

Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft in Bern
Band: 80 (2023)

Artikel: Schweizer Gletscher in Zeiten des Klimawandels
Autor: Huss, Matthias
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1049733>

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: 01.05.2026

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

Schweizer Gletscher in Zeiten des Klimawandels

Gletscher sind die Botschafter des Klimawandels. Ihr Rückgang, in der Schweiz und weltweit, hat schwerwiegende Konsequenzen für den Wasserkreislauf und den Anstieg des Meeresspiegels. Die Vermessung von Gletschern mit verschiedenen Methoden dokumentiert die immer schnellere Schmelze, die bislang im Extremjahr 2022 kulminierte. Die künftige Entwicklung von Gletschern kann mit Berechnungsverfahren erforscht werden, welche die Prozesse auf und im «ewigen» Eis mathematisch beschreiben. Solche Simulationen erlauben es, die gewaltigen Veränderungen zu verstehen und uns auf eine Welt ohne Gletscher vorzubereiten.

Autor

Matthias Huss^{1,2,3}

Die Entwicklung von Gletschern in Raum und Zeit bestimmt das Landschaftsbild von Gebirgsregionen massgeblich, nicht nur in den Schweizer Alpen. Es ist heute schwer vorstellbar, dass die eindrücklichen Gletscher an den Flanken der höchsten Gipfel bald nicht mehr existieren könnten. Im Zuge der globalen Klimakrise stellt der Rückgang von Gebirgsgletschern, sowie der beiden riesigen Eisschilde in Grönland und der Antarktis, die Menschheit vor zunehmend ernsthafte Probleme. Gletscher regulieren einerseits den Wasserkreislauf in vielen Regionen der Erde, indem sie Wasser in kalten und feuchten Perioden speichern, und es während warmen und trockenen Phasen wieder frei-

geben. Mit einem Verschwinden des Eises wird dieser Effekt zum Teil wegfallen und zu Wasserknappheit und Dürren führen. Andererseits trägt Schmelze von Gletschereis zum Anstieg des Meeresspiegels bei und betrifft daher direkt oder indirekt Milliarden von Menschen in Küstennähe. Daneben ergeben sich auch neue Bedrohungen für das Leben im Gebirge durch Naturgefahren, die durch den Gletscherrückzug begünstigt werden, wie zum Beispiel Berg- und Eisstürze, oder Hochwasser durch Ausbrüche von Gletscherseen. Nicht zuletzt stellen Gletscher eine wichtige Ressource für den Tourismus dar und werden als Sinnbild für eine intakte Bergwelt wahrgenommen. Das «Grosse Schmelzen» macht die Veränderun-

1 Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf, Schweiz

2 Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Zürich, Schweiz

3 Departement für Geowissenschaften, Universität Freiburg, Freiburg, Schweiz

gen im globalen Klimasystem und seine Auswirkungen für jede und jeden anschaulich. Deshalb kommt Gletschern eine grosse Bedeutung das oft schwer greifbare und komplexe Thema des Klimawandels zu verdeutlichen.

Seit 1850, also ungefähr seit Beginn der Industrialisierung, haben die Gletscher in den Alpen rund zwei Drittel ihres Volumens eingebüsst (ZEMP ET AL., 2006). Dieser massive Rückgang ging mit einem Anstieg der globalen Lufttemperaturen von rund einem Grad einher. Er kann zum allergrössten Teil auf den menschlichen Einfluss aufs globale Klima durch stetig zunehmende Treibhausgas-Emissionen zurückgeführt werden (MARZEION ET AL., 2014). Die eindrücklichen Gletscherzungen reichen deshalb heute viel weniger weit ins Tal als zu den Zeiten unserer Grosseltern, und tausende kleiner Gletscher sind schon ganz verschwunden

(Abb. 1). Die erwartete Erwärmung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird weitreichende Auswirkungen auf die Gletscher haben, und könnte ihnen in der Schweiz fast komplett den Garaus machen (ZEKOLLARI ET AL., 2019).

Gletscher-Vermessung

Seit über 100 Jahren werden in der Schweiz, aber auch in anderen Ländern, koordinierte Messungen auf Gletschern durchgeführt (GLAMOS, 1881–2022; ZEMP ET AL., 2015). Schon damals hat das Eis die Forscher fasziniert. Dennoch ist die Glaziologie eine relativ junge Wissenschaft und noch nicht alle Abläufe und Zusammenhänge der dynamischen Reaktion der Gletscher auf die Veränderung des Klimas sind verstanden. Langfristige Daten haben daher einen immensen Wert zur Dokumentation des Gletscherrückgangs.

