

# Die klimagesteuerte Entwicklung von Gletschern und Permafrost seit der Mitte des 19. Jahrhunderts in den österreichischen Alpen

ANDREAS KELLERER-PIRKLBAUER & GERHARD KARL LIEB

Klimageschichte, Gletscherrückzug, Permafrost, Alpen

**Kurzfassung:** Die Klimaentwicklung seit der Mitte des 19. Jahrhunderts, die den Höhepunkt einer kalten Phase innerhalb der Nacheiszeit repräsentiert, ist durch eine nur kurzfristig unterbrochene Erwärmung gekennzeichnet, die sich seit dem 20. Jahrhundert unter anthropogenen Einflüssen massiv verstärkt hat. Dadurch haben sich die Ausdehnung der Gletscher stark verringert, die Temperaturen im Permafrost erhöht und ganz allgemein viele Prozesse im Hochgebirge intensiviert. Der Beitrag zeigt die Veränderungen von Gletschern und Permafrost anhand von Messergebnissen aus langfristigen Monitoring-Programmen und interpretiert diese mit Blick auf ihre gesellschaftliche Relevanz.

## The climate-driven development of glaciers and permafrost since the middle of the 19<sup>th</sup> century in the Austrian Alps

Climate history, glacier recession, permafrost, European Alps

**Abstract:** The climate development since the middle of the 19<sup>th</sup> century, which represents the climax of a cold phase within the postglacial period, is characterized by warming with only short term interruptions. The temperature increase has massively intensified since the 20<sup>th</sup> century due to anthropogenic impact. As a result, the extent of glaciers has been greatly reduced, the temperatures in permafrost have increased and, in general, many processes in the high mountains have intensified. The article shows the changes in glaciers and permafrost based on measurement results from long-term monitoring programs and interprets them with regard to their social relevance.

### Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	8
2	Methodik .....	11
2.1	Grundsätzliches zur Methodik des Monitorings von Gletschern und Permafrost .....	11
2.2	Monitoring von Gletschern .....	12
2.3	Monitoring von Permafrost .....	14
3	Veränderungen der Gletscher .....	16
4	Veränderungen im Permafrost .....	19

5	Veränderungen von Gletschern und Permafrost im Beispielgebiet Großglockner/Pasterze .....	25
6	Diskussion .....	28
7	Fazit .....	31
8	Literatur .....	32

## 1 Einleitung

Gletscher und Permafrost sind in den letzten Jahrzehnten als „Ikonen des Klimawandels“ gleichsam in der Mitte der Gesellschaft angekommen. Kaum eine allgemein gehaltene Abhandlung über die Folgen des aktuellen Top-Themas „Klimawandel“, sei sie wissenschaftlich oder populär, verzichtet zur Veranschaulichung der Veränderungen auf einen Bildvergleich einer exemplarischen Gletscher-Landschaft an mindestens zwei Aufnahmetermi-  
nen – auch nicht der vorliegende Beitrag. In der Tat gibt es kein Naturphänomen, das auch nur annähernd so augenscheinlich die Wirkungen der globalen Erwärmung auf das Hochgebirge zeigen könnte. Diese Veränderungen der Gletschergeometrie sind schon seit der frühen Neuzeit bekannt und waren mit ein Grund für die Etablierung der Gletscherforschung im 19. Jahrhundert.

Permafrost, definitionsgemäß Untergrund, der langfristig auch im Sommer Temperaturen von 0 °C oder darunter aufweist, wurde als unsichtbares Naturphänomen in den Alpen erst in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts entdeckt und erforscht. Allerdings reichen Forschungen zu Permafrost-bezogenen Landschaftsformen (Blockgletscher, Kapitel 2.3) in der Schweiz bis in die 1910er-(CHAIX 1919) und in Österreich bis in die 1920er-Jahre (FINSTERWALDER 1928) zurück. Permafrost hat spätestens seit den frühen 2000er-Jahren zunehmend von sich reden gemacht, insbesondere durch Felsstürze (wie das in Kap. 6 thematisierte Ereignis vom Fluchthorn im Juni 2023). Heute werden Gletscher und Permafrost im Kontext des Klimawandels gerne in einem Atemzug genannt, aber dennoch selten zusammen erforscht. So gibt es bisher auch noch keine umfassende Studie, die die jüngsten Veränderungen von Gletschern und Permafrost in den Alpen gemeinsam betrachtet, sondern es werden auf dieser räumlichen Ebene die beiden Parameter separat behandelt (z. B. Gletscher: PAUL et al. 2020; Permafrost: BOECKLI et al 2012; Blockgletscher: KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2018).

Gletscher und Permafrost sind in den österreichischen Alpen zwar nur auf limitierte, bezogen auf den Gesamtstaat kleine Flächen in den höchsten Lagen der Alpen begrenzt, spielen aber hier für die Gesamtheit der Naturprozesse eine zentrale Rolle. Abbildung 1 zeigt die aktuelle räumliche Verbreitung der beiden Phänomene, wobei die Darstellung der Gletscher exakter ist und auf einer inventarmäßigen Erhebung der Gletscher beruht, während man für den Permafrost (wegen dessen Unsichtbarkeit an der Oberfläche) auf eine Modellierung

von Wahrscheinlichkeiten des Auftretens angewiesen ist. Dabei ist die Farbskalisierung in Abbildung 1 so zu lesen, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Permafrost umso größer ist, je kälter die Farbtöne sind. Die Gesamtfläche der Gletscher Österreichs umfasste mit Stand 2015/16 rund 350 km<sup>2</sup> (0,4 % der Staatsfläche; alpenweit 1807 km<sup>2</sup>; PAUL et al. 2020), für den Permafrost gelten rund 1600 km<sup>2</sup> (1,9 % der Staatsfläche; alpenweit 6200 km<sup>2</sup>; BÖCKLI et al. 2012) als aktuell beste Zahlen.

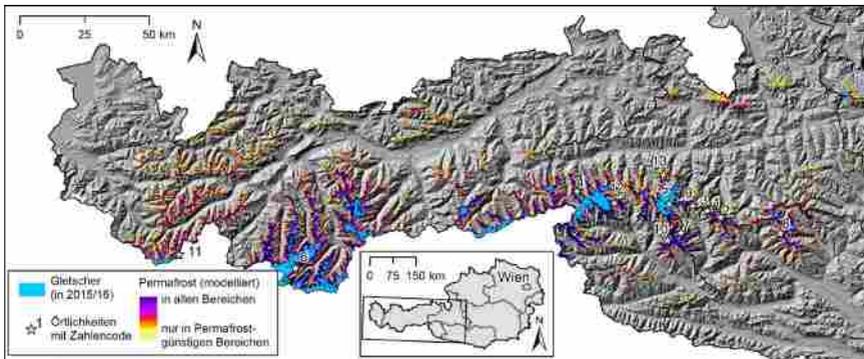


Abbildung 1: Verbreitung der Gletscher (PAUL et al. 2020) und Wahrscheinlichkeit des Vorkommens von Permafrost (BÖCKLI et al. 2012) in den österreichischen Alpen sowie die Lage aller im Text erwähnten Örtlichkeiten mit Monitoring-Aktivitäten (Zahlencode): 1 Hoher Sonnblick, 2 Goldbergkees, 3 Kleinfleisskees, 4 Venedigerkees, 5 Pasterze-Burgstall, 6 Hintereisferner, 7 Hinteres Langtalkar Blockgletscher, 8 Dösender Blockgletscher, 9 Fallbichl-Hochtor, 10 Tschadinhorn-Blockgletscher, 11 Südliches Fluchthorn, 12 Innerer Knorrkogel, 13 Kitzsteinhorn.

Figure 1: Distribution of glaciers (PAUL et al. 2020) and probability of permafrost occurrence (BÖCKLI et al. 2012) in the Austrian Alps as well as the position of all locations with monitoring activities mentioned in the text (numerical code): 1 Hoher Sonnblick, 2 Goldbergkees, 3 Kleinfleisskees, 4 Venedigerkees, 5 Pasterze-Burgstall, 6 Hintereisferner, 7 Hinteres Langtalkar rock glacier, 8 Dösen rock glacier, 9 Fallbichl-Hochtor, 10 Tschadinhorn rock glacier, 11 Southern Fluchthorn, 12 Innerer Knorrkogel, 13 Kitzsteinhorn.

Grundlage der Veränderungen von Gletschern und Permafrost sind, da es sich bei beiden um von bestimmten Klimabedingungen abhängige und somit klimasensitive Phänomene handelt, die langfristigen (über Jahrzehnte und längere Zeiträume erfolgenden) Schwankungen der klimatischen Bedingungen. Hierbei ist zwischen natürlichen Klimaschwankungen und dem anthropogenen Klimawandel seit der Industrialisierung zu unterscheiden. Erstere werden, je nach ihrer Zyklizität, von unterschiedlichen Variationen solarer Aktivität und der Erdbahnparameter ausgelöst und erklären etwa die Kalt-Warmzeit-Zyklen des Pleistozäns oder die Klimapendelungen des Holozäns. Zu diesen gehört eine im ausgehenden Mittelalter einsetzende Kältephase, die wegen der durch sie ausgelösten Gletschervorstöße auch „Kleine Eiszeit“ oder „Little Ice Age“ (LIA) genannt wird und ihr letztes Temperaturminimum in der Mitte des 19. Jahrhunderts erreichte (SCHÖNWIESE 2019).

Spätestens mit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts setzte ein deutlicher Erwärmungstrend ein, der im Wesentlichen noch aus natürlichem Antrieb begann, jedoch im 20. Jahrhundert zunehmend durch die im Treibhauseffekt begründete Klimawirksamkeit der bei menschlichen Aktivitäten freigesetzten Emissionen von  $\text{CO}_2$  und anderen Gasen überlagert wurde. Die atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Konzentration ist von 280 ppm im Jahr 1750 auf 410 ppm im Jahr 2019 angestiegen, wobei diese Konzentration die höchste in den letzten zumindest zwei Millionen Jahren ist (IPCC 2023). Im Juli 2023 lag dieser Wert bei über 420 ppm (<https://keelingcurve.ucsd.edu>), Tendenz steigend.

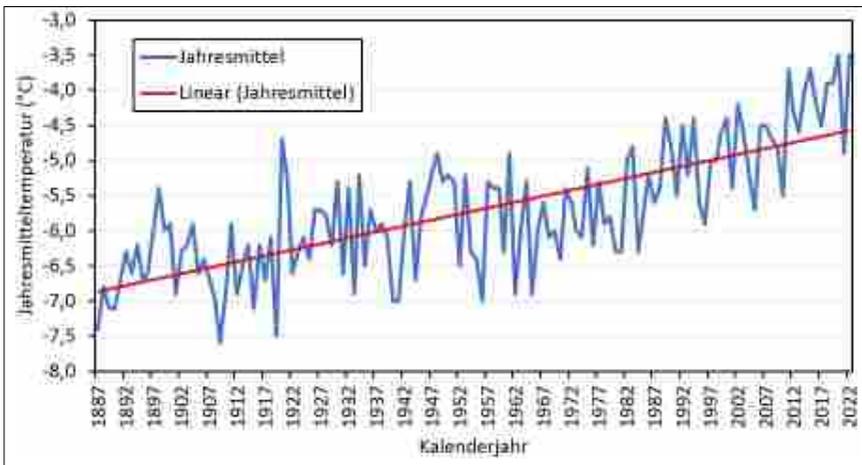


Abbildung 2: Jahresmittel der Lufttemperatur auf dem Hohen Sonnblick (3105 m; Hohe Tauern, Österreich) und linearer Trend der Temperaturen im Zeitraum 1887–2022 (Datengrundlage: GeoSphere Austria, HISTALP).

Figure 2: Mean annual values of air temperature (blue) at Hoher Sonnblick (3105 m; Hohe Tauern Range, Austria) and linear trend of temperature (red) in the period 1887–2022 (data source: GeoSphere Austria, HISTALP).

