

**Arbeiten des Institutes für Meteorologie und Geophysik
der Universität Innsbruck
im IHP 1975–1980**

**Eis-, Wasser- und Wärmehaushalt des Hintereisferners
im Rofental bei Vent in Tirol
während der Jahre 1975–1980)**

Mit 10 Abbildungen und 8 Tabellen

Inhalt

1.	Aufgabenstellung	43
2.	Massenhaushalt	43
	2.1. Die Lage des Arbeitsgebietes	43
	2.2. Ablationspegel	45
	2.3. Pegelbewegung	46
	2.4. Schneeschächte	47
	2.5. Massenbilanz und Gleichgewichtslinie	48
	2.6. Flächenverhältnisse	49
	2.7. TS-Kurven	49
	2.8. Klimadaten	51
3.	Wärmehaushalt	51
	4.1. Messungen von Eis- und Firntemperaturen am Hintereisferner	52
	4.2. Oberflächen-Temperaturen	52
	4.3. Der Spektralverlauf der Albedo	53
	4.4. Verdunstung	54
	Literatur	54

1. Aufgabenstellung

Die Glieder der hydrologischen Bilanz (Niederschlag = Abfluß + Verdunstung + Speicherung) sollen für das Einzugsgebiet des Hintereisbachs bestimmt und mit dem Verhalten der Atmosphäre vom lokalen bis zum synoptischen Maßstab in Verbindung gesetzt werden.

Wegen der ungünstigen Beschaffenheit des Bachbetts vor der abschmelzenden Gletscherzunge konnten in der Periode 1975–1980 keine Abflußmessungen am Hintereisbach selber vorgenommen werden. Pegelmessungen sind erst von der Rofen- und Venterache vorhanden.

Die Arbeiten konzentrierten sich daher auf die direkte Bestimmung der Speicherung oder des Massenhaushalts des Hintereisferners, ferner auf die Bestimmung des Gebietsniederschlags und seit 1979 auch auf direkte Verdunstungsmessungen. Der klimatologische Teil des Projekts wird mit fortlaufenden Registrierungen an Stationen im Bereich des Gletschers und in Vent fundiert, und wird durch kurzfristige Wärmehaushaltsmessungen ergänzt.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchungen aus der Zeit des IHP 1975–1980 sind im folgenden zusammengefaßt. Für ausführliche Darstellungen wird auf die Veröffentlichungen verwiesen, die am Ende des Berichts angeführt sind.

2. Massenhaushalt

2.1. Die Lage des Arbeitsgebietes

Auf der Übersichtskarte des Rofen- und Niedertals (Abb. 1) sind die Abflußpegel und ihre Einzugsgebiete eingetragen. Das Einzugsgebiet der Rofenache ist 98 km² groß und war 1970 zu etwa 70 % vergletschert. Für die Pegelmeßstelle unterhalb des Zusammenflusses von Rofen- und Niedertalerache sind die entsprechenden Werte 165 km² und 40 %, für die Meßstelle unterhalb des Hochjochospizes lauten die Werte 26,6 km² und 58 % (1959). Von den 13 eingetragenen Totalisatoren sind heute 10 in Betrieb, Nr. 8, 11 und 12 sind eingestellt.

Im Gebiet des Hintereisferners sind zwei Klimastationen in Betrieb (Zunge 2440 m und Station Hintereis 3030 m). Zeitweise Registrierungen liegen vom Hochjochospiz und von 2800 m und 2960 m Höhe am Hintereisferner vor, wo während der Hauptablationsperiode 1971 eine Wärmehaushaltsstation in Betrieb war. Eine automatische Kamera zur Beobachtung der temporären Schneegrenze steht zwischen den beiden Gletschern am Rofenberg in der Nähe des Totalisators Nr. 3.

Die Station Hintereis wird von Vent in 5–6 Stunden über das Hochjochospiz erreicht oder in ca. 2 Stunden

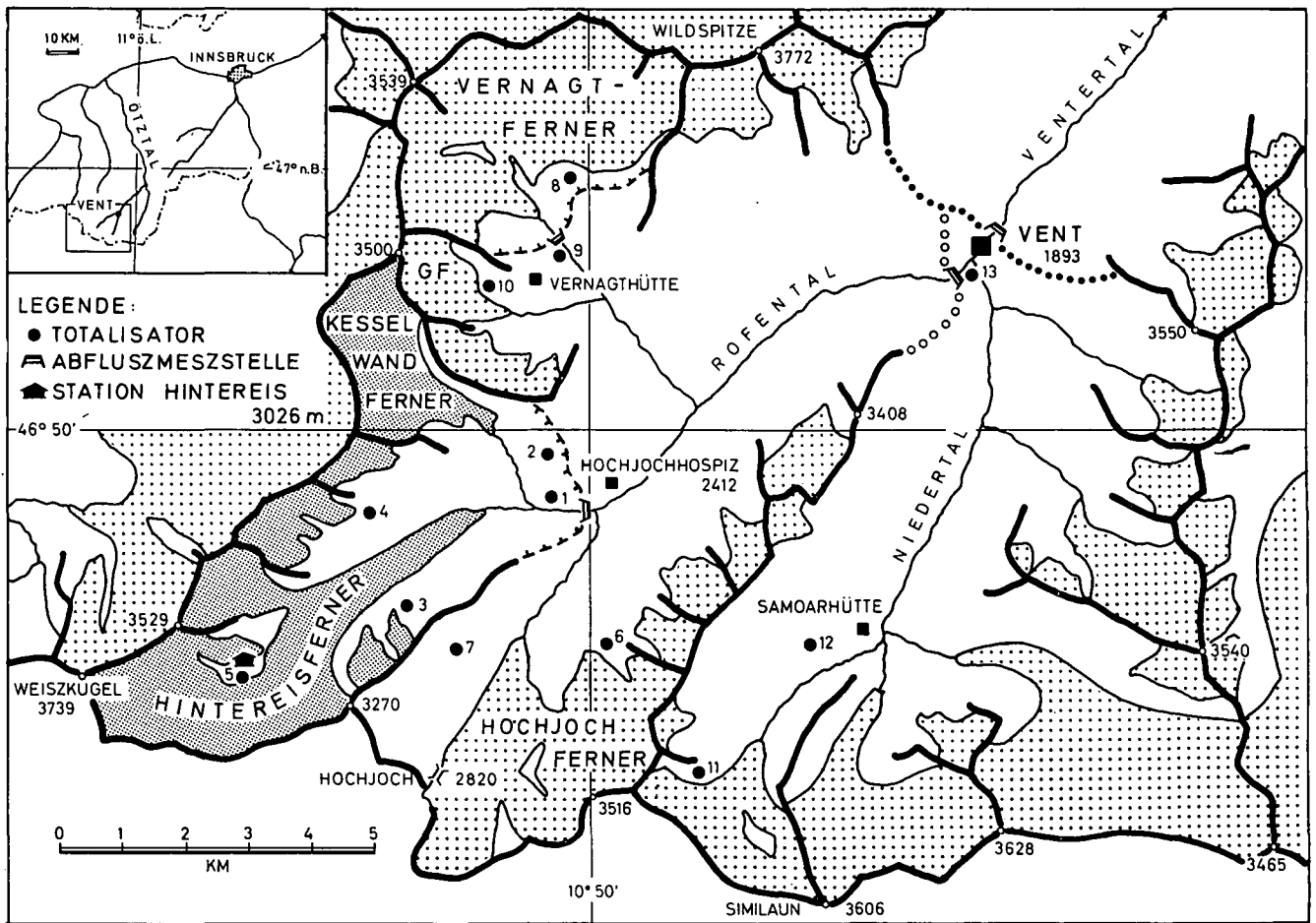


Abb. 1: Übersichtskarte des Einzugsgebietes der Schreibpegel Vent-Venterache (165 km²), Vent-Röfenache (98 km²) und Steg-Hospiz (26,6 km²); Gletscherflächen eng gerastert.

