

Monitoring von schuttbedeckten Gletschern gezeigt am Beispiel des Gössnitzkeeses (Schobergruppe, Hohe Tauern) – Methoden und Klimarelevanz

Viktor KAUFMANN¹ ([ORCID](#)) & Andreas KELLERER-PIRKLBAUER² ([ORCID](#))

¹ Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz, viktor.kaufmann@tugraz.at

² Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz

DOI: [10.3217/978-3-99161-070-0-023](https://doi.org/10.3217/978-3-99161-070-0-023), CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Diese CC-Lizenz gilt nicht für Materialien von Dritten und anderweitig gekennzeichnete Inhalte.

1 Einleitung

Die Klimaveränderung führt in nahezu allen alpinen Regionen der Erde zu einem verstärkten Abschmelzen der Gletscher. Mit dem Gletscherrückgang ist meist eine verstärkte Schuttbedeckung, vorzugsweise in den Ablationsbereichen der Gletscher (Zungenenden), verbunden. Für glaziologische und klimatologische Studien ist eine Zeitreihenanalyse der Vergletscherung für einzelne Gletscher bzw. auch Gebirgsregionen unerlässlich. Klassische Zustandsparameter der jeweils aktuellen Vergletscherung sind u.a. die geometrischen Größen wie Fläche, ein absoluter Wert, und Eisdicken- und Volumenänderung und Fließgeschwindigkeit, als Relativwerte. Durch die angesprochene Zunahme der Schuttbedeckung ist es schwieriger geworden – das Gletschereis ist häufig nicht mehr direkt sichtbar, nicht nur vor Ort im Gelände, sondern auch in Fernerkundungsbildern – den aktuellen Gletscherrand klar bzw. überhaupt abzugrenzen: In vielen Fällen ist das Oberflächensubstrat (Blockwerk, Schuttmaterial, teilweise sogar mit Pionierpflanzenbewuchs und initialer Bodenbildung bei entsprechendem, eher feinkörnigem Substrat) der Gletscher und deren Umgebung in Textur und spektraler Signatur zum Verwechseln ähnlich. Für großräumige Gletscherstudien sind Fernerkundungsmethoden unerlässlich, wobei hier vorzugsweise flugzeug- bzw. satellitengestützte Methoden zum Einsatz kommen. In-situ-Messungen werden aufgrund des großen Aufwandes (Zeit und Kosten) meist nur für glaziologische Detailstudien bzw. zur Verifikation von Auswerteergebnissen basierend auf der Fernerkundung durchgeführt.

In diesem Beitrag wird am Beispiel des Gössnitzkeeses, einem kleinen, stark schuttbedeckten Kargletscher in der Schobergruppe, Hohe Tauern gezeigt, wie die vorhin angesprochene Gletscherkartierung mit Hilfe von Luftbildzeitreihen – trotz starker Schuttbedeckung – erfolgreich durchgeführt und mit geodätischen In-situ-Messungen sinnvoll ergänzt werden kann. Die Ermittlung der spezifischen Kenndaten der Gletscher ist nicht Selbstzweck, sondern dient in optimaler Weise klimatologischen Studien zur Abklärung der Auswirkung der lokalen/globalen Klimaänderung auf die Kryosphäre (Gletscher, Permafrost) im Gebirge und die Landschaftsgenese, aktuell aber auch in Zukunft. Zu diesem Zweck werden in diesem Beitrag für das Gössnitzkees ermittelte geometrische Kenngrößen mit Temperaturzeitreihen korreliert und somit in glaziologisch-klimatologischen Wert gesetzt.

2 Arbeitsgebiet

Das Gössnitzkees – Kees ist ein in Salzburg, Tirol, Südtirol und Kärnten verwendeteter Begriff für Gletscher und leitet sich aus dem mittelhochdeutschen Wort für Eis und Frost ab – befindet sich im Talschluss des Gössnitztales im Kärntner Teil der Schobergruppe, Hohe Tauern (Abb. 1). Die Schobergruppe (Fläche ca. 386,5 km², 36 Gipfel über 3000 m) ist eine wenig erschlossene Gebirgsgruppe, die bundesländerübergreifend in Kärnten und Tirol (Osttirol) liegt und aufgrund ihrer landschaftlichen Unversehrtheit und Schönheit auch Teil des Nationalparks Hohe Tauern ist. Diese Gebirgsgruppe ist aufgrund ihrer geographischen Lage klimatologisch kontinental, mit relativ geringen Niederschlägen, geprägt, was sich auch in einer relativ geringen Vergletscherung (Gletscherinventar/GI 3 aus dem Jahr 2009: 0,7 %, FISCHER et al. 2015) widerspiegelt. Die geologischen Gegebenheiten (Altkristallin mit Glimmerschiefer und verschiedenen Typen von Gneisen; bedingt durch die starke tektonische Beanspruchung neigt dieses Gestein zur Bildung von Blockwerk und Schutt förderlich für schuttbedeckte Gletscher und Blockgletscher) in Kombination mit der geringen Vergletscherung vermitteln ein insgesamt gestein-dominiertes Landschaftsbild, das durch den fortschreitenden Gletscherrückgang überdies verstärkt wird. Das Gössnitzkees (GI 3, 0,498 km²) ist ein nordexponierter, von Lawinen genährter Kargletscher. Aus glaziologischer Sicht ist ein wirkliches Nähr- bzw. Akkumulationsgebiet für diesen Gletscher unter den aktuellen Rahmenbedingungen (Topographie, Klima) nicht mehr gegeben. In seltenen Fällen überdauern kleine Altschneeflecken in den Couloirs unterhalb der Klammerköpfe die Sommermonate (Abb. 2). Im Jahr 2025 zeigte sich das Gössnitzkees stark schuttbedeckt und war visuell kaum mehr existent (Abb. 2). Die aktuelle Oberflächenmorphologie zeigt einen offensichtlichen Zerfallsprozess des einst größten Gletschers der Schobergruppe an (um 1850 noch ca. 1,6 km²). Die aktuellen klimatischen Bedingungen begünstigen nicht nur das weitere Abschmelzen der vorhandenen Gletscherreste, sondern auch das Auftauen des außerhalb der vergletscherten Flächen befindlichen Permafrosts, was sich u.a. durch verstärkten Steinschlag aus den Gehängen der Klammerköpfe bemerkbar macht. So musste aufgrund der aktuellen Gefährdung durch Steinschlag ein alpiner Steig über die Klammerscharte (Verbindung Elberfelder Hütte zur Adolf-Noßberger-Hütte) zuerst gesperrt und später sogar aufgelassen werden (vgl. Abb. 2).

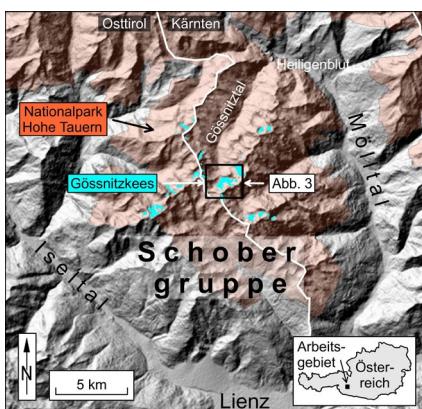


Abb. 1: Lage des Arbeitsgebietes im Kärntner Teil der Schobergruppe in der Kernzone des Nationalparks Hohe Tauern.



Abb. 2: Geodätische Vermessung. Blick in südöstlicher Richtung in den Talschluss des Gössnitztales mit dem unterhalb der Klammerköpfe gelegenen Gössnitzkees. Foto: V. Kaufmann, 29.8.2025.

