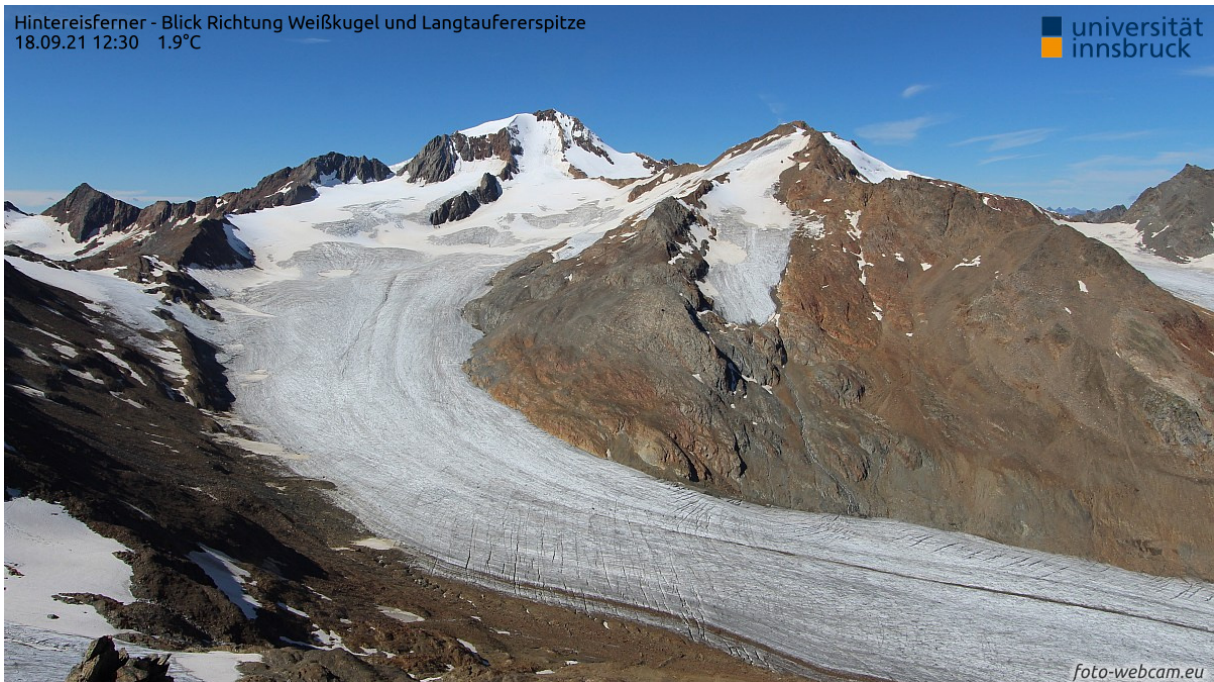

HINTEREIS- und KESSELWANDFERNER MASSENHAUSHALTSSTUDIEN

Abschlussbericht über das Haushaltsjahr 2020/21
- inklusive der Auswertungen der Niederschlagsmessung im Rofental



Der Hintereisferner zum Zeitpunkt der maximalen Ausaperung am 18.09.2021. Foto: automatische Kamera im Hinteren Eis

HINTEREIS- und KESSELWANDFERNER MASSENHAUSHALTSSTUDIEN

Abschlussbericht über das Haushaltsjahr 2020/21

Innsbruck, im November 2021

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: Univ. Prof. Dr. Mathias Rotach
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 2020/21.

Inhaltsverzeichnis

A.	Zusammenfassung	A-1
B.	Einleitung.....	B-4
B.1	Lage des Untersuchungsgebietes.....	B-4
B.2	Methodik.....	B-4
B.3	Gletscherflächen und Messnetz	B-7
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-13
C.4	Niederschlagsmessungen im Rofental.....	C-18
C.4.1	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 08.-09.05.2021 – Winterbilanz am HEF	D-2
D.2.2	Feldkampagne 09.07.2021	D-6
D.2.3	Feldkampagne 05.-06.08.2021	D-7
D.2.4	Feldkampagne 14.-15.08.2021	D-9
D.2.5	Feldkampagne 07.09.2021: KWF	D-10
D.2.6	Feldkampagne 14.-15.09.2021	D-12
D.2.7	Feldkampagne 25.09.2021	D-14
D.3	Dokumentation sonstiger Feldarbeiten in Vent und im Rofental	D-17
D.3.1	Feldkampagne 10.11.2020: Wetterstation Hintereis	D-17

D.3.2	Feldkampagne 17.12.2020: AWS 28: SCHISM Winterkampagne 2021.....	D-19
D.3.3	Feldkampagne 18.02.2021: MOMAA HEZ.....	D-21
D.3.4	Feldkampagne 22.02.2021: Abbau AWS 28	D-22
D.3.5	Feldkampagne 24.02.2021: Fensterreparatur Container IHE	D-24
D.3.6	Feldkampagne 29.07.2021: Wartung IHE, Smart Stake	D-26
D.3.7	Feldkampagne 19.08.2021: Im Hinteren Eis.....	D-28
D.3.8	Feldkampagne 07.09.2021: Fensterreparatur Container IHE	D-29

A. ZUSAMMENFASSUNG

Für den **Hintereisferner** brachte das Haushaltsjahr 2020/21 mit **-668 mm w.e.**¹ (Tabelle 1) eine negative Massenbilanz. Die Winterbilanz mit 1219 mm w.e. liegt am Durchschnitt der letzten 10 Jahre. Die ELA liegt auf 3095 m. Den Verlauf des Massenbilanzjahres prägte ein Winterhalbjahr mit dem niederschlagsreichsten Dezember seit Beginn der Aufzeichnungen. Aufgrund des kühlen Frühlings konnte die Winterschneedecke bis in den Sommer konserviert werden. Sommerliche Neuschneefälle konnten die Ablation oberhalb ~3000 m immer wieder merklich unterbinden, wovon vor allem der Kesselwandferner profitierte. Insgesamt führte aber der zu warme Sommer aber schließlich zu einer negativen Massenbilanz, die im Bereich des langjährigen Mittels der gesamten Zeitreihe liegt, aber deutlich positiver als das Mittel der letzten 10 Jahre ausfällt.

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

Tabelle 1: Kennzahlen des Bilanzjahres 2020/21 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]
	6142	7485157	1219	-11587900	-1887	-4102743	-668
S _C [10 ³ m ²]	2466		B _C [m ³ w.e.]	1123423		b _C [kg/m ²]	456
S _A [10 ³ m ²]	3676		B _A [m ³ w.e.]	-5226166		b _A [kg/m ²]	-1422
ELA	3095	m a.s.l.	S _C /S _A	0.671		AAR	0.402

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 2020/21 mit **-183 mm w.e.** nur ein schwach negatives Bilanzjahr (Abbildung 1 und Tabelle 2). Die ELA liegt bei 3177 m a.s.l.

Tabelle 2: Kennzahlen des Bilanzjahres 2020/21 für den Kesselwandferner

		gesamtes Jahr			
		Fläche	B	b	
		[10 ³ m ²]	[m ³ w.e.]	[mm w.e.]	
		3549	-649090	-183	
S_C [10³ m²]	1894		B_C [m³ w.e.]	766711	b_C [mm w.e.]
S_A [10³ m²]	1655		B_A [m³ w.e.]	-1415801	b_A [mm w.e.]
ELA	3177	m.a.s.l.	S_C/S_A	1.145	AAR
					0.534

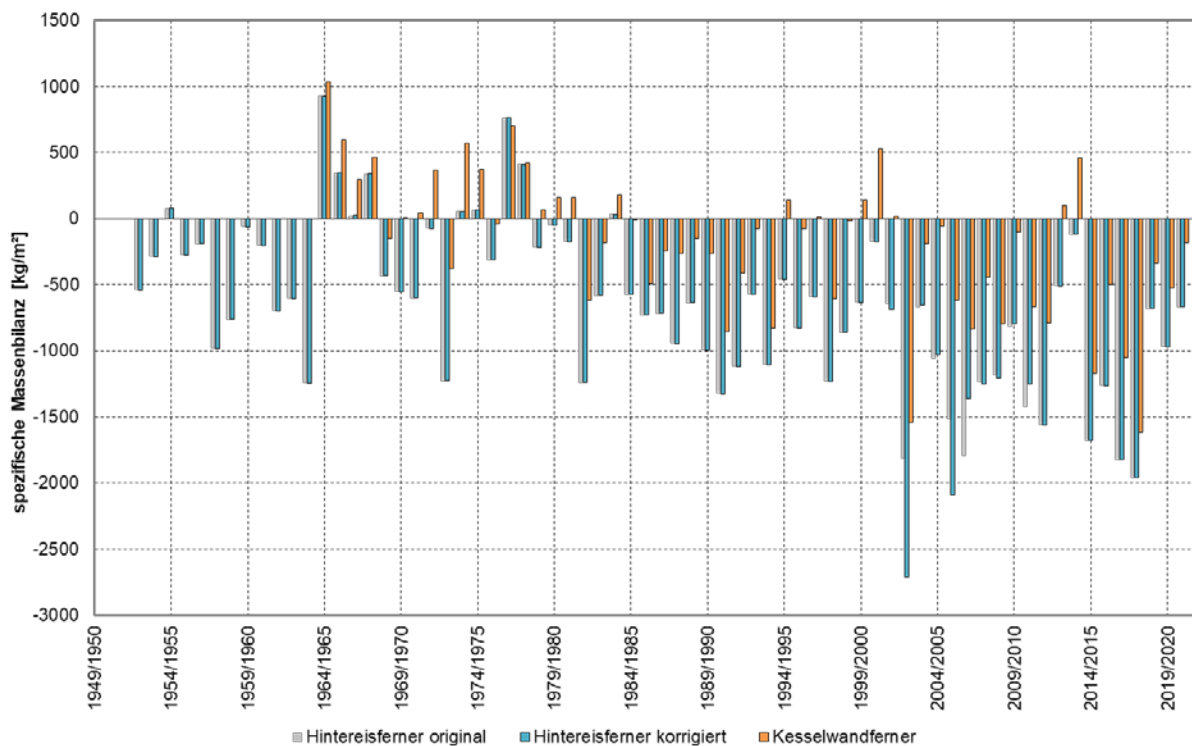


Abbildung 1: Die Massenbilanzreihen des Hintereis- und Kesselwandferners (Quelle: ACINN). Die Bilanzjahre 2001 – 2011 wurden für den HEF nach Klug et al. (2018) korrigiert.

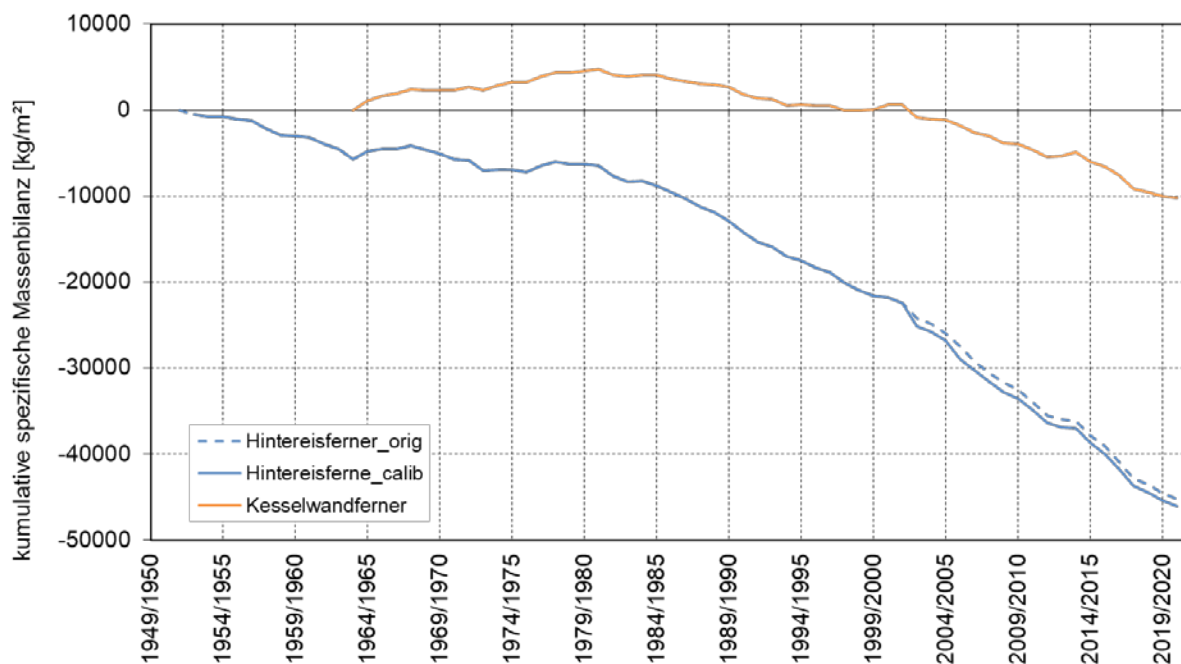


Abbildung 2: Die kumulativen Massenbilanzreihen des Hintereis- und Kesselwandferners (Quelle: ACINN). Die Massenbilanz am HEF wurde 2001-2011 nach Klug et al. (2018) korrigiert.

Besonderheiten

Auch die (Feld)Arbeiten im Haushaltsjahr 2020/21 waren von der COVID-19 Pandemie geprägt, die arbeitsrechtliche Einschränkungen mit sich brachte. Von November 2020 bis Ende Mai 2021 waren den Mitarbeiter/innen der Universität Innsbruck Feldarbeiten untersagt. Für die Messung der Winterbilanz am 08.05. konnte eine Ausnahme unter strengen Auflagen erwirkt werden.

Im Haushaltsjahr 2020/21 wurde der Niederschlag im Rofental erstmals nicht mittels Totalisatoren ermittelt, sondern über Niederschlagswaagen. Siehe Kapitel C.4 für weiter Erläuterungen.

B. EINLEITUNG

B.1 Lage des Untersuchungsgebietes

Der Hintereisferner (HEF) und der Kesselwandferner (KWF) liegen im Rofental (Abbildung 3), 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 schutfreien 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 Stationsfernens (SF) und des Langtaufererjochfernens (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., 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 .

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

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 $b = 0$.

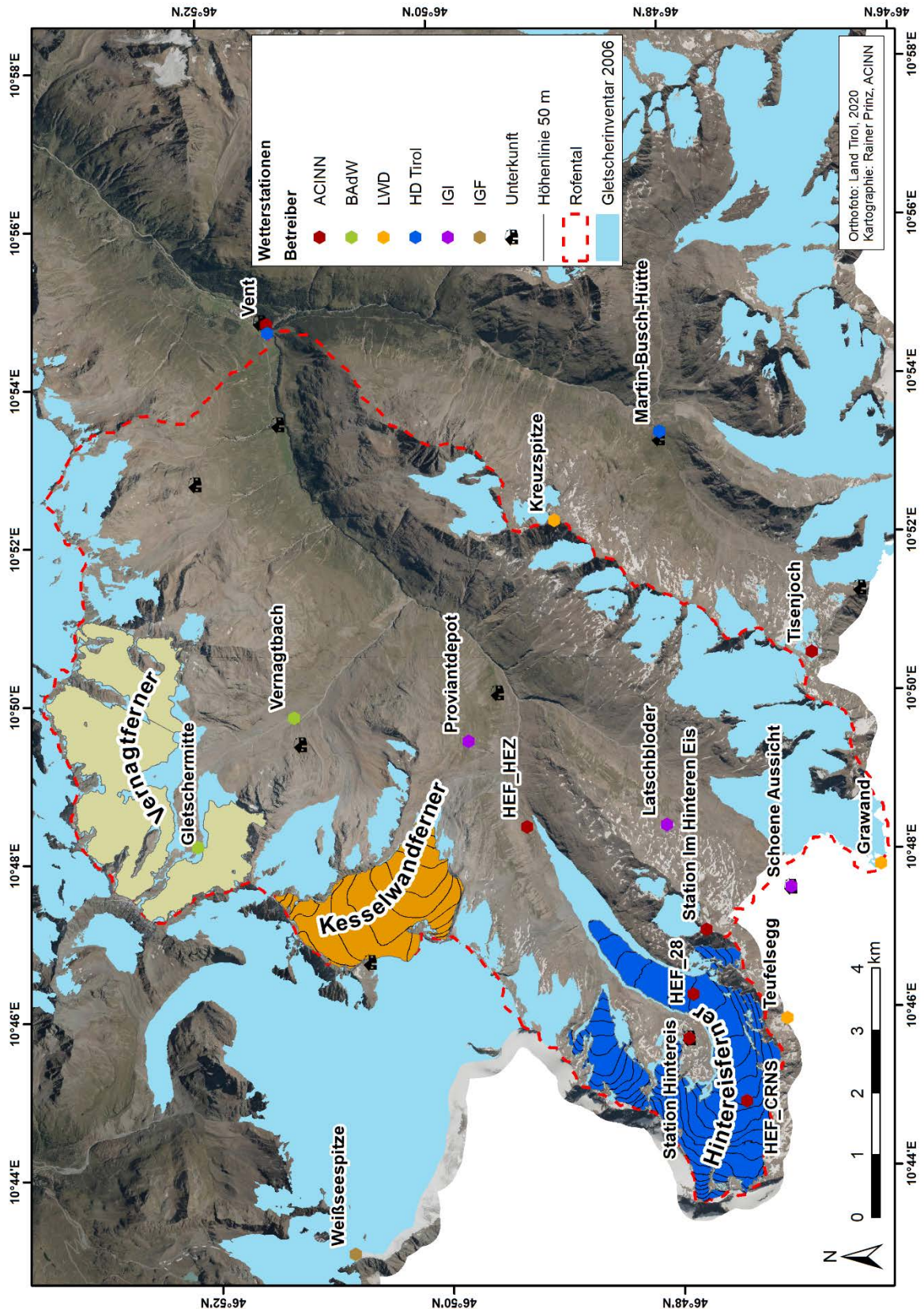


Abbildung 3: Übersichtskarte des Rofentals mit der Lage der Gletscher und automatischen Wetterstationen. Der Laserscanner befindet sich bei der Station Im Hinteren Eis.

