

Gletscherschmelze in Zeiten des Klimawandels

Matthias Huss

Zusammenfassung

Der Rückgang der Gletscher in den Alpen und weltweit ist eine eindrückliche Manifestation des Klimawandels. Das Schwinden des »ewigen« Eises bringt aber auch verschiedenste negative Auswirkungen mit sich: Lawinen und Gletscherfluten, Veränderungen für Tourismusdestinationen, Engpässe in der Wasserversorgung und der Energieproduktion aus Wasserkraft sowie den Anstieg des Meeresspiegels. Langfristige Messungen des Gletscherschwundes sind essenziell, um das zugrunde liegende Prozesssystem zu verstehen und es in numerischen Modellen zu repräsentieren. Daten aus der Schweiz zeigen eine gewaltige Beschleunigung der Gletscherschmelze in den letzten Jahren auf, mit bis vor kurzem kaum vorstellbaren Verlusten. Zum Beispiel gingen allein in den Jahren 2022 und 2023 10 % des gesamten Eisvolumens verloren. Zukunftsprognosen deuten auf einen möglicherweise vollständigen Verlust der Alpengletscher bis Ende dieses Jahrhunderts hin. Mit einem schnellen und umfassenden Klimaschutz könnten die größten Gletscher jedoch noch gerettet werden. Vor allem für die Polarregionen mit den umfangreichsten Eisreserven weltweit könnte durch einen ambitionierten Klimaschutz ein Unterschied erzielt werden, um die global schwerwiegendsten Folgen abzuwenden.

Summary

Glacial Melt in Times of Climate Change

The retreat of glaciers in the Alps and worldwide is a striking manifestation of climate change. Beyond its symbolic significance, the loss of the 'eternal' ice also entails a wide range of negative consequences: avalanches and glacial floods, changes for tourism destinations, shortages in water supply and hydropower production, as well as sea-level rise. Long-term measurements of glacier retreat are essential for understanding the underlying processes and for representing them in numerical models. Data from Switzerland reveal a dramatic acceleration of glacial melt in recent years, with loss rates that were hardly imaginable until recently. For instance, in the years 2022 and 2023 alone, 10% of the total ice volume was lost. Projections indicate a possible complete loss of Alpine glaciers by the end of this century. However, with rapid and comprehensive climate action, the largest glaciers could still be preserved. This would be particularly crucial for the polar regions, which hold the largest ice reserves, in order to prevent the most severe global consequences.

Der Beitrag basiert auf einem von dem Autor überarbeiteten Transkript seines Vortrags vom 25. März 2025 in der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

✉ Dr. Matthias Huss, ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Hönggerbergstr. 26, 8093 Zürich, Schweiz; huss@vaw.baug.ethz.ch

Einführung

Gletscher sind Botschafter des Klimawandels, sie haben die Kraft, Menschen die starken Veränderungen, die wir in den letzten Jahrzehnten gesehen haben, direkt begreiflich zu machen. Jede und jeder versteht auch ohne wissenschaftliche Berichte, dass sich etwas im Klimasystem verändert, wenn das Eis schmilzt. Die Veränderungen in der Landschaft laufen sehr schnell ab, wie Aufnahmen vom Tschiervagletscher in der Ostschweiz zeigen, der sich innerhalb von 90 Jahren von einer von großen, leuchtenden Eisströmen dominierten zu einer felsigen, weitgehend eisfreien Landschaft entwickelt hat. Die noch vorhandenen Gletscher liegen als Resteis grau in den Hängen (Abb. 1). Gletscher sind einerseits faszinierend, da sie dynamisch und »lebendig« sind. Eis ist nicht starr, sondern bewegt sich unter dem Einfluss der Schwerkraft. Dies macht es andererseits auch schwer, Gletscher zu »greifen« und ihre Entwicklung zu prognostizieren.

Nicht nur in Europa verändern sich die Gletscher unglaublich schnell. Der Gletscherrückgang ist ein globales Phänomen. So ist auch die Landschaft am Muir Glacier in Alaska innerhalb von zwei Generationen, von 1941 bis 2004, von einem eiszeitartigen Gebiet mit gewaltigen Gletschern zu einem mediterran anmutenden Fjord übergegangen.¹ Die Vegetation ist erstaunlich schnell zurückgekehrt und nimmt den freigegebenen Raum wieder ein.

In der Schweiz haben wir bis heute schon über 1000 kleine Gletscher verloren, z.B. den Pizolgletscher in der Ostschweiz, an dem wir die Gletscherbeobachtungen 2021 aufgeben mussten. 2019 haben wir dort eine Abschiedszeremonie mit 250 Leuten, inklusive eines Pfarrers, gefeiert. Heute ist eine Steinwüste anstelle des Gletschers zurückgeblieben.

2025 ist das Internationale Jahr der Erhaltung der Gletscher und am 21. März 2025 war der erste Weltgletschertag, ausgerufen von der UN², an

dem die Gletscher und ihr Rückgang weltweit im Scheinwerferlicht standen.

Die Konsequenzen des Gletscherrückgangs beginnen im Hochgebirge selbst, wo es verstärkt zu Instabilitäten und Massenbewegungen z.B. in Form von Lawinen, zu auftauendem Permafrost und zum Ausbruch von Gletscherseen kommt. Weiter hat die Veränderung der Hochgebirgslandschaft Auswirkungen auf den Tourismus, auf die Wasserkraftnutzung, die öffentliche Wasserversorgung und die Wasserverfügbarkeit z.B. zur Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen, bis hin zum Meeresspiegelanstieg. Der Rückgang der Eismassen betrifft also Millionen von Menschen weltweit, von den Gebirgsregionen bis hin zu den Ozeanen. Das Studium von Gletschern und das Verständnis ihrer Veränderungen, in Vergangenheit und Zukunft, ist deshalb ausgesprochen wichtig, um uns für eine durch den Klimawandel geänderte Welt vorzubereiten.