3 Stand der Forschung

Die folgende Auflistung gibt einen Überblick zu unterschiedlichen Forschungsaktivitäten im Bereich des Gössnitzkeeses, die in letzten Jahrzehnten dort durchgeführt wurden.

(1) Österreichweites Gletschermessprogramm des Österreichischen Alpenvereins (ÖAV): 1982 wurde das Gössnitzkees und zwei weitere benachbarte Gletscher – und somit erstmals auch die Schobergruppe – durch G.K. Lieb und V. Kaufmann in das Messnetz des ÖAV eingebunden (LIEB 1987, FISCHER et al. 2018). Im Wesentlichen werden durch einfache Distanzmessungen (Maßband, Distometer) – Wiederholungsmessungen von mehreren eingemessenen Punkten pro Gletscher in genau definierten Richtungen – am Zungenende Vorstoß bzw. Rückzug des Gletschers erfasst. Die gesamte Messreihe wird jährlich aktualisiert (zuletzt LIEB & KELLERER-PIRKLBAUER 2025) und kann online eingesehen werden (GLETSCHERMONITOR 2026).

(2) Gletscherinventare 1969, 1998, 2009 und 2015: Die Gletscherfläche des Gössnitzkeeses der genannten Jahre wurde auch im Rahmen österreichweiter Gletscherinventuren (GI 1-4) erfasst (LAMBRECHT & KUHN 2007, KUHN et al. 2008, FISCHER et al. 2015, BUCKEL & OTTO 2018).

(3) Geodätische Messungen: 1996 wurde von V. Kaufmann und G. Kienast ein geodätisches Messnetz am Gössnitzkees eingerichtet und zwar mit der Absicht nicht nur die Gletscherlängenänderung, sondern auch die Eisdickenänderung und die Fließgeschwindigkeit des Gletschers alljährlich mit hoher Genauigkeit zu erfassen. Für die Bestimmung der Fließgeschwindigkeit wurden 10 Messpunkte auf markanten Felsblöcken permanent durch Farbmarkierungen signalisiert. Aus den Messungen kann auch die lokale Eisdickenänderung abgeleitet werden. Für die bessere höhenzonale Erfassung der Eisdickenänderung wurde ein Gletscherlängsprofil angelegt. Die anfangs mit einer Totalstation durchgeföhrten Messungen wurden 2014 auf die satellitengestützte Positionierung mittels RTK-GNSS umgestellt. Die alljährlichen Auswerteergebnisse können online eingesehen werden (KAUFMANN 2026).

(4) Terrestrisch-photogrammetrisches Aufnahmen: In Ergänzung zu den punktuellen geodätischen Messungen wurde 1997 ein terrestrisch-photogrammetrisches Messnetz, bestehend aus mehreren im Gelände (Gegenhang, Steig auf den Hornkopf) gut erkennbaren, mit Farbe und Bolzen markierten Punkten, eingerichtet. Ein für dieses Monitoring wichtiges Referenz-Stereomodell wurde jedoch bereits 1988 von R. Kostka und V. Kaufmann aufgenommen. Im Laufe der Zeit (1997-2015) kamen unterschiedliche analoge und digitale Kameras zum Einsatz (KAUFMANN & LADSTÄDTER 2008a, KAUFMANN & SEIER 2016).

(5) Terrestrisches Laserscanning: Als weitere leistungsfähige terrestrische Fernerkundungsmethode kam 2000 das terrestrische Laserscanning zum Einsatz. KELLERER-PIRKLBAUER et al. (2005) haben erstmals einen terrestrischen Laserscanner eingesetzt, um den zentralen Teil des Gössnitzkeeses in Form einer dichten Punktfolge einzuscannen. Aus dem Vergleich der Zeitreihenaufnahmen konnten Eisdickenänderung und morphologische Prozesse dokumentiert werden.

(6) Luftbildauswertung (Flugzeug & unmanned aerial vehicle/UAV): Eine erste dezidierte Gletscherkartierung für das Gössnitzkees aus Luftbildern erfolgte aus einer Luftbildbefliegung 1997 (LIEB 2000). Im Rahmen eines Forschungsprojekts hat G.K. Lieb aus Geländebefunden (Moränenstände 1850; letzte maximale Vereisung in der Kleinen Eiszeit),

vorhanden historischen Kartenwerken und zusätzlichen photogrammetrischen Luftbildauswertungen (1954, 1969, 1974, 1983 und 1992) die Gletschergeschichte des Gössnitzkeeses 1850-1997 rekonstruiert (KAUFMANN & PLÖSCH 2000). In Folgeprojekten wurden im Rahmen von zwei Bachelorarbeiten die Gletscherstände 2002, 2006, 2009 und 2012 erfasst (KAUFMANN & LADSTÄDTER 2008b, KAUFMANN & SULZER 2019). In Weiterführung der flächenhaften Gletscherkartierung wurde 2018 eine UAV-gestützte Luftbildbefliegung des zentralen Gletscherbereichs durchgeführt. Durch den Vergleich des daraus ermittelten Oberflächenmodells mit jenem von 2015 konnte die diesbezügliche Eisdickenänderung des Gletschers für den unteren Zentralteil flächendeckend erfasst werden (KAUFMANN & SULZER 2019).

4 Methodik

4.1 Luftbildauswertung

Datengrundlage

Digitale Luftbilder 2015, 2018 und 2021 wurden über das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV 2026) bezogen (Tabelle 1). Kamerakalibrierungsprotokolle und Orientierungsdaten (Elemente der Äußeren Orientierung) wurden ebenfalls vom BEV zur Verfügung gestellt.

Tabelle 1: Übersicht der Luftbilddaten für das Gössnitzkees zwischen 2015 und 2021.

Archiv-nummer	Datum	Kamera	Bild-anzahl	Bodenauf-lösung (cm)
2015130	28.8.2015	UltraCam Eagle f100	12	17-30
2018160	28.9.2018	UltraCam Eagle M3	11	11-19
2021160	24.9.2021	UltraCam Eagle Mark 2	35	10-20

Die photogrammetrische Prozessierung der in Tabelle 1 gelisteten Luftbilder erfolgte mit der Software Agisoft Metashape Professional (Version 2.0.3, AGISOFT METASHAPE 2026). Als horizontales Datum wurde die Gauß-Krüger-Abbildung MGI/ Austria GK Central (EPSG Code 31255) gewählt. Die photogrammetrische Berechnung erfolgte jedoch in einem lokalen Koordinatensystem unter Berücksichtigung der Erdkrümmungskorrektur. Die Überprüfung der Genauigkeit der Georeferenzierung der erstellten digitalen Orthophotos ergab signifikante Lageversätze, die nicht vernachlässigt werden konnten. In weiterer Folge wurde deshalb der Bildverband 2021 als Referenzdatensatz für die Georeferenzierung der beiden anderen Epochen herangezogen. Die Bildverbände 2015 und 2018 wurden in zwei separaten bi-temporalen Bündelblockausgleichungen (2018+2015, 2018+2018) photogrammetrisch in Agisoft Metashape orientiert, wobei durch Maskieren der vergletscherten Gebiete im Referenzdatensatz

die bi-temporale Verknüpfung über stabile Verknüpfungspunkte sicher gewährleistet werden konnte. Die Rückprojektionsfehler lagen bei $\pm 0,24$ pixel (2015) bzw. $\pm 0,35$ pixel (2018).

