

Sensible Ökosysteme und Mikroplastik im Hochgebirge

Birgit Sattler

Zusammenfassung

Gletscher sind keine sterilen Eiskörper, sondern aktive Lebensräume voller Mikroorganismen. In Mikrofilmen zwischen Eiskristallen und in Schmelzwasser leben Bakterien, Algen, Pilze, Viren sowie mehrzellige Organismen wie Bärtierchen oder Gletscherflöhe an der Oberfläche. Besonders bekannt ist der Blutschnee: Algen färben Schnee rot und verringern die Albedo, wodurch Gletscher schneller schmelzen. Die Kryosphäre ist eine empfindliche Biosphäre, die auch über die Atmosphäre besiedelt wird: Staub- und Partikeleinträge, etwa aus der Sahara, transportieren Mikroorganismen in die Alpen. Mit dem Abschmelzen verlieren wir nicht nur Wasser, sondern auch spezialisierte Arten und wichtige Funktionen; zugleich geht biotechnologisches Potenzial verloren. Gletscher speichern Spuren menschlicher Aktivitäten: Radionuklide, Pestizide, Schadstoffe und Mikroplastik. Besonders problematisch sind Polypropylen-Geotextilien, die beim so genannten Gletscherschutz Fasern freisetzen und Ökosysteme belasten. Mikroplastik gelangt in Böden, Gewässer und Nahrungsketten, wirkt als Träger für Schadstoffe und Pathogene und betrifft auch die menschliche Gesundheit. Erste Alternativen wie cellulosebasierte Vliese sind ökologisch verträglicher und recycelbar. Langfristig bleibt die wirksamste Maßnahme die Reduktion von Treibhausgasen. »Gletscherschutz 2.0« erfordert nachhaltige Materialien, ethische Abwägungen und das Bewusstsein, dass Gletscher hochsensible Ökosysteme mit einzigartiger Biodiversität sind.

Summary

Fragile ecosystems and microplastics in the high mountains.

Glaciers are not sterile ice masses but active habitats rich in microorganisms. In microfilms between ice crystals and in meltwater, bacteria, algae, fungi, viruses, and multicellular organisms such as tardigrades or glacier fleas live at the surface. One well-known phenomenon is red snow: algae that color the snow red and reduce albedo, causing glaciers to melt faster. The cryosphere is thus a sensitive ecosystem that is also colonized via the atmosphere: dust and particle deposits, for example from the Sahara, transport microorganisms into the Alps. With glacier melt, we lose not only water but also specialized species and vital ecosystem functions. At the same time, these organisms hold increasing biotechnological potential. Glaciers also store traces of human activity: radionuclides, pesticides, pollutants, and microplastics. Particularly problematic are polypropylene geotextiles used for so called glacier protection, which release fibers and impact ecosystems. Microplastics enter soils, waters, and food chains, act as carriers for pollutants and pathogens, and affect human health. Alternatives, such as cellulose-based fleeces, are more environmentally compatible and recyclable. In the long term, however, the most effective measure remains the reduction of greenhouse gases. 'Glacier Protection 2.0' requires sustainable materials, ethical considerations, and the awareness that glaciers are highly fragile ecosystems with unique biodiversity.

Der Beitrag basiert auf einem von der Autorin überarbeiteten Transkript ihres Vortrags vom 25. März 2025 in der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

✉ PD Dr. Birgit Sattler, Universität Innsbruck, Institut für Ökologie, Technikerstraße 25, 6020 Innsbruck, Österreich; birgit.sattler@uibk.ac.at

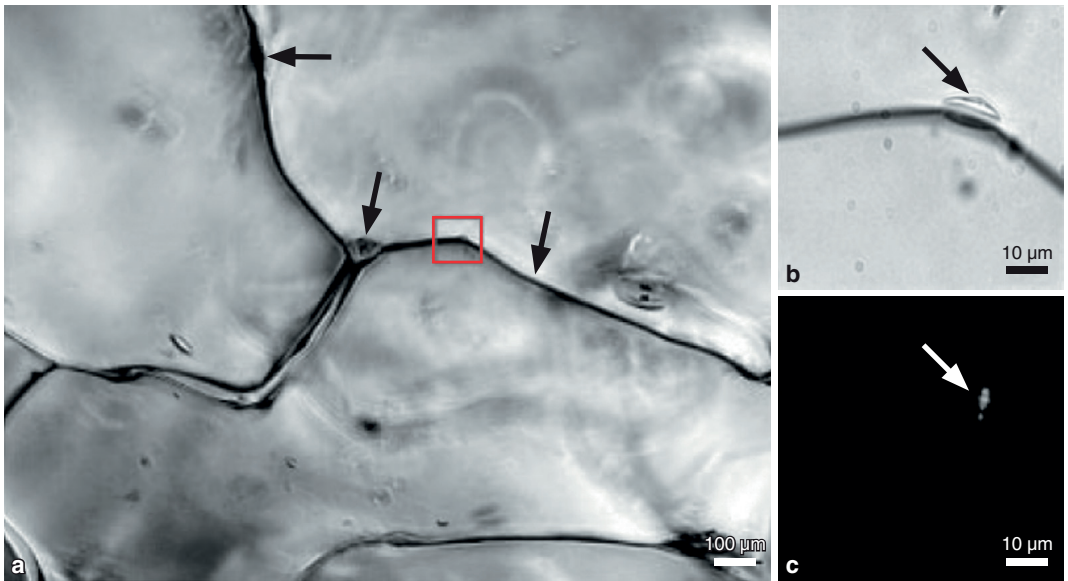


Abb. 1. Durchlichtmikroskopische Aufnahme von Eiskristallen (a; Pfeile: solehaltige, flüssige Grenzschichten zwischen den Eiskristallen) und vergrößerter Ausschnitt eines taschenartigen, solehaltigen Einschlusses (b) mit einer Bakterienzelle an seiner Wand (c; Epifluoreszenzfoto, mit DAPI angefärbt). – Junge et al. (2001), (c) die Autoren.