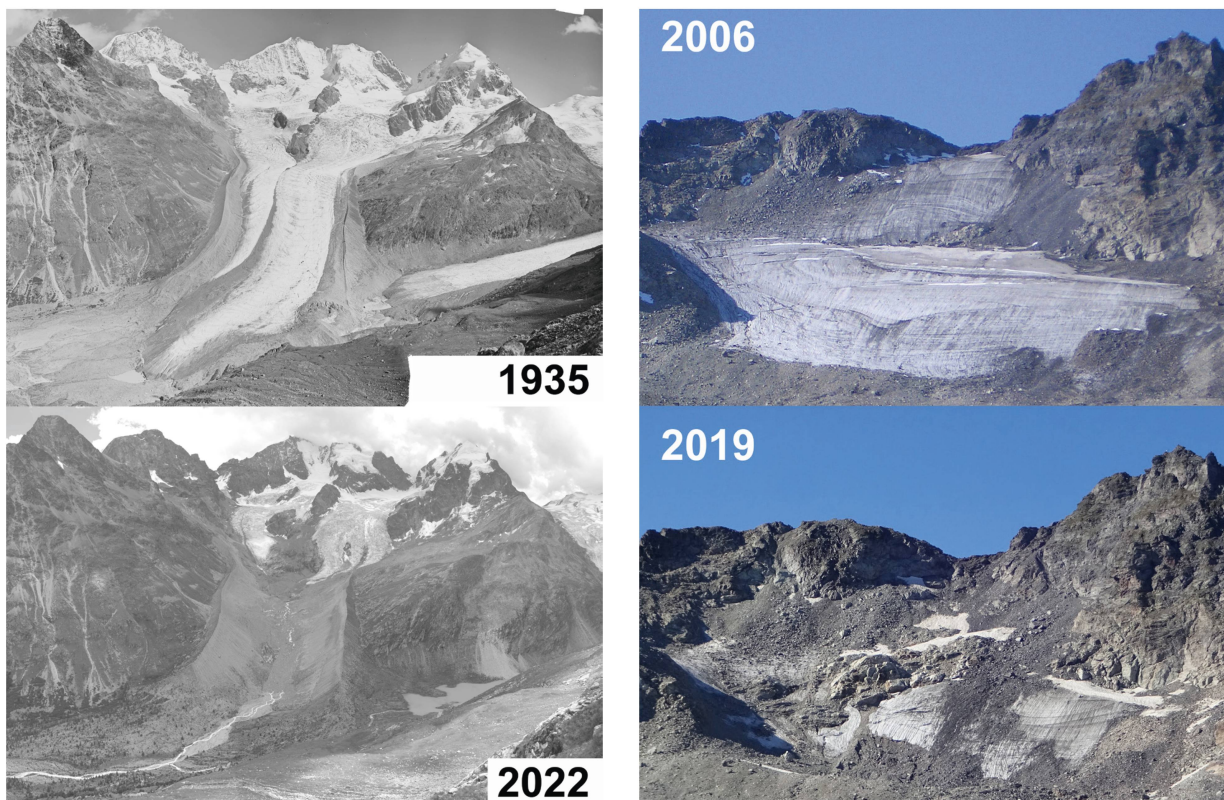


Abb. 1: Vergleichsbilder dokumentieren den Gletscher-Rückgang eindrücklich. Links: Vadret da Tschierva, 1935–2022. Rechts: Pizolgletscher, 2006–2019.

Foto: swisstopo, L. Hösli, G. Carcanade, M. Huss, VAW-ETHZ

Abb. 2: Mess-Pegel zur Bestimmung der Schmelze. An dieser Stelle auf dem Konkordia-platz, inmitten des Grossen Aletsch-gletschers, sind im Sommer 2022 über 6 Meter Eis abgeschmolzen, wie durch Höhe der Stange illustriert wird.

Foto: M. Huss



In der Schweiz ist das Messprogramm GLAMOS (Glacier Monitoring Switzerland) verantwortlich für die Aufnahme, Auswertung und Archivierung verschiedener glaziologischer Variablen. So werden insgesamt über 100 Gletscher jährlich mit verschiedenen Methoden vermessen. Auf einigen Gletschern wird die sogenannte Massenbilanz mit direkten Messungen der Schneehöhe und der Eisschmelze bestimmt. Dazu werden verteilt auf der ganzen Gletscheroberfläche Mess-Pegel ins Eis gebohrt, an denen sich der lokale Gewinn oder Verlust über ein Jahr ablesen lässt (Abb. 2). Hochgerechnet auf den ganzen Gletscher zeigen diese aufwändigen Messungen, wie sich seine Masse als sofortige Reaktion auf die Klimabedingungen im Einzeljahr ändert.

