

Schnee, Gletscher und Permafrost: Was macht das Hochgebirge aus? Einführung in das Rundgespräch

Christoph Mayer

Zusammenfassung

Die Alpen sowie auch andere Hochgebirge sind geprägt von Schnee, Eis und Permafrost und einer deutlichen Transformation aufgrund des Klimawandels. Die Limitierung der Kryosphäre auf Temperaturen unter dem Gefrierpunkt führt dazu, dass gerade im Hochgebirge große Veränderungen stattfinden. Weder die Kryosphäre noch Ökosysteme können infolge der Erwärmung wegen der mit zunehmender Höhe immer kleiner werdenden Flächen im Gebirge weiter nach oben ausweichen. Am deutlichsten sind die Veränderungen an den Gletschern zu beobachten, da sie große Flächen bedecken und in den vergangenen Jahrzehnten sehr große Massenverluste erfahren haben. Insbesondere die sehr vielen kleinen Gletscher sind stark von der Abschmelzung bedroht. Die Freilegung bisher eisbedeckter Flächen bietet eine Chance für neue Ökosysteme oder für archäologische Funde unterschiedlicher Epochen. Trotz der klimatischen Unterschiede von Hochniederschlagsgebieten am Rand der Alpen zu den inneralpinen Trockentälern wirkt sich der Klimawandel überall aus. Dies lässt sich an den Mikroorganismen im Schnee und Eis genauso feststellen wie an der Veränderung der Flora. Zudem drohen weitreichende Auswirkungen, zum Beispiel in der abnehmenden Stabilität von Permafrostregionen, mit der Gefahr von Felsstürzen und Murgängen, oder der Änderung des Abflussverhaltens der Alpenflüsse durch den Schwund der Eisreserven. Letztendlich werden diese Veränderungen auch Auswirkungen auf die Nutzung des hochalpinen Raums, insbesondere im Hinblick auf Wasserwirtschaft und Tourismus, haben.

Summary

Snow, ice, and permafrost: What defines the high mountains?

The Alps, as well as other high mountain ranges, are characterized by snow, ice, and permafrost, and are undergoing significant transformations due to climate change. Because the cryosphere can only exist at sub-zero temperatures, major changes are occurring especially in high mountain regions. Neither the cryosphere nor ecosystems can expand further upwards as a result of warming, because the available area decreases with increasing altitude. The changes are most evident in the glaciers, as they cover large areas and have experienced significant mass losses in recent decades. Numerous small glaciers are particularly threatened by melting. However, the exposure of previously ice-covered areas offers opportunities for new ecosystems or archaeological finds from different eras. Despite the climatic differences between high precipitation areas on the edge of the Alps and the dry valleys of the inner Alps, climate change has an impact everywhere. This can be seen in the microorganisms in the snow and ice, as well as in changes in flora. In addition, far-reaching impacts are expected, such as the decreasing stability of permafrost regions, with the risk of rockfalls and debris flows, or changes in the runoff patterns of Alpine rivers due to the loss of ice reserves. Ultimately, these changes will also impact the use of the high Alpine region, particularly with regard to water management and tourism.

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

✉ Dr. Christoph Mayer, Bayerische Akademie der Wissenschaften, Erdmessung und Glaziologie, Alfons-Goppel-Straße 11, 80539 München; christoph.mayer@badw.de

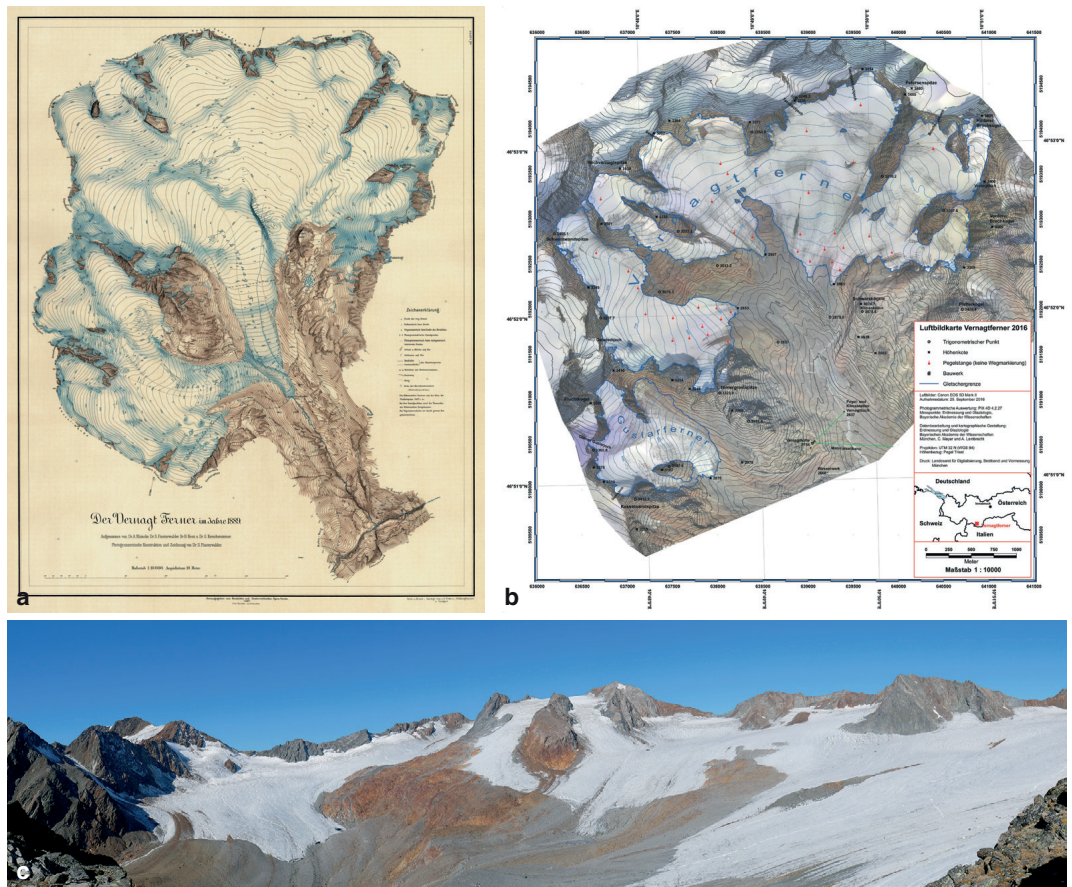


Abb. 1. Ausdehnung des Vernagtferners (Öztaler Alpen, Österreich): **a:** Topografische Karte von 1897 mit Gletscherstand 1889, basierend auf einer photogrammetrischen Vermessung von Sebastian Finsterwalder; **b:** Orthofotokarte von 2016, basierend auf Luftbildern vom 29.09.2016; **c:** Fotografie vom 27.09.2018. – a, b: BADw, <https://geo.badw.de/vernagtferner-digital/karten.html>, c: C. Mayer.