Einführung

Wir haben bereits gehört, dass ein Gletscher dynamisch ist und »lebt« (vgl. Huss 2026 in diesem Band). Früher wurden Gletscher auch als Monster dargestellt, die bei einem Vorstoß Ackerflächen bedrohen. Im Hinteren Ötztal sind durchaus Pfarrer mit Kreuzen vor den Gletschern gestanden, um sie zum Zurückweichen zu bringen. Bei seinem Rückzug entlässt das Monster dann ein nur noch dünnes Rinnsal aus seinem hinteren Teil (Haid 2004). Auch die Ausdehnung von Schnee und Eis im Jahresrhythmus erinnert im Zeitraffer an einen lebenden Organismus.

Wir versuchen, in einem anderen Licht auf Gletscher zu blicken, in dem es tatsächlich um Leben geht. Diese Wahrnehmung von aktivem Leben unter extremen Bedingungen kann auch einmal Perspektiven auf den Kopf stellen. Dazu gehört allein schon die Vorstellung, dass im Eis – und damit auch in einer Gefriertruhe zuhause – Leben herrschen kann.

Leben in Extremhabitaten

Der treibende Faktor für Leben ist die Temperatur: Wo flüssiges Wasser vorhanden ist, gibt es auch Leben, und höhere Temperaturen bewirken mehr flüssiges Wasser. Wenn Wasser ausfriert, werden Ionen auskonzentriert und dadurch wird der Gefrierpunkt etwas herabgesetzt. An den solehaltigen Stellen zwischen den Eiskristallen treten daher vermehrt Bakterien auf, da die Temperaturen und die Nährstoffkonzentrationen etwas höher sind als in den Eiskristallen (Abb. 1; Junge et al. 2001, Price & Sowers 2004). Tiefer im Eis kommen auch z.B. kettenartige Strukturen aus Cyanobakterien vor, die sich durch spezielle Anpassungen an ein Leben am Gefrierpunkt auszeichnen, oder Algenschnüre, die Bakterienzellen beinhalten (Priscu et al. 2005). D.h., der Gletscher ist tatsächlich lebendig, nicht nur durch seine dynamische Eisbewegung, sondern auch im Sinne von Leben.

Leben in Extremhabitaten bezieht sich aber nicht nur auf tiefe Temperaturen, sondern auch auf extreme Trockenheit, hohe Strahlungsdosen, geringe Nährstoffkonzentrationen und kurze Wachstumsperioden. Dies sind jedoch alles anth-