Die Position der Zunge wird an zahlreichen Gletschern seit über einem Jahrhundert bestimmt. Daraus lässt sich die Veränderung der Gletscherlänge berechnen. Diese Messungen sind zwar einfach zu erheben, doch zeigen sie keine unmittelbare Reaktion auf die vorherrschenden Klimabedingungen. Steigt die Lufttemperatur an, oder nimmt der Niederschlag in Form von Schnee ab, beginnt sich die Gletscherzunge erst mit einer Verzögerung von Jahren bis Jahrzehnten zurückzuziehen. Während grosse, dicke Gletscher lange Reaktionszeiten haben und sich somit gleichmässig zurückbilden, können kleinere, steilere und dünnere Gletscher teils auf kurze Perioden mit günstigem Klima reagieren und wieder leicht vorstossen (Abb. 3). Grundsätzlich versuchen

Gletscher durch ihren Rückgang ein neues Gleichgewicht mit dem Klima auf einer grösseren Höhe zu erreichen. Ob ein solches Gleichgewicht erreicht werden kann, oder ob das Eis ganz verschwindet, wird durch die Höhe der Bergkette, sowie den Betrag der Klimaänderung bestimmt.

Die direkt auf dem Gletscher vorgenommenen Messungen der Massenbilanz und der Längenänderung werden durch Daten ergänzt, die mit Fernerkundung erhoben werden, also auf Luft- oder Satellitenbildern basieren. Auf solchen lässt sich beispielsweise die Fläche sämtlicher Gletscher zu einem gewissen Zeitpunkt kartieren. So ist bekannt, dass in der Schweiz aktuell eine Fläche von 961 km², also gut 2% der Landesfläche mit Eis bedeckt ist (LINSBAUER ET AL., 2021). Es ist ebenfalls möglich, die Höhe der Eisoberfläche mit grosser Präzision aus dem Weltall zu bestimmen (HUGONNET ET AL., 2021). Damit kann berechnet werden, wie viel Gletschervolumen in einer mehrjährigen Zeitperiode insgesamt abgeschmolzen ist. Eine Kombination der verschiedenen Datentypen eröffnet in der Wissenschaft neue Perspektiven.

Extremjahr 2022

Während die Gletscherschmelze seit Beginn des 21. Jahrhunderts immer wieder durch neue Rekorde in die Schlagzeilen kam, stellte das Jahr 2022 Vieles auf den Kopf, was man bisher in der Alpen Glaziologie gesehen hat. Es definierte die Randbedingungen neu. Das Jahr 2022 kristallisierte sich schon früh als der «perfekte Sturm» für die Gletscher heraus. Es begann mit einem Winter, der vor allem auf der Alpensüdseite durch grosse Trockenheit und im Gebirge daher durch sehr wenig Schnee geprägt war. Zudem brachten Südwestwinde wiederholt grosse Mengen an Saharastaub in die Alpen, welche sich auf der dünnen Schneedecke absetzten. Dieser in dreckigem Rot-Gelb verfärbte Schnee nimmt mehr Sonnenenergie auf und schmilzt so deutlich schneller (RÉVELLET ET AL., 2022). Schliesslich begannen die Hitzewellen schon im Mai das Geschehen zu bestimmen und die hohen Temperaturen mit fast immer

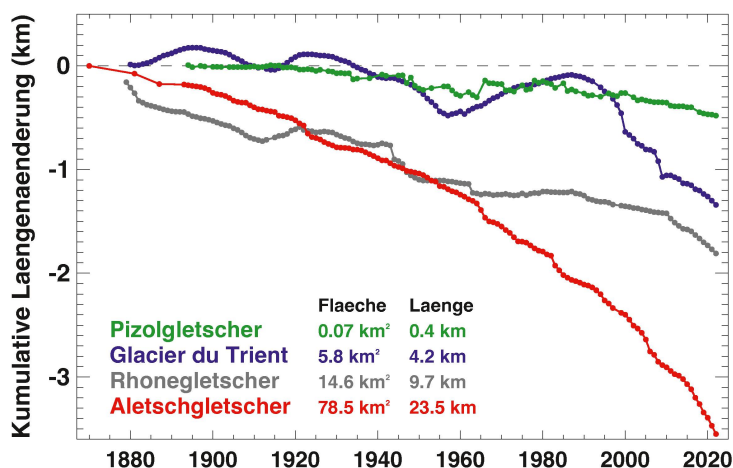


Abb. 3: Gemessener Rückgang der Gletscherzunge für vier Schweizer Gletscher seit Beginn der Messungen um 1880 (GLAMOS, 1881–2022).

schönem Wetter hielten bis in den September an. Durch die Kombination dieser drei Faktoren fegte der Sturm mit voller Wucht über die Gletscher und führte zu bislang nie dagewesenen Eisverlusten, die bis zu diesem Zeitpunkt kaum vorstellbar waren. In der Schweiz gingen rund 6% des noch verbleibenden Eisvolumens verloren – in einem einzigen Jahr (Abb. 4). Der bisherige Maximalwert von knapp 4% Verlust aus