Im September 2016 wurde im Hinteren Eis ein permanenter Laserscanner und im Laufe des Sommers 2017 eine automatische Wetterstation (Station Im Hinteren Eis, Abbildung 3) 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 2020/21 wurden dieselben Eisränder wie im vorigen Berichtsjahr verwendet:

- HEF Stand 2018, aufgrund der Vermurung an der Zunge (Ende August 2020) aktualisiert mittels einer Sentinel-2 Szene (Oktober 2020) und im Gelände validiert (09.07.2021);
- KWF Stand 2018 (auf Basis des Laserscan Geländemodelles des Landes Tirol).

Die Gletscherfläche des HEF beträgt 6,141 km², jene des KWF 3,589 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 Spaltenbildung konnten im Sommer 2021 einige Pegel nicht mehr aufgesucht werden bzw. liegen die obersten Pegel zum Teil unter Firn und Winterschnee begraben. Schneehöhen und Schneedichten der Massenrücklagen wurden bei den Abschlussbegehungen ermittelt: HEF (15.+25.09.2021), KWF (07.09.2021).

Die Ausaperung am HEF wurde 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. Trotz immer wieder auftretender Störungen in der Stromversorgung kann der Verlauf sowie der Maximalstand der Ausaperung, heuer am 18.09.2021, hinreichend festgehalten werden.

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

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

	Vent	Station Hintereis	HEF_28 ¹	HEF_HEZ ²	HEF_CRNS ²	Im Hinteren Eis	Tisenjoch
Lufttemperatur	+	+	-	+	+	+	+
Feuchte	+	+	-	+	+	+	+
Windgeschwindigkeit	+	+	-	+	+	+	+
Windrichtung	+	+	-	+	+	+	+
Strahlung (4 Komponenten)	-	+	-	-	+	+	+
Luftdruck	+	+	-	+	+	+	+
Schneehöhe	+	+	+	-	+	+	+
Bodentemperatur	-	+	-	+	+	-	-
Niederschlag	+	+	-	-	-	+	-
3D Anemometer	-	-	-	-	-	+	-
Schneedrift	-	+ ²	-	-	+	+ ²	-
Schneewasseräquivalent	-	-	-	-	+	-	-
¹ nur während der Ablationsperiode; 2021 nur Schneehöhe							
² zur Zeit nur Fallstudien; nicht im Regelbetrieb							

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 2019-2021 auf 15 Pegel reduziert. Zwei Pegelpositionen (K1, K2) nahe der Gletscherzunge haben sich durch den Gletscherrückgang erübrigt, weitere zwei Positionen (K7, K13) waren nicht repräsentativ. Zwei Positionen (SS1, SS2) wurden zur zusätzlichen Messung der Akkumulation (sofern vorhanden) festgelegt. Zur Bestimmung der Massenbilanz im Haushaltsjahr 2020/21 wurden 14 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 2020/21 lagen etwa 20% über dem Mittel der Klimanormalperiode 1981-2010 (Tabelle 4 und Abbildung 4). Auf einen extrem trockenen November (-87%) folgte der niederschlagsreichste Dezember (+230%) seit Beginn der Aufzeichnungen und ein feuchter Jänner (+93%). Von Februar bis April hingegen waren die Niederschläge unterdurchschnittlich (-57%). Die daraus resultierende Winterbilanz liegt im Mittel der letzten 10 Jahre. Obwohl die Monate März-Mai zu kalt ($-1,0^{\circ}\text{C}$) waren, war der Effekt auf die Winterbilanz durch die unterdurchschnittlichen Niederschläge gering. Die Schneedecke konnte zumindest bis in den Juni konserviert werden.
- Auch im Sommerhalbjahr lagen die Niederschläge in fast allen Monaten deutlich über dem langjährigen Mittel, besonderes im August. Im gesamten Haushaltsjahr summierten sich die Niederschläge in Vent auf 778 mm, damit auf etwa 15% über dem Durchschnitt.
- Die Lufttemperatur übersteigt das langjährige Mittel (1981-2010) des hydrologischen Jahres um $0,8^{\circ}\text{C}$, wobei die positive Abweichung im Sommerhalbjahr überwiegt (Tabelle 4). Deutlich zu warm waren vor allem die Monate November, Februar, Juni und September (Abbildung 5).
- Der Winter lag um $0,2^{\circ}\text{C}$ und der Sommer um $1,6^{\circ}\text{C}$ über dem langjährigen Mittel.
- Trotz des warmen Sommers gab es sommerliche Neuschneefälle mit wenigen cm (30.06., 06.07., 01.08., 04.08., 27.08.). Am 29.+30.08. fielen oberhalb ~ 3000 m sogar knapp 40 cm Schnee, die zum Teil bis zum Ende des Haushaltsjahres überdauerten. Besonders am Kesselwandferner, der nur geringe Flächenanteile unterhalb 3000 m aufweist, konnte die Reflektionseigenschaft des frischen Schnees die Ablation merklich unterbinden.
- Bis Ende August war dennoch das Gletschereis unterhalb etwa 3100 m größtenteils aper. In den höheren Bereichen konnten sich aufgrund der großen Schneemengen im Winter zum Teil geschlossene Akkumulationsfelder erhalten.

- Die warme Witterung bis Mitte September führte noch zu geringer Ablation bis in die höchsten Lagen der Gletscher, wo Schneefälle am 19.09. die Ablationssaison beendeten. Nach den Schneefällen am 04.10. endet die Ablationsperiode auch an der Gletscherzunge mit der einer dauerhaften Schneedecke.

Tabelle 4: Monatsmittel der Lufttemperatur und Monatssummen des Niederschlages an der Station Vent. Das Huashaltsjahr 2020/21 im Vergleich zur Klimanormalperiode 1981-2010.

Monat	Lufttemperatur (°C)			Niederschlag (mm)		
	1981-2010	2020/21	Abweichung	1981-2010	2020/21	Abweichung
Oktober	3.7	2.6	-1.1	57	108	51
November	-2.0	0.4	2.4	59	8	-52
Dezember	-2.9	-4.2	-1.3	43	142	99
Jänner	-5.8	-7.7	-1.9	36	70	34
Februar	-5.9	-2.4	3.5	35	15	-20
März	-2.7	-3.8	-1.1	44	22	-22
April	0.6	-0.3	-0.9	42	15	-28
Winter	-2.4	-2.2	0.2	316	380	64
Mai	5.6	4.5	-1.1	65	44	-21
Juni	8.7	13.1	4.4	75	101	26
Juli	10.8	12.4	1.6	82	55	-27
August	10.2	10.4	0.2	87	150	63
September	7.0	9.9	2.9	54	48	-6
Sommer	8.5	10.1	1.6	363	398	35
Hydr. Jahr	2.1	2.9	0.8	679	778	99

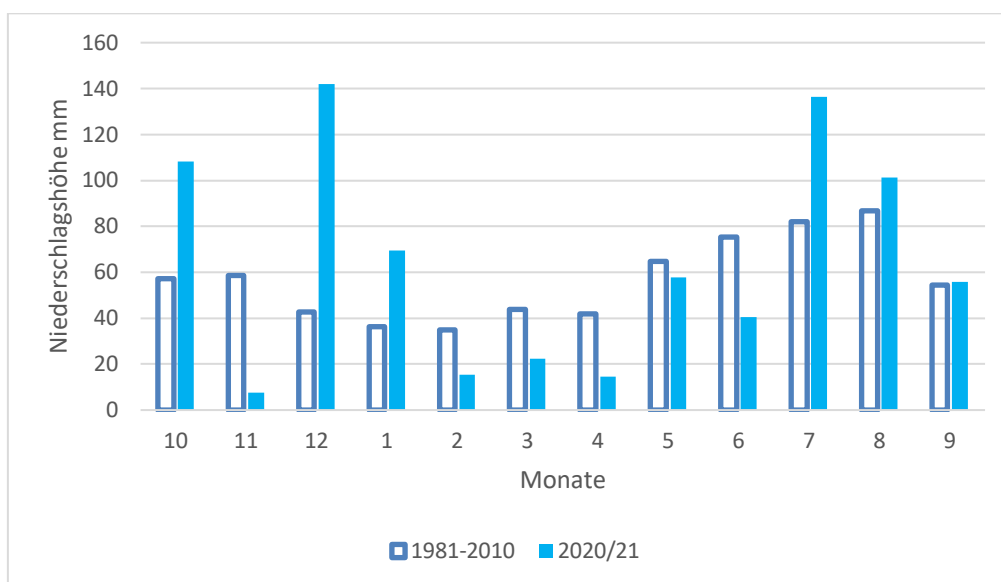


Abbildung 4: Die Monatssummen des Niederschlages an der Station Vent: Vergleich des langjährigen Mittels (1981-2010) mit dem hydrologischen Jahr 2020/21.

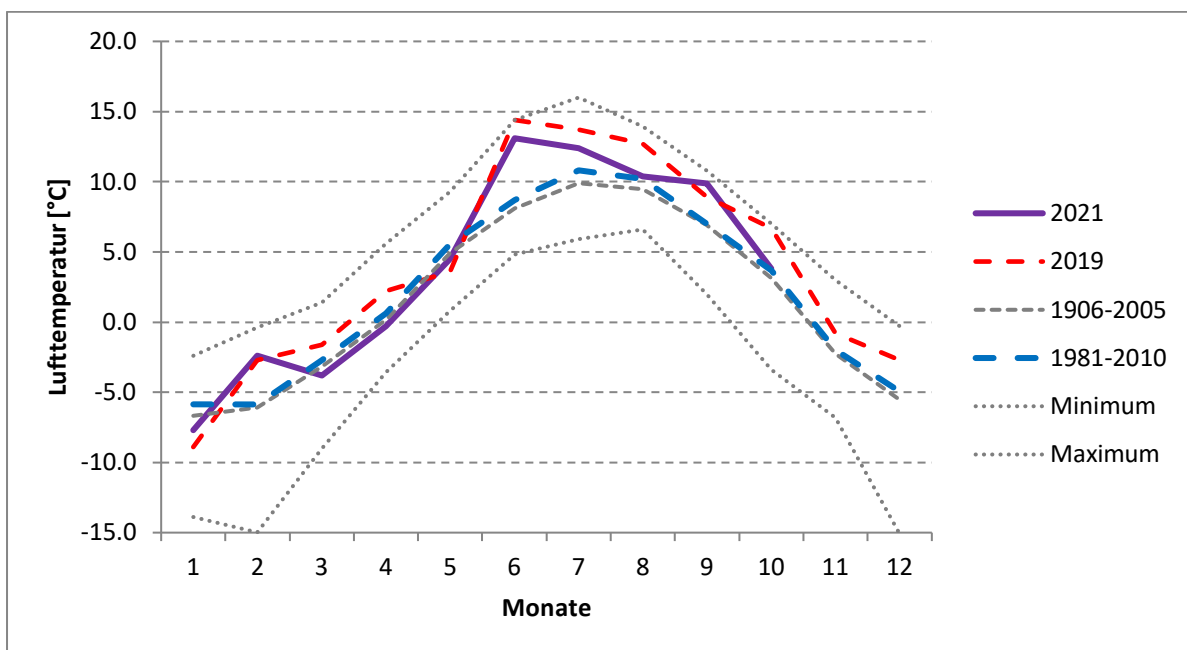


Abbildung 5: Die Monatsmittel der Lufttemperatur an der Station Vent: Vergleich der langjährigen Mittel (1906-2005 sowie 1981-2010) der Lufttemperatur mit den Jahren 2019 (bisheriger "Rekordsommer") und 2021. Der Juni und der Sommer 2019 (Juni bis August) waren die bisher wärmsten je an der Station in Vent gemessenen.

C.2 Massenbilanz Hintereisferner

C.2.1 Winterbilanz

Die Messungen zur Erstellung der Winterbilanz 2020/21 konnten aufgrund der arbeitsrechtlichen Beschränkungen im Zuge der COVID19 Pandemie mit Ausnahmegenehmigung an zwei Tagen, 08.+09.05.2021, durchgeführt werden. Ein Test eines Georadars der Universität Tübingen musste durch Auflagen gleichzeitig stattfinden. Jedoch durch Beschränkung der Teilnehmerzahl mussten Abstriche im Feldprogramm beider Messungen gemacht werden. Auf eine Korrektur der Winterbilanz zum 30.04. wurde verzichtet, da aufgrund der Witterung keine nennenswerten Änderungen in diesen wenigen Tagen zu erwarten war.

22 Schneehöhenmesspunkte und ein Schneeschacht (Tabelle 5 und Abbildung 6) zur Dichtemessung bildeten die Basis zur Analyse der Winterbilanz. Die Lage des Schneeschachtes wurde dem kurzen Zeitfenster und den zusätzlichen Arbeiten angepasst. Die stratigraphische Bestimmung des letztjährigen Oberflächenhorizontes im Akkumulationsgebiet erfolgte durch den harten, gefrorenen Horizont, der sich bereits bei der Abschlussbegehung am 01.10.2020, unterhalb des Septemberschnees 2020 zeigte. Bei den Sondierungen zur Winterbilanz wurde also die Akkumulation vom September 2020 mitgemessen, bei der Berechnung der Bilanz anhand der Daten aus dem Vorjahr aber wieder abgezogen.

Die Analyse der Winterbilanz ist Abbildung 6 und Tabelle 7 dargestellt. Das vertikale Bilanzprofil der Winterbilanz ist in Abbildung 9 abgebildet. Die detaillierten Mess- und Beobachtungswerte aus den Schneeschächten sind im Kapitel D.2.1 aufgelistet. Trotz der geringen Anzahl an Messpunkten ist die glaziologische Winterbilanz (1219 kg/m^2) quasi ident mit der geodätischen Winterbilanz (1235 kg/m^2) (Kapitel C.2.3).

Tabelle 5: HEF, Winterbilanz 2020/21: Schneehöhe, Dichte und Wasserwert der Schneeschächte für das hydrologische Winterhaushaltsjahr. Die Lage der Schneeschächte ist in Abbildung 5 und Abbildung 10 eingetragen.

