
HINTEREIS- und KESSELWANDFERNER MASSENHAUSHALTSSTUDIEN

Abschlussbericht über das Haushaltsjahr 2022/23
- inklusive der Auswertungen der Niederschlagsmessung im Rofental



Aufgrund der warmen Witterung blieb der Hintereisferner bis lange in den Oktober hinein schneefrei und nahe dem Stand seiner maximalen Ausaperung von Ende September. Quelle: foto-webcam.eu, 13.10.2023, Hintereisferner1 (Im Hinteren Eis)

HINTEREIS- und KESSELWANDFERNER MASSENHAUSHALTSSTUDIEN

Abschlussbericht über das Haushaltsjahr 2022/23

Innsbruck, im November 2023

im Auftrag von:
Land Tirol, Abteilung Wasserwirtschaft, Sachgebiet Hydrographie und Hydrologie
Herrengasse 1–3
A-6020 Innsbruck/Austria

Zusätzliche finanzielle Mittel wurden durch das Rektorat sowie durch das Institut für Atmosphären- und Kryosphärenwissenschaften der Universität Innsbruck erbracht.

Projektleitung: Mag. Rainer Prinz, PhD
Koordination der Feldarbeiten, Auswertungen und Bericht: Mag. Rainer Prinz, PhD

Kontakt: Institut für Atmosphären- und Kryosphärenwissenschaften der Universität Innsbruck
Innrain 52f, 6020 Innsbruck
E-mail: rainer.prinz@uibk.ac.at
Tel.: (+43) 0512 507 54415
Fax.: (+43) 0512 507 54599

Das Institut für Atmosphären- und Kryosphärenwissenschaften der Universität Innsbruck erhebt seit 1952 den Massenhaushalt des Hintereis- und seit 1965 den Massenhaushalt des Kesselwandfeners unter Anwendung der direkten glaziologischen Methode.

Der vorliegende Bericht ist eine Zusammenfassung der Arbeiten und Ergebnisse aus dem hydrologischen Haushaltsjahr 2022/23.

Inhaltsverzeichnis

A.	Zusammenfassung.....	A-1
B.	Einleitung.....	B-1
B.1	Lage des Untersuchungsgebietes.....	B-1
B.2	Methodik	B-1
B.3	Gletscherflächen und Messnetz	B-4
C.	Analysen und Ergebnisse.....	C-1
C.1	Witterung im Haushaltsjahr	C-1
C.2	Massenbilanz Hintereisferner	C-4
C.2.1	Winterbilanz	C-4
C.2.2	Jahresbilanz	C-6
C.2.3	Geodätische Massenbilanz	C-8
C.3	Massenbilanz Kesselwandferner	C-12
C.4	Niederschlagsmessungen im Rofental	C-17
C.4.1	Erkenntnisse aus jüngsten Arbeiten.....	C-17
C.4.2	Vergleich der Niederschlagsmessungen im Rofental.....	C-18
C.5	Literaturverzeichnis.....	C-21
C.6	Verzeichnis verwendeter Akronyme und Symbole	C-22
D.	Anhang.....	D-1
D.1	Geleistete Arbeiten	D-1
D.1.1	Feldkampagnen	D-1
D.1.2	Messungen und Analysen.....	D-1
D.2	Dokumentation der Feldarbeiten am Hintereisferner und am Kesselwandferner	D-2
D.2.1	Feldkampagne 04.05.2023: Hintereisferner Winterbilanz.....	D-2
D.2.2	Feldkampagne 08.+09.07.2023 Feldkurs.....	D-5
D.2.3	Feldkampagne 15.08. – 10.09.2023: Massenbilanzkampagnen während HEFEX II	D-7
D.2.4	Feldkampagne 05+06.09.2023	D-8
D.2.5	Feldkampagne 27.09.2023 Abschlussbegehung HEF	D-9
D.3	Dokumentation sonstiger Feldarbeiten in Vent und im Rofental	D-11
D.3.1	Feldkampagne 26.12.2022: Im Hinteren Eis.....	D-11
D.3.2	Reparatur Stromversorgung im Hinteren Eis 24.08.2023	D-12

D.3.3	Reparatur Stromversorgung im Hinteren Eis 13.10.2023	D-13
-------	--	------

A. ZUSAMMENFASSUNG

Am **Hintereisferner** brachte das Haushaltsjahr 2022/23 mit **-2189 mm w.e.**¹ (Tabelle 1) die dritt negativste Massenbilanz seit Beginn der Aufzeichnungen 1953. Die Winterbilanz mit 1017 mm w.e. liegt ca. 17% unter dem Durchschnitt der Dekade 2011-2020. Aufgrund der intensiven Ablation blieben keine Massenrücklagen erhalten. Die ELA ist somit unbestimmt und liegt oberhalb des höchsten Punktes des Gletschers. Den Verlauf des Massenbilanzjahres prägte ein sehr trockener Winter (DJF) mit gering mächtiger Schneedecke und ein leicht zu feuchtes Frühjahr (MAM), das das Niederschlagsdefizit jedoch nicht mehr kompensieren konnte. Die Monate Juni bis September waren durchgehend zu warm, letzterer sogar der wärmste der Aufzeichnungen. Sommerliche Neuschneefälle bleiben unergiebig. Die Winterschneedecke konnte großteils bis Ende Juli geschmolzen werden, sodass der Hintereisferner bis Mitte August fast zur Gänze vom Winterschnee befreit war und die Firn- und Eisablation den restlichen Sommer wirken konnte. Ähnlich wie im Rekordjahr 2022, jedoch weniger intensiv, führte der schneearme Winter in Kombination mit dem zu warmen Sommer schließlich zu einer negativen Massenbilanz und zu einem Verlust von 2.9% des Gletschervolumens oder 11.3 Mio m³ Wasser.

Die jährliche und kumulative Entwicklung der Massenbilanzreihe ist jeweils in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt.

Tabelle 1: Kennzahlen des Bilanzjahres 2022/23 für den Hintereisferner².

	Winter			Sommer		gesamtes Jahr	
	Fläche	B _w	b _w	B _s	b _s	B	b
	[10 ³ m ²]	[m ³ w.e.]	[kg/m ²]	[m ³ w.e.]	[kg/m ²]	[m ³ w.e.]	[kg/m ²]
	5171	5258249	1017	-16578876	-3206	-11320627	-2189
S _C [10 ³ m ²]	0		B _C [m ³ w.e.]	0		b _C [kg/m ²]	0
S _A [10 ³ m ²]	5171		B _A [m ³ w.e.]	-11320627		b _A [kg/m ²]	-2189
ELA	NaN	m a.s.l.	S _C /S _A	0.000		AAR	0.000

¹ Eine Liste der Akronyme und Symbole findet sich in Kapitel C.7.

² Die Werte für HEF und KWF werden den internationalen Gepflogenheiten entsprechend an das World Glacier Monitoring Service (WGMS) berichtet und damit der wissenschaftlichen Gemeinschaft zugänglich gemacht. Basis- und Zwischenwerte werden bei Anfrage und für wissenschaftliche Verwendung von ACINN zur Verfügung gestellt.

Für den **Kesselwandferner** brachte das Haushaltsjahr 2022/23 mit **-1472 mm w.e.** die viert negativste Massenbilanz seit Beginn der Aufzeichnungen (Abbildung 1 und Tabelle 2). Die ELA ist wie am Hintereisferner unbestimmt und liegt oberhalb des höchsten Punktes des Gletschers.

Tabelle 2: Kennzahlen des Bilanzjahres 2022/23 für den Kesselwandferner

		gesamtes Jahr					
	Fläche [10 ³ m ²]	B [m ³ w.e.]	b [mm w.e.]				
	3374	-4967398	-1472				
S _C [10 ³ m ²]	0			B _C [m ³ w.e.]	0	b _C [mm w.e.]	0
S _A [10 ³ m ²]	3374			B _A [m ³ w.e.]	-4967398	b _A [mm w.e.]	-1472
ELA	NaN	m.a.s.l.		S _C /S _A	0.000	AAR	0.000

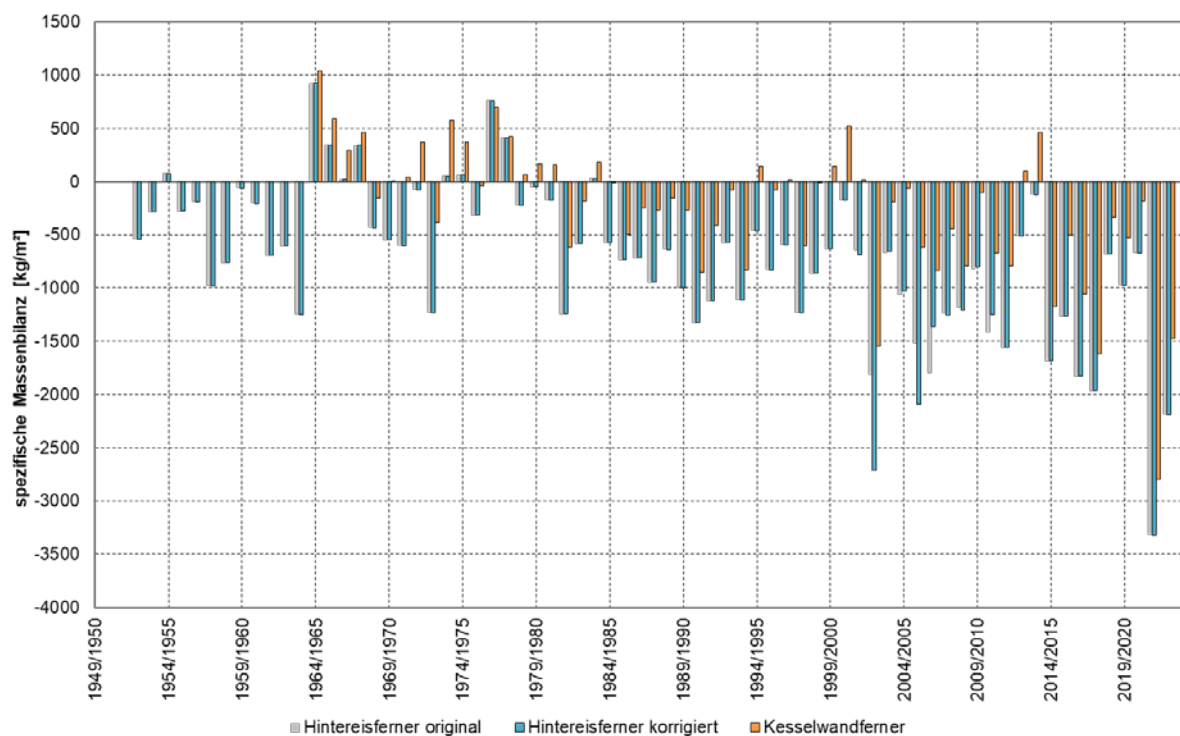


Abbildung 1: Die Massenbilanzreihen des Hintereis- und Kesselwandfern timers (Quelle: ACINN). Die Bilanzjahre 2001 – 2011 wurden für den HEF nach Klug et al. (2018) korrigiert.

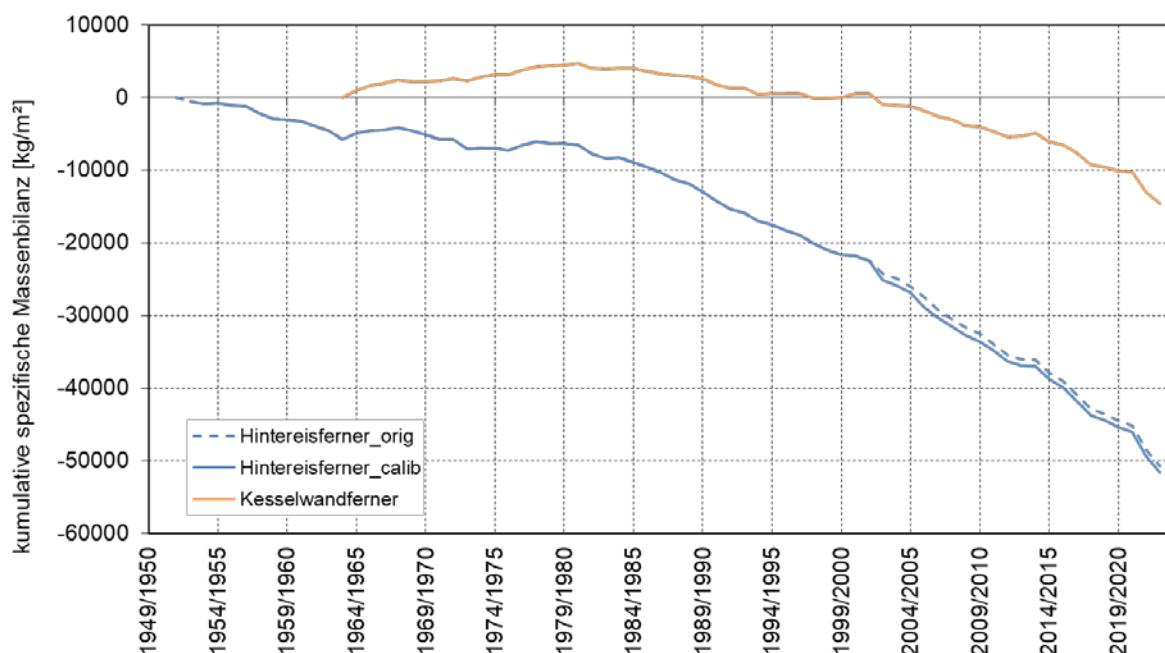


Abbildung 2: Die kumulativen Massenbilanzreihen des Hintereis- und Kesselwandferners (Quelle: ACINN). Die Massenbilanz am HEF wurde 2001-2011 nach Klug et al. (2018) korrigiert.

Abbildung 3 zeigt eine generalisierte Extremwertverteilung der Massenbilanzwerte von Hintereis- und Kesselwandferner. Hervorgehoben sind die letzten drei Bilanzjahre.

Besonderheiten

Von 15.08.-10.09.2023 fand das zweite Hintereisfernerexperiment (HEFEX II) statt. 24 Wissenschaftler aus acht Forschungsstätten aus sechs europäischen Staaten veranstalteten eine Kampagne zur Messung von meteorologischen Prozessen in der gletschernahen Atmosphäre. HEFEX II ist ein Teilprojekt des ERC Consolidator Grant UNICORN³ und TEAMx⁴. Im Rahmen des von Horizon2020 geförderten Austauschprojektes INTERACT⁵ konnten wir je eine Gruppe von Wissenschaftlern aus der Schweiz und Lettland zu glazial-meteorologischen Untersuchungen auf den Hintereisferner einladen.

³<https://www.uibk.ac.at/en/acinn/research/atmospheric-turbulence/projects/developing-a-novel-framework-for-understanding-near-surface-turbulence/>

⁴<http://www.teamx-programme.org/>

⁵<https://eu-interact.org/>

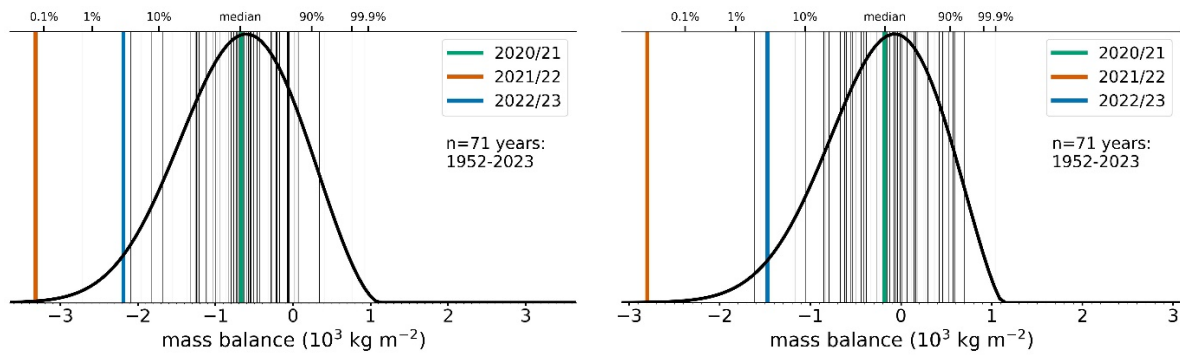


Abbildung 3: Statistische Verteilung der Massenbilanzjahre am Hintereis- (links) und Kesselwandferner (rechts). Jede Säule steht für ein Massenbilanzjahr mit dem entsprechenden Bilanzwert (untere Achse) und ihrer Position in einer generalisierten Extremwertverteilung (obere Achse) (Voordendag et al., 2023).

