

PERMAFROST



Foto: Ingo Hartmeyer 2024, Kitzsteinhorn.

Etwa 2,5 % des österreichischen Staatsgebietes sind laut Modellierungen von dauerhaft gefrorenem Untergrund geprägt, der von einer saisonal nicht gefrorenen Schicht (saisonale Auftauschicht) überlagert ist (Boeckli et al. 2012). Man spricht in diesem Fall von Permafrost. Weitere ca. 1,5 % Österreichs sind von starkem saisonalem Frost betroffen, der ähnliche Auswirkungen auf Verwitterungsprozesse hat. 23 Skigebiete, 31 Stauseen und 42 Berghütten sind direkt oder indirekt von Permafrost und den damit verbundenen Prozessen beeinflusst (Kellerer-Pirklbauer et al. 2015). Die Untergrundstabilität und damit die Sicherheit hochalpiner Infrastrukturen (unterstützende Infrastruktur, Gebäude, Wege) können durch den Anstieg der Bodentemperatur und das Auftauen des Permafrosts infolge des Klimawandels beeinträchtigt werden. Darüber hinaus hat die Permafrostdegradation erhebliche Auswirkungen auf die Hydrologie. Die Veränderungen im Permafrost sind daher von ökologischer und ökonomischer Bedeutung.

Trotz des Interesses verschiedener Institutionen fehlt in Österreich ein koordiniertes nationales Permafrost-Monitoringnetzwerk mit langfristiger Strategie und Basisfinanzierung, wie es beispielsweise in der Schweiz existiert. Diese Bedingungen erschweren die Entwicklung eines Verständnisses der Prozesse rund um die Auswirkungen des anthropogen verstärkten Klimawandels auf die permafrostbeeinflusste Hochgebirgsregion in Österreich (für weitere Details siehe Kellerer-Pirklbauer et al. 2015).

Derzeit existieren sieben Tiefenbohrlöcher für Temperaturmessungen am Kitzsteinhorn und vier am Hohen Sonnblick (beide in den Hohen Tauern). Darüber hinaus werden an rund 20 weiteren Standorten permafrost- und periglazialbezogene Messungen durchgeführt – darunter Oberflächentemperaturen, geophysikalische Untersuchungen und Geländebewegungen. Eines dieser Monitoringnetzwerke ist das „Grazer Permafrost Monitoring Netzwerk“, eine lose Kooperation zwischen verschiedenen Partnern und Institutionen mit räumlichem Bezug zu Graz. Hauptmotiviert durch das vom FWF geförderte Projekt ALPCHANGE

(2006–2011) etablierten Forscher der Karl-Franzens-Universität Graz und der Technischen Universität Graz im Jahr 2006 gemeinsam ein erstes Permafrost-Monitoring-Netzwerk in vier verschiedenen Messgebieten im Nationalpark Hohe Tauern in Kärnten. Seitdem wurde das Netzwerk auf 14 Standorte in den Zentralalpen (Kärnten, Tirol) ausgeweitet und liefert die längsten Datenreihen zu Permafrost- und periglazialen Prozessen in Österreich. Die Methodik umfasst Bodentemperaturmessungen, geodätische und photogrammetrische Messungen der Oberflächengeschwindigkeit von Blockgletschern (kriechender Permafrost) sowie der Erkennung von Oberflächenveränderungen (z. B. Felsstürze) mittels terrestrischem Laserscanning oder photogrammetrischen Verfahren (z.B. Drohnen-basierte Aufnahme von labilen Felswänden). Weitere damit verbundene Aktivitäten umfassen die optische Überwachung geomorphologischer und nivaler Prozesse in der Wurzelzone von Blockgletschern (mit automatischen Kameras), meteorologische (mit Wetterstationen), geophysikalische Messungen (elektrische Widerstandstomografie und seismische Refraktion) sowie die Überwachung von Wassertemperatur, Hydrochemie und Quellabfluss an Blockgletscherquellen (mithilfe verschiedener Mess- und Monitoringansätze).

Im aktuellen Bericht werden erstmals ausgewählte Ergebnisse aus den umfangreichen Bodentemperatur-Monitoringaktivitäten präsentiert. Diese Daten, die in zehn der 14 Untersuchungsgebiete teilweise seit fast 20 Jahren erhoben werden, ermöglichen es, lokale Messergebnisse in einen größeren räumlichen Kontext einzuordnen.

Insgesamt unterstreichen diese Ergebnisse sowohl den hohen wissenschaftlichen Wert der bestehenden Messreihen als auch die dringende Notwendigkeit eines langfristig gesicherten, national koordinierten Permafrost-Monitorings, um die komplexen Auswirkungen des Klimawandels in den österreichischen Hochgebirgsregionen verlässlich erfassen und bewerten zu können.



Dr. Viktor Kaufmann (Technische Universität Graz),
Dr. Andreas Kellerer-Pirklbauer & Dr. Gerhard K. Lieb (Universität Graz)



Foto: Gerhard K. Lieb 2025, pseudo-reliktischer Blockgletscher im Reichartkar (Seckauer Tauern); Blick vom Gipfelnahen Bereich des Hochreicharts runter ins Kar.

THERMISCHER ZUSTAND DES PERMAFROSTS



Foto: Gerhard K. Lieb 2023, Oberwalderhütte.

KEY MESSAGES

2023



3,5 m

Maximale Auftaumächtigkeit am Kitzsteinhorn (am 01.09.2023)



1,9 m

Maximale Auftaumächtigkeit am Hohen Sonnblick (am 14.09.2023)



143 Tage

Zeitraum zwischen Bildung und Zufrieren der Auftauschicht am Kitzsteinhorn



101 Tage

Zeitraum zwischen Bildung und Zufrieren der Auftauschicht am Hohen Sonnblick

KEY MESSAGES

2024



4,4 m

Maximale Auftaumächtigkeit am Kitzsteinhorn (am 09.09.2024)



2,0 m

Maximale Auftaumächtigkeit am Hohen Sonnblick (am 09.09.2024)



126 Tage

Zeitraum zwischen Bildung und Zufrieren der Auftauschicht am Kitzsteinhorn



113 Tage

Zeitraum zwischen Bildung und Zufrieren der Auftauschicht am Hohen Sonnblick

Thermische Änderungen im Permafrost können über Temperaturmessungen in tiefen Bohrlöchern direkt beobachtet werden. Im Gegensatz zum dichten Bohrlochnetz der Schweiz, gibt es in Österreich nur zwei hochalpine Standorte mit Bohrlochmessungen im Permafrost. In der Gipfelregion des Hohen Sonnblicks (GeoSphere Austria) existiert seit dem Jahr 2010 ein Bohrloch-Monitoring, am Kitzsteinhorn (GEORESEARCH Forschungsgesellschaft) seit dem Jahr 2015. Ein weiterer Bohrlochstandort für den Großglockner befindet sich in der Umsetzungsphase (GEORESEARCH Forschungsgesellschaft).