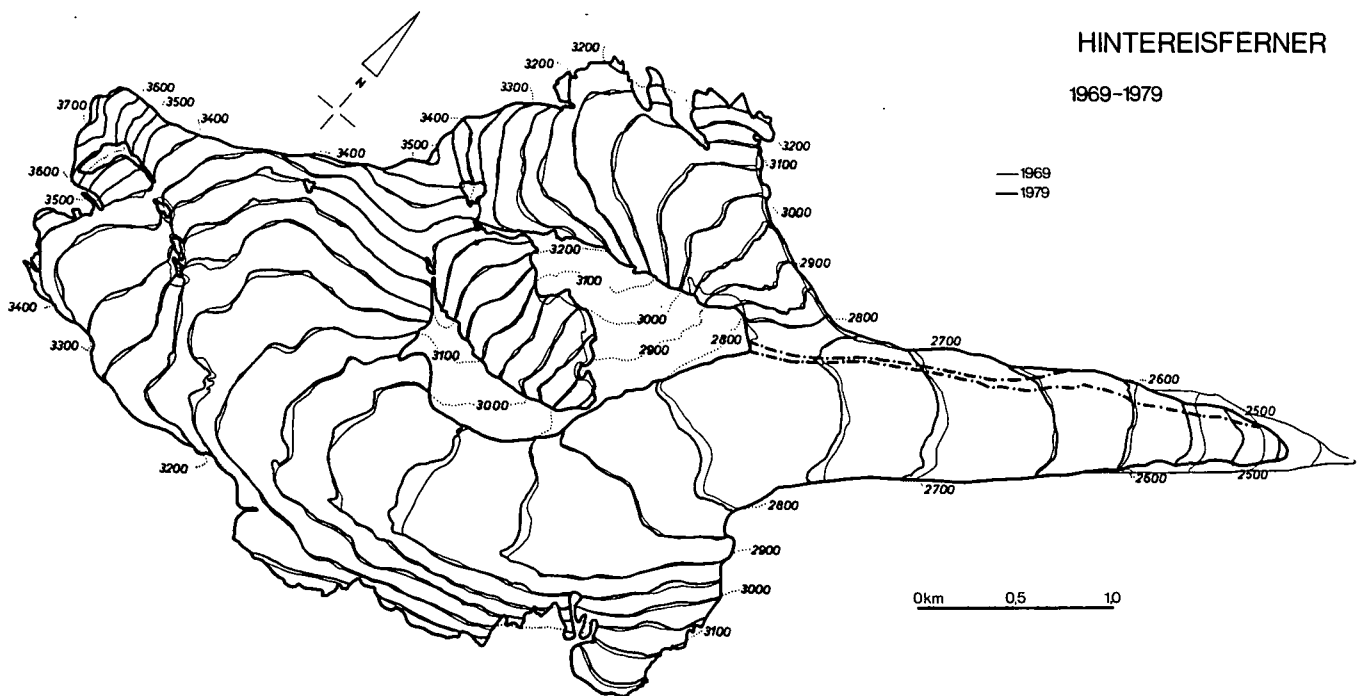


Abb. 2: Oberflächenvergleich des Hintereisferners des Jahres 1969 mit 1979.

von der Bergstation der Schnalstaler Gletscherbahn (Südtirol).

Am 14. August 1979 wurde vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen ein Bildflug über den Hintereisferner und die Zunge des Kesselwandferners durchgeführt. Aus dem Bildmaterial wurde in der Abteilung für Photogrammetrie des Amtes der Tiroler Landesregierung eine Karte im Maßstab 1 : 10.000 hergestellt. Aus dem Schichtlinienplan wurde ein digitales Geländemodell gewonnen, das die Berechnung von Energie- und Massenhaushalt in einem Netz von 20, 50 oder 100 m Maschenweite ermöglichen soll.

Die neue Karte ermöglicht auch den Volumsvergleich zum Jahr 1969, der in der Abbildung 2 wiedergegeben ist.

2.2. Ablationspegel

1974 standen auf der Zunge des Hintereisferners 101 Ablationspegel unter Beobachtung. Im Jahre 1975 waren es 89, 1976 – 84, 1977 – 75, 1978 – 78, 1979 – 98, 1980 – 85 Pegel. Bedingt durch die positiven Massenbilanzen der Haushaltsjahre 1976/77 und 1977/78

Tabelle 1
Nettoablation am Hintereisferner [cm Wasseräquivalent im hydrologischen Jahr].

Pegel	1976	1977	1978	1979	1980	Pegel	1976	1977	1978	1979	1980
81 (1)	493	432	334	437	436	25 (44)	201		85	304	182
72 (2)	572	478	383	447	428	26 (35)	207	107	107	255	237
9 (3)	462	399	368	467	461	27 (36)	204	92	88	217	175
2500 m						28 (37)	199	94	98	210	158
75 (4)	456	379	299	389	392	92 (38)	155	67	68	198	160
10 (5)	380	278	190	298	279	30 (45)	152	20	27	147	92
11 (6)	393	341	344	374	356	29 (42)	119	10	11	145	70
76 (7)	464	420	374	488	513	93 (48)	197	31	19	138	95
12 (8)	325	270	228	333	251	D3 (46)	105	33	-6	132	67
77 (9)	417	318	292	387	364	31 (39)	158	56	63	166	140
13 (11)	383	269	290	328	319	33 (41)	239	83	56	176	118
14 (10)	351	282	251	309	303	34 (40)	179	66	60	194	134
2600 m						112 (47)	130	42	17	136	97
80 (12)	286	245	212	308	244	40 (50)	132	-11	81	165	109
78 (13)	320	258	214	293	335	41 (49)	107	22	14	131	88
116 (14)	323	262	229	266	214	42 (52)	113	32	13	149	85
79 (15)	283	224	206	296	238	39 (53)	111	-4	60	157	61
16 (16)	293	231	217	268	298	94 (58)	90	Akk.	Akk.	88	
17 (17)	300	258	210	299	267	46 (54)	91	Akk.	Akk.	117	58
73 (18)	285	207	167	286	273	2800 m					
74 (19)	289	185	187	292	296	47 (55)	102	-8	-13	127	106
18 (20)	288	260	162	306	300	38 (61)	118	84	40	-18	96
86 (21)	259	164	160	260	213	48 (60)	109	-5	Akk.	36	24
22 (22)	279	225	189	264	264	49 (59)	71	-20	-56	93	28
82 (27)	234	186	136	259	237	50 (57)	91		5	98	55
85 (23)	318	164	66	170	233	52 (62)	31	22	1	11	74
20 (24)	245	160	115	212	162						
21 (26)	229	158	139	240	224						
87 (25)	205	147	105	237	207						
88 (28)	242	133	122	0	117						
2700 m											
23 (29)	210	143	134	218	197						
B5 (30)	185	114	107	212	174						
B8 (34)	218	132	117	206	129						
90 (31)	214	133	111	230	148						
89 (33)	187	115	93	225	178						
24 (32)	208	88	78	189	130						

Tabelle 2
Schneeschächte am Hintereisferner.

	1975/76	1976/77	1977/78	1978/79	1979/80
Meßstelle IA, ca. 2450 m (unter Langtauferer Spitze)					
Tiefe [cm]	88	351	209	220	78
Dichte [g/cm ³]	0,410	0,504	0,459	0,479	0,464
Wasserwert [cm]	36	177	96	106	36
Meßstelle SJ, ca. 3270 m (Steinschlagjoch)					
Tiefe [cm]	250	297	260	138	146
Dichte [g/cm ³]	0,416	0,504	0,482	0,434	0,521
Wasserwert [cm]	104	150	125	60	76
Meßstelle HJ, ca. 3315 m (Hintereisjoch)					
Tiefe [cm]	311	616	429	318	304
Dichte [g/cm ³]	0,433	0,534	0,473	0,516	0,536
Wasserwert [cm]	135	329	203	164	163
Meßstelle ST, ca. 3250 m (Schimppstollen)					
Tiefe [cm]	288	525	391	269	329
Dichte [g/cm ³]	0,477	0,530	0,518	0,505	0,574
Wasserwert [cm]	137	278	203	136	189
Meßstelle WJ, ca. 3170 m (Weißkugeljoch)					
Tiefe [cm]	250	460	429	294	345
Dichte [g/cm ³]	0,472	0,529	0,541	0,495	0,571
Wasserwert [cm]	118	243	232	145	196
Meßstelle BE, ca. 3145 m (Badeeis)					
Tiefe [cm]	250	460	344	261	239
Dichte [g/cm ³]	0,477	0,533	0,487	0,474	0,579
Wasserwert [cm]	119	245	167	124	138
Meßstelle TE, ca. 3070 m (Teufelsegg)					
Tiefe [cm]	195	390	196	181	179
Dichte [g/cm ³]	0,469	0,538	0,462	0,453	0,549
Wasserwert [cm]	91	210	90	82	98
Meßstelle LJ, ca. 3110 m (Langtaufererjoch)					
Tiefe [cm]	161	382	281	188	204
Dichte [g/cm ³]	0,447	0,520	0,493	0,471	0,558
Wasserwert [cm]	72	199	139	88	114
Meßstelle LS, ca. 3180 m (Stationsgletscher)					
Tiefe [cm]	220	430	237	160	233
Dichte [g/cm ³]	0,499	0,530	0,458	0,460	0,585
Wasserwert [cm]	110	228	108	73	136

sind einige dieser Pegel temporär in den unteren Bereich des Nährgebiets gelangt und konnten erst im Sommer 1979 zu einem Teil wieder gefunden werden. 10 Pegel wurden im Höhenbereich zwischen 2800 m und 1950 m auf Grund der Ausaperung des Gletschers im Sommer 1979 neu gesetzt. 1978 wurde die alte Numerierung der Ablationspegel aus Übersichtsgründen geändert und eine neue, durchlaufende Numerierung von 1–70 vom Zungenende bis zum Nährgebiet eingeführt. In der Tabelle 1 stehen die neuen Nummern in Klammer, die alte Numerierung an erster Stelle.

Jeweils im Herbst wurden alle vorhandenen Ablationspegel vermessen, so daß die Fließgeschwindigkei-

ten an der Oberfläche des Gletschers an vielen Punkten im Ablationsgebiet bekannt sind.