Name	Höhe [m.a.s.l.]	Schneehöhe [cm]	Dichte [kg/m ³]	Wasserwert [kg/m ²]
PWB	2826	262	407	1003

Die mittlere spezifische Winterbilanz des Hintereisferners 01.10.2020-30.04.2021 beträgt:

$$b_w = 1219 \text{ mm w.e. (= kg/m}^2\text{)},$$

$$B_w = 7,485 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ Wasser}$$

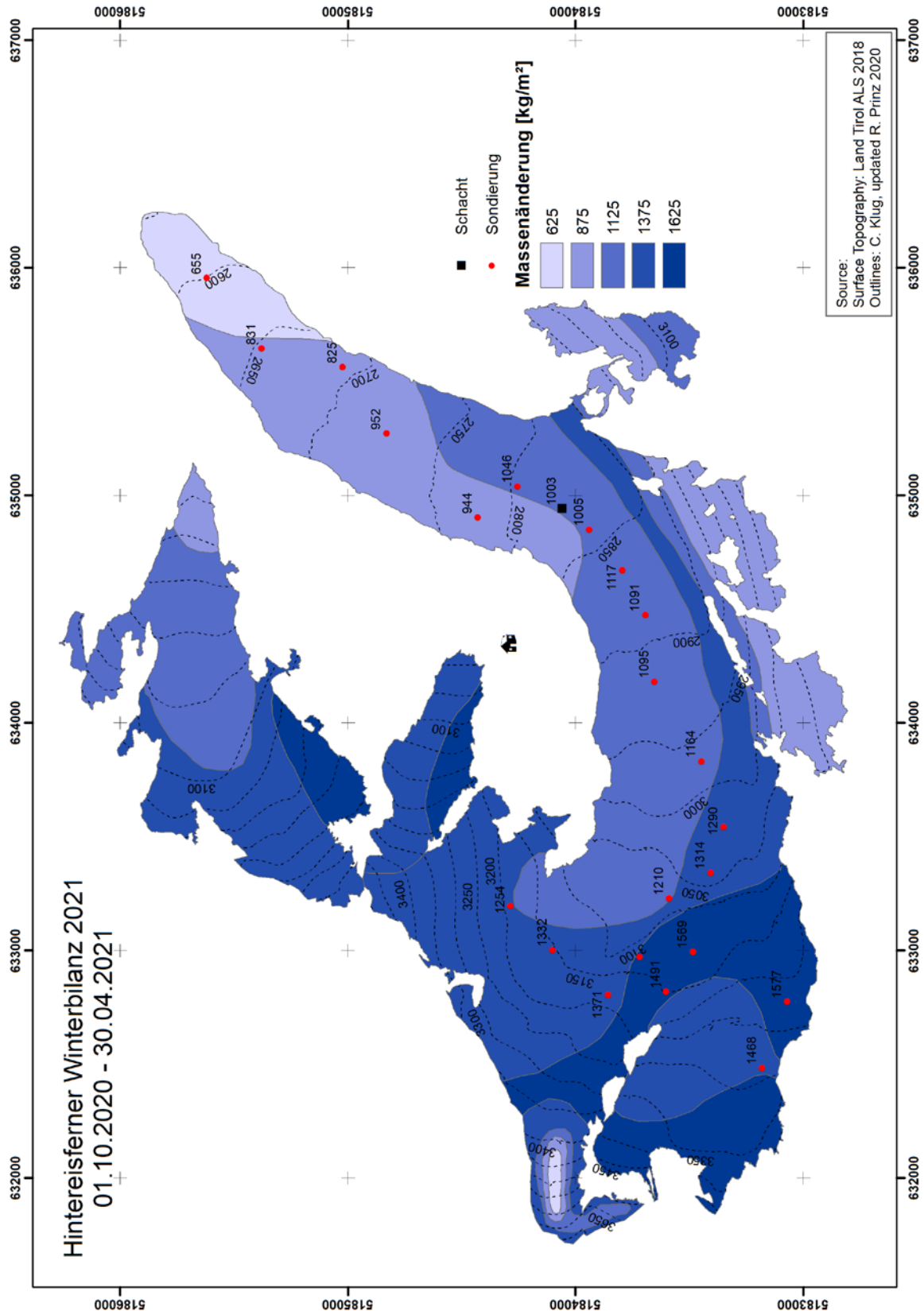


Abbildung 6: Punktwerte und räumliche Verteilung der Massenbilanz im Winterhaushaltsjahr am Hinterseesferner (01.10.2020 – 30.04.2021).

C.2.2 Jahresbilanz

Der Bestimmung der Ablation im Haushaltsjahr 2020/21 liegen Messungen und Beobachtungen aus sechs Feldkampagnen und an 28 Pegeln und Messpunkten zugrunde (Tabelle 6). Aufgrund der starken Spaltenbildung konnten die Firnpegel nur eingeschränkt erreicht werden. Die Abschlussbegehung am HEF fand am 14.09. (Pegelablesungen) und am 25.09.2021 (Akkumulationsmessungen) statt. Die Punktwerte sind neben den vertikalen Bilanzprofilen in Abbildung 9 sowie in Abbildung 10 eingetragen. Tabelle 7 zeigt die Bilanzwerte nach Höhenstufen sowie alle weiteren Kennwerte der Massenbilanz 2020/21. Eine Validierung der Interpolation der Punktwerte auf die Fläche bildet der Vergleich mit der geodätischen Massenbilanz aus der Höhenänderung von zwei Laserscans (Abbildung 9 und Kapitel C.2.3).

Aufgrund des kühlen Frühjahres konnte sich die Winterschneedecke mit ihren günstigen Reflektionseigenschaften in den Juli halten und somit trotz der hohen Lufttemperaturen im Juni die Eisablation merklich unterbinden. Dennoch war bis Ende August das Gletschereis unterhalb etwa 3100 m größtenteils aper. Obwohl der Sommer 2021 zu warm war, gab es immer wieder sommerliche Neuschneefälle, besonders ergiebig Ende August. Dieser Schnee konnte den warmen September oberhalb von etwa 3000 m überdauern und führte in tiefer gelegenen Bereichen zur einer Verminderung der Eisablation. In den höheren Bereichen konnten sich zum Teil geschlossene Akkumulationsfelder erhalten. Das Rücklagenmuster zum Zeitpunkt der maximalen Ausaperung ist in den Jahren 2020 und 2021 sehr ähnlich (Abbildung 7 und Abbildung 8).

Während des glaziologischen Geländepraktikums an der Schönen Aussicht (22.-24.09.) wurden mit einer mobilen Wetterstation alle Energieflüsse an der Gletscheroberfläche des Hochjochferners gemessen, um die Schmelze an den schönen Spätsommertagen zu berechnen. Anhand dieser Berechnungen wurde die Ablation zum 30.09. am Hintereis- und Kesselwandferner korrigiert. Die Bestimmung der Oberfläche von 2020 im Schacht P110 war problemlos.

Die mittlere spezifische Massenbilanz des Hintereisferners für das hydrologische Haushaltsjahr
01.10.2020 – 30.09.2021 beträgt: $b = -668 \text{ mm w.e.}$ ($= \text{kg/m}^2$),

Das entspricht: $B = -4,103 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ Wasser

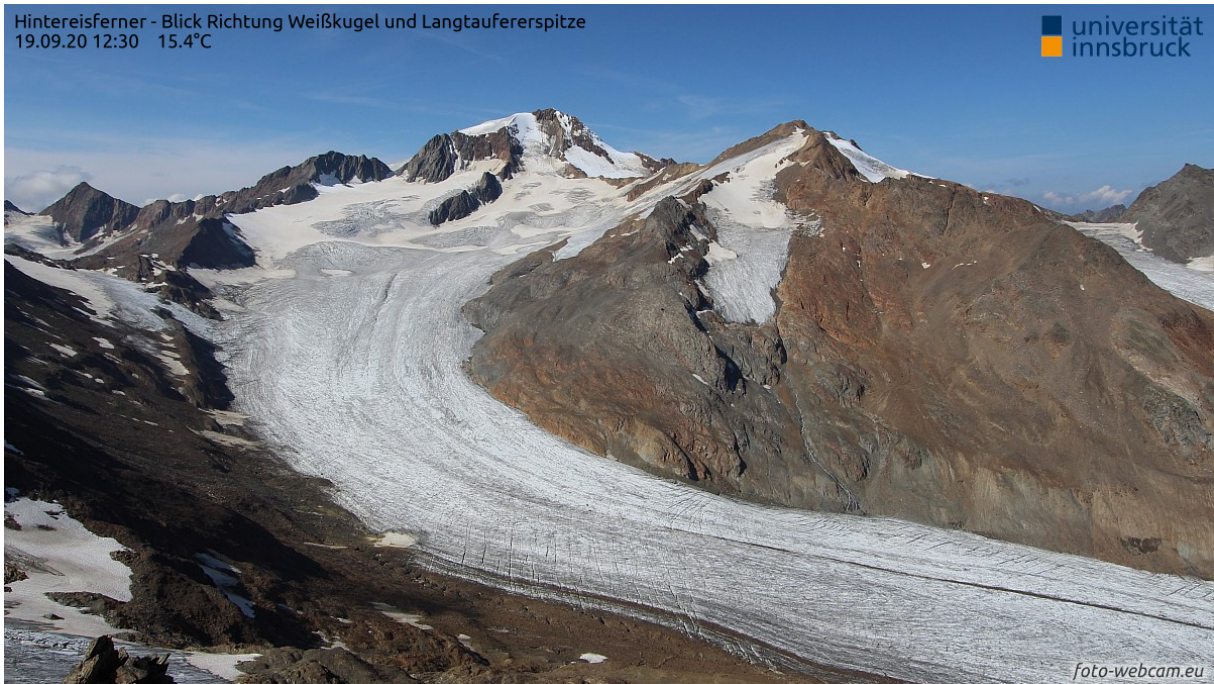


Abbildung 7: Die maximal Ausaperung des Hintereisferners am 19.09.2020.

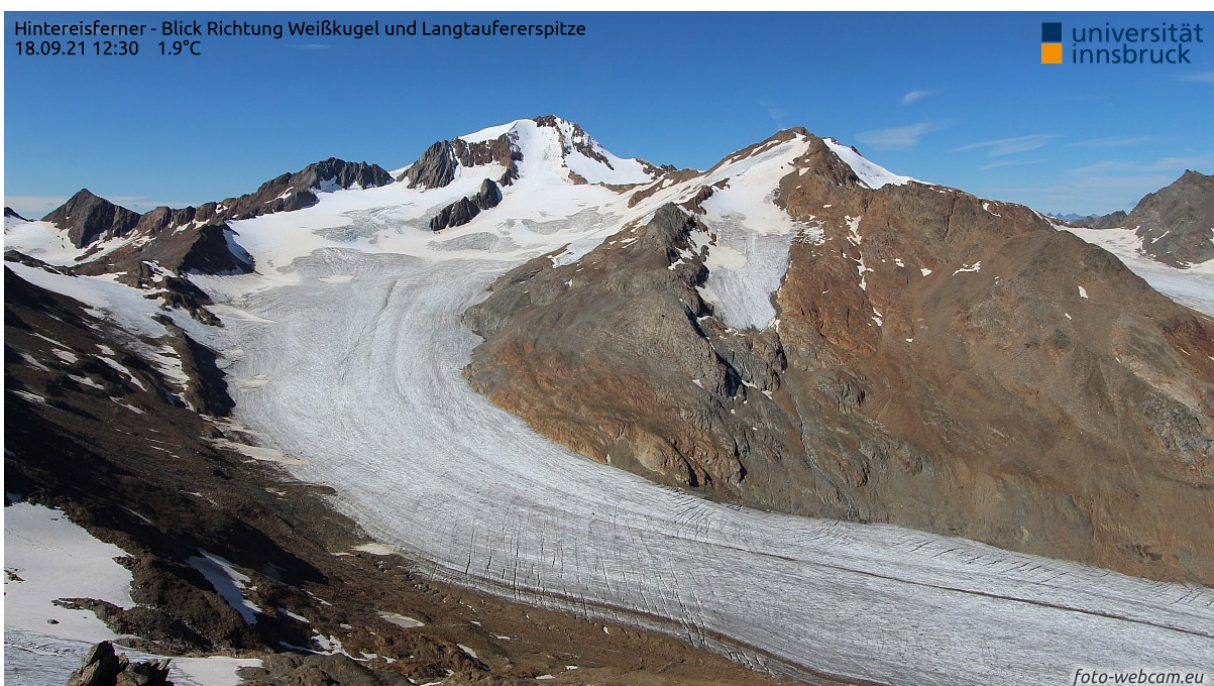


Abbildung 8: Die maximal Ausaperung des Hintereisferners am 18.09.2021. Das Muster der Massenrücklagen ist in den Jahren 2020 und 2021 beinahe identisch.

Tabelle 6: Ablationsverlauf an den Pegeln des Hintereisferners 2020/21. Die Ablation zu den Ablesezeitpunkten entspricht der Periode seit der letzten Ablesung.

Name	Ablation (cm)					Akkumulation (kg/m ²)		Massenbilanz 2020/21 (kg/m ²)
	09.07.	06.08.	14.08.	14.09.	30.09.	Sep.20	Sep.21	
41	140	164	51	145	23	21	0	-4728
L8	106	150	57	133	22	33	0	-4238
42	86	135	49	118	22	42	0	-3734
50	143	157	57	120	22	35	0	-4528
L7	85	158	57	113	21	22	0	-3928
87	44	165	48	109	21	22	0	-3508
22	38	153	60	110	21	26	0	-3464
51	4	159	58	105	21	29	0	-3154
L6	7	148	47	92	20	43	0	-2869
26		131	52	89	20	49	0	-2677
LIDAR = L5		90	41	85	19	63	0	-2174
71		119	53	66	19	67	0	-2380
102			105	77	19	64	0	-1873
L4			105	45	18	65	0	-1575
89			68	66	18	102	0	-1468
L3			70	45	15	83	0	-1251
103			18	49	10	81	15	-755
101			24	106	10	62	15	-1303
TE_B				16	5	86	24	-251
104				10	0	84	0	-174
105				0	0	97	93	-4
109				86	17	93	0	-1020
106								
107				0	10	93	15	-168
110						Schneeschant		798
111								617
WP20						Massenrücklage aus Schneeschant und Sondierungen ermittelt		370
WP21								685
WP25								182
aus umliegenden Pegeln berechnet oder geschätzt								
Neuschneedichte September 2020: 267 kg/m ³								
Altschneedichte September 2020: 546 kg/m ³								
Neuschneedichte September 2021: 300 kg/m ³								
Altschneedichte September 2021: 519 kg/m ³								
Ablation bis zum 30.09. berechnet aus Energiebilanzüberlegungen								

C.2.3 Geodätische Massenbilanz

Wie bereits im letzten Bilanzjahr wurde auch heuer die Massenbilanz geodätisch mit dem terrestrischen Laserscanner (TLS) im Hintereis bestimmt. Die Akquisitionsdaten der Laserscans waren 01.10.2020 und 09.05.2021 (Winterbilanz) bzw. 01.10.2021 (Jahresbilanz). Von den genannten Zeitpunkten werden Differenzgeländemodelle erstellt, um die Höhenänderung der Gletscheroberfläche zu ermitteln. Die Umrechnung von der mittleren Höhenänderung pro Höhenstufe in eine Massenänderung erfolgte anhand der gemessenen Schneedichten:

- Winterbilanz: 407 kg/m³
- Jahresbilanz: 533 kg/m³ bzw. 900 kg/m³ für Höhenstufen unterhalb der ELA (3095 m)

Die geodätische Winterbilanz ist mit 1235 kg/m^2 annähernd ident mit der glaziologischen (Tabelle 7). Die mittlere spezifische Jahresbilanz aus der geodätischen Methode entspricht -1299 kg/m^2 und liegt außerhalb der Messungenauigkeit beider Methoden, die $\pm 140 \text{ kg/m}^2$ (geodätisch) und $\pm 210 \text{ kg/m}^2$ (glaziologisch) beträgt (Klug et al., 2018).

