Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 115 (2023)
Heft: 1

Artikel: Kann künstliche Beschneiung die Gletscher-Schmelze bremsen?
Autor: Huss, Matthias / Mattea, Enrico / Linsbauer, Andreas
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1043738

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 27.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Kann künstliche Beschneiung die Gletscher-Schmelze bremsen?

Matthias Huss, Enrico Mattea, Andreas Linsbauer, Martin Hoelzle

Zusammenfassung

Der Rückgang der Alpengletscher ist für die Schweizer Bevölkerung eines der sichtbarsten Signale der Klimakrise. Mit dem globalen Anstieg der Temperaturen schreitet die Eisschmelze ungebremst voran. Das ist einerseits ein Verlust für die Attraktivität des Hochgebirges, hat aber auch Konsequenzen für die künftige Wasserverfügbarkeit. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob die Schmelze durch künstliche Beschneiung reduziert werden kann. Das Projekt MortAlive setzt sich zum Ziel die Machbarkeit von grossflächiger Schneeproduktion am Beispiel des Morteratschgletschers zu evaluieren. Hier beschreiben wir die Effekte der künstlichen Beschneiung auf den künftigen Gletscherrückgang und Abfluss, basierend auf detaillierten glaziologischen Modellrechnungen. Für sämtliche Klimaszenarien deuten die Resultate auf einen massiven Rückgang des Morteratschgletschers über die nächsten Jahrzehnte hin. Obwohl Beschneiung – unter Bereitstellung eines neuen Speichersees – den Gletscherrückgang verlangsamt, kann der Gletscher dadurch unter keiner der möglichen Klimaentwicklungen stabilisiert werden. Die Auswirkung des Projektes auf die Wasserverfügbarkeit im Engadin ist gering. Die notwendigen Eingriffe in die hochalpine Umwelt und die beträchtlichen Kosten machen deutlich, dass künstliche Beschneiung von grossen Gletscherflächen keine Alternative zu schnellem und griffigem Klimaschutz sein kann.

Résumé

Le recul des glaciers alpins est l'un des signaux les plus visibles de la crise climatique pour la population suisse. Avec la hausse globale des températures, la fonte des glaces se poursuit sans relâche. D'une part, c'est une perte pour l'attractivité de la haute montagne, mais cela entraîne aussi des conséquences sur la disponibilité future en eau. Dans ce contexte, la question se pose de savoir si la fonte peut être réduite par l'enneigement artificiel. Le projet MortAlive vise à évaluer la faisabilité d'une production de neige à grande échelle en prenant l'exemple du glacier de Morteratsch. Nous décrivons ici les effets de l'enneigement artificiel sur le recul futur des glaciers et l'écoulement des eaux sur la base de modélisations glaciologiques détaillées. Pour tous les scénarios climatiques, les résultats indiquent un recul massif du glacier de Morteratsch au cours des prochaines décennies. Bien que l'enneigement artificiel – avec mise à disposition d'un nouveau lac d'accumulation – ralentisse le recul du glacier, celui-ci ne peut être stabilisé sous aucune des évolutions climatiques possibles. L'impact du projet sur la disponibilité de l'eau en Engadine est faible. Les interventions nécessaires dans l'environnement alpin et les coûts considérables montrent clairement que l'enneigement artificiel de grandes surfaces glaciaires n'est pas une alternative à une protection du climat rapide et efficace.

Gletscherrückgang und Gegenmassnahmen

Die Gletscherschmelze ist in aller Munde. Noch nie seit Beginn der Aufzeichnungen vor über 100 Jahren war der Gletscherrückgang so stark. Besonders das Extremjahr 2022 hat aufgezeigt, was unter einem künftigen Klima möglich ist. Einerseits verliert ein Alpenland wie die Schweiz durch das Schrumpfen der grossen Eismassen und das Verschwinden kleiner Gletscher wichtige Identifikationsmerkmale und Touristenmagnete. Andererseits erfüllen Gletscher eine wichtige Rolle im Wasserkreislauf, indem sie Wasser in kühlen und feuchten Jahren speichern und es in heissen und trockenen Sommerperioden wieder abgeben. Was können wir gegen diesen drohenden Verlust des «ewigen» Eises unternehmen? Die Limitierung der globalen Erwärmung durch eine schnelle Verminderung des Treibhausgas-Ausstosses würde den Gletschern helfen. Doch kann modernste und innovative Technologie den Gletscherrückgang in den nächsten Jahren verlangsamen, und wenn ja, zu welchem Preis?

Vor einigen Jahren haben zwei Gletscherforscher die Idee aufgebracht, durch künstliche Beschneiung die Eisschmelze zu reduzieren *(Oerlemans et al., 2017)*. Tatsächlich ist Schnee in mehrfacher Hinsicht günstig für den Gletscher: Solange das Eis durch Schnee bedeckt ist, kann es nicht schmelzen. Zudem hat Schnee eine höhere Rückstrahlfähigkeit als nacktes Eis. Damit wird die Energie der Sonnenstrahlung zurückgeworfen und steht nicht für die Schmelze zur Verfügung. Ein sehr ähnliches Prinzip machen sich verschiedene Gletscher-Skigebiete in den Alpen schon seit fast 20 Jahren zunutze: Durch das Ausbreiten von weissen Tüchern – sogenannten Geotextilien – wird die Schmelze lokal um über die Hälfte verringert, was den Zugang zu Pisten und damit den Skibetrieb sicherstellen kann. Diese Massnahmen setzten sich aber nie zum Ziel einen ganzen Gletscher zu erhalten, sondern die Schmelze auf sehr beschränkte Flächen zu reduzieren. Wir sprechen hier also von einem konkreten, ökonomischen Interesse mit stark lokalisiertem Nutzen, was die beträchtlichen Investitionen von rund 1 Franken pro Kubikmeter erhaltenem Eis auf einer Gletscherzunge rechtfertigen kann *(Huss et al., 2021a)*.