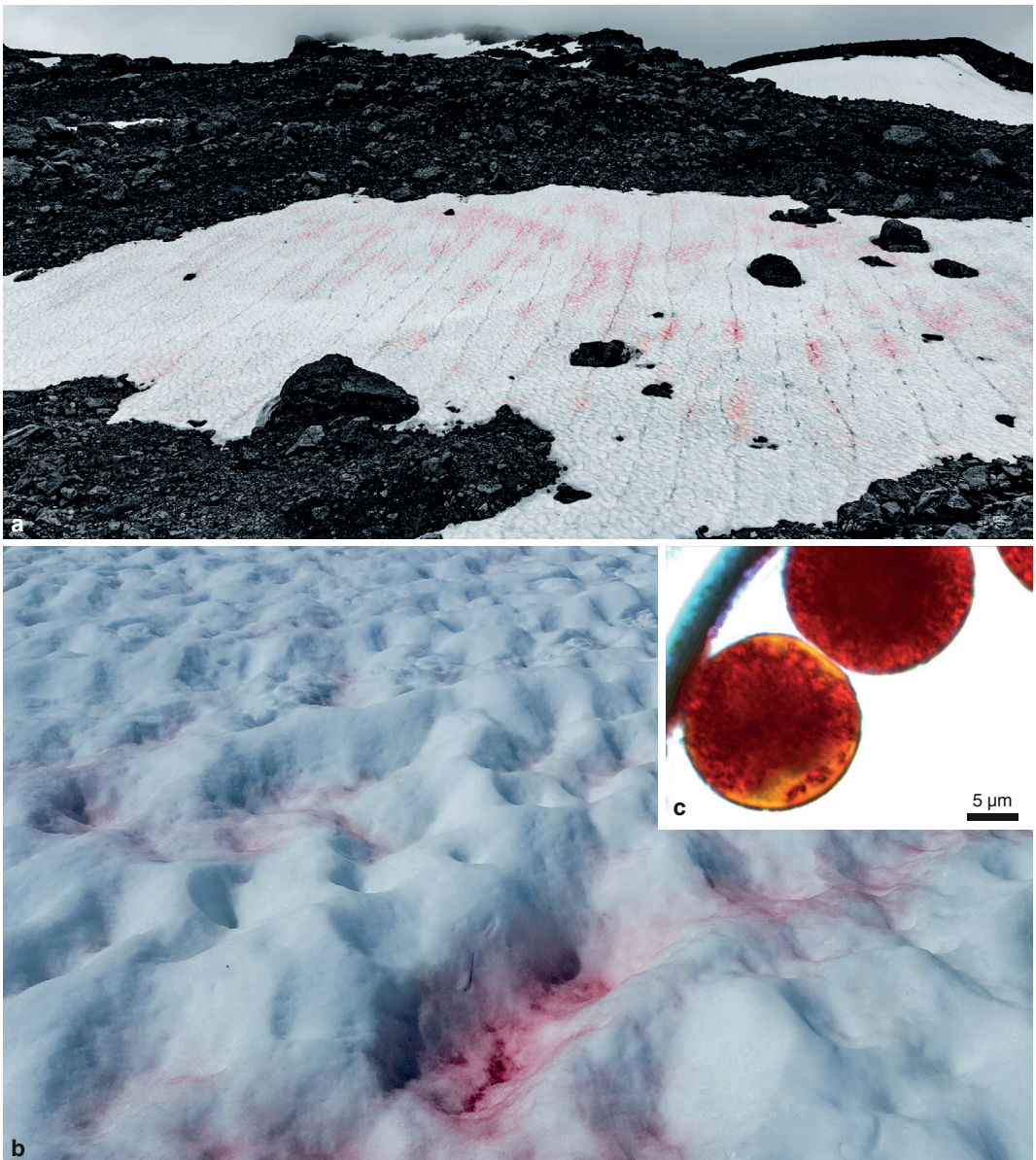


Abb. 2. Blutschnee (Roter Schnee; engl. watermelon snow): **a,b:** Jamtalferner, Österreich, 2018; **c:** Schneeealgen (*Chlamydomonas nivalis*). – Fotos: a,c: Klemens Weisleitner; b: Birgit Sattler.

ropozentrische Begriffe und Maßstäbe. Manche Bakterien aus einem alpinen Gletscher werden bei Zimmertemperatur kaum überleben, weil es ihnen zu heiß ist.

Organismen im Gletschereis

In 1 cm³ geschmolzenem Eiswasser leben etwa 100 000 Bakterien und etwa 10- bis 100-mal mehr Viren. Bei den Viren handelt es sich offenbar um keine humanpathogenen, sondern um Viren, die Bakterien oder andere Einzeller befallen. Daneben



Abb. 3. Grünalgen auf Eis und Schnee (Orne Island, Antarktis, 2013). – Foto: Norman Kuring, NASA.

kommen Hefen vor, die sich durch Pigmentierung vor der Sonneneinstrahlung schützen, sowie weitere Pilze. Auch mehrzellige Lebewesen leben im Eis, z. B. die weniger als 1 mm großen Bärtierchen (*Tardigrada*) und die etwa 2 mm großen Gletscherflöhe (*Desoria saltans*, Springschwänze, *Collembola*). Bärtierchen haben ein äußerst effizientes DNA-Reparatursystem; sie lassen sich auch mehrmals hintereinander einfrieren und wieder auftauen, ohne Schaden zu nehmen (Bertolani et al. 2004), und sind daher von großem Interesse für biotechnologische Anwendungen.

Zusätzlich finden wir z. B. Algen, die ihre Energie von Glühbirnen in touristisch erfassten Eishöhlen wie dem Natur Eis Palast im Hintertuxer Gletscher (Tirol, Österreich) beziehen. Der Begriff »Lampenflora«, der auch in die englischsprachige Fachliteratur Eingang gefunden hat, wurde 1963 von dem Botaniker und Höhlenforscher Klaus Dobat in seiner Dissertation geprägt.

Im späten Frühjahr und im Sommer beobachten wir im Hochgebirge das Phänomen des sogenannten Blutschnees (Abb. 2). Bei den Schneecalgen handelt es sich um Grünalgen (in den Alpen v. a. *Chlamydomonas nivalis*, Abb. 2c), die CO₂ fixieren und die ausschließlich in langsam abtauenden Schneefeldern während des Sommers leben. Sie färben den Schnee aufgrund ihrer Pigmentierung, mit der sie sich gegen UV-Strahlung schützen, rosarot bis karminrot. In der Kosmetikindustrie werden die Algen in Australien als Grundstoff für »biologische Sonnencremes« verwendet.

Besiedelung der Kryosphäre

Bei der Kryosphäre handelt es sich also tatsächlich um eine Kryobiosphäre und um einen äußerst sensiblen Lebensraum, der zum Teil über die Atmosphäre besiedelt wird. Bisher wurde die Atmosphäre vor allem als Transportkorridor von inaktiven Organismen (Sporen) über weite Distanzen gesehen. Inzwischen wird sie als Lebensraum verstanden, in dem u. a. auch Metabolismus und Reproduktion von Organismen ablaufen (Boetius et al. 2015).

