

	6
	2
	7
	8
H. Slupetzky: Die Massenbilanzreihe vom Stubacher Sonnblickkees 1958/59 bis 1987/88	69— 89
H. Slupetzky: Massenhaushaltswerte vom Filleckkees (Stubachtal, Hohe Tauern) 1979—1988	91— 96
	-110
	-122
	-130
	-137
	145

ZEITSCHRIFT FÜR GLETSCHERKUNDE UND GLAZIALGEOLOGIE Bd. 25/1, 1989

ZEITSCHRIFT FÜR GLETSCHERKUNDE UND GLAZIALGEOLOGIE

BEGRÜNDET VON R. v. KLEBELSBERG
FORTGEFÜHRT VON H. KINZL UND H. HOINKES

HERAUSGEGEBEN VON
G. PATZELT UND M. KUHN

BAND 25 (1989)
HEFT 1

ISSN 0044-2836



UNIVERSITÄTSVERLAG WAGNER · INNSBRUCK

- Krenke, A. N., 1974: Climatic existence conditions for glaciers and the shaping of glacial climates. In *Meteorology and Climatology*, Vol. 1 (ed. Danilia and Kapitsa), G. K. Hall and Co., 179–224.
- Krenke, A. N. and N. A. Bochin, 1984: *The Tuyuksu Glaciers*. Leningrad Hydrometeorology Publication. 170 pp.
- Kuhn, M., 1978: Die Höhe des Geschwindigkeitmaximums im Gletscherwind als Parameter des Wärmehaushalts. *Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*, 31, 69/1–69/8.
- Loewe, F., 1971: Considerations on the origin of the Quaternary Ice Sheet of North America. *J. Arctic and Alpine Research*, 3 (4), 331–344.
- Martin, S., 1975: Wind regimes and heat exchange on Glacier de Saint Sorlin. *J. Glaciology*, 14, 91–105.
- Moribayashi, S. and K. Higuchi, 1980: Glaciological studies on the perennial snow patches in Tsurugisawa Part 2. *Seppyo*, 42 (3), 119–146.
- Moribayashi, S., K. Higuchi and T. Ohata, 1984: Glaciological studies on perennial snow patches in Tsurugisawa Part 3. *Seppyo*, 46 (1), 11–18.
- Ohata, T., 1976: The characteristics of wind on snow patches. MS Thesis. Department of Science, Nagoya University, 107 pp.
- Ohata, T., 1989 a: Katabatic wind on melting snow and ice surfaces (I), Stationary glacier wind on large maritime glacier. *J. Met. Soc. Japan*, 67, 99–112.
- Ohata, T., 1989 b: Katabatic wind on melting snow and ice surfaces (II), Application of theoretical model. *J. Met. Soc. Japan*, 67, 113–122.
- Ohata, T. and K. Higuchi, 1979: Gravity wind on a snow patch. *J. Meteor. Soc. Japan*, 57 (3), 254–263.
- Ohata, T. and K. Higuchi, 1980: Heat balance study on Glacier AX010 in Shorong Himal, east Nepal. *Seppyo*, 41, Special Issue, 42–47.
- Ohata, T., H. Kondo and H. Enomoto, 1985 a: Meteorological observations at San Rafael Glacier. In *Glaciological Studies in Patagonia Northern Icefield* (ed. C. Nakajima), Data Center for Glacier Research, Japanese Soc. of Snow and Ice, 22–31.
- Ohata, T., H. Enomoto and H. Kondo, 1985 b: Characteristics of ablation at San Rafael Glacier. *ibid.*, 37–45.
- Ohata, T., Z. Bai and L. Ding, 1989: Heat balance study on No. 1 Glacier in head of Urumuqi River, Tian Shan. *J. Glaciology and Cryopedology*, 11, 298–310.
- Streten, N. A. and G. Wendler, 1967: Some observations of Alaskan Glacier winds in midsummer. *Arctic*, 20 (2), 98–102.
- Takahara, H. and K. Higuchi, 1985: Thermal modification of air moving over melting snow surface. *Annals of Glaciology*, 6, 235–237.
- Voloshina, A. P., 1966: Surface heat balance on high mountain glaciers in summer. *Akademia Nauk, SSSR, Inst. Geografii, Moscow*, 149 pp.
- Wendler, G. and N. Ishikawa, 1973: Experimental study of the amount of ice melt using three different methods: a contribution to the International Hydrological Decade. *J. Glaciology*, 12 (66), 399–410.

Manuscript received 20. April 1989, revised 1. August 1990

Author's address: Dr. Tetsuo Ohata
Water Research Institute
Nagoya University
Nagoya 464-01, Japan.

DIE MASSENBILANZMESSREIHE VOM STUBACHER SONNBlickKEES 1958/59 BIS 1987/88

DIE BERECHNUNG DER MASSENBILANZ 1980/81 BIS 1987/88
UND 1958/59 BIS 1962/63

Von H. SLUPETZKY, Salzburg

Mit 6 Abbildungen

ZUSAMMENFASSUNG

Von 1964 bis 1980 wurde am Stubacher Sonnblickkees (Hohe Tauern, Ostalpen) jährlich die Nettomassenbilanz mit der direkten glaziologischen Methode bestimmt. Von 1981 bis 1988 wurde jedes Jahr die maximale Ausaperung am Ende des natürlichen Haushaltsjahres kartiert und jeweils die Fläche mit Altschnee, Firn und Eis bzw. des Akkumulations- und Ablationsgebietes bestimmt. Aufgrund der 17jährigen Meßreihe direkter Massenbilanzbestimmungen wurden mit Hilfe von Korrelations- und Regressionsanalysen die Zusammenhänge zwischen einzelnen Haushaltsgrößen in Form von Gleichungen ausgedrückt und die Massenbilanzen des Sonnblickkeeses für 1981 bis 1988 (und 1959 bis 1963) berechnet.

Während der 30jährigen Periode waren 12 Haushaltsjahre negativ und 18 mehr oder weniger positiv. Extreme traten 1964/65 (+1976 mm Wasserwert), 1985/86 (–1432 mm) und 1962/63 (–1426 mm) auf. Die Massenänderung zeigt bis 1964 einen Massenverlust, von 1965 bis 1981 einen Massengewinn von 9,836 Mio. m³ (\bar{b} = 5522 mm) und von 1982 bis 1988 wieder einen Massenverlust von –7,767 Mio. m³ (\bar{b} = 4428 mm). Die mittlere jährliche spezifische Nettomassenbilanz im Zeitraum 1959 bis 1988 betrug –40 mm (30 Jahre), 1965 bis 1981 +325 mm (17 Jahre) und 1982 bis 1988 –633 mm (7 Jahre). Als Folge des Massenzuwachses 1965 bis 1981 stieß das Sonnblickkees von 1973 bis Juli 1982 25 m vor; seitdem schmolz es mit Unterbrechungen bis 1988 –11,3 m zurück.

THE MASS BALANCE SERIES OF THE STUBACHER SONNBlickKEES 1958/59 TO 1987/88
THE COMPUTATION OF THE MASS BALANCE 1980/81 TO 1987/88 (AND 1958/59 TO 1962/63)

SUMMARY

From 1964 to 1980 the annual net mass balance of the Sonnblickkees (Hohe Tauern, Eastern Alps) was measured with the direct glaciological method. From 1981 to 1988 the accumulation and ablation patterns at the end of the natural balance year were mapped and the respective areas of old snow, firn and ice of the accumulation and ablation area were calculated. Based on the series of 17 consecutive years of mass balance determinations the mass balance of the Sonnblickkees in the years 1981 to 1988 (and 1959 to 1963) was computed by means of correlation and regression analyses using the relations between certain mass balance parameters expressed with equations.