Im Gegensatz dazu ist die Idee zur Verlangsamung des Rückgangs eines ganzen Gletschers durch künstliche Beschneiung

viel grösser gedacht: Das Projekt MortAlive (www.mortalive.ch) setzt sich zum Ziel, eine Methode zur künstlichen Beschneiung von Gletschern zu entwickeln, um die Schmelze massgeblich zu reduzieren und damit einen Süsswasserspeicher in Form von Eis zu erhalten *(Keller et al., 2021)*. Eine Vielzahl von Schneedüsen, welche ihre Energie ausschliesslich aus dem Wasserdruck beziehen, also ohne zusätzlichen Energieaufwand auskommen, sollen an rund 200 Meter über dem Eis aufgespannten Seilen im unteren Teil des Gletschers aufgehängt werden und dort für künstlichen Schneefall sorgen. Die Projekt-Entwicklung fokussiert sich auf den Morteratschgletscher im Engadin. Dieser bekannte Talgletscher hat im letzten Jahrhundert fast drei Kilometer an Länge eingebüsst. Jährlich zieht er Zehntausende von Touristen in eine mehrheitlich unberührte Bergwelt an, wobei das Gletschervorfeld sogar im Bundesinventar der Auengebiete von nationaler Bedeutung aufgeführt ist.

In diesem Beitrag beleuchten wir das Gletscherschutz-Projekt im Engadin aus der glaziologischen Perspektive und untersuchen, ob damit die Schmelze im Klima des 21. Jahrhunderts vermindert werden kann. Die Untersuchung wurde im Rahmen einer durch die Graubündner Kantonalbank initiierten Ausstellung zum Thema Wasser und Gletscher in der Talstation Diavolezza (www.glacierexperience.com) und in einer Machbarkeitsstudie ausgeführt *(Keller et al., 2021; Huss et al., 2021b)*. Dabei kommen extra entwickelte Berechnungsverfahren zum Einsatz, die es erlauben, den Einfluss der künftigen Klimaentwicklung auf Gletscherrückgang und Abfluss – sowohl ohne Eingriff wie auch mit künstlicher Beschneiung – zu bestimmen. Die Resultate bilden daher eine wichtige Grundlage, um mögliche Investitionen in Bezug zum Gletschervolumen zu setzen, welches erhalten werden könnte.

Umfangreiche Datengrundlage

Der Morteratschgletscher ist das grösste Gletschersystem Graubündens und bedeckt eine Fläche von 15 km². Unterhalb der Gipfel von Piz Bernina und Piz Palü wird auf Höhen von bis zu 4000 m ü. M. ständig neues Eis gebildet, das dann über steile, von Spalten zerrissene Eisflanken in die Tiefe fliesst. Die Gletscherzunge reichte um 1850 bis zur heutigen RhB-Bahnstation «Morteratsch» und zieht sich seither ohne Unterbruch zurück *(Bild 1)*. Die letzten Jahre waren geprägt durch einen besonders starken Rückgang. Dabei hat sich die Gletscherzunge in kurzer Zeit über eine Felsstufe zurückgezogen und ist heute vom Ende des Gletscherlehrpfades nicht mehr zu sehen. Der Persgletscher, der grösste Zufluss, hat 2015 den Kontakt zum Hauptgletscher verloren.

Langjährige Gletscherbeobachtung hat zu umfangreichen Datensätzen auf dem Morteratschgletscher geführt. Seit 1878 wird jährlich der Rückgang der Gletscherzunge bestimmt *(GLAMOS, 1881 – 2022)*. Gletscher-Inventare seit dem Jahr 1850 dokumentieren die langfristige Veränderung der Eisfläche *(z.B. Maisch, 2000)*. Das neuste Inventar gibt die Ausdehnung von Morteratsch- und Persgletscher für das Jahr 2015 wieder und zeigt auch die von Schutt bedeckten Bereiche *(Linsbauer et al., 2021)*. Damit stellt es eine wichtige Grundlage für die Berechnung der aktuellen Massenbilanz und der künftigen Gletscherveränderung dar *(z.B. Haeberli & Hoelzle, 1995)*. Zusätzlich sind detaillierte Daten zur Gletscherbett-Topographie verfügbar. Diese basieren auf flächendeckenden Messungen der Eisdicke mittels Georadar *(Grab et al., 2021)*. Sie zeigen, dass das Eis an gewissen Stellen noch fast 300 Meter mächtig ist. In den steileren Bereichen liegt die Eisdicke aber meist unter 100 Metern. Für das ganze Gletschersystem sind Höhenmodelle im Abstand von einigen Jahrzehnten vorhanden *(Bauder et al., 2007)*. Diese wurden mit topographischen Karten und ab 1955 mit Luftbildern erstellt und ermöglichen eine Bestimmung des Eisvolumen-Verlustes über lange Zeiträume. Zwischen 1850 und heute gingen schon rund zwei Drittel des Eises verloren. Seit fast 70 Jahren gibt es am Morteratschgletscher zudem direkte Messungen der Schneeakkumulation und Eisschmelze *(Oerlemans et al., 2009; Zekollari und Huybrechts, 2018; GLAMOS, 1881 – 2022)*. Während zu Beginn nur lokal Daten erhoben wurden, konnten die Beobachtungen kürzlich zu einem kompletten Messprogramm ausgebaut werden.

