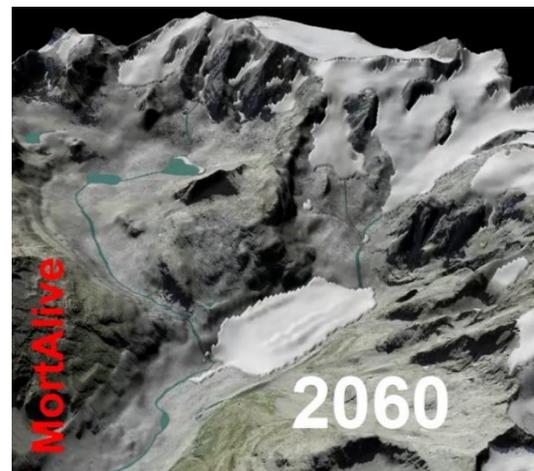
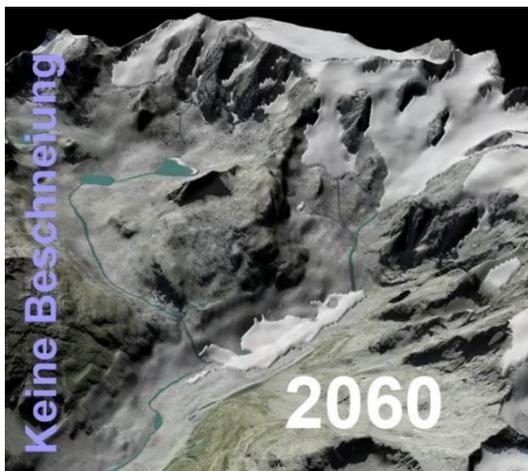


Graubündner Kantonalbank gkb2020#

Morteratschgletscher 2020-2060

**Klimaszenarien und Gletscherentwicklung
(Aus dem Projekt «VR Glacier Experience» als
Ergänzung zur Vorstudie MortAlive)**



Projektausführung:

Dr. Matthias Huss (Glaziologe, Leiter GLAMOS, Universität Fribourg),

Msc Enrico Mattea (Glaziologe, Universität Fribourg),

Dr. Andreas Linsbauer (Glaziologe, Universität Fribourg),

Prof. Dr. Martin Hoelzle (Glaziologe, Universität Fribourg)

Departement für Geowissenschaften, Universität Fribourg, 1700 Fribourg

Zusammenfassung

Die Vorstudie MortAlive zuhanden der Graubündner Kantonalbank (Keller et al., 2021) gibt einen umfassenden Überblick über die technologische Machbarkeit, die Risiken und die rechtlichen Aspekte der Implementierung einer künstlicher Beschneigung am Morteratschgletscher. Im vorliegenden Bericht der Universität Fribourg werden die Effekte der prognostizierten Klimaänderungen, sowie Auswirkungen von MortAlive auf die langfristige Entwicklung des ganzen Gletschers und dessen Abfluss untersucht. Er basiert auf detaillierten glaziologischen Untersuchungen, welche sich auf die von der GKB finanzierten Arbeiten im Zusammenhang mit der VR Glacier Experience (<https://glacierexperience.com>) im Besucherzentrum Diavolezza stützen.

Im Vergleich zur bisherigen glaziologischen Machbarkeits-Studie durch Oerlemans et al. (2017) sind heute deutlich umfassendere Datensätze vorhanden. Zusätzlich wurden die aktuellen Klimaszenarien für die Schweizer Alpen verwendet (CH2018). Die Berechnungen basieren auf einem detaillierten, räumlich verteilten Gletschermodell, das alle relevanten Prozesse (Massenbilanz, Gletscher-Vorstoss/Rückgang, Abfluss) berücksichtigt und besonderen Fokus auf den Effekt der künstlichen Beschneigung (basierend auf dem heutigen Forschungsstand zur Effizienz der Schneiseile) auf Gletscherentwicklung und Abfluss legt. Untersucht wird die Bandbreite zwischen der optimalen Klimaentwicklung (starker Klimaschutz) und einem Worst-Case Szenario (kein Klimaschutz), sowie der Unsicherheit der einzelnen Klimamodelle bis ins Jahr 2060.

MortAlive hat einen eindeutigen, positiven Effekt auf den Gletscherrückgang und die Technologie zur Schneeproduktion ist über die gesamte Projektdauer (ca. 2030-2060) anwendbar, falls ein künstlicher Speichersee bereitsteht. Das gemäss Vorstudie MortAlive dimensionierte Projekt reicht allerdings unter *keiner* der möglichen Klimaentwicklungen aus, um den Gletscher als Ganzes zu stabilisieren. Ein massiver Eis-Volumenverlust tritt gemäss den Modell-Rechnungen auch mit künstlicher Beschneigung ein (–35-52% bis 2060 gegenüber 2020). Dies führt zur Bildung eines Toteisblocks im beschneiten Bereich, während sich das aktive Gletscherende weiter zurückzieht. Stark vereinfachte Betrachtungen zur finanziellen Effizienz der geplanten, künstlichen Beschneigung deuten an, dass mit Kosten von rund 2 CHF pro Kubikmeter «gerettetem» Eis gerechnet werden muss.

Künstliche Beschneigung äussert sich ab ca. 2050 durch leicht erhöhte Abfluss-Mengen. Der positive Effekt auf den Abfluss ist aber gering (+2-4%, je nach Periode). Die Aussage ist robust, da sie kaum von der unsicheren Klimaentwicklung abhängt. Schon wenige Kilometer talabwärts dürfte der Effekt neben den anderen Komponenten des Abflusses (Schneesmelze, Regen, Grundwasser) nicht mehr messbar sein.

Während die Technologie zur Schneeproduktion ein grosses Potential hat, zeigt die aktuelle ergänzende glaziologische Machbarkeitsstudie eindeutig auf, dass eine Umsetzung von MortAlive den Morteratschgletscher auch unter der günstigsten Klimaentwicklung nicht stabilisieren könnte. Die positive Auswirkung auf das Eisvolumen und (in geringerem Ausmass) auf den Abfluss ist relativ gering.

1. Einleitung und Kontext

Das Gletscherschutzprojekt MortAlive setzt sich zum Ziel Methoden zu entwickeln, um durch künstliche Beschneigung den Rückgang von Gletschern deutlich zu verlangsamen. Damit soll unter anderem ein wichtiger Süswasserspeicher erhalten werden, um zukünftige Dürreperioden abschwächen zu können (www.mortalive.ch). Die Vorstudie MortAlive (Keller et al., 2021) will «eine Planungsarbeit für die möglicherweise weltweit erste grossangelegte Pflege eines Gletschers zum Erhalt eines Süswasserspeichers» erreichen und konzentriert sich auf die Umsetzung am Morteratschgletscher im Engadin. Klimaszenarien über das 21. Jahrhundert und deren Einfluss auf Gletscherrückgang und Abfluss – sowohl ohne künstlichen Eingriff, wie auch mit der Installation von MortAlive – bilden deshalb eine zentrale Grundlage, um mögliche Investitionen in Bezug zum Gletschervolumen zu setzen, das gerettet werden könnte.

Der aktuelle ergänzende Bericht zur Vorstudie MortAlive stützt sich auf das durch die GKB finanzierte Virtual Reality Projekt ([VR Glacier Experience](#)), welches seit Oktober 2020 an der Diavolezza Talstation der Öffentlichkeit zugänglich ist. Im Rahmen dieses Projekts hat die Universität Fribourg massgebliche Arbeiten zur Berechnung von zukünftigen Gletscherveränderungen unter den aktuellsten Klimaszenarien gemacht. Ebenfalls wurde die Effizienz der im Rahmen von MortAlive geplanten Beschneigungsanlagen, wie deren Effekt auf die Hydrologie untersucht. Dabei kamen modernste und wissenschaftlich publizierte Berechnungsverfahren zum Einsatz.

Unser Bericht lehnt sich eng an die Vorstudie MortAlive (Keller et al., 2021) an, welche umfassende Einblicke in verschiedene Aspekte der Machbarkeit des MortAlive Projekts gibt. Die vorliegende Arbeit versteht sich als eine Ergänzung und Erweiterung dieser Studie, mit einem Fokus auf den Effekt der Beschneigung auf den gesamten Morteratschgletscher und die Hydrologie *unter zukünftigen Klimabedingungen*. Sie beschreibt deshalb den Netto-Effekt von MortAlive – und damit den möglichen Gewinn für Mensch und Umwelt im Fall einer konkreten Umsetzung – welcher unter verschiedenen Entwicklungen des Klimas zu erwarten ist. Damit stellt unser Bericht eine Erweiterung der bisherigen glaziologischen Machbarkeits-Studie (Oerlemans et al., 2017) zum MortAlive Projekt dar. Dank verschiedener neuer Datensätzen, sowie auch detaillierteren, räumlichen Rechen-Modellen lassen sich nun fundiertere Aussagen über die zukünftige Gletscherentwicklung machen. Zusätzlich werden hier Klimaszenarien verwendet, welche als die aktuelle Referenz in der Schweizer Klimaforschung gelten (CH2018, 2018), während in der bisherigen Studie von Oerlemans et al. (2017) stark vereinfachte und relativ optimistische Annahmen zum künftigen Klima getroffen wurden. Die Studie wurde in enger Zusammenarbeit und in direktem Austausch mit dem MortAlive Projekt ausgeführt.