Einführung

Für das Rundgespräch »Alpen ohne Eis. Gletscherschwund in den Alpen und seine Folgen« haben wir angestrebt, ein möglichst breites Spektrum der Forschungen im Hochgebirge abzudecken. Das Thema beinhaltet dabei nicht nur das Gletschereis, sondern Eis in mannigfacher Form, wie es im Hochgebirge auftritt. Eine Einführung in die Thematik mit den vielgestaltigen Prozessen und Wechselwirkungen soll hier in Kürze gegeben werden. Gletscher und ihre Eisreserven verdeutlichen dabei besonders gut, wie und vor allem wie schnell sich das Hochgebirge verändert. Beispielhaft am Vernagtferner in den Öztaler Alpen (Tirol, Österreich) wird deutlich,

wie sehr sich die Landschaft in den letzten 100 Jahren im Hochgebirge verändert hat. Im Vergleich zu dem Höchststand am Ende der Kleinen Eiszeit im ausgehenden 19. Jahrhundert sind heute nur noch sehr rudimentäre Gletschermassen übrig (Abb. 1).

Hochgebirge unterscheiden sich von Hügelländern oder Mittelgebirgen dadurch, dass mindestens ein Landschaftsgürtel durchstoßen wird (Höfermann, J. 1994, zitiert in Burga et al. 2004, S. 20–21), wobei in vielen Fällen auch Eis und Permafrost nachgewiesen sind. Wie schon Alexander von Humboldt mit seinen Karten, z. B. dem »Tableau physique des Andes et pays

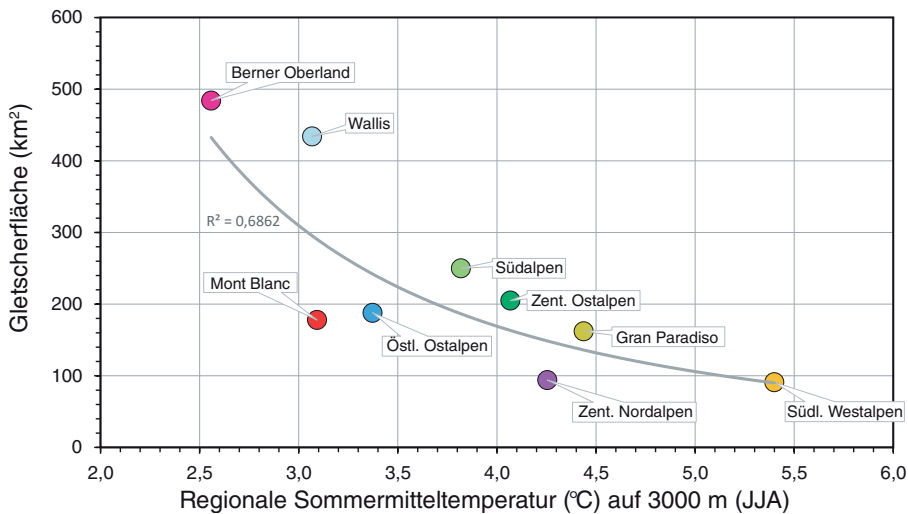


Abb. 2. Einfluss der Gletscherfläche auf die regionale Sommermitteltemperatur (Juni, Juli, August) auf 3000 m Höhe für verschiedenen Regionen der Alpen. – M. Weber, BADW.

voisins«¹, anschaulich darstellt, ist die Fläche im Hochgebirge begrenzt und nimmt nach oben hin ab. Im Zuge des Klimawandels, der zu einer Verschiebung der Klimazonen nach oben führt, bleibt immer weniger Platz für die Schnee- und Eiskappen im obersten Bereich der Hochgebirge und gleichzeitig für Pflanzengesellschaften in der darunter liegenden Zone der Periglazialflächen.

Ein großer Teil der Hochgebirge weltweit kann direkt mit Gletschern assoziiert werden, z. B. die amerikanische Kordillere in Nordamerika, aber auch ihr südlicher Teil, die Andenkordillere in Südamerika, die Hochgebirge am nördlichen Rand Südasiens, die zentralasiatischen Hochgebirge und die Hochgebirge Kanadas, Grönlands und Skandinaviens oder die Alpen in Zentraleuropa (Hock et al. 2019). Eisfrei sind dagegen z. B. die Hochgebirge Äthiopiens bzw. ganz Afrikas mit Ausnahme des Kilimandscharo und inzwischen auch Indonesiens.

Hochgebirge beeinflussen die jeweilige globale Klimazone mit einem abweichenden Bergsklima und Wettergeschehen, auch im Hinblick auf das Regionalklima des Umlandes. Diese klimatischen Unterschiede sowie Besonderheiten in der Wasserversorgung, der Geländeformen und der Böden führen zu einer spezifischen Vegetation und einer vergleichsweise hohen Biodiversität in Hochgebirgen.

Gletscher im Alpenraum

In Zentraleuropa ist die Niederschlagsverteilung deutlich durch die Alpen geprägt (Isotta et al. 2014). In einer Vielzahl von Regionen des Alpenbogens ist der Niederschlag durch das Hochgebirge erhöht, da dieses die Feuchtigkeit aus den Wolken sozusagen herauskämmt. Andererseits gibt es inneralpine Trockentäler wie das obere Inntal mit seinen Zuflüssen, in denen der Niederschlag, der bereits auf der Nordseite des Alpenbogens fällt, nicht mehr ankommt. Die räumliche Variabilität ist daher hoch, was zum Entstehen sehr unterschiedlicher Ökosysteme führt.