An den in den Hohen Tauern gelegenen Bohrlochstandorten Sonnblick und Kitzsteinhorn wurden in den Messjahren 2023 und 2024 in Oberflächennähe starke saisonale Temperaturschwankungen beobachtet, die mit zunehmender Tiefe stark gedämpft wurden. In 15 m Tiefe lagen die saisonalen Schwankungen in beiden Messjahren nur noch im Zehntelgrad-Bereich. In noch größeren Tiefen bewegten sich die Schwankungen im Hundertstelgrad-Bereich; sowohl am Sonnblick als auch am Kitzsteinhorn herrschten dort äußerst stabile Temperaturverhältnisse (Abbildung 23 und Abbildung 25).

Abbildung 25 zeigt den Temperaturverlauf in verschiedenen Untergrundtiefen (Kitzsteinhorn: 3 m und 30 m; Sonnblick: 3 m und 16 m). Die deutlich grö-

ßeren Temperaturschwankungen in Oberflächennähe verdeutlichen einen gedämpften Wärmefluss in den Untergrund. Damit wird ersichtlich, dass atmosphärische Erwärmung zeitlich verzögert und abgeschwächt in größere Tiefen vordringt.

Die saisonale Entwicklung der Permafrost-Auftauschicht wird maßgeblich von Schneelage und Witterungsverlauf bestimmt. Am steilen, schneearmen Kitzsteinhorn-Standort begann die Bildung der Auftauschicht bereits Anfang Juni (Messjahr 2023) bzw. Mitte Juni (Messjahr 2024). Am schneereichen Sonnblick-Standort setzte die Initiierung der Auftauschicht in beiden Messjahren erst Mitte Juli ein. Im Verlauf der Sommersaison nahm die Auftauschicht an beiden Standorten kontinuierlich an Mächtigkeit zu und erreichte Mitte September ihr saisonales Maximum.

In Folge des heißen Sommers und des milden vorausgehenden Winters wurden im Messjahr 2024 an beiden Standorten neue Rekordmächtigkeiten verzeichnet (2,0 m am Sonnblick, 4,4 m am Kitzsteinhorn), die die Werte des Messjahres 2023 knapp (Sonnblick 1,9 m) bzw. deutlich (Kitzsteinhorn 3,5 m) übertrafen. Das anschließende Durchfrieren der Auftauschicht dauert in der Regel rund einen Monat, kann in Extremfällen jedoch auch innerhalb einer einzigen Woche erfolgen (Sonnblick im Messjahr 2024). Sowohl am Sonnblick als auch am Kitzsteinhorn ist ein trendhaftes Anwachsen der Permafrost-Auftau-

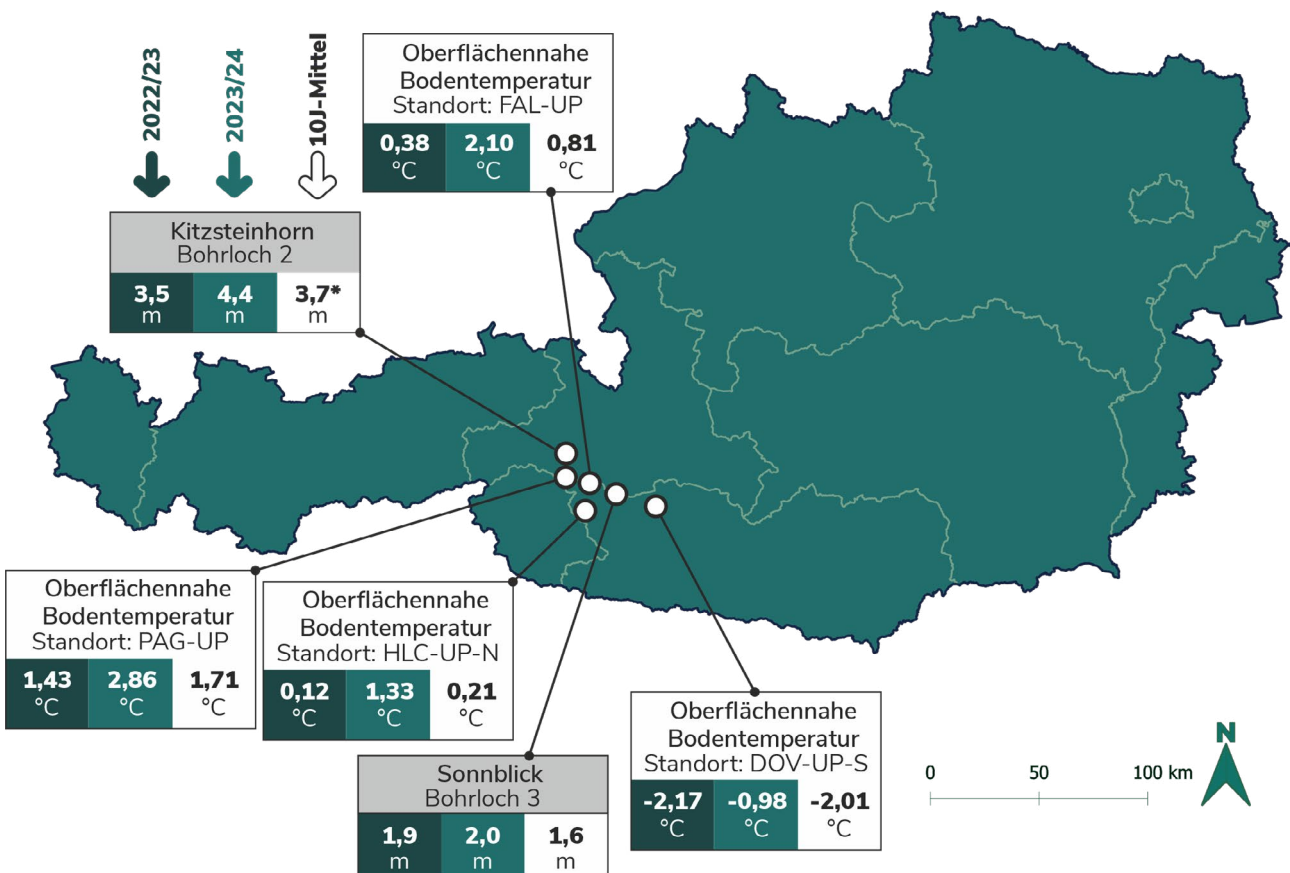


Abbildung 22: Übersicht der Tiefenbohrlöcher (grau) in Österreich mit der maximalen Auftautiefe für die Jahre 2023 (dunkelgrün), 2024 (hellgrün) und dem 10-jährigen Mittel (weiß) (2015-2024). Zusätzlich sind die Standorte der in diesem Bericht analysierten oberflächennahen Bodentemperaturmessungen dargestellt, einschließlich ihrer Jahresmitteltemperaturen (1.8.–31.7.) für 2022/23 (dunkelgrün), 2023/24 (hellgrün) und dem 10-jährigen Mittel (weiß) (2014/15–2023/24).