Das zukünftige Klima in der Schweiz wird durch Resultate von 69 regionalen Klimamodellen beschrieben und mit statistischen Methoden für alle Regionen der Schweiz heruntergerechnet *(MeteoSchweiz, 2018)*. Dabei wird von verschiedenen Entwicklungen der globalen Gesellschaft und der CO_2-Emissionen ausgegangen: (i) Ein Szenario, in der Folge als Best Case bezeichnet, geht von einer sehr schnellen und weltweiten Umsetzung der Klimaschutzziele aus – auch 2-Grad-Ziel genannt. Demnach müsste die Welt in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts CO_2-neutral sein. Dieses Ziel ist sehr ambitioniert und könnte nur mit schnellem, global koordiniertem Handeln, durch starke Reduktion des CO_2-Ausstosses und zusätzlichem Entzug von Kohlenstoff aus der Atmosphäre erreicht werden. (ii) Demgegenüber steht ein Extremszenario (Worst Case), bei dem die Emissionen nur durch Verfügbarkeit von

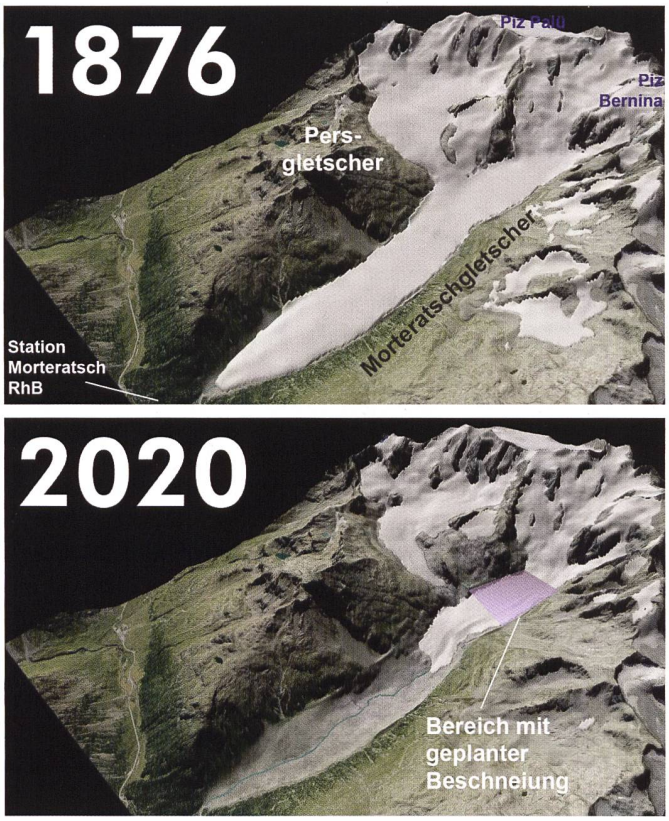

Bild 1: Beobachteter Rückgang des Morteratschgletschers über die letzten 150 Jahre. Der Bereich, welcher künstlich beschneit werden soll, ist in blau angedeutet.

Öl, Gas und Kohle limitiert sind. (iii) Dazwischen gibt es ein mittleres Klima-Szenario, welches am ehesten dem aktuellen Entwicklungspfad entspricht. In Zukunft prognostizieren alle Szenarien keine massgeblichen Veränderungen des Niederschlags, auch wenn Prognosen zu den lokalen Verhältnissen unsicher bleiben. Die Temperaturen hingegen steigen im Vergleich zur Periode 1980–2000 zwischen 1,5 und 5 Grad bis zum Ende des Jahrhunderts an. Der Anstieg der Sommer-Temperatur, welche für die Gletscher am relevantesten ist, fällt noch grösser aus.