Oberflächenmodelle und Orthophotos

Ausgehend von den hochauflösten Oberflächenmodellen (vermaschte 3D-Punktwolken) wurden 2D-Höhenraster (digitale Oberflächenmodelle/DOMs) sowie dazugehörige digitale Orthophotos (DOPs) mit zueinander gleicher Auflösung von 20 cm berechnet. Für die weitere Analyse der DOMs erfolgte eine Aggregierung der Rasterweite auf 1 Meter.

Gletscherflächen

Die epochenweise Erfassung der Gletscherränder erfolgte primär über die Uferlinie (Null-Isolinie) von bi-temporalen Oberflächendifferenzmodellen. Im Falle eines Gletscherrückgangs beschreibt die Null-Isolinie den Gletscherrand der älteren Epoche. Bei einem etwaigen Gletschervorstoß (Zunahme der Eisdicke) ergäbe sich der Gletscherrand der jüngeren Epoche. Bei gleichbleibender Geländehöhe (somit stationäres Verhalten des Gletschers an diesem Bereich) versagt jedoch die beschriebene Methode und es kann nicht auf die Veränderung der Gletscherausdehnung zurückgeschlossen werden. In diesem Fall kann der Gletscherrand entweder aus einem zeitlich vorherigen Stand übernommen oder interaktiv (2D/3D) aufgrund der vorhandenen Phototextur (DOP) und den überlagerten bi- bzw. multitemporalen Höhenschichtlinien konkordant mit den schon vorhandenen Gletscherrändern bestmöglich abgeschätzt werden. Inhärentes Rauschen der ermittelten Höhendifferenzen wurde durch einen 3x3-Gauß-Filter reduziert. Eine Kurvenglättung des so ermittelten Gletscherrandes wurde durch Anwendung des Douglas-Peucker-Algorithmus erzielt. Für die klärende Abgrenzung der Gletscherflächen kann auch auf die Oberflächenbewegung (Kap. 4.1.5) zurückgegriffen werden. Die in einer Vorstudie ermittelte Gletscherfläche für 2012 musste dem dargestellten Konzept folgend klarerweise mit Hilfe einer jüngeren Epoche wie z.B. 2018 nachgeführt werden.

Flächen- und Volumenänderung

Gletscherflächen und DOMs bilden einen multitemporalen Geodatenbestand, der nach verschiedenen Gesichtspunkten analysiert werden kann. Die Eisdickenänderung ergibt sich über die boolesche Schnittmenge/Intersection der Gletscherflächen, die Volumenänderung über die diesbezügliche Vereinigung/Union.

Fließgeschwindigkeit

Die horizontale Fließgeschwindigkeit für den Beobachtungszeitraum 2015-2018-2021 wurde mit einer Matlab-Routine flächendeckend durch Bildkorrelation der multitemporalen DOPs ermittelt (KAUFMANN et al. 2021). Die Berechnung der 2D bzw. 3D Bewegungsvektoren erfolgte in einem 5 m x 5 m Raster mit einem 31 pixel x 31 pixel (6,2 m x 6,2 m) großen Korrelationsfenster. Subpixel-Genauigkeit in den beiden Koordinatenrichtungen wurde durch Interpolation einer Parabel an der Stelle des Korrelationsmaximums erzielt. Die Ausreißerdetektion erfolgte mit Filtern (Back-Matching, Glattheit der 2D-Verschiebungsvektoren in Richtung und Betrag, Singularität, Konsistenz der Bewegungsrichtung mit der aus dem DOM berechneten Falllinie). Die Genauigkeiten der ermittelten Fließgeschwindigkeiten errechneten sich mit $\pm 2,2$ cm/Jahr (1σ -Schranke) für 2015-2018 bzw. jeweils $\pm 1,8$ cm/Jahr für die Zeiträume 2018-2021 und 2015-2021 (vgl. Abb. 5). Keine Bewegungsinformation konnte in Bereichen mit Alt- bzw. Neuschnee, entlang der Schlagschattenränder, in Zonen größerer Massenumlagerung sowie in Bereichen von Bewegungsinhomogenitäten (bewegt/stabil) gewonnen werden.

4.2 Geodätische Messungen

Eisdickenänderung

Die Eisdickenänderung im unteren Zentralbereich des Gössnitzkeeses wurde einerseits entlang eines Längsprofils und andererseits an 10 markierten Messpunkten (S0-S9) aus den alljährlichen geodätischen Messungen seit 1996 ermittelt. Die Lage der Profillinie und der Messpunkte ist der Abb. 4 zu entnehmen. Über die Jahre sind mehrere der 10 Messpunkte eisfrei geworden (siehe Kapitel 5.2).

Fließgeschwindigkeit

Auf Basis der jährlichen geodätischen Messungen an den 2025 noch relevanten Messpunkten entlang des Profils lässt sich auch die Fließgeschwindigkeitsveränderung im Zeitraum 1996 bis 2025 gut quantifizieren. Da die Messpunkte relativ gleichmäßig über die vertikale Erstreckung des Gletschers verteilt sind, beschreibt dies gleichzeitig auch sehr gut die Veränderung der Kinematik, im Sinne von abnehmender Gletscherfließbewegung und Inaktivierung.

4.3 Klimamonitoring

Im September 2006 wurde in mehreren Gebirgsregionen Mittel- und Ostösterreichs ein Netzwerk zur kontinuierlichen Überwachung der Bodenoberflächen- und bodennahen Temperatur mittels Miniaturtemperaturdatenlogger (MTD) eingerichtet und in weiterer Folge erweitert (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2025). Für die gegenständliche Arbeit wurden die Bodentemperaturdaten von zwei dieser Standorte verwendet. Ein Standort befindet sich im oberen Bereich eines Blockgletschers im 2,5 km entfernten Hinterem Langtalkar auf einer Höhe von 2693 m (HLC-UP-N). Ein zweiter Standort liegt direkt im Gletschervorfeld des Gössnitzkeeses auf 2598 m (GOE-PR), wobei dort in zwei Tiefen die Bodentemperatur automatisch gemessen wird (0, 30 cm). Die verwendeten MTDs sind Datenlogger der Firma

GeoPrecision mit PT1000-Temperatursensoren und stündlicher Temperaturmessung. Des Weiteren wurden in dieser Studie Lufttemperaturdaten der automatischen Wetterstation im Hinteren Langtalkar (HLC-AWS; 2655 m) verwendet (vgl. KELLERER-PIRKLBAUER & KAUFMANN 2012, 2018). Für jeden der genannten Standorte wurden die Jahresmitteltemperatur für die Messperioden 1.8. bis 31.7. des Folgejahres berechnet (Boden- und Lufttemperatur).

5 Ergebnisse

5.1 Gletscherveränderung auf Basis von Luftbildanalysen

In der Karte der Vergletscherung 1850-2021 (Abb. 3) ist der Gletscherrückgang und der damit einhergehende, gegenwärtige Zerfall des Gössnitzkeeses in mehrere Teilbereiche gut zu erkennen. Ein fünfter, zukünftiger Teilbereich entwickelt sich am unteren Gletscherende, in jenem Bereich, wo die geodätischen Messungen momentan noch stattfinden. Dieser Gletscherteil wird wahrscheinlich als Toteisbereich noch einige Jahre existent sein, da aufgrund der Höhe und der Permafrost-affinen Bedingungen, das Abschmelzen des schuttbedeckten Untergrundeises verlangsamt wird.

Tabelle 2 listet die geometrisch-glaziologischen Kenngrößen des Gössnitzkeeses, die aus der gegenständlichen Luftbildauswertung 2015-2021 abgeleitet wurden. Für Vergleichszwecke ist der glaziologische Hochstand von 1850 („Kleine Eiszeit“) angeführt. Der Gletscherstand von 2012 (KAUFMANN & SULZER 2019) wurde nachgeführt.