Aktuell geht das IPCC (2023) davon aus, dass die seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts eingetretene Erwärmung zu etwa zwei Drittel hierauf zurückzuführen, also in diesem Ausmaß anthropogen bedingt ist. Da in dieser neoklimatologischen Periode bereits zahlreiche Temperatur-Messreihen zur Verfügung stehen – an der österreichischen Hochgebirgsstation Hoher Sonnblick seit Sommer 1886 (Abb. 2) – ist dieser Klimawandel im österreichischen Hochgebirge ausgezeichnet dokumentiert, weshalb die vorliegende Studie nur diesen Zeitraum behandelt. Abbildung 2 zeigt deutlich den Anstieg der Lufttemperatur im Zeitraum 1887–2022 nach Einzeljahren (mit starken Schwankungen) und als linearer Trend. Vergleicht man zwei sogenannte „Klimanormalperioden“ (d. h. 30-jährige Mittelwerte nach Richtlinien der World Meteorological Organisation), so ergibt sich für die Klimanormalperiode 1891–1920 ein Mittelwert von  $-6,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , für jene

von 1991–2020 hingegen ein solcher von  $-4,7^{\circ}\text{C}$ , was einer Erwärmung von  $1,7^{\circ}\text{C}$  in 100 Jahren entspricht.

Während die Oberfläche von Gletschern unmittelbar an das atmosphärische Geschehen (mit den Hauptfaktoren Strahlung, Temperatur, Niederschlag und Wind) gekoppelt ist und Gletscher daher rasch auf Veränderungen in der Atmosphäre reagieren, ist dies bei Permafrost als Temperaturzustand des Untergrundes nicht der Fall. Im Winter wird die Permafrostschicht in der Regel durch die Schneedecke und im Sommer durch eine meist gut isolierende saisonale Auftauschicht von der Atmosphäre entkoppelt. Die Folge davon ist eine deutlich verzögerte Reaktion des Permafrosts auf klimatische Variationen. Aufgrund der schon erwähnten Tatsache des erst spät erwachenden Interesses an Permafrost, verbunden mit der Schwierigkeit, ein Untergrundphänomen zu beobachten, liegen über den Permafrost ungleich kürzere Zeitreihen vor, aus denen man seine Veränderungen beurteilen kann. Im Gegensatz zu den Gletschern gibt es systematisches Monitoring des Permafrosts erst seit den späten 2000er-Jahren (Kapitel 2).

Gesellschaftliches Interesse kommt der gegenständlichen Thematik nicht nur aufgrund der Tatsache zu, dass die raum-zeitlichen Variationen beider Phänomene Klimawandelfolgen und -indikatoren sind, sondern auch durch viele andere Aspekte. Unter diesen seien exemplarisch wasserwirtschaftliche Fragen in Zusammenhang mit dem Gletscherrückgang oder Naturgefahren wie die erwähnten Felsstürze – die sowohl mit zurückgehenden Gletscherflächen als auch mit Temperaturänderungen und Abschmelzen des Eises im Permafrost zusammenhängen können (Kapitel 6) – genannt. Für weitere Ausführungen zur gesellschaftlichen Relevanz von Eis in den Alpen wird auf LIEB & KELLERER-PIRKLBAUER (2019) verwiesen, worin sich auch Grundtatsachen zu Gletschern und Permafrost und den mit ihnen verbundenen Prozessen finden.

## **2 Methodik**

### **2.1 Grundsätzliches zur Methodik des Monitorings von Gletschern und Permafrost**

Da dieser Beitrag die langjährigen Veränderungen von Gletschern und Permafrost zum Inhalt hat, sind im Folgenden aus der Vielzahl an verfügbaren Methoden, mit denen man die beiden Phänomene erforschen kann, jene relevant, die sich zum Erfassen ebendieser Veränderungen eignen. Langfristige, durch methodische Standardisierung systematische Dauerbeobachtung von Vorgängen wird Monitoring genannt. Monitoring für die gegenständlichen Veränderungsprozesse beruht auf quantitativen Verfahren mit Messungen bestimmter Größen. Eine gewisse Sonderstellung hat fotografisches Monitoring inne, wie es aktuell durch automatische Kameras auch an vielen Gletschern (vielfach Webcams; z. B. am größ-

ten Gletscher in Österreich, der Pasterze: <https://grossglockner.panomax.com/>) und in Permafrostgebieten erfolgt. Hierbei handelt es sich nicht a priori um eine quantifizierende, sondern um eine visualisierende Methode, deren Produkte jedoch bei Bedarf auch quantitativ ausgewertet werden können (z. B. Webcam-Fotos Pasterze: KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2021).

Für manche Naturphänomene haben sich – meist im Zuge der Etablierung der zugehörigen Wissenschaften im 19. Jahrhundert – Monitoringsysteme entwickelt, die von darauf spezialisierten Organisationen getragen werden, wofür die für das Monitoring der Witterung bzw. des Klimas zuständigen (halb)staatlichen Wetterdienste das wohl beste Beispiel darstellen (in Österreich: GeoSphere Austria <https://www.geosphere.at/>). Auch für das Monitoring der Gletscher fanden sich in den meisten Staaten Organisationen, die sich dieser Aufgabe annahmen. In Österreich war dies der Alpenverein, der mit einem stark rezipierten „Aufruf“ an seine Mitglieder 1891 einen Gletschermessdienst begründete (PATZELT 2018). Dieser erfüllt unter der Patronanz des Österreichischen Alpenvereins immer noch seine Aufgabe auf der Grundlage ehrenamtlicher Tätigkeit, aktuell unter der Leitung der beiden Autoren dieses Beitrags.

Im Gegensatz dazu steckt das Monitoring des Permafrosts in Österreich gewissermaßen erst in den Kinderschuhen (im Gegensatz etwa zur Schweiz; PERMOS 2023). Bislang gab es nur Einzelinitiativen wissenschaftlicher Organisationen, die an bestimmten Orten Permafrost-Monitoring auf der Grundlage unterschiedlicher Methoden betrieben. Eines von diesen Teams ist die vom Erstautor koordinierte Gruppe, in der Institute der Universität Graz und der Technischen Universität Graz sowie GeoSphere Austria kooperieren (LIEB et al. 2016). Durch den Erstautor erfolgte seit den 2000er-Jahren der Aufbau eines Netzwerks zum Monitoring von Bodentemperaturen in Permafrost-Gebieten der Niederen und Hohen Tauern, die Bewegung von Blockgletschern (Kapitel 2.3) wird schon seit den 1990er-Jahren jährlich im Nationalpark Hohe Tauern gemessen (KELLERER-PIRKLBAUER & KAUFMANN 2012). Dieser Nationalpark fördert seit 2018 diese Monitoring-Aktivitäten durch zwei verschiedene Programme und stellt damit erstmals – zumindest für ein größeres, repräsentatives Gebiet der österreichischen Alpen – die Dauerbeobachtung von Permafrost auf eine sichere Basis.

## 2.2 Monitoring von Gletschern

Beim Monitoring von Gletschern werden zwei verschiedene Aspekte der Veränderungen untersucht, und zwar zum einen die Variation der Gletschergeometrie und zum anderen der Massenumsatz. Das Monitoring von Gletschern wird international im Rahmen verschiedener Initiativen koordiniert betrieben, worüber das World Glacier Monitoring Service (WGMS mit Sitz in Zürich; <https://wgms.ch/>) leicht zugänglich aktuelle, weltweite Daten anbietet.



Abbildung 3: Fotografische Impressionen vom jährlichen Monitoring der Gletschergeometrie an der Pasterze und in ihrer Umgebung (Glocknergruppe, Hohe Tauern); (a) Maßbandmessung von fixen Punkten im Gletschervorfeld; (b) Traditionelle analoge Einmessung von Höhenpunkten mittels Tachymeter, mittlerweile ersetzt durch (c) differentielle GPS-Technologie (bzw. GNSS/Global Navigation Satellite Systems); (d) mit Zahlencode markierte Steine als Grundlage der Messung der Oberflächenbewegung; Fotos: Autoren.

Figure 3: Photographic impressions of the annual monitoring of glacier geometry at the Pasterze Glacier and its surroundings (Großglockner mountains, Hohe Tauern); (a) tape measurement from fixed points in the glacier forefield; (b) traditional analogous measurement of the elevation at specific points via tachymeter, now replaced by (c) differential GPS-technology (GNSS/Global Navigation Satellite Systems); (d) stones marked with numerical codes as a basis for measuring surface movement; photos: authors.

Die Geometrie wird als Länge, Fläche, Höhe der Eisoberfläche und/oder (wenn der Untergrund durch geophysikalische Erkundungen bekannt ist) des Volumens des Gletschers beschrieben. Die Erfassung der Veränderung dieser Größen ist bei der Länge weitaus am einfachsten und wird daher – in Österreich ebenso wie weltweit – an sehr vielen Gletschern durchgeführt. Wenn man von Gletschervorstoß oder -rückzug spricht, beziehen sich diese Begriffe in der Regel auf eine Zu- oder Abnahme der Länge, die ihrerseits entsprechende Veränderungen der Fläche repräsentieren. Die Messung ist an den meisten Gletschern mit einfachen Mitteln möglich, was erst deren hierbei übliche jährliche Durchführung ermöglicht (Abb. 3). Vom Österreichischen Gletschermessdienst werden derzeit an rund 90 Glet-

schern (ca. 10 % aller Gletscher in Österreich) jährliche Messungen der Längenänderung durchgeführt (LIEB & KELLERER-PIRKLBAUER 2023).

Der Massenumsatz besteht aus den „Einnahmen“ des Gletschers (Akkumulation von Schnee) und den „Ausgaben“ (Abschmelzung oder Ablation), die mit relativ aufwändigen Methoden im Gelände punktuell gemessen, auf die Gesamtfläche des Gletschers extrapoliert und schließlich als Massenbilanz einander rechnerisch gegenübergestellt werden. Man spricht von positiver Massenbilanz, wenn die Akkumulation über ein Gletscher-Haushaltjahr hinweg (1.10.–30.9. des Folgejahres) größer war als die Ablation. Mehrere positive Massenbilanzen führen in der Gletschergeometrie zur Zunahme der oben genannten Größen nach einer von Gletscher zu Gletscher unterschiedlichen Zeitspanne. Diese sogenannte Reaktionszeit korreliert mit der Gletschergröße, indem kleine Gletscher rascher als große reagieren. Die aktuell weltweit vorherrschenden negativen Massenbilanzen führen daher zum Schrumpfen der Gletscher (Gletscherschwund) und langfristig zu deren Verschwinden. Eine mit dem Massenumsatz in enger Beziehung stehende Größe ist die Oberflächenbewegung des Eises, die bei positiven Massenbilanzen höher als bei negativen ist, weshalb die Bewegung derzeit an fast allen Gletschern, an denen sie gemessen wird, abnimmt. Jährliche Massenbilanzen werden aktuell an 13 österreichischen Gletschern von unterschiedlichen Organisationen gemessen und an das World Glacier Monitoring Service gemeldet (<https://wgms.ch/latest-glacier-mass-balance-data/>).

### 2.3 Monitoring von Permafrost

Da Permafrost ein thermisches Phänomen des Untergrundes ist, bestehen Monitoring-Aktivitäten primär aus Messungen der Temperatur an der Erdoberfläche und/oder in unterschiedlichen Tiefen in seichten (bis 1 m) und tieferen Bohrlöchern. Dabei kommen hochauflösende digitale Registriergeräte (Miniatur-Temperatur-Datenlogger) zum Einsatz, die entweder einmal jährlich ausgelesen werden oder – im Falle direkter Funkverbindungen zwischen Messsensor und Operator – kontinuierlich überwacht werden können (z. B. <https://www.sonnblick.net>). Die Temperaturen selbst sind das Ergebnis der Energiebilanz, die sich aus dem Zusammenwirken unterschiedlicher Komponenten (Strahlungsbilanz sowie fühlbarer, latenter und Bodenwärmestrom, Schnee) ergibt. Aus empirischen Befunden ist bekannt, dass Jahresdurchschnittstemperaturen an der Oberfläche von 0 °C oder weniger die Existenz von Permafrost im Untergrund anzeigen. An schneereichen Permafrost-Standorten wird zudem das Temperaturgeschehen an der Oberfläche von dem der Luft (durch die isolierende Schneedecke) entkoppelt, sodass sich über Permafrost für Wochen und Monate unter der Schneedecke anhaltend konstante Temperaturen von -3 °C oder darunter einstellen (HAEBERLI 1973).