*Die Messungen begannen im Jahr 2016, weshalb der Mittelwert für das Tiefenbohrloch am Kitzsteinhorn einen Zeitraum von neun Jahren umfasst.


mächtigkeit zu beobachten, das am Kitzsteinhorn (+0,8 m pro Jahrzehnt) stärker ausgeprägt ist als am Sonnblick (+0,5 m pro Jahrzehnt) (Abbildung 24).

Zur Erfassung oberflächennaher Bodentemperaturen in potenziell permafrostbeeinflussten Hochlagen werden im Kärntner Teil des Nationalpark Hohe Tauern an 41 Standorten Langzeit-Temperaturmessungen durchgeführt (Universität Graz). Im Messjahr 2023/24 (Zeitraum 1.8.–31.7. des Folgejahres) wurden an nahezu allen Standorten neue Höchstwerte der Jahresmitteltemperaturen registriert. Hauptursachen sind eine frühe, isolierende Schneedecke im Herbst 2023 sowie hohe sommerliche Lufttemperaturen 2024, die zu einer schnellen Schneeschmelze führten.

Ausgewertet wurden exemplarisch vier Standorte – je einer pro Arbeitsgebiet (Abbildung 26). Die Zeitreihen zeigen an drei der vier Messpunkte statistisch signifikante Erwärmungstrends. Im Mittel liegt die Erwärmungsrate bei 0,08 °C/Jahr, mit einem Maximum von 0,10 °C/Jahr am schneearmen Standort PAG-UP (Pasterze-Burgstall). Dort wurde im Messjahr 2023/24 mit 2,87 °C ein neuer Höchstwert gemessen – etwa 1 °C über dem bisherigen Maximum von 2019/20. Am

Standort HLC-UP-N (Hinteres Langtalkar-Kögelekar) ist die Temperatur über 17 Jahre um rund 0,08 °C/Jahr gestiegen. Das aktuelle Messjahr brachte mit 1,33 °C ebenfalls einen Rekordwert. Der Standort DOV-UP-S (Dösen-Säuleck) liegt ganzjährig im Permafrostbereich (< 0 °C), verzeichnet aber ebenfalls einen signifikanten Erwärmungstrend. Nur am Standort FAL-UP (Hochtor-Fallbichl) ist der Trend mit +0,04 °C/Jahr schwach und statistisch nicht signifikant, was auf dort besonders stark schwankende Schneeeverhältnisse zurückzuführen ist.

Trotz einzelner schneearmer Winter, die zu einer temporären Auskühlung des Untergrunds führen, sind sommerliche Hitzeperioden mit frühzeitiger Schneeschmelze die Ursache für den Erwärmungstrend. Die Fortführung des Monitorings ist entscheidend, um langfristige Entwicklungen des alpinen Permafrosts in Zeiten des Klimawandels quantitativ bewerten zu können.

 Dr. Ingo Hartmeyer (GEORESEARCH), Dr. Andreas Kellerer-Pirklbauer (Universität Graz) & Mag. Claudia Riedl (GeoSphere Austria)

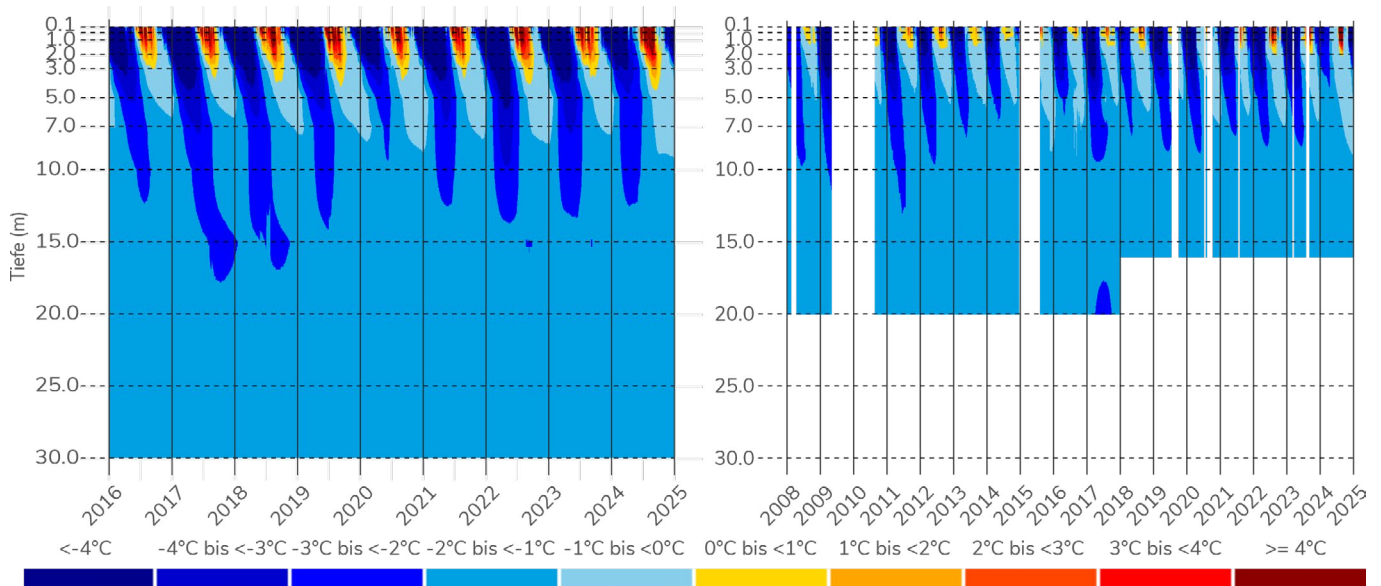


Abbildung 23: Interpolierter Jahresverlauf der Temperatur in verschiedenen Tiefen am Tiefenbohrloch ‚B2‘ am Kitzsteinhorn (links) und Tiefenbohrloch 3 am Sonnblick (rechts) seit Messbeginn, Datenlücken werden weiß dargestellt.