B. EINLEITUNG

B.1 Lage des Untersuchungsgebietes

Der Hintereisferner (HEF) und der Kesselwandferner (KWF) liegen im Rofental (Abbildung 4), einem Seitental des Ötztals und entwässern über die Rofenache in die Venter Ache, in weiterer Folge in die Ötztaler Ache und den Inn.

Der HEF erstreckt sich in ca. 5,6 km Länge von der Weißkugel (3739 m) in nord-östliche Richtung ins Rofental und endet auf etwa 2550 m (2020). Entlang des orographisch rechten Zungenbereiches erstreckt sich ein schuttbedeckter Toteiskörper, der traditionell nicht zur Fläche des Massenbilanzgletschers gezählt wird. Dieser schuttbedeckte Bereich nimmt stetig an Fläche zu, einerseits durch das Absinken der schuttfreien Gletscherzunge durch die starke Ablation, andererseits aufgrund des zunehmenden Schutteintrages aus dem darüber liegenden, zunehmend übersteilten, nicht konsolidierten Material der Ufermoräne. Zu der Ausdehnung des HEF werden die im unteren Teil nicht mehr mit der Hauptzunge des HEF verbundenen Gletscherteile des Stationsferners (SF) und des Langtaufererjochferners (LJF) gezählt.

Der KWF liegt nordöstlich des HEF. Den höchsten Punkt seines Einzugsgebiets bildet der Fluchtkogel (3497 m). Im Unterschied zum HEF besitzt der KWF ein ausladendes, südost-exponiertes und hohes Firnbecken und eine kurze Zunge, die bereits am Rand der Felsstufe des flachen Firnbeckens sitzt. Er grenzt mit einer Eisscheide an den westlich angeschlossenen Gepatschferner.

Der HEF und der KWF sind Gegenstand jahrzehntelanger glaziologischer Forschung am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck. Ihre seit 1952/53 (HEF) und seit 1965/66 (KWF) aufgezeichneten Massenbilanzreihen zählen zu den längsten weltweit (Abbildung 1 und Abbildung 2).

B.2 Methodik

Zur Bestimmung der Massenbilanz wird die direkte glaziologische Methode mit fixem Datum (Cogley et al., 2011; Hoinkes, 1970) angewandt. Die Massenbilanz eines Gletschers wird dabei anhand von Messungen der Höhenänderung der Gletscheroberfläche an ausgewählten Punkten der Gletscheroberfläche ermittelt. Diese Messungen erfolgen im Ablationsgebiet an Pegelstangen, welche in das Gletschereis gebohrt sind, und im Akkumulationsgebiet in Schneeschächten (zur Messung der Schneedichte), die durch räumlich verteilte Schneehöhensondierungen ergänzt werden. Der Zeitraum der Messung umfasst ein hydrologisches Haushaltsjahr (mittlerer Breiten der Nordhemisphäre), jeweils vom 01.10. bis zum 30.09. des Folgejahres. Das natürliche Massenhaushaltsjahr ist als die Zeitspanne von einem Massenminimum des Gletschers zum nächsten im darauffolgenden Spätsommer/Herbst definiert und kann vom hydrologischen Haushaltsjahr mehr oder weniger stark abweichen. Aufgrund der Höhenerstreckung des Gletschers und der damit verbundenen unterschiedlich langen Ablationsperioden ist die Definition des Zeitpunktes des Massenminimums des

Gesamtgletschers schwierig und unscharf. Daher wird nur bei starken Abweichungen und operationeller Möglichkeit die natürliche Massenbilanz zusätzlich zu jener im hydrologischen Haushaltsjahr ermittelt. Beim Aufsummieren der Massenänderungen über mehrere Jahre verschwinden eventuelle Unterschiede zwischen natürlichem und hydrologischem Haushaltsjahr.

Um eine höhere zeitliche Auflösung v.a. des Ablationsverlaufes zu erhalten, aber auch zur laufenden Zustandskontrolle der Messpegel, werden diese während des Sommers mehrmals, in jedem Fall aber bei der Abschlussbegehung nahe dem 30.09 abgelesen. Zusätzlich wird am Ende der Akkumulationsperiode (01.10.-30.04.) die Winterbilanz mittels Schneehöhen- und Schneedichtemessungen ermittelt (nur am HEF). Die Werte werden jeweils in Höhe Wasseräquivalent (mm w.e.) oder, bei identischen Zahlenwerten, als Masse pro Einheitsfläche (kg m^{-2}) angegeben.

Die Analyse der Linien gleicher Bilanzwerte erfolgt händisch, meist in einer Äquidistanz von 250 mm w.e. (zumindest jedoch 500 mm w.e.) und gestützt auf die gemessenen Punktwerte und Informationen zur Ausdehnung von Altschneerücklagen aus der Fotodokumentation und mithilfe von Satellitenbildern gegen Ende der Ablationsperiode. Diese Linien werden digitalisiert und in einem Geoinformationssystem mit der Gletscherfläche, aufgeteilt in Höhenstufen mit 50 m Äquidistanz, verschnitten und ausgewertet.

Die mittlere flächenspezifische Bilanz ***b*** ergibt sich aus dem Quotienten der Gesamtmassenänderung ***B*** und der Gesamtfläche ***S***. Die Gesamtfläche wird in Flächen mit Netto-Akkumulation ***S_C*** und Flächen mit Netto-Ablation ***S_A*** unterteilt. Die Bilanzen dieser Teilflächen lauten ***B_C*** und ***B_A*** mit den entsprechenden mittleren spezifischen Bilanzen ***b_C*** und ***b_A***. Die Accumulation Area Ratio (***AAR***) bezeichnet das Verhältnis ***S_C*** zu ***S***.

$$\begin{aligned} S &= S_C + S_A & [\text{m}^2] & & b_C &= B_C / S_C & [\text{mm w.e.} \equiv \text{kg m}^{-2}] \\ B &= B_C + B_A & [\text{m}^3 \text{ w.e.} \equiv 10^3 \text{ kg}] & & b_A &= B_A / S_A & [\text{mm w.e.} \equiv \text{kg m}^{-2}] \\ b &= B / S & [\text{mm w.e.} \equiv \text{kg m}^{-2}] & & AAR &= S_C / S \end{aligned}$$

Aus den Schneeschächten zu Ende des Winters (30.04.) und den Sondierungen der Schneehöhe wird die Winterbilanz (***B_w***, ***b_w***) und in Folge Sommerbilanz (***B_s***, ***b_s***) als Differenz zwischen Jahres- und Winterbilanz berechnet.

$$b_s = b - b_w \quad [\text{mm w.e.} \equiv \text{kg m}^{-2}] \quad B_s = b_s \cdot S \quad [\text{m}^3 \text{ w.e.} \equiv 10^3 \text{ kg}]$$

Nach Höhenstufen aufgetragene Bilanzwerte (***b_z***) führen zum vertikalen Bilanzprofil (VBP). Die Höhe der Gleichgewichtslinie (ELA) definiert sich als niedrigster Schnittpunkt des VBP mit der Linie ***b*** = 0.

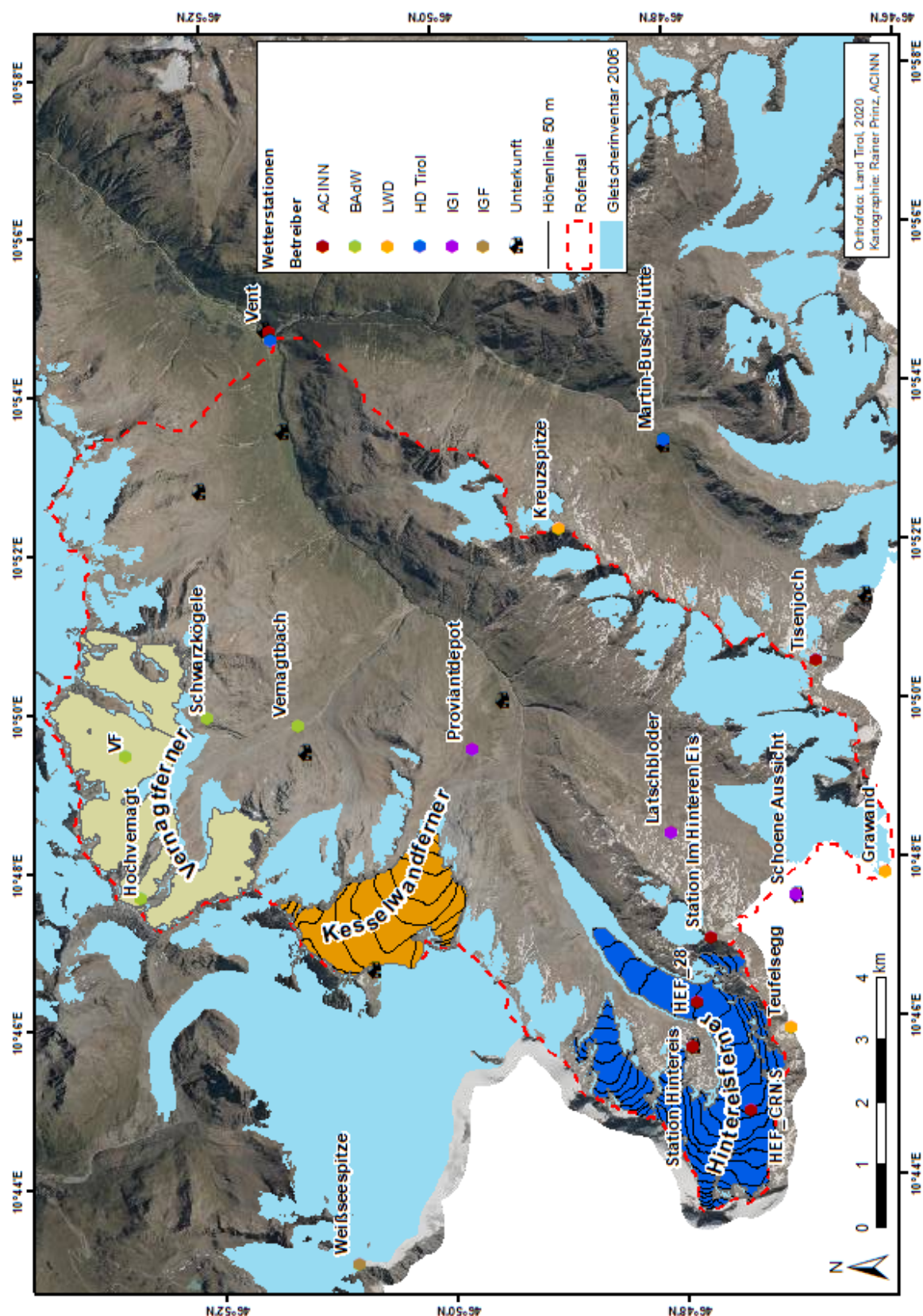


Abbildung 4: Übersichtskarte des Rofentals mit der Lage der Gletscher und automatischen Wetterstationen. Der Laserscanner befindet sich bei der Station Im Hinteren Eis.

Im September 2016 wurde im Hinteren Eis ein permanenter Laserscanner und im Laufe des Sommers 2017 eine automatische Wetterstation (Station Im Hinteren Eis, Abbildung 4) installiert. Zeitnahe Aufnahmen der Gletscheroberfläche zu den Messungen der glaziologischen Massenbilanz erlauben einen Vergleich der direkt gemessenen (glaziologischen) Massenbilanz mit der Höhenänderung aus der Differenz der beiden Laserscans (geodätische Bilanz) für die Winter- als auch die Jahresbilanz.

B.3 Gletscherflächen und Messnetz

Für das Haushaltsjahr 2022/23 wurden Gletschergrenzen und Hypsometrie auf Basis zweier Stereo-Satellitenbildszenen (16.08. und 21.08.2022) neu erhoben. Die Szenen werden vom Pléiades Glacier Observatory⁶ für alle weltweiten Referenzgletscher alle fünf Jahre frei zur Verfügung gestellt.

Hauptmerkmale der neuen Kartierung:

- Der kleine Bereich des HEF nahe Im Hinteren Eis ist durch eine Wolke abgeschattet. Hier wurde die Hypsometrie von 2018 verwendet, der Eisrand von einer Sentinel-2 Szene vom 16.08.2022 übernommen.
- Der Bereich am Südhang der Langtaufferer Spitze ist nun vom Hintereisferner getrennt und wird durch starke Fragmentierung weiter schnell Zerfallen.
- Die Bereiche des Hintereisferners entlang der Nordseite des Rofenberges wurden als gletscherfrei kartiert, obwohl aufgrund von Schuttbedeckung und Permafrost hier noch Eis (jedoch wohl kaum mehr Gletschereis) vorhanden ist. Die Entscheidung soll Konsistenz zum schuttbedeckten Teil nahe der Gletscherzunge bieten, der traditionell auch nicht zur Gletscherfläche gezählt wird. Der Flächenverlust seit der letzten Kartierung erfährt somit einen kleinen Sprung und ist nicht vollständig linear.

Die Gletscherfläche des HEF 2022 beträgt 5.171 km², jene des KWF 3.374 km².

Das Messnetz am HEF umfasst Schneeschächte und Ablationspegel. Die Schneeschächte werden zur Bestimmung der Winterbilanz und der Massenrücklage am Ende des Haushaltsjahres an mehr oder weniger denselben Stellen gegraben. Die Anzahl der Schächte hängt von der Schneelage und der herrschenden Witterung ab. Die Ablation wird an den Ablationspegeln gemessen, die an repräsentativen Standorten eine flächenhafte Interpolation der Massenänderung erlauben. Aufgrund der starken Ablation der letzten beiden Jahre schmelzen die Ablationspegel schneller aus als man sie nachbohren kann. Das Pegelnetz wurde um wenige Standorte verringert, um mit den Veränderungen Schritt zu halten. Aufgrund der starken Spaltenbildung konnten im Sommer 2022 einige Pegel nicht mehr aufgesucht werden bzw. liegen die obersten Pegel zum Teil (noch) unter altem Firn begraben. Schneehöhen und Schneedichten der Massenrücklagen bzw. Herbstakkumulation wurden bei den Abschlussbegehungen ermittelt: HEF (27.09.2023), KWF (06.09.2023).

⁶ <https://www.legos.omp.eu/pgs/>

Die Ausaperung am HEF wird durch die Bilder der im Mai 2018 installierten automatischen Kameras (<https://www.foto-webcam.eu/webcam/hintereisferner1/> und <https://www.foto-webcam.eu/webcam/hintereisferner2/>) dokumentiert. Leider nahm die Stromleitung zur Versorgung des Standortes Im Hinteren Eis am 24.12.2022 nachhaltigen Schaden, der nur kurzfristig im August und Oktober 2023 repariert werden konnte. Weitere Arbeiten müssen auf den kommenden Sommer verlegt werden. Trotz der Störungen in der Stromversorgung konnte zumindest der Maximalstand der Ausaperung am 13.10.2023 angenähert werden. Sentinel-2 Szenen vom 19.08. und 10.09.2023 sowie Bilder von Feldarbeiten waren bei der Dokumentation der Ausaperung hilfreich.

Zusätzlich betreibt das ACINN sieben automatische Wetterstationen im Rofental zur Messung glazio-meteorologisch bedeutender Parameter (Tabelle 3 und Abbildung 4). Fehlwerte können mit Wetterstationen anderer Partner im Rofental abgeglichen werden (Abbildung 4). Die Station Hintereis (3026 m) des ACINN dient als Unterkunft während der Feldkampagnen (Abbildung 4).