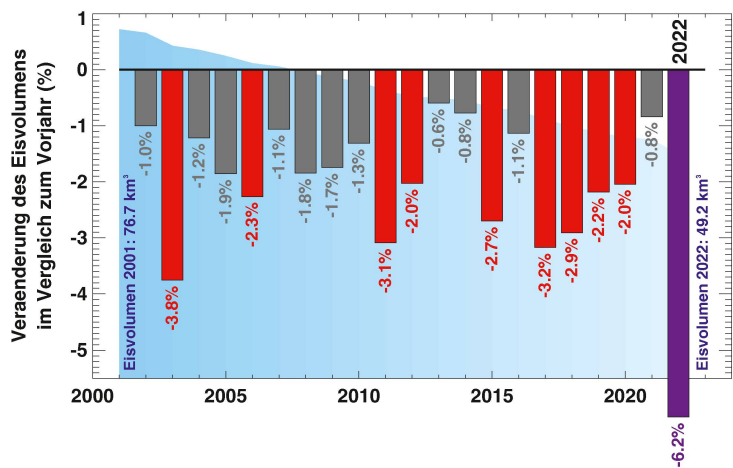


Abb. 4: Prozentualer Verlust an Gletschervolumen in der Schweiz in jedem Jahr zwischen 2000 und 2022. Die Daten basieren auf Messungen von 20 Gletschern, die auf die ganze Schweiz hochgerechnet wurden (GLAMOS, 2022).

dem Jahr 2003 wurde massiv übertroffen (GLAMOS, 2022).

Mit der Rekord-Schmelze aber nicht genug: Gletscherkatastrophen wie der Eisabbruch an der Marmolada in den Dolomiten hielten uns in Atem. Am Sonntag, den 3. Juli 2022, löste sich dort unvermittelt eine Lawine aus Eis und Geröll und verschüttete elf Bergsteiger, die sich im Aufstieg zum Gipfel befanden. Das Ereignis kam völlig unerwartet. Noch nie zuvor war an dieser Stelle ein solcher Abbruch beobachtet worden. Auf den ersten Blick zeigt sich der Gletscher, in welchem das Unglück seinen Ursprung fand, tatsächlich als eher zahm – ein kleiner Rest aus altem Eis, welcher nach dem Zurückweichen des einstmals grossen Marmolada-Gletschers übriggeblieben ist. Das Bild nach Abbruch ist schockierend: Fast, wie wenn eine Bombe eingeschlagen hätte, ist das Eis gespalten. Die Eismasse hat die Haftung am Untergrund verloren, hat auf einen Schlag ihre ehemals stabile Position verlassen und ist als Ganzes abgeglitten. Grund dafür dürfte eine an der Oberfläche kaum sichtbare, mit Schmelzwasser gefüllte Spalte gewesen sein, welche sich quer durch den Gletscher zog. Durch das Wasser erhöhte sich der Druck hinter dieser immer weiter, bis die Stabilitätsgrenze erreicht wurde. Dass die Katastrophe zu einem Zeitpunkt passierte, als viele Menschen am Berg unterwegs waren, ist äusserst unglücklich. Aber vielleicht ist es symptomatisch für die heutige Zeit, in der die Natur immer intensiver als Erholungsraum genutzt wird, und sich der Mensch im Zuge davon auch – teils unbewusst – grösseren Risiken aussetzt.

Brechen Gletscher einfach auseinander in der aktuellen Klimakrise? Müssen wir uns an solche Ereignisse gewöhnen? Ja und Nein. Die Hitze allein ist nur selten für eine Gletscher-Katastrophe verantwortlich. Auch schon vor einem Jahrhundert gab es gewaltige Eisabbrüche und Gletscherfluten, die in einigen Fällen viele Todesopfer gefordert haben. Das passierte damals bei komplett anderen Klimaverhältnissen, teils als die Gletscher noch in einer Wachstumsphase waren. Heute brechen Gletscher an Stellen ab, die bislang nicht als gefährlich galten. Obwohl es neuste Technologie heutzutage

erlaubt, Gefahrenstellen hochpräzise zu beobachten und aufgrund dieser Daten sogar recht verlässliche Vorhersagen zum Zeitpunkt einer Eislawine zu machen, bringt das alles nichts, solange man nicht weiss, wohin man die Augen oder die Sensoren richten muss. Der Klimawandel verändert das Gesicht der Alpen mit einer Geschwindigkeit, die wir bislang nicht gekannt haben. Das überfordert unsere Vorstellungskraft und unsere Anpassungsfähigkeit. Durch das Schmelzen der Gletscher und das Auftauen des Permafrosts, der als Kit für steile Felswände enorm wichtig ist, entstehen ständig und überall neue Situationen. Nur die wenigsten davon sind tatsächlich gefährlich. In einigen Fällen bewirkt das komplette Verschwinden des Eises sogar eine Entspannung und eine längerfristige Stabilisierung. Aber nur schon eine Handvoll unbekannter und unerwarteter Gefahrenstellen können eine grosse Herausforderung für das Leben in Talschaften, sowie für die touristische Nutzung des Gebirges sein. Die Unsicherheit darüber, wo wir uns in Sicherheit wähen können und wo nicht, nimmt zu.