In den letzten Jahren ist sehr viel mehr Sahara-Staub in die Alpen gelangt als früher (Di Mauro et al. 2019), was einen zusätzlichen Faktor für eine beschleunigte Schmelze darstellt (s. unten). Mit den Sandpartikeln reisen auch Mikroorganismen mit, die sich in Schnee und Eis absetzen, dort große Flächen besiedeln können und sich auch revitalisieren lassen. Sie leben dort jedoch in »Superzeitlupe«: Ein Bakterium in einem Eiskern braucht mehrere Monate zur Verdoppelung (Anesio et al. 2010), während sich ein Bakterium in einer Klärgrube etwa alle 20 Minuten verdoppelt. Trotz ihres langsamen Wachstums sind die Mikroorganismen jedoch ökologisch relevant und durch das Abschmelzen der Gletscher verlieren wir sehr viel mehr als nur Wasser. Die Biodiversität nimmt ab, besonders an spezialisierten Organismen, die nur in der Kryosphäre vorkommen. Diese sind wesentliche Bestandteile der Nährstoffkreisläufe und damit auch für die Talregionen wichtig; sie haben spezielle Funktionen und können z. B. Kunststoffe oder andere Schadstoffe abbauen; sie haben ein hohes biotechnologisches Potenzial und beeinflussen die Albedo. Die Produktionsrate der supraglazialen Lebensgemeinschaften ist mit 2 kg C pro Hektar und Jahr (0,2 g C m⁻² a⁻¹) durchaus vergleichbar zu der von Mikroorganismen in temperierten Böden.

In Zukunft werden die Gletscher buchstäblich »grüner« werden und damit wird sich die Albedo verändern. Normaler Schnee und Eis reflektieren 80–90 % der einfallenden kurzwelligen Strahlung. Auf einer von Schnee- und Eisalgen bewachsenen Fläche (Abb. 3) liegt die Albedo jedoch nur bei 3–60 %.

In einem sich verstärkenden Rückkoppelungseffekt führen eine Temperaturerhöhung und ein Mehr an flüssigem Wasser in der Atmosphäre zu einem stärkeren Algenwachstum und zu ei-



Abb. 4. Gletscherschutz mit Polypropylenvliesen, Stubaier Gletscher, Ötztal, **a:** zur Stabilisierung einer Liftstützenverankerung; **b:** großflächige Abdeckung. – Fotos: Birgit Sattler.

ner Vergrößerung der mit pigmentierten Algen bewachsenen Gletscherfläche, die wiederum zu einer Verdunkelung der Gletscheroberfläche führt. Durch die verringerte Albedo («Bioalbedo») schmelzen die Gletscher noch schneller, was wiederum zu mehr flüssigem Wasser in der Atmosphäre führt.

Eis und Schnee als Spiegel unserer Gesellschaft

Der Titel dieses Beitrags, *Sensible Ökosysteme und Mikroplastik im Hochgebirge*, könnte auch den Untertitel »Eis und Schnee als Spiegel unserer Gesellschaft« tragen. Schnee und Eis haben ein Gedächtnis und alles, was wir in die Atmosphäre entlassen, wird auf Gletschern gespeichert. Bei dem sog. Kryokonitmaterial auf der Eisoberfläche handelt es sich z. B. um windverfrachtete mineralische Emissionen von Waldbränden, aber auch um künstliche Radionuklide aus Atombombentests (z. B. ehemalige UdSSR 1961–1962 in Novaja Semlja, China 1973–1976 in Lop Nor). Die damalige Radioaktivität war auf den alpinen Gletscheroberflächen sogar höher, als sie direkt nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl Ende April 1986 bei uns in Milch und in Pilzen gemessen worden ist.

Daneben werden andere anthropogene Substanzen gespeichert wie Pestizide, persistente bzw. langlebige organische Schadstoffe (POP, persistent organic pollutant), Dioxine, Weichmacher, Mikro- und Nanoplastikteilchen, aber auch antibiotikaresistente Mikroorganismen und potenzielle Pathogene. Kurioserweise findet man in Eisbohrkernen auch die Schi-Mode der 1980er Jahre in Form von typisch gefärbten Textil- und Faserteilen wieder. Das Makroplastik wird über Wind und Schmelzwasser verteilt und gelangt so in das Wasser, in Sedimente und in den Boden. In den heimischen Gletscherbächen finden wir im Mittel 1,4 Kunststofffunde pro Höhenmeter. Im Laufe der Zeit zerfällt das Makroplastik zu Mikroplastik, d. h. zu Partikeln, die kleiner als 5 mm sind, und gelangt so auch in die Nahrungskette. Organismen wie Eintagsfliegenlarven, Wasserflöhe (Daphnien) oder Ruderfußkrebse (Copepoda) können die Kunststoffpartikel aufnehmen, wenn sie sie für Nahrung halten, und daran verenden.

Bei dem Makro- und Mikroplastik in den Gletscherbächen handelt es sich zum einen um individuellen Abfall und Abrieb, wie er auch auf abgelegenen, pristinen Gletschern durch Schitourengeher oder Bergsteiger entsteht. Jede Art von Funktionskleidung, jeder Sohlenabrieb und jedes Schiwachs hinterlässt Mikroplastikspuren.



Abb. 5. Am Eis haftende Fasern aus Gletscherschutz-Folien. – Foto: Birgit Sattler.

Auf bewirtschafteten Gletschern sind die Hauptquellen die Bautätigkeit, die Gastronomie und der Tourismus. Hinzu kommt die lokale oder atmosphärische Verfrachtung mit Partikeln aus Reifenabrieb als größter Quelle.