Tabelle 3: Überblick über die gemessenen Parameter der automatischen Wetterstationen des ACINN im Rofental.

	Vent	Station Hintereis	HEF_28 ¹	HEF_CRNS	Im Hinteren Eis ²	Tisenjoch
Lufttemperatur	+	+	-	+	+	+
Feuchte	+	+	-	+	+	+
Windgeschwindigkeit	+	+	-	+	+	+
Windrichtung	+	+	-	+	+	+
Strahlung (4 Komponenten)	-	+	-	+	+	+
Luftdruck	+	+	-	+	+	+
Schneehöhe	+	+	+	+	+	+
Bodentemperatur	-	+	-	+	-	-
Niederschlag	+	+	-	-	+	-
3D Anemometer	-	-	-	-	+	-
Schneedrift	-	+ ²	-	+	+ ²	-
Schneewasseräquivalent	-	-	-	+	-	-
¹ nur während der Ablationsperiode; nur Ablationsmessung						
² 2023 defekt bzw. kein Strom, keine Daten						

Das Messnetz am KWF wurde im Haushaltsjahr 2013/14 vom ACINN komplett neu aufgesetzt und seitdem nur marginal verändert. Dabei wurden die Ablationspegel in der Nähe der bestehenden Pegel zur Bewegungsmessung gebohrt, zusätzlich aber auch über die Gletscherfläche verteilt. Im Haushaltsjahr 2014/15 wurde das Pegelnetz weiter ausgebaut und die Anzahl der Ablationspegel am KWF auf 19 erhöht und in den Jahren 2019-2022 auf 14 Pegel reduziert. Zwei Pegelpositionen (K1, K2) nahe der Gletscherzunge haben sich durch den Gletscherrückgang erübrigt, weitere Positionen (K3, K7, K13, K8, K14) waren nicht repräsentativ. Zwei Positionen (SS1, SS2) wurden zur zusätzlichen Messung der Akkumulation (sofern vorhanden) festgelegt. Zur Bestimmung der Massenbilanz im Haushaltsjahr 2022/23 wurden neun Pegel abgelesen und ein Schneeschacht zur Bestimmung der Rücklagen angelegt.

C. ANALYSEN UND ERGEBNISSE

C.1 Witterung im Haushaltsjahr

Auf den Massenhaushalt eines Alpengletschers haben drei meteorologische Faktoren besonderen Einfluss (Hoinkes and Steinacker, 1975):

1. Der feste Niederschlag sorgt im Winterhalbjahr für den Großteil der Akkumulation,
2. die Temperatur der Umgebungsluft steht während der Sommermonate für das Wärmeangebot,
3. die Anzahl und Menge der Neuschneefälle während des Sommers kann Schmelzvorgänge maßgeblich unterbrechen und zur Nettoakkumulation beitragen.

Durch automatische Aufzeichnungen an der Wetterstation in Vent und in situ Beobachtungen während der Feldkampagnen können diese Faktoren quantifiziert werden.

- Die Winterniederschläge Oktober-April 2022/23 in Vent lagen 17% unter dem Mittel der Klimanormalperiode 1981-2010 (Tabelle 4 und Abbildung 5). Lediglich der April (+24%) war zu feucht. Oktober und März bilanzierten im langjährigen Mittel. Sonst waren alle Monate zum Teil deutlich zu trocken, besonders Jänner (-63%) und Feber (-52%).
- Die aus den Winterniederschlägen resultierende Winterbilanz liegt ca. 17% unter dem Mittel der Jahre 2011-2020. Obwohl die Winterniederschlagssumme (Okt-Apr) in Vent fast identisch zum Vorjahr ist (2022: 265 mm; 2023: 262 mm) fällt die Winterbilanz am Hintereisferner 2023 deutlich weniger unterdurchschnittlich als zum Vorjahr aus (2022: 691 mm w.e., -43%; 2023: 1017 mm w.e., -17%). Der Grund dafür liegt in der höheren Niederschlagssumme in den Frühjahrsmonaten 2023, die generell stärksten Niederschlagsgradienten mit der Höhe zeigen (Kuhn, 2012; Winter, 2022).
- Der Winter war durchwegs zu warm (+1.8°C). Lediglich Dezember (-0.5°C) und April (0.0°C) waren zu kalt oder entsprachen dem langjährigem Mittel (1981-2010).
- Im Sommerhalbjahr lagen die Niederschläge 17% über dem langjährigen Mittel. Zu feucht waren Mai (+28%) und Juli (34%). Der August (71%) brachte deutlich überdurchschnittliche Niederschläge, vor allem ein Ereignis Ende August mit bis zu 30-100 jährlichen Hochwässern im Ötztal und Oberinntal, samt Schäden an der (Straßen)Infrastruktur. Im gesamten Haushaltsjahr summierten sich die Niederschläge in Vent auf 685 mm, damit fast exakt auf den langjährigen Durchschnitt von 679 mm.
- Die Lufttemperatur übersteigt das langjährige Mittel (1981-2010) des hydrologischen Jahres um 2.1°C, wobei die positive Abweichung im Sommerhalbjahr (+2.4°C) deutlich überwiegt (Tabelle 4). Der September war der wärmste seit Beginn der Aufzeichnungen (Abbildung 6).

- Unergebigke sommerliche Neuschneefälle mit wenigen cm gab es lediglich am 05.08. und (etwas bedeutsamer) am 29.08. jedoch immer nur oberhalb von ~3000 m. Der geringe Schneebedeckungsgrad und die geringen Schneemengen konnten die Ablation nicht merklich unterbinden.
- Bereits Ende Juli war das Gletschereis unterhalb etwa 3100 m größtenteils aper. In den höheren Bereichen schmolzen nach der Winterschneedecke auch die Firnrücklagen der Jahre 2019-2021.
- Die warme Witterung bis Mitte September führte noch zu geringer Ablation bis in die höchsten Lagen der Gletscher. Ein markanter Kaltlufteinbruch samt Schneefällen beendete am 23.09. die Ablationssaison. Bis um den 20. Oktober blieb es sehr warm, sodass der Schnee von Ende September und in den untersten Lagen noch etwas Eis schmelzen konnten.

Tabelle 4: Monatsmittel der Lufttemperatur und Monatssummen des Niederschlages an der Station Vent. Das Haushaltsjahr 2022/23 im Vergleich zur Klimanormalperiode 1981-2010.

Monat	Lufttemperatur (°C)			Niederschlag (mm)			
	1981-2010	2022/23	Abweichung	1981-2010	2022/23	Abweichung (mm) (%)	
Oktober	3.7	8.2	4.5	57	57	0	1
November	-2.0	-0.6	1.4	59	47	-12	-20
Dezember	-2.9	-3.4	-0.5	43	31	-12	-28
Jänner	-5.8	-5.1	0.7	36	13	-23	-63
Februar	-5.9	-3.1	2.8	35	17	-18	-52
März	-2.7	-0.7	2.0	44	44	0	0
April	0.6	0.6	0.0	42	52	10	24
Winter	-2.4	-0.6	1.8	316	262	-54	-17
Mai	5.6	6.5	0.9	65	83	18	28
Juni	8.7	11.3	2.6	75	38	-37	-49
Juli	10.8	12.7	1.9	82	110	28	34
August	10.2	12.4	2.2	87	149	62	71
September	7.0	11.6	4.6	54	43	-11	-20
Sommer	8.5	10.9	2.4	363	423	60	17
Hydr. Jahr	2.1	4.2	2.1	679	685	6	1

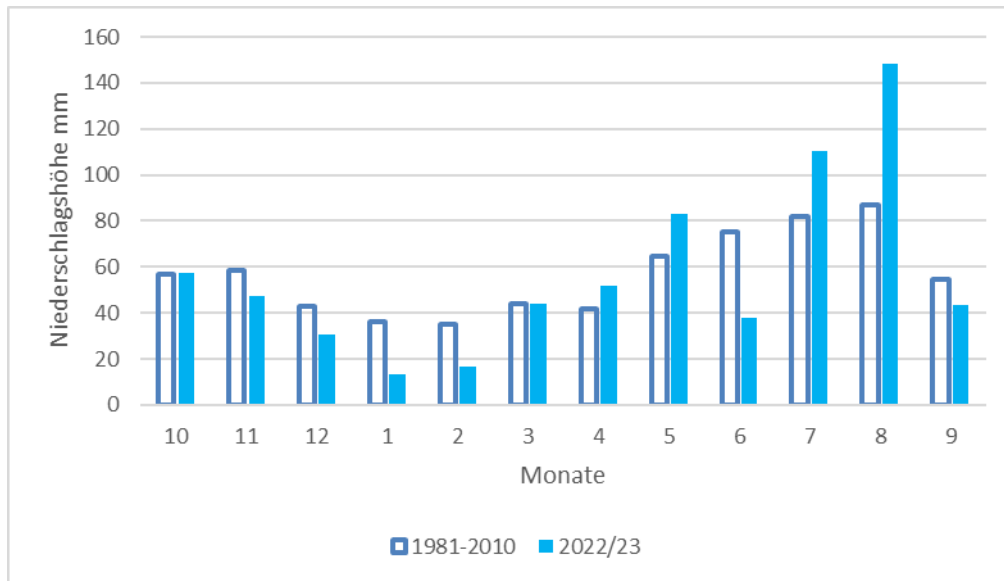


Abbildung 5: Die Monatssummen des Niederschlages an der Station Vent: Vergleich des langjährigen Mittels (1981-2010) mit dem hydrologischen Jahr 2022/23.

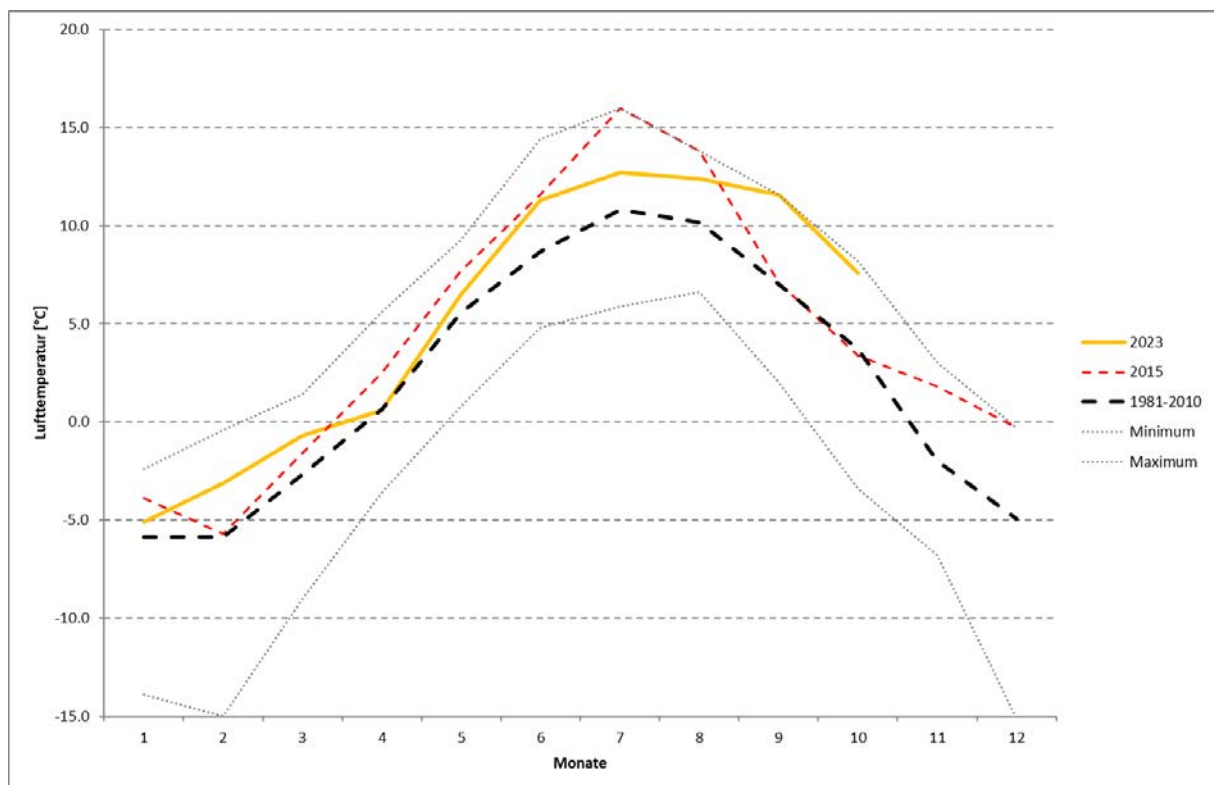


Abbildung 6: Die Monatsmittel der Lufttemperatur an der Station Vent: Vergleich des langjährigen Mittels (1981-2010) der Lufttemperatur mit den Jahren 2015 (bisheriger "Rekordsommer") und 2023. Der September 2023 war der wärmste der Aufzeichnungen.

C.2 Massenbilanz Hintereisferner

C.2.1 Winterbilanz

Die Messungen zur Erstellung der Winterbilanz 2022/23 wurden am 04.05.2023 durchgeführt. Zeitgleich fand ein Laserscanflug des Institutes für Geographie am Hintereisferner statt.

22 Schneehöhenmesspunkte und zwei Schneeschächte (Tabelle 5 und Abbildung 7) zur Dichtemessung bildeten die Basis zur Analyse der Winterbilanz. Die stratigraphische Bestimmung des letztjährigen Oberflächenhorizontes im Akkumulationsgebiet erfolgte durch den harten, gefrorenen Horizont, der sich bereits bei den Abschlussbegehungen am 22.+23.09.2022, unterhalb des Septemberschnees 2022 zeigte. Bei den Sondierungen zur Winterbilanz wurde also die Akkumulation vom September 2022 mitgemessen, bei der Berechnung der Bilanz anhand der Daten aus dem Vorjahr aber wieder abgezogen.

Die Analyse der Winterbilanz ist Abbildung 7 und Tabelle 7 dargestellt. Das vertikale Bilanzprofil der Winterbilanz ist in Abbildung 11 abgebildet. Die detaillierten Mess- und Beobachtungswerte aus den Schneeschächten sind im Kapitel D.2.1 aufgelistet. Eine geodätische Winterbilanz konnte heuer leider noch nicht erstellt werden. (Kapitel C.2.3).

Tabelle 5: HEF, Winterbilanz 2022/23: Schneehöhe, Dichte und Wasserwert der Schneeschächte für das hydrologische Winterhaushaltsjahr. Die Lage der Schneeschächte ist in Abbildung 7 eingetragen.