Abbildung 4 zeigt eine graphische Darstellung der mittleren jährlichen Eisdickenänderung des Gössnitzkeeses für den Zeitraum 2015-2021. Zu beachten sind die teilweise recht hohen Werte von mehr als -2 m/Jahr für die unteren Gletscherteile in den Bereichen von Gössnitzkees West (Bereich ①) und Ost (Bereich ②).

Die maximalen Bewegungsraten für den Zeitraum 2015-2021 betragen 115 cm/Jahr für den westlichen (Bereich ①) bzw. 118 cm/Jahr für den östlichen Teil (Bereich ②) des Gössnitzkeeses. Für den Zeitraum 2015-2018 ergab sich ein absolutes Bewegungsmaximum von 156 cm/Jahr für den westlichen Teil. Vergleiche dazu die Abbildung 5.

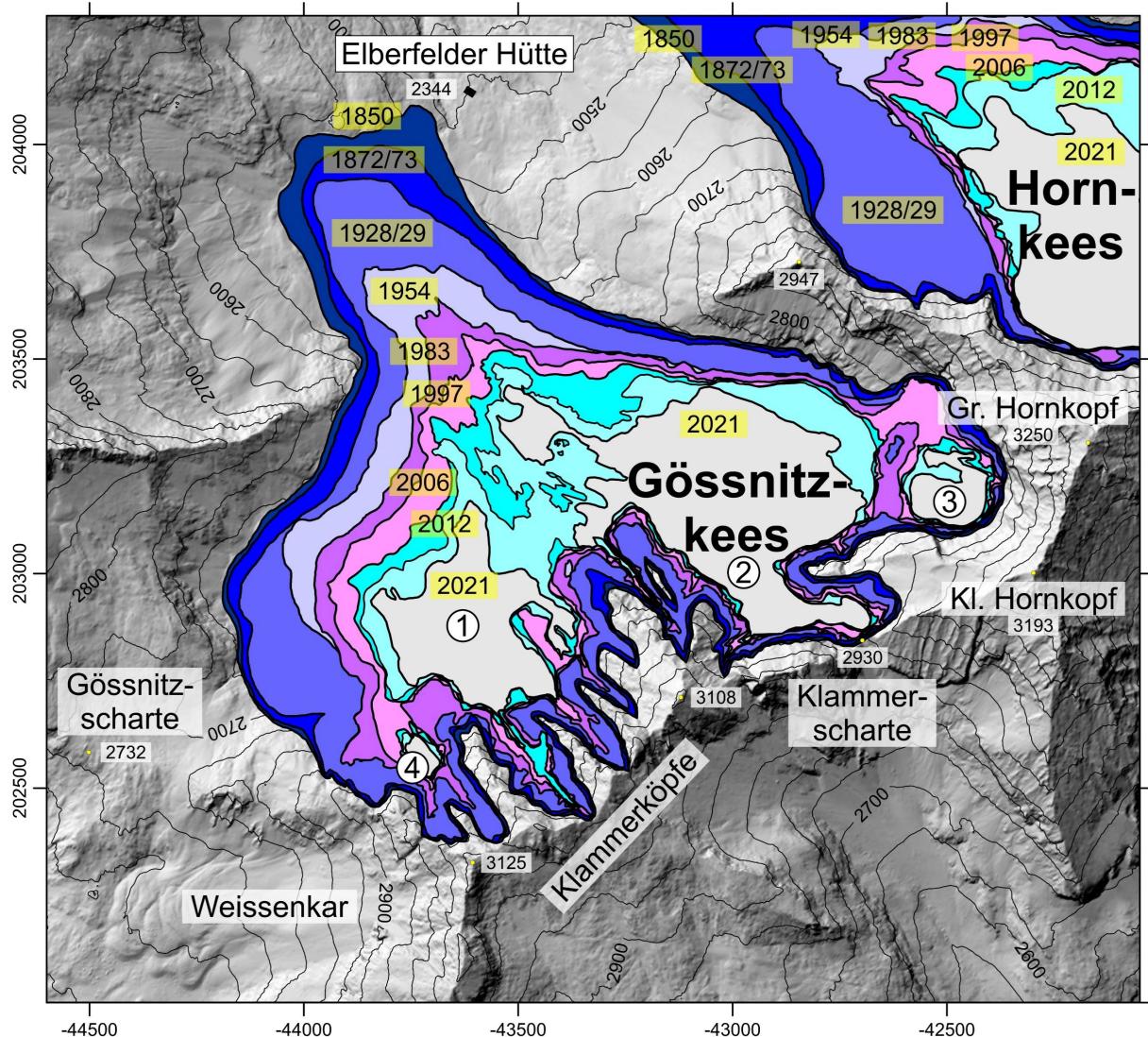


Abb. 3: Karte des Gössnitzkeeses für die verschiedenen Stände zwischen 1850 (letzter Hochstand in der sogenannten „Kleinen Eiszeit“, erkennbar im Gelände an markanten Seiten- und Endmoränen) und 2021. Geländerelief: ALS-Daten, 2012, <https://kagis.ktn.gv.at/>.

Tabelle 2: Flächen, Flächen- und Volumenänderung sowie Eisdickenänderung für ausgewählte Jahre seit 1850.

Jahr	Fläche (km ²)	Flächenänderung (%) bzgl. 1850	Volumenänderung (m ³) zur Vorepoche	Mittlere Eisdickenänderung (cm/Jahr) zur Vorepoche
1850	1,555			
2012	0,529	-66,0	-89,046 10 ⁶	-50
2015	0,471	-69,7	-0,768 10 ⁶	-52
2018	0,399	-74,3	-1,414 10 ⁶	-105
2021	0,364	-76,6	-0,465 10 ⁶	-40