Berechnungs-Modelle

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Berechnungen basieren auf dem sogenannten Glacier Evolution Runoff Model *(GERM, z.B. Huss et al., 2008; Farinotti et al., 2012)*. Dieses Rechenmodell beschreibt alle Prozesse der Gletscher-Massenbilanz auf einem 25-Meter-Gitter in täglicher Auflösung, bestimmt die dreidimensionale Entwicklung des Eises und den Wasserhaushalt in hochalpinen Einzugsgebieten. Es ist deshalb gut geeignet, um den Effekt der künstlichen Beschneiung auf den zukünftigen Rückgang des Morteratschgletschers auszuloten. Schmelzwasser sowie flüssiger Niederschlag infiltriert in ein System von Wasserspeichern, welche den Oberflächen- und Grundwasserabfluss abbilden und die zeitliche Dynamik des Gebietsabflusses wiedergeben. Die Veränderung der Gletscher-Form (Oberflächenhöhe, Vorstoss/Rückgang) wird mit einer Parametrisierung bestimmt, deren Resultate gut mit rechenintensiven Eisfliessmodellen übereinstimmen *(Huss et al., 2010)*. Ein Fokus wird auf die detaillierte Bestimmung der künstlich produzierbaren Schneemenge und des entsprechenden Einflusses auf die Gletscher-Entwicklung und den Abfluss gelegt. Gemäss den technischen Vorgaben zur Dimensionierung und Effizienz der Schneiseile bei verschiedenen Temperaturen *(InnoSuisse, 2019–2022)* sowie der beschneiten Fläche von rund 0,8 km² gemäss *Keller et al. (2021)*, wurde ein Teilmodell implementiert, welches die täglich mögliche Schneeproduktion abschätzt. Um die Beschneiung ohne grossen energetischen Zusatzaufwand zum Hochpumpen des Wassers umsetzen zu können, ist die Errichtung eines künstlichen Speichersees mit einem Volumen von rund 2,5 Millionen Kubikmeter nötig *(Keller et al., 2021)*. Dieser läge oberhalb der heute noch von Gletschern umschlossenen Isla Pers und hätte eine Kronenhöhe von ca. 30 m *(Bild 2)*. Der Speichersee könnte das im Sommer anfallende Schmelzwasser auffangen und es in den Wintermonaten für die Schneeproduktion zur Verfügung stellen. Die produzierte Schneemenge wird der Gletscher-Massenbilanz im beschneiten Bereich zugerechnet und erhöht die Rückstrahlfähigkeit der Oberfläche lokal.

GERM wird primär mit der gemessenen Veränderung des Eisvolumens des ganzen Morteratschgletschers geeicht, da diese Variable den langfristigen Eisverlust am genausten beschreibt und damit auch sicherstellt, dass Abflussmengen richtig ausgegeben werden. Der berechnete Gletscherrückgang über die letzten 150 Jahre stimmt in zeitlicher und räumlicher Dimension sehr genau mit den Beobachtungen aus Vergangenheit und Gegenwart überein. Das Rechenmodell wurde auch mit verschiedenen unabhängigen Messvariablen validiert, z.B. den lokalen Messungen von Schneehöhe und Eisschmelze, oder der Abflussmenge in Pontresina. Die gute Übereinstimmung zwischen Realität und Modell erlaubt eine Anwendung für die Zukunft.

Massiver Gletscherrückgang

Basierend auf allen 69 regionalen Klimamodellen wurden Gletscher-Entwicklung und Abfluss auf Tagesbasis bis ins Jahr 2100 berechnet. Die Daten wurden anschliessend zum Best Case und zum Worst-Case-Szenario aggregiert. Hier gehen wir nur auf Resultate bis 2060 ein. Dies ist der Planungshorizont des Projekts MortAlive. In einem ersten Modelllauf wurde kein künstlicher Eingriff vorgegeben (keine Beschneiung). In einem zweiten Lauf wurde eine Implementierung des Gletscherschutz-Projektes mit Speichersee ab dem Jahr 2021 modelliert (MortAlive). Diese Berechnung ist zu optimistisch, da eine konkrete Umsetzung in Realität nicht vor 2031 stattfinden könnte *(Keller et al., 2021)*, während bis dann weitere Eisverluste zu erwarten sind bzw. besonders im Rekordjahr 2022 schon eingetreten sind. Nur in diesem Jahr dürfte der Morteratschgletscher rund 10 Prozent seines Volumens eingebüsst haben (SCNAT, 2022).

Die Berechnungen zeigen, dass ohne künstlichen Speichersee oberhalb der Beschneiungsanlage in naher und mittlerer Zukunft praktisch kein Schnee produziert werden könnte: Wenn die Temperaturen tief genug sind für die Schneeproduktion, ist auf einer Höhe von fast 3000 m ü. M. kein Schmelzwasser verfügbar, und sobald Schmelzwasser anfällt, ist es meist auch nachts zu warm für die Beschneiung.