Gletscherbeobachtung in der Schweiz

In den letzten drei Jahren, die in Bezug auf die Gletscherschmelze extrem waren, ist die Gletscherzunge des Rhonegletschers (Wallis, Schweiz) zerfallen (Abb. 2). Ihre Dicke und Breite hat abgenommen und wir sehen Auflösungserscheinungen mit einem Zusammenbrechen des Gletschers aus dem Inneren. Auf dem Großen Aletschgletscher im Kanton Wallis, dem flächenmäßig größten und längsten Gletscher der Alpen, gingen allein im Jahr 2022 an der mächtigsten Stelle, dem Konkordiaplatz, 6 Meter Eis verloren. Um den Gletscher im Gleichgewicht zu halten, müsste an dieser Stelle, am Zusammenfluss von Großem Aletschfirn, Jungfraufrirn und Ewigschneefeld, eine ausgeglichene Bilanz herrschen, d.h., der Winterschnee müsste bis zum Ende des Sommers gerade verschwinden und es dürfte kein Eis verloren gehen.

Ähnliches sehen wir an einer Messstelle im oberen Teil des Aletschgletschers am Jungfraujoch (3350 m), wo seit über 100 Jahren die Schneeablagerung und -schmelze bestimmt wird. Es handelt sich um einen der niederschlagsreichsten Orte der Alpen. Aufgrund der großen Höhe ist die Schneeschmelze gering. Im Normalfall beträgt die Schneehöhe, die am Ende des Sommers noch liegt, daher durchschnittlich 3–4 Meter (2 m Wasseräquivalent, Abb. 3). Von

1 <https://www.usgs.gov/media/before-after/muir-and-riggs-glaciers-retreat-between-1941-2004> [abgerufen 04.04.2025].

2 International Year of Glaciers' Preservation, 2025. Resolution adopted by the General Assembly on 14 December 2022. – Resolution A/RES/77/158 der UN, https://digitallibrary.un.org/record/3998543/files/A_RES_77_158-EN.pdf [abgerufen 04.04.2025].



Abb. 1. Tschervagletscher (Vadret da Tschierva), östliche Schweizer Alpen, 1935 (oben) und 2022 (unten).
– Fotos: © swisstopo und VAW, ETH Zürich.



Abb. 2. Gletscherzunge des Rhonegletschers (Wallis, Schweiz) im Juni 2022, im September 2022, im September 2023 und im September 2024. – Fotos: VAW, ETH Zürich.

1920 bis 2021 gab es kein einziges Jahr, in dem ein Verlust aufgetreten ist. Das Extremjahr 2022 liegt dagegen weit außerhalb der statistischen Verteilung (–4,3 Standardabweichungen) und es hat neue Standards in unserem Verständnis des Klimawandels gesetzt. In diesem Jahr kamen in den Alpen drei sehr ungünstige Faktoren für die Gletscher zusammen: (1) Wenig Schnee im Winter und daher ein schwacher Schutz des unterliegenden Eises, (2) sehr hohe Temperaturen während des ganzen Sommers, von Mai bis September, und (3) die Ablagerung von Saharastaub auf der Schneeoberfläche im Spätwinter, was den Schnee dunkel färbt und damit über die geringere Albedo die Schmelze beschleunigt.

Schweizweit ging das Eisvolumen allein seit dem Jahr 2000 um 38 % zurück, von 75 km³ Eis auf 46,5 km³. Die jährlichen Verluste lagen bis 2021 im Schnitt zwischen 1 und 3 %, in dem Extremjahr 2003 gingen 3,5 % des Schweizer Eises verloren (Abb. 4). Auch hier haben die Jahre 2022 und 2023 das Bild komplett gesprengt,

mit einem Eisverlust von zusammen über 10 %. Als ich 2022 gefragt wurde, wie wahrscheinlich es ist, dass auch 2023 ein solches Extremjahr auftritt, habe ich gesagt, dass rein statistisch die Chance sehr gering ist. Aber 2023 war das bisher zweitschlimmste Jahr für die Gletscher in der Schweiz – der Klimawandel verschiebt hier die statistischen Grundlagen. Im Jahr 2024 gab es sehr viel Winterschnee, aber aufgrund der starken Schmelze im Sommer war auch dieses Jahr von einem außergewöhnlichen Verlust geprägt.

Auch weltweit sind die Verluste groß (Hugonnet et al. 2021) und ziehen sich durch alle vergletscherten Regionen der Erde. Der sich beschleunigende Prozess läuft sehr schnell ab, mit einer jährlichen Verlustrate von rund 270 Gt Eis. Seit 2000 haben die Gletscher weltweit 7300 km³ an Eis verloren (GlaMBIE 2025). Zur Veranschaulichung: Diese Masse würde die ganze Fläche Bayerns mit einer Eisschicht von 100 m Dicke bedecken.

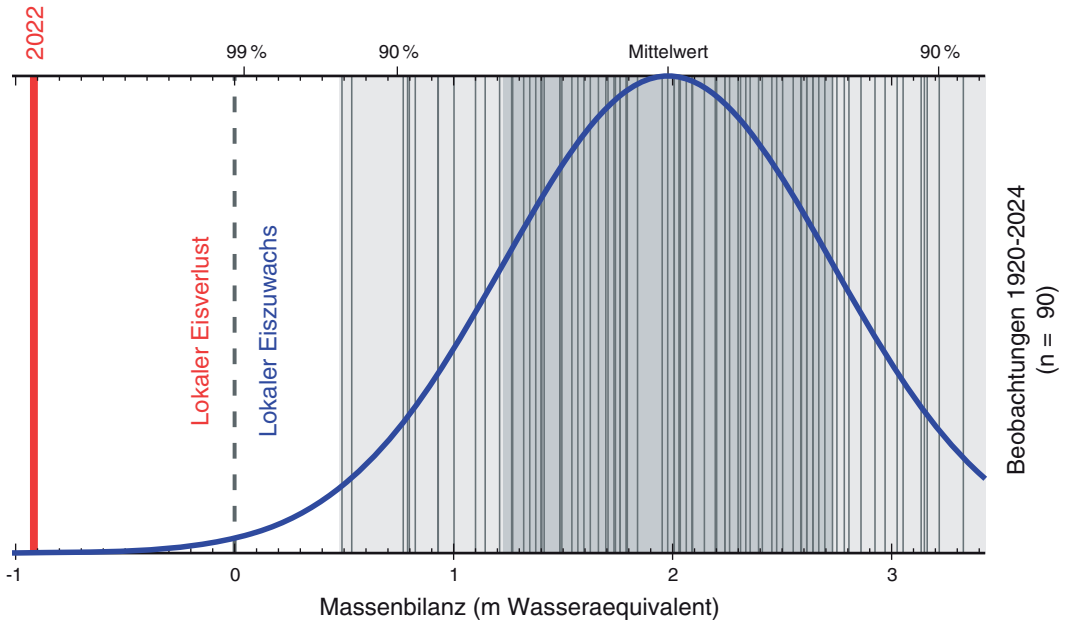


Abb. 3. Statistische Verteilung der lokalen Massenbilanz (in m Wasseräquivalenten) am Jungfraujoch (3350 m, Aletschgletscher) im Zeitraum 1920–2024; jede der Linien steht für ein Jahr, in Rot: 2022. – GLAMOS, Glacier Monitoring Switzerland.