During the period of 30 years 12 annual mass balances were negative and 18 more or less positive. Extremes were observed 1964/65 (+1976 mm w.e.), 1985/86 (-1432 mm) and 1962/63 (-1426 mm). The mass change shows a mass loss till 1964, from 1965 to 1981 a mass gain of $9.84 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ($b=5.52 \text{ m}$) and from 1982 to 1988 again a mass loss of $-7.77 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ($b=-4.42 \text{ m}$). The annual mean spec. net mass balance during the period 1959 to 1988 was -40 mm (30 years), 1965 to 1981 +325 mm (17 years) and 1982 to 1988 -633 mm (7 years). As a reaction to the mass surplus between 1965 and 1981 the Sonnblickkees advanced from 1973 to July 1982 25 m, since then it melted back — with interruptions — until 1988 -11.3 m.

1. EINLEITUNG

Am Sonnblickkees im Stubachtal (Hohe Tauern) wurde im Jahr 1963 — vor nunmehr 25 Jahren — mit Massenhaushaltsuntersuchungen begonnen. Zwischen 1963/64 und 1979/80 wurde die jährliche Massenbilanz nach der glaziologischen Methode in vollem, bei solchen Programmen üblichen Aufwand durchgeführt (Slupetzky 1974). Die Meßergebnisse für das Sonnblickkees sind in dieser Zeitschrift veröffentlicht worden (Slupetzky 1974, 1979 a, 1981), für das benachbarte Filleckkees sind die Ergebnisse in H. Slupetzky (1979 b) sowie für beide Gletscher in der Zusammenstellung von Gletscherdaten in den „Fluctuations of glaciers“ (1977, 1985, 1988) enthalten.

Die Massenbilanzmessungen am Stubacher Sonnblickkees waren zwischen 1965 und 1974 in die Internationalen Hydrologischen Dekade und von 1975 bis 1980 in das Internationale Hydrologische Programm als ein Teil des österreichischen Nationalprogrammes eingebunden (Slupetzky 1987). Mit der Beendigung der Teilnahme Österreichs an den weiteren Nachfolgeprogrammen mußte der Aufwand für die Massenbilanzmessungen eingeschränkt werden, es konnten jedoch soweit Messungen und Beobachtungen durchgeführt werden, daß eine Bestimmung der jährlichen Massenbilanz und damit eine Fortsetzung der Meßreihe möglich war. Dabei wurde vor allem auf den aus den direkten Messungen gewonnenen Erkenntnissen, besonders auf den Flächenverhältnissen S_c/S und S_c/S_a in Beziehung zur Massenbilanz, aufgebaut (Slupetzky 1974, S. 53—66). Dazu ist es notwendig, jedes Jahr am Ende des natürlichen Haushaltsjahres die maximale Ausaperung zu erfassen.

2. DIE AUSAPERUNG DES SONNBlickKEESES ZWISCHEN 1980/81 UND 1987/88

Je nach dem Witterungsverlauf im Spätsommer und Frühherbst kann die maximale Ausaperung bzw. das Ende des Haushaltsjahres zwischen Ende August und Mitte Oktober eintreten. Der Ausaperungsverlauf am Gletscher muß daher in dieser Zeit ständig beobachtet und in geeigneter Weise festgehalten werden, bis eine Neuschneedecke, die nicht mehr abgebaut wird, die Abschmelzperiode endgültig beendet hat. Mit Hilfe von Kartierungen auf einer großmaßstäbigen Karte, mit Übersichtsfotos und Luftschrägaufnahmen und wenn möglich mit photogrammetrischen Aufnahmen kann diese wichtige Information gewonnen werden. Zusammen mit der bei diesem Gletscher vorhandenen Erfahrung über die regelhafte Art der Ausaperung konnte der jeweilige maximale Ausaperungsstand mit befriedigender Genauigkeit kartiert werden (Slupetzky 1971).

Zu den einzelnen Haushaltsjahren ist festzustellen:

1980/81:

Das natürliche Haushaltsjahr dauerte vom 8. 10. 1980 bis 27. 9. 1981. Die Ausaperung konnte durch Flugschrägaufnahmen am 12. 9., Fotos zwischen 21. und 23. 9. und Kartierungen am 21. 9. festgehalten werden. Schneefälle am 28. 9. bis auf eine Seehöhe von 2500 m und am 30. 9. bis auf 1700 m herab beendeten die Abschmelzperiode endgültig, so daß die maximale Ausaperung mit 27. 9. festzulegen war. Der Gletscher war stärker ausgeapert als im Jahr vorher, weshalb ein Saum von Firn unter dem Altschnee vorhanden war. Die Ergebnisse der Planimetrierung sind in Tabelle 1 enthalten. Die Altschneefläche nahm 82,3 % gegenüber der Fläche mit Firn von 8,7 % und Eis von 9,0 % ein.

Tabelle 1: Fläche der Areale mit Altschnee, Firn und Eis des Sonnblickkeeses am 27. 9. 1981

Höhenstufe	Altschnee	Firn	Eis	Firn und Eis	Gesamtfläche m ²
3050—3000	10.800	—	—	—	10.800
3000—2950	121.700	1.500	—	1.500	123.800
2950—2900	195.180	6.000	—	6.000	201.180
2900—2850	211.060	16.700	100	16.800	227.860
2850—2800	218.710	10.150	22.600	32.750	251.460
2800—2750	241.520	9.100	19.400	28.500	270.020
2750—2700	220.770	23.450	9.200	32.650	253.420
2700—2650	43.600	29.000	39.000	68.000	111.600
2650—2600	38.100	13.600	17.300	30.900	69.000
2600—2550	50.220	8.300	7.800	16.100	66.320
2550—2500	112.120	37.700	44.400	82.100	194.220
	1.463.780	155.500	159.800	315.300	1.779.080

Zusätzlich wurde in diesem Haushaltsjahr die Massenbilanz in der Höhenstufe 2700—2750 m, in der die Gleichgewichtslinie beim stationären Haushalt liegt, mit Hilfe der Messungen der Akkumulation an 15 Schneeschächten und 8 Spalten und Berechnung der Ablation auf den geringen aperen Eisflächen bestimmt, um aus der Bilanz für diese Höhenstufe die des ganzen Gletschers berechnen zu können (siehe 3.4).

Das Bilanzjahr endete mit einem positiven Haushalt (414 mm Ww) und war das letzte einer Reihe von acht Jahren mit mehr oder weniger Massengewinn in ununterbrochener Reihenfolge. In diesem Jahr endete auch die Periode des Massenzuwachses seit 1965.

1981/82:

Das Haushaltsjahr begann am 28. 9. 1981 und endete am 30. 9. 1982, war also fast ident mit dem hydrologischen Jahr. Der Abbau der winterlichen Schneedecke hatte früh begonnen, schon im Mai waren am Sonnblickkees die ersten Eisbuckel aper. Die warmen Monate Juni, Juli und August bewirkten eine starke Abschmelzung, zwischen 16. 6. und 21. 8. gab es keine sommerlichen Schneefälle.

Unter Verwendung von Flugschrägaufnahmen vom 11. und 17. 9. (Abb. 1) und von Ausaperungskartierungen wurde der maximale Ausaperungsstand gezeichnet. Auf der Grundlage des Schichtlinienplanes von 1973 wurden die (vorläufigen) Flächenwerte planimetriert und zunächst damit die Bilanz berechnet.