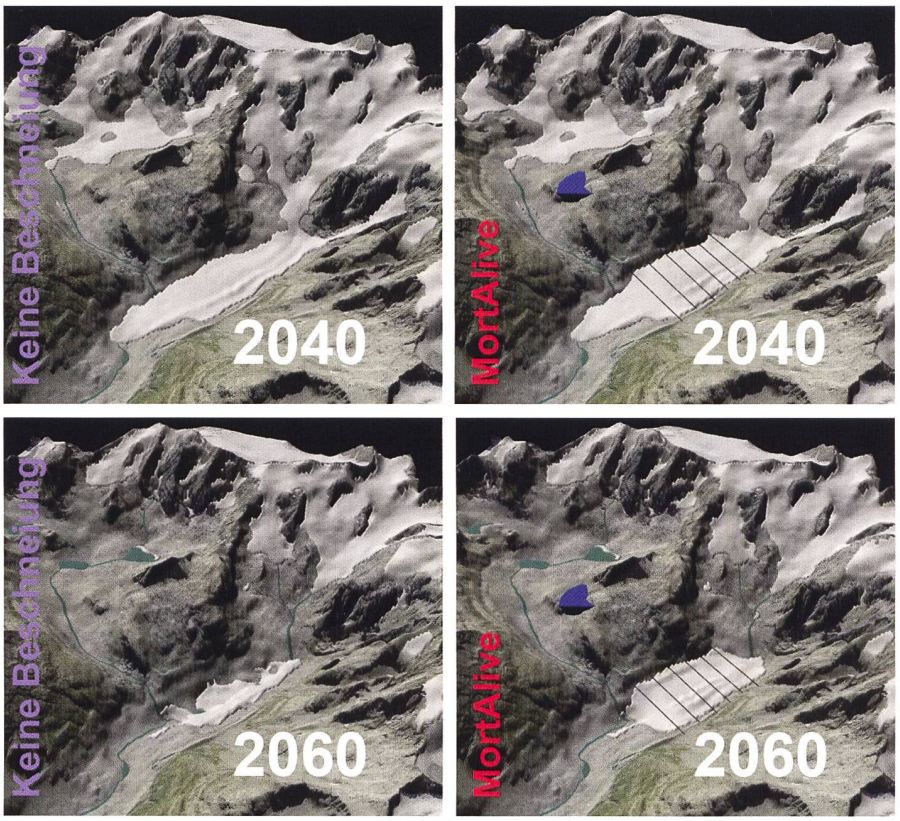

Bild 2: Visualisierung der Entwicklung des Morteratschgletschers ab 2021 bis ins Jahr 2060 ohne künstliche Beschneiung (links) und mit künstlicher Beschneiung (rechts, MortAlive) gemäss einem mittleren Klima-Szenario. Der notwendige neue Speichersee sowie über den Gletscher gespannte Schneiseile sind angedeutet.

Mit einem Speichersee kann dies aber effizient ausgeglichen werden. Gemäss unserer Studie würde die produzierbare Schneemenge auch in Zukunft kaum abnehmen, da das im Speichersee aufgefangene Wasser im nach wie vor kalten Winter in Schnee transformiert werden kann.

Der berechnete Gletscherrückgang ist massiv *(Bild 2)*. Während sich der dünnere Persgletscher schon 2040 bis auf die Höhe der Diavolezza zurückgezogen haben könnte, bleibt das dicke und teils heute schon durch Schutt natürlich geschützte Eis des Morteratschgletschers auch ohne künstliche Beschneiung 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 Zunge im Tal abreisst – eine ganz ähnliche Situation, die vor etwa 10 Jahren beim benachbarten Roseggletscher beobachtet werden konnte.

Bild 2 macht deutlich, dass das Gletscherschutz-Projekt einen Einfluss hat, den Rückgang aber bei weitem nicht aufhalten kann. Während im Jahr 2040 der beschneite Bereich etwas dicker und breiter ist als ohne Schutz, stellt er 2060 einen Eisblock mit fehlendem Nachschub von oben dar und ist daher vollständig von der künstlichen Beschneiung abhängig. Dieser Toteiskörper kann daher nicht mehr als Gletscher bezeichnet werden. Die Resultate zeigen einen geringeren Erfolg der Schneeproduktion als frühere Studien *(Oerlemans et al., 2017)*. Dies kann damit erklärt werden, dass damals im Vergleich zu den aktuellen Klimaszenarien ein geringerer Temperaturanstieg angenommen wurde. Zudem wurde die tatsächlich produzierbare Schneemenge in Bezug auf Wasserverfügbarkeit und künftiges Klima nicht berücksichtigt.

Effekt der künstlichen Beschneiung auf Eisvolumen und Abfluss

Das Bild 3 zeigt den Nettoeffekt der Beschneiung auf die Volumenentwicklung des Morteratschgletschers für die günstigste und ungünstigste Klimaentwicklung. Künstliche Schneeproduktion 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 Prozent seines Volumens verliert. Bis 2060 (mit angenommener 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 Kubikmeter. Die Abhängigkeit von der Klimaentwicklung ist für diesen Wert erstaunlich gering. Damit ist die Reduktion des Eisverlusts, die durch künstliche Beschneiung erreicht werden kann, kaum von der Unsicherheit des Erwärmungstrends abhängig, obwohl der Gletscher insgesamt im günstigsten Szenario deutlich weniger Schmelze aufweist.

Die Gesamtkosten einer Implementierung von grossflächiger, künstlicher Beschneiung am Morteratschgletscher werden von *Keller et al. (2021)* auf rund 150 Millionen Franken geschätzt (nur Bau, kein Betrieb). Was bedeutet diese Summe in Bezug auf den durch Schneeproduktion verhinderten Verlust an Gletschervolumen? Mit einem berechneten, positiven Effekt von 87 bzw. 77 Millionen Kubikmeter «gerettetem» Eis (Best-Case- bzw. Worst-Case-Szenario, siehe *Bild 3*) kann grob geschätzt werden, dass knapp 2 Franken pro Kubikmeter erhaltenem Gletschereis investiert werden müssten. Dieser Wert hängt jedoch stark von der unsicheren Schätzung der Gesamtkosten für das ganze Projekt ab, und macht keinerlei Aussagen zur Wirtschaftlichkeit – dafür müssten zusätzlich verschiedene ökonomische und ökologische Kriterien berücksichtigt werden.