Name	Höhe [m.a.s.l.]	Schneehöhe [cm]	Dichte [kg/m ³]	Wasserwert 04.05.2023 [kg/m ²]	Korrektur Wasserwert [kg/m ²]	Wasserwert 30.04.2023 [kg/m ²]
TE	3030	277	384	1063	113	950
L7	2632	137	487	667	10	657

Die mittlere spezifische Winterbilanz des Hintereisferners 01.10.2022-30.04.2023 beträgt:

$$b_W = 1017 \text{ mm w.e. (= kg/m}^2\text{)},$$

$$B_W = 5,258 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ Wasser}$$

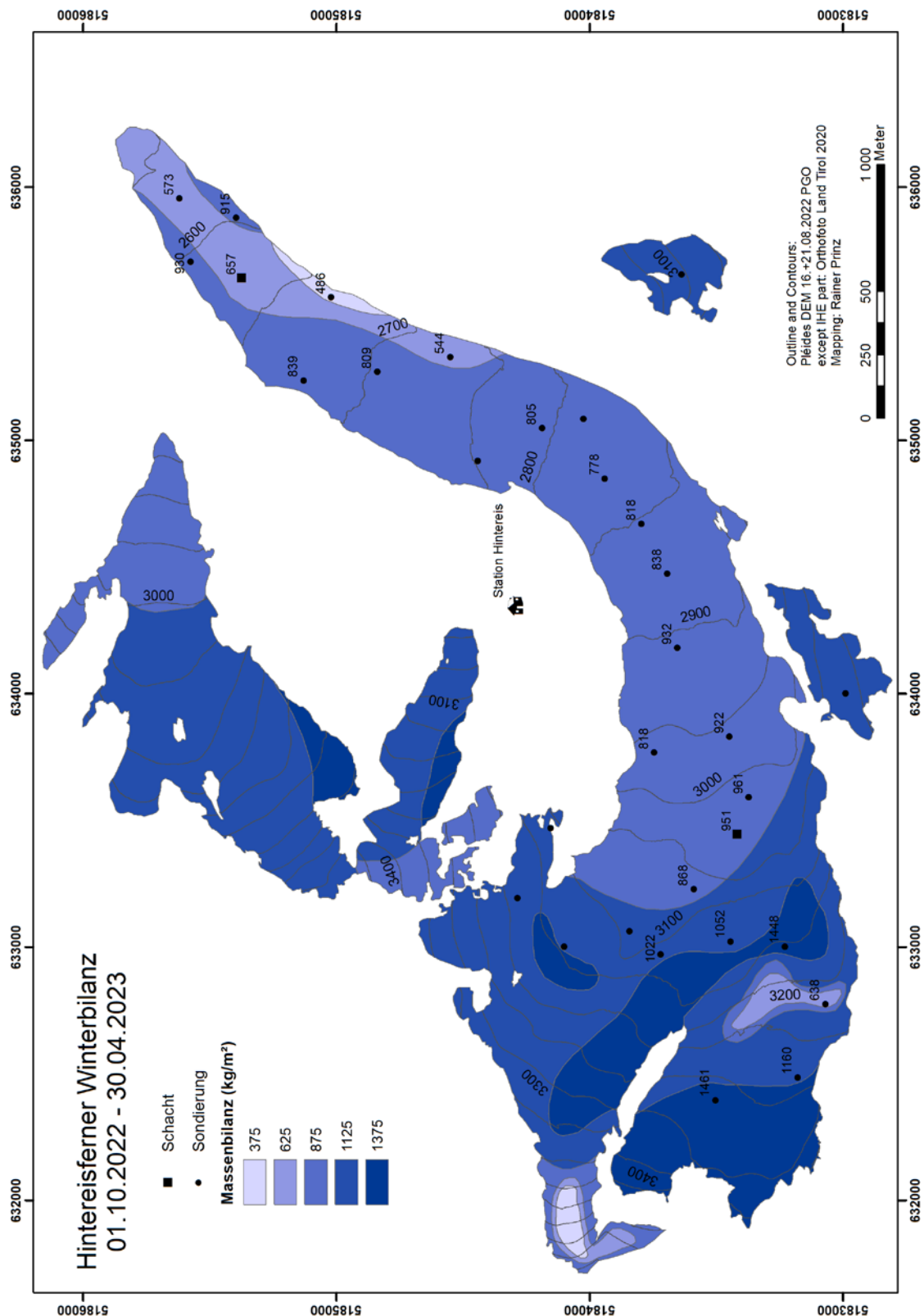


Abbildung 7: Punktwerte und räumliche Verteilung der Massenbilanz im Winterhaushaltsjahr am Hinterseeferner (01.10.2022 – 30.04.2023).

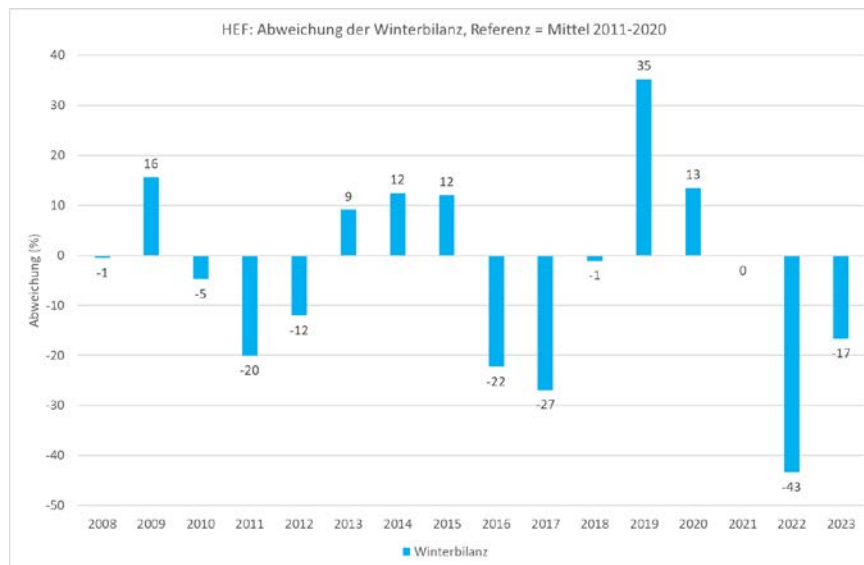


Abbildung 8: Abweichung der Winterbilanz (%) im Vergleich zum Mittelwert 2011-2020.

C.2.2 Jahresbilanz

Der Bestimmung der Ablation im Haushaltsjahr 2022/23 liegen Messungen und Beobachtungen aus fünf Feldkampagnen und an 16 Pegeln und Messpunkten zugrunde (Tabelle 6). Aufgrund der starken Spaltenbildung konnten die Firnpegel nur eingeschränkt erreicht werden. Die Abschlussbegehung am HEF fand am 22.+23.09. (Pegelablesungen und Akkumulationsmessungen) statt. Die Punktwerte sind neben den vertikalen Bilanzprofilen in Abbildung 11 sowie in Abbildung 12 eingetragen. Tabelle 7 zeigt die Bilanzwerte nach Höhenstufen sowie alle weiteren Kennwerte der Massenbilanz 2021/22. Eine Validierung der Interpolation der Punktwerte auf die Fläche kann mit der geodätischen Massenbilanz aus der Höhenänderung von zwei Laserscans erstellt werden. Leider war dies heuer noch nicht möglich (Abbildung 11 Kapitel C.2.3).

Aufgrund der intensiven Ablation blieben keine Massenrücklagen erhalten. Die ELA ist somit unbestimmt und liegt oberhalb des höchsten Punktes des Gletschers. Den Verlauf des Massenbilanzjahres prägte ein trockenes Winterhalbjahr mit gering mächtiger Schneedecke. Aufgrund des warmen Frühlings konnte die Winterschneedecke außerordentlich schnell geschmolzen werden, sodass der Hintereisferner bereits Ende Juni vom Winterschnee befreit war und die Firn- und Eisablation den ganzen Sommer wirken konnte. Nennenswerte sommerliche Neuschneefälle fehlten zur Gänze. Insgesamt führte der schneearme Winter in Kombination mit dem zu warmen Sommer schließlich zu einer negativen Rekordmassenbilanz und zu einem Verlust von 2.9% des Gletschervolumens oder 11.3 Mio m³ Wasser. Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen den Hintereisferner zum Zeitpunkt der maximalen Ausaperung im Jahr 2021 und 2022.

Die mittlere spezifische Massenbilanz des Hintereisferners für das hydrologische Haushaltsjahr

01.10.2022 – 30.09.2023 beträgt: $b = -2189 \text{ mm w.e.}$ ($= \text{kg/m}^2$),

Das entspricht: $B = -11.321 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ Wasser

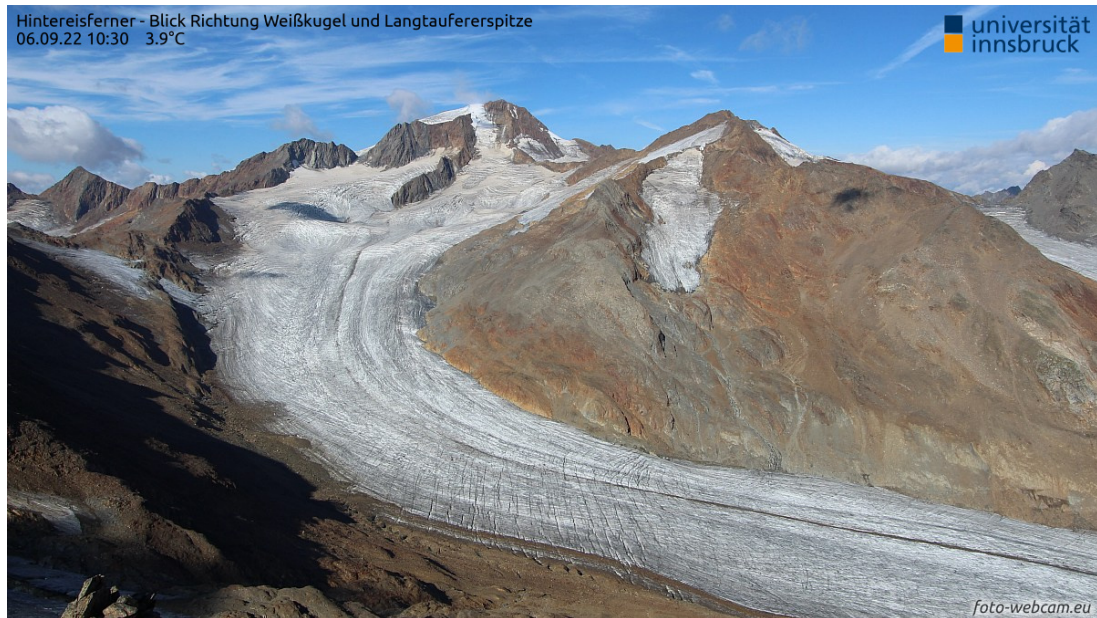


Abbildung 9: Die maximale Ausaperung des Hintereisferners am 06.09.2022.



Abbildung 10: Der Hintereisferner am 13.10.2023. Die Schneelinie ist fast ident zu jener der maximalen Ausaperung um den 20.09. Der Winterschnee ist zur Gänze abgeschmolzen. Die Firnrücklagen der Jahre 2019-2021 sind fast vollständig aufgebraucht. An den Flanken zum Teufelsegg werden die Felsinseln immer größer und zur Langtauferspitze ist der Hintereisferner fast vollständig abgeschmolzen.

Tabelle 6: Ablationsverlauf an den Pegeln des Hintereisferners 2022/23. Die Ablation zu den Ablesezeitpunkten entspricht der Periode seit der letzten Ablesung.

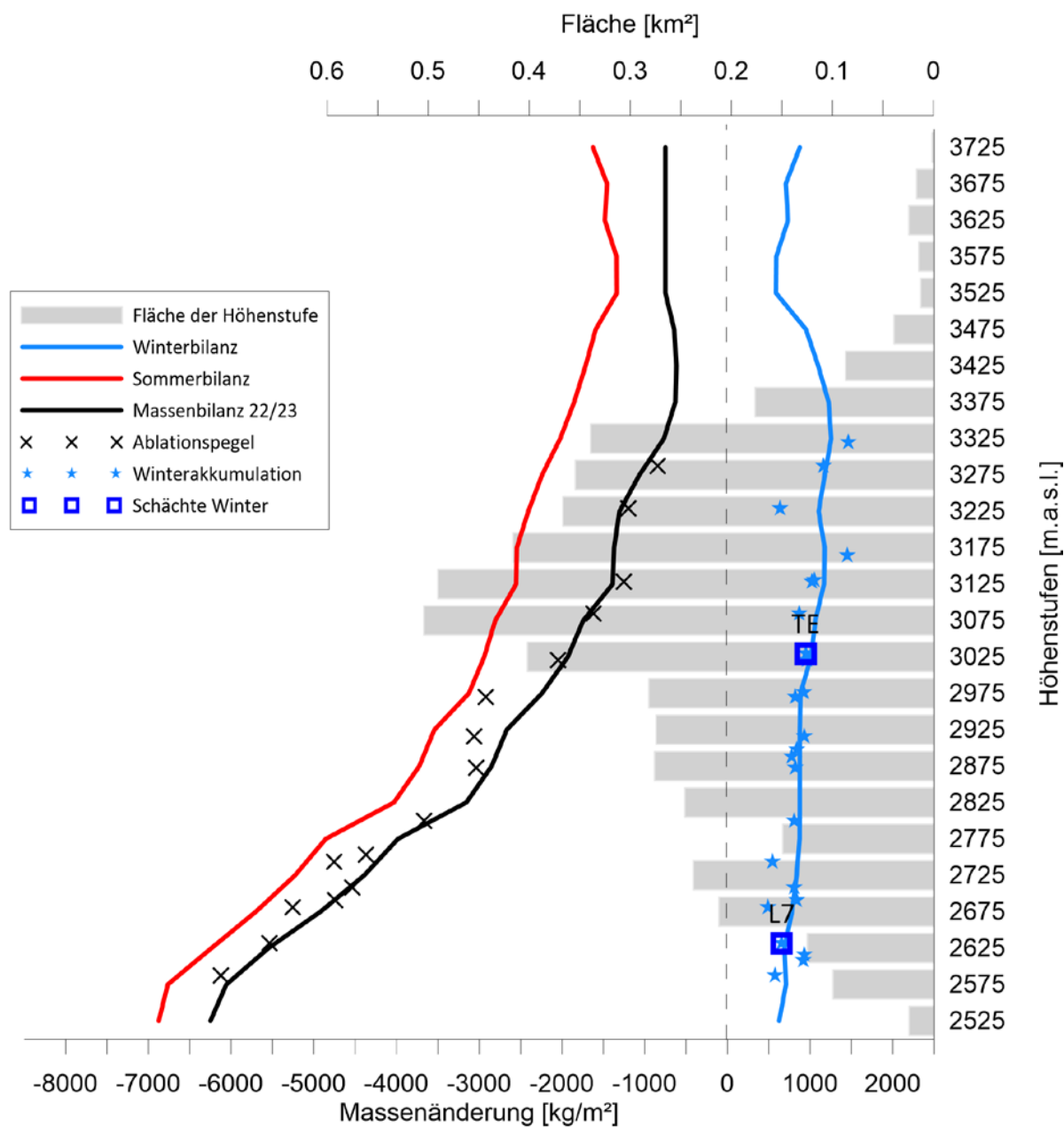
Name	Ablation (cm)						Akkumulation (kg/m ²)		Massenbilanz 2022/23 (kg/m ²)
	08.07.	16.08.	31.08.	03.09.	27.09.	30.09.	Sep.22	Sep.23	
L8	0	453	101	8	90	0	63	7	-6122
L7	0	412	93	11	93	0	63	10	-5534
22	0	0	0	497	81	0	63	10	-5255
51	0	0	0	467	55	0	63	17	-4744
L6	0	315	91	12	82	0	63	27	-4536
26	0	0	0	457	67	0	63	24	-4755
LIDAR = L5	40	201	64	25	71	0	83	27	-3665
71	0	0	0	386	92	0	83	17	-4368
L4	0	0	0	269	61	0	83	17	-3036
L3	0	173	74	7	80	0	83	30	-3059
101	0	168	0	85	62	0	83	0	-2918
TE_B	0	89	62	16	53	0	103	37	-2046
104	0	56	56	15	50	0	103	74	-1622
105	0	23	50	13	50	0	103	74	-1253
110	0	0	0	0	130	0	130	100	-1200
111	0	0	0	0	90	0	130	100	-840
aus umliegenden Pegeln berechnet oder geschätzt									
Neuschneedichte September 2022: 230 kg/m ³									
Altschneedichte September 2022: --- kg/m ³									
(Neu)schneedichte September 2023: 338 kg/m ³									
Altschneedichte September 2023: -- kg/m ³									
Ablation bis zum 30.09. aufgrund der Witterung angenommen.									