Das Regionalklima wird, neben der zonalen Einteilung von den Nord- zu den wärmeren Südalpen, wesentlich durch die Gletscherfläche in einem Gebirgsstock geprägt: Je größer die vergletscherte Fläche ist, desto geringer ist die durchschnittliche Sommertemperatur (Abb. 2).

1 Tableau physique des Andes et pays voisins (1807), <https://www.avhumboldt.de/?p=11781> [abgerufen 27.03.2025]. Entnommen aus: Humboldt, A. von & A. Bonpland. 1805. Essai sur la Géographie des Plantes accompagné d'un tableau physique des régions équinoxiales. – Avec un planche. Paris, Tübingen: Schoell, Cotta (Voyage de Humboldt et Bonpland, Partie 5).

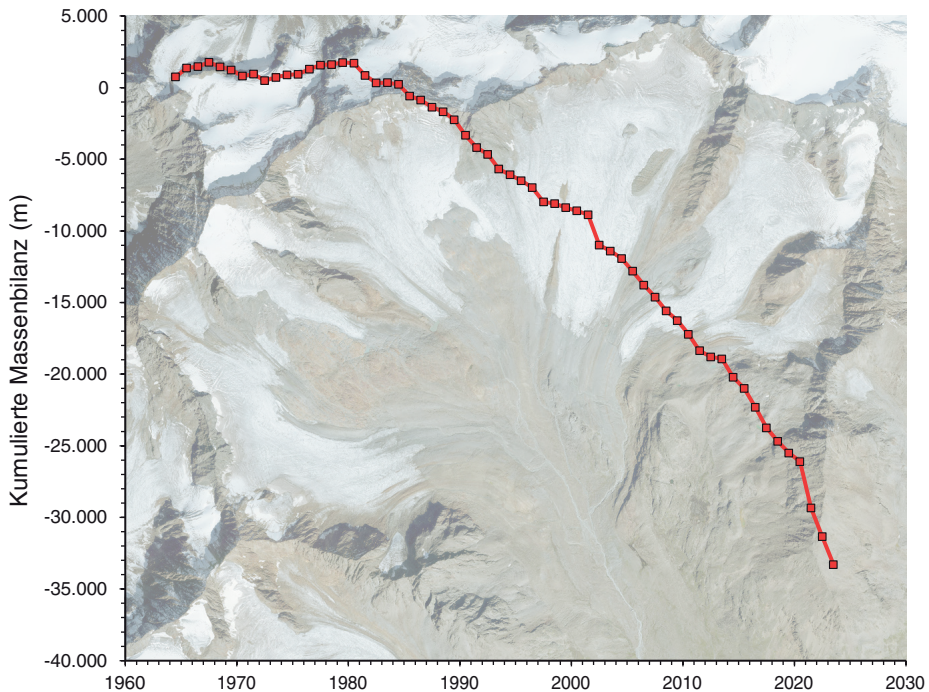


Abb. 3. Änderung der kumulativen Massenbilanz (dem Gewinn/Verlust von Eis umgerechnet in eine Wasserschicht über dem gesamten Gletscher) des Vernagtferners (Tirol, Österreich) von 1965 bis 2024. – Daten: KEG/BAW, Hintergrund: Sentinel 2 Satellitenbild.

Der Niederschlag, der im Hochgebirge in Form von Schnee fällt, ist die Grundlage für die Bildung der Gletscher, welche je nach den klimatischen und geografischen Voraussetzungen eine unterschiedliche Größe aufweisen. Der Abfluss von diesen Gletschern sowie die saisonale Schneebedeckung sind wesentliche Komponenten der Wasserbereitstellung an das Umland (Huss et al. 2017).

Es gibt derzeit weltweit keine Regionen, in denen sich die Landbedeckung aufgrund natürlicher Veränderungen schneller ändert als im Hochgebirge. Die Freilegung von bisher vergletscherten Flächen hat nicht nur auf das Abflussgeschehen große Auswirkungen, sondern z. B. auch auf reliefbedingte Massenbewegungen wie Steinschläge und Erdbeben oder auf die Veränderung von Vegetationsgesellschaften. Im Zuge des Abschmelzens der Gletscher können sich auch Seen bilden, die unter gewissen Umständen neue Wasserreservoirs darstellen, aber auch instabil sein und ausbrechen können.

Von den über 3500 Gletschern in den Alpen speichern nur etwa 800 über 90 % des Gesamtvolumens (Zekollari et al. 2019), d. h., es gibt eine geringe Zahl sehr großer Gletscher und eine sehr große Zahl relativ kleiner Gletscher, zu denen u. a. auch die noch vorhandenen bayerischen Gletscher zählen.

Der Vernagtferner

Einer der Referenzgletscher des World Glacier Monitoring Service (WMGS) ist der Vernagtferner in den Ötztaler Alpen (Abb. 1), an dem bereits 1964 mit Massenbilanzbeobachtungen begonnen wurde. Der Gletscherhaushalt (Schneeakkumulation im Winter und Schnee- und Eisschmelze im Sommer) war in den 1970er bis Anfang der 1980er Jahre hinein einigermaßen ausgeglichen, bevor ein kontinuierlicher Massenverlust begann (Abb. 3). Eine Zäsur war der »Jahrhundertsommer« 2003, in dem so viel Eis wie nie vorher im Beobachtungszeitraum weggeschmolzen ist. In den darauf folgenden Jahren ist der mittlere Abfluss deutlich größer geworden. Ab 2022 nimmt