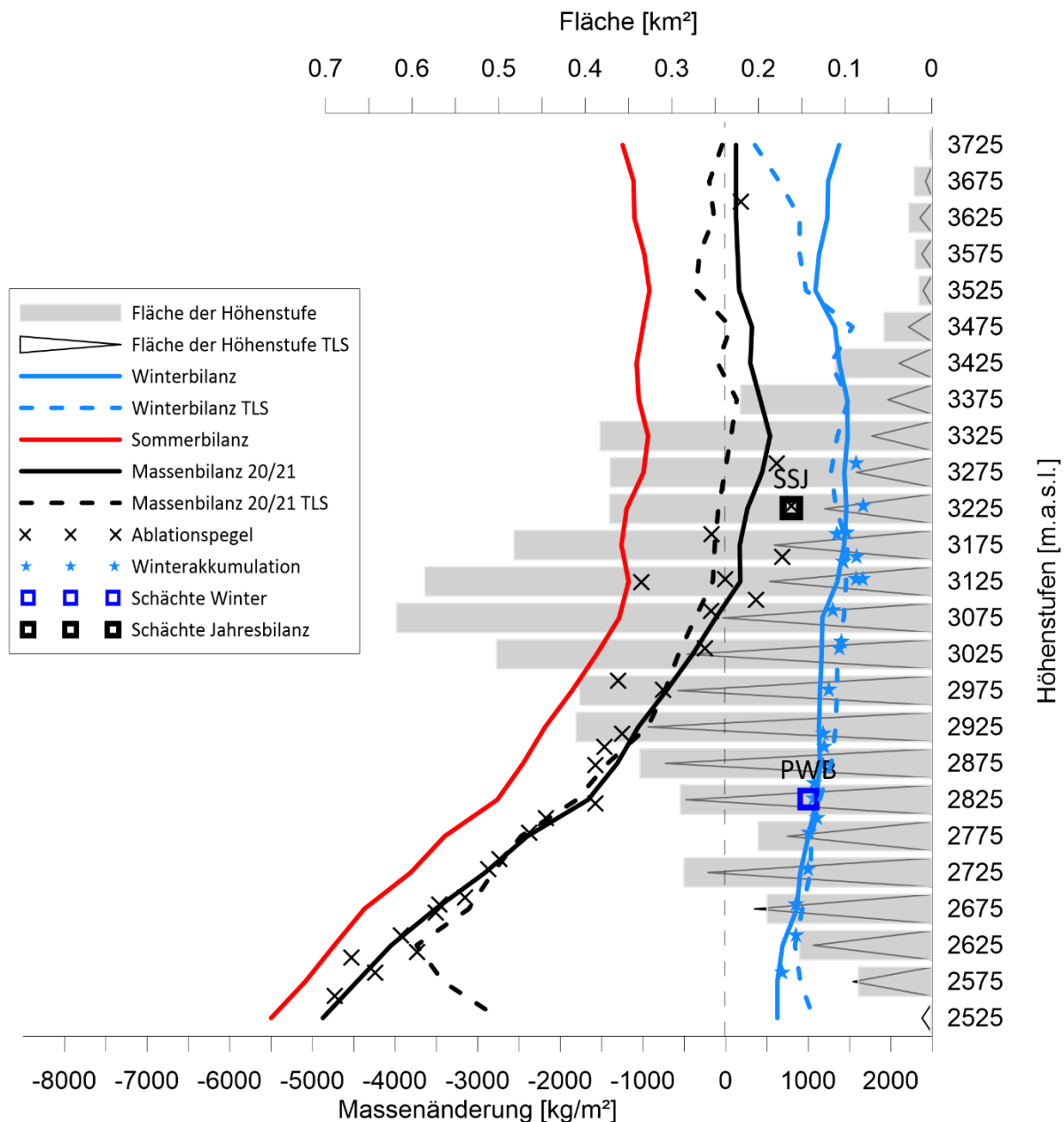
Der Unterschied zur glaziologischen Bilanz besteht im Wesentlichen darin, dass der Gletscherteil des LJF für den TLS topographisch abgeschattet ist und sich somit die Gletscherfläche unterscheidet, ebenso kann der TLS nicht in den Mulden des oberen HEF messen. Speziell heuer war in den Mulden Akkumulation zu verzeichnen, während an den Kanten und Übergängen zwischen den Mulden Eisablation bereits früh im Jahr aufgetreten ist. Der TLS misst daher in den oberen Bereichen des HEF nur die Ablation, nicht aber die Akkumulation und die geodätische Massenbilanz ist daher ähnlich wie im Vorjahr zu negativ. Im Gegensatz dazu deckt der TLS Höhenstufen des HEF ab, die aufgrund ihrer Unzugänglichkeit glaziologisch nicht gemessen werden können. Diese besitzen aber eine sehr geringe Flächenausdehnung, sodass sie auf die Gesamtmassenbilanz keine Auswirkungen haben. Auf eine Korrektur der Fließdynamik für einzelne Höhenstufen wurde verzichtet, da die geodätische Methode hier lediglich als Vergleich bzw. Verifizierung der gemessenen gletscherweiten Bilanz dient. Eine ausführliche Diskussion der Vergleichbarkeit der beiden Methoden findet sich in Klug et al. (2018).

Tabelle 7: Gegenüberstellung der glaziologischen und geodätischen Massenbilanzen der letzten Jahre.

<i>Jahr</i>	<i>b_w glaz.</i> [kg/m ²]	<i>b_w geod.</i> [kg/m ²]	<i>Differenz</i> [kg/m ²]	<i>b glaz.</i> [kg/m ²]	<i>b geod.</i> [kg/m ²]	<i>Differenz</i> [kg/m ²]
2016/17	892	791	-101	-1826	-1822	4
2017/18	1207	1277	70	-1963	-2084	-121
2018/19	1650	1564	-86	-680	-687	-7
2019/20	1396	1386	-10	-970	-1312	-342
2020/21	1219	1235	16	-688	-1299	-611

Massenhaushalt Hintereisferner 2020/21

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



Grafik: Rainer Prinz, ACINN, Univ. Innsbruck

Abbildung 9: Die vertikalen Bilanzprofile nach der glaziologischen und geodätischen (TLS) Methode am Hintereisferner im Haushaltsjahr 2020/21.

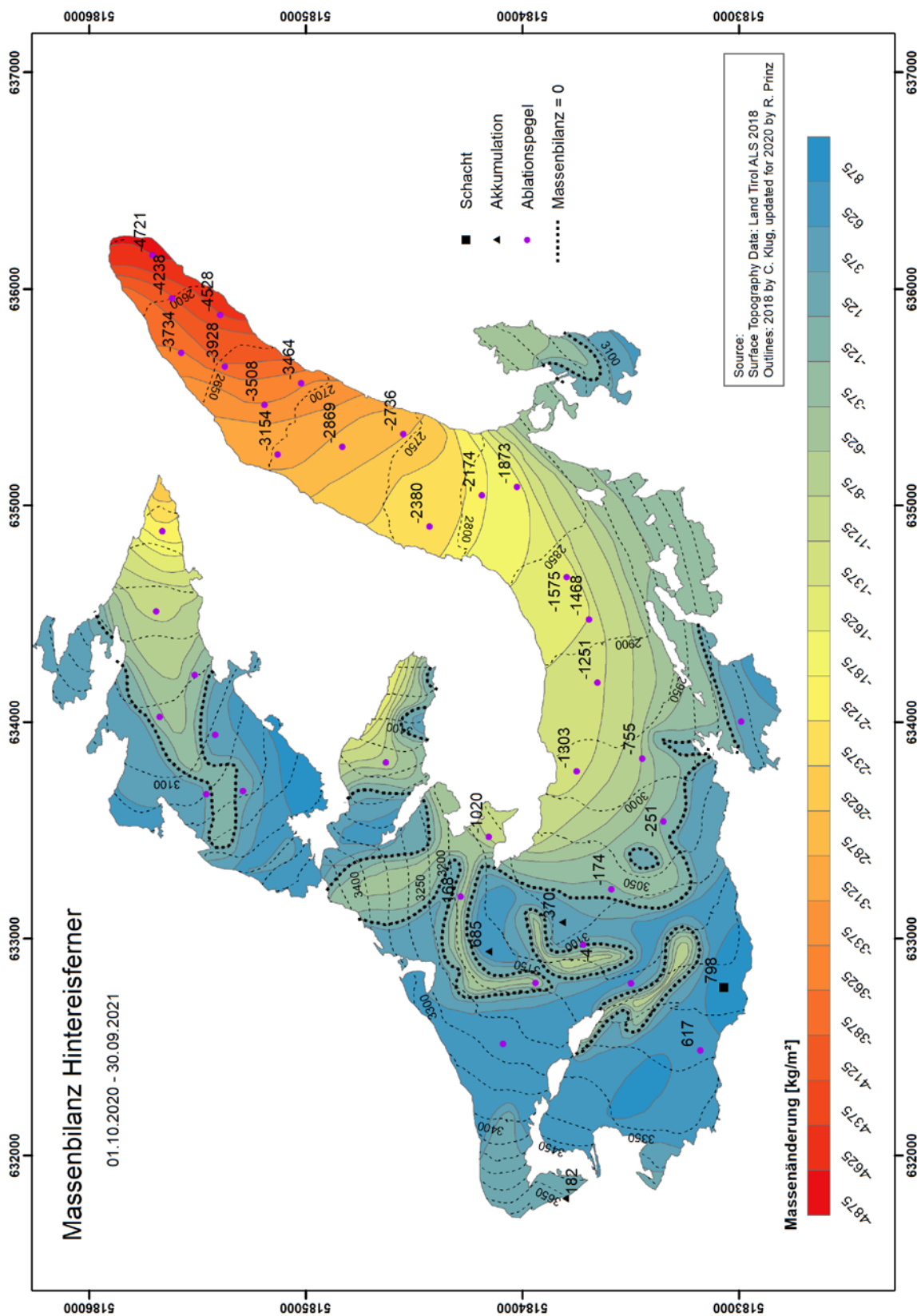


Abbildung 10: Die räumliche Verteilung der Massenbilanz am Hinterseeferner im Haushaltsjahr 01.10.2020 – 30.09.2021.

Tabelle 8: Kennzahlen und glaziologische Massenbilanzen des Hintereisferners im Haushaltsjahr 2020/21 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]
	6142	7485157	1219	-11587900	-1887	-4102743	-668
S _c [10 ³ m ²]	2466		B _c [m ³ w.e.]	1123423		b _c [kg/m ²]	456
S _A [10 ³ m ²]	3676		B _A [m ³ w.e.]	-5226166		b _A [kg/m ²]	-1422
ELA	3095	m a.s.l.	S _c /S _A	0.671		AAR	0.402
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	1	697	625	-6136	-5500	-5438	-4875
2575	85	53005	625	-431452	-5087	-378447	-4462
2625	153	104960	688	-722160	-4735	-617200	-4047
2675	190	163573	861	-830936	-4372	-667363	-3512
2725	286	258074	902	-1090819	-3811	-832745	-2909
2775	200	200559	1001	-680883	-3400	-480324	-2398
2825	290	318820	1099	-802206	-2764	-483386	-1666
2875	337	383705	1139	-825833	-2452	-442128	-1312
2925	411	463194	1128	-897551	-2186	-434356	-1058
2975	406	463609	1141	-755685	-1859	-292076	-719
3025	502	583460	1162	-784447	-1562	-200986	-400
3075	618	721855	1168	-796325	-1289	-74470	-121
3125	585	790536	1351	-687244	-1174	103292	177
3175	482	690478	1431	-608500	-1261	81978	170
3225	372	543682	1461	-446047	-1199	97635	262
3275	371	532581	1435	-369039	-994	163542	441
3325	383	564987	1475	-359445	-939	205542	537
3375	221	324517	1470	-232097	-1051	92421	419
3425	111	153143	1375	-119996	-1078	33147	298
3475	55	72528	1321	-55060	-1003	17468	318
3525	15	15923	1086	-13533	-923	2390	163
3575	19	21183	1129	-18473	-985	2710	144
3625	26	32253	1231	-28977	-1106	3276	125
3675	20	24716	1238	-22221	-1113	2495	125
3725	2	3118	1372	-2834	-1247	284	125
Summe	6142	7485157	1219	-11587900	-1887	-4102743	-668

C.3 Massenbilanz Kesselwandferner

Der Bestimmung der Massenbilanz im Haushaltsjahr 2020/21 liegen Messungen und Beobachtungen aus einer Feldkampagne an 15 Pegeln und Akkumulationsmesspunkten zugrunde (Tabelle 9 und Abbildung 14). Zur Messung der Dichte der Massenrücklage in Form von Altschnee wurde ein Schneeschacht angelegt.

Die Abschlussbegehung am KWF fand am 07.09.2021 statt. Die Ende September geplante Exkursion des glaziologischen Geländepraktikums mit Studierenden des ACINN musste aufgrund der mittlerweile frühen Schließung des Hochjochhospizes auf die Schöne Aussicht verlegt werden. Während des Praktikums wurden mit einer mobilen Wetterstation alle Energieflüsse an der Gletscheroberfläche des Hochjochferners gemessen, um die Schmelze an den schönen Spätsommertagen zu berechnen. Anhand dieser Berechnungen wurde die Ablation zum 30.09. am Hintereis- und Kesselwandferner korrigiert.

Zur Extrapolation der Punktwerte auf die Gletscherfläche wurden Fotos der Begehung vom 07.09.2021 und eine Sentinel-2 Satellitenszene vom 18.09.2021 hinzugezogen (Abbildung 11). Die Punktwerte der Massenbilanz (Pegel und Schächte) sind in der Abbildung des vertikalen Bilanzprofils (Abbildung 13) und in der Bilanzkarte (Abbildung 14) eingetragen. Tabelle 10 zeigt die Bilanzwerte nach Höhenstufen sowie alle weiteren Kennwerte der Massenbilanz 2020/21.

Die mittlere spezifische Massenbilanz des Kesselwandferners für das hydrologische Haushaltsjahr 01.10.2020 – 30.09.2021 beträgt: $b = -183 \text{ mm w.e.}$ ($= \text{kg/m}^2$),
das entspricht $B = -0,490 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ Wasser

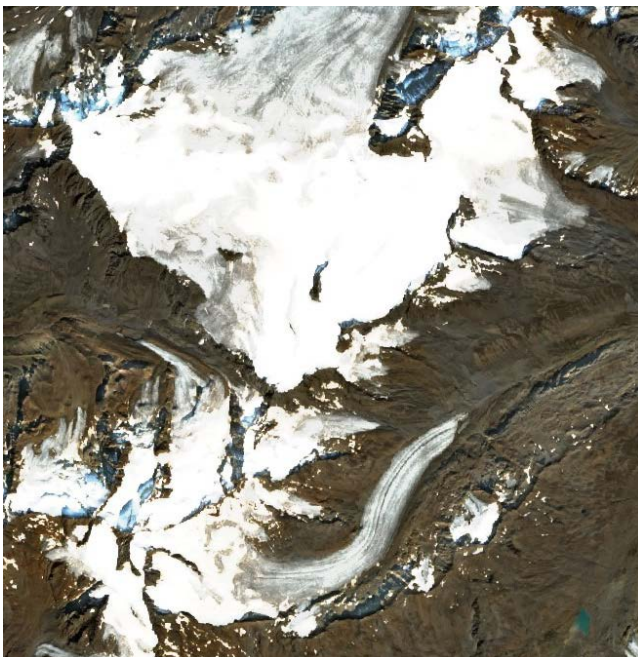


Abbildung 11: Sentinel-2 Satellitenszene vom 18.09.2021 zur Bestimmung der Schneegrenze am KWF (oben rechts).

Tabelle 9: KWF, Haushaltsjahr 2020/21: Die Massenänderung an den einzelnen Messpunkten und zwischen den Ablesezeitpunkten.