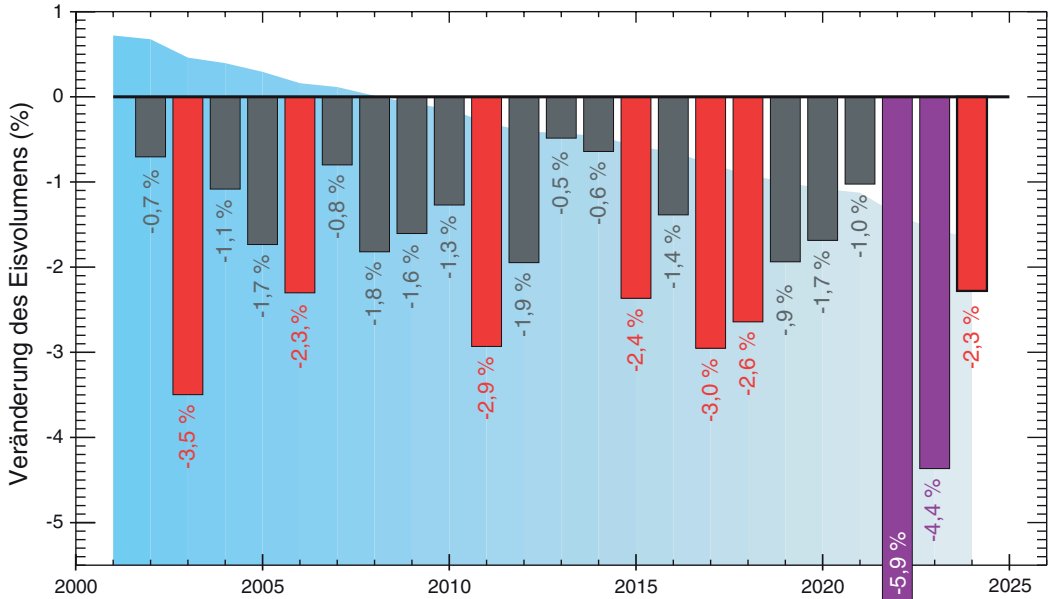


Abb. 4. Veränderung des Eisvolumens der Schweizer Gletscher im Vergleich zum Vorjahr (in %) von 2001 bis 2024; ■ vor 2022 als Extremjahre eingestufte Jahre, ■ Extremjahre 2022 und 2023. – GLAMOS, Glacier Monitoring Switzerland.

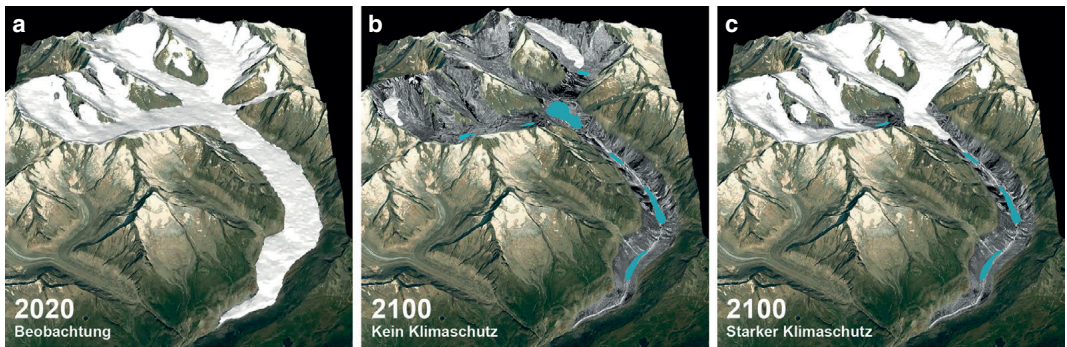


Abb. 5. Dreidimensionales Modell des Großen Aletschgletschers, **a:** gemäß Beobachtung 2020, **b:** ohne Klimaschutzmaßnahmen 2100 (RCP8.5) und **c:** mit starken, globalen Klimaschutzmaßnahmen (RCP2.6); RCP: Representative Concentration Pathways, gemäß IPCC (2014), S. 22. – Nach Jouvét & Huss (2019), Grafiken aktualisiert.

Rückgang der Gletscher in der Zukunft

Eine Simulation des Rückgangs des Großen Aletschgletschers anhand von Modellrechnungen zeigt, dass die Eisfläche von 2020 (Abb. 5a) ohne Klimaschutzmaßnahmen bis zum Jahr 2100 nahezu vollständig abgeschmolzen wäre (Abb. 5b, nach Jouvét & Huss 2019). Das entspricht in den Klimamodellen einem globalen Temperaturanstieg von etwa 5°C. Auch bei einem starken, globalen Klimaschutz (Erwärmung um 1,5°C) würde der Gletscher bis 2100 seine gewaltige Zunge, die heute noch bis zu 500 m dick ist, verlieren, aber es könnte noch ein intakter Rest im oberen Teil des Gletschers bewahrt werden (Abb. 5c). Auch wenn dieses sehr ambitionierte Klimaszenario nur zu erreichen wäre, wenn die Welt bis ins Jahr 2060, einschließlich z. B. der USA, Russland, China und Indien, komplett CO₂-neutral würde, zeigt es doch, dass es noch einen gewissen Handlungsspielraum gibt.