Schnee und Eis als Wirtschaftsmasse

Schnee wird zunehmend zur Mangelware, was große Auswirkungen in Gebieten hat, bei denen Schnee und Eis zu einer Wirtschaftsmasse geworden sind. Werden Gletscher mit Folien (Vliesen)

abgedeckt, spricht man von Gletscherschutz durch Geotextilien. Für Gletscherbahnbetreiber ist eine Abdeckung zum Teil essenziell, da es auch um Sicherheitsaspekte wie z. B. der Verankerung von Liftstützen geht (Abb. 4a).

Die bewirtschafteten Gletscher werden stellenweise mit Geotextilien aus Polypropylen geschützt (Abb. 4b). Werden die Vliese wieder entfernt, bleibt ein Belag aus Fasern am Eis haften (Abb. 5); pro m² Eis haben die Fasern eine akkumulative Länge von 3 km (Schwenter 2023). Sie werden mit Wind und Schmelzwasser verbreitet und stellen eine massive Quelle für Mikroplastik dar. Wir finden die Fasern von den Gletscherpisten bis in die Talstationen. In ihnen verhängen sich Organismen (Abb. 6), wie z. B. Köcherfliegenlarven, die die Fasern zum Teil zum Bau ihres Köchers verwenden.

Das Plastik in der Natur kann als »Taxi« für Pathogene bzw. Schadstoffe dienen. An den Partikeln können z. B. Rückstände von Pestiziden, Flammenschutzmitteln und Medikamenten anhaften (Kinigopoulos et al. 2022) und in einem Biofilm um die Partikel findet man Viren, Bakterien und Pilze. Kommen Bakterien mit den Rückständen in Kontakt, kann es zur Ausbildung von Antibiotikaresistenzen kommen.

Auch der Mensch ist Teil des Plastikkreislaufes. Die Partikel werden über die Haut, die



Abb. 6. Fasern aus Polypropylenvliesen: **a:** in den Fasern verhängte Zuckmückenlarve (Chironomidae), **b:** in einen Köcher eingebaute Fasern (Köcherfliegen, Trichoptera). – Fotos: Patrick Schwenter.

Atmung und die Nahrung (z.B. beim Essen plastikverpackter Lebensmittel) aufgenommen und finden sich im Blut und im Stuhl, im Gehirn, in der Plazenta, in der Leber und im Magen-Darm-Trakt. Pro Woche nimmt der Mensch etwa 5 g Plastikpartikel zu sich, was in etwa einer Scheckkarte entsprechen würde (Senathirajah et al. 2021). Die Zahl ist zwar noch umstritten, aber allein die Tatsache, dass wir Mikroplastik aufnehmen, schafft Raum fürs Handeln.

Gletscherschutz 2.0

Inzwischen gibt es bereits internationalen Widerstand aus den Alpenländern Österreich, Italien, Schweiz, Slowenien und Frankreich gegen die Polypropylenvliese. Auch das Österreichische Umweltbundesamt hat reagiert und den Aktionsplan Mikroplastik 2022–2025 erlassen, in dem die Gletscherschutzvliese ein eigenes Thema sind (BMK 2022). Wir haben es geschafft, uns mit der Wirtschaft und den Schiliftbetreibern an einen Tisch zu setzen, und arbeiten jetzt in einem gemeinsamen Projekt an der Entwicklung nachhaltiger Materialien.¹

Einen Gletscher abzudecken bleibt aber immer ein Kompromiss, selbst bei einem Wechsel zu umweltfreundlichem Material aus Cellulose, wie es bereits auf dem Markt ist. Dieses hat keine nennenswerten negativen Auswirkungen auf die Lebewelt, es kommen keine Auswaschungen vor und es ist recycelbar; in einem Upcycling-Prozess entstehen aus den alten Vliesen sogar neue modische Textilien.² Der beste Gletscherschutz ist aber nach wie vor die Dekarbonisierung.

Es stellt sich die ethische Frage, wie weit wir künftig gehen, »um die Gletscher zu retten«.³ Wir müssen uns bei dieser Frage darauf verständigen,

dass es sich bei Gletschern um hochsensible Ökosysteme im Hochgebirge mit einer hohen Biodiversität handelt, die ein großes Potenzial bergen, z.B. für die Biotechnologie, und dass wir dringend einen »Gletscherschutz 2.0« brauchen.

Danksagung

Zu größtem Dank bin ich meinen KollegInnen Klemens Weisleitner, Sophia Mützel, Daniel Gatteringer, Arianna Crosta, Alessandro Cuzzi und Monika Summerer verpflichtet, die alle zu diesem Wissensgewinn beigetragen haben. Zudem möchte ich mich beim ÖAD (Programm Sparkling Science, Projekt PLASTIC.ALPS) sowie der TAWANI Foundation, USA, bedanken.