2. Datengrundlage

2.1. Gletscher-Daten

Langjährige Gletscherbeobachtung hat zu ausserordentlich vollständigen Datensätzen auf dem Morteratschgletscher geführt. Seit 1878 wird jährlich der Rückgang der Gletscherzunge bestimmt (Abb. 1). Gletscher-Inventare dokumentieren die langfristige Veränderung der Eisfläche (Abb. 2). Für die Schweiz sind vollständige Inventare für 1850, 1973, 2003, 2010 und 2016 vorhanden (z.B. Paul et al., 2011; Fischer et al., 2014). Das neuste Inventar gibt die Ausdehnung des Morteratsch- und Persgletschers für das Jahr 2015 wieder und zeigt auch die von Schutt bedeckten Bereiche (Linsbauer et al., im Druck). Damit stellt es eine wichtige Grundlage für die Berechnung der aktuellen Gletschermassenbilanz und der künftigen

Gletscherveränderung dar (z.B. Haeberli&Hoelzle, 1995; Hoelzle et al., 2003). Zusätzlich sind nun sehr detaillierte Daten zur Gletscherbett-Topographie verfügbar (Abb. 2). Diese basieren auf flächendeckenden Messungen der Eisdicke mittels Georadar und der räumlichen Interpolation mithilfe verschiedener Verfahren (Grab et al., 2021).

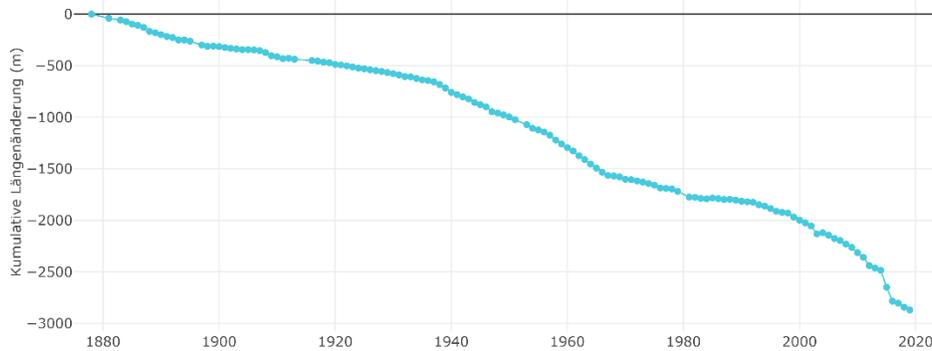


Abb. 1: Gemessene, kumulative Längenänderung des Morteratschgletschers (GLAMOS, 1881-2020).

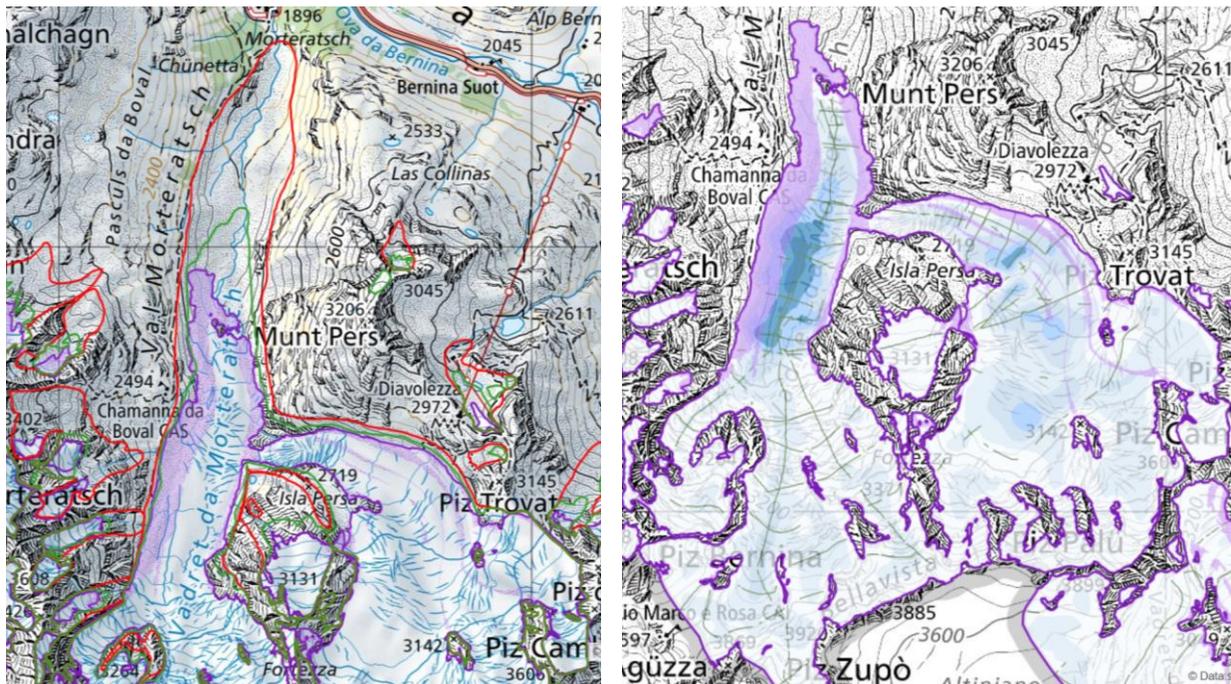


Abb. 2: (links) Beobachteter Rückgang des Morteratschgletschers basierend auf den Gletscher-Inventaren von 1850 (rot), 1973 (grün) und 2015 (violett; Linsbauer et al., im Druck). (rechts) Gletscherbett-Topographie bestimmt aus Interpolation von Messungen mit Georadar entlang von Profilen (grüne Linien; Grab et al., 2021).

Für den ganzen Morteratschgletscher sind Höhenmodelle aus den Jahren 1875, 1935, 1955, 1985, 2008 und 2015 vorhanden (Bauder et al., 2007). Diese basieren auf alten Karten und ab 1955 auf der photogrammetrischen Auswertung von Luftbildern durch die ETH Zürich und swisstopo, und ermöglichen eine Bestimmung des Eisvolumen-Verlustes über lange Zeiträume. Diese Daten stellen die beste Grundlage dar, um Rechen-Modelle für die Massenbilanz und den Abfluss zu eichen. Zwischen 1935 und 2015 hat der Morteratschgletscher zum Beispiel über 0.8 Kubikkilometer an Eis verloren; dies entspricht etwa dem heute (2020) noch verbleibenden Eisvolumen. Seit 1850 gingen sogar über zwei Drittel des Eises verloren.

Seit den 1950er Jahren gibt es am Morteratsch direkte Messungen der Schneeakkumulation und Eisschmelze an einzelnen Messpegeln. Früher wurden diese teils mit dem Fernrohr oder in einem Bohrkern erhoben (GLAMOS, 2020, für eine Zusammenstellung). Ab 1995 ist eine detaillierte Messreihe von J. Oerlemans an einigen Punkten vorhanden (z.B. Oerlemans et al., 2009). Ab 2001 kommt ein relativ umfangreiches Messnetz der Universität Brüssel dazu (Zekollari&Huybrechts, 2018). Dieses deckt allerdings nur Teile des Ablationsgebietes von Morteratsch- und Persgletscher ab. Seit 2019 hat die Universität Fribourg im Rahmen von GLAMOS (Glacier Monitoring Switzerland) ein umfangreiches Programm auf dem Persgletscher gestartet, bei dem Schneehöhe im Winter und Schmelze im Herbst an rund 15 Messpegeln bestimmt werden. Die Daten sind wichtig, um Rechen-Modelle für die Akkumulation und Schmelze lokal zu eichen. Nur korrekt kalibrierte Modelle können Gletscherveränderung und Abflussraten richtig wiedergeben und auch in die Zukunft projizieren.

2.2. Klimaszenarien

Das CH2018 Projekt (CH2018, 2018), das von MeteoSchweiz geleitet wurde, ist die aktuelle Referenz für das zukünftige Klima in der Schweiz. In dieser Studie wurden die Resultate von rund 70 regionalen Klimamodellen für Europa mit statistischen Methoden für alle Regionen der Schweiz heruntergerechnet – eine wissenschaftlich anerkannte Methode, um lokale Vorhersagen des Klimas zu liefern. Dabei wird von drei verschiedenen Entwicklungen der globalen Gesellschaft und der CO₂-Emissionen ausgegangen: RCP2.6 ist ein Szenario, welches von einer sehr schnellen und weltweiten Umsetzung der Klimaschutzziele ausgeht, welche ungefähr dem Pariser Abkommen von 2015 entsprechen. In der Folge wird dieses Szenario als **Best-Case Szenario** bezeichnet. Demnach müsste die Welt in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts CO₂-neutral sein. Dieses Ziel ist sehr ambitioniert und könnte nur mit schnellem, global koordiniertem Handeln erreicht werden. RCP4.5 ist ein mittleres Szenario, welches zwar von deutlichen Reduktionen der Emissionen ausgeht, jedoch keine vollständige CO₂-Neutralität erreicht. Dieses Szenario könnte unter den aktuellen politischen Umständen als eine relativ wahrscheinliche Entwicklung betrachtet werden. RCP8.5 ist ein Extremszenario, bei dem die Emissionen nur durch Verfügbarkeit von Öl und Kohle limitiert sind. In der Folge wird dieses Szenario als **Worst-Case Szenario** bezeichnet.