Weltweit ergibt ein Szenario ohne Klimaschutzmaßnahmen (globaler Temperaturanstieg um 5°C) einen Verlust von etwa 2/3 aller Gletscher bis zum Jahr 2100. Ein Temperaturanstieg von 3°C, 2°C bzw. 1°C (optimaler Klimaschutz) würde zu einem Verlust von 41 %, 28 % bzw. 20 % führen. Auch dies zeigt, dass aktuell noch ein Spielraum vorhanden ist, der vor allem auf den Gletscherschwund in den Polargebieten beruht. Bei einer starken Reduzierung der Emissionen (optimaler Klimaschutz, Erwärmung um 1°C) beträgt der Eisverlust in den Polargebieten nur

9 % (bei 2°C: 14 %, bei 3°C: 24 %, bei 5°C, d. h. ohne Klimaschutz: 56 %; Huss & Hock 2015, Rounce et al. 2023, Zekollari et al. 2024).

In den europäischen Zentralalpen würden dagegen auch bei optimalem Klimaschutz (globaler Temperaturanstieg um 1°C) 60 % der Gletscher verloren gehen (79 % bei 2°C, 90 % bei 3°C, 98 % bei 5°C, d. h. ohne Klimaschutz). In Asien beträgt der Verlust bei optimalem Klimaschutz 50 % (65 % bei 2°C, 78 % bei 3°C, 91 % bei 5°C; Huss & Hock 2015, Rounce et al. 2023, Zekollari et al. 2024). Es muss hier aber auch betont werden, dass die optimistischsten Szenarien, die Erwärmung auf nur 1°C gegenüber dem 19. Jahrhundert zu beschränken, aktuell praktisch nicht mehr umsetzbar sind. Mit der aktuellen Politik steuern wir auf eine globale Erwärmung von 2,7 °C bis ins Jahr 2100 zu.

Auswirkungen des Gletscherrückgangs

Wie die Daten zeigen, ist ein Teil des Eisverlustes auch bei optimalem Klimaschutz nicht mehr zu verhindern, und dieser Prozess ist nicht reversibel – »we cannot negotiate with the melting point of ice«, wie es im Berichtband State of the Cryosphere 2024 heißt (ICCI 2024). Dies dürfen wir nicht vergessen, wenn wir über die Auswirkungen des Gletscherrückgangs sprechen. Um noch etwas zu bewirken, ist sofortiges Handeln erforderlich.

Nach Berechnungen des IPCC wird der Meeresspiegel bis 2100 in dem Szenario mit starken,

globalen Klimaschutzmaßnahmen (RCP2.6) um 0,4 m bzw. um 0,9 m in dem Szenario ohne Klimaschutzmaßnahmen (RCP 8.5) ansteigen, verglichen mit dem Zeitraum 1986–2005 (Oppenheimer et al. 2019). Vor allem in Kombination mit Fluten und Stürmen betrifft ein derartiger Anstieg Millionen, wenn nicht Milliarden von Menschen in Küstenregionen. Das Abschmelzen der gegenüber den polaren Eisschilden vergleichsweise kleinen Gletschern weltweit trägt bis etwa 2100 zu dem Anstieg bei; langfristig, bis 2300, dominieren jedoch die großen Eisschilde von Grönland und der Antarktis das Geschehen. Ohne Klimaschutzmaßnahmen wird der Meerespiegelanstieg nach den Modellrechnungen bis 2300 bei knapp 4 m liegen, unter Berücksichtigung von derzeit noch ungenügend erforschten Feedback-Mechanismen könnte er sogar noch höher sein (Oppenheimer et al. 2019).

Auch in Bezug auf andere wichtige Parameter im Klimasystem traten wir in den letzten Jahren in eine Phase mit völlig neuen, teils schwer vorstellbaren Werten. Zum Beispiel lag die durchschnittliche Ozeantemperatur massiv über den bisherigen Rekorden. Die globale Mitteltemperatur hat erstmals für längere Zeit die Grenze von +1,5 Grad über dem vorindustriellen Mittel überschritten. Und derzeit erleben wir die mit Abstand geringste beobachtete Ausdehnung des arktischen Meereises seit Beginn der Aufzeichnungen 1979 (NSIDC 2025).

Zu den direkten Gefahren durch Gletscher in einer veränderten Umwelt zählt z. B. die Bildung von Gletscherseen und das Auftauen von Permafrost (Krautblatter 2026 in diesem Band). Gletscherseen und ihr plötzlicher Ausbruch stellen eine beträchtliche Bedrohung für die unterliegenden Siedlungen und Täler dar. Sie können sich plötzlich bilden, sehr groß werden und entsprechend schnell ausbrechen. Ein Beispiel hierfür ist der eisgestaute See am Kyagar-Gletscher im Karakorum-Gebirge. 2012 Jahren konnten wir den See besuchen und dort eine Warnstation installieren, die u. a. den Seespiegel automatisch vermisst (Haemmig et al. 2014). Bei unserem Besuch war der See klein und das Gefahrenpotenzial schien gering. Dann hat sich der Gletscher aber überraschend verhalten: Innerhalb eines Jahres ist er durch eine Instabilität des Eisfließens stark vorgestoßen und die Eisdicke hat sich um rund 100 Meter erhöht. Einen solchen Prozess, bei

dem auf eine längere Ruhephase oder einem Rückgang ein schneller, kurzzeitiger Vorstoß folgt, bezeichnet man als »surge«. Dem schnellen Vorstoß folgte ein rapider Rückgang. Das hat dazu geführt, dass sich der See plötzlich mit einem sehr großen Volumen aufgestaut hat, unsere Station geflutet hat und später ausgebrochen ist (Abb. 6, Round et al. 2017).

Durch das Auftauen von Permafrost kommt es vermehrt zu Hanginstabilitäten und gefährlichen Folgeereignissen, wie z. B. am Piz Cengalo, an dessen Nordflanke im August 2017 rund 3,1 Mio. m³ Felsmaterial ins Val Bondasca (Graubünden, Schweiz) stürzten. Der Bergsturz hatte direkt acht Menschenleben gefordert und anschließend in den Dörfern große Zerstörungen an Gebäuden und Infrastruktur durch Murgänge bewirkt.³

Daneben treten verstärkt Eislawinen durch Gletscherabbrüche auf, wie z. B. im Sommer 2022 in Kirgisistan eindrucksvoll von einem Bergsteiger gefilmt und ins Internet gestellt.⁴ Das Verhalten des Menschen in Bezug auf die Klimaänderung lässt sich gut anhand dieses Videos illustrieren: Man realisiert, dass etwas Großes auf einen zukommt, aber man wartet und beobachtet diese starke Veränderung. Erst im allerletzten Moment, wenn man die Gefahr für sein Leben erkennt, versucht man, noch schnell wegzulaufen, kommt aber nicht mehr ganz in Sicherheit. (Im Fall der gefilmten Eislawine ist keinem der Bergsteiger etwas passiert, aber es hätte auch anders ausgehen können.)