Abb. 1: Das stark ausgeaperte Stubacher Sonnblickkees am 17. 9. 1982. Links die Granatspitze, 3085 m. Der Gletscher erstreckt sich zwischen 2500 und 3050 m Seehöhe. (Foto: H. Slupetzky, freigeig. v. BMLV Zl. 13.080/534-1.6/82)

In diesem Jahr erfolgte eine photogrammetrische Neuaufnahme des Sonnblickkeeses, es wurde am 30. und 31. 8. und 20. 9. von H. Slupetzky und L. Mauelshagen, Bonn, fotografiert. Gleichzeitig wurde der Gletscher bei der Befliegung durch das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen in Wien am 17. 9. 1982 aufgenommen. Die photogrammetrische Auswertung wurde von W. Schröter und L. Mauelshagen, Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn, durchgeführt und ein Höhenlinienplan im Maßstab 1 : 5000 mit 10 m Isohypsen hergestellt. Damit konnte der Ausaperungsstand nahe dem Haushaltsende exakt erfaßt werden, was auch insofern vorteilhaft war, weil durch die diesjährige starke Ausaperung das Akkumulationsgebiet in ein kompliziertes Muster von Schneeflecken aufgelöst war. Unter Verwendung der neuen Karte wurde der maximale Ausaperungsstand neu gezeichnet und planimetriert (Tab. 2). Mit 10,2 % Akkumulations- und 89,8 % Ablationsfläche war es die seit Beginn der Messungen im Jahr 1964 stärkste Ausaperung des Gletschers. Die Berechnung der Massenbilanz ergab einen stark negativen Nettohaushalt von -1282 mm Ww. Die Berechnung der Massenbilanz hatte ursprünglich -1376 mm Ww ergeben. (Diese Zahlenwerte für das Haushaltsjahr 81/82 in den „Fluctuations of Glaciers“, 1988, S. 184 sind daher als vorläufige anzusehen.)

Die ursprüngliche Berechnung der Ausaperung hatte 8,6 % Altschneefläche und 91,4 % Ablationsfläche ergeben. Die Differenz zu den endgültigen Werten von nur

Tabelle 2: Flächen der Areale mit Altschnee, Firn und Eis des Sonnblickkeeses am 30. 9. 1982

Höhenstufe	Altschnee	Firn	Eis	Firn und Eis	Gesamtfläche m ²
3050—3000	—	8.500	1.000	9.500	9.500
3000—2950	19.400	91.700	5.400	97.100	116.500
2950—2900	59.000	132.800	3.400	136.200	195.200
2900—2850	31.400	179.700	30.400	210.100	241.500
2850—2800	15.700	166.200	57.100	223.300	239.000
2800—2750	34.800	190.400	48.700	239.100	273.900
2750—2700	7.300	194.200	45.000	239.200	246.500
2700—2650	7.900	50.300	66.000	116.300	124.200
2650—2600	6.200	35.000	31.100	66.100	72.300
2600—2550	800	43.100	29.500	72.600	73.400
2550—2500	—	79.400	110.000	189.400	189.400
2500—2450	—	100	2.600	2.700	2.700
	182.500	1.171.400	430.200	1.601.600	1.784.100

± 1,6 % kann, was die zu erzielende Genauigkeit der Erfassung der Ausaperungsmuster ohne jährliche photogrammetrische Meßaufnahmen betrifft, als sehr zufriedenstellend angesehen werden. Zu einem Teil ist der Unterschied auch durch die Zunahme der Gletscherfläche von 1,704 km² (1973) auf 1,784 km² (1982) bedingt.

Die starke Ausaperung und das Abschmelzen mehrerer Jahresrücklagen über große Flächen zusammen mit der in den vergangenen Jahren vor sich gegangenen Dickenzunahme und Erhöhung der Fließgeschwindigkeit führte dazu, daß der Gletscher sehr spaltenzerrissen war. Der Eisrand schmolz zurück, womit der Vorstoß der siebziger Jahre unterbrochen wurde. Das Sonnblickkeeses war im Winter 1981/82 bis zum Juli 1982 5,3 m vorgestoßen und hatte eine Vorstoßmoräne aufgeschoben. Von hier schmolz der Eisrand im Sommer -12,6 m zurück, der Nettorückzug betrug daher -7,3 m.

1982/83:

Das Haushaltsjahr vom 1. 10. 1982 bis 30. 9. 1983 war ident mit dem hydrologischen Jahr. Mit Flugschrägaufnahmen vom 1. 9. 1983, der laufenden Fotodokumenta-

Tabelle 3: Flächen der Areale mit Altschnee, Firn und Eis des Sonnblickkeeses am 30. 9. 1983

Höhenstufe	Altschnee	Firn	Eis	Firn und Eis	Gesamtfläche m ²
3050—3000	—	8.000	1.500	9.500	9.500
3000—2950	64.600	45.300	6.600	51.900	116.500
2950—2900	130.400	61.600	3.200	64.800	195.200
2900—2850	84.000	127.600	29.900	157.500	241.500
2850—2800	57.000	125.800	56.200	182.000	239.000
2800—2750	165.700	54.000	54.200	108.200	273.900
2750—2700	49.300	142.200	55.000	197.200	246.500
2700—2650	12.100	43.800	68.300	112.100	124.200
2650—2600	10.000	26.700	35.600	62.300	72.300
2600—2550	4.500	29.600	39.300	68.900	73.400
2550—2500	9.500	58.800	121.100	179.900	189.400
2500—2450	—	100	2.600	2.700	2.700
	587.100	723.500	473.500	1.197.000	1.784.100

tion und Kartierungen wurde der maximale Ausaperungsstand gezeichnet. Die Ergebnisse der Flächenauswertungen ist in Tab. 3 enthalten. 32,9 % des Gletschers waren Akkumulationsgebiet und 67,1 % Ablationsgebiet. Das Haushaltsjahr war mit -535 mm Ww negativ.

1983/84:

Das Haushaltsjahr begann am 1. 10. 1983 und endete relativ früh, am 5. 9. 1984, so daß es um 26 Tage kürzer war als das hydrologische Jahr. Übersichtsfotos von höhergelegenen Standpunkten und Kartierungen ermöglichten die Herstellung der Karte der maximalen Ausaperung. Der Gletscher war gegenüber den beiden Vorjahren wesentlich geringer ausgeapert, so daß das Akkumulationsgebiet 79,5 % der Gletscherfläche einnahm (Tab. 4). Nur an wenigen Stellen war Firn exponiert (5,1 %), 15,4 % war Eisfläche. Die spezifische Nettobilanz betrug 338 mm Ww. Der Zufluß in den Speicher Weißsee, in dessen Einzugsgebiet das Sonnblickkees liegt (5,3 km², 36,2 % vergletschert, wobei das Sonnblickkees 33,7 % einnimmt), gehört zu den geringsten der 44jährigen Meßreihe.

Tabelle 4: Flächen der Areale mit Altschnee, Firn und Eis des Sonnblickkeeses am 5. 9. 1984

Höhenstufe	Altschnee	Firn	Eis	Firn und Eis	Gesamtfläche m ²
3050—3000	9.500	—	—	—	9.500
3000—2950	116.500	—	—	—	116.500
2950—2900	193.500	1.700	—	1.700	195.200
2900—2850	217.200	14.400	9.900	24.300	241.500
2850—2800	184.200	23.800	31.000	54.800	239.000
2800—2750	232.200	3.300	38.400	41.700	273.900
2750—2700	183.700	25.600	37.200	62.800	246.500
2700—2650	55.700	11.700	56.800	68.500	124.200
2650—2600	36.100	5.000	31.200	36.200	72.300
2600—2550	51.700	2.300	19.400	21.700	73.400
2550—2500	136.200	3.000	50.200	53.200	189.400
2500—2450	1.300	—	1.400	1.400	2.700
	1.417.800	90.800	275.500	366.300	1.784.100

1984/85:

Das Bilanzjahr dauerte vom 6. 9. 1984 bis 9. 10. 1985. Mit Luftfotos vom 5. 10. 1985 konnte die maximale Ausaperung sehr gut erfaßt werden. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Planimetrierung zusammengestellt. 46 % der Gletscherfläche waren Akkumulationsgebiet, 54 % Ablationsgebiet. Die Massenbilanz betrug -281 mm Ww. Der Gletscher stieß vom Herbst 1982 bis Herbst 1985 um 6,8 m vor, davon 1984/85 1,8 m.