Berechnung der künftigen Gletscher-Entwicklung

Während Gletscherschmelze in der Vergangenheit direkt beobachtet werden kann, ist die Anwendung von Berechnungs-Modellen unumgänglich, um ihre zukünftige Entwicklung zu erforschen und um physikalische Zusammenhänge und verstärkende Mechanismen zu verstehen. Solche mathematischen Verfahren beschreiben die Auswirkungen der Änderungen von z.B. Temperatur, Niederschlag oder Sonneneinstrahlung auf die Schneemenge auf dem Gletscher und die Schmelze von Schnee und Eis. Andererseits wird der durch das Fliesen des Eises beeinflusste Rückgang der Gletscherzunge als verzögerte Reaktion auf den Klimawandel berechnet.

Zukunftsprognosen für Gletscher werden durch regionale oder globale Klimamodelle angetrieben. Diese liefern unter anderem Daten zur Entwicklung von Temperatur und Niederschlag im 21. Jahrhundert aufgrund von Annahmen zu verändertem CO₂-Aus-



Abb. 5: Berechneter Rückgang des Grossen Aletschgletschers während des 21. Jahrhunderts. Links: aktuelle Ausdehnung. Mitte: berechnete Ausdehnung um 2100 für ein Szenario ohne Klimaschutz. Rechts: berechnete Ausdehnung um 2100 für ein Szenario mit starkem Klimaschutz (Graphik modifiziert nach Jouvét & Huss, 2019).

stoss und den daraus entstehenden Reaktionen im globalen Klimasystem. Heute existiert eine Vielzahl von Klimamodellen, deren Resultate eindeutig auf eine auch in Zukunft schnell voranschreitende, markante Erwärmung der Atmosphäre hindeuten (IPCC, 2019). Die Beschreibung der vielschichtig zusammenhängenden, klimatischen Prozesse ist jedoch äusserst komplex. Deshalb unterscheiden sich die einzelnen Klimamodelle bezüglich der erwarteten Erwärmung. Die wichtigste Unsicherheit betrifft jedoch die künftigen Emissionen von Treibhausgasen. Diese hängen von der Entwicklung der verfügbaren Technologien, den globalen politischen Strategien zur Eindämmung der Klimakrise, sowie den Entscheidungen und Möglichkeiten jedes einzelnen von uns ab. Um die Veränderung von Gletschern im 21. Jahrhundert zu analysieren, müssen daher Berechnungen, basierend auf verschiedenen Szenarien, durchgeführt werden.

Abb. 5 zeigt exemplarisch die berechnete Entwicklung des Aletschgletschers, des grössten Gletschers der Alpen, für zwei mögliche Entwicklungen des Klimas. Es wurde ein Szenario betrachtet, das keinerlei Massnahmen zum Klimaschutz annimmt. Das andere Szenario entspricht einer vollständigen und vor allem weltweiten Umsetzung der Versprechen, welche die Staatengemeinschaft anlässlich des Pariser Klimaabkommens im Jahr 2015 gemacht

hat. Demnach müsste die Menschheit spätestens ab 2060 CO₂-neutral leben. Welches der beiden Szenarien eintritt, lässt sich heute noch nicht sagen. In den letzten Jahrzehnten änderte das Klima tendenziell gemäss der Entwicklung, welche von fehlendem Klimaschutz ausgeht. In vielen Regierungen hat nun aber ein Umdenken stattgefunden, und ehrgeizige Ziele zur Eindämmung der Emissionen wurden gesetzt, so dass die günstigste Entwicklung mit sehr grossen Anstrengungen und sofortigem Handeln weiterhin erreicht werden könnte.

Gemäss den Resultaten des detaillierten Berechnungs-Modells wird der Aletschgletscher bis zum Ende dieses Jahrhunderts zwischen 60 % und 95 % seines heutigen Volumens verloren haben. Während bis 2050 der Gletscherrückgang noch einigermaßen gemächlich vor sich geht, ist eine deutliche Beschleunigung in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zu erwarten. Mehrere eindruckliche Gletscherseen könnten im tief eingeschnittenen Tal unter dem Eis zum Vorschein kommen und den Rückgang noch weiter beschleunigen. Das Gletscher-Modell zeigt klar: Der Grosse Aletschgletscher wird sich auch im Falle der günstigsten, annehmbaren Klimaentwicklung in den nächsten Jahrzehnten deutlich zurückbilden. Einerseits erklärt sich dies damit, dass auch mit schneller Reduktion der Treibhausgas-Emissionen die globalen Temperaturen weiter steigen und sich erst gegen Ende des