2.3. Pegelbewegung

Die Höhe und Koordinaten der Pegel am Hintereisferner werden jährlich eingemessen. Die Pegel des Längsprofils werden dabei jährlich an einem fixen Punkt neu eingemessen. Abbildung 3 zeigt die Bewegung der Längspegel L5, L6, L7 im Lauf von neun Jahren: die Jahreszahlen bei den Längspegeln geben jeweils den Sommer

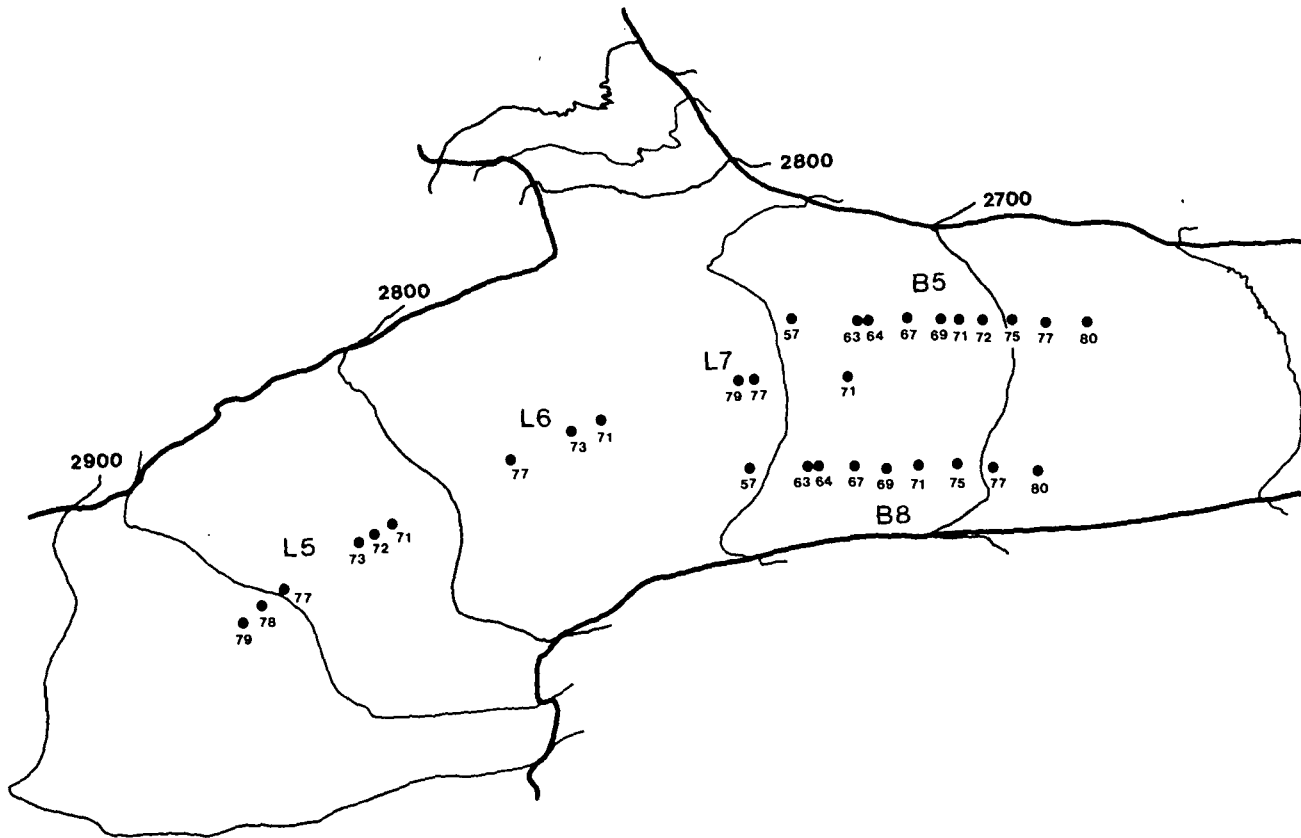


Abb. 3: Bewegung der Pegel von 1957–1980.

an, in dem dieser Pegel in der Ausgangsposition (79) eingesetzt wurde.

Die beiden Ablationspegel B5 und B8 wurden dagegen nie versetzt. Sie sind mit dem Gletscher mitgewandert und haben dabei von 1957 bis 1980 die angegebenen Positionen erreicht.

2.4. Schneeschächte

Die Netto- Akkumulation wird in Schneeschächten gemessen (Tab. 2), wobei die Schichtung, Korngröße, Härte und Dichte in senkrechtem Abstieg an der Schachtwand bis zu einem Leithorizont bestimmt wird.

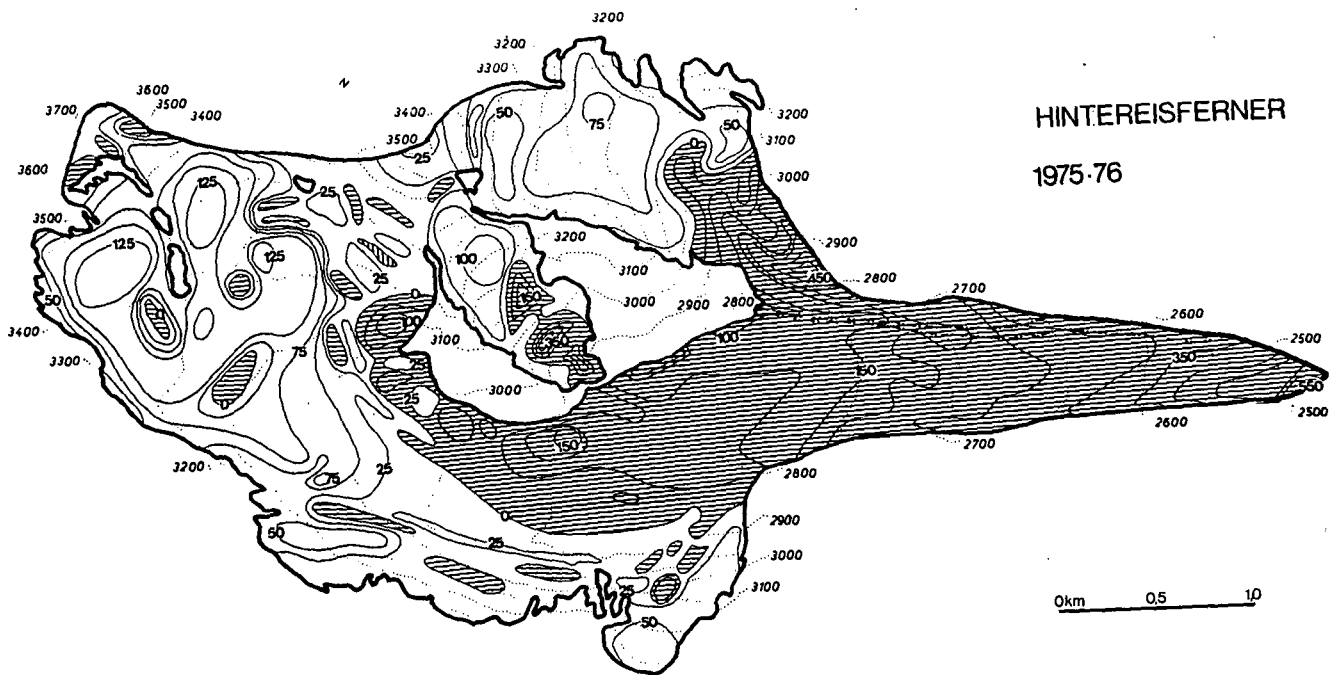


Abb. 4: Massenbilanz-Analysenkarte für das Haushaltsjahr 1975/1976.