Abbildung 4: Fotografische Impressionen vom jährlichen Monitoring der Bodentemperatur an der Gipfelpyramide des Inneren Knorrkogels (Venedigergruppe, Hohe Tauern); (a) Einrichtung eines neuen seichten Permafrost-Bohrloches, welches in mehreren Tiefen automatisch Felstemperaturen aufzeichnet, (b) fertig eingerichteter Felstemperatursensor; sowie (c) vom Dösenener Blockgletscher (Ankogelgruppe, Hohe Tauern; im Bild links: Säuleck, 3086 m) mit typischer Ausprägung und (d) Messungen der Oberflächenbewegung an diesem Blockgletscher mittels differentieller GPS-Technologie; Fotos: Autoren.

Figure 4: Photographic impressions of the annual monitoring of ground temperatures at the summit pyramid of the Innerer Knorrkogel (Venediger Mountains, Hohe Tauern Range); (a) installation of a new shallow permafrost borehole, which automatically records rock temperatures at different depths, (b) completed set up rock temperature sensor; as well as (c) of Dösen rock glacier (Ankogel Mountains, Hohe Tauern Range; left: Säuleck, 3086 m) with typical physiognomy and (d) measurement of surface movement at the same rock glacier using differential GPS-technology; photos: authors.

Temperaturen im Untergrund können nur dadurch ermittelt werden, indem man die Temperatursensoren in Bohrlöcher einbringt. Unter diesen kommt den „tiefen Bohrlöchern“ besondere Bedeutung zu, weil sie die Temperaturverhältnisse bis weit in den Permafrost-Körper hinein registrieren. Da die Jahresschwankung der Temperatur mit zunehmender Tiefe abnimmt (in 15–20 m Tiefe geht diese gegen Null), werden thermische Variationen aufgrund des unterschiedlichen Witterungscharakters von Einzeljahren herausgefiltert und langjährige Trends besser erkennbar. Des Weiteren können in Bohrlöchern auch andere geophysikalische Größen erhoben werden, was an den beiden in Österreich derzeit betriebenen Standorten mit tiefen Bohrlöchern (Sonnblick und Kitzsteinhorn,

beide in den Hohen Tauern) jedoch nur im geringen Umfang der Fall ist. Ebenso fehlt langfristiges Monitoring der Untergrundeigenschaften (z. B. des Eisgehalts mittels geoelektrischer Profile), weshalb in Kapitel 4 auf die Ergebnisse des Oberflächen-Temperatur-Monitorings in den Hohen Tauern zurückgegriffen wird.

Eisübersättigte Schuttkörper im Permafrost können bei ausreichenden Hangneigungen in Bewegung geraten und mit Geschwindigkeiten von in der Regel wenigen Zentimetern bis Metern pro Jahr Hänge hinunterkriechen. Solche Schuttkörper werden aktive Blockgletscher genannt, obwohl sie im Allgemeinen keine direkte genetische Beziehung zu Gletschern aufweisen (BARSCH 1996). Die Messung dieser Bewegung an der Oberfläche mit geodätischen Verfahren (Abb. 4) wurde an einigen dieser Blockgletscher schon vollzogen, bevor man überhaupt wusste, dass sie durch Deformation des Permafrost-Eises entstehen (PILLEWIZER 1938). An einigen aktiven Blockgletschern Österreichs liegen lange Messreihen vor – die geschlossensten wiederum aus dem von den Autoren betreuten Untersuchungsgebieten in den Hohen Tauern (PELLET et al. 2022).

### 3 Veränderungen der Gletscher

Für die österreichischen Alpen steht in Bezug auf das Monitoring der Gletschergeometrie die lange Datenreihe des Österreichischen Gletschermessdienstes (Kapitel 1) zur Verfügung (Abb. 5). Die Graphik zeigt für alle Einzeljahre den An-

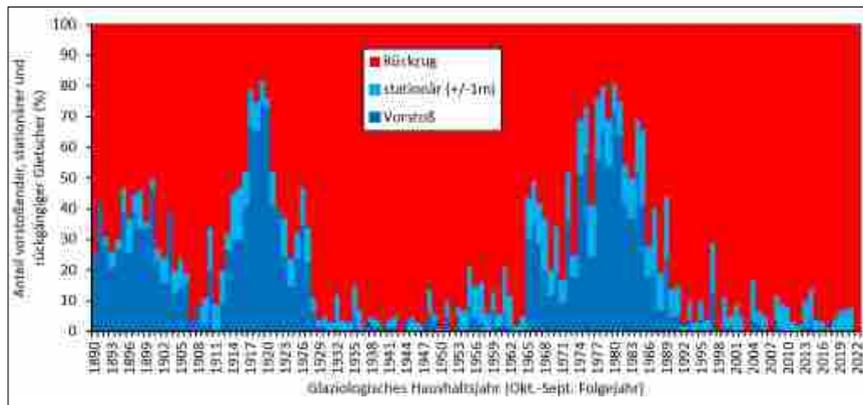


Abbildung 5: Jährlicher Anteil der vorstößenden, stationären und sich zurückziehenden Gletscher an allen beobachteten Gletschern in Österreich seit 1890 in Prozenten (Erläuterungen im Text; Datengrundlage: Österreichischer Gletschermessdienst; vgl. LIEB & KELLERER-PIRKLBAUER 2023).

Figure 5: Annual percentage of advancing, stationary and retreating glaciers of all observed glaciers in Austria since 1890 (explanations in the text; data source: Austrian Glacier Measurement Service; cf. LIEB & KELLERER-PIRKLBAUER 2023).

teil vorstoßender, stationärer und sich im Rückzug befindlicher Gletscher, von denen Messwerte zur Verfügung standen, und deren Differenzierung nach dem Gletscherverhalten, wobei man von stationärem Verhalten bei Längenänderungen innerhalb von +/-1 m spricht. Die Graphik verbirgt zwar, dass die Zahl der beobachteten Gletscher stark schwankt, was u. a. dem ehrenamtlichen Charakter des Messdienstes geschuldet ist. Dennoch erkennt man die für diesen Zeitraum typischen Entwicklungen: Während insgesamt die Anzahl der sich zurückziehenden Gletscher überwiegt und seit den 1990er-Jahren Vorstöße nur mehr seltene Ausnahmen sind oder überhaupt fehlen, fallen zwei Phasen mit deutlich erhöhten Anteilen vorstoßender Gletscher auf, und zwar um 1920 sowie zwischen 1965 und 1985.

Ergänzt um die vom Österreichischen Gletschermessdienst nicht erfasste Periode vor 1890 ergibt sich somit folgender Verlauf der jüngsten Gletschergeschichte:

- Unmittelbar nach dem Hochstand um 1850 begannen sich die Gletscher zurückzuziehen.
- In den letzten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts wurden an einzelnen Gletschern auch Vorstöße registriert, was mit ein Grund für den in Kapitel 2.1 genannten „Aufruf“ war: Man mutmaßte, dass die Gletscher erneut – wie zuvor schon mehrfach in der Neuzeit – auf Hochstandsgröße anwachsen würden. Tatsächlich stießen zwischen 1890 und 1905 viele Gletscher vor, ihr Anteil blieb aber stets und meist deutlich unter 50 % (Daten der Einzeljahre in PATZELT 2018, Tab. 2.1). Daher erscheint es in der Ex-post-Betrachtung als diskussionswürdig, ob die Ausweisung eines in der älteren Literatur mitunter so bezeichneten „Vorstoßes von 1890“ überhaupt gerechtfertigt ist.
- Es folgten mehrere Jahre mit vorherrschendem Gletscherrückzug, bevor zwischen 1916 und 1920 mehr als die Hälfte der vermessenen und – wie entsprechende Moränen beweisen – viele weitere Gletscher vorstießen.
- Die zugrundeliegende kühle Phase dauerte jedoch nur kurz an, sodass ab den späten 1920er-Jahren wieder fast alle Gletscher im Rückzug waren. Diese markante Rückzugsphase war an eine positive Temperaturabweichung gebunden und sollte dreieinhalb Jahrzehnte andauern.
- Recht schlagartig stellte sich mit dem Haushaltsjahr 1965/66 eine Trendumkehr ein, die ab Mitte der 1970er-Jahre in acht Jahren mehr als 50 % der beobachteten Gletscher vorstießen ließ – das letzte dieser Jahre war das Haushaltsjahr 1983/84. Damit dauerte diese letzte Vorstoßperiode deutlich länger als jene um 1920.
- In der zweiten Hälfte der 1980er-Jahre nahm die Zahl der im Rückzug befindlichen Gletscher erneut rasch zu und sank mit Ausnahme der Haushaltsjahres 1996/97 nie mehr unter 80 %, ja lag meist deutlich über 90 % und in einigen Jahren bei 100 %, zuletzt im Haushaltsjahr 2021/22. Den Hintergrund dieser Entwicklung bildet, wie in Abbildung 2 klar ersichtlich ist, die anthropogen beschleunigte globale Erwärmung des Klimas (anthropogener Klimawandel).

Dass der Gletscherschwund sich seit dem ausgehenden 20. Jahrhundert noch verstärkt hat, ist der Abbildung 6 zu entnehmen. Diese zeigt das arithmetische Mittel aller registrierten Längenänderungen der österreichischen Gletscher seit 1960, also die Vorstoßphase von 1965 bis 1985 sowie die letzten Jahre davor und die gesamte Periode danach. Man erkennt zum einen, wie wenig des davor erfolgten Rückzugs die genannte Vorstoßphase kompensieren konnte, und zum anderen, dass die Rückzugswerte tendenziell ab den 1990er-Jahren zunahmen und im Haushaltsjahr 2002/03 erstmals im Mittel aller Gletscher über 20 m betragen, mehr als je zuvor, seit es Beobachtungen gibt. Bis 2022 gab es bereits fünf solcher Jahre mit einem neuen Maximalwert von -28,7 m im Haushaltsjahr 2021/22 (LIEB & KELLERER-PIRKLBAUER 2023). Dies ist umso bemerkenswerter, als die Gletscher ja wesentlich kleiner als früher und somit die registrierten Rückzugsbeträge in Bezug auf die Gesamtlängen der Gletscher relativ größer geworden sind.

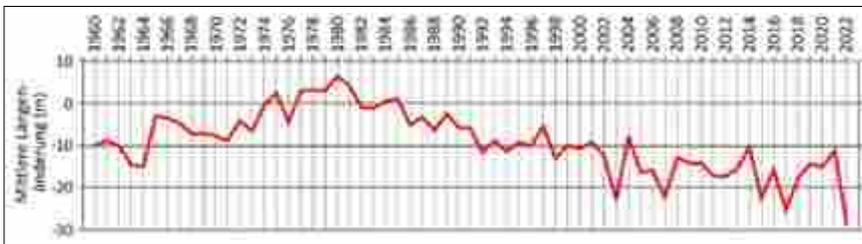


Abbildung 6: Mittlere Längenänderung der österreichischen Gletscher im Zeitraum 1960–2022. Der bisherige negative Maximalwert der mittleren Gletscherlängenänderung wurde im Haushaltsjahr 2021/22 mit -28,7 m/a erreicht (weitere Erläuterungen im Text; Datengrundlage: Österreichischer Gletschermessdienst).

Figure 6: Mean length variation of the Austrian glaciers in the period 1960–2022. So far, the negative maximum value of the mean change in glacier length was reached in 2021/22 at -28.7 m/a (further explanations in the text; data source: Austrian Glacier Measurement Service).