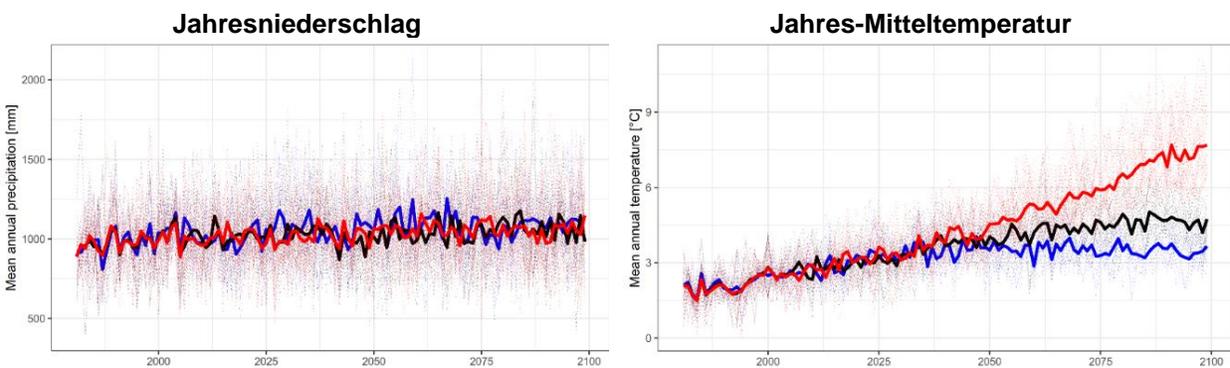


Abb. 3: Entwicklung von (links) jährlicher Niederschlagsmenge und (rechts) jährlicher Mitteltemperatur in der Nähe des Morteratschgletschers gemäss regionaler Klimamodelle (CH2018, 2018) für ein Szenario mit geringen CO₂-Emissionen (blau, Best-Case), mittleren CO₂-Emissionen (schwarz, RC4.5), sowie keinen massgeblichen Massnahmen zur Eindämmung der CO₂-Emissionen (rot, Worst-Case).

Abbildung 3 zeigt die Entwicklung von Niederschlag und Temperatur für das Oberengadin basierend auf dem Mittel der jeweiligen Modelle für die drei Szenarien. Es wird deutlich, dass es keine massgeblichen Veränderungen des Niederschlags gibt. Die Temperaturen hingegen steigen deutlich und erreichen im Vergleich mit 1980-2000 zwischen 1.5 und 5 Grad höhere Werte bis zum Ende des Jahrhunderts. Der Anstieg der Sommer-Temperatur, welcher für die Gletscher-Schmelze relevant ist, ist noch grösser.

3. Methoden

3.1. Gletschermodell GERM

Das Glacier Evolution Runoff Model (GERM) wurde vor 15 Jahren an der ETH Zürich entwickelt (z.B. Huss et al., 2008, 2010a, 2010b; Farinotti et al., 2012) und kam seither neben wissenschaftlichen Studien auch in mehreren angewandten Projekten im Zusammenhang mit der Wasserkraftnutzung zum Einsatz. Der Fokus des Modells ist die Entwicklung von Gletschern und ihres Abflusses in Zukunft zu bestimmen. Das Modell beschreibt alle Prozesse der Gletscher-Massenbilanz und des Wasserhaushaltes in hochalpinen Einzugsgebieten und ist deshalb gut geeignet, um den Effekt der künstlichen Beschneigung auf die künftige Gletscher-Entwicklung auszuloten. GERM berechnet Schnee-Akkumulation und Schnee-/Eis-Schmelze auf einem räumlichen Gitter (25 m) in einem hydrologischen Einzugsgebiet. Die komplexe räumliche Verteilung der Schneehöhe wird durch ein statistisches Modell beschrieben, während die Schmelze durch drei verschiedene Ansätze berechnet wird: Ein verteiltes Temperatur-Index Modell (Hock, 1999), ein vereinfachtes Energie-Bilanzmodell (Oerlemans, 2001) und ein komplettes, verteiltes Energiebilanz-Modell (Huss, 2019, unpubliziert). Das Modell wird durch tägliche Daten angetrieben (Temperatur, Niederschlag; sowie kurzwellige Strahlung, Windgeschwindigkeit, relative Feuchtigkeit und Luftdruck im Fall des kompletten Energie-Bilanzmodells). Diese stammen von den MeteoSchweiz-Messstationen Corvatsch und Sils-Maria (für lange Zeiträume). Schmelzwasser, sowie flüssiger Niederschlag infiltriert in ein System von Wasserspeichern mit unterschiedlichen Reaktionszeiten. Diese bilden die Reaktion des Oberflächen- und Grundwasserabflusses ab und erlauben es die zeitliche Dynamik des Gebietsabflusses zu bestimmen (Farinotti et al., 2012). Die Veränderung der Gletscher-Form (Oberflächenhöhe, Vorstoss / Rückgang) wird mit einer Parametrisierung bestimmt, deren Resultate sehr gut mit komplexen dreidimensionalen Gletscher-Fliessmodellen übereinstimmen (Huss et al., 2010b).

4.2. Weiterentwicklung am Morteratschgletscher

Im Rahmen des aktuellen Berichts wurden an der Universität Fribourg massgebliche Weiterentwicklungen des Modells vorangetrieben. Diese betreffen zum Beispiel eines der weltweit ersten räumlichen Berechnungs-Verfahren, um die Entwicklung der natürlichen Schuttbedeckung auf dem Eis und ihren Effekt auf die Schmelze zu beschreiben. Viel Arbeit wurde investiert, um den Effekt der künstlichen Beschneigung auf die Gletscher-Entwicklung und den Abfluss im Detail analysieren zu können. Gemäss den aktuell noch erarbeiteten, technischen Vorgaben zur Dimensionierung und Effizienz der Schneiseile bei verschiedenen Temperaturen (InnoSuisse, 2019-2022), sowie der beschneiten Fläche wurde ein detailliertes Teilmodell implementiert, welches die täglich mögliche Schneeproduktion berechnet. Dabei werden Wetterdaten in Vergangenheit und Zukunft mit Stunden-Auflösung herangezogen. Die für die Beschneigung verfügbare Wassermenge leitet sich aus dem direkt anfallenden Schmelz- und Regenwasser im Einzugsgebiet des möglichen Speichersees oberhalb der Isla Pers ab, sowie aus Bezügen aus dem Speichersee, falls dieser Wasser enthält. Die Dimensionierung des Speichersees entspricht den Untersuchungen im Rahmen der Vorstudie MortAlive (Keller et al., 2021). Die verschneite Schneemenge wird der Gletscher-Massenbilanz im beschneiten Bereich zugerechnet und erhöht die Oberflächen-Albedo lokal. Die Implementierung sowie die Resultate für das heutige Klima decken sich weitgehend mit dem detaillierten anderen, in der Vorstudie MortAlive angewendeten Modell (COSIPY; Sauter et al., 2020), was die Anwendbarkeit der Methode auf zukünftige Klimabedingungen stützt.

4.3. Kalibrierung und Überprüfung des Modells

GERM wird primär mit der gemessenen Veränderung des Eisvolumens kalibriert, da diese Variable die langfristige Veränderung Gletschermassenbilanz am genauesten beschreibt, und damit auch sicherstellt, dass Abflussmengen richtig modelliert werden. Abbildung 4 visualisiert den durch GERM berechneten Gletscherrückgang über die letzten 150 Jahre. Dieser stimmt in zeitlicher und räumlicher Dimension sehr genau mit den Beobachtungen überein (siehe Abb. 2). Das Modell wurde mit verschiedenen unabhängigen Messvariablen validiert, also mit Daten, die nicht zur Kalibrierung von GERM herangezogen wurden: Der berechnete Rückgang der Gletscherzunge wurde zum Beispiel mit Beobachtungen seit Ende des 19. Jahrhunderts verglichen. Gewisse zwischenzeitliche Abweichungen können auf lokale Prozesse am Gletscherende (z.B. Schuttbedeckung) zurückgeführt werden, wie auch auf die Unsicherheit der Messungen selbst. Die langfristige Übereinstimmung ist aber gut. Zusätzlich wurden die GERM Resultate mit über 30-jährigen Messungen der Massenbilanz an einzelnen Eis-Pegeln, sowie jährlichen und monatlichen Abflussmengen des Rosegbachs (Pontresina) verglichen. Obwohl das Modell nicht alle Variabilität der Einzeljahre erfassen kann, zeigt sich eine gute Übereinstimmung über das ganze letzte Jahrhundert. Dies erlaubt es, das Modell für Gletscher-Massenbilanz, Abfluss und Gletscher-Rückgang bis zum Jahr 2100, mit starkem erwarteten Klimawandel anzuwenden.