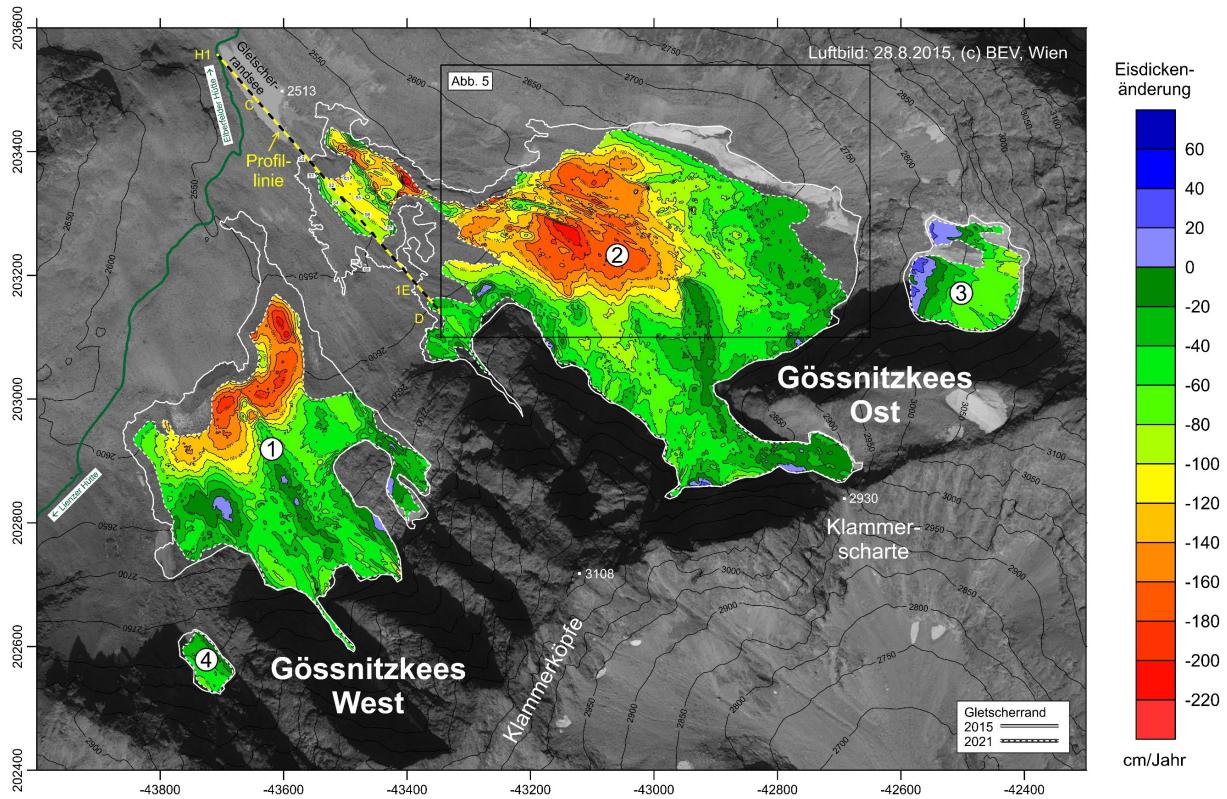


Abb. 4: Eisdickenänderung am Gössnitzkees zwischen 2015 und 2021. Bereits 2015 bestand der Gletscher aus mehreren Teilen (① bis ④).

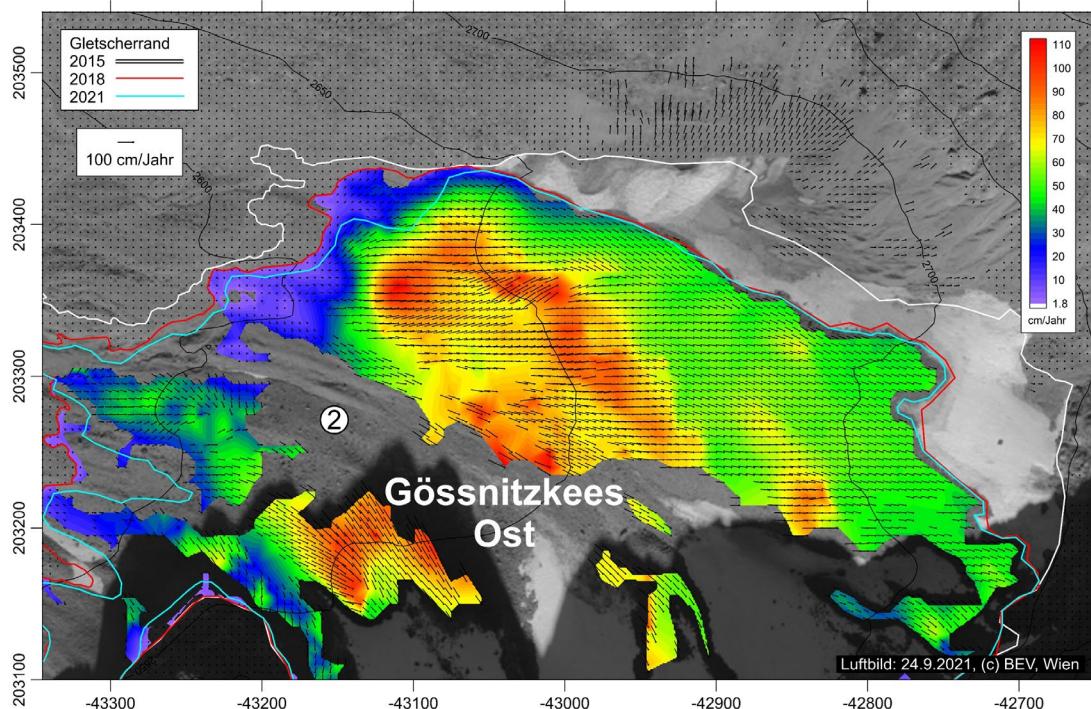


Abb. 5: Karte der Fließbewegung 2018-2021 im östlichen Teil des Gössnitzkeeses. Die maximale Fließgeschwindigkeit betrug in diesem Bereich 118 cm/Jahr.

5.2 Gletscherveränderung auf Basis von geodätischen Messungen

Die Eisdickenänderung des Gössnitzkeeses entlang des geodätisch gemessenen Längsprofils ist in Abb. 6 dargestellt.

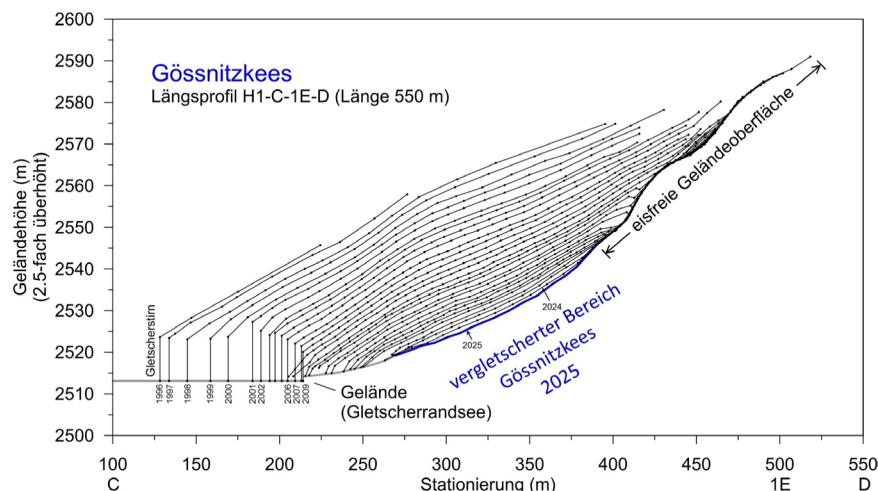


Abb. 6: Eisdickenänderung 1996-2025 am Gössnitzkees entlang der Profillinie. Vergleiche mit Abbildung 4.

Aufgrund der anhaltenden Gletscherschmelze waren im Sommer 2025 von den ursprünglich 10 Messpunkten nur mehr 4 (S4-S7) nutzbar – die übrigen befinden sich schon auf eisfreiem Terrain – sowohl oberhalb als auch unterhalb der heute noch existierenden Eismasse (vgl. Abb. 4). Die Erkenntnisse aus der Luftbildanalyse werden durch die geodätischen Messungen – zumindest für den unteren zentralen Gletscherbereich – bestätigt. Die Eisdickenänderung betrug bis in die 2010er Jahre zumeist mehr als -1,5 m/Jahr und liegt aktuell in diesem Bereich nur mehr bei etwa -1 m/Jahr (Abb. 7 und 8). Aufgrund der kontinuierlichen Verringerung der Eismächtigkeit ergibt sich dort auch eine damit einhergehende Verringerung der Fließgeschwindigkeit (Abb. 9). Die aktuelle Bewegungsrate beträgt 30 cm/Jahr im Mittel. Auffallend in allen drei hier gezeigten Abbildungen 7 bis 9 sind neben dem Trend auch die starken Schwankungen von Jahr zu Jahr, der Trend ist erst durch die lange Datenreihe erkennbar.