Jahrhunderts stabilisieren. Andererseits hat der Aletschgletscher eine sehr lange Reaktionszeit – seine Ausdehnung entspricht dem Klima von vor rund 50 Jahren. Selbst wenn sich die Temperaturen ab dem heutigen Tag nicht mehr ändern, wird sich die Gletscherzunge um über 6 Kilometer zurückziehen (JOUVET & HUSS, 2019). Um den Grossen Aletschgletscher in seiner aktuellen Form zu bewahren, hätte man schon in einer Zeit handeln müssen, als noch niemand vom Klimawandel sprach. Trotzdem macht Klimaschutz einen wichtigen Unterschied, auch für den Aletschgletscher: Ohne Anstrengungen zur Reduktion der Emissionen verschwindet das Gletschereis bis auf ein paar kümmerliche Reste vollständig. Beim Jungfraujoch stünde man auf dem Trockenen. Mit umfassendem Klimaschutz hingegen, verbleibt ein beträchtliches Eisvolumen in hohen Lagen. Die Gletscher würden auch im Jahr 2100 noch am Konkordiaplatz zusammenfliessen (Abb. 5). Wenn dieses Szenario eintritt, könnten also auch

unsere Enkel noch ansehnliche Gletscher in den Alpen bewundern.

Die Gletscherschmelze aufhalten?

Angesichts des massiven und auch durch ehrgeizigen Klimaschutz nur zu einem gewissen Teil aufhaltbaren Gletscherschwundes, kommt immer wieder die Frage auf, ob man die Schmelze künstlich reduzieren kann. Dieses Thema findet vielleicht daher grosse Resonanz, da es ein gutes Gefühl gibt, mit ganz konkreten Massnahmen gegen die deutlich sichtbaren Auswirkungen der Klimakrise anzukämpfen. Hier werden zwei Fälle beleuchtet, wie ingenieurstechnische Methoden zur Eindämmung der Eisschmelze eingesetzt werden, und was diese bewirken können.

Seit über einem Jahrzehnt haben mehr als ein Dutzend Gletscher-Skigebiete in allen Alpenländern die Abdeckung des Eises mit weissen Tüchern, sogenannten Geotextilien, im Programm. Diese Methode hat sich

Abb. 6: Effekt der Gletscher-Abdeckung mit weissem Fleece am Beispiel des Rhonegletschers, Schweiz. Innerhalb des letzten Jahres wurde diese Mächtigkeit an Eis-Schmelze verhindert.

Foto: M. Huss



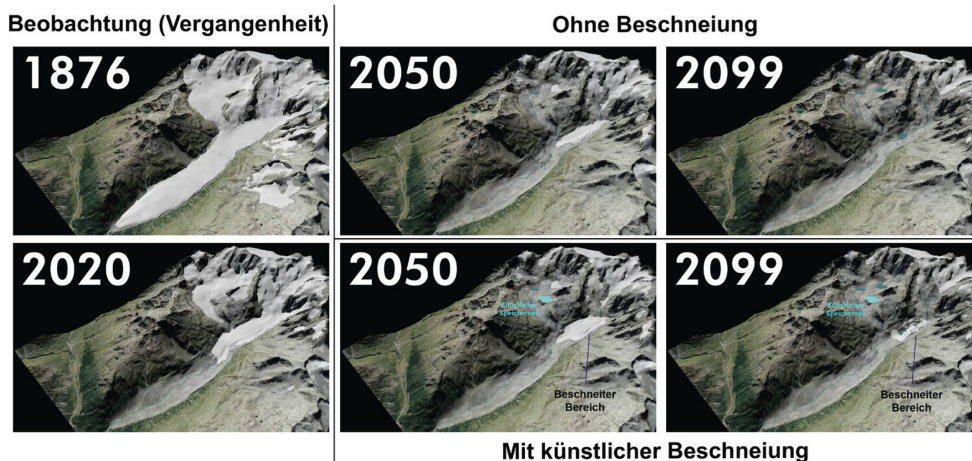


Abb. 7: Rückgang des Morteratschgletschers mit und ohne Implementierung des Projekts zur künstlichen Beschneigung eines Bereiches auf der Gletscherzunge (OERLEMANS ET AL., 2017). Links: beobachteter Gletscher-rückgang im letzten Jahrhundert. Rechts oben: berechnete Gletscher-Entwicklung basierend auf einem mittleren Klimaszenario.

Rechts unten: berechnete Entwicklung unter Einbezug der künstlichen Schneeproduktion zum Gletscherschutz.