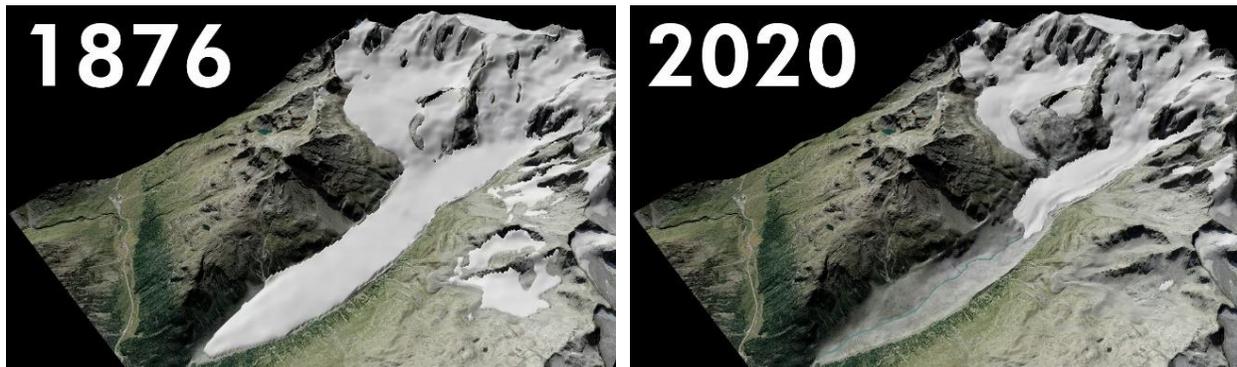


Abb. 4: Mit GERM berechneter Rückgang des Morteratschgletschers über die letzten 150 Jahre.

4. Resultate

4.1. Gletscherrückgang und Visualisierung

Mit der gemessenen Gletscher-Ausdehnung und Eisdicke von 2015 wurde das in der Vergangenheit für den Morteratschgletscher kalibrierte Modell bis ins Jahr 2100 mit den Resultaten von allen 69 Klima-Modellen auf Tagesbasis angetrieben. Hier wird nur auf den Zeithorizont 2060 eingegangen, da die Veränderungen des Klimas ab diesem Zeitpunkt aktuell noch kaum mit Sicherheit prognostiziert werden können (Einfluss globaler politischer Entscheidungen bzgl. Klimaschutz, Unsicherheit der Klimamodelle).

In einem ersten Modell-Lauf wurde kein künstlicher Eingriff vorgegeben (**keine Beschneigung**). In einem anderen Modell-Lauf wurde eine Implementierung des Gletscherschutz-Projektes MortAlive mit einem Speichersee oberhalb der Isla Pers ab 2021 modelliert (**MortAlive**). Diese Berechnung ist etwas zu optimistisch, da eine Umsetzung in Realität nicht vor 2031 stattfinden könnte (Keller et al., 2021), während zwischen 2020 und 2030 weitere, starke Verluste des Gletschers zu erwarten sind. Die Berechnungen wurden mit dem verteilten Temperatur-Index Modell (Hock, 1999) durchgeführt, welches die robustesten Resultate liefert. Ein Vergleich mit den beiden Energiebilanz-Modellen zeigt allerdings, dass der Einfluss der Modellwahl auf die Resultate vernachlässigbar ist. Die berechneten Unterschiede im Eisvolumen liegen mit gleichen Klimavorgaben innerhalb 2% über das ganze Jahrhundert.

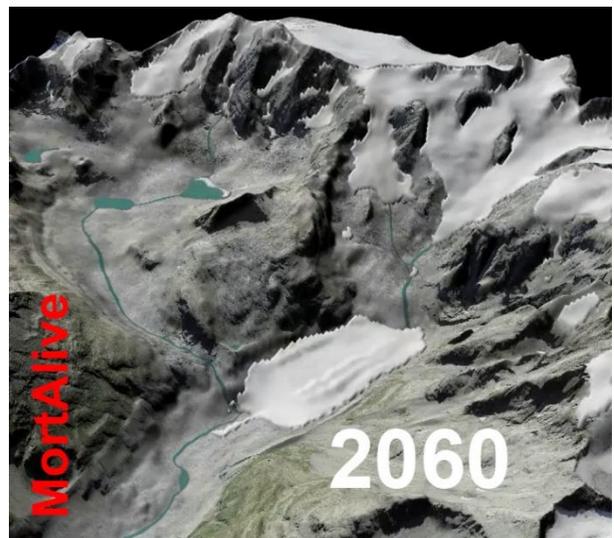
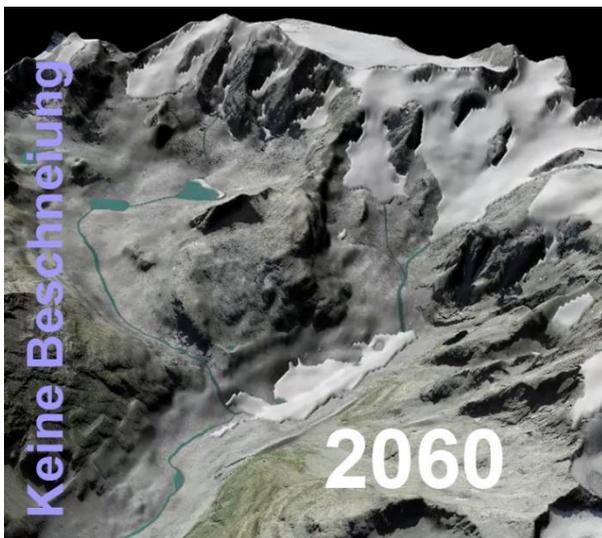
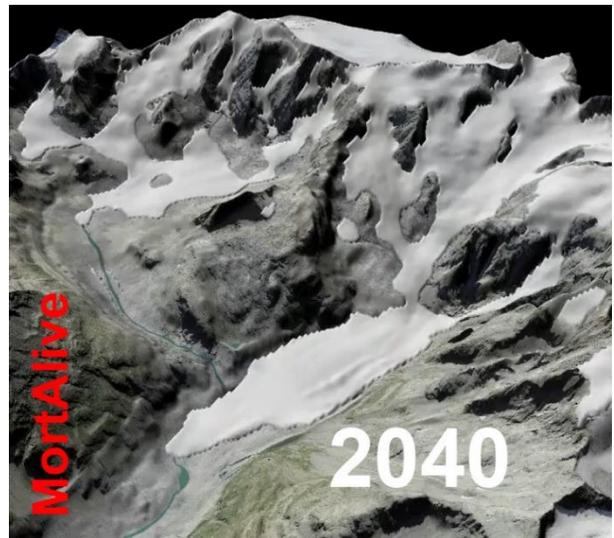
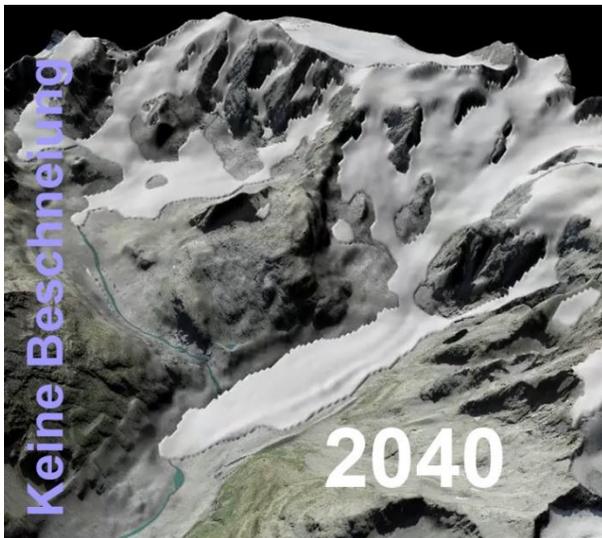
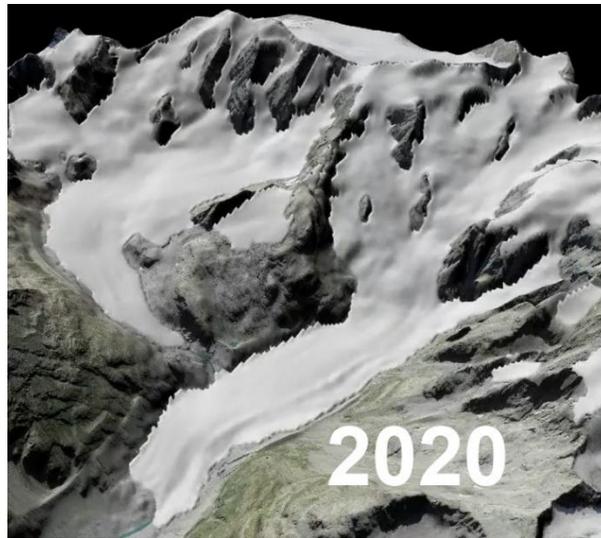


Abb. 5: Visualisierung der Entwicklung des Morteratschgläubers zwischen 2020 und 2060 ohne künstliche Beschneigung (links) und mit künstlicher Beschneigung (rechts, MortAlive) gemäss dem mittleren Szenario (RCP4.5).

In den nächsten Jahrzehnten ist ein weiterer, massiver Rückgang des Morteratschgletschers zu erwarten (Abb. 5). Während sich der dünnere Persgletscher schon in 20 Jahren bis auf die Höhe der Diavolezza zurückgezogen haben könnte, bleibt die dicke und teils heute schon durch Schutt natürlich geschützte Eis der Morteratsch-Zunge auch ohne künstliche Beschneigung noch relativ lange intakt, obwohl es immer dünner wird. Dabei versiegen die Zuflüsse von Eis aus den höheren Regionen allmählich und ab ca. 2050 ist (gemäss allen Klimaszenarien) damit zu rechnen, dass die Verbindung zwischen der Gipfelvergletscherung und der Gletscherzunge im Tal abreist (siehe Abb. 5) – eine ganz ähnliche Situation, wie in den letzten 20 Jahren beim benachbarten Roseggletscher beobachtet werden konnte.