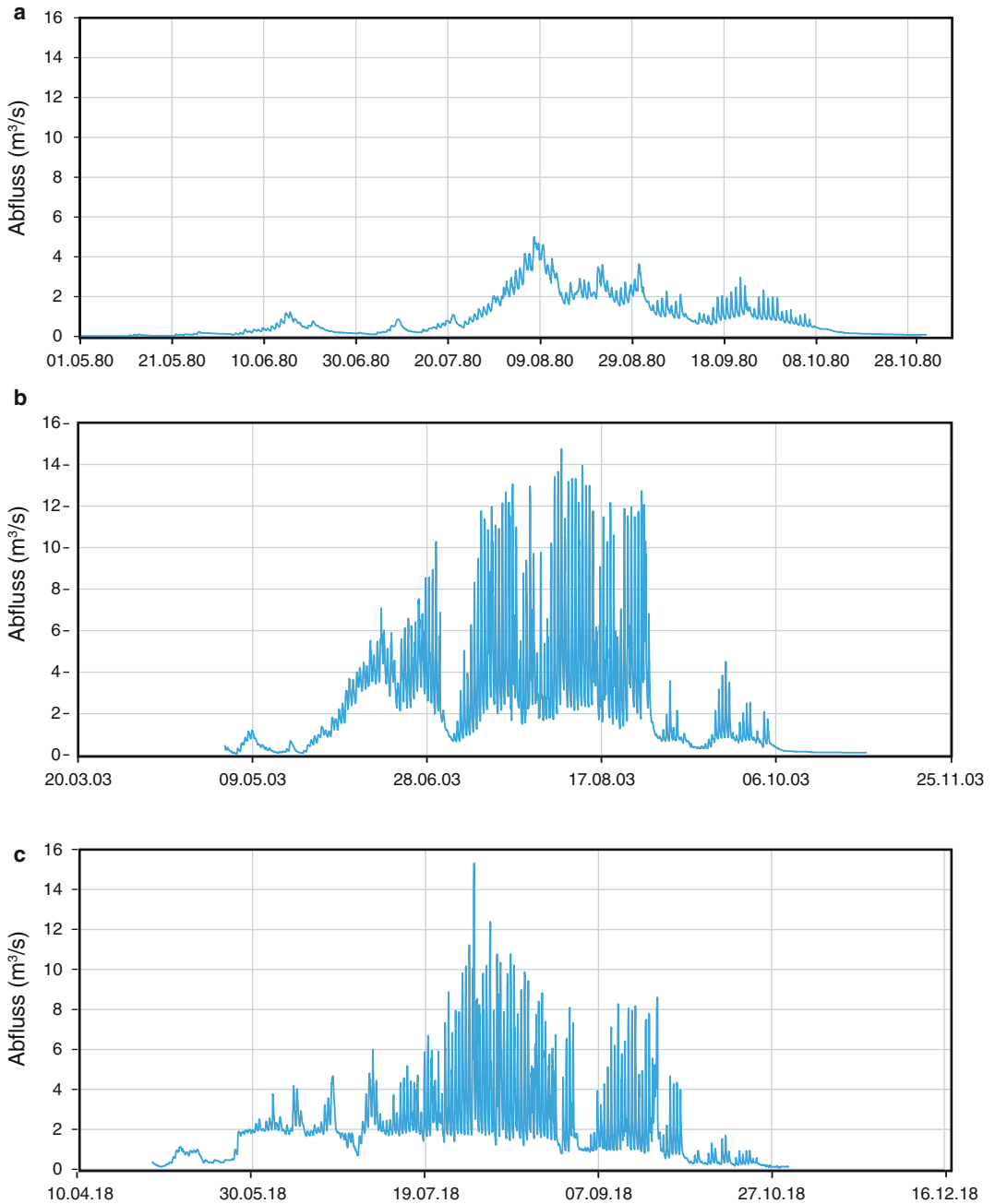


Abb. 4. Stundenmittel des Abflusses (in m^3/s) an der Pegelstation Vernagtbach (2640 m über Meereshöhe, Ötztaler Alpen, Tirol, Österreich) im Sommer 1980 (a), 2003 (b) und 2018 (c). – a: Escher-Vetter et al. 2011, b: Escher-Vetter et al. 2014, c: KEG/BADW.

die Gletschermasse erneut stark ab und die Massenverluste der letzten drei Jahre waren im Mittel die höchsten der bisherigen Aufzeichnungen.

Allein vom 11. Juli bis zum 15. September 2022 sind an der höchsten Beobachtungsstation auf dem Vernagtferner, die in der Akkumulationszone

in 3450 m Höhe auf dem Hochvernagtplateau liegt, 3 m an Firn abgeschmolzen. Angesichts dieser Entwicklung der letzten Jahre fragt man sich, ob hier eine Zeitenwende eingeläutet wird.

Wir sind am Vernagtferner in der glücklichen Lage, dass wir neben den Gletscherbeobachtungen auch eine Abflussstation betreiben – meines Wissens gibt es keine andere stark vergletscherte Region weltweit, die auch den Abfluss aus diesem Gebiet in dieser Frequenz beobachtet. An der Pegelstation Vernagtbach auf 2640 m Höhe, etwa 1,5 km unterhalb der Gletscherzunge, werden seit den 1970er Jahren zusätzlich zum gletschernahen Abfluss umfassende Wetterdaten aufgezeichnet. In den Jahren, in denen Zuwachs (Akkumulation) und Abnahme (Ablation) der Gletschermasse ausgeglichen waren, ist die Abflusskurve relativ unauffällig, mit einem höheren Abfluss im Sommer aufgrund der Schnee- und Eisschmelze, aber einem wenig ausgeprägten Tagesgang (Abb. 4a). Im stark negativen »Jahrhundertsommer« 2003 (Abb. 4b) setzt die Schneeschmelze früher ein und ist wesentlich stärker ausgeprägt. Der deutlich ausgeprägte Tagesgang der Gletscherschmelze im Hochsommer setzt sich auch in den folgenden Jahren fort und charakterisiert der Abflussgeschehen bis heute (Abb. 4c). Die Station wurde zu einer Zeit mit nur geringen Massenverlusten des Gletschers gebaut und das Messgerinne entsprechend dimensioniert. In den letzten Jahren kommt es immer wieder an seine Grenzen (Abb. 5) und es gab durchaus Situationen, in denen nicht klar war, ob die Hütte nach einem Hochwasserereignis noch steht.