Tabelle 5: Flächen der Areale mit Altschnee, Firn und Eis des Sonnblickkeeses am 9. 10. 1985

Höhenstufe	Altschnee	Firn	Eis	Firn und Eis	Gesamtfläche m ²
3050—3000	5.000	4.750	—	4.750	9.750
3000—2950	106.000	10.000	—	10.000	116.000
2950—2900	172.250	16.750	5.750	22.500	194.750
2900—2850	135.250	68.700	37.250	105.950	241.200
2850—2800	73.000	115.000	50.600	165.600	238.600

Höhenstufe	Altschnee	Firn	Eis	Firn und Eis	Gesamtfläche m ²
2800—2750	181.750	39.500	52.250	91.750	273.500
2750—2700	82.450	93.250	70.600	163.850	246.300
2700—2650	22.250	33.500	70.000	103.500	125.750
2650—2600	26.500	12.000	34.500	46.500	73.000
2600—2550	11.250	25.750	36.000	61.750	73.000
2550—2500	5.500	48.000	136.000	184.000	189.500
2500—2450	—	250	2.500	2.750	2.750
	821.200	467.450	495.450	962.900	1.784.100

1985/86:

Erst am 20. 10. 1986 beendeten Schneefälle das Bilanzjahr; es dauerte vom 10. 10. 1985 bis 19. 10. 1986. Mit Flugfotos vom 23. 9. und 1. 10. wurden die Ausaperungsstände gegen Ende des Haushaltsjahres dokumentiert. Die extreme Ausaperung in diesem Jahr war die stärkste der Meßreihe seit 1964.

In diesem Jahr herrschte eine Kombination „ungünstiger“ Witterung für den Gletscher: Ein außergewöhnlich warmes und niederschlagsarmes Frühjahr bewirkte einen sehr raschen Abbau der Schneedecke, der Hochsommer war warm, langanhaltende Schönwetterperioden im Spätsommer und Frühherbst führten zu starker Abschmelzung. Unter Verwendung der Flugfotos vom 23. 9. wurde der Ausaperungsstand kartiert und auf dieser Grundlage der vom 1. 10. Nach dem 8. 10. — in der Nacht vom 7./8. 10. schneite es leicht bis 2300 m herab — veränderten sich die Apermuster nur unter 2700 m und am Filleckkees. Der endgültige Stand der stärksten Ausaperung dieses Jahres ergab nur 7,9 % Altschnee und 92,1 % Firn- und Eisfläche (Tab. 6). Die Gesamtfläche des Gletschers verringerte sich gegenüber der von 1982.

Tabelle 6: Flächen der Areale mit Altschnee, Firn und Eis des Sonnblickkeeses am 19. 10. 1986

Höhenstufe	Altschnee	Firn	Eis	Firn und Eis	Gesamtfläche m ²
3050—3000	—	—	9.800	9.800	9.800
3000—2950	18.900	54.600	43.000	97.600	116.500
2950—2900	31.100	146.600	16.000	162.600	193.700
2900—2850	22.900	142.100	69.600	211.700	234.600
2850—2800	16.200	62.200	154.200	216.400	232.600
2800—2750	39.600	146.300	87.900	234.200	273.800
2750—2700	4.300	111.100	129.900	241.000	245.300
2700—2650	4.900	16.200	102.400	118.600	123.500
2650—2600	—	17.200	50.000	67.200	67.200
2600—2550	—	7.300	62.500	69.800	69.800
2550—2500	—	400	171.700	172.100	172.100
2500—2450	—	—	2.300	2.300	2.300
	137.900	704.000	899.300	1.603.300	1.741.200

Das Flächenverhältnis S_c/S war nur 0,08. Die spezifische Nettobilanz betrug -1432 mm Ww. Der Eisrand schmolz -7,2 m zurück.

1986/87:

Das natürliche Haushaltsjahr zwischen dem 20. 10. 1986 und dem 17. 10. 1987 war

der Länge nach einem Kalenderjahr gleich, war jedoch gegenüber dem hydrologischen Jahr um drei Wochen verschoben. Die Fotodokumentation und Kartierungen ermöglichten zunächst die Zeichnung des Ausaperungsstandes vom 24. und 27. 9. 1987. Witterungsbedingt änderte sich dieser Stand bis zur maximalen Ausaperung am 17. 10. nur wenig. Der Gletscher war wieder stark, jedoch nicht so extrem wie im Jahr vorher, ausgeapert. Wohl hatte eine niederschlagsreiche und kühle Witterung den Abbau der Schneedecke verzögert, so daß Anfang Juli in 2300 m Seehöhe noch eine geschlossene Schneedecke lag, warme und sonnenreiche Perioden im Sommer und Frühherbst führten zu einer raschen Ausaperung und starken Abschmelzung. Die Ergebnisse der Flächenplanimetrierung des maximalen Ausaperungsstandes zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7: Flächen der Areale mit Altschnee, Firn und Eis vom Sonnblickkees am 17. 10. 1987

Höhenstufe	Altschnee	Firn	Eis	Firn und Eis	Gesamtfläche m ²
3050—3000	—	—	9.482	9.482	9.482
3000—2950	64.501	19.072	32.401	51.473	115.973
2950—2900	158.743	28.051	8.654	36.705	195.448
2900—2850	93.445	62.000	78.902	140.902	234.347
2850—2800	41.268	35.949	154.019	189.968	231.236
2800—2750	164.721	16.869	91.727	108.596	273.317
2750—2700	42.112	38.205	166.108	204.313	246.425
2700—2650	9.132	6.452	108.105	114.557	123.689
2650—2600	8.537	12.623	50.612	63.235	71.772
2600—2550	1.499	4.427	63.389	67.816	69.315
2550—2500	—	1.085	171.528	172.613	172.613
2500—2450	—	—	2.469	2.469	2.469
	583.958	224.733	937.396	1.162.129	1.746.087

Die spezifische Massenbilanz betrug -525 mm Ww. Der Zufluß in den Speicher Weißsee war mit 20,9 Mio. m³ der zweithöchste der Meßreihe seit 1942, der Zufluß lag mit 140 % weit über dem langjährigen Durchschnitt. Im Juli wurde mit 7,7 Mio. m³ Zufluß der höchste monatliche Zuflußwert der Meßreihe registriert (durch die Kraftwerke der Österreichischen Bundesbahnen).

1987/88:

Das Haushaltsjahr begann am 18. 10. 1987 und endete am 5. 10. 1988. Mit Fotos und Kartierungen wurde der Ausaperungsstand zwischen 9. und 11. 9. erfaßt. Im September gab es immer wieder Schneefälle, wobei die Neuschneedecke nur unter 2700 m wieder abgebaut wurde. Darüber blieben Altschneelinie und Firngrenze nach dem 11. 9. gleich. Erst am 6. 10. beendeten ergiebige Schneefälle endgültig das Haushaltsjahr. Der Gletscher aperte wieder relativ stark aus, der Altschnee nahm 25,5 % der Gletscherfläche ein, die Firn- und Eisfläche betrug 74,5 % (Tab. 8).

Die spezifische Massenbilanz betrug -711 mm Ww. Der Eisrand schmolz in den vergangenen drei Jahren $-10,8$ m, seit 1981 um $-11,3$ m zurück.

Eine Felsinsel in der Mitte des Gletschers, die seit 1965 mehr und mehr vom Eis überfahren und kleiner geworden war, schmolz wieder stärker aus. Der orographisch linke Teil der Gletscherzunge, der nicht mehr durch Eisnachschub ernährt wird, verkleinerte sich stark, so daß die Gesamtgletscherfläche von 1,784 km² (1982) auf

1,715 km² reduziert wurde. Orographisch rechts entstand ein neuer Eisrandsee, der „Keessee“ benannt wurde.