Diese Entwicklung führt in letzter Konsequenz zum Verschwinden von Gletschern, einem Prozess, der keineswegs neu ist, sondern dem bereits PASCHINGER (1959) eine spezielle Studie gewidmet hat. Hierzu sei angemerkt, dass der Gletscherschwund in vielen Fällen nicht direkt zum Verschwinden von ganzen Gletschern, sondern zum Eisfreiwerden von Felsgelände und zur Isolierung einzelner Eisflächen (Teilung von Gletschern in mehrere Teile) führt, die Zahl der Gletscher also langsamer abnimmt als deren Fläche. Regional kann kurzfristig trotz sich verringernder Gletscherflächen sogar die Zahl der Gletscher ansteigen. Hinzu kommt, dass vielfach Eisreste unter zunehmender Schuttbedeckung – oft oberflächlich visuell nicht mehr erkennbar – lange Zeit erhalten bleiben und es somit nur zu einem scheinbaren Verschwinden des Gletschereises kommt, das Eis jedoch unter der Schuttdecke durchaus konserviert wird (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2008; LIEB & KELLERER-PIRKLBAUER 2018). Dennoch kann kein Zweifel daran bestehen, dass sich die (österreichischen) Alpen in einem fortschreitenden Pro-

zess der Entgletscherung befinden, der Eisflächen aller Größen und Höhenlagen in gleicher Weise betrifft.

Diese Vorgänge werden schließlich auch in den ausgewählten, in Abbildung 7 gezeigten Massenbilanzzeitreihen veranschaulicht. Eindrucksvoll sieht man bei allen vier Gletschern die stark und in jüngster Zeit (mit Ausnahme von 2013/14) verstärkt nach unten weisenden Entwicklungen, die den anhaltenden Massenverlust belegen. Weder in Bezug auf die oben gezeigten Daten zu den Längenänderungen noch zu den Massenbilanzen ist eine Trendwende in Sicht (Kap. 6). Einige der österreichischen Gletscher weisen mittlerweile Massenbilanzdatenreihen von mehr als 50 Jahren auf. Beispielsweise wird am Hintereisferner in den Ötztaler Alpen seit 1953 die Massenbilanz, in jüngerer Vergangenheit sogar differenziert zwischen Sommer- und Winterbilanz, gemessen. Damit hat dieser Gletscher eine der längsten Messreihen global und gilt auch als globaler Referenzgletscher (WGMS 2021).

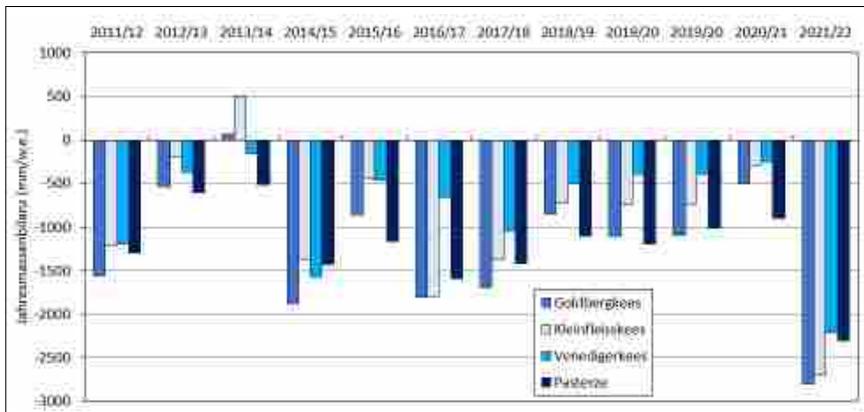


Abbildung 7: Jahresmassenbilanzen vier ausgewählter österreichischer Gletscher (Goldbergkees, Kleinfleisskees, Venedigerkees, Pasterze; alle in den Hohen Tauern) zwischen 2011/12 und 2021/22. Die Jahreswerte sind in mm Wasseräquivalent (mm w. e.) angegeben (Datengrundlage: WGMS)

Figure 7: Annual mass balances of four selected Austrian glaciers (Goldbergkees, Kleinfleisskees, Venedigerkees, Pasterze; all in the Hohe Tauern Range) between 2011/12 and 2021/22. The annual values are given in mm water equivalent (mm w. e.) (data source: WGMS)

## 4 Veränderungen im Permafrost

Wie schon erwähnt, liegen für den Permafrost nur relativ kurze Messreihen vor – für die Bodentemperaturverhältnisse erst seit Mitte der 2000er- und für die Blockgletscherbewegung immerhin seit Mitte der 1990er-Jahre. Mit Modellierungsansätzen für die Temperatur und Rekonstruktion der Bewegungsraten aus photogrammetrischen Daten sind jedoch auch vorsichtige Aussagen über die davor

liegenden Zeiträume möglich. Grundsätzlich ist anzumerken, dass dem bekannten Verlauf der Lufttemperatur (Abb. 2) folgend auch eine wenngleich verzögerte Erhöhung der Temperaturen im Untergrund stattfinden muss. Diese Erhöhung der Untergrundtemperaturen führt zu höheren Deformationsraten im Eis (wärmeres Eis verhält sich weniger starr als kaltes) und zu höheren Bewegungen der Blockgletscher. Dieser Effekt verstärkt sich in positiver Rückkoppelung dadurch, dass in wärmerem Untergrund auch mehr Wasser in flüssiger Form zirkuliert und somit erhöhter hydrostatischer Druck die Bewegung verstärkt.

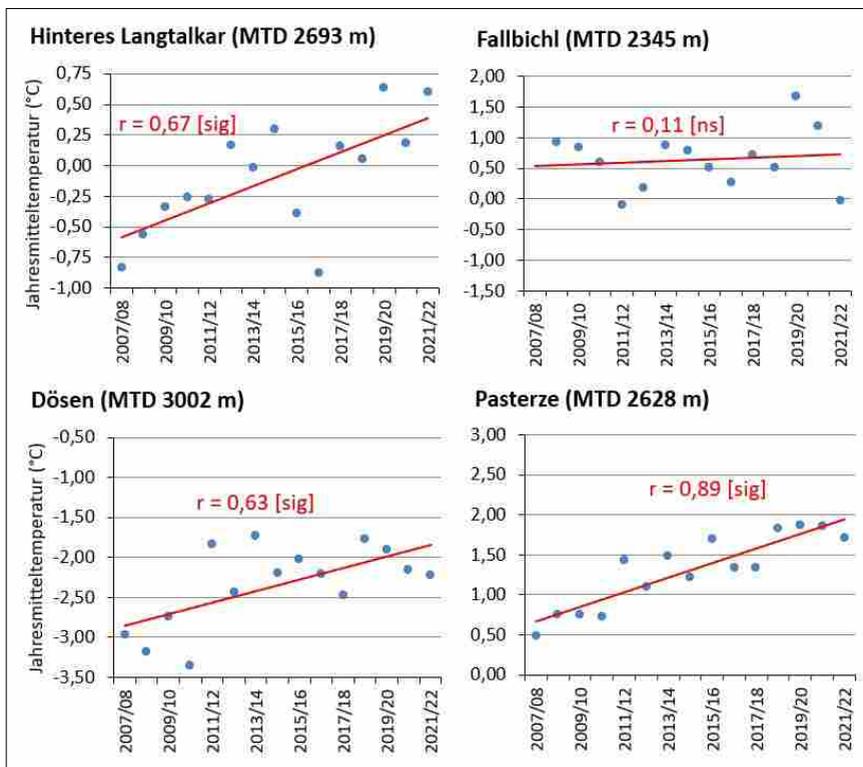


Abbildung 8: Jahresmitteltemperatur der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten (Lage in Abb. 1), jeweils für den Zeitraum 1.8.–31.7. des Folgejahres, für die Messjahre von 2007/08 bis 2021/22. Lineare Trends sowie entsprechende Korrelationskoeffizienten (sig = statistisch signifikante Erwärmung, ns = nicht signifikant) sind dargestellt (MTD = Miniatur-Temperatur-Datenlogger; weitere Erläuterungen im Text; eigene Messungen und Berechnungen).

Figure 8: Mean annual temperatures of the ground surface at four selected sites (for locations see Fig. 1), for the time span 1.8.–31.7. of the subsequent year in the period 2007/08–2021/22. Linear trends and corresponding correlation coefficients (sig = statistically significant warming, ns = not significant) are shown (MTD = miniature-temperature-datalogger; further explanations in the text; own measurements and calculations).

Aus dem über 100 Einzelmessstellen umfassenden, vom Erstautor betreuten Messnetz der Bodentemperaturen werden in Abbildung 8 exemplarisch die Jahresmittelwerte von vier Stationen gezeigt. Die Darstellungen lassen zum einen eine sehr starke Variabilität der Werte von Jahr zu Jahr erkennen, was nicht so sehr mit den Lufttemperaturen, sondern primär mit der Schneebedeckung an den Standorten zusammenhängt. Hierbei gilt die Regel, dass die späte Ausbildung einer Winterschneedecke durch starke effektive Ausstrahlung des Untergrundes diesen kühlt, ebenso wie eine späte Ausaperung des Standortes im Sommer dessen Erwärmung hintanhält. Die niedrigsten Jahrestemperaturen an der Oberfläche stellen sich in jenen Jahren ein, in denen die Winterschneedecke spät einsetzt, aber bis weit in den Sommer hinein andauert.

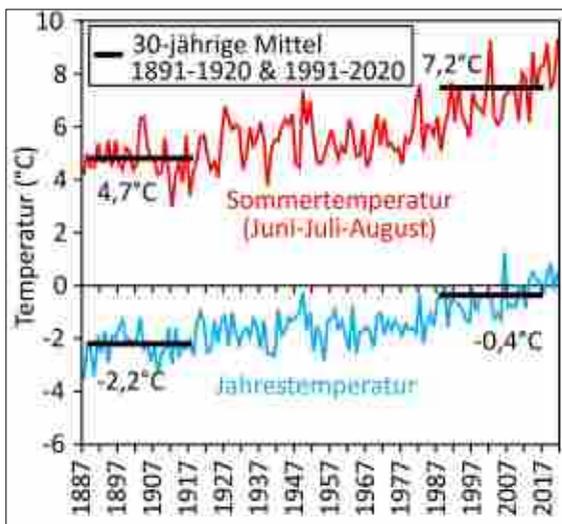


Abbildung 9: Gemessene (2010–2022) und rekonstruierte (1887–2009) Bodentemperaturen am Hochtor, Hohe Tauern – Jahresmittel- (unten) und Sommertemperatur (oben). Mittelwerte für die zwei Klimanormalperioden 1891–1920 sowie 1991–2020 sind zusätzlich angegeben (weitere Erläuterungen im Text; KELLERER-PIRKLBAUER & EULENSTEIN 2023, verändert).

Figure 9: Measured (2010–2022) and reconstructed (1887–2009) ground temperatures at Hochtor, Hohe Tauern Range – mean annual (below) and summertemperature (above). Mean values of the two climate normal periods 1891–1920 and 1991–2020 are additionally depicted (further explanations in the text; KELLERER-PIRKLBAUER & EULENSTEIN 2023, adapted).

Zum anderen ist an allen Standorten ein Erwärmungstrend erkennbar (lineare Trendgeraden und Korrelationskoeffizienten, beide in Rot, in Abbildung 8), der an den Standorten Hinteres Langtalkar, Dösen und Pasterze auch statistisch signifikant ist. Die erwartete Erwärmung des Untergrundes als Reaktion auf die langfristige Erwärmung der Atmosphäre im Alpenraum (siehe Abb. 2) ist damit belegt, wenngleich die Kürze der Datenreihe die Sicherheit der Aussage relativiert. Die Existenz von Permafrost ist nur am hoch gelegenen Standort Dösen

in allen Jahren sicher, am Standort Hinteres Langtalkar könnte innerhalb der Beobachtungsperiode der Permafrost verschwunden sein (Permafrost-Degradation), wenngleich dessen Reaktivierung nicht vollständig ausgeschlossen werden kann.