Einen (stark geglätteten) Modellansatz, den zukünftigen mittleren Abfluss am Vernagtbach zu simulieren, zeigt Abb. 6. Demnach wird trotz des auch künftig fortschreitenden Klimawandels etwa 2030 ein Maximum des saisonalen Gletscher- und des Gebietsabflusses erreicht werden. Wir müssen uns 2030 auf einen maximalen Abfluss von etwa 34,7 Mio. m³ Wasser einstellen, wovon etwa 40 % (14,1 Mio. m³ in 2029) aus der Gletscherschmelze stammen. (Zum Vergleich: In den Jahren 2003 bis 2012 betrug der mittlere Abfluss 27,9 Mio. m³, der mittlere Gletscherabfluss 7,7 Mio. m³.) Nach 2030 wird der Abfluss aufgrund der deutlich kleiner werdenden Gletscherfläche trotz weiterhin sehr hoher Schmelzraten relativ schnell zurückgehen, was einen massiven Einfluss auf die Wasserführung in den Flüssen und evtl. auf die lokale

Grundwasserbildung haben wird. Trotzdem kann es durch das Zusammenwirken von intensiver Eisschmelze und Starkregenereignissen auch dann noch zu kritischen Hochwasserereignissen an der Pegelstation kommen.

Gletscher in Bayern

Auch die bayerischen Gletscher werden seit langer Zeit beobachtet. Ihre Fläche und ihr Volumen gehen ebenfalls stark zurück (Abb. 7); von den ehemals 5 Gletschern hat einer, der südliche Schneeferner, seinen Status als Gletscher 2022 verloren bzw. wurde aufgrund seiner geringen Fläche aus dem Beobachtungsprogramm gestrichen.

Eine Analyse der meteorologischen Parameter zeigt, dass die klimatische Entwicklung an der Messstation Zugspitze besonders im Frühjahr (März, April, Mai) vor allem seit 1990 eine deutliche Erhöhung der Globalstrahlung aufweist. In der jüngeren Vergangenheit gab es in diesen Monaten relativ häufig stabile Schönwetterlagen mit wenig Niederschlag, was zu einer intensiveren Schneeschmelze führt, die wiederum Auswirkungen auf die Gletschermassenbilanz hat. Dies und die zunehmende Erwärmung sind die wesentlichen Ursachen für den starken Verlust und das baldige Ende der bayerischen Gletscher.

Welche Veränderungen erwarten wir im Hochgebirge?

Die einzelnen Konsequenzen der Massenverluste und klimatischen Veränderungen im Hochgebirge werden hier nur stichpunktartig dargestellt:

Wenn die Eisvolumen bzw. die Gletscherfläche abnimmt, können sich in den freigelegten Regionen Seen bilden (z.B. Purdie et al. 2016). Diese können als Wasserreservoir dienen, aber auch eine Gefahr darstellen, falls die sie begrenzenden Moränen nicht stabil sind.

Durch die zunehmende Ausaperung ergeben sich Schwierigkeiten für Bergsteiger, wenn Routen schwieriger oder nicht mehr begehbar werden. In einigen Fällen müssen hochalpine Routen wegen Felsstürzen umgelegt werden (Mourey et al. 2019). Zum Beispiel lag in einer Kletterroute an der Aiguille du Midi (Mont-Blanc-Massiv, Savoyer Alpen, Frankreich) durch das Abschmelzen des Gletschers der blanke Fels frei, der nur sehr schwierig zu begehen ist und eine Alternative der Routenführung erforderte.



Abb. 5. Pegelstation Vernagtbach in Jahren mit **a:** geringem (1974) und **b:** hohem Abflussgeschehen (2024). – Fotos: a: KEG/BAdW, b: F Hofmeister.

Das Problem stellt sich auch an der Zugspitze. Dort wird am Höllentalferner regelmäßig blanker Fels im unteren Teil des Klettersteigs freigelegt, welcher eine Verlängerung der technischen Steighilfen erfordert.

Auch führt eine verstärkte Spaltenbildung durch eine veränderte Dynamik der Eiskörper oder die geringere Schneebedeckung der Spalten (Colgan et al. 2016) vermehrt zu Spaltenstürzen von Hochalpinisten.

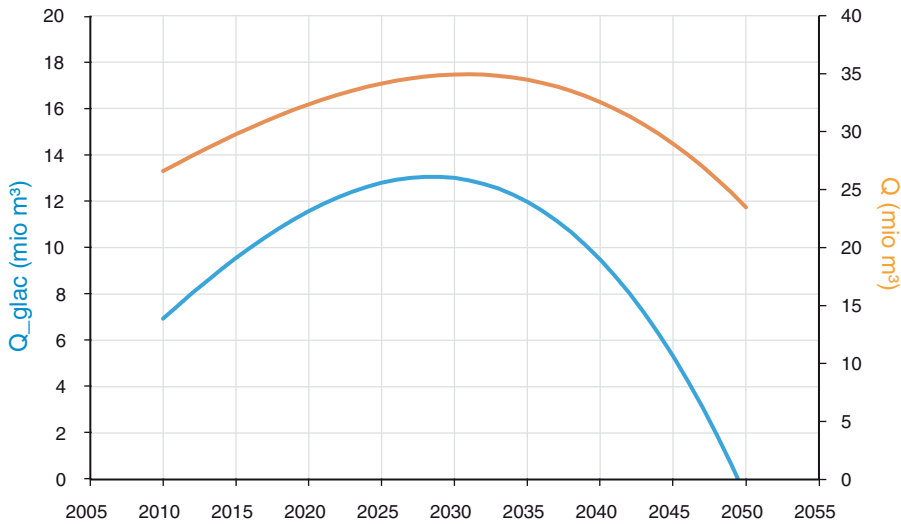


Abb. 6. Simulierter Gletscher- (—) und Gebietsabfluss (—) (in Mio. m³) an der Pegelstation Vernagtbach für die Jahre 2010 bis 2050. – C. Mayer.

Auch die Permafrostregionen der Alpen verändern sich stark. Der zunehmende Anstieg der Lufttemperatur in der Schweiz seit Ende der 1980er Jahre hat z.B. zeitversetzt zu einer Temperaturerhöhung von bis zu 1,5°C in 20 m Tiefe unter dem Schilthorn (2910 m ü. Meereshöhe), dem Murtèl-Corvatsch (2670 m) und dem Stockhorn (3410 m) geführt (Noetzi et al. 2024). Ein Auftauen des Permafrostes kann zu gewaltigen Felsstürzen aus bisher Permafrostfixiertem Fels wie am Matterhorn 2003 oder am Piz Scerscen in der Bernina 2024 sowie zu Eislawinen wie an der Ostseite des Monte-Rosa-Massivs 2007 führen (Paranunzio et al. 2016). Darüber hinaus können auftauender Permafrost oder schwindende Gletscher zu Problemen für die Standfestigkeit von Seilbahnen führen, indem sich z.B. Stützen verbiegen oder die Fundamente instabil werden, oder auch für Hütten, die plötzlich abzukippen drohen (Duvillard et al. 2019). So musste die Schutzhütte Refuge des Cosmiques am Mont Blanc über Jahre grundlegend saniert werden, weil die Gründungen nicht mehr im Permafrost sind.