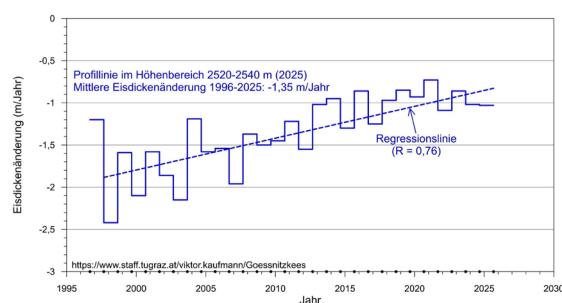


Abb. 7: Eisdickenänderung Gössnitzkees 1996-2025 in der Profillinie.

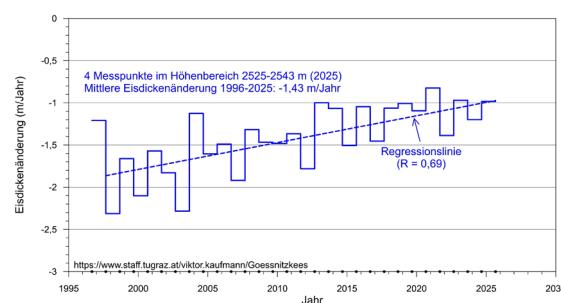


Abb. 8: Eisdickenänderung Gössnitzkees 1996-2025 an 4 markierten Punkten.

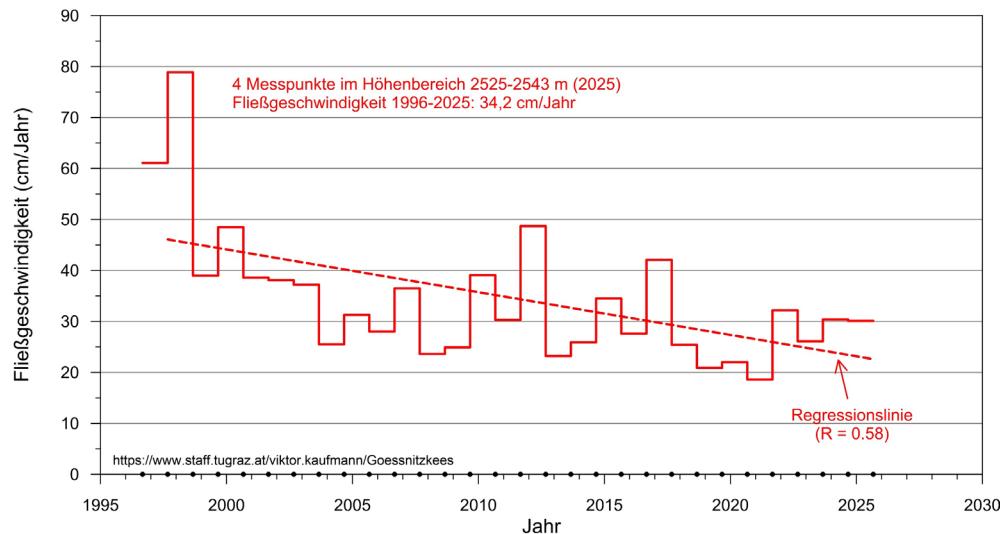


Abb. 9: Fließgeschwindigkeit Gössnitzkees 1996-2025 an 4 markierten Punkten.

5.3 Klimatische Veränderungen im Untersuchungszeitraum

Abbildung 10 zeigt die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur an den drei Standorten im Zeitraum 2007-2025 (für HLC-UP-N und HLC-AWS) bzw. 2015-2025 (GOE-PR). Deutlich ist der Erwärmungstrend in allen Datenreihen zu erkennen, wobei am Standort GOE-PR bedingt durch die kürzere Datenreihe dieser Trend ausgeprägt ist. Der Erwärmungstrend liegt bei den Bodentemperatursensoren HLC-UP-N sowie GOE-PR-0cm bei $0,05$ bis $0,07^\circ\text{C}/\text{Jahr}$, jener der Lufttemperatur sogar bei über $0,1^\circ\text{C}/\text{Jahr}$. Die Trends sind für die Langzeittaten von HLC-UP-N (Bodentemperatur) und HLC-AWS (Lufttemperatur) auch statistisch signifikant. Ähnliche signifikante Trends lassen sich auch an anderen Messtandorten im Ostalpenraum erkennen (KELLERER-PIRKLBAUER & LIEB 2023, KELLERER-PIRKLBAUER 2026)

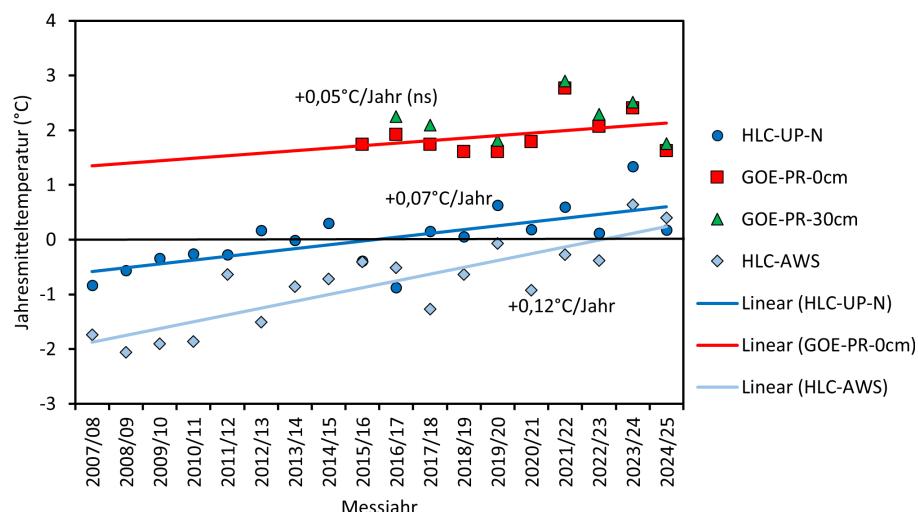


Abb. 10: Entwicklung der mittleren jährlichen Luft- und Bodentemperatur im Bereich des Gössnitzkeeses zwischen 2007 und 2025 (Messjahre hier: 1.8. bis 31.7. des Folgejahres).

6 Diskussion

6.1 Kombination von Luftbild- mit geodätischen Daten

Durch die zunehmende Schuttbedeckung verbessert sich aus photogrammetrischer Sicht die Oberflächenrekonstruktion wesentlich. Vorhandene Schnee- bzw. Blankeisflächen zeigen oftmals Korrelationsmängel – die Oberfläche kann nicht 3D rekonstruiert werden. Moderne digitale Luftbildkameras können diesem Phänomen durch hohe radiometrische Auflösung schon gut entgegenwirken. Die Ableitung der Gletscherränder durch Differenzbildung von zeitunterschiedlichen DOMs funktioniert nur dann gut, wenn die Eisdickenänderung signifikant von Null verschieden ist. Bei einer negativen Eisdickenänderung zwischen zwei Datensätzen, wovon momentan auszugehen ist, kann nur der ältere der beiden Gletscherstände rekonstruiert werden. Für die (gesicherte) Ermittlung der aktuellen Gletscherausdehnung ist eine weitere, jüngere Vergleichsepoke notwendig. Der in diesem Aufsatz beschriebene halbautomatische Prozess der Findung der Gletscherränder könnte durch den Einsatz von KI-Methoden theoretisch vollkommen automatisiert werden, wobei eine Plausibilitätsprüfung des Ergebnisses trotzdem natürlich durchgeführt werden sollte. Die geodätischen Messungen liefern aufgrund der geringen Punktdichte entlang eines Profils nur beschränkte Informationen in Hinblick auf den Gletscherzustand. Die Messungen haben jedoch eine höhere temporale Auflösung, ergänzen die Ergebnisse aus der Fernerkundung und können überdies zur Überprüfung derselben herangezogen werden. Aufgrund der geringen Größe des Gössnitzkeeses deckt das geodätische Profil im Wesentlichen auch den gesamten Gletscher in seiner Vertikalerstreckung ab. Die Eisdickenänderung nahm kontinuierlich seit den 1990er Jahren ab (Abb. 7 und 8), schwächte sich aber im Laufe der Zeit ab, bedingt durch den zunehmenden Abschmelzschatz der supraglazialen Schuttdecke.