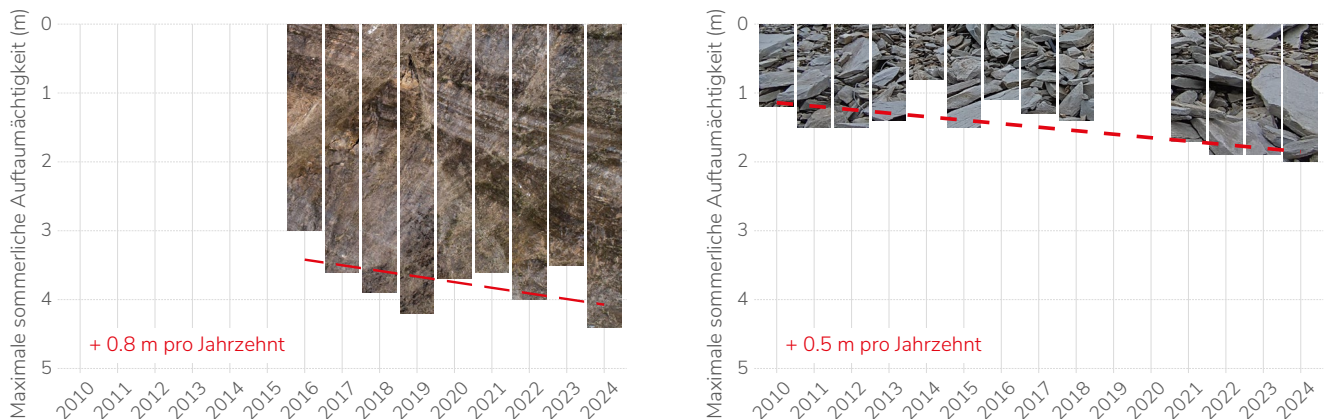


Abbildung 24: Entwicklung der Permafrost-Auftaumächtigkeit am Kitzsteinhorn (links) und Sonnblick (rechts).

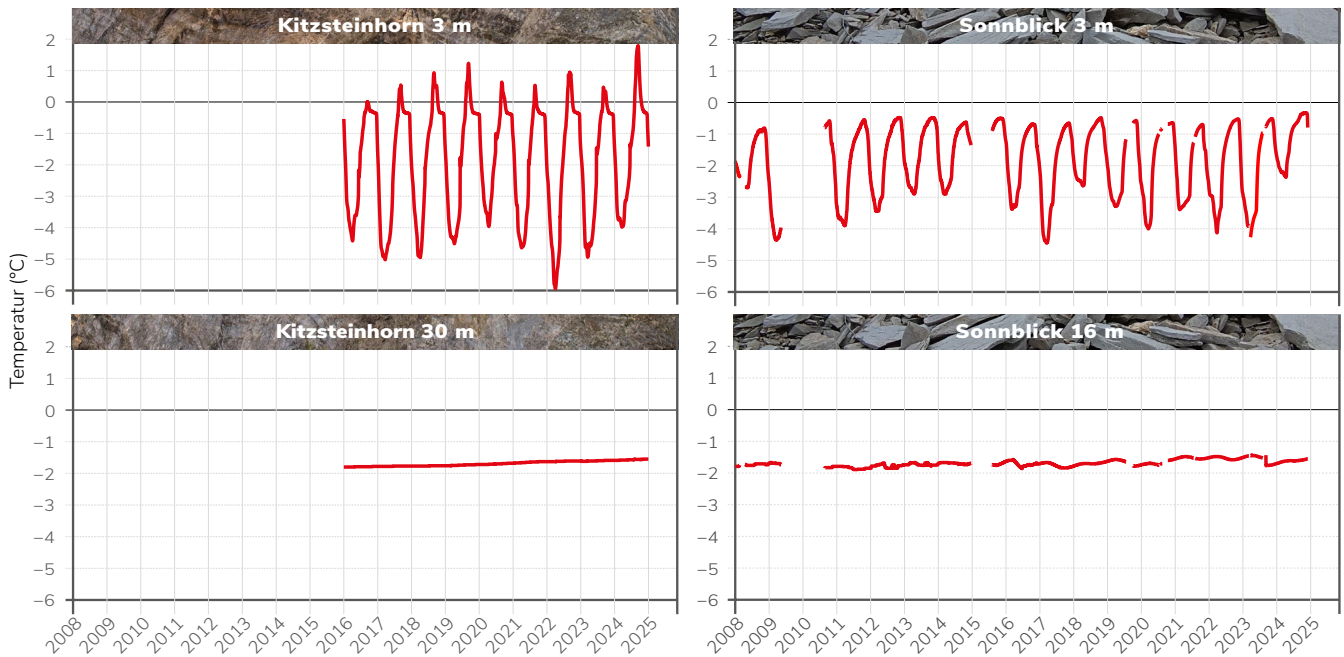


Abbildung 25: Ausgewählte Bohrlochtemperaturen für oberflächennahe Bereiche (3 m Tiefe für Sonnblick und Kitzsteinhorn) und für große Tiefen (16 m für Sonnblick, 30 m für Kitzsteinhorn, jeweils tiefster verfügbarer Sensor gewählt).

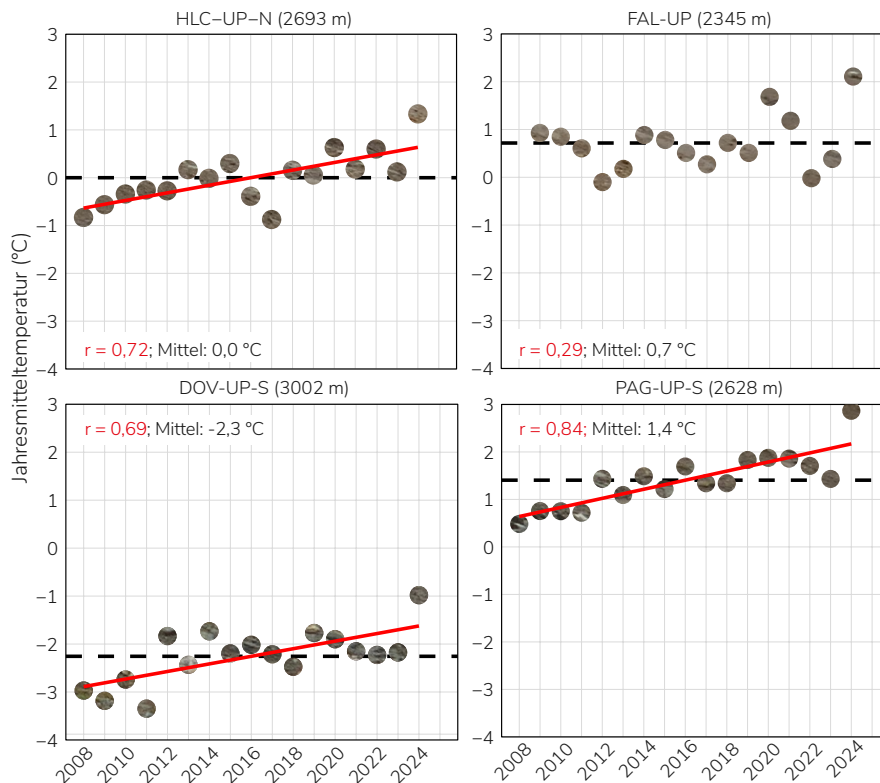


Abbildung 26 Links: Jahresmitteltemperatur der Bodenoberfläche an vier ausgewählten Standorten in den Hohen Tauern für den Zeitraum 1.8.–31.7. des Folgejahres für die Messjahre von 2007/08 bis 2023/24. Lineare Trends sowie entsprechende Korrelationskoeffizienten sind in rot dargestellt. Jene für DOV-UP-S, HLC-UP-N und PAG-UP sind statistisch signifikant (alle drei $p < 0,01$ – Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1 %). Zu beachten die gleiche Skalierung der Ordinaten.