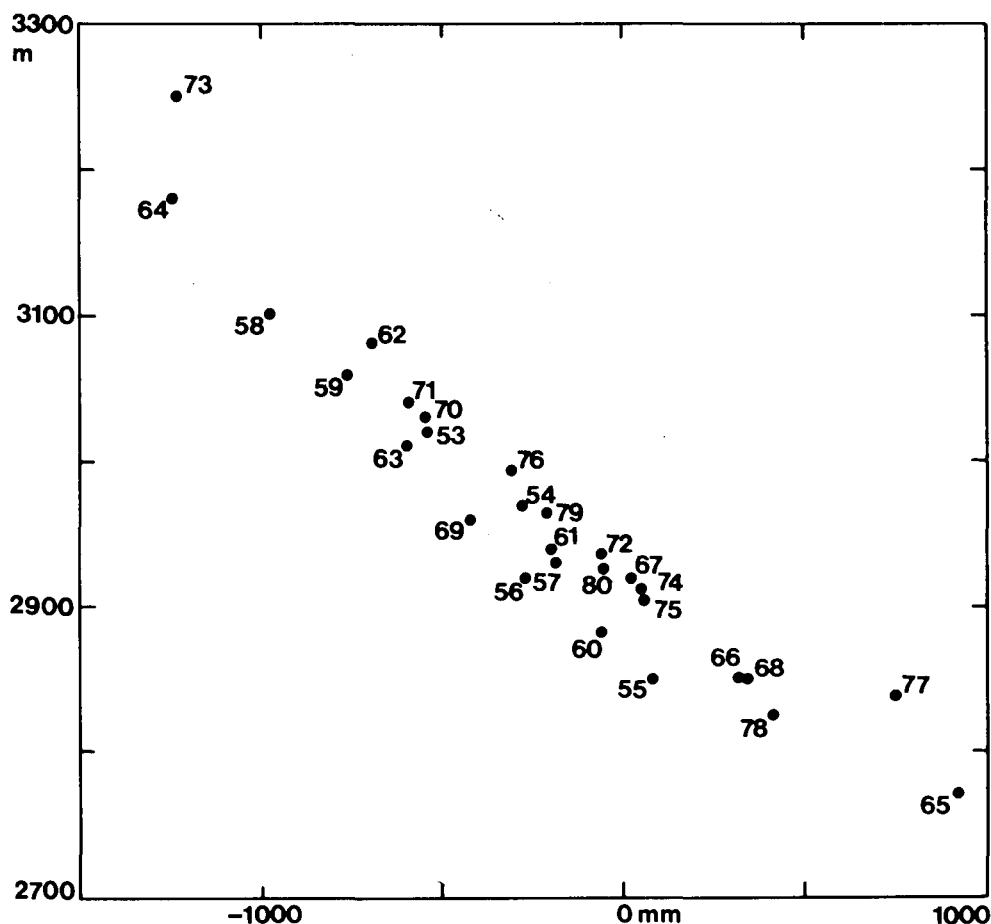


Abb. 5: Hinterseiferner: Höhe der Gleichgewichtslinie – spezifische Massenbilanz.

Tabelle 3
Massenbilanz Hinterseiferner 1975/76 bis 1979/80.

Haushaltsjahr 1. 10. – 30. 9.	Nettoakkumulation		Nettoablation		Massenbilanz			mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie [m]	Flächenverhältnisse	
	Sc [km ²]	Bc [10 ⁶ m ³ ww]	Sa [km ²]	Ba [10 ⁶ m ³ ww]	S [km ²]	B [10 ⁶ m ³ ww]	\bar{b} [mm ww]		Sc/S	Sc/Sa
1975/76	5,23	2,64	3,73	5,45	8,96	-2,81	-314	2.995	0,58	1,40
1976/77	6,95	9,24	1,93	2,48	8,88	+6,76	+760	2.840	0,78	3,59
1977/78	6,81	5,87	2,07	2,22	8,88	+3,65	+411	2.825	0,77	3,29
1978/79	5,22	2,85	3,55	4,84	9,08	-1,99	-219	2.970	0,58	1,47
1979/80	6,06	3,54	2,96	3,99	9,08	-0,45	- 50	2.930	0,67	2,05

Als solcher kann ein natürlicher Schmutzhorizont einer spätsommerlichen Schönwetterperiode dienen.

Zur Bestimmung der Schneedichte wird ein Ausstechrohr aus Aluminium (Pesola) mit einem Inhalt von 500 cm³ (19,6 cm Länge, 25,5 cm² Grundfläche) verwendet. Die Masse des ausgestochenen Schnees wird mit einer Federwaage bestimmt.

2.5. Massenbilanz und Gleichgewichtslinie

Die Gleichgewichtslinie verbindet alle Punkte, an denen die spezifische Massenbilanz Null ist. Da diese Bedingung auch um unzusammenhängende, apere Eisflä-

chen erfüllt ist, ist die Bestimmung einer mittleren Höhe der Gleichgewichtslinie aus Karten oder Photos nicht immer zielführend. Die mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie wird daher aus der Höhenverteilung der Massenbilanz als die Höhe mit $\bar{b} = 0$ ausgewertet (Abb. 4).

Der Zusammenhang zwischen dieser Höhe und der Massenbilanz ist in Abb. 5 abgebildet. Er wäre dann perfekt, wenn die Bilanz-Höhenverteilung in jedem Jahr die gleiche Form hätte. Die Bestimmung der Bilanz aus der Höhe der Gleichgewichtslinie ist eine indirekte Methode, die dadurch an praktischem Wert gewinnt, daß sie mit Ausnahme von extrem negativen Jahren nur einen Besuch oder ein Photo des Gletschers am Ende des Haushaltsjahres voraussetzt (Tab. 3).

2.6. Flächenverhältnisse

Das Akkumulationsgebiet ist die Fläche S_c , in der die spezifische Bilanz positiv ist, $b = c > 0$, im Ablationsgebiet S_a ist sie negativ, $b = a < 0$. Da bei einem stationären Gletscher die Oberfläche unverändert bleibt, muß die jährliche Netto-Akkumulation $\bar{c} \cdot S_c$ durch die Gletscherbewegung ins Ablationsgebiet transportiert werden, wo sie abschmilzt. Die Identität $\bar{c} \cdot S_c = \bar{a} \cdot S_a$ und die Tatsache, daß \bar{c} und \bar{a} aus der Bilanz-Höhenverteilung $b(h)$ direkt bestimmt werden kann, bedeutet, daß bei einem vorgegebenen Verlauf von $b(h)$ und von $S(h)$ die Massenbilanz durch das Verhältnis S_c/S_a ausgedrückt werden kann. Durch $b(h)$ bekommt dieses Flächenverhältnis eine energetische Komponente, durch $S(h)$ eine topographische (Tab. 4).

Die Abbildung 6 zeigt die Korrelation der mittleren spezifischen Massenbilanz des Hintereisferners mit den Flächenverhältnissen S_c/S_a und S_c/S , wobei $S = S_a + S_c$. Wie beim Zusammenhang zwischen Höhe der Gleichgewichtslinie und Massenbilanz ist auch hier die geringe Streuung der Werte auf die geringe Änderung des Verlaufs von $b(h)$ von einem Jahr zum anderen zurückzuführen.

2.7. TS-Kurven

Die Korrelation der Massenbilanz mit der Summe der positiven Gradtage wird dadurch stark verbessert, daß die Wärme, die zum Abschmelzen von Neuschnee auf dem Gletscher benötigt wird, als eine bestimmte Anzahl von Gradtagen abgezogen wird. Diese reduzierte Zahl der positiven Gradtage wird mit TS bezeichnet, wobei T die Temperatur als Parameter der Globalstrahlung bedeutet, S den Neuschnee als Parameter der Albedo (Abb. 7). Nur der Teil des Niederschlags muß berücksichtigt werden, der als Schnee auf den Gletscher fällt und damit die Albedo erhöht und die Ablation verringert. Überdurchschnittlicher Winterschnee wird durch Verschiebung des Nullpunkts der TS- Skala zu negativen Werten ausgeglichen, nach trockenen Wintern werden positive Gradtage vorgegeben.

Der Korrelationskoeffizient der TS-Werte mit der Massenbilanz ist $-0,94$. Die Standardabweichung der so berechneten Bilanz von der Regressionsgeraden ist 190 mm oder weniger als 10 % der Schwankungsbreite zwischen den beiden Extremen des Massenhaushalts (1963/64: -1.244 mm, 1964/65: $+925$ mm).

Tabelle 4
Mittlere spezifische Massenbilanz \bar{b} auf Flächen ΔS zwischen 50 m-Isohypsen.

Höhenstufe [m]	1975/76		1976/77		1977/78		1978/79		1979/80	
	Fläche \bar{b}		Fläche \bar{b}		Fläche \bar{b}		Fläche \bar{b}		Fläche \bar{b}	
	[km ²]	[g/cm ²]	[km ²]	[g/cm ²]	[km ²]	[g/cm ²]	[km ²]	[g/cm ²]	[km ²]	[g/cm ²]
3750-3700	0,002	+ 12	0,002	+ 37	0,002	+ 12	0,004	+ 13	0,004	+ 0
3700-3650	0,024	+ 11	0,024	+ 55	0,024	+ 12	0,023	+ 4	0,023	+ 3
3650-3600	0,031	- 2	0,031	+ 74	0,031	+ 15	0,032	+ 7	0,032	+ 15
3600-3550	0,023	+ 5	0,023	+114	0,023	+ 38	0,023	+ 17	0,023	+ 13
3550-3500	0,026	+ 9	0,026	+126	0,026	+ 42	0,026	+ 14	0,026	+ 19
3500-3450	0,085	+ 34	0,085	+166	0,085	+ 64	0,086	+ 38	0,086	+ 22
3450-3400	0,157	+ 44	0,157	+166	0,157	+ 80	0,165	+ 47	0,165	+ 31
3400-3350	0,296	+ 50	0,296	+186	0,296	+104	0,294	+ 54	0,294	+ 48
3350-3300	0,433	+ 78	0,433	+221	0,433	+132	0,423	+ 72	0,423	+ 72
3300-3250	0,449	+ 59	0,449	+176	0,449	+104	0,469	+ 53	0,469	+ 61
3250-3200	0,510	+ 56	0,510	+161	0,510	+ 98	0,524	+ 46	0,524	+ 48
3200-3150	0,675	+ 58	0,675	+170	0,675	+114	0,711	+ 55	0,711	+ 68
3150-3100	0,840	+ 46	0,840	+172	0,840	+105	0,871	+ 54	0,871	+ 73
3100-3050	0,796	+ 38	0,796	+151	0,796	+ 94	0,809	+ 41	0,809	+ 61
3050-3000	0,639	+ 10	0,639	+106	0,639	+ 78	0,657	+ 26	0,657	+ 38
3000-2950	0,642	- 12	0,642	+ 79	0,642	+ 55	0,629	+ 2	0,629	+ 14
2950-2900	0,587	- 36	0,587	+ 53	0,587	+ 43	0,618	- 24	0,618	- 3
2900-2850	0,500	- 60	0,500	+ 28	0,500	+ 19	0,519	- 54	0,519	- 22
2850-2800	0,418	- 91	0,418	- 7	0,418	0	0,400	- 74	0,400	- 46
2800-2750	0,602	-124	0,602	- 27	0,602	- 33	0,617	-126	0,617	- 83
2750-2700	0,357	-199	0,357	- 91	0,357	- 86	0,349	-210	0,349	-152
2700-2650	0,364	-249	0,364	-170	0,364	-129	0,388	-210	0,388	-199
2650-2600	0,218	-295	0,195	-228	0,195	-205	0,214	-286	0,214	-267
2600-2550	0,144	-362	0,126	-270	0,126	-248	0,110	-316	0,110	-305
2550-2500	0,102	-418	0,085	-343	0,085	-301	0,073	-349	0,073	-333
2500-2450	0,035	-509	0,019	-420	0,019	-341	0,042	-389	0,042	-383
	8,96	-31,4	8,88	+76,1	0,88	+41,1	9,079	-21,9	9,079	-5,0