Gebirge als Wasserschloss der Erde

In einem wärmeren Klima werden gewaltige Veränderungen in der Wasserverfügbarkeit erwartet. Solange noch Reste von Eis in der umgebenden Felswüste liegen, gibt es in den Alpentälern und darüber hinaus im Sommer in Dürre- und Hitzeperioden noch Wasser. Ist das Eis hingegen ganz geschmolzen, wird vor allem in den trockenen Phasen im Jahr deutlich weniger Wasser zur Verfügung stehen. Auf Jahresbasis nimmt zwar

3 WSL, News und Medienarbeit, 15.03.2025, <https://www.wsl.ch/de/news/unwetter-und-bergstuerze-2017-acht-todesopfer-und-hohe-sachschaeden/> [abgerufen 07.04.2025]

4 <https://www.instagram.com/harryshimmin/reel/CfyT6xcA27D/?hl=de> [abgerufen 07.04.2025].

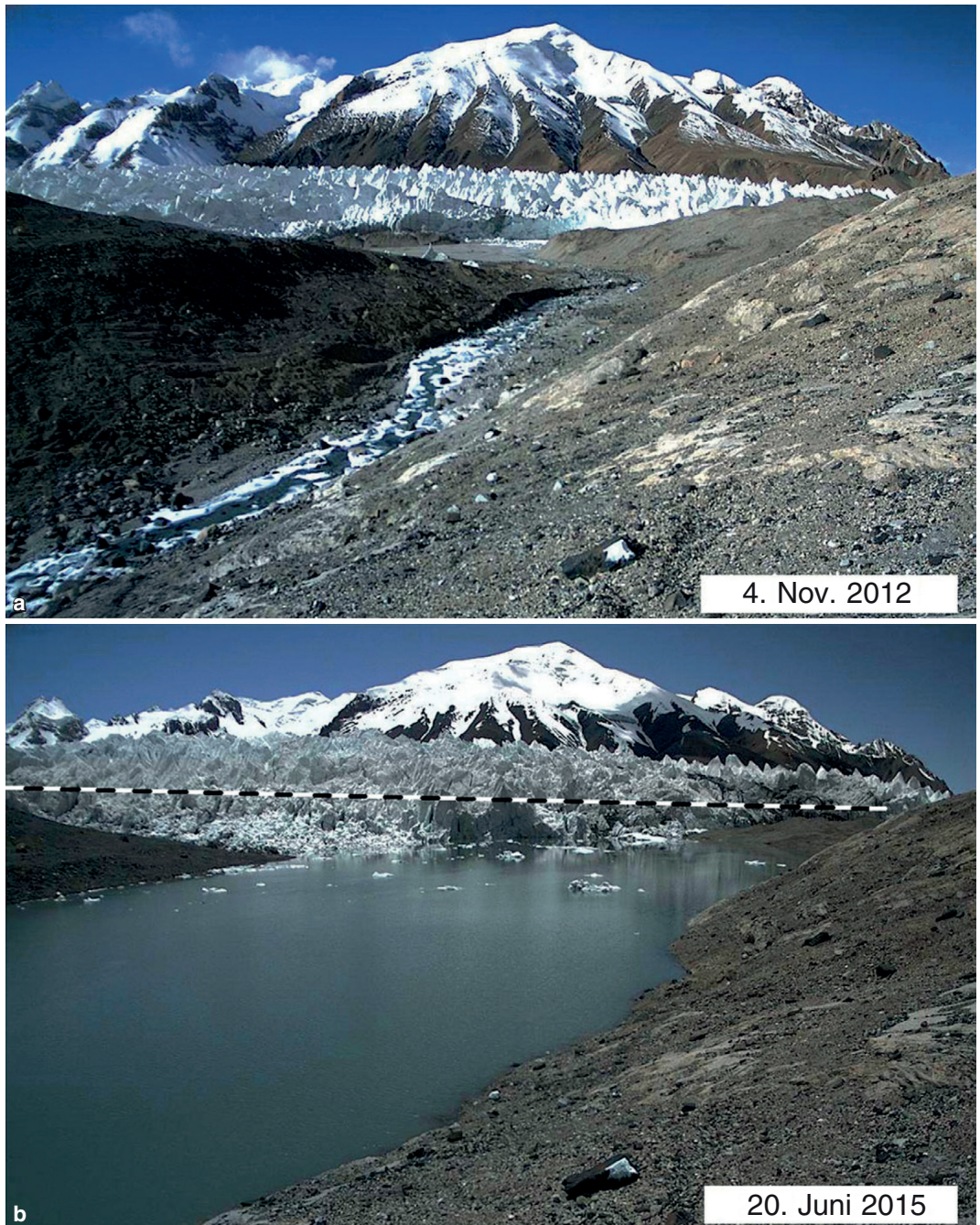


Abb. 6. Kyagar-Gletscher im Karakorum-Gebirge vor (a) und nach (b) seinem plötzlichen Vorstoß (surge). Der Gletschersee hat sich infolge des höheren Eisdamms aufgestaut (gestrichelte Linie, Höhe des Eisdamms 2012). – Abb. aus Round et al. (2017).

zunächst der Abfluss aus dem Hochgebirge zu, da das Eis, das seit Jahrhunderten eingelagert ist, abschmilzt. In dieser Phase liefern die noch vorhandenen Gletscher viel Wasser, da sie schnell schmelzen. Das Maximum der Abflusskurve wird jedoch vermutlich bald erreicht sein bzw. ist für kleinere Gletscher in den letzten Jahren oder Jahrzehnten bereits erreicht worden. Vor allem im Sommer wird der Abfluss dann konsistent rückgängig sein und in Trockenperioden fehlen (Huss & Hock 2018, Stahl 2026 in diesem Band).