Tabelle 8: Flächen der Areale mit Altschnee, Firn und Eis des Sonnblickkees am 5. 10. 1988

Höhenstufe	Altschnee	Firn	Eis	Firn und Eis	Gesamtfläche m ²
3050—3000	3.737	—	5.746	5.756	9.483
3000—2950	58.513	32.916	24.466	57.382	115.895
2950—2900	125.017	58.164	10.780	68.943	193.961
2900—2850	79.697	62.267	90.861	153.128	232.825
2850—2800	39.594	37.741	149.828	187.569	227.162
2800—2750	91.976	95.045	82.820	177.865	269.841
2750—2700	24.276	81.400	135.505	216.989	241.181
2700—2650	4.853	13.039	100.077	113.117	117.970
2650—2600	9.469	7.784	50.697	58.481	67.949
2600—2550	872	675	67.438	68.113	68.985
2550—2500	—	—	166.776	166.776	166.776
2500—2450	—	—	2.623	2.623	2.623
	438.002	389.031	887.617	1.276.648	1.714.651

Die Ergebnisse der Planimetrierung der Flächen mit Altschnee, Firn und Eis zur Berechnung der Flächenverhältnisse und in weiterer Folge der Haushaltszahlen ist in der Übersichtstabelle (Tab. 9) zusammengestellt.

Tabelle 9: Flächen- und Prozentanteile der Areale mit Altschnee, Firn und Eis der Gletscheroberfläche für die maximalen Ausaperungsstände des Sonnblickkees in den Jahren 1981—1988

Maximale Ausaperung am:	S		Altschnee-fläche S _c		Firnfläche		Eisfläche		Firn- und Eis-fläche S _a	
	10 ³ m ²	%	10 ³ m ²	%	10 ³ m ²	%	10 ³ m ²	%	10 ³ m ²	%
27. 8. 1981	1.779	100	1.464	82,3	156	8,7	160	9,0	315	17,7
30. 9. 1982	1.784	100	182	10,2	1.171	65,7	430	24,1	1.602	89,8
30. 9. 1983	1.784	100	587	32,9	724	40,6	474	26,5	1.197	67,1
5. 9. 1984	1.784	100	1.418	79,5	91	5,1	276	15,4	366	20,5
6. 10. 1985	1.784	100	821	46,0	468	26,2	495	27,8	963	54,0
19. 10. 1986	1.742	100	138	7,9	704	40,4	899	51,7	1.603	92,1
17. 10. 1987	1.746	100	584	33,4	225	12,9	937	53,6	1.162	66,5
5. 10. 1988	1.715	100	438	25,5	389	22,7	888	51,8	1.277	74,5

3. DIE BESTIMMUNG DER MASSENBILANZ DES SONNBlickKEESES (H. SLUPETZKY, 1974; I. HOFER, 1984)

3.1. BERECHNUNGSMETHODEN

Massenhaushaltsmessungen an Gletschern haben in den vergangenen zwei bis drei Jahrzehnten entscheidende Fortschritte in der Beantwortung der Frage nach dem Zusammenhang zwischen Klima- und Gletscherschwankungen gebracht; dabei hat

sich vor allem die Anwendung der direkten glaziologischen Methode bewährt. Während frühere Erklärungsversuche, eine Beziehung zwischen einzelnen meteorologischen Elementen oder davon abgeleitete Indizes zu den Schwankungen der Gletscher (Längenänderung, Flächenänderung) zu finden, unbefriedigend waren, lassen sich mit Korrelationen zwischen den mit der direkten glaziologischen Methode gemessenen jährlichen Massenbilanzen und bestimmten Klimaelementen bedeutend bessere Ergebnisse erzielen (Hoinkes 1970, Wakonigg 1971, Hoinkes 1971). Die nun vorliegenden schon längeren Meßreihen an Gletschern ermöglichten eine Erweiterung und Verfeinerung der angewandten Methoden (Günther 1982, Günther und Widlewski 1986). In weiterer Folge wurde versucht, aus den genauer erfaßten Klima-Gletscherbeziehungen an Hand geeigneter meteorologischer Daten aus Klimameßreihen den Massenhaushalt rückzurechnen (Steinacker 1979, Günther 1982). Mit Hilfe dieser Erkenntnisse ist die Möglichkeit gegeben, bei einer Beendigung eines Meßprogrammes an einem Gletscher den weiteren Verlauf der jährlichen Schwankungen des Massenhaushaltes aus Klimadaten nahegelegener Stationen mit befriedigender Genauigkeit zu berechnen.

Neben diesen Verfahren kommen bei der Frage nach der Fortsetzung einer Meßreihe ohne den großen Aufwand von direkten Massenbilanzbestimmungen Erkenntnisse zum Tragen, die bei den Haushaltsmessungen gewonnen wurden und die die Anwendung einfacherer Methoden eröffnen. Ein gangbarer Weg im Hinblick auf eine Vereinfachung ist die Anwendung der Beziehung zwischen der Massenbilanz in der Höhenstufe des ausgeglichenen Haushalts mit der Gesamtbilanz (Hoinkes 1970, S. 67; Slupetzky 1974, S. 41), oder eine Reduktion der Meßpunkte und Berechnung der Bilanz mit von den direkten Messungen abgeleiteten Verfahren (Aellen und Funk 1988). Eine andere Verfahrensweise ist die Anwendung der Beziehung zwischen der Massenbilanz und der Höhenlage der Gleichgewichtslinie (Hoinkes 1970, S. 68; Kuhn et al. 1985, S. 33; Meier 1963; Palgov 1962). In enger Beziehung zur Höhenlage der Gleichgewichtslinie steht die Verwendung der Größenverhältnisse Akkumulations- (S_c) zu Ablationsgebiet (S_a) oder zwischen dem Akkumulationsgebiet (S_c) und der Gesamtfläche des Gletschers (S). Schon früh wurde das Flächenverhältnis S_c/S (AAR — accumulation area ratio) als ein Maß für die Größenordnung einer jährlichen Bilanz und als Parameter für die Anpassung des Gletschers an das Klima eingeführt (Meier 1963; Meier und Post 1962). Bei manchen Gletschertypen und reliefbedingt kann die Oberflächentopographie kompliziert sein. Hier stößt die Bestimmung der Gleichgewichtslinie auf Schwierigkeiten, da diese keine klare Grenze, die Nähr- und Zehrgebiet trennt, bildet. Zumeist ist ein komplementäres Muster von Akkumulations- und Ablationsflächen vorhanden. In diesen Fällen ist es daher günstiger, mit den Flächenverhältnissen zu arbeiten, wie dies beim Stubacher Sonnblickkees geschieht. In einer Weiterentwicklung der Anwendungsmöglichkeiten der Flächenverhältnisse wurde das Umsatzverhalten von Gletschern zur Charakterisierung des Massenhaushaltsgeschehens eingeführt und der systematische Zusammenhang zwischen den Flächenverhältnissen und dem spezifischen Nettoumsatz untersucht (Slupetzky 1974, 1976, 1979 b). Mit den Ergebnissen der 17jährigen Meßreihe direkter Massenbilanzbestimmungen (Tab. 10) wurden mit Hilfe von Korrelations- und Regressionsanalysen die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Haushaltsgrößen in Form von Gleichungen und Diagrammen ausgedrückt und die Massenbilanz des Sonnblickkeeses „indirekt“ berechnet (Hofer 1984).