► Bodentemperatur DATEN 2022/23 & 2023/24

Kitzsteinhorn:

Daten- und Fördergeber: GEORESEARCH Forschungsgesellschaft mbH;
Daten: GTNP: Global Terrestrial Network for Permafrost - Database.

Sonnblick:

Daten- und Fördergeber: GeoSphere Austria;
Daten: GTNP: Global Terrestrial Network for Permafrost - Database.

Bodentemperaturen:

Daten- und Fördergeber: Nationalpark Hohe Tauern;
Daten: Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M., Frießenbichler M. (2025): Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2022-2024. Endbericht.



BLOCKGLETSCHER

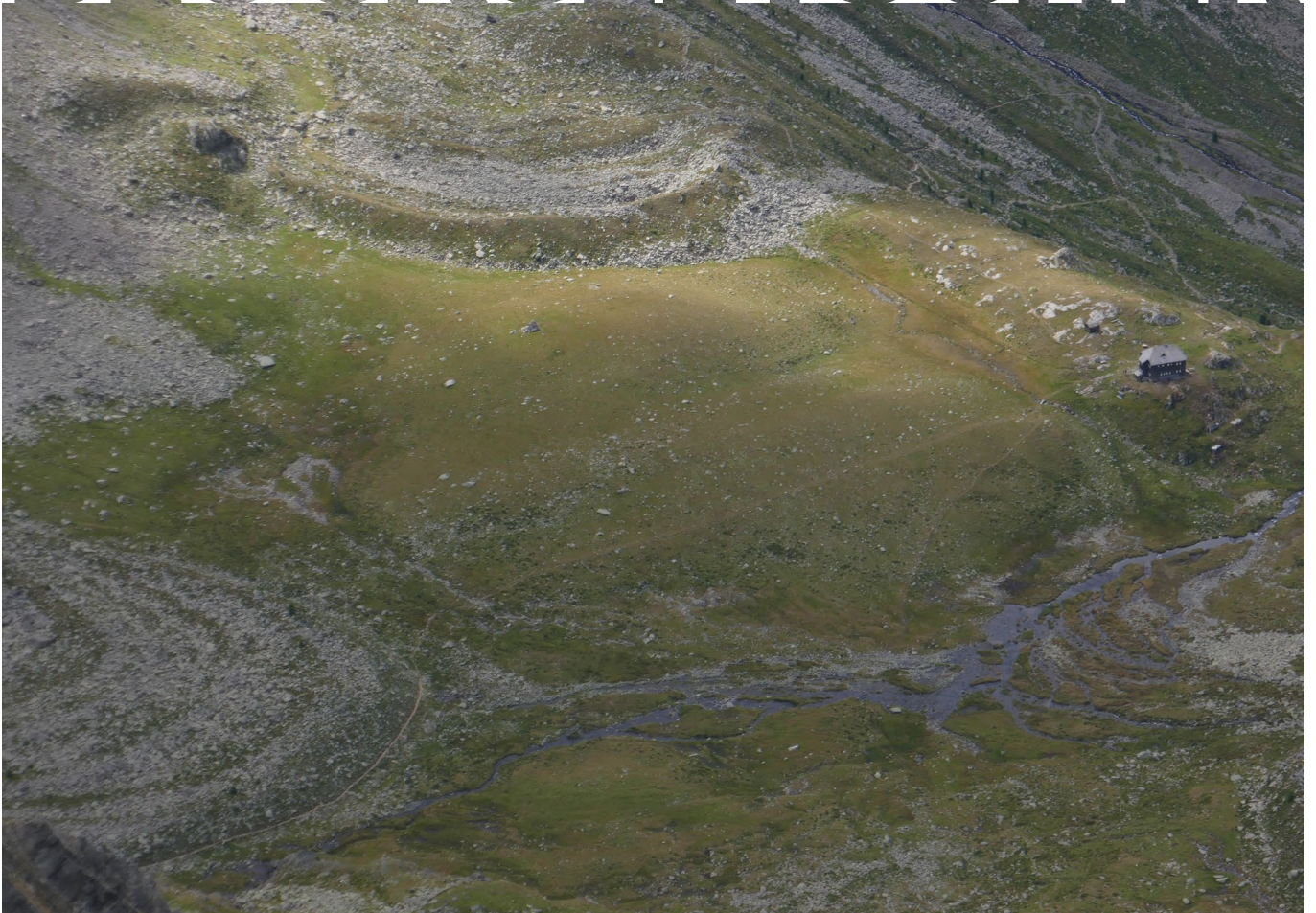


Foto: Gerhard K. Lieb 2023, reliktsche Blockgletscherzunge nahe der Hochschoberhütte.

KEY MESSAGES

2022/2023



17,06 m/Jahr

Äußeres Hochebenkar, Blockgletscher mit der höchsten mittleren Bewegungsrate



0,13 m/Jahr

Weißekar, Blockgletscher mit der niedrigsten mittleren Bewegungsrate

KEY MESSAGES

2023/2024



31,44 m/Jahr

Äußeres Hochebenkar, Blockgletscher mit der höchsten mittleren Bewegungsrate



0,13 m/Jahr

Weißekar, Blockgletscher mit der niedrigsten mittleren Bewegungsrate

Im Jahr 2022 wurde die Blockgletscher-Oberflächengeschwindigkeit (rock glacier velocity: RGV) als zusätzlicher assoziierter Parameter (associated parameter oder product) der essentiellen Klimavariablen (essential climate variable: ECV) von GCOS (Global Climate Observing System) zur Beschreibung der Klimaveränderung in Hinblick auf die Kryosphäre festgelegt (GCOS-Imp 2022, GCOS-Req 2022, GCOS-ECV 2025, ECV 2025). RGV ist ein auf ein Jahr homogener Wert der oberflächlichen horizontalen Geschwindigkeit an einem Blockgletscher bzw. einem Teil von ihm, abgeleitet aus jährlichen oder mehrjährigen Messungen. Die gemessenen Geschwindigkeiten spiegeln den Prozess des Permafrostkriechens wider. Dabei bezeichnet man als „Permafrostkriechen“ die Kombination aus innerer Verformung des Eises des gefrorenen Materials (Kriechen des Permafrostkörpers im engeren Sinne) und Scherung an einem oder mehreren unterschiedlichen Horizonten innerhalb oder nahe der Basis des gefrorenen Körpers (Arenson 2002, Cicoira et al. 2020, RGK 2022).