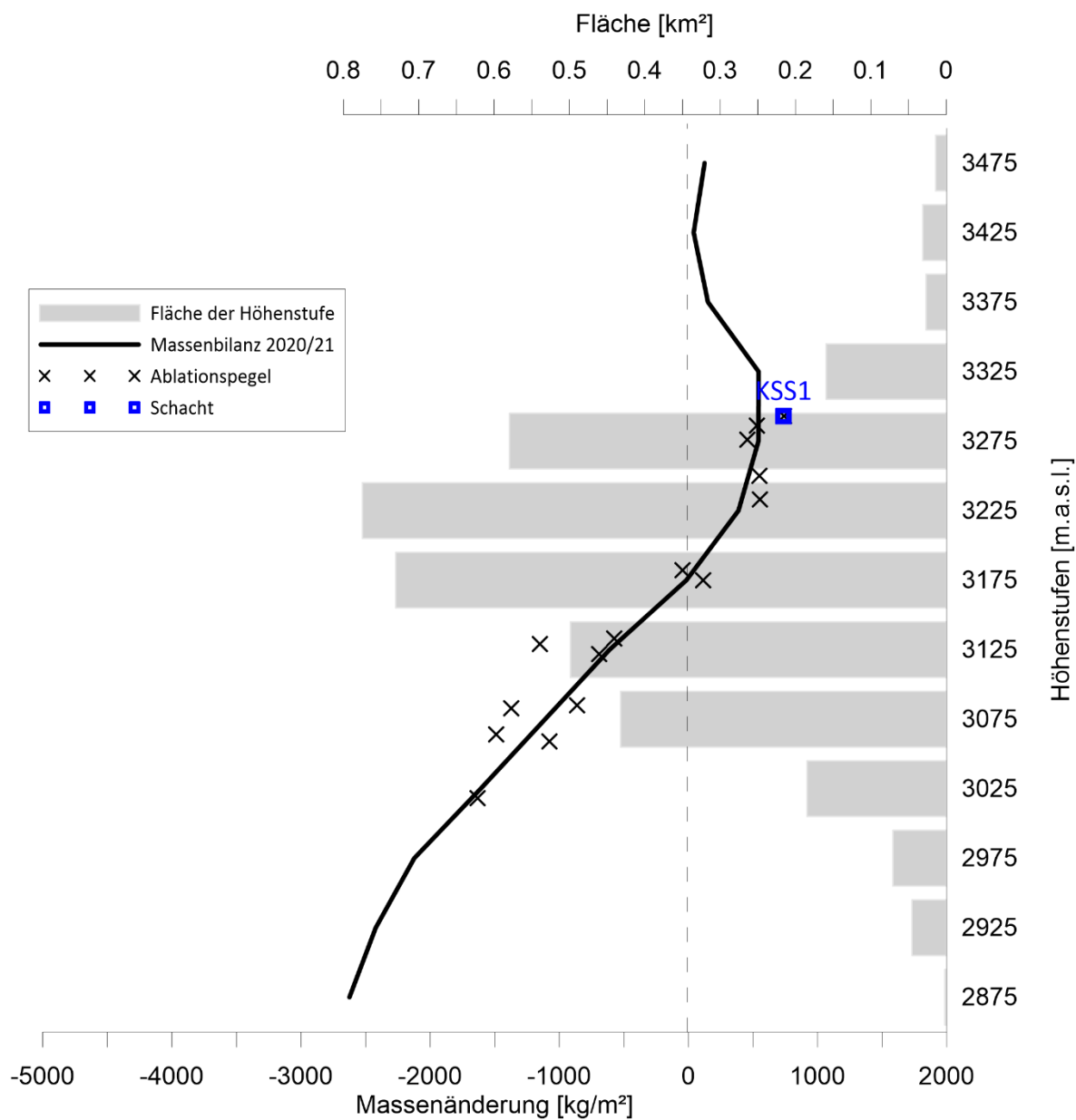
Name	Ablation (cm)		Akkumulation (kg/m ²)		Massenbilanz 2019/20 (kg/m ²)	
	07.09.	30.09.	Sep.20	Sep.21		
K3	150	30	14	0	-1634	
K4	126	25	14	0	-1373	
K5	132	25	74	0	-1487	
K6	84	25	94	0	-1075	
K8	71	20	43	0	-862	
K9	51	15	97	0	-691	
K10	38	15	97	0	-574	
K12	0	0	101	215	115	
K14	111	15	68	51	-1151	
K16	5	0	105	104	-46	
K18	0	0	88	642	554	
K19	0	0	71	601	530	
K20	0	0	133	590	457	
SS1	0	0	99	739	739	Schacht
SS2	0	0	116	666	550	
aus umliegenden Pegeln berechnet oder geschätzt						
Neuschneedichte September 2020: 284 kg/m ³						
Altschneedichte September 2020: 540 kg/m ³						
Schneedichte September 2021: 360 kg/m ³						
Altschneedichte September 2021: 530 kg/m ³						
Ablation bis zum 30.09. berechnet aus Energiebilanzüberlegungen						



Abbildung 12: Blick von Schacht SS1 über die oberen Bereiche des KWF zum Fluchtkogel (links) und Gepatschferner (rechts). Foto: Lindsey Nicholson, 07.09.2021.

Massenhaushalt Kesselwandferner 2020/21

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



Grafik: Rainer Prinz, ACINN, Univ. Innsbruck

Abbildung 13: Das vertikale Bilanzprofil am Kesselwandferner im Haushaltsjahr 2020/21.

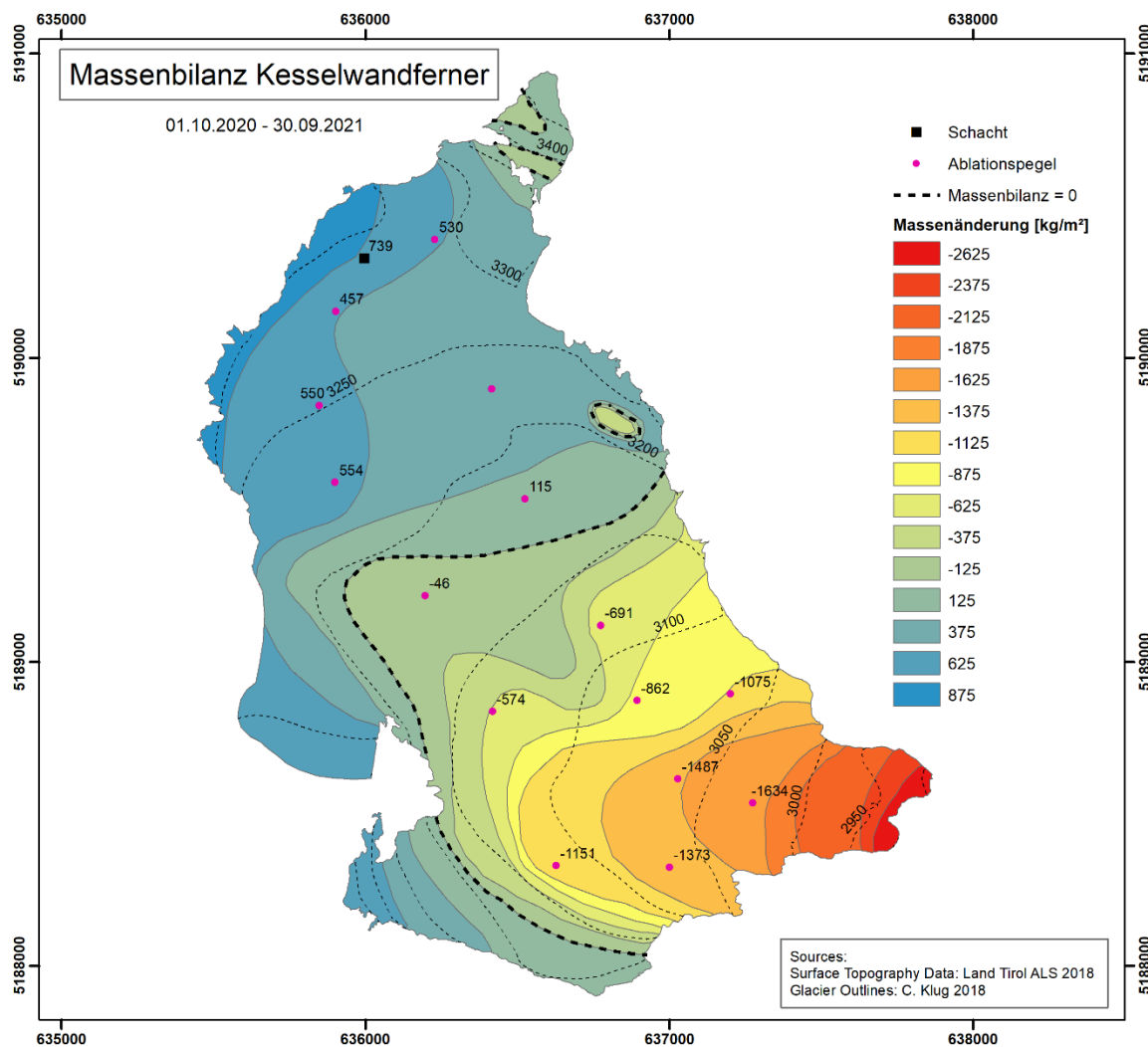


Abbildung 14: Punktwerte und räumliche Verteilung der Massenbilanz am Kesselwandferner im Haushaltsjahr 01.10.2020 – 30.09.2021.

Tabelle 10: Kennzahlen und Massenbilanz des Kesselwandfeners im Haushaltsjahr 2020/21 für die Gesamtfläche und aufgeteilt nach Höhenstufen.

		gesamtes Jahr				
	Fläche	B	b			
	[10 ³ m ²]	[m ³ w.e.]	[mm w.e.]			
	3549	-649090	-183			
S_C [10³ m²]	1894		B_C [m³ w.e.]	766711	b_C [mm w.e.]	405
S_A [10³ m²]	1655		B_A [m³ w.e.]	-1415801	b_A [mm w.e.]	-856
ELA	3177	m.a.s.l.	S_C/S_A	1.145	AAR	0.534
Jahresbilanz						
	Höhenstufe	Fläche	B	b		
	[m.a.s.l.]	[10 ³ m ²]	[m ³ w.e.]	[mm w.e.]		
	2875	2	-4642	-2625		
	2925	45	-109477	-2421		
	2975	71	-149764	-2123		
	3025	185	-297220	-1609		
	3075	432	-479395	-1110		
	3125	499	-304668	-611		
	3175	731	-11522	-16		
	3225	775	299843	387		
	3275	580	314203	542		
	3325	159	86557	543		
	3375	27	4013	151		
	3425	31	1247	40		
	3475	14	1734	125		
	Summe	3549	-649090	-183		

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. Eine Masterarbeit beschäftigt sich mit Homogenisierung der Daten und einer generellen Niederschlagsklimatologie im Rofental (Abgabe vermutlich Frühjahr 2022).

Die Lage der Wetterstationen im Rofental zeigt Abbildung 3, die Koordinaten der Niederschlagswaagen sind in Tabelle 11 angeführt.

Tabelle 11: 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	Proviandepot	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

C.4.1 Vergleich der Niederschlagsmessungen im Rofental

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 12 und Abbildung 15). 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 771 mm (Waage ACINN) und 826 mm (Waage HD). Der Niederschlag nimmt mit der Höhe zu und erreicht auf der Station Hintereis (3030 m) ungefähr das 1,8-fache als in Vent (1905 m). In einzelnen Monaten kann der Niederschlag auch knapp das 5-fache erreichen (z.B. im trockenen Februar). Von Oktober bis Jänner registrieren die Waagen am Hochjoch (Bella Vista und Proviandepot) weniger Niederschlag als in Vent. Auch hier kann Windexposition als mögliche Ursache für die Unterschätzung der Niederschlagsmenge angenommen werden.

Der Winterniederschlag (Okt.-Apr.) in Vent beträgt 380 mm, auf der Station Hintereis 857 mm (Extrapolation des Oktoberniederschlags von Vent mit Faktor 1.81) – ungefähr das 2.25-fache. Die Wintermassenbilanz, die dem Gebietsniederschlag am Hintereisferner im selben Zeitraum entspricht, ergibt 1219 mm oder das 3.2-fache des Winterniederschlags von Vent.

Der Dezember 2020 war der niederschlagsreichste seit Beginn der Aufzeichnungen. In Vent fielen 142 mm (ACINN) und nahe am Alpenhauptkamm und in größerer Höhe über 300 mm; der Großteil davon innerhalb 72 h, zwischen 04. und 06.12., während einer starken Südstauage. In diesen drei Tagen wurden an der Station Hintereis 218 mm Niederschlag gemessen. Am 17.12. wurde am Hintereisferner ein Schneeprofil (Abbildung 30) angelegt. Stratigraphisch konnte ein Niederschlag von 280 mm diesem Zeitraum zugeordnet werden.

Tabelle 12: Niederschlagsmengen (mm) an den Totalisatoren im Einzugsgebiet des Pegels Rofenache (inkl. Martin-Busch-Hütte) nach Monaten im hydrologischen Jahr 2020/21. Jahre mit Fehlwerten sind rot gekennzeichnet.

Messstelle	Betreiber	Höhe	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	HHJ 2021
Vent	ACINN	1905 m	108	8	142	70	15	22	15	58	41	136	101	56	771
Vent	HD Tirol	1890 m	111	9	152	87	16	25	17	65	41	135	106	61	826
Verhältnis Vent ACINN			1.03	1.25	1.07	1.25	1.05	1.11	1.17	1.13	1.00	0.99	1.04	1.09	1.07
Martin-Busch-Hütte	HD Tirol	2470 m	193	8	325	77	27	16	20	76	48	182	135	47	1155
Verhältnis Vent ACINN			1.78	1.07	2.29	1.11	1.77	0.70	1.41	1.32	1.19	1.33	1.33	0.85	1.50
Vernagtbach	HD Tirol	2640 m						28			73	189	155	54	498
Verhältnis Vent ACINN								1.24			1.81	1.38	1.53	0.97	
Proviandepot	IGI	2737 m	123			81	24	22	23	64	60	137	157	50	741
Verhältnis Vent ACINN			1.13			1.16	1.57	1.00	1.59	1.12	1.47	1.01	1.55	0.89	
Bella Vista	IGI	2805 m	98	3	66	59	27	5	26	80	60				424
Verhältnis Vent ACINN			0.90	0.40	0.47	0.84	1.78	0.24	1.82	1.38	1.47				
Latschbloder	IGI	2910 m	87	6	99	114	30	28	26	95	77	148	163	46	918
Verhältnis Vent ACINN			0.80	0.77	0.70	1.64	1.94	1.26	1.79	1.65	1.90	1.08	1.60	0.82	1.19
Station Hintereis	ACINN	3030 m		12	361	115	76	56	41	175	85	204	203	65	1394
Verhältnis Vent ACINN				1.66	2.54	1.66	4.97	2.52	2.84	3.04	2.09	1.50	2.00	1.17	1.81

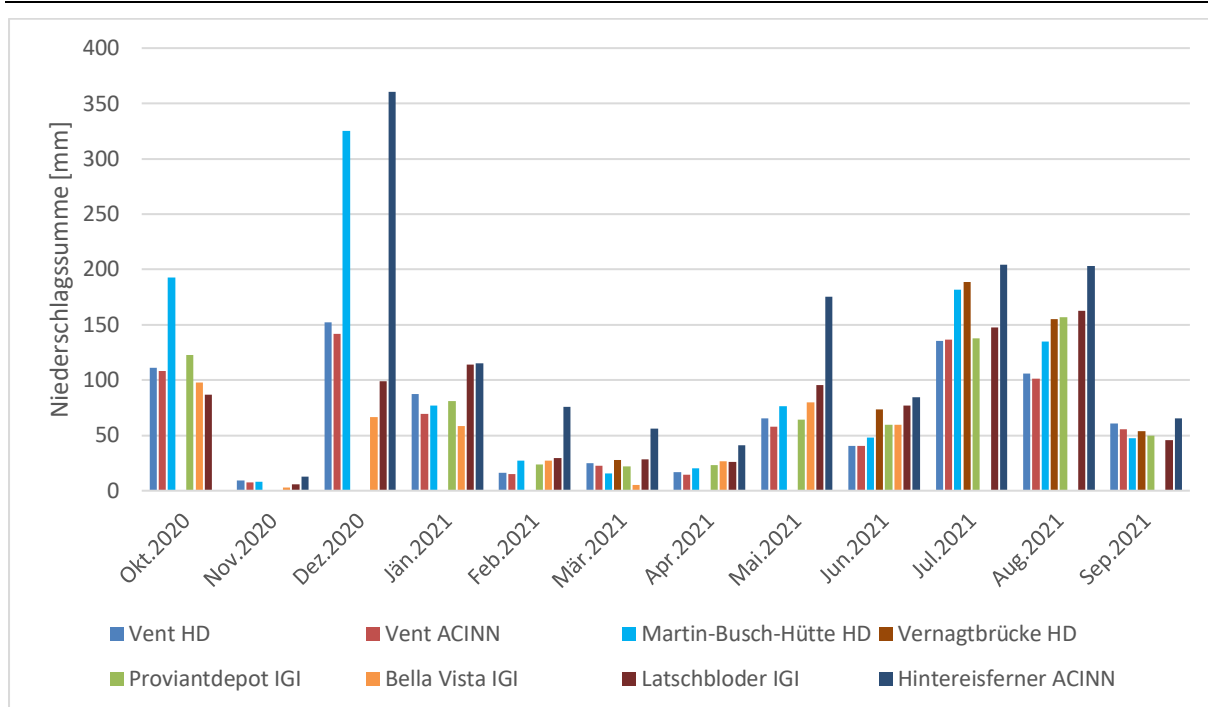


Abbildung 15: Vergleich der Monatssummen des Niederschlages an der Niederschlagswaagen.