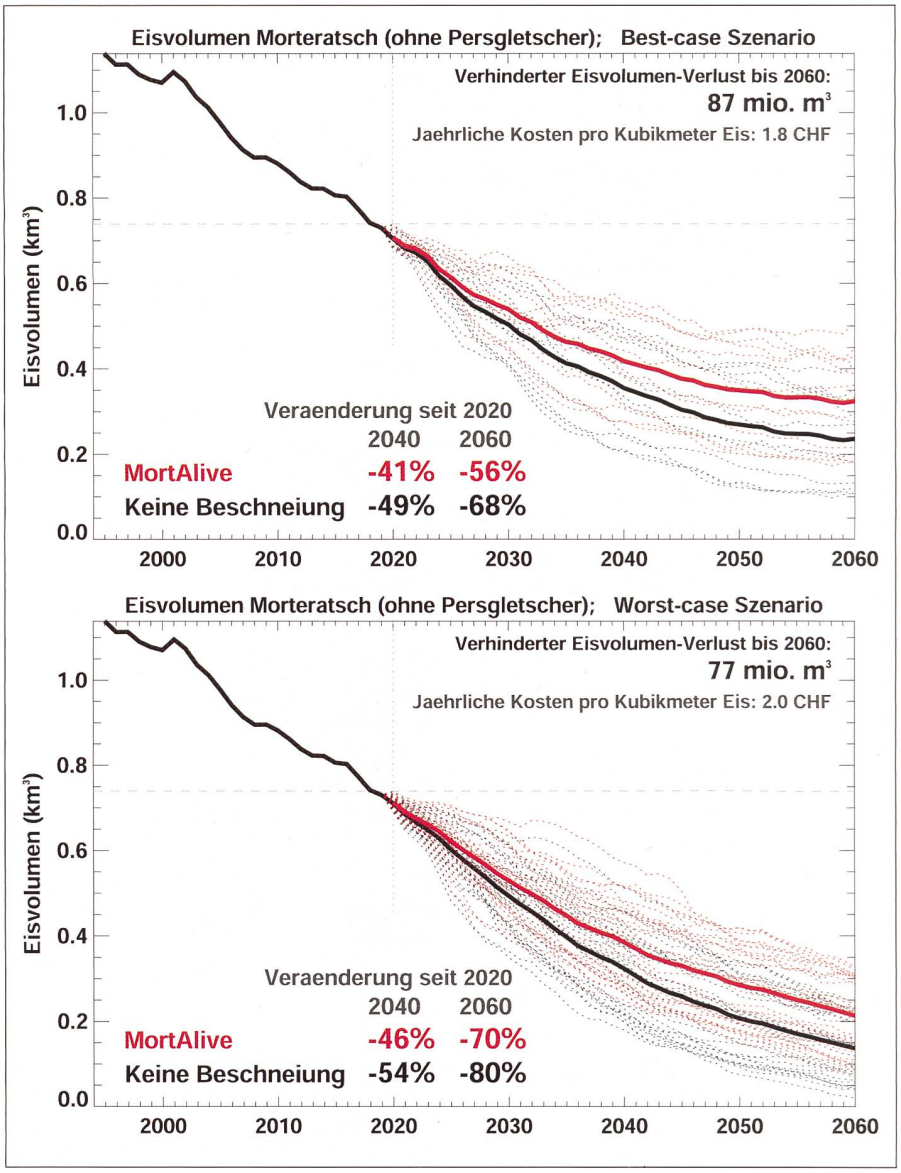

Bild 3: Effekt der künstlichen Beschneiung auf die Entwicklung des Eisvolumens des Morteratschgletschers (ohne Persgletscher) gemäss Best-Case- (oben) und Worst-Case-Szenario (unten). Die vergangene Entwicklung ist seit 1995 gezeigt. Modellresultate für die Zukunft basieren auf allen einzelnen Klimaszenarien (dünne Linien) für eine gegebene Entwicklung der CO_2-Emissionen. Die dicke Linie zeigt das Mittel. Veränderungen gegenüber dem Jahr 2020 sind für 2040 und 2060 ausgewertet.

Hauptziel des Projekts MortAlive ist die Entwicklung einer Technologie, die durch künstliche Beschneiung von Gletschern einen positiven Effekt auf den Abfluss erzielt, primär in Asien und Südamerika, wo die Wasserressourcen besonders unter Druck stehen *(Keller et al., 2021)*. Mittels unseres Berechnungsansatzes führen wir für den Morteratschgletscher eine Analyse der künftigen Abflussveränderung mit und ohne künstliche Beschneiung durch. In *Bild 4* ist der Jahresabfluss im ganzen Einzugsgebiet des Morteratsch- und Persgletschers bis zur RhB-Station «Morteratsch» dargestellt. Auffällig ist, dass es über das ganze Jahr hinweg bis 2060 kaum zu Veränderungen des Abflusses kommt. 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 Jahresabfluss beginnt sich ab ca. 2050 zu zeigen und führt im Jahr 2060 zu 3 bis 4 Prozent grösseren Abflussmengen im ganzen Einzugsgebiet als im natürlichen Fall.