C.2.3 Geodätische Massenbilanz

Aufgrund schwerwiegender Probleme mit der Stromversorgung im Hintereis konnten keine terrestrischen Laserscans durchgeführt werden. Es wurden jedoch Laserscans per Hubschrauber vom Institut für Geographie der Universität Innsbruck zeitgleich zu den Daten der Abschluss- und Frühjahrsbegehungen (22.09.2022, 04.05.2023 und 27.09.2023) akquiriert. Ein Ergebnis der geodätischen Massenbilanz 2022/23 liegt mit Berichtlegung jedoch noch nicht vor.

Massenhaushalt Hintereisferner 2022/23

Höhenverteilung der glaziologischen und geodätischen Massenbilanzen, der Massenbilanz an den einzelnen Pegeln und Flächen der Höhenstufen



Grafik: Rainer Prinz, ACINN, Univ. Innsbruck

Abbildung 11: Die vertikalen Bilanzprofile nach der glaziologischen Methode am Hintereisferner im Haushaltsjahr 2022/23.

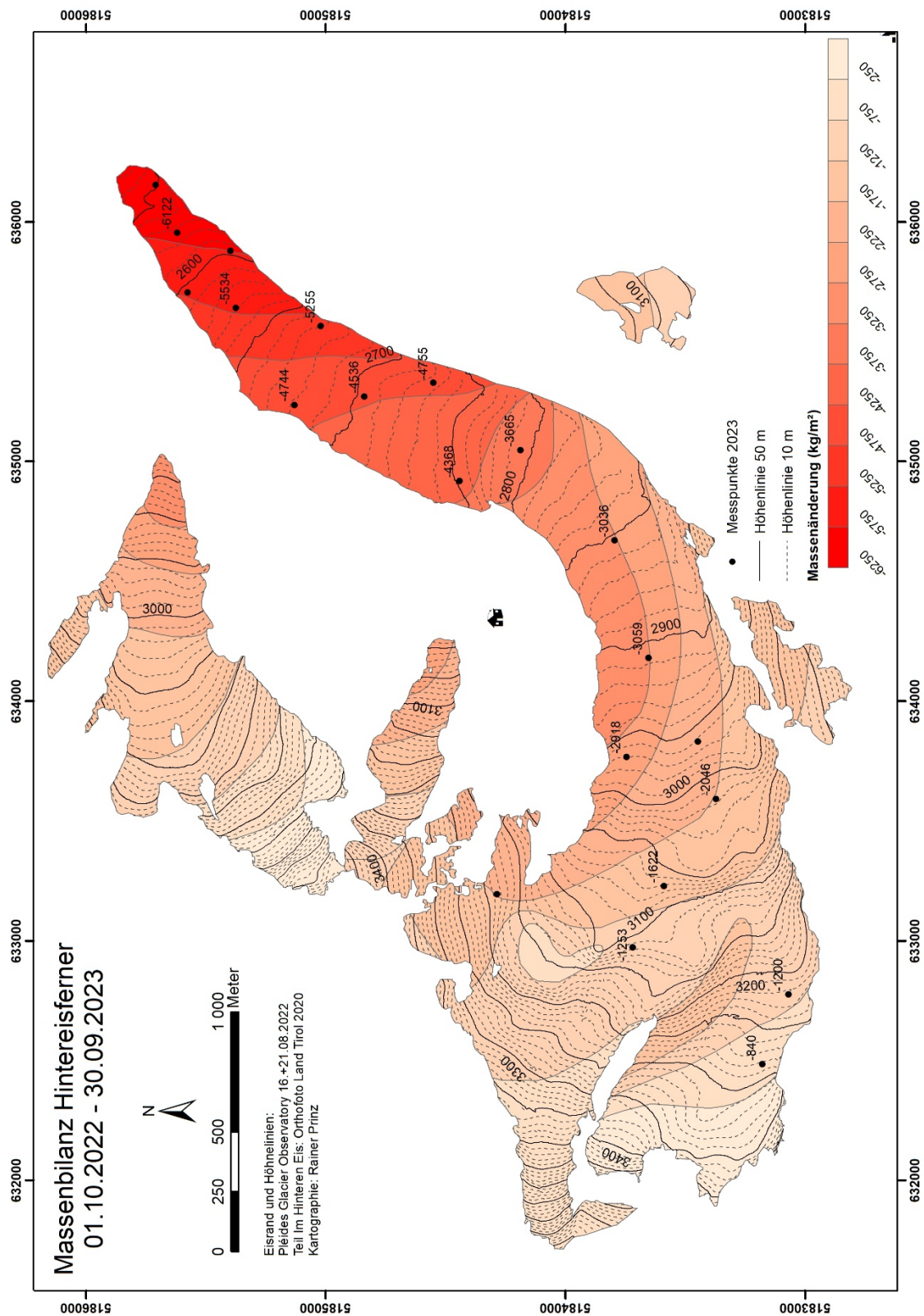


Abbildung 12: Die räumliche Verteilung der Massenbilanz am Hintereisferner im Haushaltsjahr 01.10.2022 – 30.09.2023.

Tabelle 7: Kennzahlen und glaziologische Massenbilanzen des Hintereisferners im Haushaltsjahr 2022/23 für die Gesamtfläche und aufgeteilt nach Höhenstufen.

	Winter			Sommer		gesamtes Jahr	
	Fläche	B _W	b _W	B _S	b _S	B	b
	[10 ³ m ²]	[m ³ w.e.]	[kg/m ²]	[m ³ w.e.]	[kg/m ²]	[m ³ w.e.]	[kg/m ²]
	5171	5258249	1017	-16578876	-3206	-11320627	-2189
S _C [10 ³ m ²]	0		B _C [m ³ w.e.]	0		b _C [kg/m ²]	0
S _A [10 ³ m ²]	5171		B _A [m ³ w.e.]	-11320627		b _A [kg/m ²]	-2189
ELA	NaN	m a.s.l.	S _C /S _A	0.000		AAR	0.000
Winterbilanz				Sommerbilanz		Jahresbilanz	
Höhenstufe	Fläche	B _W	b _W	B _S	b _S	B	b
[m.a.s.l.]	[10 ³ m ²]	[m ³ w.e.]	[kg/m ²]	[m ³ w.e.]	[kg/m ²]	[m ³ w.e.]	[kg/m ²]
2525	24	15115	625	-166264	-6875	-151149	-6250
2575	99	70395	708	-672654	-6766	-602259	-6058
2625	125	86134	689	-779536	-6237	-693403	-5548
2675	212	165917	781	-1210910	-5701	-1044993	-4920
2725	238	198756	837	-1241868	-5227	-1043112	-4390
2775	149	130192	873	-724358	-4856	-594166	-3983
2825	246	215233	875	-991792	-4032	-776558	-3157
2875	276	241580	875	-1028509	-3725	-786929	-2850
2925	275	240193	875	-972513	-3543	-732320	-2668
2975	282	248718	883	-880407	-3126	-631689	-2243
3025	402	406203	1011	-1181586	-2941	-775383	-1930
3075	504	536106	1063	-1415280	-2807	-879175	-1744
3125	490	572258	1167	-1252569	-2555	-680311	-1388
3175	416	488960	1175	-1059188	-2546	-570227	-1371
3225	367	404434	1103	-882828	-2408	-478394	-1305
3275	354	416907	1176	-794095	-2241	-377188	-1064
3325	339	425433	1254	-686041	-2022	-260608	-768
3375	176	215889	1223	-327086	-1854	-111196	-630
3425	87	95517	1097	-149309	-1715	-53792	-618
3475	39	37159	949	-62367	-1593	-25207	-644
3525	13	7427	587	-16924	-1337	-9497	-750
3575	15	8701	591	-19750	-1341	-11049	-750
3625	24	17909	732	-36250	-1482	-18341	-750
3675	17	11822	705	-24395	-1455	-12573	-750
3725	1	1292	875	-2399	-1625	-1107	-750
Summe	5171	5258249	1017	-16578876	-3206	-11320627	-2189

C.3 Massenbilanz Kesselwandferner

Der Bestimmung der Massenbilanz im Haushaltsjahr 2022/23 liegen Messungen und Beobachtungen aus einer Feldkampagne an acht Pegeln und Akkumulationsmesspunkten zugrunde (Tabelle 8 und Abbildung 16). Aufgrund des Fehlens von Altschnee wurde kein Schneeschacht gegraben. Auf Firndichtemessungen wurde verzichtet.

Die Abschlussbegehung am KWF fand am 06.09.2023 statt. Anhand der Beobachtungen vom Hintereisferner wurde die Ablation zum 30.09. am Kesselwandferner korrigiert.

Zur Extrapolation der Punktwerte auf die Gletscherfläche wurden Fotos der Begehung vom 06.09.2023 und eine Sentinel-2 Satellitenszene vom 10.09.2023 hinzugezogen (Abbildung 13). Die Punktwerte der Massenbilanz (Pegel und Schächte) sind in der Abbildung des vertikalen Bilanzprofils (Abbildung 15) und in der Bilanzkarte (Abbildung 16) eingetragen. Tabelle 9 zeigt die Bilanzwerte nach Höhenstufen sowie alle weiteren Kennwerte der Massenbilanz 2022/23.

Die mittlere spezifische Massenbilanz des Kesselwandferners für das hydrologische Haushaltsjahr 01.10.2022 – 30.09.2023 beträgt: **$b = -1472 \text{ mm w.e.}$** ($= \text{kg/m}^2$),
das entspricht **$B = -4.967 \cdot 10^6 \text{ m}^3$** Wasser

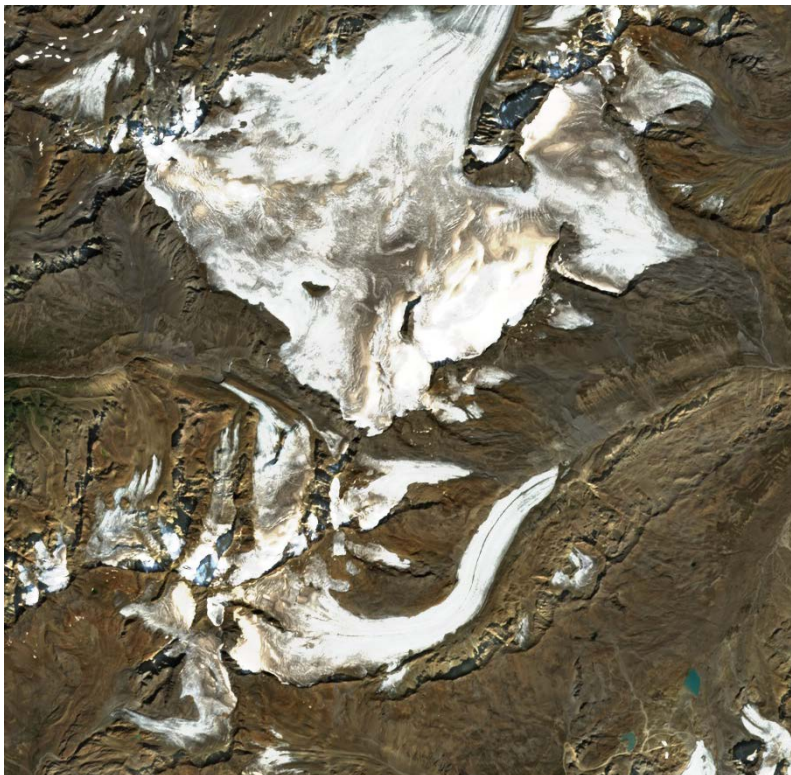


Abbildung 13: Sentinel-2 Satellitenszene vom 10.09.2023 zur Bestimmung der Firngrenze am KWF (oben rechts).

Tabelle 8: KWF, Haushaltsjahr 2022/23: Die Massenänderung an den einzelnen Messpunkten und zwischen den Ablesezeitpunkten.

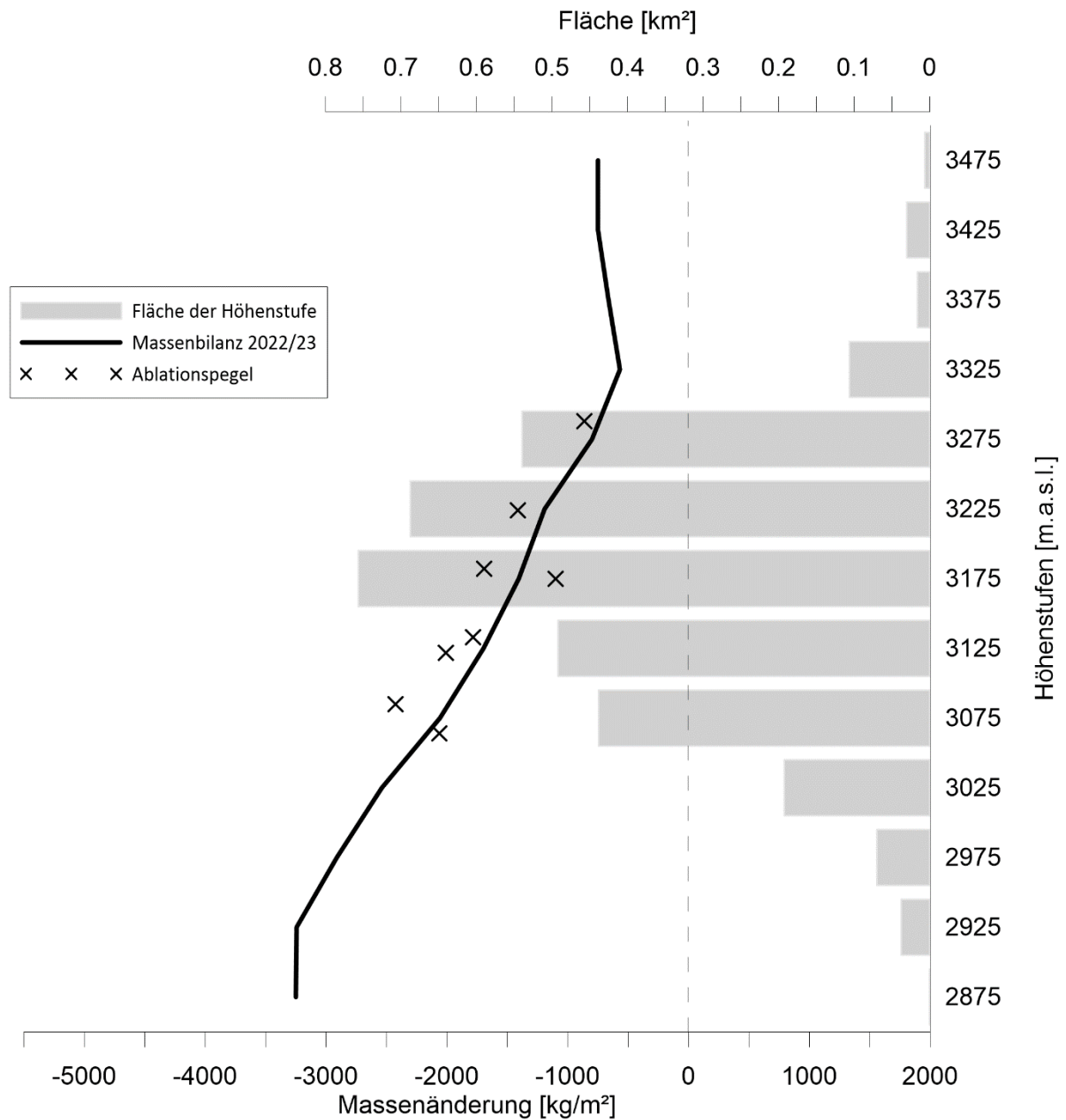
	Ablation (cm)	Ablation (cm)	Akkumulation (kg/m ²)		Massenbilanz
Name	06.09.	30.09.	Sep.22	Sep.23	2022/23 (kg/m ²)
K5	174	50	83	40	-2062
K8	212	50	103	40	-2424
K9	166	50	103	40	-2010
K10	141	50	103	40	-1785
K12	80	40	103	80	-1100
K16	146	40	103	80	-1694
K18	124	30	130	100	-1413
K19	63	30	130	100	-864
K20					
SS1					
SS2					
aus umliegenden Pegeln berechnet oder geschätzt					
Schneedichte September 2022: von HEF übertragen					
Ablation bis zum 30.09. berechnet aus Gradtagfaktoren und Ablation vom HEF					
Akkumulation September 2023: von HEF übertragen					



Abbildung 14: Blick über die oberen Bereiche des KWF zum Brandenburger Haus und Fluchtkogel. Es sind nur mehr Neuschneereste von 29.08. erhalten, jedoch kein Winterschnee mehr. Foto: Rainer Prinz, 06.09.2023.