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.

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.

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.

C.6 Verzeichnis verwendeter Akronyme und Symbole

Akronym	Bedeutung	Einheit
AAR	Accumulation Area Ratio	
ALS	airborne laserscanning	
AWS	automatische Wetterstation	
DGPS	differential global positioning system	
ELA	Höhe der Gleichgewichtslinie	m
HEF	Hintereisferner	
IGI	Institut für Geografie der Universität Innsbruck	
ACINN	Institut für Atmosphären- und Kryosphärenwissenschaften der Universität Innsbruck	
KWF	Kesselwandferner	
LJF	Langtaufererjochferner	
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.1 Geleistete Arbeiten

D.1.1 Feldkampagnen

Die Feldkampagnen in der Saison 2020/21 im Rofental erforderten sechs Arbeitseinsätze am HEF und einen am KWF, die zum Teil mehrtägig absolviert wurden. Am HEF wurden 9 Pegel neu gebohrt. Am KWF mussten heuer keine Pegel neu gebohrt werden. Acht Feldkampagnen wurden mit Wartungsarbeiten oder anderen Forschungsprojekten gemeinsam durchgeführt. Acht Kampagnen wurden durch einen Hubschrauber unterstützt.

Sämtliche CO₂-Emissionen durch Hubschrauberflüge oder Fahrten mit PKWs (insgesamt 5440 kg) werden durch zertifizierte Kompensationsprojekte abgegolten.

Personentage

- **24 Personentage – HEF Massenbilanz**
- **2 Personentage – KWF Massenbilanz**
- **15 Personentage – Wartung von Wetterstationen und Pluviometer**

Personen:

Universität Innsbruck: Rainer Prinz, Wolfgang Gurgiser, Brigitta Goger, Annelies Voordendag, Leon Bührle, Lindsey Nicholson, Philipp Vettori, Michael Binder, Moritz Oberrauch, Georg Kaser

Universität Tübingen: Reinhard Drews, Inka Koch, Reza Ershadi

Praktikanten: Mathieu Crétet, Guillem Carcanade, Clement Valla

Metallbau Schillinger: Mario Pohling

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.
- Auswertung der geodätischen Winter- und Jahresbilanz auf Basis von drei Lasercans: 01.10.2020, 09.05.2021, 01.10.2021
- 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 08.-09.05.2021 – Winterbilanz am HEF

Ziel der Feldkampagne:

- Messung der Massenrücklage aus der Akkumulationsperiode 2020/21 zur Erstellung der Winterbilanz am Hintereisferner
- Kontrolle/Wartung der Wetterstation Hintereis
- Mithilfe beim INTERACT Projekt "Glacier Sliding Dynamics" der Universität Tübingen

Teilnehmer:

- Rainer Prinz – ACINN
- Reinhard Drews, Inka Koch, Reza Ershadi –Universität Tübingen

Ausgeführte Arbeiten:

Aufgrund der Einschränkungen durch die Eindämmung der Coronapandemie mussten wir die Teilnehmerzahl auf vier Personen begrenzen. Die Arbeiten wurden aufgrund der Radargeräte beim An- und Abtransport mit einem Hubschrauber unterstützt.

- Glacier Sliding Dynamics: Test eines phasensensitiven Bodenradars, das besonders Wassereinschlüsse im Eis detektieren kann. Das Radar wurde an zwei Tagen auf einem Querprofil auf ca. 2800 m Höhe am HEF getestet.
- Massenbilanz: Von der Position HJ wurde an allen Pegeln die Schneehöhe sondiert. Messungen zur Schneedichte erfolgten am Schacht PWB, etwas oberhalb des LIDAR Pegels (L5), weil dort auch der Test der Radargeräte stattfand.
- Die Niederschlagswaage an der Station Hintereis wurde neu befüllt, die Wetterstation kontrolliert (09.05. 07:30 UTC)

Situation:

0°C auf ca. 3000 m, wolkenlos, schwach windig mit lebhaften Böen aus SW. Schneedecke noch durchgehend kalt, erst unterhalb von ~2700 m an der Oberfläche leichte Schmelze.



Abbildung 16: Schacht PWB am 08.05.2021. Foto: Rainer Prinz.

Tabelle 13: Auswertung Schacht PWB.

Schacht PWB							
Schacht: PWB	H = 262 cm	10.768286	46.796421	Alt: 2826 m	Date:	08.05.2021	
R. Prinz					Time:	14:00 MESZ	
Abstich mit 1000 cm ³ Keil							
Höhe [cm]	Masse [g]	Dichte [kg/m ³]	Schichthöhe [cm]	Wasserwert [kg/m ²]		Höhe [cm]	Temperatur [°C]
262						262	-2.4
252	258	258	10	26		252	-3.0
241	347	347	11	38		242	-3.7
227	350	350	14	49		232	-3.2
217	335	335	10	34		222	-2.7
207	379	379	10	38		212	-2.7
197	384	384	10	38		202	-2.5
187	380	380	10	38		192	-2.5
177	400	400	10	40		182	-2.6
167	403	403	10	40		172	-2.9
157	423	423	10	42		162	-3.2
147	432	432	10	43		152	-3.3
137	440	440	10	44		142	-3.3
127	436	436	10	44		132	-3.4
115	442	442	12	53		122	-3.4
105	401	401	10	40		112	-3.4
95	416	416	10	42		102	-3.6
85	468	468	10	47		92	-3.6
75	479	479	10	48		82	-3.6
65	482	482	10	48		72	-3.6
55	470	470	10	47		62	-3.7
46	470	470	9	42		52	-3.7
30	435	435	16	70		42	-3.6
20	408	408	10	41		32	-3.4
10	378	378	10	38		22	-3.3
0	373	373	10	37		12	-3.3
Gesamt:	10189	407	262	1067		0	-3.1
Stratigraphie:							
262-234	Neuschnee April&Mai						
234-230	Eislinsen: eingeschneiter Schmelzharsch (Karwoche; Ende März)						
216-214	Eislinsen: eingeschneiter Schmelzharsch (Ende Feber?)						
195-194	Saharastaub (schwach)						
172-170	Saharastaub deutlich (Anfang Feber)						
46-0	aufbauend umgewandelt						
	0 Eisoberfläche 2020						

Tabelle 14: Werte der Schneehöhensondierungen zur Bestimmung der Winterbilanz

Ident	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Snowdepth (cm)	Density (kg/m ³)	Accumulation Oct2020 (kg/m ²)	SWE (kg/m ²)	SWE corr (kg/m ²)	Comment
TE	46.7908826	10.7471303	3042	344	407	86	1400	1314	
WJ	46.7971854	10.7428948	3152	350	407	93	1425	1332	
L8	46.8102504	10.7820117	2587	169	407	33	688	655	
L7	46.808137	10.77788	2639	210	407	22	853	831	
22	46.804953	10.776711	2681	209	407	26	851	825	
L6	46.8032834	10.7728434	2730	245	407	43	995	952	
LIDAR	46.7981657	10.7696136	2800	273	407	63	1109	1046	FEE 313
71	46.7997604	10.7678788	2780	249	407	67	1011	944	
88	46.7953727	10.7670406	2848	263	407	67	1072	1005	
L4	46.7941051	10.764654	2873	291	407	65	1182	1117	
89	46.7932268	10.7620542	2898	293	407	102	1193	1091	
L3	46.792933	10.758196	2916	289	407	83	1178	1095	
103	46.7911526	10.7535505	2976	306	407	81	1245	1164	
TE_B	46.79032	10.7497368	3033	338	407	86	1376	1290	
104	46.7925414	10.7457075	3085	318	407	84	1294	1210	
105	46.793762	10.7423794	3128	388	407	97	1577	1480	
107	46.798811	10.745463	3190	331	407	93	1347	1254	
110	46.7879544	10.7396239	3229	408	407	84	1661	1577	20 cm Altschnee??
111	46.7890017	10.7358449	3287	388	407	110	1578	1468	
PWB	46.796421	10.768286	2827	262	407	63	1066	1003	
1	46.795044	10.740248	3192	359	407	90	1461	1371	
2	46.792757	10.740357	3159	389	407	90	1581	1491	
3	46.791656	10.742599	3129	408	407	90	1659	1569	



Abbildung 17: Vorbereitungen zu den Radarmessungen. Foto: Rainer Prinz, 08.05.2021.

D.2.2 Feldkampagne 09.07.2021

Ziel der Feldkampagne:

- Ablesen von Ablationspegeln an der Zunge des HEF
- Validierung des aus Satellitendaten abgeleiteten Eisrandes an der Zunge
- Auslesen der Wetterstation AWS HEZ

Teilnehmer:

- Rainer Prinz – ACINN

Ausgeführte Arbeiten:

AWS HEZ kontrolliert und ausgelesen. Alles in Ordnung. GPS-Punkte am aktuellen Zungenende gesetzt, nachdem im August 2020 das unterste Zungenende vermurt wurde. GPS-Punkte stimmen exakt mit der abgeleiteten Schuttbedeckung aus dem Bodenfeuchteindex der Sentinel-2 Szene von Oktober 2020 überein.

Alle Pegel bis hinauf zu P26 (nicht 71) abgelesen, 1-2 cm Neuschnee. Oberhalb von L6 auch 5-10 cm Aufeis.

Situation:

Hochsommerlich warm mit 0°C Grenze >4000 m, 0/8-2/8, schwach windig aus S. Deutlicher, katabatischer Wind am HEF. Mühsamer Zugang zur Zunge aufgrund der schlammigen und tiefen Murablagerungen.



Abbildung 18: Das mit Murablagerungen von Ende August 2020 verfüllte Tal des Zungenendes des HEF. Foto: Rainer Prinz, 09.07.2021.

D.2.3 Feldkampagne 05.-06.08.2021

Ziel der Feldkampagne:

- Bohren von Ablationspegeln am HEF
- Ablesen von Ablationspegeln an der Zunge des HEF
- Auslesen der Wetterstationen AWS HEZ und AWS28
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, Michael Binder (Student) – ACINN
- Leon Janis Bührle – Student IGI

Ausgeführte Arbeiten:

Am 05.08. zum Hochjochhospiz; Übernachtung. Am Morgen des 06.08. Hinflug mit Heli zum Lollipop Stake (L5). Das Hospiz hatte Versorgungsflüge geplant. Wir konnten uns kurzerhand einklinken.

- AWS28 kontrolliert und ausgelesen. Die interne Batterie des Datenloggers ist jetzt endgültig leer. Der Datenlogger verliert die Uhrzeit, wenn das Solarpanel keinen Strom liefert. Datum und Uhrzeit synchronisiert (06.08.2120 ~06:15 UTC). SR50 Messungen werden durchgeführt und gespeichert.
- Höhe SR50 über Grund: unteres Bein 383 cm, oberes Bein 360 cm
- Sichtkontrolle SmartStake
- 8 Pegel gebohrt: L6 (10 m), 51 (8 m), 22 (8 m), L7 (10 m), 50 (12 m), 42 (10 m), L8 (14 m), 41 (14 m); ca. 30 m mit einer Coleman M1003 Kartusche
- Pegel bis hinauf zu Lollipop abgelesen
- AWS HEZ ausgelesen und Sichtkontrolle

Situation:

Kaltfrontdurchzug am 04.08. mit Schnee bis ~3000 m, >10 cm. Am 06.08. für die Jahreszeit kühl mit 0°C Grenze ~3000 m, 3/8-6/8, schwach windig aus SW. Schmelzwasser am Gletscher über Nacht gefroren.



Abbildung 19: Kurze Rast bei der temporären Wetterstation HEZ. Foto: Rainer Prinz, 06.08.2021.



Abbildung 20: Blick entlang des orographisch rechten Randes des HEF. Foto: Rainer Prinz, 06.08.2021.

D.2.4 Feldkampagne 14.-15.08.2021

Ziel der Feldkampagne:

- Bohren von L5 und SR50 am HEF
- Ablesen von Ablationspegeln
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Guillem Carcanade, Mathieu Cr  tet, Clement Valla (Praktikanten aus Grenoble auf Besuch; haben einige Wochen vorher schon mit Glaziologen in Grenoble und Zürich gearbeitet)

Ausgeführte Arbeiten:

Am 14.08. mit ÖPNV nach Vent, von dort zum HEF. Pegel abgelesen (bis 103), SR50 Gestange neu gebohrt, L5 (Lollipop) neu gebohrt.

- Höhe SR50 über Grund: alt: 404 cm, neu: 73 cm
- L5 / Lollipop: alt: 441 cm, neu: 95 cm

Übernachtung auf der Station und am 15. auf die Weißkugel und retour nach Vent.

Situation:

Hochsommerlich warm mit 13  C auf 3000 m. Wind aus S und SW. Zunehmende Quellbewölkung und leichte Schauer in der Nacht auf 15. Nach Auflösung der Restbew  lkung wieder ein Hochsommertag mit leichten Schauern am Abend.



Abbildung 21: Der Pegel L5 (Lollipop) wird neu gebohrt. Foto: Mathieu Cr  tet, 14.08.2021.

D.2.5 Feldkampagne 07.09.2021: KWF

Ziel der Feldkampagne:

- Ablesung aller Pegel
- Messung der Massenrücklage
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Lindsey Nicholson, Moritz Oberrauch – ACINN

Ausgeführte Arbeiten:

- Ablesung aller Pegel, außer K17 und K13
- Schneehöhenmessungen
- Schacht zur Identifikation des letztjährigen Horizontes und der Schneedichte an Punkt KSS1

Anflug per Hubschrauber anlässlich der Reparaturarbeiten im Hinteren Eis. Abstieg zu Fuß nach Rofen.

Situation:

Oberflächenreif. Spätsommerlich warm mit max. 7°C auf 3000 m. Vormittags Durchzug hoher Wolkenfelder (bis 7/8) mit schwachem Wind aus NW, nachmittags Quellbewölkung (4/8).



Abbildung 22: Dichtemessung im Schacht am KWF. Foto: Lindsey Nicholson, 07.09.2021.



Abbildung 23: Der Schacht zur Bestimmung der Massenrücklage am KWF. Foto: Lindsey Nicholson, 07.09.2021.

Tabelle 15: Auswertung des Schachtes KSS1 am KWF, 07.09.2021.

Abstich	Füllhöhe [cm]	Masse [g]	Tara [g]	korrigierte Masse [kg]	Dichte [kg/m ³]	Wasserwert [mm w.e.]	
1	21.0	730	540	0.190	362	76	Neuschnee September 2021
2	21.0	820	540	0.280	534	112	
3	21.0	820	540	0.280	534	112	
4	18.0	780	540	0.240	534	96	Altschnee 2020/21
5	2.0				900	18	
6	21.0	810	540	0.270	515	108	
7	21.0	800	540	0.260	496	104	Firn September 2020
8	21.0	820	540	0.280	534	112	
9	19.0	780	540	0.240	506	96	
Gesamt:	165.0	6360	4320	2.040	495	817	835
					mittlere Neuschneedichte	362	
					mittlere Altschneedichte	530	
Stratigraphie							
165-145	Neuschnee 27.08.-30.08.2021						
119	1-2 cm Eis						
84-82	bis 4 cm Eis						
19	Oberfläche 01.10.2020 mit Schmelzkruste						
0	Schmutzhorizont: Sommer 2020						

D.2.6 Feldkampagne 14.-15.09.2021

Ziel der Feldkampagne:

- Ablesung aller aperen Pegel am Hintereisferner
- Schneehöhenmessungen in Mulden
- AWS 28: Auslesen des Smart Stake, Auslesen des SR 50 neben Smart Stake
- Wartung AWS Station Hintereis: Montage Flow Capt, Installation Bodentemperatursensoren, Wartung Pluviometer
- Aufnahme von 360° Bildern an der Station Hintereis
- Auslesen der AWS HEZ
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, Moritz Oberrauch – ACINN

Ausgeführte Arbeiten:

14.09.: Start bei den Rofenhöfen gegen 09:00. Anmarsch zum HEF.