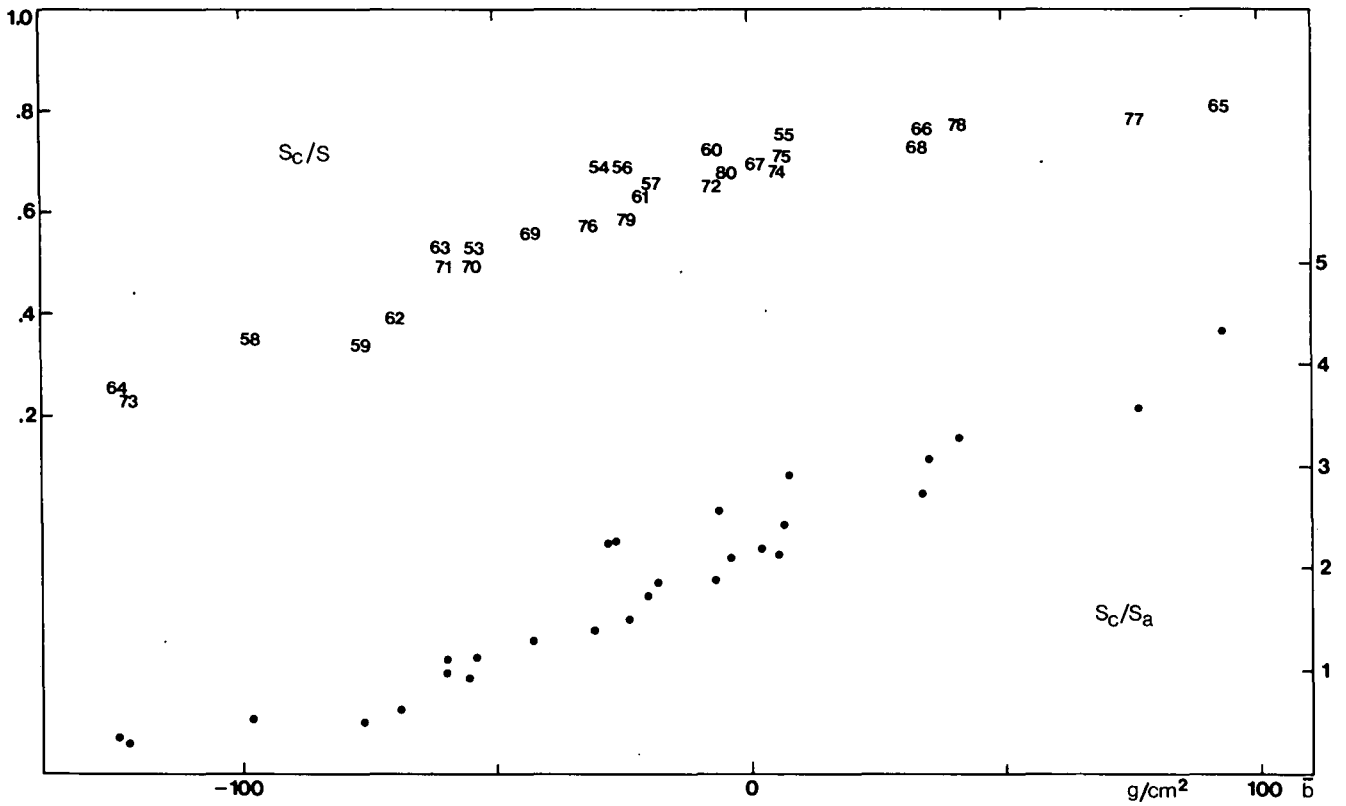


Abb. 6: Hinterseiferner: Flächenverhältnisse und mittlere spezifische Massenbilanz.

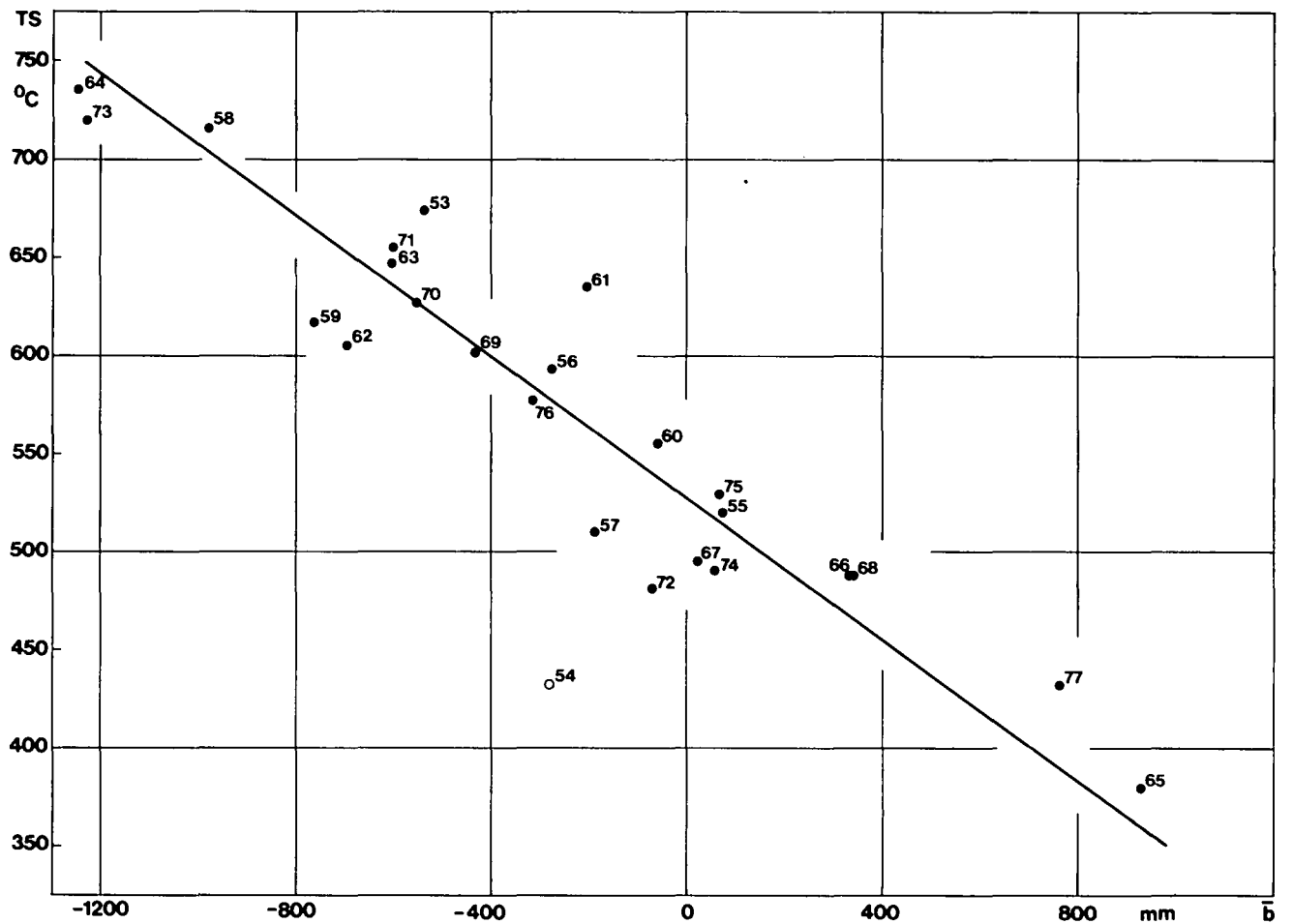


Abb. 7: Hinterseiferner: TS-Werte und mittlere spezifische Massenbilanz.