Ein deutlicher Rückgang des Abflusses ist hingegen in den Sommermonaten festzustellen. Dieser ist vor allem im August relevant, da dann andere Zuflüsse (z.B. Schneeschmelze) gering sind. Gletscherwasser ist daher zu dieser Zeit für die europäischen Flüsse, unter anderem für Bewässerung und Schifffahrt, besonders wichtig. Auch für die Veränderung des August-Abflusses ist die Unsicherheit in den Klimaszenarien bis 2060 nicht ausschlaggebend. Künstliche Beschneiung äussert sich bis etwa 2050 in tieferen Abflüssen, da sich das Eisvolumen weniger schnell verringert. Die grössere Gletscherfläche trägt nachher zu etwas höheren Abflussmengen bei. 2060 ist der Effekt mit 1 bis 3 Prozent zusätzlichem August-Abfluss aber ebenfalls gering.

Für die Analyse der grossräumigen hydrologischen Auswirkungen wurden die durch Beschneiung herbeigeführten Abflussveränderungen im Jahr 2060 mit den mittleren, gemessenen Abflüssen an zwei Engadiner Messstellen verglichen. Der Rosegbach in Pontresina (Einzugsgebietsgrösse 107 km²) ermöglicht Aussagen über Abflussmengen in der Nähe des vergletscherten Quellgebiets, und die Messstation am Inn in Martina (1941 km²) zeigt den Effekt auf der Skala des ganzen Engadins. Dabei wird klar, dass der Nettoeffekt der Beschneiung auf den Gebietsabfluss im Jahr 2060 (ungefährer Zeitpunkt der maximalen Wirksamkeit) auch im Quellgebiet gering bleibt: Sowohl Jahres- wie August-Abfluss könnten künstlich um 1 bis 2 Prozent erhöht werden. Auf der Skala des ganzen Engadins liegt der Effekt bei 0,1 bis 0,2 Prozent, ist damit also äusserst klein und nicht mehr messbar.

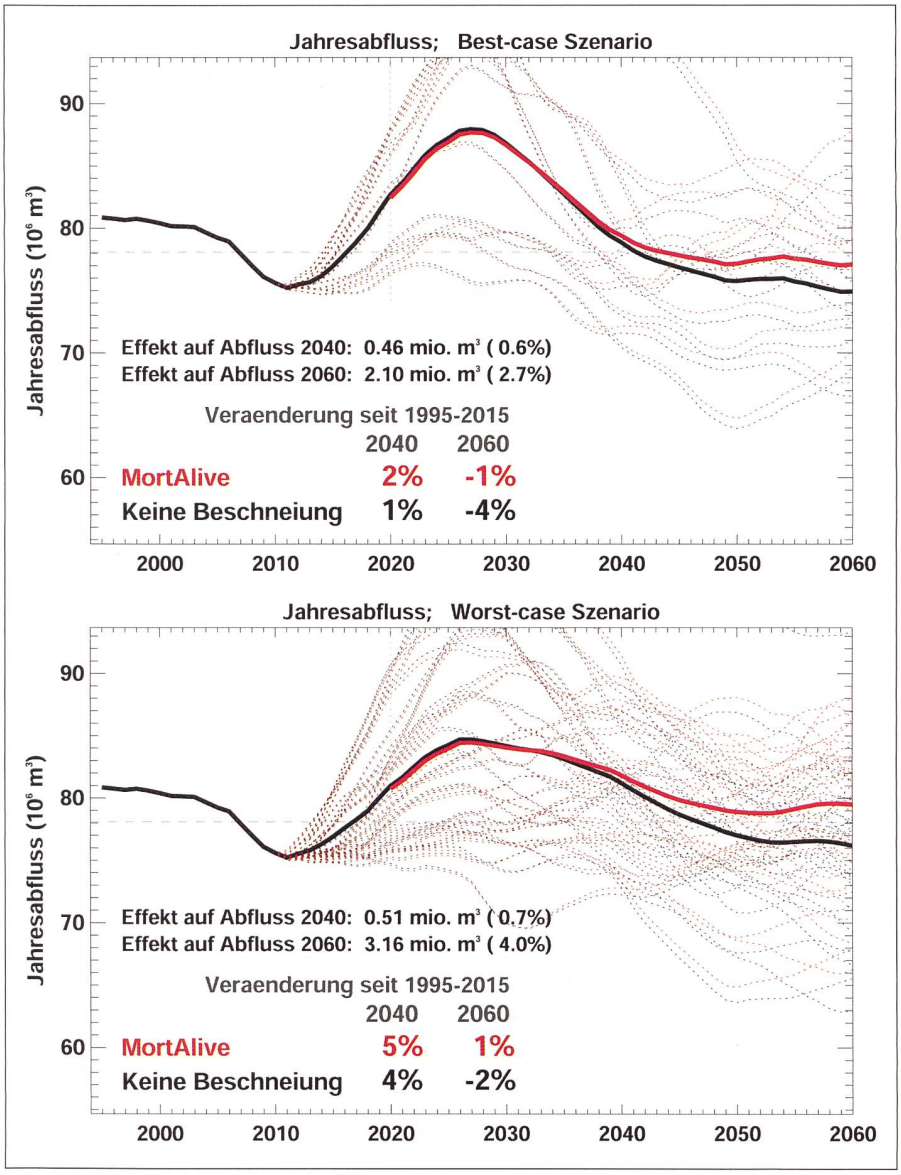

Bild 4: Effekt der Beschneiung auf die Entwicklung des Jahresabflusses aus dem Einzugsgebiet des Morteratsch- und Persgletschers gemäss Best-Case- (oben) und Worst-Case-Szenario (unten). Alle Linien sind geglättet, da der Abfluss starke Jahr-zu-Jahr-Schwankungen aufweist.