Abbildung 5 macht deutlich, dass MortAlive einen Einfluss auf die Gletscherentwicklung hat, den Rückgang aber nicht aufhalten kann. Während im Jahr 2040 der beschneite Bereich etwas dicker und breiter als ohne Schutz ist, befindet sich das natürliche Toteis der Gletscherzunge im Jahr 2060 in Auflösung, während es mit MortAlive noch eine relativ grosse und zusammenhängende Eismasse darstellt. Dennoch erhält dieser Eisblock keinen Eis-Nachschub von oben mehr und ist daher vollständig von der Beschneigung abhängig.

Die dreidimensionale Visualisierung der Resultate von GERM bzgl. des vergangenen und zukünftigen Rückgangs des Morteratschgletschers – mit und ohne künstlicher Beschneigung – hat einen grossen Wert in der Verdeutlichung der zu erwartenden Veränderungen, und macht diese auch für den Laien greifbar. Am eindrücklichsten sind diese in der VR Glacier Experience im Besucherzentrum Diavolezza zu erleben. Animierte Darstellungen sind auch direkt online abrufbar:

Gletscher-Rückgang 1875-2100 OHNE Beschneigung: <https://tube.switch.ch/videos/b3a35d82>

Gletscher-Rückgang 1875-2100 MIT MortAlive: <https://tube.switch.ch/videos/3c49e687>

4.2. Schneeproduktion im Klima des 21. Jahrhunderts

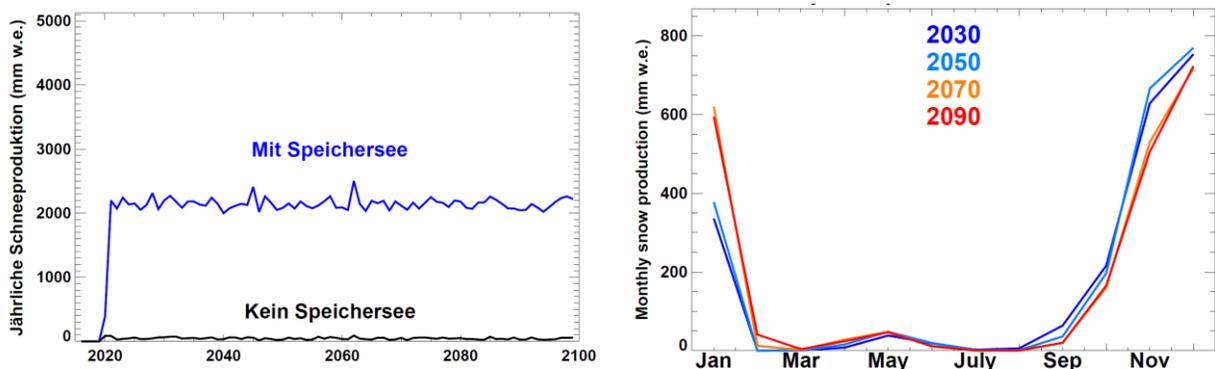


Abb. 6: (links) Produzierbare Schneemenge unter zukünftigem Klima (mittleres Klimaszenario, RCP4.5) mit und ohne Speichersee. (rechts) Schneeproduktion in den einzelnen Monaten des Jahres mit Speichersee als 10-jähriges Mittel um die Jahre 2030, 2050, 2070 und 2090.

Es stellt sich die Frage, ob auch in einem deutlich wärmeren Klima, das in Zukunft erwartet wird, noch genügend Schnee mit der entwickelten Anlage produziert werden könnte. Die Analyse in der Vorstudie MortAlive zeigt, dass unter dem aktuellen Klima der beschneite Bereich ganzjährig schneebedeckt gehalten werden kann (Keller et al., 2021) – ein Resultat, dass sich mit der Untersuchung mit dem hier verwendeten Modell deckt. Zusätzlich wurde im aktuellen Bericht die Schneeproduktion über das ganze Jahrhundert analysiert (Abb. 6). Es wird deutlich, dass die produzierbare Schneemenge auch in Zukunft kaum abnehmen würde, da das im Speichersee aufgefangene Wasser in den nach wie vor kalten Wintermonaten in Schnee transformiert werden kann. Interessant ist, dass *ohne* künstlichen Speichersee

in naher und mittlerer Zukunft praktisch kein Schnee produziert werden kann: Zu der Zeit, in der das Schmelzwasser auf der entsprechenden Höhe anfällt, ist es zu warm. Schnee produziert werden kann vor allem in den Monaten November bis Januar (Abb. 6). Gegen Ende des Jahrhunderts nehmen die produzierbaren Mengen im Spätherbst ab, steigen dafür im Januar an (höherer Füllstand des Speichersees). Chancen könnten sich ab ca. 2060 mit der Bildung eines grossen, natürlichen Sees unter dem Piz Palü ergeben (Abb. 5) – dies liegt allerdings jenseits des Planungsintervalls (2030-2060) für die Implementierung des Projekts MortAlive.

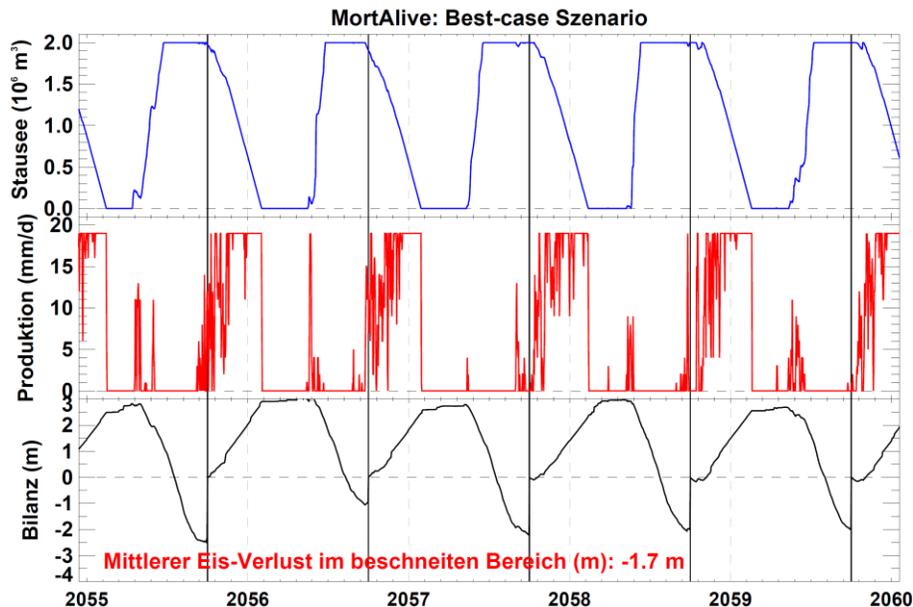


Abb. 7: Modellierter Füllstand des Reservoirs (oben), tägliche Schneeproduktion (Mitte) und jährlich kumulierte Massenbilanz des Gletschers im beschneiten Bereich zwischen 2055 und 2060. Dargestellt sind Resultate für das Best-Case Szenario (RCP2.6). Um 2060 sind die Differenzen zu den anderen Szenarien aber relativ gering.

Auch im Jahr 2060, also unter deutlich wärmeren Klimabedingungen und mit einem kleineren Gletscher, kann der Speichersee unter allen Klimaentwicklungen während der Sommermonate (Schneesmelze und Regen) ohne Probleme gefüllt werden (Abb. 7). Allerdings zeigt sich, dass – entgegen der Situation heute (Resultate des COSIPY-Modells; siehe Vorstudie MortAlive) – die produzierte Schneemenge nicht mehr ausreicht, um den Gletscher ganzjährig schneebedeckt zu halten. Pro Jahr gehen im beschneiten Bereich um 2060 auch unter der günstigsten Klimaentwicklung (starker Klimaschutz) jährlich rund 1.5 Meter an Eisdicke verloren (Abb. 7). Dieser Wert liegt fürs Worst-Case Szenario bei über 2 Metern pro Jahr – die Differenz vergrössert sich bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich, falls sich keine neuen Wasserspeicher erschliessen lassen.