Tabelle 10: Massenhaushaltsgrößen vom Stubacher Sonnblickkees für die Jahre 1959—1988, nach der direkten Bilanzmessung 1964—1980 und nach Berechnungen der Bilanzen von 1959—1963 und 1981—1988

Jahr	S_c km ²	B_c 10 ⁶ m ³ WW	S_a km ²	B_a 10 ⁶ m ³ WW	S km ²	B 10 ⁶ m ³ WW	mm WW	S_c/S	S_c/S_a	Höhe der Gleichgewichtslinie	Dauer des natürl. Haushaltsjahres
58/59	0,667	0,229	0,948	-0,833	1,615	-0,604	-	0,41	0,70	2820	23. 9. 58—27. 9. 59
59/60	1,217	0,681	0,398	-0,279	1,615	0,402	374	0,75	3,06	2700	28. 9. 59—20. 9. 60
60/61	1,132	0,581	0,483	-0,342	1,615	0,239	249	0,70	2,34	2725	21. 9. 60—6. 10. 61
61/62	1,051	0,497	0,565	-0,410	1,615	0,087	148	0,65	1,86	2740	7. 10. 61—16. 9. 62
62/63	0,123	0,029	1,492	-2,332	1,615	-2,303	54	0,08	0,08	2950	17. 9. 62—25. 9. 63
63/64	0,331	0,098	1,285	-1,604	1,615	-1,506	932	0,21	0,26	2890	26. 9. 63—16. 9. 64
64/65	1,747	3,528	0,025	-0,028	1,772	3,500	+1976	0,99	69,88	2520	17. 9. 64—25. 8. 65
65/66	1,571	1,490	0,200	-0,186	1,772	1,304	+736	0,89	7,88	2560	26. 8. 65—17. 10. 66
66/67	1,282	0,610	0,490	-0,326	1,772	0,284	+160	0,72	2,62	2720	18. 10. 66—2. 10. 67
67/68	1,340	0,718	0,431	-0,300	1,772	0,418	+236	0,76	3,12	2700	3. 10. 67—18. 9. 68
68/69	0,740	0,263	1,032	-0,701	1,772	-0,438	247	0,42	0,72	2820	19. 9. 68—3. 10. 69
69/70	1,211	0,618	0,561	-0,363	1,772	0,255	+144	0,68	2,16	2730	4. 10. 69—25. 9. 70
70/71	0,713	0,248	0,995	-0,917	1,709	-0,669	392	0,42	0,72	2825	26. 9. 70—27. 9. 71
71/72	1,088	0,561	0,620	-0,342	1,709	+0,219	128	0,64	1,76	2750	28. 9. 71—10. 9. 72
72/73	0,390	0,128	1,315	-1,356	1,704	-1,228	721	0,23	0,30	2885	11. 9. 72—21. 9. 73
73/74	1,554	1,171	0,205	-0,158	1,760	+1,014	576	0,88	7,58	2575	22. 9. 73—20. 9. 74
74/75	1,461	0,970	0,298	-0,272	1,760	+0,698	+397	0,83	4,90	2650	21. 9. 74—4. 10. 75
75/76	1,291	0,503	0,469	-0,364	1,760	+0,140	79	0,73	2,75	2715	5. 10. 75—31. 8. 76
76/77	1,256	0,623	0,504	-0,363	1,760	+0,261	+148	0,71	2,49	2720	1. 9. 76—8. 9. 77
77/78	1,636	1,580	0,136	-0,104	1,772	+1,476	+833	0,92	12,03	2540	9. 9. 77—31. 8. 78
78/79	1,384	0,672	0,388	-0,275	1,772	+0,397	+224	0,78	3,57	2690	1. 9. 78—21. 9. 79
79/80	1,632	1,573	0,128	-0,105	1,760	+1,468	+834	0,93	12,75	2540	22. 9. 79—7. 10. 80
80/81	1,464	0,954	0,315	-0,217	1,779	+0,737	+414	0,82	4,65	2645	8. 10. 80—27. 9. 81
81/82	0,182	0,042	1,602	-2,329	1,784	-2,287	1282	0,10	0,11	2940	28. 9. 81—30. 9. 82
82/83	0,587	0,186	1,197	-1,140	1,784	-0,954	535	0,33	0,49	2850	1. 10. 82—30. 9. 83
83/84	1,418	0,858	0,366	-0,255	1,784	+0,603	+338	0,79	3,87	2670	1. 10. 83—5. 9. 84
84/85	0,821	0,302	0,963	-0,803	1,784	-0,501	281	0,46	0,85	2800	6. 9. 84—9. 10. 85
85/86	0,138	0,031	1,603	-2,524	1,741	-2,493	1432	0,08	0,09	2950	10. 10. 85—19. 10. 86
86/87	0,584	0,185	1,162	-1,102	1,746	-0,916	525	0,33	0,50	2850	20. 10. 86—17. 10. 87
87/88	0,438	0,127	1,277	-1,346	1,715	-1,219	711	0,26	0,34	2875	18. 10. 87—5. 10. 88

3.2. BERECHNUNG DER MASSENBILANZ DES SONNBlickKEESES MIT HILFE DER SPEZIFISCHEN NETTOAKKUMULATION UND -ABLATION

Die spezifische Nettoakkumulation \bar{b}_c wird definiert als die jährliche Nettoakkumulation B_c bezogen auf die gesamte Gletscherfläche S (und nicht auf die Akkumulationsfläche). Die spezifische Nettoablation \bar{b}_a ist die jährliche Nettoablation B_a bezogen auf die Gesamtgletscherfläche S (und nicht auf die Ablationsfläche). Die spezifische Nettomassenbilanz \bar{b} ist die algebraische Summe aus der spezifischen Nettoakkumulation und Nettoablation.

$$\frac{B}{S} = \frac{B_c}{S} + \frac{B_a}{S} \quad (1)$$

Zwischen dem Flächenverhältnis S_c/S und \bar{b} bzw. \bar{b}_c und \bar{b}_a besteht ein klarer Zusammenhang (Abb. 2).

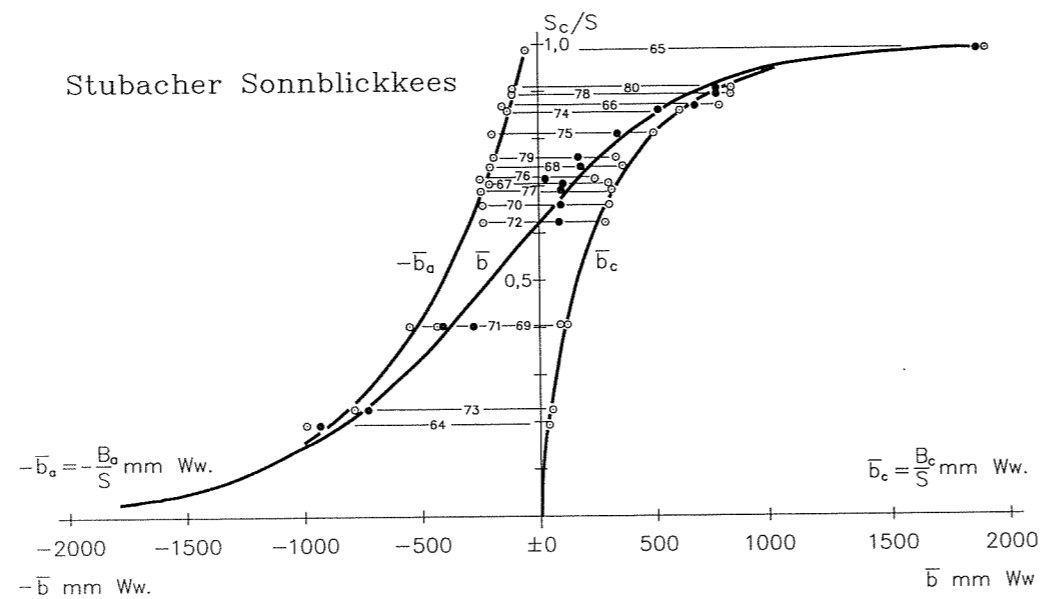


Abb. 2: Zusammenhang zwischen dem Flächenverhältnis S_c/S und der mittleren spezifischen Nettobilanz \bar{b} in Abhängigkeit von der spez. Nettoakkumulation (B_c/S) und -ablation (B_a/S) für das Sonnblickkees

Die Kurven für \bar{b}_c und \bar{b}_a sind aufgrund der Regressionsanalyse gezeichnet, die Kurve für \bar{b} ergibt sich dann aus der Beziehung

$$\bar{b} = \bar{b}_c + \bar{b}_a \quad (2)$$

Die Zahlenwerte aus der Meßreihe von 1964 bis 1980 für die Berechnung sind in Tab. 11 enthalten.