Literatur

- Anesio, A. M., B. Sattler, C. Foreman, J. Telling, A. Hodson, M. Tranter & R. Psenner. 2010. Carbon fluxes through bacterial communities on glacier surfaces. – *Annals of Glaciology*, 51: 32–40. DOI: [10.3189/172756411795932092](https://doi.org/10.3189/172756411795932092)
- Bertolani, R., R. Guidetti, I. K. Jönsson, T. Altiero, D. Boschini & L. Rebecchi. 2004. Experiences With Dormancy in Tardigrades. – *Journal of Limnology*, 63(s1): 16–25.
- BMK. 2022. Aktionsplan Mikroplastik 2022–2025. – Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien, 58 S. <https://www.bmluk.gv.at/service/publikationen/klima-und-umwelt/aktionsplan-mikroplastik-2022-2025.html> [abgerufen 11.07.2025]
- Boetius, A., A. M. Anesio, J. W. Deming, J. A. Mikucki & J. Z. Rapp. 2015. Microbial ecology of the cryosphere: sea ice and glacial habitats. – *Nature Reviews Microbiology*, 13: 677–690. DOI: [10.1038/nrmicro3522](https://doi.org/10.1038/nrmicro3522)
- Di Mauro, B., R. Garzonio, M. Rossini, G. Filippa, P. Pogliotti, M. Galvagno, U. Morra di Cella, M. Migliavacca, G. Baccolo, M. Clemenza, B. Delmonte, V. Maggi, M. Dumont, F. Tuzet, M. Lafaysse, S. Morin, E. Cremonese & R. Colombo. 2019. Saharan dust events in the European Alps: role in snowmelt and geochemical characterization. – *The Cryosphere*, 13: 1147–1165. DOI: [10.5194/tc-13-1147-2019](https://doi.org/10.5194/tc-13-1147-2019)
- Haid, H. 2004. Mythos Gletscher. – *Pro Vita Alpina* (Hrsg.). Löwenzahn, Innsbruck, Bozen, 112 S.
- Huss, M. 2026. Gletscherschmelze in Zeiten des Klimawandels. – In: Bayer. Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): *Alpen ohne Eis. Gletscherschwund in den Alpen und seine Folgen*. Pfeil, Günding: 33–45.
- Junge, K., C. Krems, J. W. Deming, A. P. Stierle & H. Eicken. 2001. A microscopic approach to investigate bacteria under in situ conditions in
-
- 1 Seit 2021 arbeitet das Institut für Ökologie der Universität Innsbruck mit allen österreichischen (und einem Südtiroler) Gletscherbahnbetreibern, Faser- und Vliesherstellern an der Optimierung und Austestung auf ökologisch vertretbare Materialien.
- 2 Die Cellulosevliese werden über ein Pfandsystem zurückgenommen und in einem Recyclingprozess mit italienischen Herstellern zu neuer Mode verarbeitet (»una giacca dal ghiacciaio« – »eine Jacke vom Gletscher«).
- 3 Tatsächlich sind die alpinen Gletscher nicht mehr »zu retten«. Der Prozess des Abschmelzens kann lediglich verlangsamt werden.

- sea-ice samples. – *Annals of Glaciology*, 33: 304–311. DOI: [10.3189/172756401781818275](https://doi.org/10.3189/172756401781818275)
- Kinigopoulou, V., I. Pashalidis, D. Kalderis & I. Anastopoulos. 2022. Microplastics as carriers of inorganic and organic contaminants in the environment: A review of recent progress. – *Journal of Molecular Liquids*, 350: 118580. DOI: [10.1016/j.molliq.2022.118580](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118580)
- Price, P. B. & T. Sowers. 2004. Temperature dependence of metabolic rates for microbial growth, maintenance, and survival. – *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 101: 4631–4636. DOI: [10.1073/pnas.0400522101](https://doi.org/10.1073/pnas.0400522101)
- Priscu, J. C., E. E. Adams, H. W. Paerl, C. H. Fritsen, J. E. Dore, J. T. Lisle, C. F. Wolf & J. A. Mikucki. 2005. Perennial Antarctic lake ice: A refuge for cyanobacteria in an extreme environment. – In: Castello, J. D. & S. O. Rogers (eds.): *Life in Ancient Ice*. Princeton Press: 22–49.
- Schwenter, P. 2023. Emissions from geotextiles used in glacier skiing areas and testing of alternative materials. Promotion of inclusion in a scientific project. – Masterarbeit am Institut für Ökologie, Universität Innsbruck, 133 S. <https://ulb-dok.uibk.ac.at/ulbtirolhs/download/pdf/8796180> [abgerufen 11.07.2025]
- Senathirajah, K., S. Attwood, G. Bhagwat, M. Carbery, S. Wilson & T. Palanisami. 2021. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. – *Journal of Hazardous Materials*, 404 (Pt B): 124004. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2020.124004](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004)

Diskussion

E. Grill: Bis zu welchen Temperaturen können die kälteliebenden Mikroorganismen, die Sie vorgestellt haben, noch wachsen? Sie haben erwähnt, dass auch im Tiefkühlschrank, also bei -18°C , noch etwas wachsen könnte. Und um welche Bakterien handelt es sich?

B. Sattler: Die Biodiversität auf dem Gletscher ist riesig. Es gibt die Psychrotoleranten wie z. B. *Polaromonas glacialis* oder *Chryseobacterium sp.*, die ein größeres Spektrum haben und auch noch überleben können, wenn es etwas wärmer wird. Psychrotrophe haben ein engeres Spektrum und würden eine Temperaturerhöhung nicht überleben. Die allgemeine Meinung, die auch in Richtung Astrobiologie geht, ist, dass es Organismen gibt, die bis -28°C metabolische Aktivität zeigen können.⁴ Für den Permafrost ist ein Temperaturlimit bis -20°C dokumentiert.⁵ Die Strategie dieser Organismen ist unter anderem, dass sie bei für sie »ungemütlichen« Bedingungen in ein Ruhestadium gehen können. So können sie auch über Jahrhunderte überdauern, bis sie wieder revitalisiert werden. Die Anpassung wechselt je nach Art und Stamm, zum Beispiel in der Ausrüstung mit Gefrierschutzproteinen.