6.2 Kombination von geometrischen Gletscherveränderungen mit Klimadaten

Wie in den Abbildungen 7 bis 9 gezeigt wurde, nahm die Gletscherdynamik markant seit den 1990er Jahr ab. Gleichzeitig nahm auch die Eismächtigkeit dramatisch ab. Kumuliert man die mittleren Höhenabnahme der vier verbliebenen Messpunkte für den Zeitraum 1996 bis 2025, so ergibt sich ein mittlerer Höhenverlust der Profillinie von -41,1 m. Der Vergleich der kumulativen Eisdickenänderung mit der Fließgeschwindigkeit (Abb. 11 links) zeigt, dass mit zunehmenden Eisverlust auch die Kinematik in Form der Fließgeschwindigkeit deutlich abnahm, was glaziologisch zu erwarten ist. Vergleicht man die mittlere Jahreslufttemperatur an der nahe gelegenen meteorologischen Station im Hinteren Langtalkar mit der Fließgeschwindigkeit (Abb. 11 Mitte) und der Eisdickenänderung pro Jahr (Abb. 11 rechts), so fällt auf, dass die Temperatur weder für die Fließgeschwindigkeit noch für die Eisdickenänderung der wichtigste Faktor zu sein scheint. Diese Grafiken zeigen des Weiteren, dass sich offensichtlich aufgrund der zunehmenden Schuttbedeckung und nicht aufgrund der tieferen Lufttemperaturen der Eisverlust über die Zeit abgeschwächt hat. Die Fließgeschwindigkeit war im Zeitraum 1996-2025 unabhängig von der Lufttemperatur und primär durch die Eismächtigkeit bestimmt. Somit zeigen unsere Daten, dass die zunehmende supraglaziale Schuttbedeckung (Fläche und Mächtigkeit) am Gössnitzkees sich positiv für die Resteiserhaltung auswirkt und den Eisverlust reduziert, ein Phänomen, das auch am

nahegelegenen Pasterzenkees bereits beobachtet wurde (KELLERER-PIRKLBAUER 2008, KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2008). Somit entkoppeln sich schuttbedeckte Gletscher immer mehr von den aktuellen klimatischen Bedingungen. Im Falle von hochgelegenen Gebieten, wie des Gössnitzkeeses, sind umliegende Fels- und Schuttbereiche auch von Permafrost beeinflusst, wobei diese Beeinflussung im Gletschervorfeld des Gössnitzkeeses selbst nur marginal ist und schuttbedecktes Eis dadurch zwar nicht langfristig erhalten, aber zumindest mittelfristig verlangsamt abschmelzen können. Permafrostneubildung ist in den entgletscherten Bereichen theoretisch möglich, auf Basis der aktuellen rasanten Erwärmungstendenzen (vgl. KELLERER-PIRKLBAUER & LIEB 2023) aber stark erschwert. Auch die positiven Jahresmitteltemperaturen vom Standort GOE-PR (vgl. Abb. 10) belegen, dass eine Permafrostneubildung im Gletschervorfeld des Gössnitzkeeses aktuell unwahrscheinlich ist. Extrapoliert man die Entgletscherung des Gössnitzkeeses – übertragen auf die gesamte Schobergruppe sowie dem österreichischen Alpenraum – in die Zukunft, so kann davon ausgegangen werden, dass oberflächlich sichtbares Eis in der Schobergruppe bald Geschichte sein wird, sich aber strahlungsgeschützte Gletscherreste in den Hochlagen der Ostalpen noch einige Jahrzehnte halten werden. Ob man dann aber noch von eigentlichen „Gletschern“ sprechen kann, ist jedoch eine andere Frage, da Gletscher per Definition am Ende des Gletscherhaushaltjahres (in den Alpen Ende September) noch großflächig vom Altschnee des Vorwinters bedeckt sein sollten. Bei Gletscher, die im klimatischen Gleichgewicht sind, sollte dieser Altschneeanteil 2/3 des gesamten Gletschers umfassen, ein Wert der schon lange nicht mehr erreicht wird, wie auch die jährlichen Gletscherberichte des ÖAV (vgl. LIEB & KELLERER-PIRKLBAUER 2025) belegen.

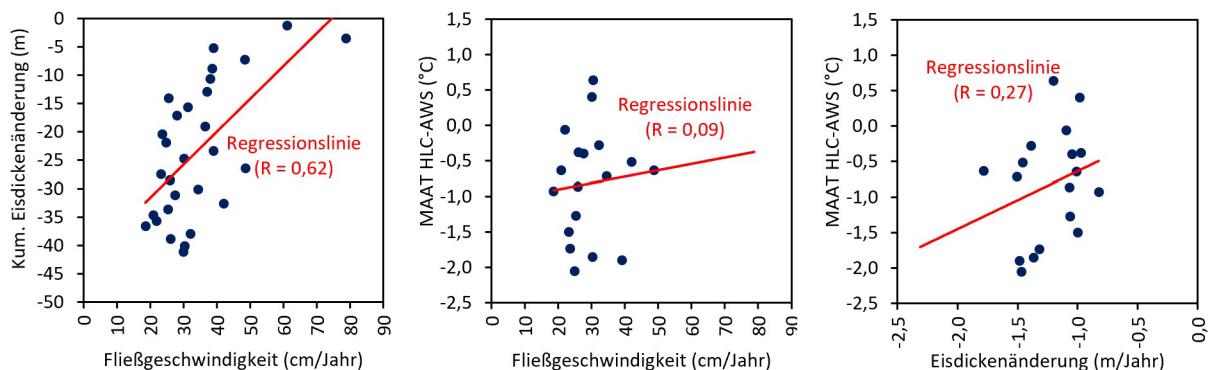


Abb. 11: Gegenüberstellungen verschiedener glaziologischer und meteorologischer Parameter und ihre Korrelationen. Eisdicken- und Bewegungsdaten des Gössnitzkeeses für 1996-2025, mittlere Jahrestemperaturen (MAAT=mean annual air temperature der Luft im Hinteren Langtalar HLC-AWS) für 2007-2025.

7 Fazit

Das Gössnitzkees zeigt exemplarisch, wie stark sich schuttbedeckte Gletscher unter anhaltender klimatischer Erwärmung verändern: Flächenverlust, Zerfall in Teilkörper und deutliche Abnahme der Eismächtigkeit seit den 1990er Jahren, begleitet von stark sinkenden Fließgeschwindigkeiten. Die Kombination von Orthophotos und Oberflächenmodellen mit jährlichen geodätischen Messungen liefert ein belastbares, sich ergänzendes Bild: Fernerkundung erfasst flächenhafte Veränderungen und Geschwindigkeitsfelder, Geodäsie

erhöht die zeitliche Auflösung und validiert Trends lokal. Klimatisch belegen die Boden- und Lufttemperaturreihen einen signifikanten Erwärmungstrend. Dennoch schwächtet sich der spezifische Eisverlust zuletzt ab – vor allem durch eine anwachsende supraglaziale Schuttdecke, die das Eis thermisch immer besser schützt. Damit entkoppeln sich schuttbedeckte Gletscher zu einem gewissen Grad von kurzfristigen Lufttemperaturschwankungen; die Kinematik wird primär durch Eismächtigkeit und Schuttbedeckung bestimmt. Permafrost kann in den Hochlagen der Schobergruppe kryologische Prozesse modifizieren, eine Neubildung im Vorfeld des Gössnitzkeeses ist derzeit jedoch unwahrscheinlich unter Berücksichtigung der Boden- und Lufttemperaturdaten. Regional ist in den Ostalpen mit dem baldigen Verschwinden frei sichtbaren Eises zu rechnen; strahlungsgeschützte, schuttbedeckte Reste könnten jedoch noch Jahrzehnte bestehen bleiben.