- Pegelablesung
- Auslesen des SR 50 neben Smart Stake. Uhr des Datenloggers schon wieder ~48 h hinten. Neu synchronisiert. Schraubenschlüssel aus Loggerbox mitgenommen.
- Aufnahme von 360° Bilder der Station Hintereis: Initiative von INTERACT: Das Projekt verleiht 360° Kameras (GoPro Max) zur Veröffentlichung der Bilder auf der eigenen Homepage.
- Wartung AWS Station Hintereis:
 - Montage Flow Capt (Gewinde der oberen Halterung verklemmt; lässt sich nicht mehr öffnen)
 - Installation Bodentemperatursensoren: 1) in nach oben offener Felsritze (10 cm tief), 2) unter Steinplatte (~70x70 cm 15-20 cm stark), 3) eingegraben 20 cm tief (10 cm Erde oben, 10 cm Schutt darunter)
 - Wartung Pluviometer: mit Frostschutz befüllt
 - SR 50: 232 cm über Grund
- Vorräte Station Hintereis
 - Frostschutz Pluviometer: noch max. 3 Befüllungen
 - 2 kg Nudeln, 1.5 kg Reis, je 0.5 kg Linsen und Couscous, 2x Curry, 2x Dosenobst, Rosinen, Zucker, Schwarztee, Kaffee.
 - Zu besorgen: Kräutertee, Pfeffer, Nudelsaucen

15.09.: Nach Nächtigung auf Station Abmarsch gegen 09:00.

- Smart Stake: SD Karte getauscht. Sensor genullt. (gute Idee?)

- AWS HEZ ausgelesen

MO ging danach nach Rofen, RP zur Vernaghütte, wo er am 16.09. eine Exkursion des Gymnasiums Hall begleitete.

Situation:

14.09.: Spätsommerlich warm mit max. 9°C auf 3000 m. Vormittags wolkenlos mit schwachem Wind aus SW, nachmittags Quellbewölkung (max 3/8).

15.09.: In der Früh wie am Vortag. Schneller Bewölkungsaufzug aus W mit leichtem Niederschlag ab Mittag. Geringfügig kälter.

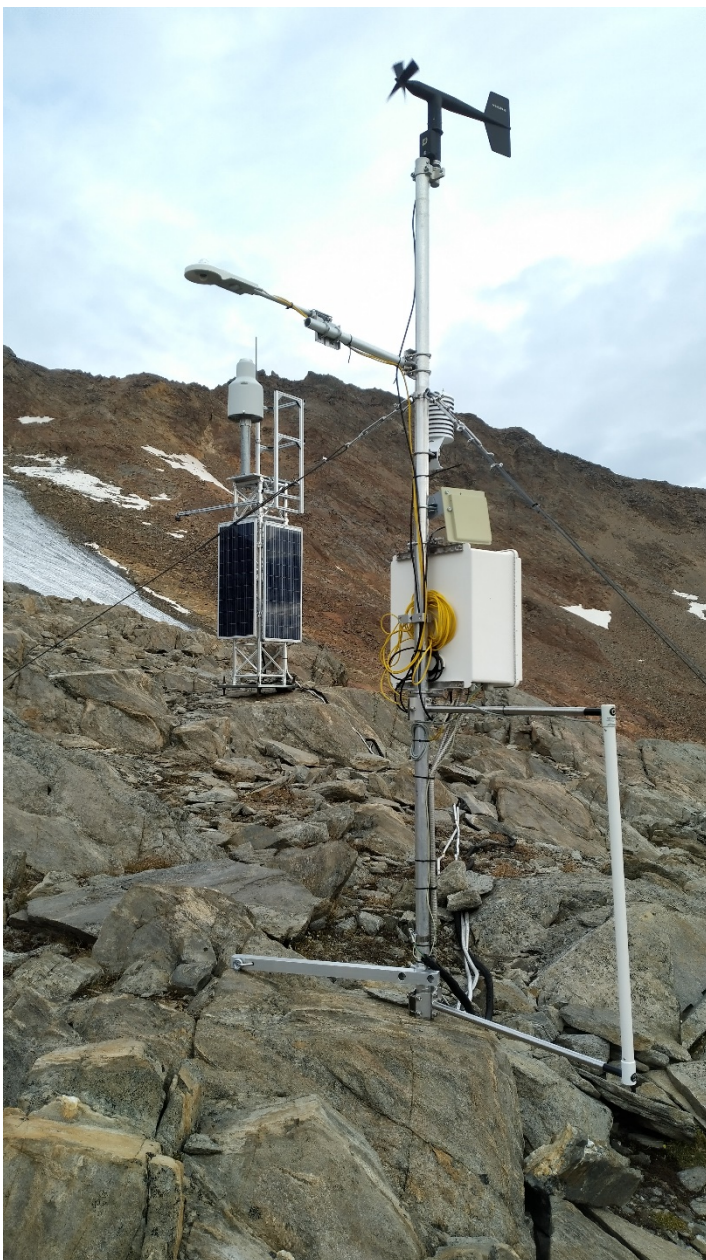


Abbildung 24: Die Wetterstation Hintereis mit dem FlowCapt Sensor zur Messung von Schneedrift. Foto: Rainer Prinz 15.09.2021.



Abbildung 25: Die Ausaperung am oberen HEF. Foto: Rainer Prinz, 14.09.2021.

D.2.7 Feldkampagne 25.09.2021

Ziel der Feldkampagne:

- Schneemessungen am oberen Hintereisferner: Schneedichte, Schneehöhe
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz – ACINN

Ausgeführte Arbeiten:

Anmarsch von der Schönen Aussicht über das Steinschlagjoch zu P110. Dort Schneeschacht zur Messung der Akkumulation des HHJ 2020/21. Schneehöhe 170 cm, davon 10 cm Septemberschnee, Rest Altschnee. Schneehöhensondierung an P111 und am Grat zur Weißkugel.

Situation:

Wolkenloser Spätsommertag mit bis zu 11°C (!) auf 3000 m. Leichter Wind aus S.

Tabelle 16: Auswertung des Schachtes P110 (SSJ) zur Bestimmung der Massentrücklage am HEF.

Schacht P110		SSJ: Steinschlagloch				
Schacht: P110	H = 170 cm	10.7394	46.7879	Alt: 3226 m	Date:	
R. Prinz					Time:	
Abstich mit 1000 cm ³ Keil						
Höhe [cm]	Masse [g]	Dichte [kg/m ³]	Schichthöhe [cm]	Wasserwert [kg/m ²]		
170						
160	300	300	10	30	September	
150	520	520	10	52		
140	540	540	10	54		
125	520	520	15	78		
115	515	515	10	52		
100	540	540	15	81	Altschnee:	
90	550	550	10	55	Dichte: 533	
80	506	506	10	51	kg/m ³ ;	
64	531	531	16	85	minus 84	
50	522	522	14	73	kg/m ² Firn	
40	512	512	10	51	Sep 2020	
30	575	575	10	58		
10	550	550	20	110		
0	536	536	10	54		
Gesamt:	7217	519	170	882		

Stratigraphie:	
170-160	Neuschnee September
160-158	Schmutzhorizont: Saharastaub vom Winter 20/21
158-89	Altschnee
89-87	Eislinsen
87-66	Altschnee
66-64	Eislinsen
64-0	Altschnee und Firn aus September 2020!
0	Schmutzhorizont: Oberfläche 2020



Abbildung 26, Der Schacht P110 am HEF. Foto: Rainer Prinz, 25.09.2021.



Abbildung 27: Blick auf den oberen HEF. Foto: Rainer Prinz, 25.10.2021.

D.3 Dokumentation sonstiger Feldarbeiten in Vent und im Rofental

D.3.1 Feldkampagne 10.11.2020: Wetterstation Hintereis

Ziel der Feldkampagne:

- Fertigstellung Wetterstation Station Hintereis
- Wartung Stationen Hintereis und Im Hinteren Eis
- Wartung Vent und Regenmesserablesung Vent
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, Philipp Vettori – ACINN

Ausgeführte Arbeiten:

An und Abtransport per Hubschrauber.

- Bei der Wetterstation hat sich ein Spannseil vermutlich von selbst gelockert. Alle Spannseile gesichert.
- Neue Batterien, verbesserte Laderegulierung
- Kontrolle über Pluviometerheizung mittels Relais zur Verhinderung einer Tiefentladung der Batterien
- Sensorhöhen vermessen, Sensoren arbeiten, Datenübermittlung stabil
- FlowCapt noch nicht installiert – liegt in Hütte bereit
- Ein Bigbag Müll und obsolekte Ausrüstung (Winde, Batterien, Feuerlöscher...) ins Tal geflogen
- Übersetzen zu Im Hintere Eis: Tausch der SR50AH Membran, Sensorcheck. Container nicht besucht.
- Check Vent, Ablesung RM

Situation:

Warm mit -2°C an der Station. Bewölkung durchgehend 0/8-2/8. Schwacher Wind aus SW.

Sensor StHE	Höhe (cm)	Bemerkung
T/RH	210	7. Lamelle
Anemometer	330	
SR50	207 (über Schnee)	Schneehöhe: 13, 17, 15, 10



Abbildung 28: Links: Station Im Hinteren Eis. Rechts: Wetterstation Hintereis. Fotos: Rainer Prinz 10.11.2020.



Abbildung 29: Die Wetterstation am HEF für das SCHISM Projekt. Foto: Rainer Prinz, 17.12.2020.

D.3.2 Feldkampagne 17.12.2020: AWS 28: SCHISM Winterkampagne 2021

Ziel der Feldkampagne:

- Aufstellen der Wetterstation System Erlangen am HEF: AWS28
- Schneeprofilaufnahme
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, Wolfgang Gurgiser – ACINN

Ausgeführte Arbeiten:

- Anflug mit Helikopter, alles Innenlast. Leider versperrte ein Felssturz die Ötztalstraße. Daher Flug ab Huben (ENI Tankstelle). Überflug über Station im Hinteren Eis und Station Hintereis zur Besichtigung eventueller Schäden durch das Starkniederschlag- und Sturmereignis 4.-6.12. Aus der Luft keine Schäden erkennbar.
- Ankunft HEF ~10 Uhr. Aufstellen der AWS ~20 m oberhalb des LIDAR Pegels. Sensorhöhen vermessen. Die Sonne kommt gerade nicht mehr zum Standort der AWS. Beim nächsten Besuch sollte ein frischer Akku zum Tausch mitgenommen werden.
- Schneeprofilaufnahme etwa 30 m nördlich der AWS mit Temperatur- und Dichtemessung; Eintrag ins LAWIS. Das Niederschlagsereignis 4.-6.12. brachte etwa 280 mm an diesem Standort (97 cm bei mittlerer Dichte von 291 kg/m^3 ; 218 mm am Pluviometer Station Hintereis
- LIDAR Pegel: freies Ende 128 cm; Schneehöhe: 190 cm = mean(186, 196, 187, 191)
- Rückflug ~15 Uhr.

Im BigBag an der AWS deponiert (am östlichen Bein):

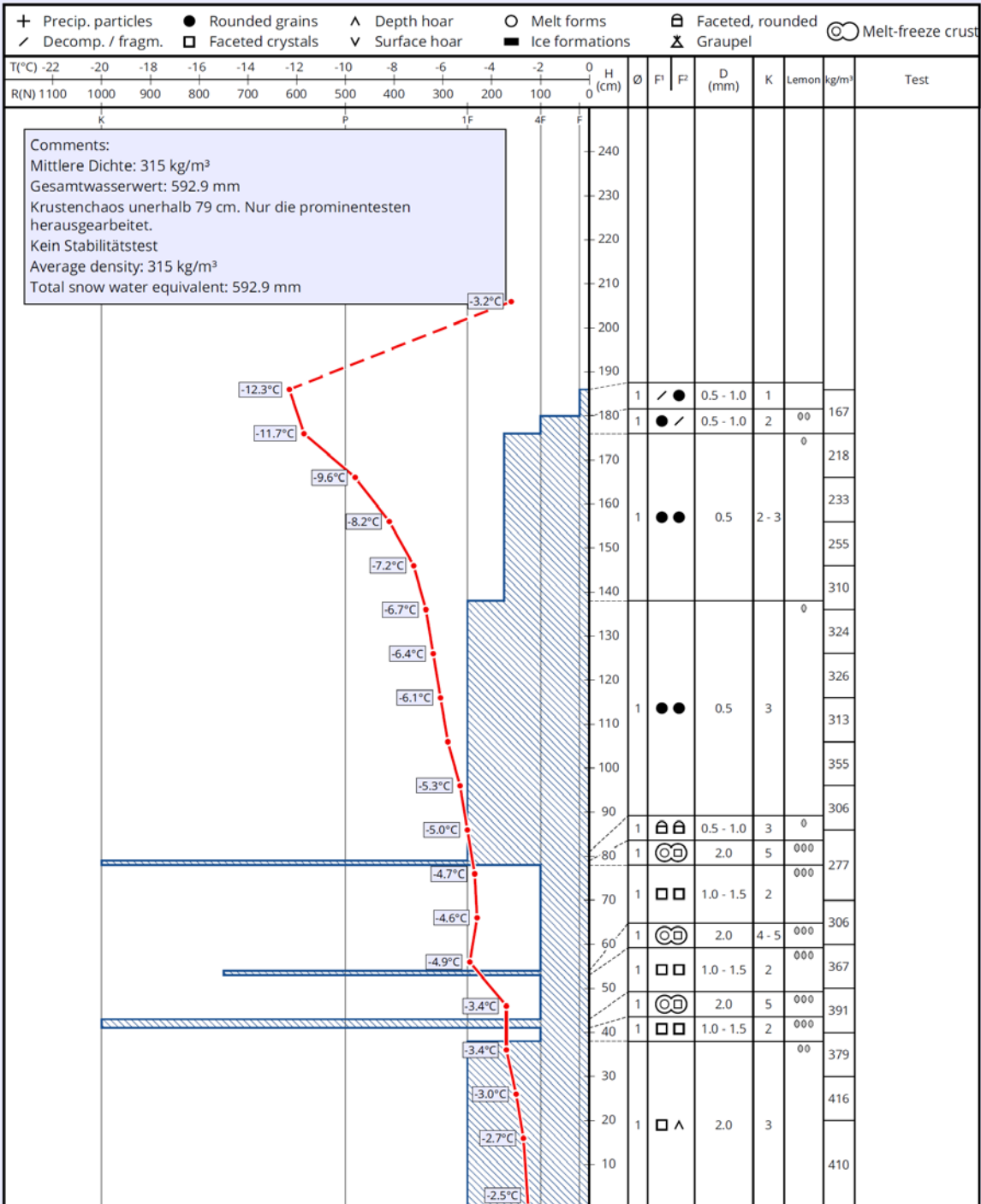
- AWS Box: Werkzeug, Biwaksack, Reepschnur 5 m, Sonde inkl. 2 Verlängerungen (~3,8 m)
- Matte
- Große Schneeschaufel (außerhalb des Sacks)

Situation:

~-3°C mit leichtem Ausfließen der Kaltluft (~1-4 m/s). Teilweise hohe Wolken (~1-2/8).
Schneeoberfläche -12°C.

Snowprofile: Hintereisferner AWS 28

Name: R. Prinz, W. Gurgiser	e-mail: rainer.prinz@uibk.ac.at	Observation date: 17. Dec. 2020 13:40
Place: Hintereisferner AWS 28	Elevation: 2797 m	Air temperature: -3.2°C
Subregion: Gurgler Gruppe	Incline: 10°	Precipitation: No precipitation
Region: Tirol	Aspect: NE	Intensity:
Country: Österreich	Wind speed: Gentle (< 20 km/h)	Sky condition: Few (1/8 - 2/8)
Lat/Long: 46.7979° / 10.7693°	Wind direction: SW	Profile-class:



SnoProfilier 0.94 powered by mapyrus

© 2020 LAWIS | Uni-Wien

Abbildung 30: Schneeprofil am Standort der Wetterstation des SCHISM Projektes. Daraus konnte das starke Niederschlagsereignis 04.-06.12.2020 rekonstruiert werden (Schichten 176-80 cm).