Für einen Standort an dem als historischem Verkehrsweg bedeutenden Passübergang des Hochtors (2576 m) wurde aus der Korrelation der Bodentemperatur und der Lufttemperatur der nur 10 km entfernten Station am Hohen Sonnblick (siehe Abb. 2) eine lange Bodentemperaturreihe rekonstruiert, die in Abbildung 9 zu sehen ist. Dies war möglich, da wegen der weitgehenden Schneefreiheit dieses Pass-Standortes in der Zeitperiode 2010–2022 die Bodentemperatur am Hochtort mit der Lufttemperatur am Sonnblick sehr gut korreliert und somit die Entwicklung der Monatstemperatur bis ins Jahr 1887 zurück modelliert werden kann. Die berechnete Erwärmung der Bodenoberflächen zwischen zwei Klimareferenzperioden (1891–1920, 1991–2020) lässt einen Anstieg der mittleren jährlichen Bodenoberflächentemperatur um 1,8 °C und der mittleren sommerlichen Bodenoberflächentemperatur sogar um 2,5 °C erkennen. Die sommerliche Erwärmung ist somit deutlich stärker ausgeprägt als die jährliche Erwärmung, was mit früheren Arbeiten und Zukunftsszenarien übereinstimmt (KOTLARSKI et al. 2022). Für den Permafrost am Hochtort bedeutet dies, dass die aktuelle Entwicklung zur Permafrost-Degradation führt und möglicherweise der Standort bald nur mehr (zumindest oberflächlich) saisonalen Frost aufweisen wird (KELLERER-PIRKLBAUER & EULENSTEIN 2023).

Von den Ergebnissen der Messungen in tiefen Bohrlöchern ist vor allem die maximale Mächtigkeit der sommerlichen Auftauschicht (Auftautiefe, engl. „active layer“) von Interesse, welche nicht nur von der Seehöhe, sondern auch von der Beschaffenheit des Untergrundes abhängt. Die längste Datenreihe in Österreich liegt hierfür vom „Bohrloch 3“ am Hohen Sonnblick vor, weist aber wegen technischer Probleme Unterbrechungen auf, weshalb hieraus noch keine allgemeingültigen Aussagen abgeleitet werden können. Nichtsdestotrotz ist aber von den Langzeitbohrlochmessungen in den Schweizer Alpen bekannt, dass sich sowohl die Temperaturen im Permafrost als auch die saisonale Auftauschicht an der Oberfläche signifikant verändert haben, ausgeprägt einerseits als deutliche Erwärmung und andererseits als allgemeine Zunahme der Mächtigkeit der Auftauschicht (PERMOS 2023).

Zu den längsten Reihen von Bewegungsraten aktiver Blockgletscher in Österreich auf der Basis jährlicher direkter Messung gehören die beiden in Abbildung 10 dargestellten Blockgletscher, wobei bei einem der schnelle untere Bereich vom langsameren oberen Bereich unterschieden wird. Erkennbar ist an allen drei Blockgletschern eine gleichsinnige Variation der Bewegungsraten über die Zeit mit jeweils höheren Bewegungen etwa 1–2 Jahre nach wärmeren und vice versa geringeren Bewegungen nach kühleren Phasen, wie Vergleiche mit Lufttemperaturreihen zeigen. Im Jahr 2020/21 wurde an zwei der drei Datenreihen ein neu-

es historisches Hoch erzielt, bei der dritten Datenreihe wurden nur im Zeitraum 2014–2016 höhere Werte ermittelt. Die kalten, schneearmen Bedingungen im Winter 2021/22 sowie der trockene Sommer 2022 verursachten eine Abnahme der Geschwindigkeit im letzten Messjahr 2021/22.

Die Kurven sind in langfristiger Perspektive so zu interpretieren, dass der allmähliche Anstieg der Bewegungsraten nach dem Beginn der Messungen mit dem Anstieg der Lufttemperatur nach der kühleren Phase 1965–1985 erklärt werden kann. Nach dem ersten Peak in den frühen 2000er-Jahren verursachte die zwischenzeitlich etwas eingebremste globale Erwärmung (Hiatus des Langfristtrends; vgl. SCHÖNWIESE 2019: 71) auch in den Hochgebirgen Österreichs etwas permafrostgünstigere Bedingungen mit Verlangsamung der Kriechbewegung der Blockgletscher. Hierauf stiegen die Bewegungsraten wieder recht kontinuierlich bis 2015 an und sanken danach – als Folge einiger relativ permafrostgünstiger Winter (siehe oben) – wieder ab, bevor sie in den letzten Jahren auf neue Maxima stiegen.

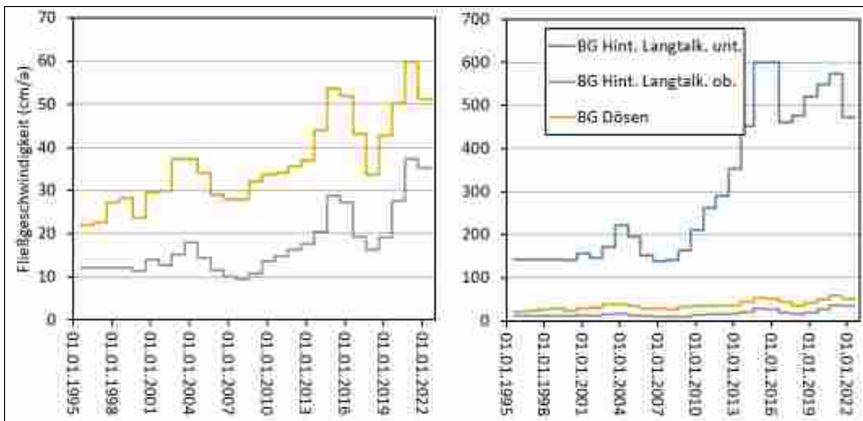


Abbildung 10: Mittlere Bewegungsraten ausgewählter Messpunkte an der Oberfläche zweier aktiver Blockgletscher (BG) – Hinteres Langtalkar (dort in der rechten Graphik unterschieden in oberen, langsameren und unteren, sehr schnellen Bereich) und Dösen – in den Hohen Tauern. Zu beachten ist die Gleichsinnigkeit der Veränderungen, was auf eine klimatische Steuerung hinweist (weitere Erläuterungen im Text; Daten: V. KAUFMANN; eigene Darstellung).

Figure 10: Mean movement rates of selected points at the surface of two active rock glaciers (BG) – Hinteres Langtalkar (there, in the right diagram a distinction is made between the upper, slower and the lower, very fast part) and Dösen – in the Hohe Tauern Range. Note that the inter-annual changes are comparable at the two rock glaciers, which points to climatic control (further explanations in the text; data: V. KAUFMANN; own draft).

Ergänzt sei, dass eine allmählich steigende Zahl aktiver Blockgletscher ähnlich hohe oder höhere Bewegungsraten als in Abbildung 10 rechts dargestellt aufweist, und zwar bis zu mehreren Metern pro Jahr. Manche der Blockgletscher im Alpenraum beschleunigten sich in den letzten Jahrzehnten sogar so schnell, dass sie auseinander reißen und dabei Spalten und Abrissnischen bilden, wie beispielsweise

auch am Blockgletscher im Hinteren Langtalkar beobachtet wurde (AVIAN et al. 2005; SCHOENEICH et al. 2014).



Abbildung 11: Zwei Beispiele aktuell hochaktiver, über alpine Rasen vorstoßender Blockgletscher in den Hohen Tauern – Blockgletscher im Hinteren Langtalkar: (a) Quer- und Längsspalten, welche die Fließstrukturen des Blockgletschers überprägen und Auflösungserscheinungen anzeigen, (b) Aufschiebung der alpinen Grasheide durch die Bulldozer-artige Wirkung der vorstoßenden Blockgletscherstirn; Tschadinhorn Blockgletscher: (c) aktiver Stirnbereich der über einer Steilstufe endet, (d) übersteilte Stirn mit Gesteinsmaterial unterschiedlicher Größe am Fuß; Fotos: Autoren.

Figure 11: Two examples of currently highly active rock glaciers advancing over alpine meadows in the Hohen Tauern Range – Hinteres Langtalkar rock glacier: (a) transversal and longitudinal crevasses remodeling the flow structures of the rock glacier which can be interpreted as signs of decay, (b) deformation of an alpine meadow caused by the bulldozer-like action of the advancing rock glacier front; Tschadinhorn rock glacier: (c) active rock glacier front ending above a steep slope, (d) oversteepened front with rocky material of different size at its foot; photos: authors.

Dadurch rücken diese Blockgletscher dynamisch talwärts vor und überschieben mit ihren aufgewölbten Stirnen den darunter sich ausbreitenden alpinen Rasen (Abb. 11). Dies wird aus der Kombination der genannten thermischen und dynamischen Veränderungen im eisreichen Permafrost mit großen Hangneigungen möglich. So etwa hat die Stirn des Blockgletschers im Hinteren Langtalkar seit den 1990er-Jahren eine Geländekante (Karschwelle) überwunden und gleitet seither – begleitet von gravitativen, bruchhaften Auflösungserscheinungen (unten) und Zerrspalten (oben) – einen steilen Hang hinunter. Die mit solchen Prozessen

verbundenen potenziellen Naturgefahren (AVIAN et al. 2009) werden in Kapitel 6 thematisiert.

## 5 Veränderungen von Gletschern und Permafrost im Beispielgebiet Großglockner/Pasterze

Ein (u. a. durch die Autoren) sehr gut sowohl in Hinblick auf Gletscher als auch auf Permafrost untersuchtes, für die österreichischen Alpen ikonisches Gebiet ist jenes um Österreichs höchsten Berg, den Großglockner (3797 m), und Österreichs größten Gletscher, die Pasterze (LIEB & SLUPETZKY 2011). Auch hier reicht die Erforschung der Gletscher ungleich weiter zurück als die des Permafrostes, und zwar bis weit ins 19. Jahrhundert. So ist die Ausdehnung der Pasterze beim Hochstand in der Mitte des 19. Jahrhunderts nicht nur durch Moränen nachverfolgbar und naturwissenschaftlich (dendrochronologisch) exakt auf 1852–1856 datiert (NICOLUSSI & PATZELT 2000), sondern es liegt neben bildlichen Quellen auch eine exakte Gletscherkarte – eine der ältesten alpenweit – für eine hochstandsnahe Ausdehnung vor. Besonders wichtig aber ist im vorliegenden Kontext der Beginn jährlicher Gletschermessungen durch F. Seeland bereits 1879, der eine Messreihe begründete, die seit damals in nur drei Jahren unterbrochen wurde (Abb. 12). Mit großer Wahrscheinlichkeit handelt es sich damit um die weltweit längste (auf realen jährlichen Messungen beruhende und nicht wie bei vielen anderen Gletschern später rekonstruierte) Datenreihe der Längenänderungen eines Gletschers. Im Laufe des 20. Jahrhunderts wurde das jährlich durchgeführte Monitoring auch um Messungen der Höhenänderung und der Bewegung an der Gletscheroberfläche erweitert (Details in LIEB & KELLERER-PIRKLBAUER 2018 und KELLERER-PIRKLBAUER & BAUER 2021).

Die in der Abbildung 12 erkennbare Entwicklung weicht insofern von der in Kapitel 3 aufgezeigten insofern ab, als die Pasterze als sehr großer Gletscher (1852–56: 26,5 km<sup>2</sup>, 2019: 15,4 km<sup>2</sup>) die Vorstoßphasen anderer Gletscher nicht mitmachte, weil ihre Reaktionszeit länger als die Dauer der jeweils gletschergünstigen Klimaphasen war (ZUO & OERLEMANS 1997). Allein zwischen etwa 1910 und den 1930er-Jahren war der Rückgang deutlich verlangsamt (mit geringfügigen Vorstößen in einigen Jahren). Die gletschergünstige Phase zwischen 1965 und 1985 hingegen bewirkte an der Pasterze keinen Längengewinn, sehr wohl aber Massenzuwächse und hohe Bewegungsraten, die mit den entsprechenden Messungen dokumentiert wurden. Seit den späten 1980er-Jahren beschleunigte sich der Rückgang und ist spätestens seit der Jahrtausendwende von einem massiven Eiszerfall begleitet, der zuletzt den rund 40 ha großen Pasterzensee hat entstehen lassen und sich aktuell massiv weiter fortsetzt: Die Gletscherzunge ist auf dem Großteil ihrer aktuell noch rund 2,3 km<sup>2</sup> umfassenden Fläche in Zerfall und beginnt, ihre Eisverbindung mit ihrem im 3000 m-Niveau gelegenen Nährgebiet zu

verlieren (und solcherart zu einem nicht mehr aktiv ernährten Toteiskörper zu werden).