Im Rahmen der Aktivitäten des „Grazer Permafrost-Monitoring- Netzwerks“, wird an mehreren Blockgletschern in den Hohen Tauern die RGV gemessen (Abbildung 27). Zwei der Blockgletscher mit den längsten Messreihen sind jene im Dösental, Anko-

gelgruppe (Dösener Blockgletscher) und im Hinteren Langtalkar, Schobergruppe (Blockgletscher Hinteres Langtalkar). Die vergleichende Darstellung der zeitlichen Änderung der geodätisch ermittelten Oberflächenbewegung der beiden untersuchten Blockgletscher ist Inhalt der Abbildung 28 und 29 (Kellerer-Pirklbauer et al. 2025).

Darin ist auch der zeitliche Verlauf der Oberflächenbewegung der im Nationalpark Hohe Tauern (Schobergruppe) gelegenen Blockgletscher Leibnitzkopf, Tschadinhorn und Weißenkar dargestellt. Aus dem Bild der Geschwindigkeitsgraphen (Abbildung 29) ist gut zu erkennen, dass (1) die Bewegungsraten der Blockgletscher gut miteinander korrelieren, (2) die Bewegungsraten im Messjahr 2020/21 die größten der gesamten geodätischen Messreihe waren, (3) noch zwei zeitlich zurückliegende Bewegungsmaxima (2003/04 bzw. 2014/15) erkennbar sind und (4) die Bewegungsraten über den gesamten Messzeitraum hinweg tendenziell zunehmen (Abbildung 31). Dies ist auch stimmig zu alpenweiten Vergleichen der RGV (vgl. Kellerer-Pirklbauer et al. 2024; Pellet et al. 2024).

Ein ähnliches Verhalten zeigt der Blockgletscher Äußeres Hochebenkar in den Öztaler Alpen. An diesem Blockgletscher werden bereits seit 1938 – wenn auch mit Unterbrechungen – Bewegungsmessungen

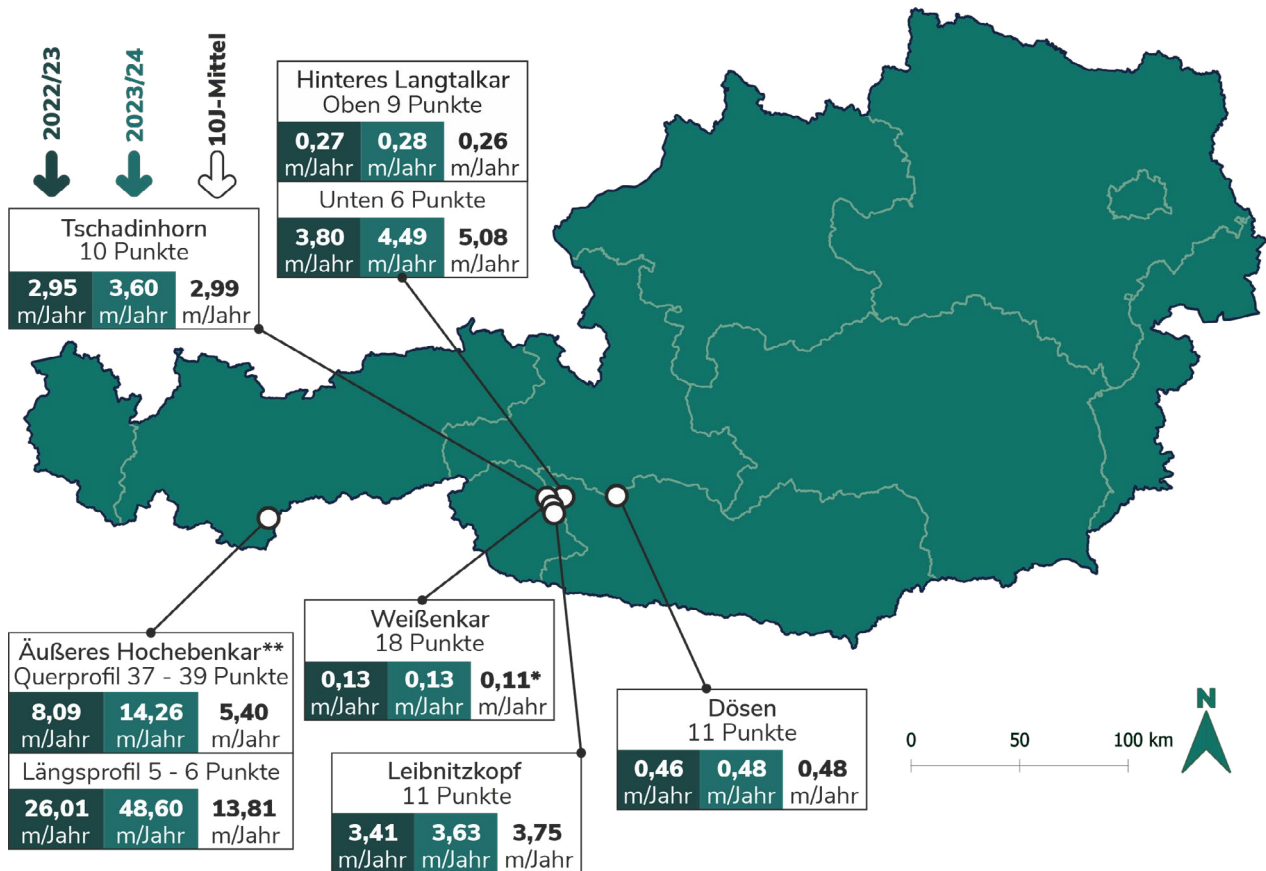



Abbildung 27: Lage und mittlere jährliche Bewegungsrate aller sechs*** Blockgletscher für das Haushaltsjahr 2022/23 (dunkelgrün), 2023/24 (hellgrün) sowie das 10-jährige Mittel (weiß) (2014/15-2023/24). Die Bewegungsraten vom Blockgletscher Hinteres Langtalkar werden aus zwei Gruppen von Punkten (obere und untere Gruppe) berechnet, da diese jeweils ein homogenes Fließverhalten aufweisen.