F. Pfluger: Würden Sie Gletscherschmelzwasser auf Hochtour ohne Weiteres trinken? Oder verwenden Sie Silberionen zum Desinfizieren?

B. Sattler: Diese Frage wird oft gestellt. Sie wird auch gern von Kindern zu Schnee gestellt, ob man davon krank werden würde. Im Sommer vermeide ich inzwischen, Gletscherschmelzwasser zu trinken, allein schon wegen der Schutt-

auflage. Wenn wir auf Expedition sind, trinken wir Schmelzwasser, aber trennen vorher das Festmaterial ab. Silberionen setzen wir nicht zu, bisher hatten wir keine schlechten Erfahrungen, auch nicht mit befürchteten Krankheitserregern. Diese haben im Eis nicht ihre Komfortzone.

C. Mayer: Ich kann kommentieren, dass wir auf unseren Expeditionen akkumuliert über sehr viele Monate nur Gletscherschmelzwasser getrunken haben. Bisher geht das noch ganz gut. Aber man kann natürlich nicht sagen, was dann alles im Körper zurückbleibt.

L. Dagostin: Aus Sicht der Naturschutzverbände ist es so, dass wir immer sagen, die Gletschervorfelder und die Moränen sollten geschützt werden. In der Wiederherstellungsverordnung der Europäischen Union sind aber auch die permanenten Gletscher als Ökosystem gelistet, das zu schützen ist.⁶ Welche Vorschläge gibt es da, wenn man von den Vliesen absieht? Können die permanenten Gletscher überhaupt wiederhergestellt werden?

B. Sattler: Die Vliese sehe ich eher als eine Art Pflaster. Es gibt durchaus Visionen, ganze Gletscher abzudecken, um das Abschmelzen zu verzögern, aber allein die entsprechenden Kosten für beispielsweise alle Schweizer Gletscher wären utopisch.⁷ Ich persönlich finde es auch ethisch nicht richtig, Gletscher auf diese Weise »retten« zu wollen, was zudem von der notwendigen Dekarbonisierung ablenken kann.

4 Doran, P. T., A. Hayes, O. Grasset, A. Coustenis, O. Prieto-Ballesteros, ... & Schmidt. 2024. The COSPAR planetary protection policy for missions to Icy Worlds: A review of history, current scientific knowledge, and future directions. – *Life Sciences in Space Research*, 41: 86–99. DOI: [10.1016/j.lssr.2024.02.002](https://doi.org/10.1016/j.lssr.2024.02.002)

5 Rivkina, E. M., E. I. Friedmann, C. P. McKay & D. A. Gilichinsky. 2000. Metabolic Activity of Permafrost Bacteria below the Freezing Point. – *Applied Environmental Microbiology*, 66. DOI: [10.1128/AEM.66.8.3230-3233.2000](https://doi.org/10.1128/AEM.66.8.3230-3233.2000)

6 Verordnung (EU) 2024/1991 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. Juni 2024 über die Wiederherstellung der Natur und zur Änderung der Verordnung (EU) 2022/869. – *Amtsblatt der Europäischen Union*, 2024/1991, 29.07.2024. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32024R1991> [abgerufen 10.04.2025].

7 Huss, M., U. Schwyn, A. Bauder & D. Farinotti. 2021. Quantifying the overall effect of artificial glacier melt reduction in Switzerland, 2005–2019. – *Cold Regions Science and Technology*, 184: 103237. DOI: [10.1016/j.coldregions.2021.103237](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103237)

Vielmehr sollte man als zusätzliche Komponente auch in der Politik verankern, dass Gletscher nicht nur eine Eismasse oder eine Wirtschaftsmasse sind, sondern ein hochsensibles Ökosystem, das eng mit den talgelegenen Ökosystemen zusammenhängt. Von Seiten der Touristikbranche wird oft das Argument verwendet, »wir erhalten die Gletscher ja, indem wir sie beschneien oder Vliese auflegen, und tragen daher zu ihrem Schutz bei«. Das mag sein, aber es handelt sich trotzdem um einen massiven Eingriff in das Ökosystem, gerade im Hinblick auf Neuerschließungen. Für unsere bewirtschafteten Gletscher haben wir uns mit der Wirtschaft grob darauf verständigt, dass sie instand gehalten werden, aber für Neuerschließungen gilt für mich »Finger weg«.

J. Kollmann: Wie teuer sind die Cellulosevliese in ihrer Anschaffung und wie lange halten sie im Vergleich zu den Polypropylenvliesen? Und wie ist die Besiedelung der verschiedenen Vliese durch die Kleinlebewelt?