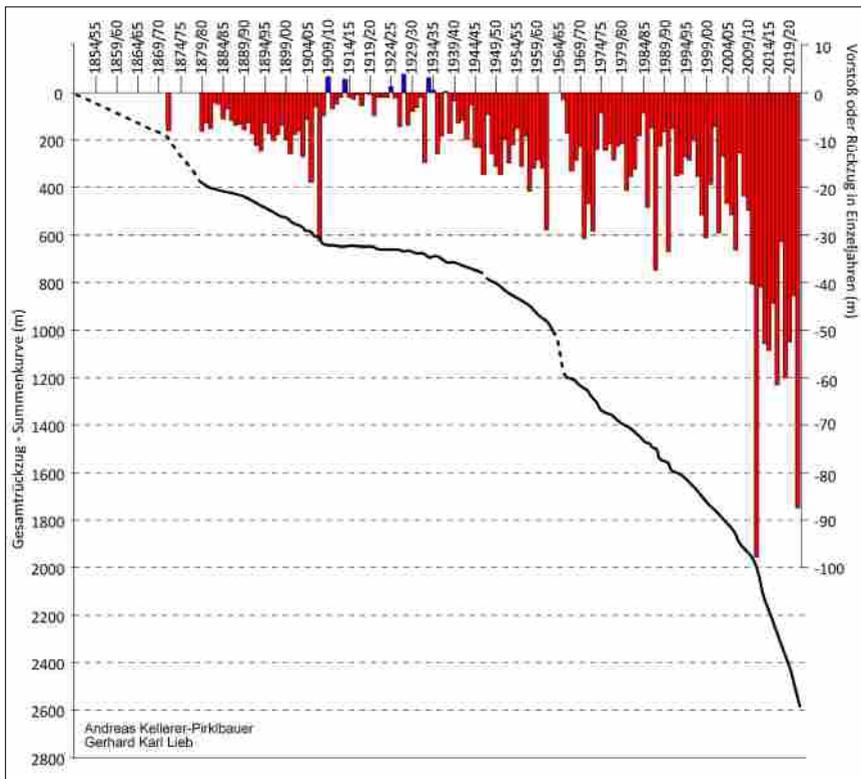


Abbildung 12: Längenänderungen der Pasterze nach Einzeljahren (Balken, y-Achse rechts) und aufsummiert (schwarze Linie, y-Achse links). Zu beachten ist, dass der letzte Vorstoß der Pasterze in den 1930er-Jahren stattfand (eigene Darstellung).

Figure 12: Length variations of Pasterze Glacier in single years (bars, y-axis right) and cumulative (black line, y-axis left). Note that the last advance of the glacier took place in the 1930ies (own draft).

Die Pasterze ist damit ein hervorragendes Beispiel für die fundamentalen Veränderungen des Landschaftsbildes im Hochgebirge in kurzer Zeit, was in Bildpaaren darzustellen – wie in Kapitel 1 schon erwähnt – zu einem geradezu standardisierten Stilmittel der Veranschaulichung von Klimawandelfolgen geworden ist (Abb. 13). Diese Veränderungen umfassen den schon erwähnten Eiszerfall, das Eisfreiwerden von Geländeteilen, die zunehmende Schuttbedeckung der Gletscherzunge, die Bildung von Bächen und Seen samt zugehörigen Sedimentationsprozessen, die Vegetationsukzession und die starke Umlagerung von Material, das seiner Stütze durch das abschmelzende Eis beraubt ist. Diese Umlagerung kann

durch unterschiedliche Prozesse erfolgen – im Lockermaterial meist durch Erosion und Murentätigkeit, im Fels durch Felsstürze.



Abbildung 13: Die Pasterze in Blickrichtung Westnordwest von der Franz-Josefs-Höhe aus gesehen (a) um 1920 (Foto: Archiv Grazer Geographie) und (b) Mitte Juli 2023 (Foto: Autoren). Diese „klassische“ Ansicht der Pasterze und des Großglockners veranschaulicht vor allem den Massenverlust der Gletscherzunge, die Vergrößerung des Gletschervorfeldes mit Seenbildung sowie die damit verbundene allgemeine Veränderung des Landschaftsbildes.

Figure 13: Pasterze Glacier seen in westnorthwest direction from the viewpoint Franz-Josefs-Höhe (a) around 1920 (photo: archive Graz Geography) and (b) in the middle of July 2023 (photo: authors). This „classic“ view of the Pasterze Glacier and Grossglockner primarily illustrates the mass loss of the glacier tongue, the expansion of the proglacial area with development of lakes as well as the associated general change in the landscape.

Die zuletzt genannten schwerkraftbedingten (gravitativen) Prozesse können sich auch aufgrund der Lockerung von zuvor durch Permafrosteis verfestigtem Substrat einstellen. Ganzjährig im Untergrund vorhandenes Eis wirkt bei tiefen Temperaturen stabilisierend (Eiszement) und kann nicht nur Schuttkörper (z. B. Blockgletscher), sondern auch Felswände und Grate zusammenhalten. Wie in Kapitel 4 dargelegt wird wärmeres Eis verformbarer und/oder durch eindringendes Wasser können die innere Reibung von Gesteinsmassen herabgesetzt und diese gravitativ mobilisiert werden, also etwa als Felsstürze niedergehen. Ein solches mehrphasiges Ereignis ist an der Pasterze für den Mittleren Burgstall, einen Felsgipfel am Rand des Gletschers, für den Zeitraum 2007–2008 dokumentiert und exakt ausgewertet worden (KAUFMANN et al. 2015; KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2012 a). Das betroffene Areal ist bis heute noch nicht vollständig zur Ruhe gekommen und wird im Rahmen eines Projektes gemeinsam mit der GeoSphere Austria (M. Avian) weiter beobachtet.

Abbildung 14 zeigt die damit verbundenen Veränderungen der Oberflächenformen im Zeitraum 2006 bis 2008 sowie einen Standort für Bodentemperaturmonitoring am Gipfelplateau des Mittleren Burgstalls. Im Zeitraum 2007 bis 2022 veränderte sich dort die mittlere jährliche Bodentemperatur an der Oberfläche und in der Tiefe (10 und 55 cm) von überwiegend leicht negativ zu überwiegend positiv, was auf warme Permafrostbedingungen schließen lässt. Solche thermischen Bedingungen führen im Allgemeinen dazu, dass aktuell (gerade) noch

gefrorene Gesteinsmassen leichter deformiert werden können. Auch wenn hier die Bodentemperatur-Messreihe erst mit dem Ereignis begonnen wurde, besteht in Analogie zu Abbildung 9 kein Zweifel daran, dass das Substrat erst nach den 1980er- oder 1990er-Jahren jenes Temperaturniveau erreichte, das die Destabilisierung hervorrief. Das Beispiel zeigt das Zusammenwirken von einsinkenden Gletscheroberflächen, die die Wände nicht mehr stützen, und sich erwärmendem Permafrost, der auch das innere Gefüge von Felsflanken schwächt. Vorgänge in dieser oder ähnlichen Prozesskombinationen sind in den höchsten Lagen der (österreichischen) Alpen in Zukunft verstärkt zu erwarten.

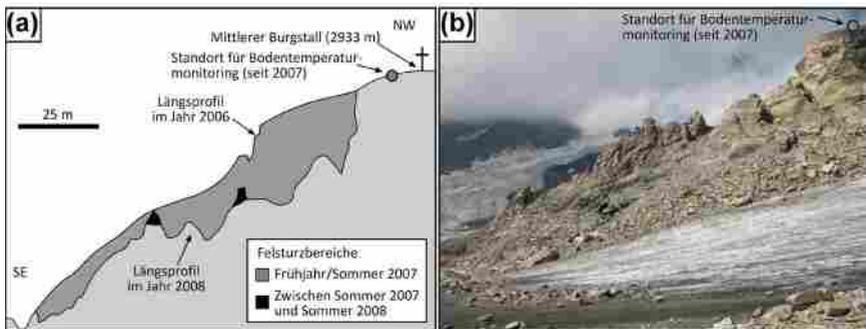


Abbildung 14: Felssturzgebiet Mittlerer Burgstall, Pasterzengebiet: (a) Längsprofil durch den Südgrat des Mittleren Burgstalls vor und nach den Felssturzereignissen von 2007–2008 und (b) eine Ansicht des verstürzten Grates von Osten aus gesehen. Langzeit-Bodentemperaturdaten vom Standort in der Abbildung zeigen deutliche Permafrost-Degradation im Zeitraum 2007–2022; Foto: Autoren.

Figure 14: Rock fall area Mittlerer Burgstall near the Pasterze Glacier: (a) Longitudinal profile through the southern crest of the Mittlerer Burgstall before and after the rock fall events of 2007–2008 and (b) a view of the collapsed crest from the east. Longterm surface temperature data at the site shown in the figure (circle) prove significant permafrost-degradation in the period 2007–2022; photo: authors.

## 6 Diskussion

Mit den präsentierten Ergebnissen liegen aussagekräftige quantitative Angaben über die Wirkungen des aktuellen Klimawandels auf Gletscher und Permafrost, zwei klimasensitiven abiotischen Prozessgruppen, in den (österreichischen) Alpen vor. Allerdings kann die Validität der Aussagen einerseits in Bezug auf die Repräsentativität der Stichprobe und andererseits auf die Relevanz der durch das Monitoring erfassten Größen hinterfragt werden. In Bezug auf den erstgenannten Einwand ist festzuhalten, dass die vom Gletschermessdienst erhobenen Längsänderungen sich auf alle vergletscherten Gebirgsgruppen Österreichs (und die Massenbilanz-Messungen zumindest auf die meisten) verteilen und auch Gletscher aller Größenklassen sowie unterschiedlicher Seehöhen umfassen. Auch

ist aus Einzelstudien bekannt, dass sich das Gletscherverhalten langfristig nicht grundlegend zwischen Gebirgsgruppen, ja nicht einmal zwischen Gletschern unterscheidet. Ebenso zeigen fernerkundungsgestützte, großflächige und inventarmäßige Aufnahmen der Vergletscherung (z. B. PAUL et al. 2020 für die gesamten Alpen), dass kein Grund besteht, an der Gültigkeit der getätigten Aussagen in Bezug auf den Gletscherschwund zu zweifeln.

Mitunter wird auch die Verwendung der Längenänderung als Proxy für die Änderung der Gletscherflächen kritisiert und angesichts der verfügbaren technischen Möglichkeiten die Verwendung von Fernerkundungsmethoden gefordert. Dem ist entgegenzuhalten, dass letztere technisch sowohl in Bezug auf die Aufnahme als auch auf die Auswertung aufwändig, somit teuer und nur in unregelmäßigen Zeitabständen für ein so großes Gebiet wie die österreichischen Alpen durchführbar sind. Hinzu kommt, dass es auch mit diesen Methoden schwierig ist, Gletscherbegrenzung (aufgrund von Schnee- oder Schuttbedeckung) exakt festzulegen, da immer größere Anteile der noch vorhandenen Gletscherflächen von sogenannten Obermoränen (oder supraglazialem Schutt) bedeckt werden, wie beispielsweise für die Pasterze gezeigt wurde (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2008; LIEB & KELLERER-PIRKLBAUER 2018; AVIAN et al. 2020). Die Erhebung der Längenänderung vor Ort durch sach- und ortskundige ehrenamtlich tätige Personen hat sich hingegen bewährt und liefert jahresscharf Daten, die gemittelt für ganz Österreich den Gletscherschwund ausreichend exakt (und in einer gut vorstellbaren Maßzahl) widerspiegeln.