Visualisierung:
E. Mattea

als sehr effizient erwiesen, um die Schmelze lokal zur verringern. Bis zu 60% weniger Schnee und Eis schmilzt unter dem Fleece-Material, da dieses die Sonnenstrahlung zurückreflektiert und warme Winde abhält (OLEFS & FISCHER, 2008). Wenn das Fleece im Frühsommer platziert und im Herbst vor dem ersten Schneefall wieder eingerollt wird, kann teils sogar lokal Gletschermasse aufgebaut werden. Noch effizienter ist die Gletscher-Abdeckung in tieferen Lagen, wo ohne Schutz besonders viel Eis schmilzt. Auf dem Rhonegletscher wird seit 2009 eine touristische Eisgrotte mit dieser Methode am Leben gehalten. Pro Jahr können unter der Abdeckung bis zu 4 Meter Eis «gerettet» werden (Abb. 6). Eine Hochrechnung auf die ganze Schweiz zeigt allerdings, dass mit der ganzen aktuell künstlich abgedeckten Gletscherfläche gerade einmal rund 0.03% des jährlichen Eisverlustes verhindert werden (HUSS ET AL., 2021). Obwohl die Gletscher-Abdeckung also lokal gut funktioniert und sich für Skigebiete durchaus lohnen kann, ist der Effekt auf der Skala ganzer Gletscher, oder gar einer Gebirgsregion, verschwindend klein. Durch eine Kombination von verschiedenen Datensätzen und Resultaten glaziologischer Modelle konnte auch gezeigt werden, dass selbst ein komplettes «Einpacken» aller Gletscher mit Fleece den Eisverlust nur verlangsamen, nicht aber aufhalten würde (HUSS ET AL., 2021). Zusätzlich wären

sowohl Kosten wie auch Umweltauswirkungen gewaltig und würden Prinzipien der Nachhaltigkeit in höchstem Mass verletzen.

Ein spektakuläres Projekt ist im Engadin in Diskussion. Der Rückgang des Morteratschgletschers, dem grössten Gletscher Graubündens, soll durch ein umfassendes System von Anlagen zur künstlichen Schneeproduktion, welche an Seilen über dem Eis hängen, verlangsamt werden (OERLEMANS ET AL., 2017). Mit dieser neuen Technologie sollen grosse Schneemengen auf einer Fläche von knapp 1 km² im Zehrgebiet des Gletschers abgelagert werden. Dies erhöht die Rückstrahlungsfähigkeit und minimiert die Schmelze. Der Fokus ist grundsätzlich anders als bei der Gletscher-Abdeckung mit Fleece in Skigebieten, wo das Eis in kleinem Massstab nur genau dort bewahrt wird, wo es besonders benötigt wird. Hier wird angestrebt, den Gletscher als Ganzes so weit als möglich zu bewahren, um seine touristische Attraktivität und die Funktion des Eises als Wasserspeicher aufrechtzuerhalten.

Um zu analysieren, welchen Effekt ein solch grossflächiger Einsatz modernster Technologie – auch als Georingeneering bezeichnet – auf die langfristige Entwicklung des Gletschers haben kann, wurde ein räumlich verteiltes Modell zur Bestimmung von Schneefall, Schmelze und Abfluss, sowie der Fliessdynamik des Eises eingesetzt (HUSS ET AL., 2008). Dieses Berechnungs-

Verfahren wurde mit verschiedenen Messdaten geeicht, die einen Zeitraum von mehr als einem Jahrhundert abdecken. Mit Klimaszenarien konnte dann die Entwicklung des Morteratschgletschers bis ins Jahr 2100 berechnet werden (*Abb. 7*). Die Resultate decken sich mit denen aller Talgletscher in den Alpen: Ein massiver Rückgang und ein Verlust der Eismasse mit Ausnahme unzusammenhängender, kleiner Gletscher als Überbleibsel des einst eindrücklichen Eispanzers ist zu erwarten. Bemerkenswert ist auch die gewaltige beobachtete Veränderung seit dem 19. Jahrhundert – im Vergleich zur riesigen Gletscherzunge von damals ist der Morteratsch-Gletscher schon heute nur noch ein Schatten seiner selbst.

Um den Effekt der geplanten künstlichen Schneeproduktion im Detail berücksichtigen zu können, wurde ein zusätzliches Berechnungs-Modell spezifisch für diesen Prozess erstellt. Dabei wurde einerseits berücksichtigt, wie viel Schneemasse bei optimalen Bedingungen durch die Anlage produziert werden kann, wie auch ob Wasser in ausreichender Menge und zur rechten Zeit verfügbar ist. Auch hier wurden Klimaszenarien angewendet, um die Auswirkungen veränderter Temperatur-Verhältnisse abbilden zu können. Die Resultate zeigen eindeutig, dass – unabhängig davon, ob die enormen Investitionen von rund 150 Millionen Franken (KELLER ET AL., 2021) für die Umsetzung des Projekts je aufgewendet werden könnten – der Erfolg beschränkt ist (*Abb. 7*). Zwar wird der Gletscherrückgang etwas verlangsamt und selbst im Jahr 2100 findet sich im beschneiten Bereich noch etwas Eis. Dennoch bleibt nur ein losgelöster Block Toteis zurück, bei dem man nicht mehr von einem Gletscher sprechen kann. Und auch um diesen Effekt zu erzielen, sind die Eingriffe in die intakte und momentan teils geschützte Bergwelt beträchtlich: Um Wasser für die Schneeproduktion im Winter bereitstellen zu können, müsste ein grosser, künstlicher See auf einer schwer zugänglichen Felsinsel zwischen zwei Gletschern errichtet werden (*Abb. 7*). Auch der Bau der Seile, an welchen die Schneekanonen angebracht werden, wäre eine ernstzunehmende bauliche Herausforderung (KELLER ET AL.,

2021). Beides würde die Landschaft um den Gletscher, heute ein Magnet für unzählige Touristen aus aller Welt, massgeblich und langfristig verändern.