2.8. Klimadaten

Während des internationalen hydrologischen Programms wurde die Erfassung von Klimadaten in Vent (1.906 m), vor der Zunge des Hintereisferners (2.442 m) und an der Station Hintereis (3.030 m) fortgesetzt.

In Vent war am 31. 12. 1977 der tägliche Klimadienst aus personellen Gründen eingestellt worden. Dadurch mußte die Registrierung der Sonnenscheindauer, die Beobachtung der Bewölkung und des Witterungsablaufs fallen gelassen werden. Nach wie vor wird aber der Luftdruck, die Temperatur, die relative Feuchte, der Wind und der Niederschlag registriert.

An der Station Hintereisferner-Zunge werden ebenfalls Temperatur, relative Feuchte und Wind (Woelfle) registriert. Der Niederschlag aus Wartungsgründen jedoch nur im Sommer mit einer Niederschlagswaage.

Auf der Station Hintereis wurden bis zum Juni 1977 die Temperatur und die relative Feuchte mit Thermohygrographen registriert, was aber nur während der Ablationsperiode möglich war. Die Datenerfassung wurde dann auf Magnetband (Energieversorgung mit Solarzellen) umgestellt und erlaubt einen ganzjährigen Betrieb (Temperaturjahresmittel 1978: $-5,0^{\circ}\text{C}$). Die relative Feuchtigkeit und der Luftdruck werden nur im Sommer registriert.

Im Sommer werden die Geräte an den Gletscherstationen alle 10 bis 14 Tage, während der Arbeitseinsätze ständig und im Winter monatlich kontrolliert und gewartet. Dadurch wird eine befriedigende Genauigkeit gewährleistet, was sich auch in den erhaltenen mittleren Temperaturgradienten zwischen den Stationen niederschlägt. Darin zeichnet sich nicht nur die mittlere Temperaturschichtung der Atmosphäre, sondern auch ein

„Ausaperungseffekt“ ab. Es zeigt sich eine „Überhitzung“ der tiefer liegenden Stationen im Mai und Juni gegenüber der Station Hintereis, bei der zu dieser Zeit noch winterliche Bedingungen vorherrschen. Die größeren Gradienten in diesen Monaten täuschen auf Grund der unterschiedlichen Bodenbeschaffenheit an den Stationen eine etwas labilere Schichtung der Atmosphäre vor. Sie wird in der freien Atmosphäre etwas abgeschwächt vorhanden sein. Ein interessanter monatlicher Temperaturgradient tritt im November 1978 mit $-0,1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ zwischen der Station Hintereis und Hintereisferner-Zunge auf. Es gab vom 1. bis zum 26. keinen Niederschlag und die Bewölkung bestand während dieser Zeit, wenn überhaupt, größtenteils aus hohen Wolken. Die Zungenstation hat im November auf Grund ihrer Horizontüberhöhung nur am Nachmittag kurz Sonne, wogegen die Station Hintereis auf dem Grat eines nach Süden geneigten Hanges liegt und in dieser Richtung nur eine geringe Überhöhung des Horizontes aufweist. Auf Grund dieser Gegebenheiten ergibt sich für die Zungenstation eine zu niedrige Monatsmitteltemperatur im Vergleich zur besonnten Umgebung auf selber Höhe.

3. Wärmehaushalt

Nach einer Reihe von Voruntersuchungen wurde im Sommer 1971 in 2.960 m Höhe eine Meßstation auf den Hintereisferner errichtet, um die Wärmehaushaltskomponenten und deren Veränderungen im Zusammenhang mit dem Witterungsablauf und den daraus resultierenden Auswirkungen auf den Massenhaushalt während einer Ablationsperiode studieren zu können.

Tabelle 5

Mittelwerte der Temperatur [$^{\circ}\text{C}$], berechnet aus $(7 + 19 + \text{Max.} + \text{Min.})/4$ und Niederschlagssummen [mm] in Vent in den Jahren 1975–1980.

Jahr	Temperatur			Niederschlag		
	Jahresmittel	Sommer 1. 6. – 31. 8.	Ablationsperiode 1. 5. – 30. 9.	Jahressumme	Sommer 1. 6. – 31. 8.	Ablationsperiode 1. 5. – 30. 9.
1975	1.5	8.5	7.9	763	317	478
1976	1.1	8.8	7.3	642	206	374
1977	1.9	8.6	7.1	727	298	405
1978	1.4	8.2	6.8	564	183	303
1979	1.0	(8.5)	7.2	823	226	367
1980	0.8	(8.8)	7.3	481	160	229

Tabelle 6

Mittelwerte der Temperatur [$^{\circ}\text{C}$], berechnet aus $(7 + 19 + \text{Max.} + \text{Min.})/4$ an der Hintereisferner-Zunge (2442 m) und an der Station Hintereis (3030 m) in den Jahren 1975–1980.

Jahr	Hintereisferner-Zunge		Station Hintereis	
	Sommer 1. 6. – 31. 8.	Abl.-Periode 1. 5. – 30. 9.	Sommer 1. 6. – 31. 8.	Abl.-Periode 1. 5. – 30. 9.
1975	5.3	4.6	1.7	0.8
1976	5.7	4.0	1.6	0.1
1977	5.3	3.9	1.1	-0.1
1978	5.2	3.9	0.8	0.5
1979	5.4	4.0	1.5	0.6
1980	5.5		1.3	0.4

Die Abbildung 8 zeigt den Verlauf der kurzwelligen, der langwelligen und der Gesamtbilanz von Juli bis September 1971 an der Hauptstation Hintereisferner. Die langwellige Bilanz zeigt einen bis ins Detail gehenden konphasen Verlauf mit der Bewölkung. Außerdem fällt der antiphasen Verlauf von langwelliger und kurzwelliger Strahlungsbilanz auf. Dies kann darauf zurückgeführt werden, daß bei geringen Albedoschwankungen die kurzwellige Bilanz nur vom Betrag der Globalstrahlung abhängt.

Während die Globalstrahlung mit zunehmender Bewölkung kleiner wird, nimmt die langwellige Bilanz zu. Insgesamt sieht man aber aus den Abbildungen, daß die Gesamtstrahlungsbilanz (B) positiv mit der kurzwelligen Bilanz ($S + D + R_H - R$) korreliert ist, während

Tabelle 7

Mittlere Temperaturgradienten [$^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$] zwischen der Station Vent (1906 m), Hintereisferner-Zunge (2442 m) und der Station Hintereis (3030 m).

Jahr	Vent – Station Hintereis		Vent – Hintereisferner-Zunge		Hintereisferner-Zunge – Station Hintereis	
	Sommer 1. 6. – 31. 8.	Ablationsperiode 1. 5. – 30. 9.	Sommer 1. 6. – 31. 8.	Ablationsperiode 1. 5. – 30. 9.	Sommer 1. 6. – 31. 8.	Ablationsperiode 1. 5. – 30. 9.
1975	0.60	0.63	0.60	0.62	0.61	0.65
1976	0.64	0.64	0.58	0.62	0.70	0.66
1977	0.67	(0.64)	0.62	0.60	0.72	0.68
1978	0.66	(0.65)	0.56	0.54	0.75	0.75
1979	(0.62)	(0.59)	(0.58)	(0.60)	0.66	0.58
1980	(0.65)	(0.62)	(0.57)	(0.55)	0.72	(0.68)

Tabelle 8

Niederschlagswerte von Totalisatoren im Raum Hintereisferner [in mm] im Zeitraum 1975/76 bis 1979/80.

	RM VENT (1900 m)				HOCHJOCHHOSPITZ (2360 m)			
	Akk.-Per. 1. 10. – 30. 4.	Abl.-Per. 1. 5. – 30. 9.	Sommer 1. 6. – 31. 8.	Hydrol. Jahr 1. 10. – 30. 9.	Akk.-Per. 1. 10. – 30. 4.	Abl.-Per. 1. 5. – 30. 9.	Sommer 1. 6. – 31. 8.	Hydrol. Jahr 1. 10. – 30. 9.
1975/76	188	402	215	590	233	436	240	669
1976/77	450	446	324	896	526	514	351	1040
1977/78	312	360	212	672	374	422	260	796
1978/79	297	438	263	735	417	481	304	898
1979/80	361	276	192	637	455	341	238	796
	PROVIANTDEPOT (2780 m)				ROFENBERG (2850 m)			
1975/76	249	510	293	759	327	521	282	848
1976/77	513	547	382	1060	672	551	412	1223
1977/78	350	468	270	818	472	571	349	1043
1978/79	390	557	947	947	516	575	347	1091
1979/80	450	408	858	858	479	415	286	894
	HINTEREISALM (2900 m)				HINTEREISFERNER, neu (2970 m)			
1975/76	355	591	328	946	319	621	317	940
1976/77				1319	922	836	515	1758
1977/78	450	624	370	1074	659	719	390	1378
1978/79	540	658	427	1198	667	742	468	1409
1979/80	532	568	394	1100	685	657	458	1342

für die langwellige Bilanz (A – E) keine Korrelation mit (B) feststellbar ist. Die Ursache dafür ist vor allem die im Mittel abnehmende Albedo der Gletscheroberfläche während des Sommers, was höhere Werte der kurzwelligen Bilanz zur Folge hat. Die Beträge der kurzwelligen Bilanz sind über weite Teile des Sommers doppelt so groß wie die der langwelligen Bilanz.