Ein zusätzliches lokales Problem stellen z.B. Funde aus dem ersten Weltkrieg dar, wie z.B. eine noch nicht entschärfte Granate, die durch Ausaperung auf dem Mandronegletscher (Adamello-Massiv, Trentino, Italien) zum Vorschein

kam und 2020 von Glaziologen gefunden wurde. Von 1915 bis 1918 verlief hier die österreich-italienische Frontlinie der Adamellofront.

Folgen im periglazialen Umfeld

Durch den Rückgang der Gletscher werden große Flächen frei, die durch spezialisierte Ökosysteme besiedelt werden können. Die Entwicklung geschieht in der Regel über Jahrzehnte, beginnend mit Mikroorganismen (Ficetola et al. 2024), und ist von vielen Faktoren abhängig wie z.B. von Temperatur und Sonneneinstrahlung, vom Niederschlag und der Dauer der Schneebedeckung, vom Relief, von Bodenbildungsprozessen und der Nährstoffverfügbarkeit, von der Artenvielfalt in der Umgebung und dem Konkurrenzverhalten der Arten und nicht zuletzt von der menschlichen Nutzung (Ramskogler et al. 2023).

Außerdem können durch das Abschmelzen der Gletscher Jahrhunderte oder Jahrtausende alte Funde freigelegt werden, wie die prähistorischen Funde am Schnidejoch, einem seit der Jungsteinzeit genutzten Saumpfad und Gebirgspass im Wildhornmassiv in den Berner Alpen (Grosjean et al. 2007) oder der sogenannte »Söldner vom Theodulpass«, der in etwa 3000 m Höhe am Fuß des Matterhorns in den Gletscher stürzte (Hafner 2009).

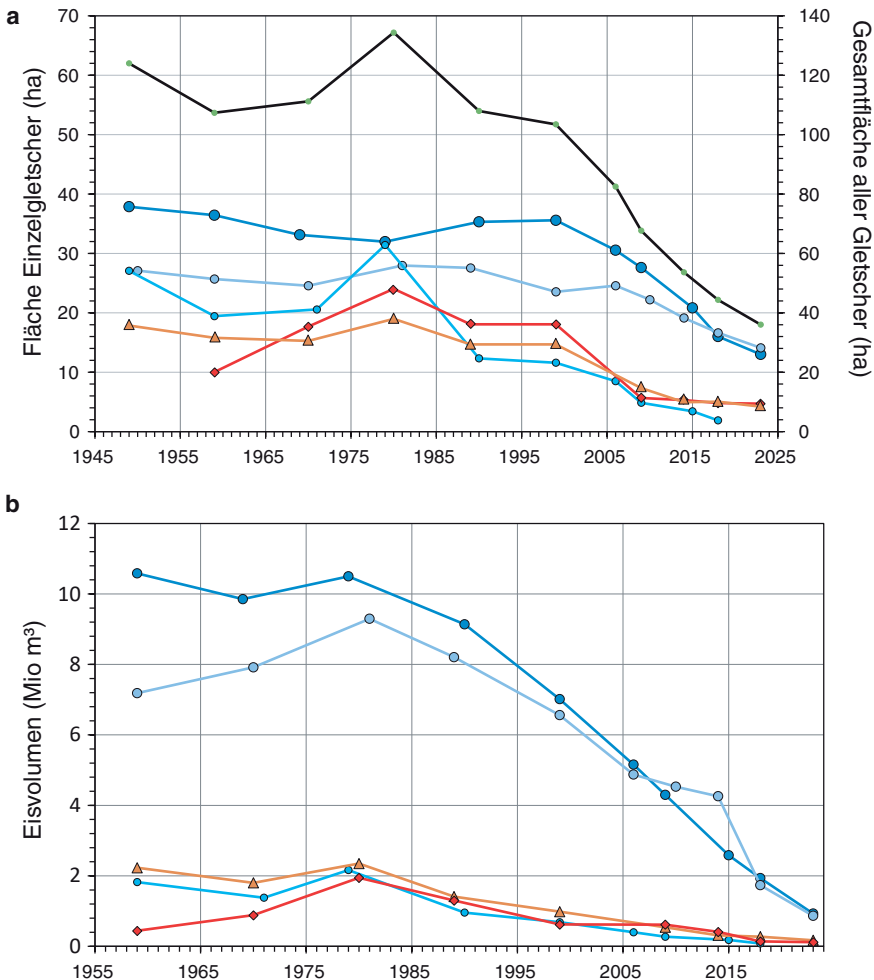


Abb. 7. Massenbilanz der Gletscher in Bayern: Fläche 1945–2023 (oben; ha) und Eisvolumen 1959–2023 (unten; Mio. m³); ●, — Nördlicher Schneeferner (Zugspitzplatt), ○, — Höllentalferner, ●, — Südlicher Schneeferner, ▲, — Blauis (Berchtesgadener Alpen), ◆, — Watzmanngletscher, ●, — Summe. – C. Mayer und www.bayerische-gletscher.de.

Letztendlich führt die Entwicklung des Gletscherrückgangs zu einer völlig anderen Wahrnehmung und Nutzung des hochalpinen Raums, so dass wir in Zukunft Alpengletscher vermutlich nur noch in virtuellen Landschaften aus der Vergangenheit betrachten können, während draußen vor der Tür eine völlig veränderte hochalpine Landschaft mit einer veränderten Nutzung entstanden ist (Salim 2023).

Als kurzes Fazit sei festgehalten, dass wir derzeit eine fundamentale Umwälzung im Hochgebirge sehen, die eine Vielzahl von Systemen und eine Vielzahl von Wechselwirkungen betrifft. Die begleitende Forschung eröffnet jedoch die Möglichkeit, mehr oder weniger in Echtzeit interessante und wertvolle Einblicke in grundlegende Prozesse zu gewinnen. In den weiteren Beiträgen des Rundgesprächs werden wir dazu und zu der Frage, was die Zukunft bringen wird, vieles erfahren.