*Die Datenreihe weist Lücken auf. Aus diesem Grund konnten für die Bildung des Mittelwerts der letzten zehn Jahre nur Daten aus sechs Jahren verwendet werden.
 ** Alle Linien wurden 2021 in den Ausgangsprofilen neu angelegt; Querprofil 2022/23: 37 Punkte, 2023/24 39 Punkte; Längsprofil 2022/23: 6 Punkte, 2023/24: 5 Punkte.
 *** Anzumerken ist, dass es in Österreich noch weitere Blockgletscher gibt, an denen Bewegungsmessungen durchgeführt werden. In diesem Bericht werden nur jene Blockgletscher angeführt, die einen langen Untersuchungszeitraum (>20 Jahre) aufweisen

durchgeführt. Derzeit erfolgt die Messung der Bewegung in vier Querprofilen sowie einem Längsprofil entlang der zentralen Fließlinie (Abbildung 30). Seit 2019 wird eine kontinuierliche Zunahme der Bewegungsraten beobachtet, die sich auch in den Jahren 2022/23 und 2023/24 fortsetzte. Einzelne Steinpositionen erreichten dabei Maximalwerte von über 50 m pro Jahr, während die höchsten Tageswerte im Sommer bei über 20 cm lagen. Aufgrund der starken Bewegungen mussten das unterste Querprofil (Profil 0) sowie die Zentralsteine im Querprofil 1 an neuen Ausgangspositionen angelegt werden. Die Destabilisierung betrifft - wie auch am Blockgletscher im Hinteren Langtalar - insbesondere den unteren Bereich des Blockgletschers auf einer Länge von etwa 300 m.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bewegungsraten der Blockgletscher im Vergleich zum

Vorjahr zugenommen haben und sich auf einem insgesamt hohen Niveau befinden. Zu bedenken ist die Verzögerung, bis sich höhere Untergrundtemperaturen in höheren Bewegungsraten kriechenden Permafrostes niederschlagen. Ansteigende RGV entsteht - mit zeitlichen Verzögerungen von ein bis zwei Jahren - durch die mit höheren Temperaturen steigende Deformierbarkeit des Eises und den hydrostatischen Druck des vermehrt verfügbaren Wassers im Blockgletschersystem. Eine langfristige Tendenz zu höheren Bewegungsraten ist an allen Blockgletschern unverkennbar und bringt zunehmende Permafrost-Ungunst zum Ausdruck.

 Dr. Viktor Kaufmann (Technische Universität Graz), Dr. Andreas Kellerer-Pirklbauer, Dr. Gerhard K. Lieb (Universität Graz) & Dr. Martin Stocker-Waldhuber (Österreichische Akademie der Wissenschaften)

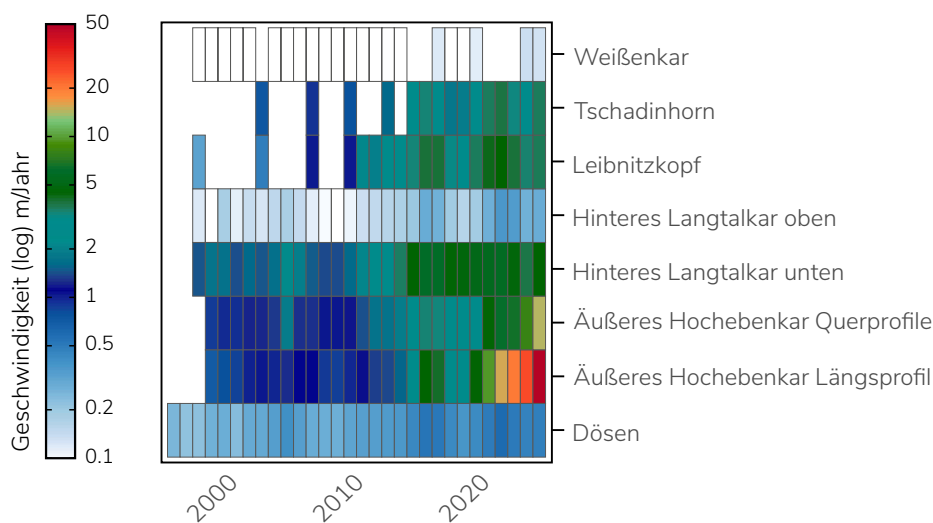


Abbildung 28: Mittlere jährliche Oberflächengeschwindigkeit aller Messpunkte und Linien (mit mindestens zwei Messwerten) der betrachteten Blockgletscher. Messpunktpositionen siehe Abbildung 30. Farbgebung der Geschwindigkeitsrate in logarithmischer Skala (Basis 10).

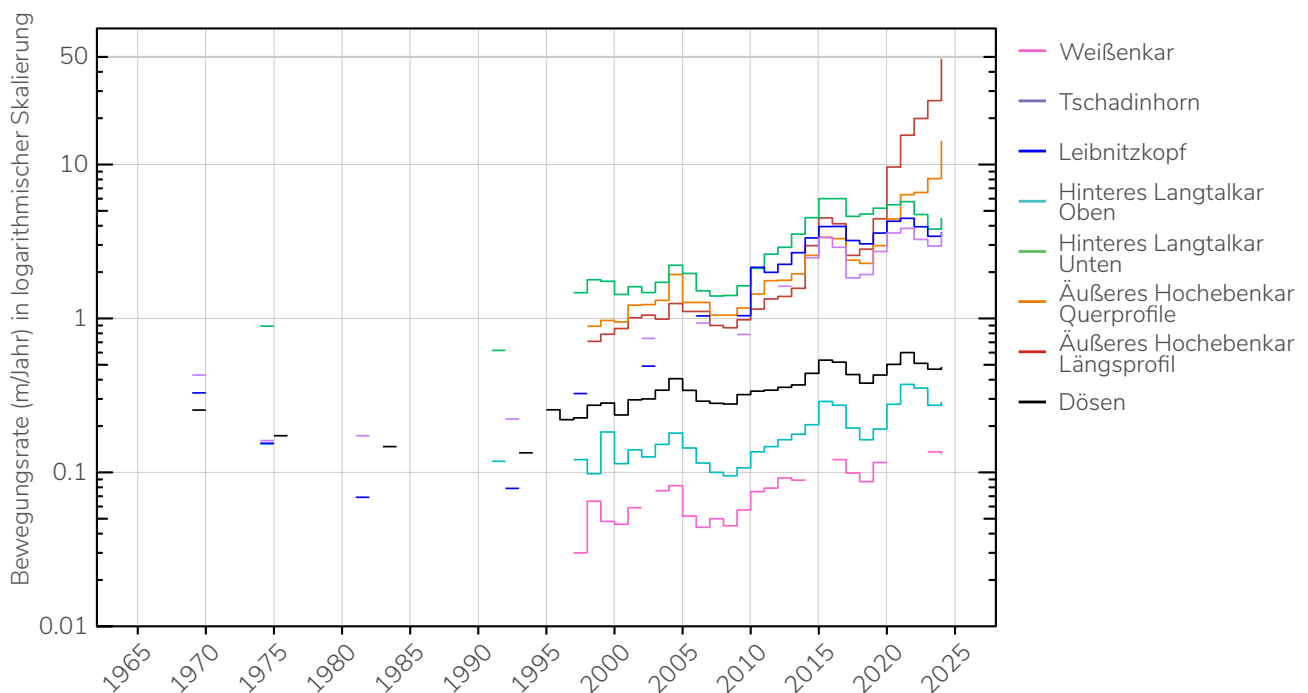


Abbildung 29: Mittlere jährliche Oberflächengeschwindigkeit aller 8 Blockgletscher. Die Bewegungsraten sind logarithmisch (Basis 10) skaliert.