Massenhaushalt Kesselwandferner 2022/23

Höhenverteilung der spezifischen Massenbilanzen, der Massenbilanz an den einzelnen Pegeln und Flächen der Höhenstufen



Grafik: Rainer Prinz, ACINN, Univ. Innsbruck

Abbildung 15: Das vertikale Bilanzprofil am Kesselwandferner im Haushaltsjahr 2022/23.

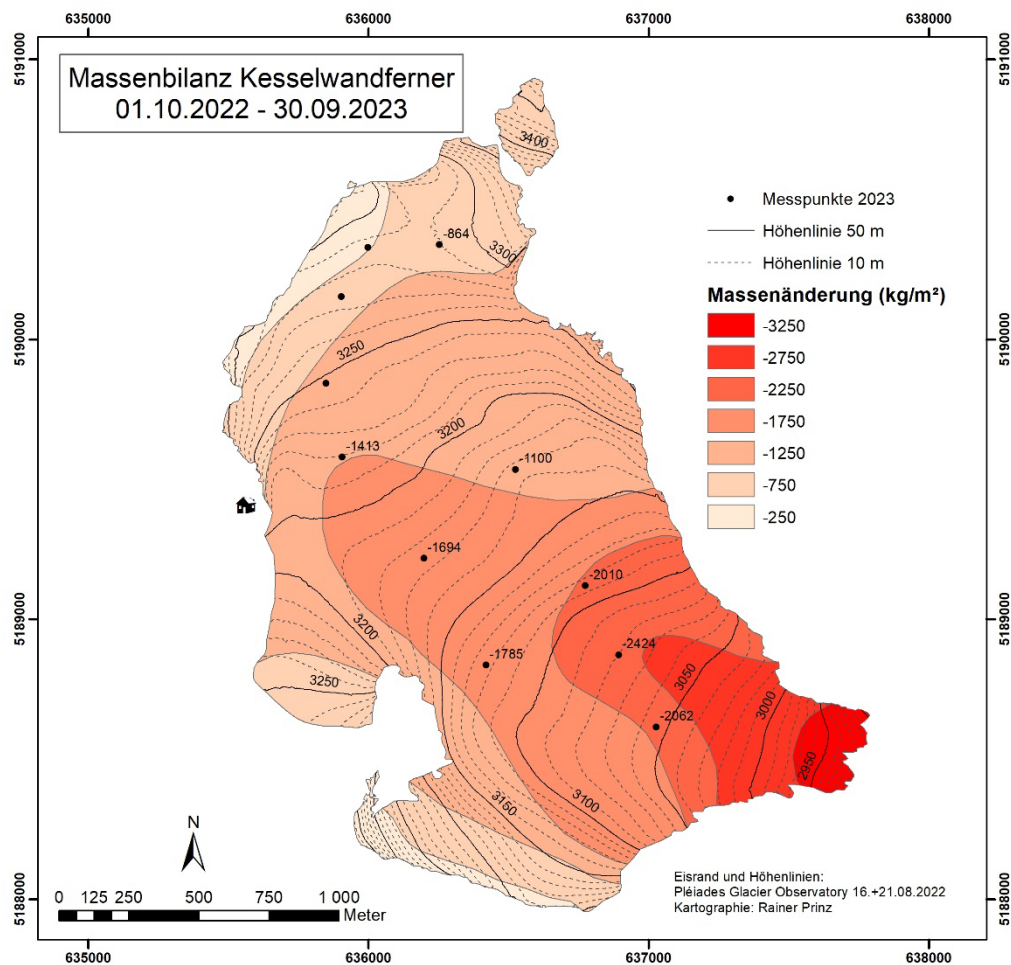


Abbildung 16: Punktwerte und räumliche Verteilung der Massenbilanz am Kesselwandferner im Haushaltsjahr 01.10.2022 – 30.09.2023.

Tabelle 9: Kennzahlen und Massenbilanz des Kesselwandfeners im Haushaltsjahr 2022/23 für die Gesamtfläche und aufgeteilt nach Höhenstufen.

	gesamtes Jahr					
	Fläche	B	b			
	[10 ³ m ²]	[m ³ w.e.]	[mm w.e.]			
	3374	-4967398	-1472			
S_C [10³ m²]	0		B_C [m³ w.e.]	0	b_C [mm w.e.]	0
S_A [10³ m²]	3374		B_A [m³ w.e.]	-4967398	b_A [mm w.e.]	-1472
ELA	NaN	m.a.s.l.	S_C/S_A	0.000	AAR	0.000
	Jahresbilanz					
	Höhenstufe	Fläche	B	b		
	[m.a.s.l.]	[10 ³ m ²]	[m ³ w.e.]	[mm w.e.]		
	2875	0	-762	-3250		
	2925	38	-122419	-3244		
	2975	70	-203835	-2911		
	3025	193	-489104	-2539		
	3075	439	-902750	-2058		
	3125	492	-835467	-1698		
	3175	756	-1063379	-1406		
	3225	688	-819364	-1192		
	3275	540	-431513	-800		
	3325	106	-60421	-568		
	3375	16	-10760	-663		
	3425	30	-22718	-750		
	3475	7	-4905	-750		
	Summe	3374	-4967398	-1472		

C.4 Niederschlagsmessungen im Rofental

Die Niederschlagsmessungen im Rofental wurden bis zum Ende des hydrologischen Jahres 2020 mit Totalisatoren an abgelegenen Standorten, sowie einer Niederschlagswaage in Vent durchgeführt. Vorschriften der Arbeitssicherheit an der Universität Innsbruck erlauben ein Ablesen der Totalisatoren jedoch nicht mehr. Eine bauliche Abänderung der Messeinrichtung entsprechend der Arbeitssicherheitsbestimmungen und in Einklang mit den Messprinzipien ist nicht finanzierbar. Mittlerweile stehen an fünf der sieben Totalisatorstandorte elektronische Niederschlagswaagen, mit denen die Messreihe fortgeführt wird. Die Standorte Rofenberg und Hochjochhospiz werden derzeit nicht weiter betrieben.

C.4.1 Erkenntnisse aus jüngsten Arbeiten

In seiner Masterarbeit vergleicht Winter (2022)⁷ die Messwerte aus Niederschlagswaagen und Totalisatoren und stellt synoptische Beziehungen zu (Extrem)Niederschlägen her:

- An den Standorten Vent und Vernagtbach, wo Niederschlagswaagen und Totalisatoren in direkter Nachbarschaft über mehrere Jahre parallel betrieben wurden, unterscheiden sich die Jahresniederschläge kaum. In Vent überschätzt der Totalisator den gewogenen Niederschlag um 1% für den Zeitraum 2000-2020. An der Vernagtbach gibt ebenfalls der Totalisator 3% mehr Niederschlag für die Jahre 2012-2020.
- Die Abweichung im Monatsniederschlag zwischen den beiden Messmethoden ist wesentlich variabler, über- bzw. unterschreitet aber nicht die 10%-Marke. Lediglich in den Monaten September und Oktober überschätzt die Niederschlagswaage Vernagtbach den Totalisator um knapp 20%. In den Sommermonaten überschätzt generell die Niederschlagswaage, in den Wintermonaten der Totalisator. Am Standort Latschbloder treten Messfehler der Waage in einzelnen Monaten auf (besonders Juli und November) und aufgrund des kurzen Vergleichszeitraumes (4 Jahre) wird die Statistik an diesem Standort als nicht robust erachtet.
- Saisonale Niederschlagsveränderungen im Rofental seit den 1960er Jahren sind nicht signifikant. Ein Anstieg der Winterniederschläge um 0.27 mm pro Monat und Jahr (bis 2000 und seitdem fast konstant) ist allerdings nur knapp nicht signifikant.
- Die Änderung der Variabilität der saisonalen Niederschläge mit einer Abnahme der Variabilität von etwa 1960 bis etwa 1980 gefolgt von einer Zunahme von 2000-2020 ist signifikant und konform zu einer Studie der Niederschlagsvariabilität im Alpenraum (Haslinger et al., 2021).
- Hohe Winterniederschläge im Rofental korrelieren zunehmend mit der positiven Phase der nordatlantischen Oszillation, geringe Sommerniederschläge mit deren negativen Phase.

⁷ <https://digital.obvsg.at/urn:urn:nbn:at:at-ubi:1-121916>

- Synoptische Analysen sowohl der täglichen als auch der monatlichen Niederschlagsextreme zeigen, dass extreme Niederschläge im Allgemeinen mit Höhentiefs über Nordwesteuropa und trockenere Perioden mit Blockierung von Luftmassen aufgrund eines starken Hochs über Skandinavien oder Nordeuropa verbunden sind.
- Schwache Niederschlagsgradienten (kaum Zunahme des Niederschlages mit der Höhe) im Rofental korrelieren mit einem starken skandinavischen Hoch, starke Gradienten mit Tiefdruck über Skandinavien (Winter) oder über den britischen Inseln (Frühjahr, oft Südföhnlagen).
- Die verschiedenen Stationen im Rofental weisen auch unterschiedliche Charakteristika in der Niederschlagsverteilung auf, wobei die feuchtesten Tage am Vernagtbach im Allgemeinen mit einer nördlichen, an der Martin-Busch-Hütte eher mit einer südlichen und in Vent mit einer westlichen Anströmung assoziiert sind.

Schroeder (2023)⁸ zeigt in ihrer Masterarbeit kontinuierliche Messungen des Schneewasseräquivalentes mittels eines Neutronenzählers am Hintereisferner für den Zeitraum Oktober 2021 – Juli 2022. Die Abweichung zu manuellen Schneedichtemessungen betragen $-7 \pm 10\%$. Gemessene Schneedichte und Schneewasserwert unterscheiden sich kaum von Werten, die je mit einem komplexen, prozessorientierten Modell, SNOWPACK (Lehning et al., 1999), sowie mit einem sehr einfachen, empirischen Modell, Δ Snow (Winkler et al., 2021), ermittelt wurden. Wobei letzteres Modell aufgrund seiner Genauigkeit trotz großer Einfachheit besonders hervorsteht und lediglich bei großen Schneehöhen und großen Dichten (im Frühjahr) größere Abweichungen zeigt. Ebenso lässt sich aus den kontinuierlichen Daten zum Schneewasserwert auch der Niederschlagsgradient mit der Höhe quantifizieren und bietet somit eine tägliche Auflösung des Niederschlagsgeschehens während der Wintermonate.

C.4.2 Vergleich der Niederschlagsmessungen im Rofental

Die Lage der Wetterstationen im Rofental zeigt Abbildung 3, die Koordinaten der Niederschlagswaagen sind in Tabelle 10 angeführt.

Tabelle 10: Koordinaten der Niederschlagswaagen im Rofental (inkl. Martin-Busch-Hütte).

Betreiber	Name	Lat	Lon	Höhe (m)
HD Tirol	Vent	46.8572	10.9109	1890
ACINN	Vent	46.8573	10.9128	1905
HD Tirol	Martin-Busch-Hütte	46.8009	10.8884	2470
HD Tirol	Vernagtbach	46.8546	10.8298	2640
IGI	Proviantdepot	46.8295	10.8241	2737
IGI	Bella Vista	46.7834	10.7921	2805
IGI	Latschbloder	46.8012	10.8056	2910
ACINN	Station Hintereis	46.7986	10.7606	3030

⁸ <https://ulb-dok.uibk.ac.at/urn:urn:nbn:at:at-ubi:1-140212>

Im Folgenden sollen ausgewählte Niederschlagsmessungen im Rofental aus Messeinrichtungen des ACINN und des Sachgebietes Hydrographie und Hydrologie der Abteilung Wasserwirtschaft des Landes Tirol (HD Tirol) sowie des Institutes für Geographie der Universität Innsbruck (IGI) verglichen werden (Tabelle 11 und Abbildung 17). Die Daten entsprechen Rohwerten ohne Korrekturen, die z.B. für Messfehler durch Wind vorgeschlagen werden (vgl. Kochendorfer et al., 2017; Pan et al., 2016).

Die beiden Niederschlagswaagen in Vent liefern ähnliche Werte, wobei die Waage des HD Tirol immer etwas höhere Werte registriert. Die Ursache liegt vermutlich in den Standorten, der im Fall der Waage des HD etwas windgeschützter als der freie Standort des ACINN erscheint. Die Jahressummen des Niederschlages in Vent liegen zwischen 684 mm (Waage ACINN) und 773 mm (Waage HD). Der Niederschlag nimmt mit der Höhe zu und erreicht auf der Station Hintereis (3030 m) ungefähr das 2-fache als in Vent (1905 m). In einzelnen Monaten kann der Niederschlag auch knapp das 5-fache erreichen (z.B. im September). Besonders in Monaten mit Schneeniederschlag registrieren einzelne Waagen weniger Niederschlag als in Vent. Auch hier kann Windexposition als mögliche Ursache für die Unterschätzung der Niederschlagsmenge angenommen werden, zum Teil auch Regen in Vent und Schneefall auf höher gelegenen Stationen.

Der Winterniederschlag (Okt.-Apr.) in Vent beträgt 262 mm, auf der Station Hintereis 501 mm – ungefähr das 1.9-fache. Die Wintermassenbilanz, die grob dem Gebietsniederschlag am Hintereisferner im selben Zeitraum entspricht, ergibt 1017 mm oder das 3.9-fache des Winterniederschlages von Vent.

Der unkorrigierte Niederschlag auf der Station Hintereis der letzten drei Winter unterschätzt die Winterbilanz um 36% bis 51%. Nach Korrektur des Niederschlages (Kochendorfer et al., 2017) wird die Winterbilanz um 10% bis 16% überschätzt.

Tabelle 11: Niederschlagsmengen (mm) an den Totalisatoren im Einzugsgebiet des Pegels Rofenache (inkl. Martin-Busch-Hütte) nach Monaten im hydrologischen Jahr 2022/23.