D.3.3 Feldkampagne 18.02.2021: MOMAA HEZ

Ziel der Feldkampagne:

- Aufstellen einer MOMAA im Vorfeld des HEF – an P2444, ehemals Standort Hintereisferner Zunge AWS HEZ
- Schneeprofilaufnahme
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, Brigitta Goger – ACINN

Ausgeführte Arbeiten:

- Anflug mit Helikopter von Rofen, alles Innenlast.
- Ankunft an P2444 ~10 Uhr. Aufstellen der AWS. Sensorhöhen vermessen.
- Schneeprofilaufnahme etwa 30 m westlich der AWS; Eintrag ins LAWIS.
- Rückflug ~14 Uhr mit Überflug iHE: Zur Ansicht des TLS-Containiers, bei dem die Fenster seit Wochen offenstehen.

Situation:

~0°C mit leichter Südwestströmung (~1-4 m/s). Hohe Wolken (~5-7/8). Schneeoberfläche -1.5°C.



Abbildung 31: Wetterstation HEZ. Foto: Rainer Prinz 18.02.2021.

D.3.4 Feldkampagne 22.02.2021: Abbau AWS 28

Ziel der Feldkampagne:

- Abbau der AWS 28: Muss wie geplant wieder retour nach Erlangen
- Schneeprofilaufnahme
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, Annelies Voordendag – ACINN

Ausgeführte Arbeiten:

- Anflug mit Helikopter von Rofen.
- Ankunft an AWS28 ~10 Uhr. Sensorhöhen vermessen. Beginn mit Ausschaufeln und Abbau der AWS.
- Schneeprofilaufnahme am Ort der AWS; Eintrag ins LAWIS.
- Rückflug ~15 Uhr.

Situation:

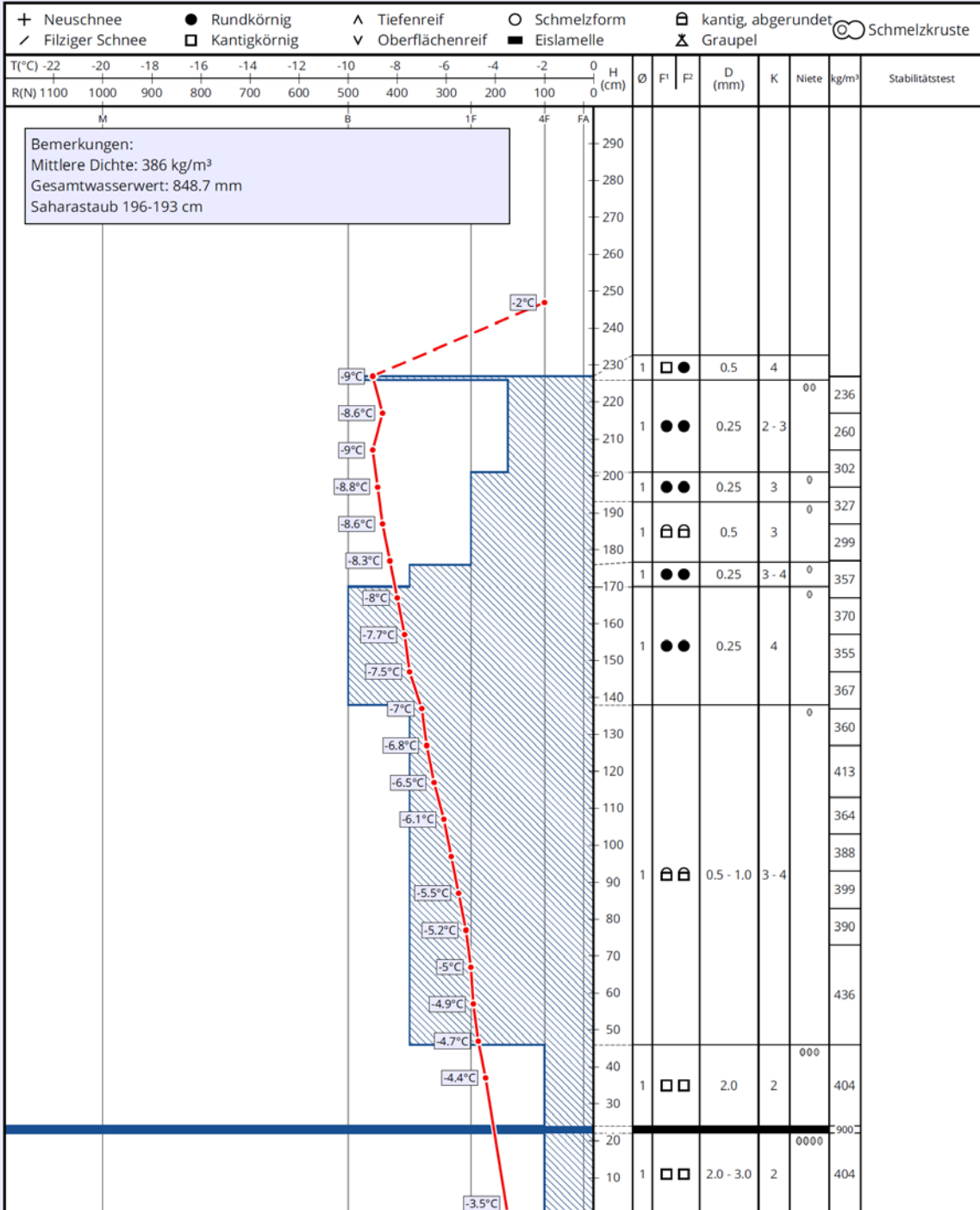
~-2°C mit mäßiger Südwestströmung (~20-25 km/h). Hohe Wolken (~3-4/8). Schneeoberfläche -9°C.



Abbildung 32: Die AWS 28 am HEF. Rechts der Lollipop Pegel: Foto: Rainer Prinz, 22.02.2021.

Schneeprofil: Hintereisferner AWS28

Name: R. Prinz, A. Voordendag	E-Mail: rainer.prinz@uibk.ac.at	Aufnahmedatum: 22. Feb. 2021 13:30
Ort: Hintereisferner AWS28	Seehöhe: 2797 m	Lufttemperatur: -2°C
Subregion: Gurgler Gruppe	Hangneigung: 5°	Niederschlag: kein Niederschlag
Region: Tirol	Exposition: NO	Intensität:
Land: Österreich	Windgeschw.: mäßig (20 - 40 km/h)	Bewölkung: bewölkt (3/8 - 4/8)
Lat/Long: 46.7978° / 10.7697°	Windrichtung: S	Schneeprofilklasse:



SnoProfilier 0.94 powered by mapyrus

© 2021 LAWIS | Uni-Wien

Abbildung 33: Das Schneeprofil bei AWS 28 vom 22.02.2021.

D.3.5 Feldkampagne 24.02.2021: Fensterreparatur Container IHE

Ziel der Feldkampagne:

- Reparatur der Fenster des Containers iHE
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, Georg Kaser – ACINN
- Mario Pohling – Schillinger Metallbau München (Erbauer des Containers): Anreise schon am Vortag, Übernachtung in Rofen im Auto (COVID bedingt waren alle Unterkünfte geschlossen)
- Paul Grüner – Schöne Aussicht

Ausgeführte Arbeiten:

- Anflug mit Helikopter von Rofen, Kaser und Grüner von der Schönen Aussicht. Ankunft an iHE ~08:30 Uhr.
- Der Container war nur wenig mit Schnee gefüllt, lediglich der Scanner-Raum mit ca. 30 cm. Mario hat das Problem schnell erkannt. Das Gerüst des Scanners wurde bei Einrichtung mit Stellschrauben in eine schräge Lage gezogen, damit ein optimaler Scanwinkel erreicht werden kann. Dabei drückt nun aber dieses Gerüst gegen die Fensterbretter. Mit der Zeit haben die Fensterbretter dem Druck wohl nachgegeben und drücken nun ihrerseits gegen die Fenster. Dabei entsteht zu viel Reibung als dass die Kraft des Motors ausreicht, um die Fenster zu öffnen / schließen. Mario hat die Außenseite der Fensterbretter abgehobelt, damit sie die Fenster nicht mehr berühren. Somit war das Problem behoben. Die Fenster gleiten nun wieder schön entlang der Fensterbretter. Ein Verstellen des Scanners haben wir aufgrund der laufenden Messungen und der damit einhergehenden Veränderung der Scaengeometrie abgelehnt. Nebenbei soll der Scanner im Mai zur Wartung abgebaut werden.
- Rückflug ~14 Uhr. Kaser und Grüner mit Schi retour.

Situation:

~-2°C mit mäßiger Südwestströmung (~20-25 km/h). Vormittags großteils wolkenlos (~0-1/8), ab Mittag aufziehende hohe Bewölkung (bis 8/8). Lawinensperre der Straße Rofen-Vent bis 12-18 Uhr.



Abbildung 34: Anzeichnen der Schliffkanten zur Minimierung der Reibung der Fenster. Foto: Rainer Prinz, 24.02.2021.

D.3.6 Feldkampagne 29.07.2021: Wartung IHE, Smart Stake

Ziel der Feldkampagne:

- Einbau eines FI mit Wiedereinschaltautomatik im Container
- Kalibrierung der Niederschlagswaage IHE
- Einbau der LoRaWan Empfängerstation am Mast IHE
- Start des automatischen TLS Scanskriptes
- Installation des Smart Stake am HEF
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, Philipp Vettori – ACINN

Ausgeführte Arbeiten (bereits für 07.07. geplant aber aufgrund des Wetters in Rofen abgesagt):

Anflug mit Helikopter von Rofen gegen 08:00. Eine Rotation für Paul Grüner von der Schönen Aussicht zum Teufelsegg. Abholung mit Heli um 13 Uhr und kurzer Zwischenstopp am HEF (AWS 28) zur Installation des Smart Stake.

- Umbau des Sicherungskastens im Container mit Einbau des FI mit Wiedereinschaltautomatik. Test erfolgreich.
- Kalibrierung der Niederschlagswaage (Geonor T200B):
 - (i) Kalibrierte Messfrequenz der Waage mit leerem Behälter: 1108.7 Hz. Am 29.07. beobachtete Frequenz mit leerem Behälter: 1167.4 Hz. Abweichung daher kleiner als 10% -> keine Neukalibrierung der Umrechnung Hz in mm notwendig. Offset entspricht ca. 2 mm und lässt sich durch im Behälter verbliebene Öl-Wasserrückstände erklären.
 - (ii) Nach Zugabe einer abgemessenen Menge Wasser von 1000 g (sollte exakt 50 mm Niederschlag entsprechen) wurden 52.19 mm registriert, also Zugabe plus Offset. Behälter mit ~5 l Frostschutz und ~1/2 l Paraffin aufgefüllt
- Einbau der LoRaWan Antenne des Empfängers an der Westseite des Mastes in Höhe der Antenne für die WLAN Strecke zur Station Hintereis. Kabel am Eingang zur Loggerbox mit Blitzschutz versehen. PoE mit 12 V aus der Loggerbox versorgt.
- Script zum automatischen Scannen wieder gestartet, Daten der bereits nach Innsbruck übertragenen Scans am Computer gelöscht. Alte Satellitenantenne und das Manual für das Protective Housing des Scanners nach Innsbruck (Annelies) gebracht.
- Installation des Smart Stake (Hersteller A2 Photonic Sensors): Dieser Prototyp zur Messung der Ablation und Übermittlung der Daten in Echtzeit via LoRaWan wurde uns durch Vermittlung des WGMS von der Kilianjournefoundation zum Test am HEF zur Verfügung gestellt. Datenverbindung konnte noch nicht hergestellt werden. Lollipop abgelesen.

Situation:

Hochsommerlich warm mit 0°C Grenze >4000 m, 0/8-2/8, schwach windig aus S.



Abbildung 35: Der automatische FI-Schalter im Container IHE. Foto: Rainer Prinz, 29.07.2021.



Abbildung 36: Der SmartStake nahe dem Lollipop (L5). Eine Schnur mit Gewicht am Ende wird bis zum Boden eines Bohrlochs (6 m) im Gletscher hinabgelassen. Bei Schmelze verringert sich die Distanz der Oberfläche zum Grund des Bohrlochs. Die Schnur wird locker, über eine Haspel aufgewickelt und diese Länge registriert. Foto: Rainer Prinz, 29.07.2021.

D.3.7 Feldkampagne 19.08.2021: Im Hinteren Eis

Ziel der Feldkampagne:

- Wartung Container IHE – Einbau einer USV
- Vermessung der Sensorhöhen an AWS IHE
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz – ACINN
- Lorenz Prinz, Xaver Prinz (privat)

Ausgeführte Arbeiten:

Mit Paul Auffahrt zur Schönen Aussicht. Aufstieg in Hintere Eis (~11:30). Abstieg gegen 13:30.

- In Container war die Sicherung "Steckd. Tisch" gefallen, alle anderen Sicherungen waren ein (außer "Heizbänder", die permanent aus ist).
- Einbau der USV zur möglichst unterbrechungsfreien Stromversorgung des PC. Nur PC angesteckt; Modell Dell Optiplex 755 Core2. USV-Kontrollprogramm am PC installiert. Sicherung wieder eingeschaltet, USV erfolgreich getestet.
- Skript zur automatischen Steuerung des Scanners gestartet. Script konnte nicht auf Scanner zugreifen – Annelies hat es nach Telefonat mit einem Restart des Protective Housings geschafft.
- Sensorhöhen am Mast neu vermessen.

Sensor	Höhe über Grund (cm)	Kommentar
Strahlung: CNR4	135	
Distanz: SR50	112	
Windgeschwindigkeit: 2D Sonics	150; 300; 600	alle genordet
Windgeschwindigkeit: 3D Sonic	318	N = 70°
Lufttemperatur / Feuchte: T / RH	150; 550	
Niederschlag: Geonor T200-B	365	
Schneedrift: Flowcapt FC4	51 (Unterkante)	

Situation:

Sommerlich warm mit max. 8°C auf 3000 m. Nach wolkenlosem Tagesanbruch rasch zunehmende Quellbewölkung und Gipfel (auch das hintere Eis) zeitweise ab 13:30 in den Wolken. Wind schwach aus NW.

D.3.8 Feldkampagne 07.09.2021: Fensterreparatur Container IHE

Ziel der Feldkampagne:

- Reparatur Fenster Container IHE
- Fotodokumentation

Teilnehmer:

- Rainer Prinz, Annelies Voordendag – ACINN
- Mario Pohling – Schillinger Metallbau: Anreise am 06.09., Nächtigung im Geierwallyhof.

Ausgeführte Arbeiten:

Fortsetzung der Fensterreparatur vom 24.02.2021, die sich als nicht ausreichend erwies. Finanzierung über die Fakultät für Geo- und Atmosphärenwissenschaften. Mit Helikopter um 07:00 ins Hintere Eis, Abholung um 14:30.

- Fenster: Die Fensterrahmen wurden ~1 cm nach innen versetzt und etwas abgeschliffen, um den vorbeigleitenden Fenstern so wenig Auflagefläche und Reibung wie möglich zu bieten. Das Gestell des Laserscanners wurde wenige mm nach innen gekippt, sodass dieses nicht mehr gegen die Fensterbänke drückt und diese nach außen, gegen die Fenster schiebt.
- Laserscanner: Neues Field of View erstellt. Entgegen der Befürchtung verlieren wir kaum Gletscherfläche im Sichtfeld des Scanners. Der Gletscher ist einerseits in den letzten Jahren schmaler geworden und die Verluste am orographisch rechten Gletscherrand andererseits sind minimal.
- Sonstige Arbeiten:
 - Bildschirm im Container getauscht.
 - Router auch auf die USV angeschlossen (Jetzt PC und Router autonom).
 - Laserscanner und Stromversorgung Datenlogger/Fenster (Dreier-Steckerleiste unterhalb des Sicherungskastens) auf die separat abgesicherte "Steckdose Laserscanner" angeschlossen, um etwas Last von der Sicherung "Steckdose Tisch" zu nehmen. ACHTUNG: Einsteckrichtung dieser Steckerleiste beachten! Die automatische Steuerung der Fenster ist sensitiv auf die Phase bzw. den Nullleiter des Schuko-Steckers! Stecker mit Tape gesichert.
 - Uhr des PC synchronisiert (war ca. 2 min hinten).
 - Uhr des Datenloggers im Container synchronisiert. (War im Juli 1971)

Situation:

In der Früh Bodenfrost und Reif. Spätsommerlich warm mit max. 7°C auf 3000 m. Vormittags Durchzug hoher Wolkenfelder (bis 7/8) mit schwachem Wind aus NE, später NW, nachmittags Quellbewölkung (4/8).