Tabelle 11: Zahlenwerte für die Haushaltsjahre 1963/64 bis 1979/80 für das Sonnblickkees

$$\begin{aligned} \bar{b}_c &= B_c/S \text{ spez. Nettoakkumulation} & \frac{B}{S} &= \bar{b} = \bar{b}_c + \bar{b}_a \text{ spez. Nettomassenbilanz} \\ \bar{b}_a &= B_a/S \text{ spez. Nettoablation} \\ \bar{b}_{2700-2750} & \text{Mittl. spez. Massenbilanz in der Höhenstufe der Gleichgewichtslinie des ausgeglichenen Haushalts} \end{aligned}$$

Haushaltsjahr	\bar{b}_c mm WW.	\bar{b}_a mm WW.	\bar{b} mm WW.	S_c/S_a	S_c/S	$\bar{b}_{2700-2750}$ mm WW.
1963/64	+ 61	- 993	-932	0,26	0,21	-1040
1964/65	+1991	- 16	+1975	70,73	0,99	+1862
1965/66	+ 841	-105	+ 736	7,88	0,89	+ 655
1966/67	+ 344	-184	+ 160	2,62	0,72	+ 126
1967/68	+ 405	-169	+ 236	3,12	0,76	+ 214
1968/69	+ 148	-396	- 248	0,72	0,42	- 208
1969/70	+ 349	-205	+ 144	2,16	0,68	+ 176
1970/71	+ 145	-537	- 392	0,72	0,42	- 368
1971/72	+ 328	-200	+ 128	1,76	0,64	+ 78
1972/73	+ 75	-796	- 721	0,30	0,23	- 775
1973/74	+ 665	- 90	+ 575	7,58	0,88	+ 487
1974/75	+ 551	-155	+ 396	4,90	0,83	+ 432
1975/76	+ 286	-207	+ 79	2,75	0,73	+ 153
1976/77	+ 354	-206	+ 148	2,49	0,71	+ 280
1977/78	+ 892	- 59	+ 833	12,03	0,92	+ 847
1978/79	+ 379	-155	+ 224	3,57	0,78	+ 254
1979/80	+ 894	- 60	+ 834	12,75	0,93	+ 830
Mittelwert	+ 512	-267	+ 246	8,02	0,69	
Standardabweichung	465	269	666	16,61	0,24	

Die normale Gerade zur S_c/S — Achse durch 1 ist praktisch die Asymptote für die \bar{b}_c -Kurve, bedingt durch die Tatsache, daß das Sonnblickkees zur Gänze Akkumulationsgebiet sein kann (was 1964/65 bei $S_c/S=0,99$ fast der Fall war). Für die Berechnung wird daher der exponentielle Zusammenhang

$$1 - S_c/S = e^{k_1} \cdot \bar{b}_c^{k_2} \quad (3)$$

angenommen. Dadurch ist auch gewährleistet, daß die Kurve durch den Punkt (0/0) geht. Durch zweimaliges Logarithmieren und die Transformation $Y = \ln(-\ln(1 - S_c/S))$ und $X = \ln(\bar{b}_c)$ ergibt sich der lineare Regressionsansatz

$$X = c_1 \cdot Y + c_2 \quad (4)$$

Nach der Rücktransformation erhält man für \bar{b}_c die Kurvengleichung (\bar{b}_c in g/m^2)

$$\bar{b}_c = 29,19 \cdot (-\ln(1 - S_c/S))^{1,125} \quad (5)$$

Der Korrelationskoeffizient ist 0,989, die Reststandardabweichung für die 17 Meßdaten beträgt $\pm 10,9 g/cm^2$.

Die Rechnung für die \bar{b}_a -Kurve geht von dem Ansatz

$$S_c/S = e^{-k_1 \cdot |\bar{b}_a| + k_2} \quad (6)$$

aus. Nach der Transformation $Y = \ln(S_c/S)$ kann die lineare Regression für $|\bar{b}_a| = c_1 \cdot Y + c_2$ durchgeführt werden. Dabei ergibt sich bei einem Korrelationskoeffizienten von $-0,986$ (und einer Reststandardabweichung der Meßdaten von $\pm 4,6 \text{ g/cm}^2$) für den Absolutbetrag von \bar{b}_a (in g/cm^2) die Beziehung

$$|\bar{b}_a| = -56,808 \cdot \ln(S_c/S) + 0,925 \quad (7)$$

Tab. 12 enthält die nach den Regressionsgleichungen (5), (7) berechneten Werte im Vergleich zu den gemessenen Werten. Ein ausgeglichener Massenhaushalt ist aufgrund dieser Berechnungen bei einem Flächenverhältnis $S_c/S = 0,62$ zu erwarten.

Tabelle 12: Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen Werten der mittl. spez. Nettobilanz für das Sonnblickkees (in mm Wasserwert). (Zahlen in Klammern sind die 95 %-Vertrauensbereiche)

Haushalts-jahr	b_c (S_c/S) mm WW.	b_a (S_a/S) mm WW.	b ($b_c + b_a$) mm WW.	b (S_c/S_a) mm WW.	b mm WW. gemessen
1963/64	+ 57 (1)	- 896 (6)	- 839	- 885 (12)	- 932
1964/65	+ 1626 (25)	- 15 (3)	+ 1611	+ 1725 (15)	+ 1975
1965/66	+ 711 (6)	- 75 (3)	+ 636	+ 703 (7)	+ 736
1966/67	+ 383 (3)	- 196 (3)	+ 187	+ 190 (6)	+ 160
1967/68	+ 435 (3)	- 165 (3)	+ 270	+ 272 (6)	+ 236
1968/69	+ 147 (2)	- 502 (3)	- 355	- 411 (8)	- 248
1969/70	+ 338 (3)	- 228 (2)	+ 110	+ 100 (6)	+ 144
1970/71	+ 147 (2)	- 502 (3)	- 355	- 411 (8)	- 392
1971/72	+ 299 (2)	- 263 (2)	- 36	+ 5 (6)	+ 128
1972/73	+ 65 (1)	- 844 (6)	- 779	- 819 (11)	- 721
1973/74	+ 680 (6)	- 82 (3)	+ 598	+ 685 (7)	+ 575
1974/75	+ 556 (4)	- 115 (3)	+ 441	+ 482 (6)	+ 396
1975/76	+ 395 (3)	- 188 (3)	+ 207	+ 213 (6)	+ 79
1976/77	+ 371 (3)	- 204 (3)	+ 167	+ 166 (6)	+ 148
1977/78	+ 828 (8)	- 57 (3)	+ 771	+ 900 (8)	+ 833
1978/79	+ 465 (3)	- 150 (3)	+ 315	+ 334 (6)	+ 224
1979/80	+ 877 (9)	- 50 (3)	+ 827	+ 927 (8)	+ 834
1964—80 17j. Mittel berechnet	+ 493	- 267	+ 226	+ 248	
1964—80 17j. Mittel bemessen	+ 512	- 267	+ 245		246

3.3. BERECHNUNG DER MASSENBILANZ AUS DEM FLÄCHENVERHÄLTNIS S_c/S_a

In Abb. 3 ist der Zusammenhang zwischen dem Flächenverhältnis S_c/S_a und der mittleren spez. Nettobilanz \bar{b} für das Sonnblickkees dargestellt. Die eingezeichnete