Literatur

- Burga, C., F. Klötzli & G. Grabherr (Hrsg.). 2004. Gebirge der Erde – Landschaft, Klima, Pflanzenwelt. – Ulmer, Stuttgart, 504 S.
- Colgan, W., H. Rajaram, W. Abdalati, C. McCutchan, R. Mottram, M. S. Moussavi & S. Grigsby. 2016. Glacier crevasses: Observations, models, and mass balance implications. – *Reviews of Geophysics*, 54: 119–161. DOI: [10.1002/2015RG000504](https://doi.org/10.1002/2015RG000504)
- Duvillard, P. A., L. Ravel, M. Marcer & P. Schoeneich. 2019. Recent evolution of damage to infrastructure on permafrost in the French Alps. – *Regional Environmental Change*, 19: 1281–1293. DOI: [10.1007/s10113-019-01465-z](https://doi.org/10.1007/s10113-019-01465-z)
- Escher-Vetter, H., H. Oerter & O. Reinwarth. 2011. Hydrological records from the Vernagtferner Basin – Vernagtbach station, for the year 1980 [dataset]. PANGAEA, DOI: [10.1594/PANGAEA.770971](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.770971). – In: Escher-Vetter, H., H. Oerter, O. Reinwarth, L. N. Braun & M. Weber. 2012: Hydrological and meteorological records from the Vernagtferner Basin – Vernagtbach station, for the years 1970 to 2001 [dataset publication series]. PANGAEA, DOI: [10.1594/PANGAEA.775113](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.775113)
- Escher-Vetter, H., L. N. Braun & M. Siebers. 2014. Hydrological records from the Vernagtferner Basin – Vernagtbach station, for the year 2003 [dataset]. PANGAEA, DOI: [10.1594/PANGAEA.832024](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.832024). – In: Escher-Vetter, H., L. N. Braun & M. Siebers. 2014: Hydrological and meteorological records from the Vernagtferner Basin – Vernagtbach station, for the years 2002 to 2012 [dataset publication series]. PANGAEA, DOI: [10.1594/PANGAEA.829530](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.829530)
- Ficetola, G. F., S. Marta, A. Guerrieri, I. Cantera, A. Bonin, S. Cauvy-Fraunié, R. Ambrosini, M. Caccianiga, F. Anthelme, R. S. Azzoni, P. Almond, P. A. Gazitúa, J. L. Ceballos Lievano, P. Chand, M. C. Sharma, J. J. Clague, J. A. Cochachín Rapre, C. Compostella, R. Cruz Encarnación, O. Dangles, P. Deline, A. Eger, S. Erokhin, A. Franzetti, L. Gielly, F. Gili, M. Gobbi, S. Hågvær, R. Kaufmann, N. Khedim, R. I. Meneses, M. A. Morales-Martínez, G. Peyre, F. Pittino, A. Proietto, A. Rabatel, K. Sieron, L. Tielidze, N. Urseitova, Y. Yang, V. Zaginaev, A. Zerboni, A. Zimmer, G. A. Diolaiuti, P. Taberlet, J. Poulénard, D. Fontaneto, W. Thuiller & A. Carteron. 2024. The development of terrestrial ecosystems emerging after glacier retreat. – *Nature*, 632: 336–342. DOI: [10.1038/s41586-024-07778-2](https://doi.org/10.1038/s41586-024-07778-2)
- Grosjean, M., P. J. Suter, M. Trachsel & H. Wanner. 2007. Ice-borne prehistoric finds in the Swiss Alps reflect Holocene glacier fluctuations. – *Journal of Quaternary Science*, 22: 203–207. DOI: [10.1002/jqs.1111](https://doi.org/10.1002/jqs.1111)
- Hafner, A. 2009. Geschichte aus dem Eis – Archäologische Funde aus alpinen Gletschern und Eismulden. – In: *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern*, 66: 159–171. DOI: [10.5169/seals-324110#165](https://doi.org/10.5169/seals-324110#165)
- Hock, R., A. Bliss, B. Marzeion, R. H. Giesen, Y. Hirabayashi, M. Huss, V. Radić & A. B. A. Slangen. 2019. GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections. – *Journal of Glaciology*, 65: 453–467. DOI: [10.1017/jog.2019.22](https://doi.org/10.1017/jog.2019.22)
- Huss, M., B. Bookhagen, C. Huggel, D. Jacobsen, R. S. Bradley, J. J. Clague, M. Vuille, W. Buytaert, D. R. Cayan, G. Greenwood, B. G. Mark, A. M. Milner, R. Weingartner & M. Winder. 2017. Toward mountains without permanent snow and ice. – *Earth's Future*, 5: 418–435. DOI: [10.1002/2016EF000514](https://doi.org/10.1002/2016EF000514)
- Isotta, F. A., C. Frei, V. Weigluni, M. P. Tadić, P. Lassègues, B. Rudolf, V. Pavan, C. Cacciamani, G. Antolini, S. M. Ratto, M. Munari, S. Micheletti, V. Bonati, C. Lussana, C. Ronchi, E. Panettieri, G. Marigo & G. Vertačnik. 2014. The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data. – *International Journal of Climatology*, 34: 1657–1675. DOI: [10.1002/joc.3794](https://doi.org/10.1002/joc.3794)
- Mourey, J., M. Marcuzzi, L. Ravel & F. Pallandre. 2019. Effects of climate change on high Alpine mountain environments: Evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif (Western Alps) over half a century. – *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 51: 176–189. DOI: [10.1080/15230430.2019.1612216](https://doi.org/10.1080/15230430.2019.1612216)
- Noetzli, J., K. Isaksen, J. Barnett, H. H. Christiansen, R. Delaloye, B. Etzelmüller, D. Farinotti, T. Galleman, M. Guglielmin, C. Hauck, C. Hilbich, M. Hoelzle, C. Lambiel, F. Magnin, M. Oliva, L. Paro, P. Pogliotti, C. Riedl, P. Schoeneich, M. Valt, A. Vieli & M. Phillips. 2024. Enhanced warming of European mountain permafrost in the early 21st century. – *Nature Communications*, 15: 10508. DOI: [10.1038/s41467-024-54831-9](https://doi.org/10.1038/s41467-024-54831-9)
- Paranunzio, R., F. Laio, M. Chiarle, G. Nigrelli & F. Guzzetti. 2016. Climate anomalies associated with the occurrence of rockfalls at high-elevation in the Italian Alps. – *National Hazards and Earth System Sciences*, 16: 2085–2106. DOI: [10.5194/nhess-16-2085-2016](https://doi.org/10.5194/nhess-16-2085-2016)
- Purdie, H., P. Bealing, E. Tidey, C. Gomez & J. Harrison. 2016. Bathymetric evolution of Tasman Glacier terminal lake, New Zealand, as determined by remote surveying techniques. – *Global and Planetary Change*, 147: 1–11. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2016.10.010](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.010)
- Ramskogler, K., B. Knoflach, B. Elsner, B. Erschbamer, F. Haas, T. Heckmann, F. Hofmeister, L. Piermattei, C. Ressler, S. Trautmann, M. H. Wimmer, C. Geitner, J. Stötter & E. Tasser. 2023. Primary succession and its driving variables