4.3. Effekt von MortAlive auf das Eisvolumen

Abbildung 8 zeigt den Netto-Effekt der Beschneigung auf die Entwicklung des Eisvolumens des Morteratschgletschers (der Persgletscher, wo keine Beschneigung stattfindet, ist ausgenommen) für die günstigste und ungünstigste Klimaentwicklung (RCP2.6 und RCP8.5). Die Beschneigung reduziert die Geschwindigkeit des Verlustes eindeutig, kann ihn allerdings nicht aufhalten. Ohne Eingriff wird erwartet, dass der Morteratschgletscher in den nächsten 40 Jahren zwischen 56% und 71% seines Volumens verliert. Bis 2060 (mit theoretischer Implementierung von MortAlive schon um 2021) kann gut ein Drittel bis ein Viertel dieses Verlustes aufgehalten werden. In absoluten Zahlen entspricht dies einem verhinderten

Volumenverlust von rund 80 Millionen m³. Die Abhängigkeit von der Klimaentwicklung ist für diesen Wert gering (Abb. 8). Wenn man den insgesamt verhinderten Eisverlust in Bezug zu den Gesamt-Kosten des Projektes von rund 156 Millionen CHF (nur Bau, kein Betrieb) gemäss der Vorstudie MortAlive (Keller et al., 2021) setzt, lässt sich der nötige finanzielle Aufwand grob bestimmen, um 1 Kubikmeter Gletscher-Eis durch Beschneigung zu «retten». Dieser liegt bei rund 2 CHF pro m³ und zeigt praktisch keine Abhängigkeit von der effektiven Klimaentwicklung. Der Wert kann also als robust bezeichnet werden. Diese Schätzung macht keinerlei Aussagen zur Wirtschaftlichkeit; dies müsste verschiedene ökonomische Kriterien berücksichtigen. Um die Kosten von durch Beschneigung «gerettetem» Gletscher-Eis einordnen zu können, bietet sich ein Vergleich zur Anwendung von weissen Geotextilien an, einer in der Schweiz seit Jahren lokal eingesetzten Technik zur Reduktion der Eisschmelze (Huss et al., 2021). Für einen vergleichbaren Fall am Rhonegletscher (abgedeckte Fläche 0.05 km²) wurde ein Aufwand von ca. 0.6 CHF pro m³ bestimmt (Huss et al., 2021). Eine Geotextil-Abdeckung dürfte am Morteratschgletscher aufgrund der schlechten Umweltverträglichkeit keine Alternative sein, obwohl sie technisch wahrscheinlich möglich wäre.

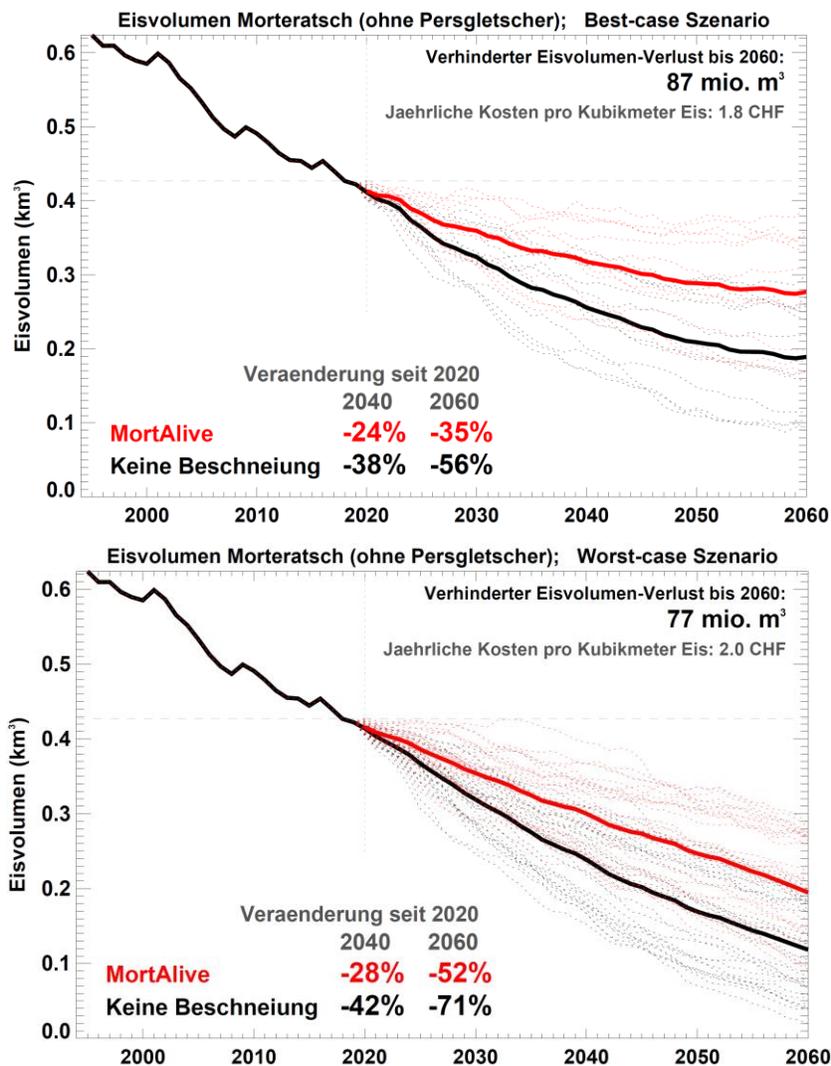


Abb. 8: Effekt der Beschneigung auf die Entwicklung des Gletschervolumens des Morteratschgletschers (ohne den Persgletscher) gemäss dem Best-Case Szenario (oben) und dem Worst-Case Szenario (unten). Die Entwicklung in der Vergangenheit ist seit 1995 gezeigt. Modellresultate für die Zukunft basieren auf dem Mittel aller einzelnen CH2018-Szenarien (dünne Linien) für eine gegebene Entwicklung der CO₂-Emissionen. Veränderungen gegenüber 2020 sind für 2040 und 2060 ausgewertet.

4.4. Effekt von MortAlive auf den Abfluss und die Wasserverfügbarkeit

Hauptziel von MortAlive ist die Entwicklung einer Technologie, mit der es durch künstliche Beschneieung möglich ist, einen positiven Effekt auf den Gletscher-Abfluss, primär in Asien und Südamerika, zu erzielen und einen wichtigen Süsswasserspeicher zu erhalten (www.mortalive.ch). Mittels unserem Berechnungs-Modell führen wir auch für den Morteratschgletscher eine Analyse der künftigen Abfluss-Veränderung *mit* und *ohne* künstliche Beschneieung durch.

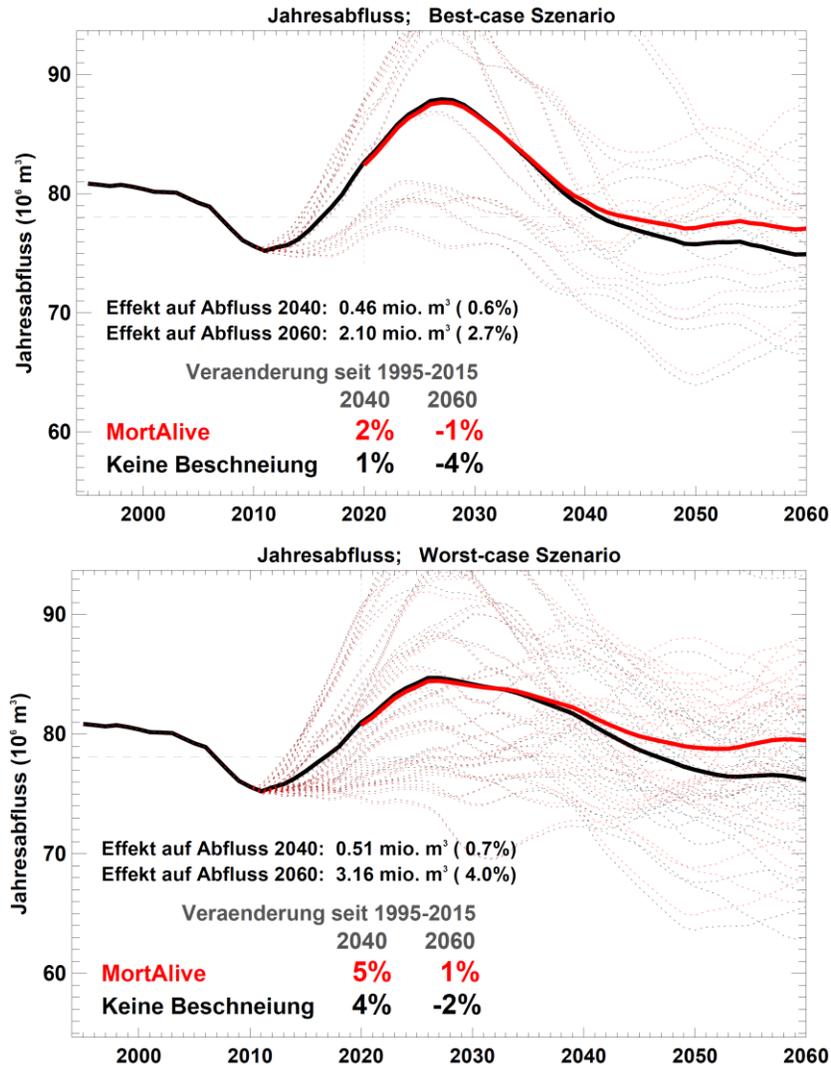


Abb. 9: Effekt der Beschneieung auf die Entwicklung des Jahresabflusses aus dem Einzugsgebiet des Morteratsch- und Persgletschers (Ova da Morteratsch auf Höhe der Station RhB) gemäss dem Best-Case Szenario (oben) und dem Worst-Case Szenario (unten). Die Entwicklung in der Vergangenheit ist seit 1995 gezeigt. Alle Linien sind geglättet, da der Abfluss starke Schwankungen von Jahr zu Jahr aufweist. Modellresultate für die Zukunft basieren auf dem Mittel aller einzelnen CH2018-Szenarien (dünne Linien) für eine gegebene Entwicklung der CO₂-Emissionen. Veränderungen gegenüber 2020 sind für 2040 und 2060 ausgewertet.

In Abbildung 9 ist die Veränderung des Jahres-Abflusses im Einzugsgebiet des Morteratsch- und Persgletschers (Ova da Morteratsch auf Höhe Station RhB) gezeigt. Auffällig ist, dass es über das ganze Jahr hinweg bis 2060 auch im Fall ohne künstliche Beschneieung zu praktisch keiner Veränderung des Abflusses kommt (Rückgang von 4%, bzw. 2% verglichen mit dem Mittel 1995-2015). Nach einer Spitze zwischen 2020 und 2030 stabilisieren sich die Abflüsse sowohl im Best-Case wie im Worst-Case Szenario.