Wünschenswert wären schließlich auch exakte Angaben zur Veränderung der (wasserwirtschaftlich relevanten) Volumenverluste der Gletscher. Wie schon erwähnt würde dies zum einen die exakte Kenntnis der Untergründe der Gletscher (Modellierungsansätze hierzu auf Basis von Eisradardaten einzelner Gletscher existieren; HELFRICHT et al. 2019) und zum anderen die exakte Ermittlung der Höhenänderungen der Gletscheroberfläche erfordern, die ebenfalls aufwändig ist und daher nur an wenigen Gletschern (z. B. Pasterze) gemessen wird. Auch hierbei gilt für mögliche Fernerkundungsverfahren die Einschränkung von Aufwand, Kosten und Unsicherheit der Abgrenzung und damit Quantifizierung von Gletscherflächen und -volumina, die Fernerkundungsansätzen inhärent sind (PAUL et al. 2020).

Für den Permafrost sind die verfügbaren Ergebnisse sowohl zeitlich durch kurze Reihen als auch örtlich eingeschränkt, weil kein die gesamten österreichischen Alpen abdeckendes Messnetz existiert. Jedoch besteht auch hierbei kein Grund, die Repräsentativität der – vornehmlich in den Hohen Tauern gewonnenen – Aussagen für die gesamten österreichischen Alpen (sowie für den gesamten Alpenbogen; KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2018) in Frage zu stellen. In vielen gesamtalpinen Studien (z. B. MAIR et al. 2011; SHOENEICH et al. 2014) hat sich gezeigt, dass sich die Prozesse im Permafrost alpenweit ähneln, inklusive der in den letzten Jahrzehnten beobachtbaren Tendenz vieler aktiver Blockgletscher

zu markanten Bewegungszunahmen (Kap. 4) in stärker geneigtem Gelände (z. B. ROER et al. 2008; SCOTTI et al. 2017). Dennoch sind gerade beim Permafrost auch Wissenslücken zu beklagen, die sich aus der geringen Zahl an tiefen Bohrlöchern in Österreich (maximale Tiefen in Österreich bis 30 m am Kitzsteinhorn; HARTMEYER et al. 2012) ergeben, weshalb kaum Aussagen über die Variabilität der Auftautiefe als zentrale Größe der Permafrost-Dynamik getätigt werden können. Nichtsdestoweniger kann aber auf Basis von Bohrlochdaten in anderen Teilen der Alpen sowie in den nordischen Ländern inklusive Spitzbergen gezeigt werden, dass sich zumindest seit der Jahrtausendwende die Permafrost-Temperaturen in 10 und 20 m Tiefe deutlich erhöht haben (NOETZLI et al. 2020).

In Bezug auf die gesellschaftliche Relevanz von Gletscherschwund und Permafrost-Degradation kommt den potenziell in diesen Prozessen begründeten Naturgefahren eine besondere Rolle zu. Natürliche Prozesse werden erst dadurch, dass sie Menschenleben oder Infrastruktur gefährden, zu (potenziellen) Naturgefahren. Somit hängt deren Ausmaß nicht nur von der Art, der Größe (Magnitude) und der Häufigkeit (Frequenz) der Ereignisse ab, sondern auch von soziökonomischen Faktoren wie der Anwesenheit von Menschen oder dem Wert der den Prozessen exponierten Artefakte (z. B. Gebäude). Hierbei kann für Österreich die Feststellung getroffen werden, dass die gegenständlichen Prozesse direkt nur hochgelegene, nicht dauernd besiedelte Flächen betreffen, die sich auf nur wenige Prozente der Staatsfläche konzentrieren – nur an ganz wenigen Stellen greifen diese Prozesse bis in Täler durch, wofür die Eislawinen vom Nördlichen Bockkarkees (Glocknergruppe, Salzburg) ein Beispiel darstellen (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2012 b). Allerdings können durch Folge- oder Kaskadenprozesse (z. B. Aufstau eines Gewässers durch eine Mure und nachfolgende Überschwemmung) auch tiefer gelegene und besiedelte Gebiete betroffen sein. Gefährdungen dieser Art sind jedoch in den höheren, steileren und in den Tälern vielfach dichter besiedelten Westalpen ungleich größer als in den österreichischen Alpen.

Hervorzuheben ist schließlich die positive Rückkoppelung von Gletscherschwund und Permafrost-Degradation in Bezug auf potenziell gefährliche Prozesse. Als ein aktuelles Beispiel hierfür zeigt Abbildung 15 den Felssturz, der sich am 11.06.2023 am Fluchthorn ereignete. Dieser erklärt sich in seiner Grundanlage zum einen aus dem Schwinden des die Flanke ursprünglich abstützenden Gletschers und zum anderen aus der Kopplung der Permafrost-Temperatur in den länger aperen Felsen an die wärmer gewordene Atmosphäre. Die beiden in Abbildung 15 gezeigten Bilder wurden eine Woche nach dem Ereignis aufgenommen. Vom Südgipfel des Fluchthorns hatten sich ca. 1 Million m<sup>3</sup> Gestein gelöst, wodurch sich die Gipfelhöhe um 19 m verringerte. Die Gesteinsmassen trafen ein feuchtes Gebiet mit einigen kleinen Seen, was dazu führte, dass Geröll und Wasser das Furtschöltal erreichten und ein Murgang flussabwärts entstand. Da das Ereignis in einem sehr entlegenen, nur gelegentlich von Alpinistinnen und Alpinisten

aufgesuchten Gebiet stattfand, gab es weder Menschenleben noch nennenswerte Schäden an Infrastruktur zu beklagen.

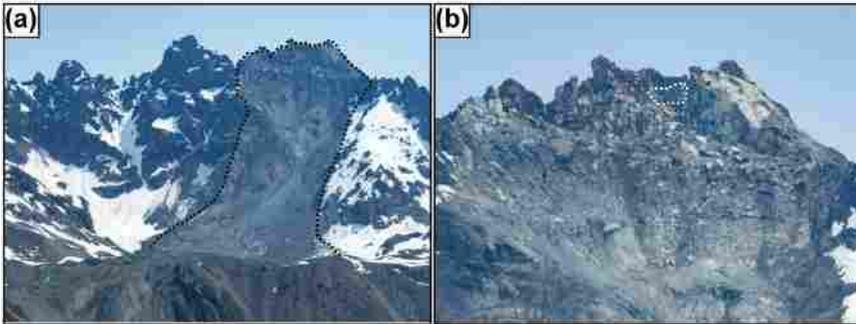


Abbildung 15: Blick von Westen auf Abrissbereich, Sturzbahn und Ablagerungsgebiet des Felssturzes vom 11.06.2023 am Südlichen Fluchthorn (Jamtal, Silvrettagruppe, Tirol). (a) Anrissbereich, worin sich die Gipfelhöhe von 3399 auf 3380 m verringerte, und Teile der Sturzbahn; (b) Zoomaufnahme mit markiertem Bereich des wahrscheinlichen Auftretens von massivem Permafrosteis; Fotos: M. Mergili.

Figure 15: View from the west to the detachment, transportation and deposition area of the rock fall at Southern Fluchthorn (Jamtal, Silvretta Mountains, Tyrol). (a) Detachment area, where the summit elevation was reduced from 3399 to 3380 m, and parts of the transportation area, (b) zoom image with marked area of probable occurrence of massive permafrost ice; photos: M. Mergili.

## 7 Fazit

Da Vorgänge dieser Art auch in stärker besuchten und bebauten Arealen bereits eingetreten und weiterhin zu erwarten sind (z. B. in Gletscherskigebieten oder bei Anlagen der Energiewirtschaft im Hochgebirge), wäre es falsch, aus dem Fallbeispiel den Schluss zu ziehen, dass die Naturgefahren zu vernachlässigen wären. Ganz im Gegenteil wird es durch das ungebremste, lokal auch verstärkte Fortschreiten von Gletscherschwund und Permafrost-Degradation zu einer Steigerung der Frequenz und Magnitude der in Rede stehenden Prozesse kommen – gerade auch in Gebieten bzw. Höhenlagen, in denen dies bisher noch nicht der Fall war. Verstärkend wirkt hierbei die in der wärmeren Atmosphäre gesteigerte Intensität von Starkregenereignissen als Auslöser von Massentransporten auch über größere Distanzen und in allen Höhenlagen. Es wird also durchaus zu einer gravierenden Veränderung der Relief- und Landschaftsdynamik kommen (HÄBERLI et al. 2019), wobei auch von neu entstehenden Landschaftselementen wie Seen weitere Gefahren ausgehen können, welche sich im Steilrelief der Alpen auch auf tiefere Lagen auswirken können.

Dennoch betreffen die in Rede stehenden Veränderungen, so gravierend sie sein mögen, primär hochgelegene Flächen, die nur einen kleinen Anteil der Staats-

fläche Österreichs ausmachen (Permafrost nach Kapitel 1 nur 1,9 %). Hochwertige Infrastrukturen können darüber hinaus durch in langen Zeiträumen entwickelte Strategien und Maßnahmen der Naturgefahren-Prävention geschützt werden. Mitunter diskutierte nachteilige Auswirkungen auf den für die österreichischen Alpen ökonomisch so wichtigen Tourismus werden sich in Grenzen halten: Von nicht mehr begehbaren Bergwegen und alpinen Routen in den von Gletscherschwund und Permafrost-Degradation betroffenen Hochlagen abgesehen, sind kaum Einbußen zu erwarten. Dies gilt ebenso für die acht österreichischen Gletscherskigebiete, die auch nach Einstellung des (sommerlichen) Skibetriebs attraktive Destinationen bleiben. Die hydrologischen Auswirkungen des Gletscherschwundes sind lokal und regional durch den Wegfall der Gletscherspende (samt sommerlichen Abflussspitzen) markant, beeinflussen den gesamtösterreichischen Wasserhaushalt bei den erwarteten geringen Veränderungen der jährlichen Niederschlagssummen (IPCC 2023) aber nur wenig. Auf die Trinkwasserversorgung der österreichischen Bevölkerung, die aus unterirdischen Aquiferen sichergestellt wird, hat der Gletscherschwund gar keinen nennenswerten Einfluss.

Auch wenn somit die Folgen des Gletscherschwundes und der Permafrost-Degradation für einen hoch entwickelten Staat wie Österreich, wenngleich mit erhöhten Kosten, beherrschbar bleiben dürften, seien doch zwei Postulate an den Schluss gestellt: Das eine richtet sich an die Politik, die noch viel ambitionierter als bisher den Klima- und Umweltschutz in alle Politikbereiche integrieren muss. Das andere besteht in der Forderung nach der Fortführung des Monitorings von Gletschern und Permafrost, dessen Ergebnisse weiterhin eine faktenbasierte Grundlage für politische Entscheidungen liefern müssen.

## 8 Literatur

- AVIAN, M., KAUFMANN, V. & LIEB, G.K. (2005): Recent and Holocene dynamics of a rock glacier system: The example of Langtalkar (Central Alps, Austria). – *Norsk Geogr. Tidsskr.*, **59**: 149–156.
- AVIAN, M., KELLERER-PIRKLBAUER, A. & BAUER, A. (2009): LiDAR for monitoring mass movements in permafrost environments at the cirque Hinteres Langtal, Austria, between 2000 and 2008. – *Nat. Hazard Earth Sys.*, **9**: 1087–1094.
- AVIAN, M., BAUER, C., SCHLÖGL, M., WIDHALM, B., GUTJAHR, K.H., PASTER, M., HAUER, C., FRIESSENBICHLER, M., NEUREITER, A., WEYSS, G., FLÖDL, P., SEIER, G. & SULZER, W. (2020): The status of earth observation techniques in monitoring high mountain environments at the example of Pasterze Glacier, Austria: data, methods, accuracies, processes, and scales. – *Remote Sens.*, **12**: 1251; doi.org/10.3390/rs12081251.
- BARSCHE, D. (1996): Rockglaciers. Indicators for the present and former geoecology in high mountain environments. – *Springer Series in Physical Environment*, **16**: 331; Berlin, Heidelberg, New York (Springer Verlag).
- BOECKLI, L., BRENNING, A., GRUBER, S. & NOETZLI, J. (2012): Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics. – *Cryosphere*, **6** (4): 807–820; doi.org/10.5194/tc-6-807-2012.