Weltweit werden nicht alle Regionen mit Gletschern von dieser Entwicklung gleich betroffen sein. In gewissen Regionen – wie zum Beispiel im Einzugsgebiet des Ganges oder Brahmaputra – werden, trotz Rückgang der Gletscher, im gesamten hydrologischen System kaum Änderungen zu merken sein. In Zentralasien jedoch, wo das Klima v.a. im Sommer sehr trocken ist und die Gletscher noch sehr groß sind, und in Südamerika werden die Veränderungen im Gletscherabfluss die größten Veränderungen im Wasserhaushalt nach sich ziehen und zu einer Wasserknappheit in den Trockenzeiten führen. Wichtige Auswirkungen werden auch im Westen Kanadas und in Europa, vor allem im Rhonebecken und am Po, spürbar sein (Huss & Hock 2018).

Fazit

Gletscher sind eine visuelle Manifestierung der Klimakrise. Weltweit beobachten wir einen schnellen und sich beschleunigenden Rückgang sowohl in den zentraleuropäischen Alpen als auch weltweit. Der Klimawandel und das Abschmelzen der Gletscher im Hochgebirge hat lokal und regional, aber auch weltweit große Auswirkungen, z.B. auf die Wasserversorgung während sommerlicher Trockenperioden. Aber es besteht noch ein gewisser Handlungsspielraum. Die schlimmsten Auswirkungen könnten über intensive Klimaschutzmaßnahmen noch abgefedert werden.

Literatur

- GlaMBIE (The GlaMBIE Team, Glacier Mass Balance Intercomparison Exercise). 2025. Community estimate of global glacier mass changes from 2000 to 2023. – *Nature*, 639: 382–388. DOI: [10.1038/s41586-024-08545-z](https://doi.org/10.1038/s41586-024-08545-z)
- Haemmig, C., M. Huss, H. Keusen, J. Hess, U. Wegmüller, Z. Ao & Q. Kulubayi. 2014. Hazard assessment of glacial lake outburst floods from Kyagar glacier, Karakoram mountains, China. – *Annals of Glaciology*, 55: 34–44. DOI: [10.3189/2014AoG66A001](https://doi.org/10.3189/2014AoG66A001)
- Hugonnet, R., R. McNabb, E. Berthier, B. Menounos, C. Nuth, L. Girod, D. Farinotti, M. Huss, I. Dussaillant, F. Brun & A. Kääb. 2021. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. – *Nature*, 592: 726–731. DOI: [10.1038/s41586-021-03436-z](https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z)
- Huss, M. & R. Hock. 2015. A new model for global glacier change and sea-level rise. – *Frontiers in Earth Science*, 3: 54. DOI: [10.3389/feart.2015.00054](https://doi.org/10.3389/feart.2015.00054)
- Huss, M. & R. Hock. 2018. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. – *Nature Climate Change*, 8: 135–140. DOI: [10.1038/s41558-017-0049-x](https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x)
- ICCI. 2024. State of the Cryosphere 2024 – Lost Ice, Global Damage. – International Cryosphere Climate Initiative (ICCI), Stockholm, Sweden. 72 S. <https://iccinet.org/statecryo24/> [abgerufen 07.04.2025]
- IPCC. 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Core Writing Team, R. K. Pachauri & L. A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 S. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> [abgerufen 07.04.2025]
- Jouvet, G. & M. Huss. 2019. Future retreat of Great Aletsch Glacier. – *Journal of Glaciology*, 65: 869–872. DOI: [10.1017/jog.2019.52](https://doi.org/10.1017/jog.2019.52)
- Krautblatter, M. 2026. Auswirkungen von sich erwärmendem Permafrost auf Felsstürze, Hangbewegungen und alpine Naturgefahren. – In: Bayer. Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): Alpen ohne Eis. Gletscherschwund in den Alpen und seine Folgen. Pfeil, Günding: 85–93.
- NSIDC. 2025. Sea Ice Today. Analyses and daily images of sea ice conditions. – National Snow and Ice Data Center (NSIDC), Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES) at the University of Colorado Boulder, USA. <https://nsidc.org/sea-ice-today> [abgerufen 07.04.2025]
- Oppenheimer, M., B. C. Glavovic, J. Hinkel, R. van de Wal, A. K. Magnan, A. Abd-Elgawad, R. Cai, M. Cifuentes-Jara, R. M. DeConto, T. Ghosh, J. Hay, F. Isla, B. Marzeion, B. Meyssignac & Z. Sebesvari. 2019. Chapter 4 – Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. – In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Pörtner, H.-O., D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama & N. M. Weyer (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA: 321–445. DOI: [10.1017/9781009157964.006](https://doi.org/10.1017/9781009157964.006)

- Rounce, D. R., R. Hock, F. Maussion, R. Hugonnet, W. Kochtitzky, M. Huss, E. Berthier, D. Brinkerhoff, L. Compagno, L. Copland, D. Farinotti, B. Menounos & R. W. McNabb. 2023. Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. – *Science*, 5 Jan 2023, 379: 78–83. DOI: [10.1126/science.abo1324](https://doi.org/10.1126/science.abo1324)
- Round, V., S. Leinss, M. Huss, C. Haemmig & I. Hajnsek. 2017. Surge dynamics and lake outbursts of Kyagar Glacier, Karakoram. – *The Cryosphere*, 11: 723–739. DOI: [10.5194/tc-11-723-2017](https://doi.org/10.5194/tc-11-723-2017)
- Stahl, K. 2026. Wasser in uns aus den Alpen: Hydrologie im Wandel. – In: Bayer. Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): *Alpen ohne Eis. Gletscherschwund in den Alpen und seine Folgen*. Pfeil, Günding: 21–32.
- Zekollari, H., M. Huss, L. Schuster, F. Maussion, D. R. Rounce, R. Aguayo, N. Champollion, L. Compagno, R. Hugonnet, B. Marzeion, S. Mojtavavi & D. Farinotti. 2024. Twenty-first century global glacier evolution under CMIP6 scenarios and the role of glacier-specific observations. – *The Cryosphere*, 18: 5045–5066. DOI: [10.5194/tc-18-5045-2024](https://doi.org/10.5194/tc-18-5045-2024)

Diskussion

A. Fischer: Sie haben überwiegend von Gletschern im Hochgebirge gesprochen und nur einmal das arktische Eisschild erwähnt. Wie verhält es sich mit dem antarktischen Schild? Im Vergleich zu diesen beiden sind die Gletscher in den Alpen oder auch in Asien und Kanada unbedeutend. Wenn Grönland und die Antarktis abschmelzen würden, würde der Meeresspiegelanstieg nicht vier, sondern 65 Meter betragen.