Messstelle	Betreiber	Höhe	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	HHJ 2023
Vent	ACINN	1905 m	57	47	31	13	17	44	52	83	38	110	149	43	684
Vent	HD Tirol	1890 m	60	64	32	16	20	51	60	92	41	123	161	54	773
Verhältnis Vent ACINN			1.04	1.35	1.04	1.19	1.22	1.16	1.14	1.11	1.08	1.11	1.08	1.26	1.13
Martin-Busch-Hütte	HD Tirol	2470 m	66	54	47	23	12	49	58	93	41	157	203	80	883
Verhältnis Vent ACINN			1.15	1.15	1.53	1.69	0.69	1.12	1.11	1.12	1.07	1.42	1.37	1.86	1.29
Vernagtbach	HD Tirol	2640 m	80	45	46	21	26	60	61	86	54	180	192	64	914
Verhältnis Vent ACINN			1.39	0.95	1.49	1.54	1.53	1.37	1.17	1.03	1.42	1.64	1.29	1.48	1.34
Proviantdepot	IGI	2737 m	69	57	47	24	33	57	66	94	56	154	202	79	939
Verhältnis Vent ACINN			1.20	1.20	1.53	1.82	1.98	1.29	1.28	1.14	1.48	1.40	1.36	1.83	1.37
Latschbloder	IGI	2910 m	83	38	51	25	39	75	54	70	59	186	205	117	1002
Verhältnis Vent ACINN			1.45	0.80	1.65	1.88	2.35	1.71	1.04	0.84	1.55	1.69	1.38	2.72	1.46
Station Hintereis	ACINN	3030 m	111	71	85	35	25	79	95	100	64	230	267	210	1372
Verhältnis Vent ACINN			1.93	1.51	2.74	2.59	1.52	1.79	1.82	1.21	1.69	2.09	1.80	4.86	2.00

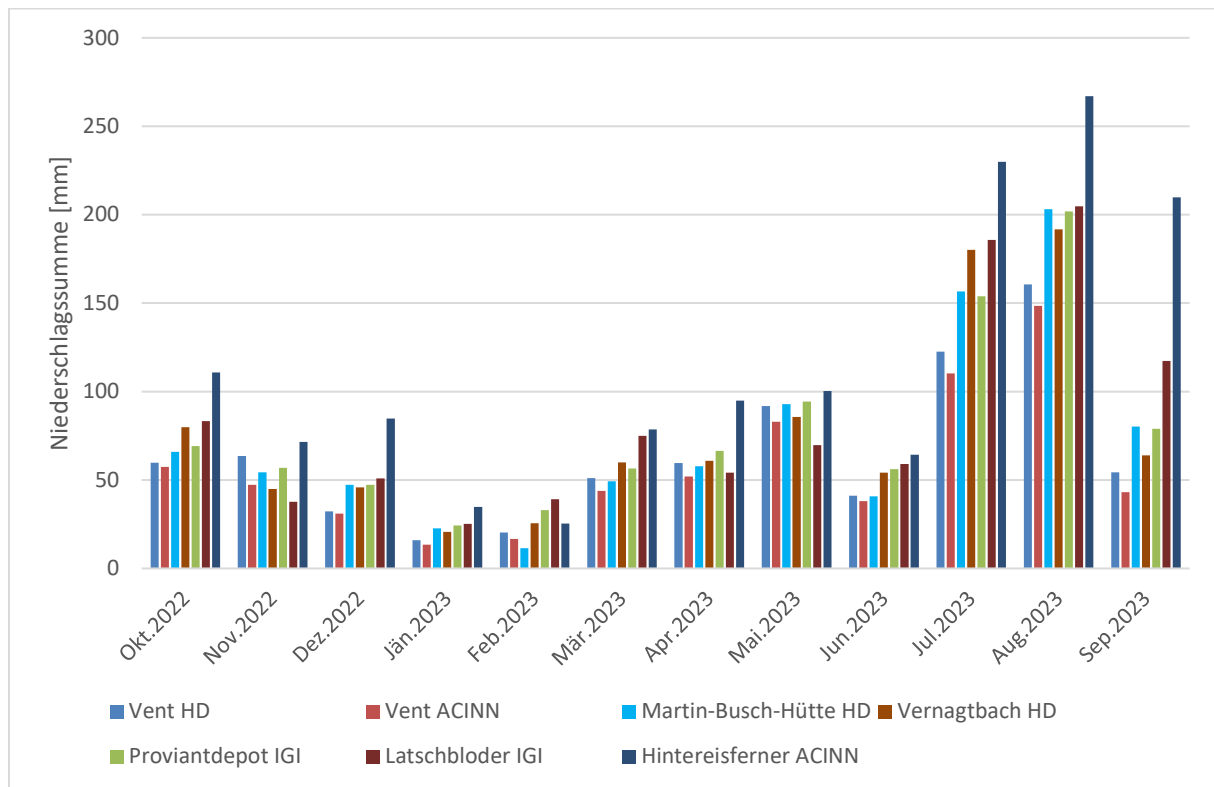


Abbildung 17: Vergleich der Monatssummen des Niederschlages an der Niederschlagswaagen. Beachtlich ist der Niederschlag an der Station Hintereis/Hintereisferner im September, der auf das Niederschlagsereignis vom 22.09. zurückzuführen ist.

C.5 Literaturverzeichnis

Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A. A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L. and Zemp, M.: Glossary of Mass Balance and Related Terms, UNESCO-IHP, Paris., 2011.

Haslinger, K., Hofstätter, M., Schöner, W. and Blöschl, G.: Changing summer precipitation variability in the Alpine region: on the role of scale dependent atmospheric drivers, *Clim. Dyn.*, 57(3–4), 1009–1021, doi:10.1007/s00382-021-05753-5, 2021.

Hoinkes, H.: Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern, *Zeitschrift für Gletscherkd. und Glazialgeol.*, 6(1–2), 37–90, 1970.

Hoinkes, H. and Steinacker, R.: Zur Parametrisierung der Beziehung Klima - Gletscher, *Riv. Ital. di Geofis. e Sci. Affin.*, 1, 97–103, 1975.

Klug, C., Bollmann, E., Galos, S. P., Nicholson, L., Prinz, R., Rieg, L., Sailer, R., Stötter, J. and Kaser, G.: Geodetic reanalysis of annual glaciological mass balances (2001–2011) of Hintereisferner, Austria, *Cryosph.*, 12, 833–849, doi:10.5194/tc-12-833-2018, 2018.

Kochendorfer, J., Rasmussen, R., Wolff, M., Baker, B., Hall, M. E., Meyers, T., Landolt, S., Jachcik, A., Isaksen, K., Brækkan, R. and Leeper, R.: The quantification and correction of wind-induced precipitation measurement errors, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21(4), 1973–1989, doi:10.5194/hess-21-1973-2017, 2017.

Kuhn, M.: Rain and Snow at High Elevation, in *Plants in Alpine Regions*, edited by C. Lütz, pp. 1–10, Springer Vienna, Vienna., 2012.

Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Russi, T., Stöckli, U. and Zimmerli, M.: snowpack model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 30(1–3), 145–157, doi:10.1016/S0165-232X(99)00022-1, 1999.

Pan, X., Yang, D., Li, Y., Barr, A., Helgason, W., Hayashi, M., Marsh, P., Pomeroy, J. and Janowicz, R. J.: Bias corrections of precipitation measurements across experimental sites in different ecoclimatic regions of western Canada, *Cryosph.*, 10(5), 2347–2360, doi:10.5194/tc-10-2347-2016, 2016.

Schroeder, M.: Snow Water Equivalent measured by a Cosmic Ray Neutron Sensor: A Case Study from Hintereisferner, Austria, University of Innsbruck., 2023.

Voordendag, A., Prinz, R., Schuster, L. and Kaser, G.: Brief communication: The Glacier Loss Day as an indicator of a record-breaking negative glacier mass balance in 2022, *Cryosph.*, 17(8), 3661–3665, doi:10.5194/tc-17-3661-2023, 2023.

Winkler, M., Schellander, H. and Gruber, S.: Snow water equivalents exclusively from snow depths and their temporal changes: the Δ_{snow} model, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25(3), 1165–1187, doi:10.5194/hess-25-1165-2021, 2021.

Winter, C.: Temporal and spatial trends in precipitation in the Rofental, University of Innsbruck., 2022.

C.6 Verzeichnis verwendeter Akronyme und Symbole

Akronym	Bedeutung	Einheit
AAR	Accumulation Area Ratio	
ACINN	Institut für Atmosphären- und Kryosphärenwissenschaften der Universität Innsbruck	
ALS	airborne laserscanning	
AWS	automatische Wetterstation	
CRNS	cosmic ray neutron sampling	
DGPS	differential global positioning system	
ELA	equilibrium line altitude	m
HEF	Hintereisferner	
IGI	Institut für Geografie der Universität Innsbruck	
KWF	Kesselwandferner	
LJF	Langtaufenerjochferner	
SF	Stationsferner	
TLS	Terrestrischer Laserscanner (Im Hinteren Eis)	
VBP	vertikales Bilanzprofil	
VF	Vernagtferner	
w.e.	Wasseräquivalent	
WGMS	World Glacier Monitoring Service	

Symbol	Bedeutung	Einheit
B	Gesamtmassenbilanz	$\text{m}^3 \text{ w.e.} \equiv 10^3 \text{ kg}$
b	(flächen)spezifische Massenbilanz	$\text{mm w.e.} \equiv \text{kg m}^{-2}$
a	(flächen)spezifische Ablation	$\text{mm w.e.} \equiv \text{kg m}^{-2}$
c	(flächen)spezifische Akkumulation	$\text{mm w.e.} \equiv \text{kg m}^{-2}$
S	Gletscherfläche	m^2

Subskript	Bedeutung
A	Ablation (z.B.: B _A : Gesamtmassenbilanz der Gletscherteilfläche mit Netto-Ablation)
C	Akkumulation
W	hydrologisches Winterhalbjahr
S	hydrologisches Sommerhalbjahr
fix	nach fixem Datum (01.10. – 30.09.)
nat	nach dem natürlichen Haushaltsjahr
z	Höhe

D. ANHANG

D.1 Geleistete Arbeiten

D.1.1 Feldkampagnen

Die Feldkampagnen in der Saison 2022/23 im Rofental erforderten vier Arbeitseinsätze am HEF (wobei hier die mehrwöchige Kampagne HEFEX II nur als eine Kampagne zählt) und einen am KWF, die zum Teil mehrtägig absolviert wurden. Am HEF wurden sieben Pegel neu gebohrt, am KWF zwei. Die meisten Feldkampagnen wurden mit Wartungsarbeiten oder anderen Forschungsprojekten gemeinsam durchgeführt. Drei Kampagnen wurden durch einen Hubschrauber unterstützt.

Kompensationen für CO₂-Emissionen durch Hubschrauberflüge oder Fahrten mit PKWs durch zertifizierte Kompensationsprojekte wurden für die Jahre 2020 und 2021 in Kooperation mit der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) bereits geleistet. Umstrukturierungen auf Seiten der BOKU führten zu einer Einstellung des Programmes. An einer Lösung wird bis dato noch gearbeitet.

Personentage

- 20 Personentage – HEF Massenbilanz
- 4 Personentage – KWF Massenbilanz
- 10 Personentage – Wartung von Station Hintereis, Wetterstationen und Pluviometer

Personen:

Universität Innsbruck: Rainer Prinz, Lindsey Nicholson, Annelies Voordendag, Marie Schroeder, Claudine Charrondière, Andrea Bruckmeier, Moritz Mairl, Michael Leiter, Georg Kaser, Philipp Vettori

Schnalstaler Gletscherbahnen: Philipp Kofler

Alle Kampagnen verliefen unfall- und verletzungsfrei. Allen Teilnehmern sei hiermit für ihren Einsatz und ihr Engagement herzlichst gedankt!

D.1.2 Messungen und Analysen

- Es wurden die Grundlagen für die Erstellung der Winter- und Jahresmassenbilanzen nach der glaziologischen Methode am HEF und am KWF (nur Jahresbilanz) gesammelt und ausgewertet, Zustand und Veränderung der Gletscheroberfläche im Lauf der Ablationsperiode dokumentiert und das Netz von Ablationspegeln gewartet.
- Die Daten der Wetterstation in Vent wurden als Tageswerte der Lufttemperatur und des Niederschlages berechnet.

- Die monatlichen Niederschlagssummen der Niederschlagswaagen im Rofental wurden ausgewertet.

D.2 Dokumentation der Feldarbeiten am Hintereisferner und am Kesselwandferner

D.2.1 Feldkampagne 04.05.2023: Hintereisferner Winterbilanz

Ziel der Feldkampagne:

- Messung der Winterbilanz am Hintereisferner
- Kontrolle Station Hintereis
- Auslesen der Wetterstationen CRNS (09:10-09:30 MESZ) und STHE
- Zeitgleicher ALS Flug Inst. f. Geografie
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, Marie Schroder – ACINN
- Andrea Bruckmeier – Institut für Geografie, Universität Innsbruck
- Moritz Mairl - Institut für Ökologie, Universität Innsbruck

Ausgeführte Arbeiten:

Aufgrund des zeitgleichen ALS Fluges mit dem Heli zum HEF auf Position HJ. Sondierung aller Punkte bis zur Schachtposition TE. Dort Auslesen der AWS CRNS – alles in Ordnung. MS und MM sondieren alle weiteren Punkte und graben Schacht L7.

Station HE (RP, AB): Wenig Wasser in der Hütte. Westseitigen Heizungseinlass frei geschaufelt.

Wasserflaschen wieder geplatzt. 1 große Schaufel dort deponiert.

AWS STHE: Pluvio entleert, Daten ausgelesen.

Abholung per Heli gegen 15:30 am Zungenende.

Situation:

Meist wolkenlos mit -3°C auf 3000 m. Wenig Wind, tw. Windstille. Schneedecke TE noch kalt und trocken, L7 nass. Großer Dichtegradient zwischen diesen Punkten.

Tabelle 12: Auswertungen Schacht TE und L7.

Schacht: TE	H = 277 cm	X:	Y:	Alt: 3030 m	Date:	04.05.2023
R. Prinz, M. Schroeder, A. Bruckmeier, M. Mairl					Time:	10:30 MESZ
Keil 1000 cm ³						

Höhe [cm]	Masse [g]	Dichte [kg/m ³]	Schichthöhe [cm]	Wasserwert [kg/m ²]	Höhe [cm]	Temperatur [°C]
277					277	-0.3
267	264	264	10	26	267	-3.6
257	272	272	10	27	257	-3.5
247	275	275	10	28	247	-3.0
237	295	295	10	30	237	-2.5
227	277	277	10	28	227	-2.5
217	324	324	10	32	217	
205	336	336	12	40	205	-3.2
195	321	321	10	32	195	
185	371	379	10	38	185	-3.5
173	425	425	12	51	173	
163	401	401	10	40	163	-3.8
153	403	403	10	40	153	
143	417	430	10	43	143	
133	431	431	10	43	133	
123	450	450	10	45	123	-3.9
113	380	380	10	38	113	
103	413	413	10	41	103	
93	423	423	10	42	93	
83	425	425	10	43	83	
73	424	424	10	42	73	
63	415	415	10	42	63	
53	352	363	10	36	53	
43	403	403	10	40	43	
33	432	432	10	43	33	
23	461	461	10	46	23	
13	459	459	10	46	13	
0	459	459	13	60	0	-3.0
Gesamt	10308	384	277	1063		

Korrektur	Akkumulation Sep 2022	103
	Akkumulation Mai 2023	10
Korrigierter Wasserwert für 30.04.2023		950

Schacht: L7	H = 137 cm	X:	Y:	Alt: 2632 m	Date:	04.05.2023
M. Schroeder, M. Mairl					Time:	13:30 MESZ
Keil 1000 cm ³						

Höhe [cm]	Masse [g]	Dichte [kg/m ³]	Schichthöhe [cm]	Wasserwert [kg/m ²]	Höhe [cm]	Temperatur [°C]
137					137	-0.3
127	484	484	10	48	127	-0.3
117	504	504	10	50	117	-0.3
107	529	529	10	53	107	
97	561	561	10	56	97	-0.3
87	644	644	10	64	87	
77	481	481	10	48	77	-0.3
67	487	487	10	49	67	
57	509	509	10	51	57	-0.4
47	562	562	10	56	47	-0.5
37	428	428	10	43	37	
27	445	445	10	45	27	-0.7
17	393	393	10	39	17	
7	359	359	10	36	7	
0	412	412	7	29	0	-0.6
Gesamt	6798	487	137	667		

Korrektur	Akkumulation Sep 2022	0
	Akkumulation Mai 2023	10
Korrigierter Wasserwert für 30.04.2023		657

Tabelle 13: Werte der beiden Schneesächte zur Bestimmung der Schneedichte der Winterbilanz.

Name	Höhe [m.a.s.l.]	Schneehöhe [cm]	Dichte [kg/m³]	Wasserwert [kg/m²]	Wasserwert [kg/m²] 30.04.
TE	3030	277	384	1063	950
L7	2632	137	487	667	657



Abbildung 18: AWS30 (CRNS) und Schacht TE. Foto: Rainer Prinz, 04.05.2023.