3.1. Messungen von Eis- und Firntemperaturen am Hintereisferner

Am Hintereisferner (Ötztal, Tirol) wird seit Sommer 1972 in 2.800 m Seehöhe an einem 15 m tiefen Profil die Temperatur des Gletschereises mit Thermoelementen gemessen. Seit Herbst 1975 erfolgten die Messungen zusätzlich in einem Längsprofil mit 5 Meßstellen zwischen 3.150 und 2.550 m Seehöhe mittels Thermistoren in Tiefen bis zu 16 m. Die jahreszeitlichen Schwankungen sind gekennzeichnet durch

- das Eindringen der Winterkälte und
- durch die sommerliche Erwärmung in Verbindung mit dem Abschmelzen der Winterschneedecke.

In 10 m Tiefe trifft bei Station 28 die Winterkälte sehr verspätet ein und die Jahresschwankung der Eistemperatur beträgt nur wenige Zehntel Grad Celsius. Insgesamt stieg die 10 m-Temperatur von $-1,5^{\circ}\text{C}$ (1972) auf $-0,5^{\circ}\text{C}$ (1976) an. Im Längsprofil zeigt sich 1976 mit Einsetzen der Schneeschmelze die rasche Erwärmung des Firns auf 0°C , während im Ablationsgebiet die Eistemperaturen ab 2 m Tiefe leicht negativ blieben.

3.2. Oberflächen-Temperaturen

Die Temperatur einer Oberfläche wird von ihrem Energiehaushalt bestimmt und von der Möglichkeit von Phasenübergängen. Wenn die Summe von Strahlungsbilanz-, Bodenwärmestrom und turbulenten Strömen fühlbarer- und Verdunstungswärme positiv ist, schmilzt

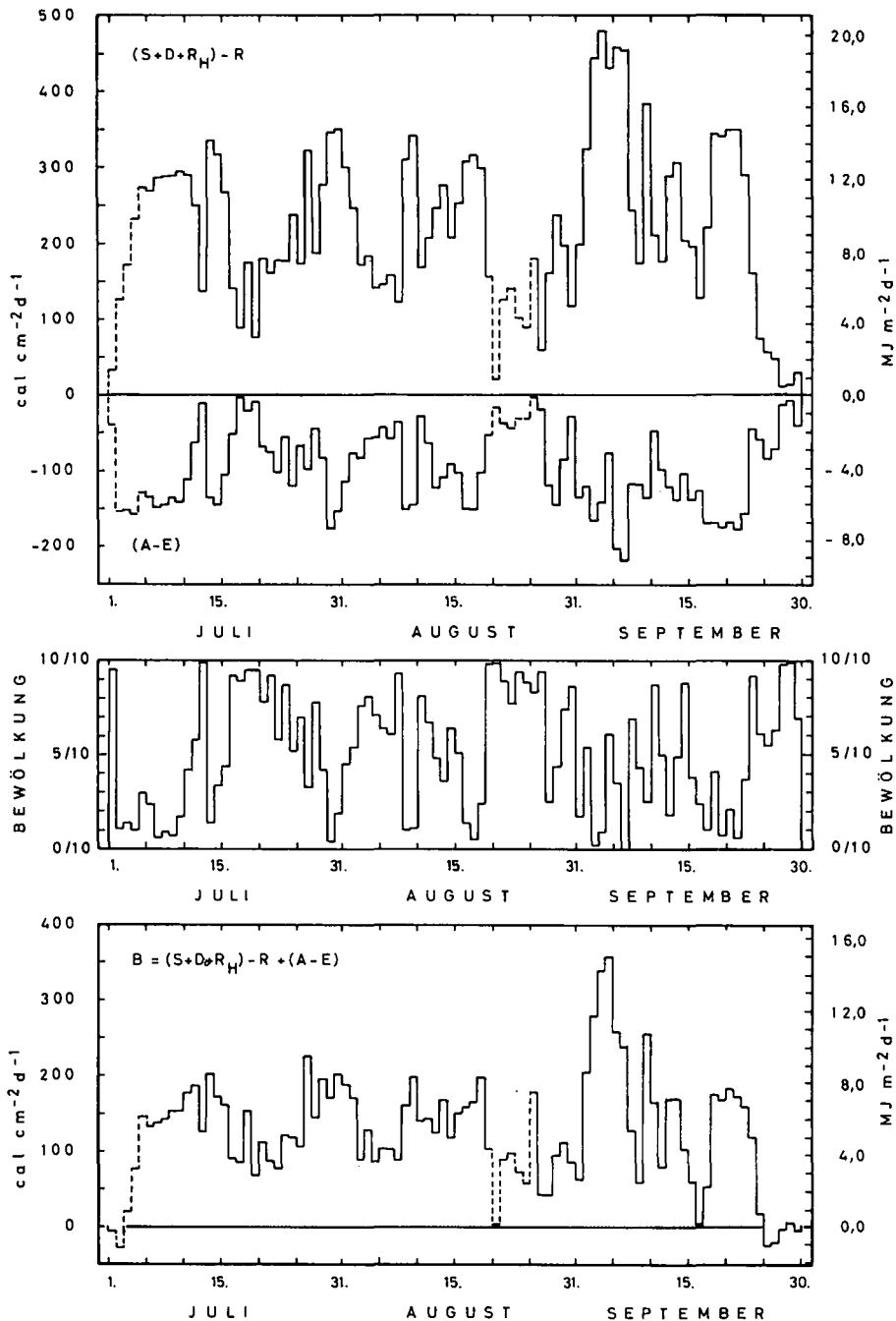


Abb. 8: Verlauf der kurzwelligen $(S + D + R_H) - R$, der langwelligen $(A - E)$ und der Gesamtstrahlungsbilanz B an der Hauptstation Hintereisferner von Juli bis September und Tagesmittel der Bewölkung ($6^h - 22^h$).

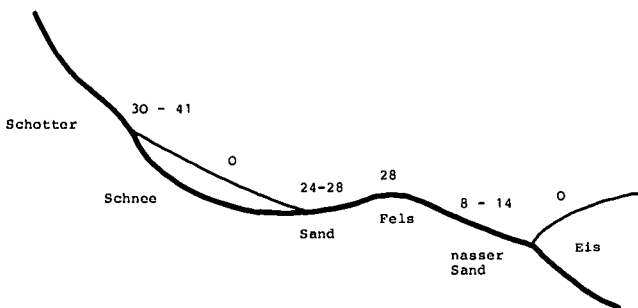


Abb. 9: Strahlungstemperaturen am Rand des Hintereisferners [°C]; 2400–2500 m, 29. Mai 1977.

eine Eisfläche und bleibt auf 0°C, während unter den gleichen Bedingungen Steine auf erhebliche positive Temperaturen aufgeheizt werden (Abb. 9). Im Vorfeld des Hintereisferners wurden im Juli mit einem Infrarotthermometer an trockenen Steinen Temperaturen von über 40°C beobachtet, an windausgesetzten Stellen wirkte der turbulente Austausch mit der kälteren Luft abkühlend auf die Steine, im feuchten Sand lagen wegen der Verdunstung die Temperaturen bei 10°, während sie bei trockenem Sand ca. 25°C betragen.

3.3. Der Spektralverlauf der Albedo

Die von Schnee- und Eisflächen reflektierte Energie dringt zum größten Teil erst in das Medium ein, bevor

sie durch Vielfachstreuung nach oben gelenkt wird. Das Spektrum der Albedo wird also von Absorption und Streuung bestimmt und zeigt vor allem im Bereich der H₂O-Banden im nahen Infrarot die Möglichkeit von Rückschlüssen auf die Struktur der Schneedecke.

Die Abbildung 10 zeigt eine Meßserie von Spektren der von einer ebenen Schneefläche auf der Seegrube bei Innsbruck hemisphärisch reflektierten Globalstrahlung. Bei frischgefallenem, trockenem Schnee (27. 3.) ist die Single Scattering Albedo wegen der feinen Kristallstruktur nahezu Eins und die Albedo bleibt auch im nahen Infrarot hoch. Mit der Durchfeuchtung der Schneedecke (30. 3.) überwiegt der Einfluß der Absorption an flüssigem Wasser und in den metamorphen Schneekörnern. Mit zunehmender Vergrößerung der Körner (1. 4. und 14. 6.) sinkt die Gesamtalbedo und die H₂O-Banden werden tiefer.