M. Huss: Wenn wir von Gletschern sprechen, nehmen wir in der Tat die großen Eisschilde Grönland und Antarktis aus. Diese beiden Eisschilde haben kombiniert ein Meeresspiegelanstiegspotenzial von deutlich über 60 Meter. Würden alle 270 000 Gletscher weltweit abschmelzen, liegen wir etwa bei 40 Zentimeter im Jahr 2100. Der Unterschied bei diesen Komponenten sind aber die Zeitskalen. Gletscher reagieren relativ schnell und könnten bis in 100 Jahren zu einem großen Teil verschwinden. Die großen Eisschilde hingegen sind deutlich träger, d. h., sie brauchen sehr lange, um instabil zu werden. Wenn sie – in Zeitskalen von Jahrhunderten, vielleicht sogar Jahrtausenden – aber einmal instabil werden, sind die Auswirkungen katastrophal. Im Moment tragen die Gletscher noch stärker zum Meeresspiegelanstieg bei als die Eisschilde, aber sehr bald werden die Eisschilde wichtiger werden. In Bezug auf die Wasserverfügbarkeit und den hydrologischen Kreislauf, was viele Menschen weltweit direkt betrifft, sind es jedoch die Gletscher in den Gebirgsregionen, die relevant sind.

M. Matern: Sie sprachen von einer Steinwüste, die nach dem Rückzug der Gletscher übrig bleibt. In den Pyrenäen vermutet man in einer derartigen Steinwüste Wasserstoff⁵, der ganz Toulouse und auch noch angrenzende Städte mit Energie versorgen könnte. Könnte auch in der Schweiz oder in Bayern Wasserstoff vorkommen?

M. Huss: In Bezug auf Wasserstoff bin ich überfragt. Aber ich stimme zu, dass mit dem Gletscherrückgang durchaus auch Chancen verbunden sind. Es werden große Flächen frei, die Gletscher geben neues Land zurück. Dieses Land wird zum Beispiel wichtig sein für die Biodiversität, vor allem als Rückzugsort für Pflanzen, die ihr Verbreitungsgebiet nach oben ausweiten wollen, aber auch für die menschliche Nutzung. Gerade wenn wir über Stromproduktion und Speicherseen sprechen, haben diese neuen, freiwerdenden Gebiete durchaus ein Potenzial. Aber auch vielfältigen anderen Nutzungsmöglichkeiten wie zum Beispiel dem Tourismus bietet die Landschaftsveränderung im Hochgebirge durchaus Chancen.

F. Kellermeier: Als Lehrer habe ich viel mit jungen Menschen zu tun, die teilweise in ihrem Leben vermutlich keinen Gletscher mehr sehen werden können. Welche Botschaft wollen wir ihnen vermitteln? Sollen wir mehr über die Chancen sprechen, die der Gletscherrückgang mit sich bringt, um eine positive Botschaft zu senden? Wo sehen Sie den Schwerpunkt im Bildungsbereich zu diesem Thema?

M. Huss: Das ist eine sehr wichtige Frage. Ich denke, wir sollten nicht zu viele negative Botschaften vermitteln, nach dem Motto »alles geht verloren, alles ist weg und alles wird schlecht«. Wir müssen aber aufzeigen, dass sich die Gletscher verändern und dass wir durch unser Handeln noch einen Unterschied machen können. Klimaschutz ist wichtig für die Gletscher, aber wenn die Gletscher verschwinden, wie es zum Beispiel in Bayern der Fall sein wird, werden wir in Bayern keine sehr großen negativen Auswirkungen sehen. Aber die Gletscher sind nur ein Faktor, was die weltweiten Auswirkungen der Klimaänderung betrifft, zum Beispiel den Meeresspiegelanstieg oder die zunehmende Häufigkeit von Starkregenereignissen, Dürreperioden, Hitzewellen usw. Daher müssen wir die Klimaänderung unbedingt eindämmen. Um auf Ihre Frage zurückzukommen: Ich denke, neben diesen dramatischen Bildern müssen wir versuchen, die positiven Aspekte zu vermitteln,

5 Zwaan, F., A. C. Glerum, D. A. Vasey, J. B. Naliboff, G. Manatschal & E. C. Gaucher. 2025. Rift-inversion orogens are potential hot spots for natural H₂ generation. – *Science Advances*, 11: eadr341. DOI: [10.1126/sciadv.adr3418](https://doi.org/10.1126/sciadv.adr3418)

um dem Ganzen auch einen positiven Touch zu geben, und zeigen, dass es nie zu spät ist etwas zu ändern. Damit kann man die jungen Leute eher ansprechen, als wenn man nur pessimistisch sagt, wir haben es eh verbockt.

F. Pfluger: Gletscherseeausbrüche kenne ich vorwiegend aus dem asiatischen Raum. Inwiefern werden sie künftig auch für den europäischen Alpenraum relevant werden?

M. Huss: In der Schweiz haben wir immer wieder einmal größere Probleme mit Gletscherseeausbrüchen. Sie beschränken sich naturgemäß auf größere Gletscher, in denen größere Wasservolumina und größere Eismassen, die das Wasser aufstauen können, vorhanden sind. Es gab immer wieder Gefahren, die man mit sehr aufwändigen Methoden oder mit der Installation eines Warnsystems abschwächen musste. Ich würde nicht so weit gehen zu sagen, dass mit dem Klimawandel Gletschergefahren wie Überflutungen oder Eislawinen sehr stark zunehmen werden. Sind die Gletscher einmal ganz weg, gibt es auch keine solche Gletschergefahren mehr. Das Problem ist eher, dass wir aktuell diese Gefahren an völlig unerwarteten, neuen Stellen erkennen, aufgrund der schnellen Veränderung im Hochgebirge. Und das ist schwierig für die Warnung. Gletschergefahren gab es auch schon in der Vergangenheit mit großen Fluten und Zerstörungen, aber das waren bekannte Stellen, von denen man wusste, dass etwas passieren kann und man sich in Acht nehmen muss. Aber gerade bei der Eislawine an der Marmolata in den Dolomiten im Juli 2022 war man völlig überrascht, da der Gletscher sehr klein war und nie als instabil galt. Derartige unerwartete Ereignisse wird es häufiger geben. Das macht die Sache so gefährlich, da man nicht weiß, wo man die modernsten Sensortechnologien einrichten soll, um die Leute rechtzeitig zu warnen.