Tabelle 14: Werte der Schneehöhensondierungen zur Bestimmung der Winterbilanz

Ident	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Snowdepth (cm)	Density (kg/m³)	Accumulation Oct2021 (kg/m²)	Accumulation Mai2022 (kg/m²)	SWE (kg/m²)	SWE corr (kg/m²)	Comment
L8	46.8102504	10.7820117	2587	120	487	0	10	583	573	FEE: 176
42	46.809916	10.778734	2616	193	487	0	10	940	930	
50	46.808264	10.78095	2608	190	487	0	10	925	915	
L7	46.808111	10.777825	2632	137	487	0	10	667	657	
22	46.804945	10.776727	2681	105	474	0	10	496	486	
51	46.80599	10.772458	2691	180	472	0	10	849	839	
L6	46.803368	10.772829	2708	182	467	30	10	849	809	
26	46.800765	10.773501	2743	128	458	30	10	584	544	
LIDAR	46.79756	10.76971	2800	195	444	50	10	865	805	FES?: 159
88	46.7953727	10.7670406	2888	207	421	83	10	871	778	
L4	46.7941051	10.764654	2873	215	425	83	10	911	818	
89	46.7932268	10.7620542	2898	223	418	83	10	931	838	
L3	46.792933	10.758196	2916	248	414	83	10	1025	932	
103	46.7911526	10.7535505	2976	255	398	83	10	1015	922	
101	46.793838	10.752814	2970	228	400	83	10	911	818	
TE_B	46.790513	10.750396	3021	278	386	103	10	1074	961	
104	46.7925414	10.7457075	3085	256	384	103	10	981	868	
105	46.793762	10.7423794	3128	296	384	103	10	1135	1022	
110	46.7879544	10.7396239	3229	196	384	103	10	751	638	
111	46.7890017	10.7358449	3287	332	384	103	10	1273	1160	
WP26	46.79127	10.742962	3131	304	384	103	10	1165	1052	
WP27	46.78935	10.742626	3164	407	384	103	10	1561	1448	
TE	46.7909599	10.7484997	3030	277	384	103	10	1064	951	
HJ	46.7919346	10.7347786	3320	410	384	103	10	1574	1461	

D.2.2 Feldkampagne 08.+09.07.2023 Feldkurs

Ziel der Feldkampagne:

- Pegelablesung Hintereisferner
- Feldkurs für Atmosphärenwissenschaften (glazialmeteorologische Messungen)
- Wartung und Auslesen der Wetterstationen und Sensoren
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, sechs Studierende – ACINN
- Robert Ciatti – Bergführer Meran

Ausgeführte Arbeiten:

08.07. Von der Schönen Aussicht über das Hintere Eis im Schnee hinunter zu Pegel L5 (LIDAR). Von dort zur AWS30 (CRNS), immer wieder Messungen mit dem EcoBot. Retour zur Schönen Aussicht.

09.07. Über das Teufelsegg zur AWS30 und wieder retour.

Wartung AWS30 (CRNS): Auslesen der Daten.

Situation:

Schneegrenze unterhalb L5. Warme Sommertage mit 1/8-6/8 Bewölkung und knapp 10°C auf 3000 m. Leichter katabatischer Wind.



Abbildung 19: Studierende des ACINN bei der Datenakquisition der Lehrveranstaltung Feldkurs für Atmosphärenwissenschaften. Foto: Rainer Prinz, 09.07.2023.



Abbildung 20: Der Hintereisferner ist bereits bis über 2800 m schneefrei. Foto: Rainer Prinz, 09.07.2023.

D.2.3 Feldkampagne 15.08. – 10.09.2023: Massenbilanzkampagnen während HEFEX II

Ziel der Feldkampagne:

- Pegelablesung Hintereisferner
- Pegelbohrung
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, Lindsey Nicholson, Marie Schroeder, Annelies Voordendag, Claudine Charrondière – ACINN

Ausgeführte Arbeiten:

Die Station Hintereis war von 15.08.-10.09. durchgehend besetzt, um die Messungen der glazial-meteorologischen Kampagne HEFEX II zu gewährleisten. In diesem Zuge wurden Pegelablesungen und Neubohrungen durchgeführt. Hier sind nur jene Personen aufgelistet, die Massenbilanzmessungen unternommen haben.

Pegelbohrungen: 18.08.: L5 (LIDAR); 01.09.: 104, 105; 02.09: 71, 51, 22, L8

04.09.: Niederschlagswaage Station Hintereis neu befüllt.



Abbildung 21: Bohren von Ablationspegeln. Foto: Lindsey Nicholson 18.08.2023

D.2.4 Feldkampagne 05+06.09.2023

Ziel der Feldkampagne:

- Pegelablesung Kesselwandferner
- Bohren von Ablationspegel
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, Emily Collier – ACINN

Ausgeführte Arbeiten:

Am 05.09. nachmittags zum Hochjochhospiz. Übernachtung.

Am 06.09. auf den KWF. Bohren der Pegel 10 und 16. Pegel 8 und 14 werden aufgelassen. Ablesung aller Pegel (außer 14). Dichtemessung bei K19. Pegelstangendepot (30) am Gletscherende, direkt neben dem Steig. Der Bohrer (Nr 417) am Hospiz funktioniert ausgezeichnet. 8+4 m Schlauch, beide Gasanschlüsse, 1 volle Kartusche CV470.

Situation:

Kein Altschnee mehr am Gletscher, aber noch stabile Spaltenbrücken aus Altschnee. In den obersten Regionen noch Reste des Schneefalls von Ende August.

Sehr warme Spätsommertage mit 0/8-1/8 Bewölkung und $>10^{\circ}\text{C}$ auf 3000 m. Im Rofental Taleinwind, sonst kaum Wind, selbst am KWF kaum katabatischer Wind. Eisoberfläche in der Früh gefroren. Deutlicher Anstieg der Schmelze im Tagesverlauf.



Abbildung 22: Bohren von Pegel K16 am Kesselwandferner. Foto: Rainer Prinz, 06.09.2023.

D.2.5 Feldkampagne 27.09.2023 Abschlussbegehung HEF

Ziel der Feldkampagne:

- Pegelablesung Hintereisferner
- Schneedichtemessung
- Wartung und Auslesen der Wetterstationen und Sensoren
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, Michael Leiter – ACINN
- Andrea Bruckmeier – Institut für Geografie, Universität Innsbruck
- Moritz Mairl - Institut für Ökologie, Universität Innsbruck

Ausgeführte Arbeiten:

Mit dem Helikopter knapp unterhalb des Weißkugeljoches. Ablesen aller zugänglichen Pegel am Hintereisferner.

Schneedichtemessung bei Pegel 104.

Wartung AWS30 (CRNS): Auslesen der Daten. Ausrichten der Station (waagrecht und Windrichtung).

Auslesung der Daten: SmartStake, AWS28 (SR50) und AWS27.

Situation:

Kein Altschnee mehr am Gletscher. Max. 25 cm Schnee vom 23.09.

Sehr warmer Spätsommertage mit 0/8-1/8 Bewölkung und 10°C auf 3000 m. Schwache Südföhnlage, leichter katabatischer Wind. Schneeoberfläche in der Früh gefroren. Anstieg der Schmelze im Tagesverlauf.



Abbildung 23: Der SmartStake am Hintereisferner misst automatisch die Ablation über das Aufwickeln einer ins Eis eingebrachte Schnur, die durch Ablation freigegeben wird. Foto: Rainer Prinz, 27.09.2023.



Abbildung 24: Der obere Teil des HEF ist unangenehm überschneit. Die Spaltenzonen sind nicht sicher zu durchqueren. Foto: Rainer Prinz, 27.09.2023.

D.3 Dokumentation sonstiger Feldarbeiten in Vent und im Rofental

D.3.1 Feldkampagne 26.12.2022: Im Hinteren Eis

Ziel der Feldkampagne:

- Überprüfung Stromversorgung IHE
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, Georg Kaser – ACINN

Ausgeführte Arbeiten:

Anmarsch von der Bergstation des Hintereisliftes ins Hintere Eis. Die Stromversorgung war am 24.12.2022 zusammengebrochen. Nach Überprüfung der möglichen Fehlerquellen war klar, dass das Kabel von der Bergstation des Hintereisliftes beschädigt sein musste. Eine Reparatur kann also nur im Sommer erfolgen.

Situation:

Warmer Wintertag mit $\sim -4^{\circ}\text{C}$ auf 3000 m. Lebhafter Westwind im Vorfeld einer Kaltfront, ab Mittag stark. Bewölkung 3-6/8.

D.3.2 Reparatur Stromversorgung im Hinteren Eis 24.08.2023

Teilnehmer

- Elektrotechnik Permoser – 2 Personen (Manuel und Chef Christian)
- Rainer Prinz, Annelies Voordendag – ACINN
- Philipp Kofler – Schnalstaler Gletscherbahnen

Ausgeführte Arbeiten

Auffahrt mit PK zur Talstation Hintereislift, dann mit Lift zur Bergstation. Aufstieg IHE (RP und Manuel). Sichtkontrolle der Kunstharzmuffe im Schacht alte – neue Leitung. Muffe kaputt (entweder nie ausgehärtet oder falsches Harz verwendet). Muffe sah im März 2023 noch gut aus! Abklemmen der Leitungen aus dem Schaltschrank, Isolationsmessung – erfolglos.

Hochspannungsmessung ergab mehrere Kabelfehler im Bereich des Sees. Freilegen des Kabels aus dem See und dem Erdreich. Durch genügend Kabellänge konnten zwei Fehlstellen (Blitzteffer) entfernt und das Kabel neu verbunden werden, ohne ein Ersatzkabel zu benötigen.

Muffe in der Verbindung alt – neu durch Kabelklemmen und Schrumpfschlauch ersetzt.

Das Kabel besteht aus drei Teilleitungen.

1. Bergstation Hintereislift – 1. Schacht (~50 m nach Station): Vermutlich 5-polig, 16 mm², Gummikabel.
2. 1. Schacht – Schacht alt-neu: altes Kabel. 4-polig, 50 mm², SM, Erdkabel: Hier ist eine Phase auf gelb-grün gelegt, wird oben mit grau weitergeführt).
3. Schacht alt-neu – IHE: neues Kabel: 5-polig, 16 mm², Gummikabel

Isolationsmessung: Kabel fehlerfrei – siehe Bericht der Messwerte von Elektrotechnik Permoser.

Im Schaltschrank IHE alle drei Phasen aufgelegt und angeschlossen.

PC im Container kaputt. PC ins Tal gebracht, Container sicherheitshalber ausgeschaltet, Fenster noch ausgehängt, keine Webcambilder.

Noch zu erledigen – PK hat sich bereit erklärt diese Arbeiten auszuführen.

- 2 Überspannungsableiter Bergstation Hintereislift defekt.
- Kleinere Beschädigung des alten Kabels zwischen 1. Schacht und See sollte noch mit einer Muffe geflickt werden.

Am 25.08. wurde die Stromversorgung wieder unterbrochen.

D.3.3 Reparatur Stromversorgung im Hinteren Eis 13.10.2023

Teilnehmer

- Rainer Prinz, Philipp Vettori – ACINN

Vorgeschichte

Nach dem Defekt am 24.12.2022 wurde die Stromleitung in Hintere Eis am 24.08.2023 durch die Firma Elektro Permoser repariert und dreiphasig angeschlossen. Wetterstation und Container hatten wieder Strom, Details zur Funktionalität der Geräte konnten aufgrund Zeitmangels nicht erhoben werden, außer dass der PC im Container kaputt war und nach Innsbruck gebracht wurde. Philipp Vettori bemerkte Schäden der Ultraschallwindsensoren, die keine oder unklare Signale sandten.

Die Stromversorgung lief allerdings nicht stabil, weil vermutlich nicht alle Schadstellen im Kabel gefunden und repariert wurden. So fiel der Strom am 03.09. wieder aus. Philipp Kofler konnte dankenswertereise kleinere Reparaturen durchführen und am 08.09. die Versorgung wieder herstellen.

Am 10.09. konnte Rainer Prinz einen neuen PC in den Container bringen. Trotz Strom an der Wetterstation konnte keine Stromversorgung in den Container hergestellt werden. Aufgrund des wartenden Helikopters blieb keine Zeit für nähere Analysen.

Am 14.09. brach die Stromversorgung ins Hintere Eis schließlich wieder zusammen.

Ausgeführte Arbeiten

Auffahrt mit Arbeiter der Schnalstaler Gletscherbahnen zur Talstation Hintereislift, weiter mit Lift zur Bergstation.

Strom: Im Verteilerkasten Bergstation Hintereislift war nur eine Phase zur Versorgung ins Hintere Eis angeschlossen (grau). Am Neutralleiter fehlt der Überspannungsschutz (**ersetzen!**). Die Sicherung war gefallen, konnte allerdings stabil eingeschaltet werden. Im Hinteren Eis lieferten alle drei Phasen Strom. Es sind im Kabel also irgendwo alle Phasen miteinander verbunden (vielleicht in der Kunstharzmuffe im ersten Schacht wenige Meter nach der Bergstation??). Wir entschieden uns, wieder auf das alte Setup (vor der Reparatur des Kabelschadens) zu wechseln. Es wurden die vermutlich beschädigten Phasen im Hinteren Eis blind gelegt und die Versorgung läuft somit nur über eine Phase (grau). Interessanterweise funktioniert somit auch wieder die Stromversorgung im Container.

Datenverbindung: Der Router am Mast der Wetterstation konnte sofort eine Datenverbindung von der Wetterstation nach Innsbruck aufbauen. Allerdings konnten wir aus dem Container den Router am Mast nicht erreichen. Diese Verbindung ist essenziell für den Fernzugriff auf den Laserscanner. Die

Stecker an beiden Enden des LAN-Kabels Container-Mast zeigten Einwirkung von Überspannung, der LAN-Überspannungsableiter im Container war defekt, die Lan-Buchse (Nr. 3) am Router im Mast ebenso. Wir vermuten eine Induktion aufgrund eines Blitzschlages. Wir konnten beide Stecker und den Überspannungsableiter ersetzen und die Verbindung über eine alternative Buchse wieder herstellen. Der Antenne am Mast fehlt die Abdeckung. Ein **Ersatz der Antenne** muss mit den zuständigen Funktechnikern von Land Südtirol vereinbart werden. Der provisorisch ersetzte **Überspannungsableiter** im Container muss mit dem baugleichen Modell ersetzt werden.

Sensoren:

- Der PC im Container wurde wieder an die USV angeschlossen und läuft problemlos. Verbindungen zu allen Datenloggern im Hinteren Eis und Station Hintereis wurde aufgebaut.
- Die Steuerung des Laserscanners braucht noch Feinschliff. Durch das Update des PC und sämtlicher Software haben sich Änderungen in den Abhängigkeiten der Softwarepakete ergeben. Die **Aktualisierung der Steuerung des Laserscanners** sollte über Fernzugriff möglich sein.
- Die Fenster wurden wieder eingehängt und lassen sich über den PC steuern.
- Die Webcams funktionieren einwandfrei.
- Das Netzteil des Metek 3D-Anemometers ist defekt und muss **ersetzt** werden. Provisorisch versorgt nun ein Netzteil eines Ventus 2D-Anemometers das Metek.
- Von den drei Ventus 2D-Anemometern funktioniert nur das oberste. Ob es sich um einen Soft- oder Hardware Fehler handelt, kann Philipp Vettori über Fernzugriff ermitteln.
- Die Ventilation des Strahlungssensors ist defekt, aber nicht entscheidend.
- Der Schneehöhensensor ist defekt. Dieser hat sich am Standort aber ohnehin als nutzlos herausgestellt.
- Beide Temperatur- und Feuchtesensoren funktionieren einwandfrei.
- Das Pluviometer wurde neu mit Frostschutz und Öl befüllt (12:10 -12:20 MESZ). Im Container ist kein Frostschutz mehr vorrätig und muss bei Gelegenheit wieder **deponiert** werden.

Rückmarsch zu Fuß ab ca. 14 Uhr ins Tal (15:30).

Am 21.10. brach die Stromversorgung oder zumindest die Datenverbindung wieder zusammen.

Situation

Sehr warmer Herbsttag mit etwa 6°C auf 3000 m. Bewölkung 1-3/8. Auflebender Wind aus SW mit aufkommender Südföhnlage.