- a sphere-spanning approach applied in proglacial areas in the upper Martell Valley (Eastern Italian Alps). – *Biogeosciences*, 20: 2919-2939. DOI: [10.5194/bg-20-2919-2023](https://doi.org/10.5194/bg-20-2919-2023)
- Salim, E. 2023. Glacier tourism without ice: Envisioning future adaptations in a melting world. – *Frontiers in Human Dynamics*, 5: 1137551. DOI: [10.3389/fhumd.2023.1137551](https://doi.org/10.3389/fhumd.2023.1137551)
- Zekollari, H., M. Huss & D. Farinotti. 2019. Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. – *The Cryosphere*, 13: 1125-1146. DOI: [10.5194/tc-13-1125-2019](https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019)

Diskussion

E. Grill: Besonders faszinierend war für mich die Analyse des Vernagtgletschers mit dem Knickpunkt im Jahr 2003. Davor war die Verlustrate über Jahre hinweg konstant, danach war sie ebenfalls konstant, aber auf einem höheren Niveau, bis es 2022 erneut zu einem Knickpunkt und seitdem einer noch stärkeren Abnahme kam. Wie lassen sich diese plötzlichen Veränderungen der Verlustraten erklären?

C. Mayer: Ein Grund ist sicherlich, dass nach den 2000er Jahren der Klimawandel deutlich »fühlbarer« geworden ist. Zum anderen ist im »Hitzesommer« 2003 mehr oder weniger die gesamte Schneefläche des Vernagtferners, also auch in den höheren Bereichen, weggeschmolzen. Dadurch sind sehr dunkle Flächen zum Vorschein gekommen und der Staub auf dem Gletscher hat sich angesammelt. Der Gletscher ist im Prinzip dunkler, als er vorher war, und in den Jahren darauf ist die Schmelze allein durch die geringere Albedo verstärkt worden. Aus den hohen Verlustraten der letzten drei Jahre lässt sich noch kein Trend ableiten. Aber es sieht zumindest so aus, als gäbe es tatsächlich nochmal einen neuen Knick. Wir sehen aber auch, dass sich nach 2010 die Klimaveränderung deutlich beschleunigt hat

M. Krautblatter: Ich habe noch gelernt, dass der Höllentalferner eine etwas bessere Prognose als der nördliche Schneeferner hat, da er stark lawinengespeist ist. Gibt es im Höllentalferner noch Jahre, in denen über viele Lawinen so viel Schnee akkumuliert wird, dass wir in den Altschnee kommen und die Bilanz positiv ist, oder ist dies inzwischen auch vorbei?

C. Mayer: Für den Höllentalferner kann ich das nicht aus dem Stehgreif beantworten. Im Allgemeinen kann man für die Alpengletscher sagen, dass der Sommer die Massenbilanz macht. Die Schmelze im Sommer dominiert mehr oder weniger die Fluktuation des Niederschlags im

Winter. Das trifft aber nicht für die ganz kleinen Gletscher zu. Die ganz kleinen Gletscher sind sehr sensitiv, da bei ihnen die Ablations- und die Akkumulationsfläche nicht räumlich getrennt sind. Die großen Gletscher erhalten einen Zuwachs im oberen Bereich und schmelzen unten ab. Bei den kleinen Gletschern in den bayerischen Alpen aber gibt es entweder einen Sommer, in dem alles blank ist und das Eis schmilzt, oder einen Sommer, in dem noch Altschnee übrig bleibt. Es gibt tatsächlich Situationen, in denen wir dort noch positive Massenbilanzjahre haben, weil so viel Schnee fällt, dass er über den Sommer liegen bleiben kann. Aber das sind nur einzelne Jahre in einer langen Zeit von Verlusten. Beim Höllentalferner wird es in der Tat so sein, dass er aufgrund seiner begünstigten Lage vermutlich länger überleben wird als die anderen bayerischen Gletscher.

A. Fischer: Gibt es in der Glaziologie Entscheidungskriterien, ab wann ein Gletscher als »tot« angesehen wird? Darf da kein Eis mehr vorhanden sein?

C. Mayer: Eine strikte Definition gibt es nicht. Es ist natürlich definiert, was ein Gletscher ist: Ein Gletscher muss ein mehrjähriges Eisvorkommen sein, das einen Massenaustausch hat – ein Gletscher in einem Gefrierschrank ist demnach kein Gletscher mehr – und eine gewisse Eigenbewegung aufweist. Dies bedeutet, dass er an einem Hang liegt und eine Dicke von mehreren Metern hat, damit sich eine Deformation ausbilden kann. Als Glaziologen wollen wir aber natürlich auch sehen, wie es mit den Gletschern zu Ende geht, das heißt, wir beobachten diese Gletscher auch noch, wenn sie nur noch Eisfelder sind, solange es eben geht. Den südlichen Schneeferner haben wir 2022 aus der Beobachtung herausgenommen, da tatsächlich nur noch ein paar kleine Eisreste übrig waren; inzwischen ist er ganz verschwunden. Eine strikte untere Grenze gibt es aber nicht.