F. Pfluger: Meine Frage zielte auf die Mechanik der Gletscherseeausbrüche. Dafür ist nach meinem Verständnis das Vorhandensein einer Endmoräne nötig. Wenn ein Gletschersee gebildet wird und durch Festgestein aufgestaut wird, ist der Damm erosionsresistent. Es ist daher vermutlich eher die Frage, wie viel Moränenmaterial in dem Bereich der Gletscher vorhanden ist.

M. Huss: Es gibt zwei Typen von Gletscherseen. Die einen sind von Moränen aufgestaut und liegen vor dem Gletscher. In den Alpen kenne ich wenige Ereignisse, die von diesem Typ ausgehen. Die anderen Gletscherseen sind von Eis aufgestaut. Diese sind deutlich gefährlicher, da sie sich sehr häufig, also jährlich, bilden und sich entleeren, und an sich instabil sind. Solche durch Gletschereis gestauten Seen gibt es auch in den Alpen und sie werden entsprechend überwacht.

M. Krautblatter: Bevor sich ein Gletscher völlig zurückzieht, gibt es einen Übergang zwischen einem »kalten« und einem »warmen« Gletscher: die alpinen polythermalen Gletscher. Diese weisen sowohl Bereiche mit temperiertem als auch mit kaltem Eis auf. Wir haben in einer kürzlich durchgeführten Studie die Auswirkungen dieses Übergangs auf den darunterliegenden Fels untersucht, da dieser das erste Mal seit Tausenden von Jahren Wasserdrücken ausgesetzt ist. Wir glauben, dass einige dieser Ereignisse gemischte Fels-Eis-Versagen waren. Wie gut lassen sich der Rückzug der kalten Gletscher und die Verschiebung der polythermalen Gletscherlinie modellieren?

M. Huss: Momentan wissen wir noch nicht einmal wirklich, welche Gletscher kalt (Temperaturen von unter null Grad) und welche temperiert (Temperaturen von ca. null Grad) sind. Bis vor kurzem ist man davon ausgegangen, dass alle Gletscher der Alpen temperiert sind, vielleicht mit Ausnahme derjenigen oberhalb von 4000 Metern. Aber man beginnt immer mehr zu sehen, dass die polythermalen Gletscher, die am Untergrund angefroren sind, und hier vor allem die kleinen Gletscher, vielleicht sogar die bayerischen Gletscher, zum Teil kalt sind. Das kann komplexe Wechselwirkungen zum Beispiel mit Permafrost verursachen. Das ist ein sehr spannendes Thema, bei dem man noch nicht zum Ende der Forschung vorgedrungen ist.

B. Rutkowski: Beim Schmelzen der Gletscher durch den lokalen Albedoeffekt kommt es mit der Zeit zu einem sich selbst beschleunigenden System. Inwiefern ist das in den Modellierungen zur Zukunft der Gletscher mit eingerechnet?

M. Huss: Das ist zu einem gewissen Grad berücksichtigt. Wenn wir Schnee mit Eis austauschen, ist der Albedoeffekt einberechnet. Aber es gibt

verschiedene Nuancen dieses Effekts, die nicht vollständig in den Modellen berücksichtigt sind: wenn beispielsweise der Firn, also der mehrjährige Schnee, der oben auf dem Gletscher liegt, verschwindet und wenn die umliegenden Felswände immer dominanter werden und damit mehr langwellige Strahlung auf den Gletscher zurückwerfen. Derartige Faktoren und Rückkoppelungseffekte sind nicht vollständig in den Modellen enthalten. Es gibt auch gegenläufige Effekte, wenn zum Beispiel die Bedeckung von Schutt auf dem Gletschereis zunimmt. Das schützt das Eis. Alle diese Rückkoppelungseffekte können ein lokaler Faktor sein, der die Geschwindigkeiten des Gletscherrückgangs ändert, aber sie beeinflussen den generellen Trend nicht wesentlich. Die Projektionen sind erstaunlich robust. Gegenüber den Berechnungen des zu erwartenden Gletscherrückgangs in den Alpen, die wir vor zwanzig Jahren erstellt haben, liegen wir immer noch ungefähr an der gleichen Stelle. Wir können tatsächlich mit großer Sicherheit sagen, dass wir praktisch alle Gletscher der Alpen bis in die höchsten Lagen bis zum Ende des Jahrhunderts verlieren werden.

S. Mühlbauer: Meine Frage bezieht sich ebenfalls auf die Gletscherseerausbrüche. Wenn man ein relativ klar definiertes Abflussgebiet hat und

Abflussmessungen durchführen kann, besteht dann die Möglichkeit, dass man in Zusammenhang mit einer Massenbilanz abschätzen kann, welches Volumen an Wasser theoretisch abgeschmolzen ist, das aber unten am Ausfluss nicht erfasst wurde und das dementsprechend zwischengestaut sein sollte?

M. Huss: Das kann man durchaus, wenn man eine Abflussstation hat, die unmittelbar vor dem Gletscher liegt, wie es zum Beispiel am Vernagtferner der Fall ist. Aber wir haben bereits gehört, dass das sehr selten ist.⁶ Es gibt ein paar wenige solcher Einzugsgebiete, wo dies zutrifft, und dort lassen sich derartige Bilanzabschätzungen durchführen. Wir haben das auch schon an einem Gletscher in der Schweiz gemacht, aber die Unsicherheiten sind relativ groß, und ich würde nicht sagen, dass man damit die Entstehung eines neuen Gletschersees mit Sicherheit detektieren kann. Aber solche Abflussmessungen könnten retrospektiv sehr nützlich sein, um die Dynamik eines Gletscherseerausbruchs zu rekonstruieren und damit auch besser zu verstehen, was passiert ist, oder auch, was die Gefährdung dieses zusätzlichen Flutwassers betrifft, das ins Tal geht.

6 Mayer, C. 2026. Schnee, Gletscher und Permafrost: Was macht das Hochgebirge aus? Einführung in das Rundgespräch. – In: Bayer. Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): Alpen ohne Eis. Gletscherschwund in den Alpen und seine Folgen. Pfeil, Günding: 9–20