B. Sattler: Die Kosten für das Cellulosevlies sind höher. Beim Polypropylen geht man von etwa zwei Euro pro m² Vlies aus, bei Cellulose muss man mit dem Doppelten rechnen. Die Lebensdauer der Polypropylenvliese liegt bei drei, maximal vier Jahren. Das Vlies wird im Herbst vor dem ersten größeren Schneefall wieder eingerollt und zwischengelagert und kommt in der nächsten Saison wieder auf den Gletscher. Nach drei bis vier Jahren sind die Vliese zu dunkel und werden als Sondermüll entsorgt, das heißt, sie werden verbrannt. Die Cellulosevliese sind noch in der Testphase, aber man hat sich darauf verständigt, dass die herstellende Firma sie von den jeweiligen Bahnbetreibern zurücknimmt, in einer Art Pfandsystem. Die verwendeten Gletschervliese werden wieder aufgerissen und es wird neues Garn aus ihnen hergestellt, entweder für neue Vliese oder für Modekollektionen. Zur Besiedelung: Unter den Polypropylenvliesen hinkt die mikrobielle Besiedelung im Vergleich zu einem Kontrollfeld immer etwas nach, weil das Eis von der atmosphärischen Deposition relativ gut abgeschnitten ist und das Vlies eher wasserabweisend ist. Die Cellulosevliese sind dagegen wie eine Art atmende Membran und saugen sich stark mit Wasser an. Dadurch kann mehr an Besiedelung eindringen. Wir sehen in ihnen eine wesentlich höhere Biodiversität als

unter Polypropylen und auch die mikrobielle Aktivität ist vergleichbar zu einem unbedeckten Kontrollfeld.

B. Rutkowski: Können Sie etwas dazu sagen, welche Auswirkungen der Verlust der Artenvielfalt der Gletscher auf andere alpine und außeralpine Ökosysteme hat, zum Beispiel auf die Gewässer?

B. Sattler: Allein in Bezug auf Gewässer ist es sehr spannend, was in einem Vorgletschersee passiert, wenn sich der Gletscher zurückzieht. Ein Vorgletschersee hat eine extrem hohe Turbilität durch den Gletscherschluff, das heißt, es gibt sehr viel weniger Photosynthese betreibende Organismen, weil die lichtdurchflutete Zone relativ flach ist. Wenn sich der Gletscher weiter zurückzieht und keine Verbindung mehr zu den Vorgletscherseen besteht, stellt sich eine völlig andere Artenzusammensetzung ein, mit autotrophen Organismen bis in Bodennähe. Wie schon erwähnt, sind die Organismen auf den Gletscheroberflächen sehr aktiv und produzieren vergleichsweise viel Kohlenstoff, und dieser Kohlenstoff fehlt dann in tieferen Tallagen. Das heißt, das Kontinuum in der Nährstoffbilanz ist nicht mehr gegeben, wenn die Biodiversität auf dem Gletscher verloren geht. Es wird sich irgendwann wieder ausgleichen, da sich die Biodiversität mit steigenden Temperaturen von unten nach oben erhöhen wird, wenn Organismen neue Nischen besiedeln. Aber viele der Mikroorganismen auf den Gletschern haben spezifische Funktionen, die verloren gehen werden.

K. Stetter: Die Mikroben sitzen ja nicht nur auf dem Mikroplastikpartikeln, sondern auch auf den Staubkörnern in dem Saharastaub. Für eine Mikrobe ist ein Staubkorn eine ideale Unterlage, ein »Mikrofelsen«, der genug Nahrung bietet. Gilt das auch für ihr Wachstum auf dem Gletscher?

B. Sattler: Die Mikroorganismen reisen sozusagen mit dem Saharastaub mit, der Sand nimmt sie wie ein Schwamm auf. Die Wolken sind voll mit aktiven Mikroorganismen, nicht nur mit inaktiven Sporen. In dem Saharastaub haben wir im Vergleich zum Landepunkt am Gletscher tatsächlich nicht sehr viel an Biodiversität gefunden. Aber auch auf allen anderen Aerosolen

sitzen Mikroorganismen. Die Staubkörner sind tatsächlich ideale Unterlagen, da diese auch Nährstoffe für die Organismen bieten, auch für das weitere Wachstum auf dem Gletscher.⁸ Bei Plastikpartikeln jedoch, welche am Gletscher landen, ist die Gefahr, dass sich die Mikroorganismen gegen Additive wehren, seien es Weichmacher oder UV-Stabilisatoren, und dabei Antibiotikaresistenzen ausbilden.⁹

N. Schäffer: Angesichts der Problematik mit dem Mikroplastik: Sollte Ski fahren auf Gletschern grundsätzlich verboten werden?

B. Sattler: Das ist eine große Frage. Wir haben dazu schon viele Diskussionen geführt, auch mit dem Alpenverein. Ich denke, man muss das große Ganze sehen, auch die wirtschaftlichen Konsequenzen, die entstehen würden, wenn wir alle Gletscherschigebiete schließen würden. Was wir aber zu erreichen versuchen, ist, dass es keine neuen Erschließungen gibt, eben aus ökologischen Gründen. Die bewirtschafteten Gletscher sind ökonomisch relevant bis in die hintersten Täler, aber bei jeder weiteren Erschließung würde ich Ihre Frage mit Ja beantworten.

-
- 8 Meola, M., A. Lazzaro & J. Zeyer. 2015. Bacterial composition and survival on Sahara dust particles transported to the European Alps. – *Frontiers in Microbiology*, 6: 1454. DOI: [10.3389/fmicb.2015.01454](https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01454)
 - 9 Joannard, B. & C. Sanchez-Cid. 2024. Bacterial dynamics of the plastisphere microbiome exposed to sub-lethal antibiotic pollution. – *Microbiome*, 12: 97. DOI: [10.1186/s40168-024-01803-2](https://doi.org/10.1186/s40168-024-01803-2)