Dies hat damit zu tun, dass der Gletscher auch in 40 Jahren noch eine ausreichende Grösse hat, durch Schmelze zusätzliches Wasser zu liefern. Der Effekt von MortAlive auf den Jahres-Abfluss beginnt sich ab ca. 2050 zu zeigen und führt im Jahr 2060 zu 3-4% grösseren Abflussmengen im ganzen Einzugsgebiet als im natürlichen Fall.

Obwohl die Jahres-Abflussmengen bis 2060 auch mit starker Klimaänderung relativ konstant bleiben (Abb. 9), ist ein deutlicher Rückgang des Abflusses in den Sommermonaten festzustellen (Abb. 10). Dieser ist vor allem im August relevant, da dann andere Zuflüsse (z.B. Schneeschmelze) gering sind und die Evapotranspiration in tiefgelegenen Gebieten hoch ist. Gletscherwasser ist daher zu dieser Zeit für die europäischen Flüsse besonders wichtig (z.B. Bewässerung, Schifffahrt; z.B. Huss, 2011). Auch für die Veränderung des August-Abflusses ist die Unsicherheit im Klimawandel bis 2060 kaum ausschlaggebend (30% Abfluss-Rückgang im Best-Case Szenario gegenüber 36% im Worst-Case Szenario). Künstliche Beschneidung äussert sich bis etwa 2050 in tieferen Abflüssen im August, da sich das Eisvolumen weniger schnell verringert. Die grössere Gletscherfläche trägt nachher zu etwas grösseren Abflussmengen bei. 2060 ist der Effekt mit 1.5% (Best-Case), bzw. 2.4% (Worst-Case) zusätzlichem August-Abfluss aber gering.

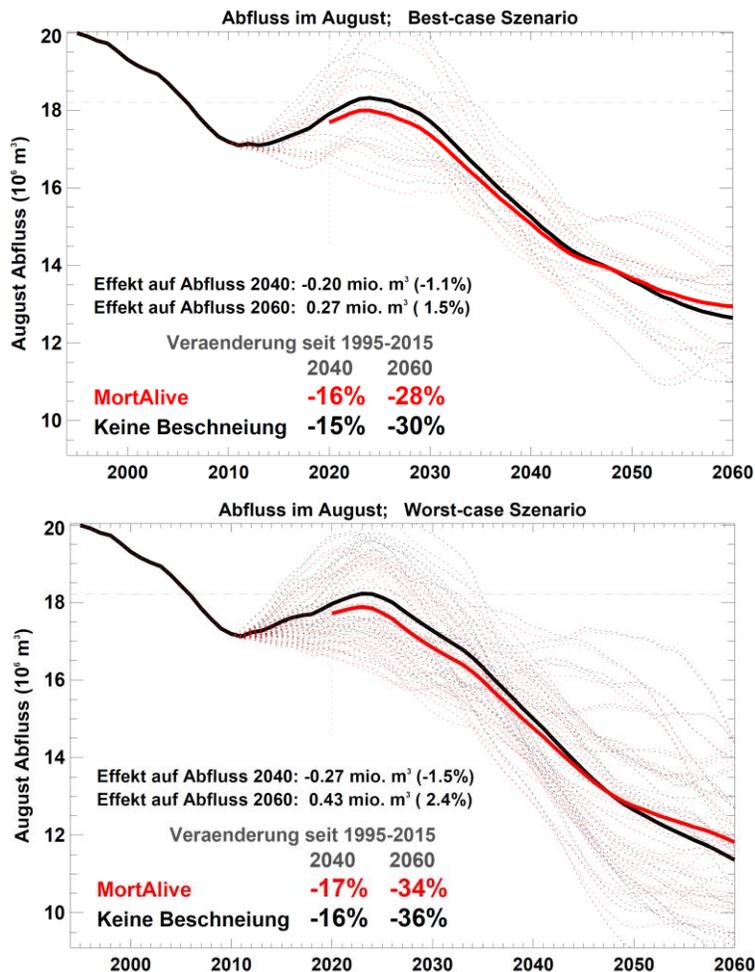


Abb. 10: Effekt der Beschneidung auf die Entwicklung des August-Abflusses aus dem Einzugsgebiet des Morteratsch- und Persgletschers gemäss dem Best-Case Szenario (oben) und dem Worst-Case Szenario (unten). Alle Linien sind geglättet, da der Abfluss starke Schwankungen von Jahr zu Jahr aufweist. Modellresultate für die Zukunft basieren auf dem Mittel aller einzelnen CH2018-Szenarien (dünne Linien) für jedes CO₂-Emissions-Szenario.

Bemerkenswert ist, dass die Unsicherheit im Netto-Effekt von künstlicher Beschneidung auf Abfluss und Eisvolumen relativ gering ist, obwohl die Klimamodelle teils stark divergierende Trends vorgeben, einerseits aufgrund der noch unbekanntem CO₂-Emissionen, andererseits aufgrund der Unsicherheit der einzelnen Modelle selbst (Abb. 8-10). Der Gewinn an Eisvolumen, bzw. Wasser-Abfluss durch eine Implementierung von MortAlive bleibt also immer ähnlich, egal wie sich das Klima ändert. Dies ist positiv, da es eine Planungssicherheit schafft, auch wenn das Klima in den Alpen um 2050 noch unbekannt ist.

Für die Einschätzung der Relevanz dieser Abflussveränderungen wurden die zusätzlich «gewonnenen» Jahres-Wasservolumina im Jahr 2060 wiederum mit den Projektkosten verglichen. Damit können Gestehungskosten (Minimal-Schätzung, da Betrieb nicht eingerechnet) zwischen 2.5 CHF pro Kubikmeter Wasser (Best-Case Klimaszenario) und 1.6 CHF pro Kubikmeter Wasser (Worst-Case Szenario) angegeben werden. Diese Zahlen verstehen sich nicht als Wirtschaftlichkeits-Berechnung, aber geben dennoch einen groben Rahmen zum Verhältnis von Kosten und Nutzen des Gletscherrettungs-Projekts in Bezug auf die künftige Verfügbarkeit von zusätzlichem Wasser.

Für die Analyse der grossräumigen hydrologischen Auswirkungen des MortAlive Projekts wurden die positiven Abflussveränderungen im Jahr 2060 mit den mittleren, gemessenen Abflüssen an zwei wichtigen Engadiner Messstellen des Bundesamts für Umwelt (BAFU) verglichen. Der Rosegbach in Pontresina (Einzugsgebietsgrösse 107 km²) ermöglicht Aussagen über Abflussmengen nahe am vergletscherten Quellgebiet, und die Abfluss-Messstation am Inn in Martina (Einzugsgebietsgrösse 1941 km²) zeigt den Effekt auf der Skala des ganzen Engadins. Tabelle 1 stellt die berechnete Abflussveränderung im Jahr 2060 in Bezug zum aktuellen Messwert des Jahres- und des August-Abflusses. Dabei zeigt sich, dass der Netto-Effekt von MortAlive auf den Gebiets-Abfluss im Jahr 2060 (ungefährer Zeitpunkt der maximalen Wirksamkeit) auch im Quellgebiet relativ gering bleibt: Sowohl Jahres- wie August-Abfluss können künstlich um 1-2% erhöht werden. Die Effizienz ist etwas besser ohne Klimaschutz. Auf Skala des ganzen Engadins, liegt der Effekt bei 0.1% bis 0.2%, ist damit also sehr klein und nicht mehr messbar (Tabelle 1).

Tabelle 1: Effekt von MortAlive auf Abflussmengen im Jahr 2060 (Best- und Worst-Case Klimaszenario) bestimmt durch Vergleich des berechneten zusätzlichen Abflusses (Abb. 9 und 10) mit heutigen Abflussmessungen an zwei BAFU Mess-Stationen (vergletschertes Quellgebiet und gesamtes Engadin).

| | Rosegbach (Pontresina) | | Inn (Martina) | |
|-----------------------|------------------------|----------------|---------------|----------------|
| | Jahresabfluss | August-Abfluss | Jahresabfluss | August-Abfluss |
| Best-Case Klima 2060 | +1.45% | +1.06% | +0.12% | +0.13% |
| Worst-Case Klima 2060 | +2.18% | +1.70% | +0.19% | +0.21% |

4.4. Potentielle Naturgefahren durch künstlichen Eingriff



Abb. 11: Proglaziale Gletscherseen und potentieller, eisgestauter Gletschersee als Folge der Beschneuerung (Modell-Resultate für das Jahr 2100 mit und ohne Implementierung von MortAlive).