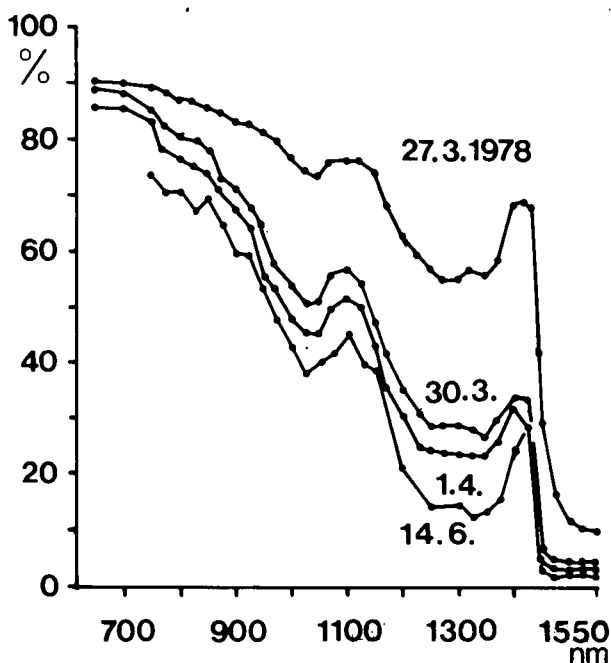


Abb. 10: Spektraler Verlauf der Albedo nach einer Meßserie der von einer ebenen Schneefläche reflektierten Globalstrahlung.

3.4. Verdunstung

Am HEF werden seit dem Sommer 1978 Messungen zur Untersuchung der Verdunstung von Schnee und Eis durchgeführt. Dabei dienen 10 Liter-Plexiglasbehälter als Lysimetertöpfe. Es werden jeweils 2 dieser Töpfe ineinander gestellt, der Äußere wird in die Schneedecke eingelassen, der Innere wird mit Schnee gefüllt und in bestimmten Zeitabständen herausgenommen und gewogen. Die Gewichtsunterschiede zwischen den Meßterminen werden auf 0.5 g genau bestimmt. Bei einer Oberfläche von 400 cm² entspricht 1 g Gewichtsabnahme einer Verdunstung von 0.025 mm. Dieselbe Meßmethode wird mit etwas mehr Arbeitsaufwand auf dem Gletschereis angewandt.

Im Sommer 1980 konnten mehrere Meßreihen durchgeführt werden. An der Station Hintereis (3.026 m) wurden zwischen dem 23. 7. und dem 3. 8. insgesamt 203 stündliche Messungen gemacht. In Abständen von mehreren Stunden wurden gleichzeitig an der Hauptstation (2.960 m in Gletschermitte) Wägungen durchge-

führt. Zwischen dem 21. 8. und dem 29. 8. wurden an der Zunge des Hintereisferners insgesamt 139 stündliche Messungen durchgeführt. Gleichzeitig mit jeder Wägung wurden Lufttemperatur und Dampfdruck, mit einem IR-Thermometer die Oberflächentemperatur und mit Windzählern in verschiedenen Höhen die Windgeschwindigkeit bestimmt.

Literatur

- 1) HOINKES, H. & STEINACKER, R.: Hydrometeorological implications of the mass balance of Hintereisferner, 1952–53 to 1968/69. – IAHS–AISH Publ. No. **104**, 144–149, 1975.
- 2) SCHNEIDER, H.: Die Karte des Kesselwandferners 1971 und die Grundlagen der Vermessungen. – Zeitschr. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie, **XI**, H. 2, 229–244, 1975.
- 3) MARKL, G.: Massenhaushaltswerte von Hintereisferner und Kesselwandferner 1968/69–1974/75. – Zeitschr. f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie, **XI**, H. 2, 271–272, 1975.
- 4) SIOGAS, L.: Die Windverhältnisse an der Station Hintereis (3.026 m) in den Ötztaler Alpen. – Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B., **25**, 79–89, 1977.
- 5) SIOGAS, L.: Die Luftdruckreihe Vent 1935–1970. Eine Analyse des jahres- und tagesperiodischen sowie des aperiodischen Schwankungsverhaltens an einer inneralpinen Talstation im Vergleich zu anderen Stationen des Alpenraumes. – Diss. Univ. Innsbruck, 150 S., 34 Tab., 25 Abb., 1977.
- 6) DREISEITL, E.: Zur Berechnung der Eisablation. – Zeitschr. f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie, **XII**(1976), H. 1, 75–78, 1977.
- 7) WAGNER, H. P.: Strahlungshaushaltsuntersuchungen am Hintereisferner/Ötztal während der Hauptablationsperiode 1971. – Diss. Univ. Innsbruck, 216 S., 99 Tab., 46 Abb., 1978.
- 8) MARKL, G.: Massenhaushaltsstudien am Hintereisferner. – Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, H. **31**, S. 55/1, 1978.
- 9) WAGNER, H. P.: Strahlungshaushaltsuntersuchungen am Hintereisferner (Ötztaler Alpen) während der Ablationsperiode 1971. – Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, H. **31**, S. 56/1, 1978.
- 10) DREISEITL, E.: Witterungsklimatologie von Vent und Massenbilanz des Hintereisferners. – Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, H. **31**, S. 57/1–5, 1978.
- 11) KUHN, M.: Die Höhe des Geschwindigkeitsmaximums im Gletscherwind als Parameter des Wärmehaushalts. – Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, H. **31**, S. 69/1–8, 1978.
- 12) MARKL, G., WAGNER, H. P.: Messungen von Eis- und Firntemperaturen am Hintereisferner (Ötztaler Alpen). Symposium über die Dynamik temperierter Gletscher. – Zeitschr. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie, **13** (1977), 261–265, 1978.
- 13) KUHN, M.: On the computation of heat transfer coefficients from energy balance gradients. – Journal of Glaciology, Vol. **22**(87), 263–272, 1979.
- 14) KUHN, M., KASER, G., MARKL, G., WAGNER, H. P. & SCHNEIDER, H.: 25 Jahre Massenhaushaltsuntersuchungen am Hintereisferner, Inst. für Meteorologie und Geophysik Innsbruck, 80 Seiten, 1979.
- 15) SCHNEIDER, H.: Aerial photogrammetric map of Kesselwandferner 1971. – In: Fluctuations of Glacier 1970–1975, Vol. **III**, 250–252, Paris (IAHS–UNESCO) 1977.
- 16) WAGNER, H. P.: Strahlungshaushaltsuntersuchungen an einem Ostalpengletscher während der Hauptablationsperiode. Teil 1, Kurzwellige Strahlung. – Arch. Met. Geoph. Bioklimat., Ser. B., Bd. **27**, 297–324, 1979.

- 17) WAGNER, H. P.: Strahlungshaushaltsuntersuchungen an einem Ostalpengletscher während der Hauptablationsperiode. Teil 2, Langwellige Strahlung und Strahlungsbilanz. – Arch. Met. Geoph. Bioklimat., Ser. B. Bd. **28**, 41–62, 1980.
- 18) STEINACKER, R.: Rückrechnung des Massenhaushaltes des Hintereisferners mit Hilfe von Klimadaten. – Zeitschr. für Gletscherkunde und Glazialgeologie, **15**(1), 101–104, 1980.
- 19) MARKL, G.: Neue Massenhaushaltswerte von Hintereisferner und Kesselwandferner 1975/76 – 1977/78. – Zeitschr. für Gletscherkunde und Glazialgeologie, **15**(1), 95–99, 1980.
- 20) WAGNER, H. P.: The radiation balance at the equilibrium line of Hintereisferner (Ötztal Alps), 1971. – Materialy Glatsiologicheskikh Issledovaniy, **38**, 185–187, 1980.
- 21) DREISEITL, E.: Mass balance of glaciers and general circulation. – Materialy Glatsiologicheskikh Issledovaniy, **38**, 187–196, 1980.
- 22) KUHN, M.: Climate and Glaciers. Proceedings of the Symposium on Sea Level, Ice and Climate Change, Canberra, December 1979. – IAHS Publ. No. **131**, 3–20, 1981.
- 23) KUHN, M.: Begleitworte zur Karte des Hintereisferners 1979, 1 : 10.000. – Zeitschr. für Gletscherkunde und Glazialgeologie, **16**(1), 117–124, 1979.
- 24) KUHN, M., NICKUS, U. & PELLET, F.: Die Niederschlagsverhältnisse im inneren Ötztal. 17. Internationale Tagung für Alpine Meteorologie. – Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 235–237, 1982.
- 25) KASER, G.: Verdunstung von Schnee und Eis. – Dissertation und Tabellenanhang, 152 S., 1981.
- 26) KASER, G.: Über die Verdunstung auf dem Hintereisferner. – Zeitschr. für Gletscherkunde und Glazialgeologie, **19**(2), 149–162, 1982.
- 27) MARKL, G.: Neue Haushaltswerte von Hintereis- und Kesselwandferner 1977/78 – 1980/81. – Zeitschr. für Gletscherkunde und Glazialgeologie, **18**(2), 161–167, 1981.
- 28) KUHN, M., KASER, G., MARKL, G., NICKUS, U. & PELLET, F.: Hydrologische und Glaziologische Untersuchungen im Ötztal, 1952–1982. – Bericht über Projekte, die von der Öst. Akademie der Wissenschaften im Rahmen von IHD, IHP und HÖ7 gefördert wurden, 1985.