Diese Betrachtung macht deutlich, wie schwierig die «Rettung» eines ganzen Gletschers ist, auch wenn neuste Technologie eingesetzt wird. Zudem reicht es nicht aus, einen einzelnen Gletscher zu bewahren, um die negativen Konsequenzen der Entgletscherung auf den Abfluss aufzuheben. Der Gletscherschwund kann nur durch umfassende und weltweite Reduktionen der Treibhausgas-Emissionen verlangsamt werden – und dies nicht nur in den Alpen, sondern auch in Regionen, wo die Auswirkungen eines Verlustes der Gletscher noch viel dramatischer wären.

Schlussfolgerung

Als überdimensionale Thermometer illustrieren Gletscher mit ihrem massiven Rückgang eindrücklich und eindeutig die Veränderung des Klimas – sie sind die Botschafter des Klimawandels. Die Dokumentation der Gletscherschmelze mit genauen Messdaten ist zentral, um das Verhalten des «ewigen» Eises in der Klimakrise verstehen zu können und ihre künftige Veränderung, wie auch die vielschichtigen Auswirkungen des Eisverlustes, bestimmen zu können. In den Alpen, wie auch weltweit, zeichnet sich ein düsteres Bild für die Zukunft: Eine weitere Beschleunigung der Schmelze ist zu erwarten, sogar, wenn weitreichende Massnahmen zum Klimaschutz sofort umgesetzt werden. Dennoch könnte mit einer Reduktion der Treibhausgas-Emissionen ein Teil des Gletschervolumens erhalten werden, was die Auswirkungen abschwächen würde. Lokale Massnahmen zur Reduktion der Gletscherschmelze, zum Beispiel mit weissen Tüchern, funktionieren. Allerdings sind sie nicht skalierbar auf ganze Gletscher oder gar Gebirgszüge.

Referenzen

- 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.
- HUGONNET, R., McNABB, R., BERTHIER, E., MENOUNOS, B., NUTH, C., GIROD, L., FARINOTTI, D., HUSS, M., DUSSAILLANT, I., BRUN, F. & KÄÄB, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726–731.
- 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., 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.
- IPCC (2019): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. H.-O. PÖRTNER, D.C. ROBERTS, V. MASSON-DELMOTTE, P. ZHAI, M. TIGNOR, E. POLOCZANSKA, K. MINTENBECK, A. ALEGRÍA, M. NICOLAI, A. OKEM, J. PETZOLD, B. RAMA and N.M. WEYER (eds.).
- JOUVET, G., & HUSS, M. (2019). Future retreat of Great Aletsch Glacier. *Journal of Glaciology*, 65(253), 869–872.
- KELLER, F., MÜLLER, D., LEVY, C. & SEUPEL, C. (2021). Vorstudie Gletscherschutzprojekt MortAlive. https://mortalive.ch/downloads/Schlussbericht_MortAlive.pdf
- 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.
- MARZEION, B., COGLEY, J. G., RICHTER, K., & PARKES, D. (2014). Attribution of global glacier mass loss to anthropogenic and natural causes. *Science*, 345(6199), 919–921.
- 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(1–2), 189–203.
- OLEFS, M., & FISCHER, A. (2008). Comparative study of technical measures to reduce snow and ice ablation in Alpine glacier ski resorts. *Cold regions science and technology*, 52(3), 371–384.
- RÉVEILLET, M., DUMONT, M., GASCOIN, S., ET AL. (2022) Black carbon and dust alter the response of mountain snow cover under climate change. *Nat Commun* 13, 5279.
- ZEKOLLARI, H., HUSS, M., & FARINOTTI, D. (2019). Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere*, 13(4), 1125–1146.
- ZEMP, M., HAEBERLI, W., HOELZLE, M., & PAUL, F. (2006). Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters*, 33(13).
- ZEMP, M., FREY, H., GÄRTNER-ROER, I., NUSSBAUMER, S. U., HOELZLE, M., PAUL, F., ... & BAJRACHARYA, S. (2015). Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, 61(228), 745–762.

Matthias Huss



ist Glaziologe an der ETH Zürich, der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, und der Universität Freiburg. Seit 2016 leitet er das Schweizer Gletschermessnetz (GLAMOS). Er beschäftigt sich mit der Messung und der Berechnung der Gletscher-Veränderung auf der lokalen bis hin zur globalen Skala.