Künstliche Eingriffe ins hochalpine System können eine Veränderung der Gefährdungs-Situation nach sich ziehen, die kritisch evaluiert werden muss. Der Gletscherrückgang wird zur Bildung verschiedener proglazialer Seen führen (Abb. 11; Linsbauer et al., 2012). Diese stellen im Normalfall nur eine geringe Gefährdung dar, da sie von Fels und Sediment aufgestaut werden und die Neigung im Vorfeld des Morteratschgletschers (und damit das Murgang-Potential) relativ gering ist. Bei einer Implementierung von MortAlive ist allerdings mit der Bildung eines grossen Toteisblocks zu rechnen. Zu diesem Schluss kommt auch die Vorstudie MortAlive, sowie die glaziologische Untersuchung von Oerlemans et al. (2017). Diese künstlich geschaffene Eis-Barriere könnte sich in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zu einem schwer kontrollierbaren und instabilen Staudamm entwickeln, hinter dem sich beträchtliche Wassermengen ansammeln könnten. Eisgestaute Seen stellen aktuell die häufigste Art von Gletscher-Gefahrenereignissen in der Schweiz dar (GLAMOS, 1881-2020). See-Entleerungen können jährlich auftreten und sind nicht genau vorhersehbar. Mit einem Frühwarnsystem kann das Gefahrenpotential für Touristen und die Rhätische Bahn reduziert werden, doch längere Sperrungen hätten einen schwer einschätzbaren Effekt. Im Fall einer plötzlichen Entleerung des eisgestauten Sees wäre mit Flutwellen zu rechnen. Wenn sich ein derartiger Gletschersee einmal gebildet hat, sind künstliche Massnahmen zur Eindämmung der Gefahr sehr teuer und unsicher, wie das kürzliche Beispiel vom Plaine Morte Gletscher im Berner Oberland zeigt (Ogier et al., 2021). Im Fall des Morteratschgletschers könnte mit einem zusätzlichen Schneiseil über dem potentiellen Gletschersee möglicherweise Abhilfe geschaffen werden.

5. Abschliessende Betrachtungen

Die glaziologische Ergänzung zur Vorstudie MortAlive basiert auf der von der GKB finanzierten VR Glacier Experience im Besucherzentrum Diavolezza. Sie zeigt mit modernsten Rechenmodellen und umfangreichen Datensätzen auf, wie die geplante künstliche Beschneidung die zukünftige Entwicklung des Morteratschgletschers, sowie den Wasser-Abfluss beeinflusst. Wir halten drei wichtige Aussagen fest:

1. MortAlive hat einen eindeutigen, positiven Effekt auf den Gletscherrückgang und die Technologie zur Schneeproduktion ist über die gesamte Projektdauer (ca. 2030-2060) anwendbar, falls ein künstlicher Speichersee oberhalb der Isla Pers (Kapazität ca. 2.5 mio. m³, siehe Keller et al., 2021) bereitsteht. Das gemäss Vorstudie dimensionierte Projekt reicht allerdings unter *keiner* der möglichen Klimaentwicklungen aus, um den Gletscher als Ganzes zu stabilisieren (siehe auch Vorstudie MortAlive). Ein massiver Volumenverlust (–35-52% bis 2060 gegenüber 2020) tritt gemäss den Modell-Rechnungen auch mit künstlicher Beschneidung ein. Dies führt zur Bildung eines Toteisblocks im beschneiten Bereich.
2. Eine Umsetzung des Projekt MortAlive hätte einen Einfluss auf den Abfluss aus dem Einzugsgebiet des Morteratschgletschers. Dieser äussert sich ab ca. 2050 durch leicht erhöhte Wassermengen. Die positive Beeinflussung des Abflusses ist aber sehr gering (+2-4%) und ist fast unabhängig von der Klimaentwicklung. Schon wenige Kilometer talabwärts dürfte der Effekt neben den anderen Komponenten des Abflusses (Schneesmelze, Regen, Grundwasser) nicht mehr messbar sein.
3. Aus der Bestimmung des «geretteten» Eisvolumens bis 2060 lassen sich durch Vergleich mit den nötigen Investitionen (gemäss Vorstudie MortAlive) stark vereinfachte Betrachtungen zum Preis des Erhalts von Gletschereis machen, und damit der Effizienz einer Implementierung von MortAlive. Die Kosten von rund 2 CHF pro Kubikmeter Eis sind praktisch unabhängig von Klimaentwicklung, was Planungssicherheit verschafft. Die Gestehungskosten für 1 Kubikmeter zusätzlichen Wasser-Abfluss im Jahr 2060 werden auf rund 2 CHF geschätzt. Nur eine wirtschaftliche Analyse könnte aber zeigen, inwiefern dies ökonomisch wäre.

Trotz grossem Potential der Technologie zur Schneeproduktion zeigt unsere Studie, dass eine Umsetzung von MortAlive den Morteratschgletscher auch unter der günstigsten Klimaentwicklung nicht retten könnte. Der Netto-Effekt auf zukünftiges Eisvolumen und Wasser-Abfluss ist für die Grösse der notwendigen Investition und den Eingriff in die Umwelt relativ gering.

Dr. Matthias Huss, August 2021
(Universität Fribourg, ETH Zürich, Leiter Schweizerisches Gletschermessnetz GLAMOS)



Referenzen

- Bauder, A., Funk, M. and Huss, M. (2007). Ice volume changes of selected glaciers in the Swiss Alps since the end of the 19th century. *Annals of Glaciology*, 46, 145-150.
- CH2018 (2018), CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp
- Farinotti, D., Usselman, S., Huss, M., Bauder, A. and Funk, M. (2012). Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrological Processes*, 26(13), 1909-1924, doi:10.1002/hyp.8276.
- Fischer, M., Huss, M., Barboux, C. and Hoelzle, M. (2014). The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: Relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 46(4), 933-945.
- GLAMOS (1881-2020). The Swiss Glaciers 1880-2018/19, Glaciological Reports No 1-140, Yearbooks of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences (SCNAT), published since 1964 by VAW / ETH Zurich, doi:10.18752/glrep_series.
- GLAMOS (2020). Swiss Glacier Point Mass Balance Observations, release 2020, Glacier Monitoring Switzerland. doi:10.18750/massbalance_point.r2020.2020.
- Grab, M., Mattea, E., Bauder, B., Huss, M., Rabenstein, L., Hodel, E., Linsbauer, A., Hellmann, S., Church, G., Langhammer, L., Schmid, L., Deleze, K, Schaer, P., Lathion, P., Farinotti, D., Maurer, H. (2021). Ice thickness distribution of all Swiss glaciers based on extended ground-penetrating radar data and glaciological modeling *Journal of Glaciology* 1–19.
- Haerberli, W., & Hölzle, M. (1995). Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps. *Annals of glaciology*, 21, 206-212.
- Hock, R. (1999). A distributed temperature-index ice-and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of glaciology*, 45(149), 101-111.
- Hoelzle, M., Haerberli, W., Dischl, M., & Peschke, W. (2003). Secular glacier mass balances derived from cumulative glacier length changes. *Global and Planetary Change*, 36(4), 295-306.
- Huss, M., Farinotti D., Bauder, A. and Funk, M. (2008). Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrological Processes*, 22(19), 3888-3902, doi:10.1002/hyp.7055.
- Huss, M. (2011). Present and future contribution of glaciers to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water Resources Research*, 47, W07511, doi:10.1029/2010WR010299.
- Huss, M., Usselman, S., Farinotti, D., & Bauder, A. (2010a). Glacier mass balance in the south-eastern Swiss Alps since 1900 and perspectives for the future. *Erdkunde*, 119-140.
- Huss, M., Juvet, G., Farinotti, D., and Bauder, A. (2010b). Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 815-829, doi:10.5194/hess-14-815-2010.
- Huss, M., Schwyn, U., Bauder, A., and Farinotti, D. (2021). Quantifying the overall effect of artificial glacier melt reduction in Switzerland, 2005-2019. *Cold Regions Science and Technology*, 184, 103237.
- Innosuisse/FHGR. (2019-2022). Bodenunabhängiges Beschneigungssystem. 2019-2022.
- Keller, F., Müller, D., Levy, C. & Seupel, C. (2021). Vorstudie MortAlive. Machbarkeitsstudie zuhanden der Graubündner Kantonalbank.
- Linsbauer, A., Paul, F., & Haerberli, W. (2012). Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: Application of a fast and robust approach. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3).
- Linsbauer, A., Huss, M., Hodel, E., Bauder, A., Fischer, M., Weidmann, Y. and Baertschi, H. (im Druck). The new Swiss Glacier Inventory SGI2016: From a topographic to a glaciological dataset. *Frontiers in Earth Science*.
- Oerlemans, J. (2001). *Glaciers and climate change*. CRC Press.
- Oerlemans, J., Giesen, R. H., & Van den Broeke, M. R. (2009). Retreating alpine glaciers: increased melt rates due to accumulation of dust (Vadret da Morteratsch, Switzerland). *Journal of Glaciology*, 55(192), 729-736.
- 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*, 145(1), 189-203.
- Ogier, C., Werder, M. A., Huss, M., Kull, I., Hodel, D., & Farinotti, D. (2021). Drainage of an ice-dammed lake through a supraglacial stream: hydraulics and thermodynamics. *The Cryosphere Discussions*, 1-28.
- Paul, F., Frey, H., & Le Bris, R. (2011). A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: challenges and results. *Annals of Glaciology*, 52(59), 144-152.
- Sauter, T., Arndt, A., & Schneider, C. (2020). COSIPY v1. 3—an open-source coupled snowpack and ice surface energy and mass balance model. *Geoscientific Model Development*, 13(11), 5645-5662.
- Zekollari, H., & Huybrechts, P. (2018). Statistical modelling of the surface mass-balance variability of the Morteratsch glacier, Switzerland: strong control of early melting season meteorological conditions. *Journal of Glaciology*, 64(244), 275-288.