Abschliessende Betrachtungen

Die Idee der künstlichen Verminderung der Gletscherschmelze durch modernste Technologie ist spektakulär. Man stelle sich vor, es gelingt dem Menschen durch reine Innovationsleistung einen so gewaltigen Eisriesen wie den Morteratschgletscher etwas länger «am Leben» zu halten. Das Projekt MortAlive hat eine vielversprechende technologische Entwicklung hervorgebracht, bei welcher ohne zusätzlichen Energiebedarf grosse Mengen an Schnee produziert werden können. Doch selbst wenn 150 Millionen Schweizer Franken für eine Skalierung der Anlage zur Beschneiung des Morteratschgletschers investiert würden und man so den Niedergang des Eises etwas verzögert, bliebe es ein Tropfen auf den heissen Stein. Dazu kommt, dass ein Bauvorhaben der geplanten Grössenordnung in der weitgehend unberührten Natur des Oberengadins wahrscheinlich eine nachhaltige Auswirkung auf das Ökosystem und die At-

traktivität dieser einmaligen Hochgebirgslandschaft hätte.

Unsere Modellrechnungen deuten an, dass das weltweit erste Projekt zur grossflächigen Schmelzreduktion eines ganzen Gletschers das Eis nicht langfristig stabilisieren kann. Selbst mit der aufwändigen Erstellung eines neuen Speichersees lässt sich die Schmelze des Morteratschgletschers unter sämtlichen zu erwartenden Klimaentwicklungen nur leicht verlangsamen. Der lokale Effekt auf den Abfluss bleibt im Bereich von wenigen Prozenten und ist weiter flussabwärts kaum mehr erkennbar. Es müssen aber auch die positiven Aspekte der Projektidee beleuchtet werden: Die innovative Technologie der Schneeproduktion könnte für Skigebiete durchaus interessant sein, und – wer weiss – vielleicht wird sie tatsächlich einmal auf einem Gletscher in Asien eingesetzt. Zudem ist das öffentlichkeitswirksame Gletscherschutz-Projekt ein Fanal, das eindrücklich auf die unumkehrbaren Folgen des Klimawandels hinweist und aufzeigt, wie unglaublich schwierig und teuer es ist, technisch dagegen anzukämpfen. Unter dem Strich wird klar: Wer den Morteratschgletscher, und das Eis der Erde im Allgemeinen, erhalten will, muss heute und in Zukunft auf fossile Treibstoffe verzichten – und hilft damit nicht nur den Gletschern, sondern auch die unzähligen Auswirkungen der Klimakrise weltweit zu mildern.

Quellen:

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.

Farinotti, D., Usselmann, 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.

GLAMOS (1881-2022). The Swiss Glaciers 1880–2020/21, Glaciological Reports No. 1–142, Yearbooks of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences (SCNAT), published since 1964 by VAW / ETH Zurich, doi:10.18752/glrep_series.

Grab, M., Mattea, E., Bauder, B., Huss, M., Rabenstein, L., Hodel, E., Linsbauer, A., Hellmann, S., Church, G., Langhammer, L., Schmid, L., Délèze, 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.

Haeberli, 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.

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.

Huss, M., Jouvet, G., Farinotti, D., and Bauder, A. (2010). 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. (2021a). Quantifying the overall effect of artificial glacier melt reduction in Switzerland, 2005-2019. Cold Regions Science and Technology, 184, 103237.

Huss, M., Mattea, E., Linsbauer, A. and Hölzle, M. (2021b). Morteratschgletscher 2020-2060, Klimaszenarien und Gletscherentwicklung. https://mortalive.ch/downloads/Schlussbericht_Glaziologie_MortAlive.pdf

Innosuisse/FHGR. (2019-2022). Bodenunabhängiges Beschneiungssystem. 2019-2022.

Keller, F., Müller, D., Levy, C. & Seupel, C. (2021). Vorstudie Gletscherschutzprojekt MortAlive. https://mortalive.ch/downloads/Schlussbericht_MortAlive.pdf

Maisch, M. (2000). Die Gletscher der Schweizer Alpen: Gletscherhochstand 1850, aktuelle Vergletscherung, Gletscherschwund-Szenarien. Vdf, Hochschulverlag AG an der ETH.

MeteoSchweiz (2018), CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp.

Linsbauer, A., Huss, M., Hodel, E., Bauder, A., Fischer, M., Weidmann, Y. and Baertschi, H. (2021). The new Swiss Glacier Inventory SGI2016: From a topographic to a glaciological dataset. Frontiers in Earth Science, 9, 774.

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.

SCNAT (2022). Schlimmer als 2003: Schweizer Gletscher schmolzen wie noch nie. Medien-Mitteilung der SCNAT vom 28.9.2022. https://scnat.ch/de/id/qPn2w

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.

Autoren:

Matthias Huss[1,2,3], matthias.huss@unifr.ch, **Enrico Mattea**[1], **Andreas Linsbauer**[1,4], **Martin Hoelzle**[1]

[1] Departement für Geowissenschaften, Universität Fribourg, 1700 Fribourg,

[2] Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 8903 Birmensdorf

[3] Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 8093 Zürich

[4] Geographisches Institut, Universität Zürich, 8057 Zürich