Danksagung

Die Gletscherstände 2002, 2006, 2009, 2012, 2015, 2018 und 2021 wurden im Rahmen von Bakkalaureatsarbeiten vom Th. Moder (2008), Th. Klinghan (2016) und Th. Pichler (2025) am Institut für Geodäsie der TU Graz erfasst. Dem Nationalpark Hohe Tauern Kärnten sowie dem ÖAV-Patenschaftsfonds Nationalpark Hohen Tauern werden für die langjährige Unterstützung des Permafrostmonitoringprogramms herzlich gedankt.

Literatur

- AGISOFT METASHAPE 2026: <https://www.agisoftmetashape.com/> (letzter Zugriff 10.01.2026)
- BEV 2026: <https://www.bev.gv.at/> (letzter Zugriff 10.01.2026)
- BUCKEL, J. & OTTO, J.-CH. (2018): The Austrian Glacier Inventory GI 4 (2015) in ArcGis (shapefile) format [dataset]. PANGEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.887415>
- FISCHER, A., SEISER, B., STOCKER WALDHUBER, M., MITTERER, C. & ABERMANN, J. (2015): Tracing glacier changes in Austria from the Little Ice Age to the present using lidar-based high-resolution glacier inventory in Austria. *The Cryosphere*, 9, 753–766.
- FISCHER, A., PATZELT, G., ACHRANNER, M., GROSS, G., LIEB, G.K., KELLERER-PIRKLBAUER, A. & BENDLER, G. (2018): Gletscher im Wandel. 125 Jahre Gletschermessdienst des Alpenvereins. Springer Spektrum, 139 S.
- GLETSCHERMONITOR (2026): Gößnitzkees, Schobergruppe.
<https://www.alpenverein.at/gletschermonitor/gletscher/Gossnitz-K/> (letzter Zugriff 10.01.2026)
- KAUFMANN, V. (2026): Goessnitzkees (Carinthia, Austria).
<https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann/Goessnitzkees.html> (letzter Zugriff 10.01.2026)
- KAUFMANN, V. & PLÖSCH, R. (2000): Mapping and visualization of the retreat of two cirque glaciers in the Austrian Hohe Tauern National Park. *IAPRS*, Vol. XXXIII, Part B4, Amsterdam, 446-453.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R. (2008a): Application of Terrestrial Photogrammetry for Glacier Monitoring in Alpine Environments. *IAPRS*, Vol. 37, Part B8, Beijing, 813-818.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R. (2008b): Documentation of the Retreat of Gössnitzkees and Hornkees glaciers (Hohe Tauern Range, Austria) for the Time Period 1997-2006 by Means of Aerial

- Photogrammetry. *Proceedings of the 6th ICA Mountain Cartography Workshop*, 11-15 February 2008, Lenk, Switzerland, 115-123.
- KAUFMANN, V. & SEIER, G. (2016): Long-term monitoring of glacier change at Gössnitzkees (Austria) using terrestrial photogrammetry. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Vol. XLI-B8, 495-502.
- KAUFMANN, V. & SULZER, W. (2019): Dokumentation des Gletscherrückgangs am Gössnitzkees für den Zeitraum 1982-2018 – eine Gletschergeschichte mit Ablaufdatum. In: KERSTEN, T.P. (Hrsg.): 39. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF e.V., 20.-22. Februar 2019, Universität für Bodenkultur, Wien, Publikationen der DGPF, Band 28, 572-586.
- KAUFMANN, V., KELLERER-PIRKLBAUER, A. & SEIER, G. (2021): Conventional and UAV-Based Aerial Surveys for Long-Term Monitoring (1954-2020) of a Highly Active Rock Glacier in Austria. *Frontiers in Remote Sensing*, 2:732744.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., BAUER, A. & PROSKE, H. (2005): Terrestrial laser scanning for glacier monitoring: Glaciation changes of the Gößnitzkees glacier (Schober group, Austria) between 2000 and 2004. Conference Volume. 3rd Symposium of the Hohe Tauern National Park for Research in Protected Areas, 15-17 Sep. 2005, Kaprun, Austria, 91-95.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2008): The Supraglacial Debris System at the Pasterze Glacier, Austria: Spatial Distribution, Characteristics and Transport of Debris. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplementary Issues Volume 52, Supplementary Issue 1, 3-25.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2026): Ground temperature monitoring during the period 2004–2024 indicates permafrost degradation in the Austrian Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 37(1), 37-59. <https://doi.org/10.1002/ppp.70014>
- 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. & KAUFMANN, V. (2018): Deglaciation and its impact on permafrost and rock glacier evolution: New insight from two adjacent cirques in Austria. *Science of The Total Environment*, 621, 1397-1414. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.087>
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. & LIEB, G.K. (2023): Die klimagesteuerte Entwicklung von Gletschern und Permafrost seit der Mitte des 19. Jahrhunderts in den österreichischen Alpen. *Jb. nass. Ver. Naturkd*, 144, 7-35.
- 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*, A 90(4), 269-285.
- KELLERER-PIRKLBAUER A., LIEB G.K., KAUFMANN V., AVIAN M., FRIESENBICHLER M. (2025): Permafrost-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern Kärnten 2022-2024. Endbericht, 65 S. <https://www.data.gv.at/datasets/710de779-a873-5916-980d-36533422ce55?locale=de>
- KUHN, M., LAMBRECHT, A., ABERMANN, J., PATZELT, G. & GROSS, G. (2008): Projektbericht 10. Die österreichischen Gletscher 1998 und 1969, Flächen- und Volumenänderungen. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, 125 S.
- LAMBRECHT, A. & KUHN, M. (2007): Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory. *Annals of Glaciology*, 46, 177-184.

LIEB, G.K. (1987): Die Gletscher und Blockgletscher im Kärntner Teil der Schobergruppe und ihre Entwicklung seit dem Spätglazial. Unveröffentlichte Dissertation, Naturwissenschaftliche Fakultät der Karl-Franzens-Universität Graz, 286 S. mit Fotoanhang und Tafeln.

LIEB, G.K. (2000): Die Flächenänderung von Gößnitz- und Hornkees (Schobergruppe, Hohe Tauern) von 1850 bis 1997. In: ASCHENBRENNER, J. & SUIDA, H. (Hrsg.): 1960-2000. 40 Jahre glaziologische Forschung. Festschrift für Heinz Slupetzky zum 60. Geburtstag. Institut für Geographie und angewandte Geoinformatik, Universität Salzburg, 83-96.

LIEB, G.K. & KELLERER-PIRKLBAUER (2025): Gletscherbericht 2023/24. Sammelbericht über die Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins im Jahr 2024. *Bergauf*, 1, 13-25. https://www.alpenverein.at/bk/bergauf/bergauf2025/Bergauf_1_2025/html5/index.html?&locale=DEU