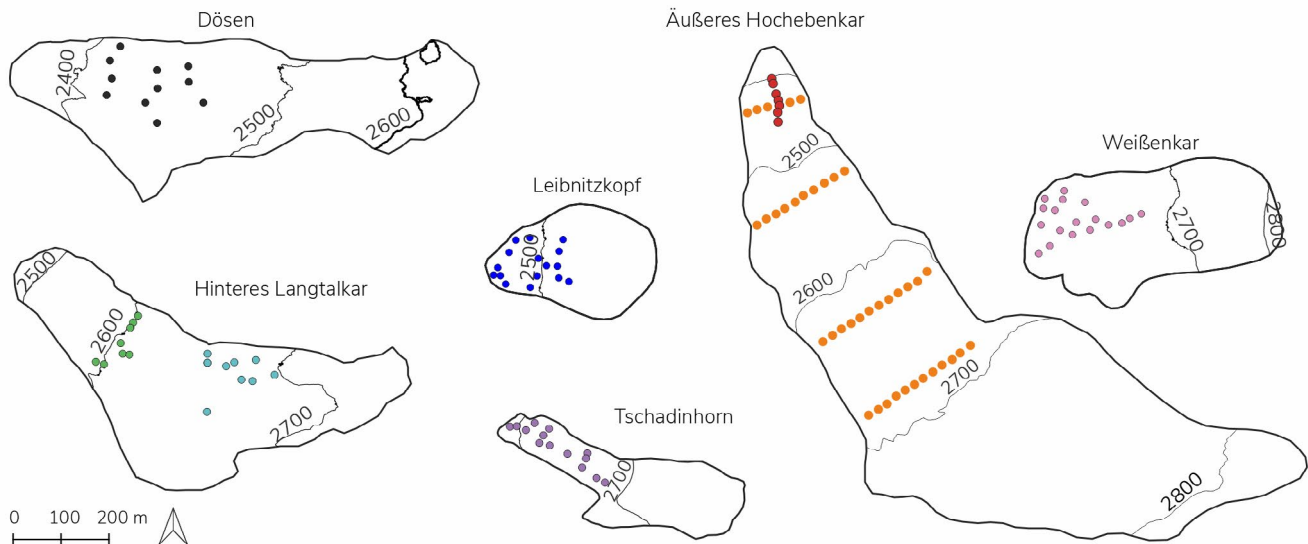


Abbildung 30: Gezeigte Blockgletscher und Messpunkte zur jährlichen Mittelwertbildung. Farbgebung der Messpunkte entspricht den Treppenplots der Mittelwerte in Abbildung 29 und 31.

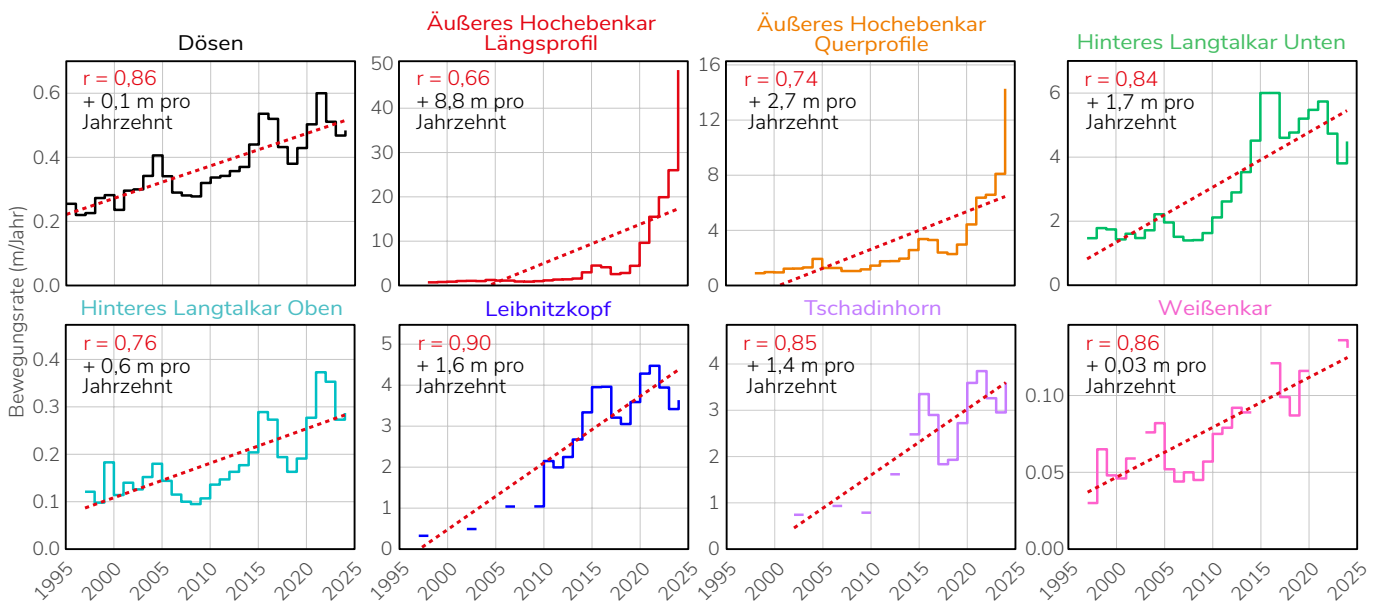


Abbildung 31: Jährliche Mittelwerte der Blockgletscherbewegung seit 1995 mit unterschiedlichen Y-Achsen-Skalen. Die Regressionsgerade zeigt den Zusammenhang zwischen Jahren und Bewegungsrate, der Korrelationskoeffizient (r) die Stärke und Richtung des linearen Zusammenhangs.

► Blockgletscher DATEN 2022/23 & 2023/24

Dösen; Hinteres Langtalkar; Leibnitzkopf; Tschadinhorn und Weißenkar:

Datengeber: Institut für Geodäsie (Technische Universität Graz)
 Fördergeber: ÖAV-Patenschaftsfonds Nationalpark Hohe Tauern
 Daten: Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kaufmann V., Avian M., Frießenbichler M. (2025): Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2022-2024.

Äußeres Hochebenkar:

Daten- und Fördergeber: Verein Gletscher und Klima & Österreichische Akademie der Wissenschaften, Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung
 Daten: Stocker-Waldhuber M., Fischer A., Hartl L., Abermann J. & Schneider H. (2021): Flow velocity records at Rock Glacier Outer Hochebenkar (Äußeres Hochebenkar), Ötztal, Tyrolian Alps.