- CHAIX, A. (1919): Coulées de blocs (rock-glaciers, rock-streams) dans le parc national Suisse de la Basse-Engadine. – *Cr Séances Soc Phys Hist Nat Genève*, **36**: 12-15.
- FINSTERWALDER, S. (1928): Begleitworte zur Karte des Gepatschferners. – *Zeitschr. f. Gletscherkunde*, **16**: 20-41.
- HAEBERLI, W. (1973): Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. – *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **9**: 221-227.
- HAEBERLI, W., OERLEMANS, J. & ZEMP, M. (2019): The future of alpine glaciers and beyond. – *Oxford Research Encyclopedia. Climate Science*: **36**; Oxford/USA (Oxford University Press); doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.769.
- HARTMEYER, I., KEUSCHNIG, M. & SCHROTT, L. (2012): A scale-oriented approach for the long-term monitoring of ground thermal conditions in permafrost-affected rock faces, Kitzsteinhorn, Hohe Tauern Range, Austria. – *Austrian J Earth Sci*, **105** (2): 128-139.
- HELFRICHT, K., HUSS, M., FISCHER, A. & OTTO, J.C. (2019): Calibrated Ice Thickness Estimate for All Glaciers in Austria. – *Frontiers in Earth Science*, **7**: 58; doi.org/10.3389/feart.2019.00068.
- IPCC (2023): Summary for Policymakers. – *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. LEE & J. ROMERO (eds.)], 1-34. IPCC, Geneva, Switzerland; doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- KAUFMANN, V., KELLERER-PIRKLBAUER, A., LIEB, G.K., SLUPETZKY, H. & AVIAN, M. (2015): Glaciological Studies at Pasterze Glacier (Austria) based on aerial photographs. – In: LI, J. & YANG, X. (Hrsg.): *Monitoring and Modeling of Global Changes: A Geomatics Perspective*. Springer Remote Sensing/Photogrammetry. – 173-198; Dordrecht (Springer); doi.org/10.1007/978-94-017-9813-6\_9.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. & BAUER, C. (2021): Von Bergspitzen zu Wüstenregionen: Ein Überblick über geomorphologische Forschungen an der Geographie der Universität Graz im Zeitraum 1886 bis 2021. – In: ČEDE, P., FLECK, D. & LIEB, G.K. (Hrsg.): *150 Jahre Grazer Geographie 1871–2021*. – *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, **51**: 133-154.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. & EULENSTEIN, J. (2023): The summer heatwave in 2022 and its role in changing permafrost and periglacial conditions at a historic mountain pass in the Eastern Alps (Hochtor, Hohe Tauern Range, Austria). – *Permafrost and Periglacial Processes*; doi.org/10.1002/ppp.2205.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. & KAUFMANN, V. (2012): About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in central Austria. – *Austrian Journal of Earth Sciences*, **105** (2): 94-112.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., LIEB, G.K., AVIAN, M. & GSPURNING, J. (2008): The response of partially debris-covered valley glaciers to climate change: The example of the Pasterze Glacier (Austria) in the period 1964 to 2006. – *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, **90** (A/4): 269-285.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., AVIAN, M., LIEB, G.K. & CARRIVICK, J. (2012 a): Climate change and rock fall events in high mountain areas: numerous and extensive rock falls in 2007 at Mittlerer Burgstall, Central Austria. – *Geografiska Annaler Ser. B*, **94**: 59-78; doi.org/10.1111/j.1468-0459.2011.00449x.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., SLUPETZKY, H. & AVIAN M. (2012 b): Ice-avalanche impact landforms: the event in 2003 at the glacier Nördliches Bockkarkees, Hohe Tauern Range, Austria. – *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, **94/1**: 97-115. <https://www.jstor.org/stable/41431041>.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., DELALOYE, R., LAMBIEL, C., GÄRTNER-ROER, I., KAUFMANN, V., SCAPOZZA, C., KRAINER, K., STAUB, B., THIBERT, E., BODIN, X., FISCHER, A., HARTL, L., MORRA DI CELLA, U., MAIR, V., MARCER, M. & SCHOENEICH, P. (2018): Interannual variability of rock glacier flow velocities in the European Alps. – In: *5<sup>th</sup> European Conference on Permafrost – Book of Abstracts*. – 396-397; Chamonix, France.

- KELLERER-PIRKLBAUER, A., AVIAN, M., BENN D.I., BERNSTEINER, F., KRISCH, P. & ZIESLER, C. (2021): Buoyant calving and ice-contact lake evolution at Pasterze Glacier (Austria) in the period 1998–2019. – *The Cryosphere*, **15** (3): 1237–1258; doi.org/10.5194/tc-15-1237-2021.
- KOTLARSKI, S., GOBIET, A., MORIN, S., OLEFS, M., RAJCAK, J. & SAMACOÏTS, R. (2022): 21<sup>st</sup> century alpine climate change. – *Climate Dynamics*, **60**: 65–86. doi.org/10.1007/s00382-022-06303-3.
- LIEB, G.K. & KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2018): Die Pasterze, Österreichs größter Gletscher, und seine langjährige Messreihe in einer Ära massiven Gletscherschwundes. – In: FISCHER, A., PATZELT, G., ACHRAINER, M., GROSS, G., LIEB, G.K., KELLERER-PIRKLBAUER, A. & BENDLER G. (2018): Gletscher im Wandel. 125 Jahre Gletschermessdienst des Alpenvereins. – 31–51; Berlin (Springer Spektrum).
- LIEB, G.K. & KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2019): Das Eis und die Berge und warum sie untrennbar zusammengehören. – *Berg 2020* (Alpenvereinsjahrbuch „Zeitschrift Band 144“): 62–69; München, Innsbruck, Bozen.
- LIEB, G.K. & KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2023): Gletscherbericht 2021/2022 – Sammelbericht über die Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins im Jahr 2022. – *Bergauf* **2022** (03): 10–21; Innsbruck. [https://www.alpenverein.at/portal\\_wAssets/docs/service/presse/2023/Gletscherbericht-2021-22/Gletscherbericht\\_Bergauf\\_2\\_23.pdf](https://www.alpenverein.at/portal_wAssets/docs/service/presse/2023/Gletscherbericht-2021-22/Gletscherbericht_Bergauf_2_23.pdf).
- LIEB, G.K. & SLUPETZKY, H. (2011): Die Pasterze. Der Gletscher am Großglockner. – 158; Salzburg (Pustet Verlag).
- LIEB, G.K., KELLERER-PIRKLBAUER, A., KAUFMANN, V. & AVIAN, M. (2016): Das Grazer Permafrost-Monitoring-Netzwerk im Nationalpark Hohe Tauern (Österreich). – *Joannea Geol. Paläont.*, **12**: 9–16; Graz.
- MAIR, V., ZISCHG, A., LANG, K., TONIDNADEL, D., KRAINER, K., KELLERER-PIRKLBAUER, A., DELINE, P., SCHOENEICH, P., CREMONESE, E., POGLIOTTI, P., GRUBER, S. & BÖCKLI, L. (2011): PermaNET – Permafrost Long-term Monitoring network. Synthesebericht. – INTER-PRAEVENT Schriftenreihe 1, Report 3: 24; Klagenfurt.
- NICOLUSSI, K. & PATZELT, G. (2000): Untersuchungen zur holozänen Gletscherentwicklung von Pasterze und Gepatschferner (Ostalpen). – *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **36**: 1–87.
- NOETZLI, J., CHRISTIANSEN, H.H., HRBACEK, F., ISAKSEN, K., SMITH, S.L., ZHAO, L. & STRELETSKIY, D.A. (2020): Permafrost thermal state. – In: BLUNDEN, J. & BOYER, T. (Hrsg.): State of the Climate in 2020. – *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **102** (8): Si–S42–44; doi.org/10.1175/2021BAMS-StateoftheClimate.1.
- PASCHINGER, V. (1959): Die verschwundenen Gletscher der Ostalpen (seit dem letzten Hochstand um 1850). – *Abhandlungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft*, **16**: 67; Wien.
- PATZELT, G. (2018): Die Längenmessungen des Alpenvereins an Ostalpengletschern. – In: FISCHER, A., PATZELT, G., ACHRAINER, M., GROSS, G., LIEB, G.K., KELLERER-PIRKLBAUER, A. & BENDLER G.: Gletscher im Wandel. 125 Jahre Gletschermessdienst des Alpenvereins. – 7–15; Berlin (Springer Spektrum).
- PAUL, F., RASTNER, P., AZZONI, R.S., DIOLAIUTI, G., FUGAZZA, D., LE BRIS, R., NEMEC, J., RABATEL, A., RAMUSOVIC, M., SCHWAIZER, G. & SMIRAGLIA, C. (2020): Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2. – *Earth System Science Data*, **12**: 1805–1821; doi.org/10.5194/essd-12-1805-2020.
- PELLET, C., BODIN, X., CUSICANQUI, D., DELALOYE, R., KÄÄB, A., KAUFMANN, V., NOETZLI, J., THIBERT, E., VIVERO, S. & KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2022): Cryosphere – Rock glacier velocity. – In: State of the Climate in 2021. – *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **103** (8): S43–S44; doi.org/10.1175/2022BAMSStateoftheClimate.1
- PERMOS (2023): Swiss Permafrost Bulletin 2022 (Hrsg.: NOETZLI, J. & PELLET, C.). – 22 S.; doi.org/10.13093/permos-bull-2023.

- PILLEWIZER, W. (1938): Photogrammetrische Gletscheruntersuchungen im Sommer 1938. – Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde, **9** (19): 367-372.
- ROER, I., HAEBERLI, W., AVIAN, M., KAUFMANN, V., DELALOYE, R., LAMBIEL, C. & KÄÄB, A. (2008): Observations and considerations on destabilizing active rock glaciers in the European Alps. – In: Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Permafrost. – 1505-1510; Fairbanks, Alaska.
- SCHOENEICH, P., BODIN, X., ECHELARD, T., KAUFMANN, V., KELLERER-PIRKLBAUER, A., KRY-SIECKI, J.-M. & LIEB, G.K. (2014): Velocity changes of rock glaciers and induced hazards. – In: LOLLINO, G., MANCONI, A., CLAGUE, J., SHAN, W. & CHIARLE, M. (Hrsg.): Engineering Geology for Society and Territory, **1**: 223-227; (Springer); doi.org/10.1007/978-3-319-09300-0\_42
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2019): Klimawandel kompakt. Ein globales Problem wissenschaftlich erklärt, 2. Auflage. – 132; Stuttgart (Gebr. Borntrager).
- SCOTTI, R., CROSTA, G.B. & VILLA, A. (2017): Destabilisation of creeping permafrost: the Plator Rock Glacier case study (Central Italian Alps). – Permafrost Periglacial Process, **28**: 224-236; doi.org/10.1002/ppp.1917.
- WGMS (2021): Global Glacier Change Bulletin No. 4 (2018-2019). – SC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, [ZEMP, M., NUSSBAUMER, S. U., GÄRTNER-ROER, I., BANNWART, J., PAUL, F. & HOELZLE, M. (Hrsg.)]. – 278; Zürich (World Glacier Monitoring Service); doi.org/10.5904/wgms-fog-2021-05.
- ZUO, Z. & OERLEMANS, J. (1997): Numerical modelling of the historic front variation and the future behaviour of the Pasterze Glacier, Austria. – Ann. Glaciol., **24**: 234-241; doi.org/10.3189/S0260305500012234.

MMAG. DR. ANDREAS KELLERER-PIRKLBAUER  
AO. UNIV. PROF. MAG. DR. GERHARD KARL LIEB  
Institut für Geographie und Raumforschung  
Heinrichstraße 36  
A-8010 Graz  
andreas.kellerer@uni-graz.at  
gerhard.lieb@uni-graz.at

Manuskripteingang: 11. August 2023

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Jahrbücher des Nassauischen Vereins für Naturkunde](#)

Jahr/Year: 2023

Band/Volume: [144](#)

Autor(en)/Author(s): Kellerer-Pirklbauer Andreas, Lieb Gerhard Karl

Artikel/Article: [Die klimagesteuerte Entwicklung von Gletschern und Permafrost seit der Mitte des 19. Jahrhunderts in den österreichischen Alpen 7-35](#)