Kurve wurde durch die Regressionsanalyse aus 17 Meßdaten berechnet (Tab. 11), wobei der exponentielle Zusammenhang

$$S_c/S_a = e^{k_1 \cdot \bar{b} + k_2} \quad (8)$$

angenommen wurde. Nach Logarithmieren der Gleichung und mit Hilfe der Transformation $Y = \ln(S_c/S_a)$ erhält man den linearen Regressionsansatz für die abhängige Variable \bar{b} ($\bar{b} = c_1 \cdot Y + c_2$), wobei $c_1 = \frac{1}{k_1}$ und $c_2 = -k_2$ ist. Bei einem Korrelationskoeffizienten von $0,987$ ergibt sich die Gleichung (\bar{b} in g/cm^2)

$$\bar{b} = 46,556 \cdot \ln(S_c/S_a) - 25,819 \quad (9)$$

Stubacher Sonnblickkees

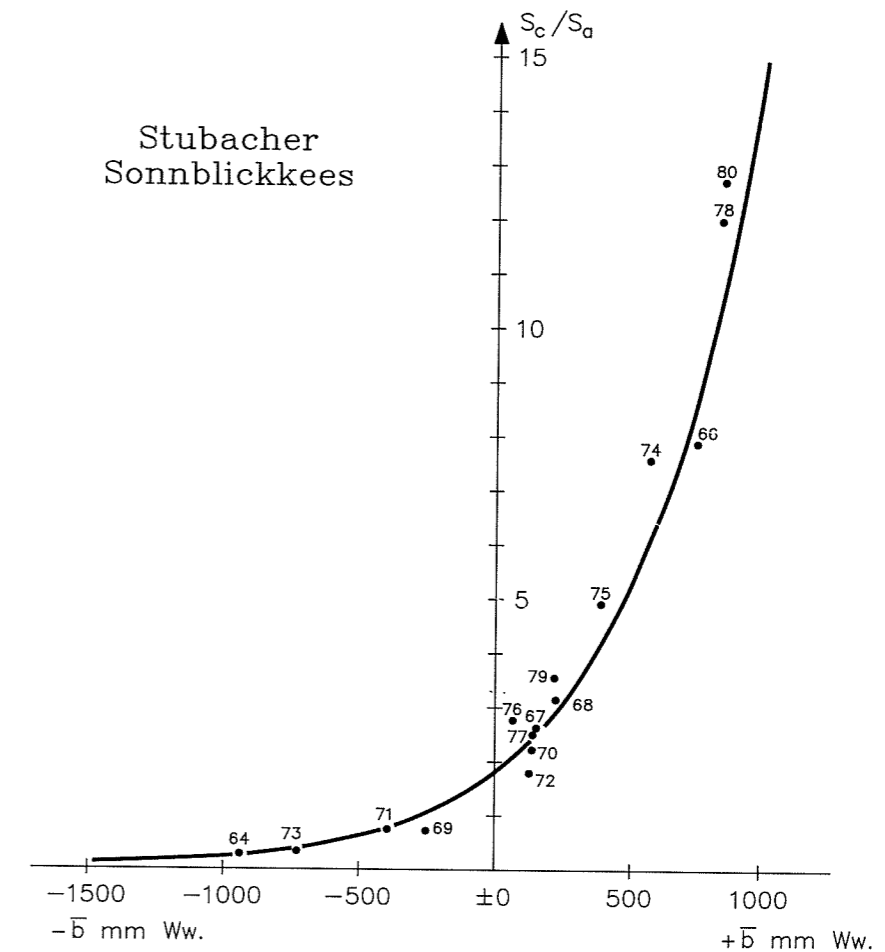


Abb. 3: Der Zusammenhang zwischen dem Flächenverhältnis S_c/S_a und der mittl. spez. Massenbilanz des Sonnblickkees

Ein ausgeglichener Massenhaushalt ist aufgrund dieser Beziehung bei einem Flächenverhältnis von $S_c/S_a = 1,74$ zu erwarten.

Die mit der Gleichung (9) berechneten \bar{b} -Werte für die Meßreihe 1963/64 bis 1979/80 sind in Tabelle 12, für die Jahre 1958/59 bis 1962/63 und 1980/81 bis 1987/88 in Tabelle 13 enthalten. (Die Flächenverhältnisse für 1958/59 bis 1962/63 sind aus Slupetzky 1974, S. 46 entnommen.)

Tabelle 13: Vergleich der berechneten \bar{b} -Werte aus dem spez. Nettomassenumsatz und aus dem Flächenverhältnis für die Jahre 1958/59 bis 1962/63 und 1980/81 bis 1987/88

Haushaltsjahr	\bar{b} mm ($b_c + b_a$)	\bar{b} mm (S_c/S_a)
1958/59	- 374	- 424
1959/60	+ 249	+ 262
1960/61	+ 148	+ 138
1961/62	+ 54	+ 31
1962/63	- 1426	- 1434
1980/81	+ 413	+ 457
1981/82	- 1284	- 1286
1982/83	- 535	- 590
1983/84	+ 338	+ 372
1984/85	- 281	- 332
1985/86	- 1432	- 1400
1986/87	- 522	- 577
1987/88	- 711	- 757

3.4. BERECHNUNG DER MASSENBILANZ FÜR DAS HAUSHALTSJAHR 1980/81 AUS DER HÖHENSTUFE DER GLEICHGEWICHTSLINIE IM AUSGEGLICHENEN HAUSHALTSJAHR

Für das Haushaltsjahr 1980/81 wurde durch direkte Messung die Massenbilanz für die Höhenstufe 2700–2750 m bestimmt. Wegen der komplizierten Topographie in dieser Zone — es gibt steile Stellen mit vielen Spalten und flache Mulden in diesem Bereich — ist die Messung mit erheblichem Aufwand verbunden. Abb. 4 läßt den linearen Zusammenhang zwischen den \bar{b} -Werten und den $b(z_0)$ -Werten der Höhenstufe $z_0 = 2700-2750$ m erkennen (Slupetzky 1974, S. 41). Durch lineare Einfachregression (Datengrundlagen in Tab. 11) ergibt sich für \bar{b} die Geradengleichung (\bar{b} in g/cm^2)

$$\bar{b} = 1,005 \cdot b(z_0) + 0,718 \quad (10)$$

bei einem Korrelationskoeffizienten von 0,995. Die 95 %-Vertrauensbereiche sind um den Mittelwert von $b(z_0)$ ($23,7 g/cm^2$) mit $\pm 3 g/cm^2$ am kleinsten, werden aber für $b(z_0) = 200 g/cm^2$ (bzw. -150) nicht größer als $\pm 10 g/cm^2$. (Die Reststandardabweichung für die Meßdaten ist $6,9 g/cm^2$.)

Die Ergebnisse der glaziologischen Messungen in der Höhenstufe 2700–2750 mm sind in Tab. 14 angeführt.

Mit der Gleichung (10) erhält man eine mittlere spez. Massenbilanz für das Sonnblickkees von 417 mm, mit der Gleichung (9) 457 mm und mit den Gleichungen (5) und (7) 414 mm gegenüber der Messung von 405 mm.

Die Ergebnisse der gemessenen und berechneten Massenbilanzen der Meßreihe

Tabelle 14: Massenbilanzwerte in der Höhenstufe 2700–2750 m im Jahr 1980/81

Höhenstufe	ΔS_c km ²	ΔS_a km ²	ΔS	$b_c \Delta S$ 10 ⁶ m ³	$b_a \Delta S$ 10 ⁶ m ³	\bar{b} mm
2700–2750	0,2208	0,0327	0,2534	0,1140	-0,0113	405

1959 bis 1988 sind in Tab. 10 zusammengestellt. Die Massenbilanzwerte 1959–1963 und 1981–1988 sind unter Verwendung des spez. Nettomassenumsatzes bestimmt worden. Diese Verfahrensweise ermöglicht die Quantifizierung der jeweiligen spez. Nettoakkumulation und -ablation, bei Verwendung von S_c/S_a erhält man nur die Bilanz \bar{b} . Beide Berechnungsmethoden geben im Mittel eine gute Übereinstimmung (Tab. 12): Das 17jährige Mittel 1964 bis 1980 von \bar{b} beträgt nach ersterer Methode 226 mm, nach letzterer 248 mm (nach den direkten Messungen 246 mm).

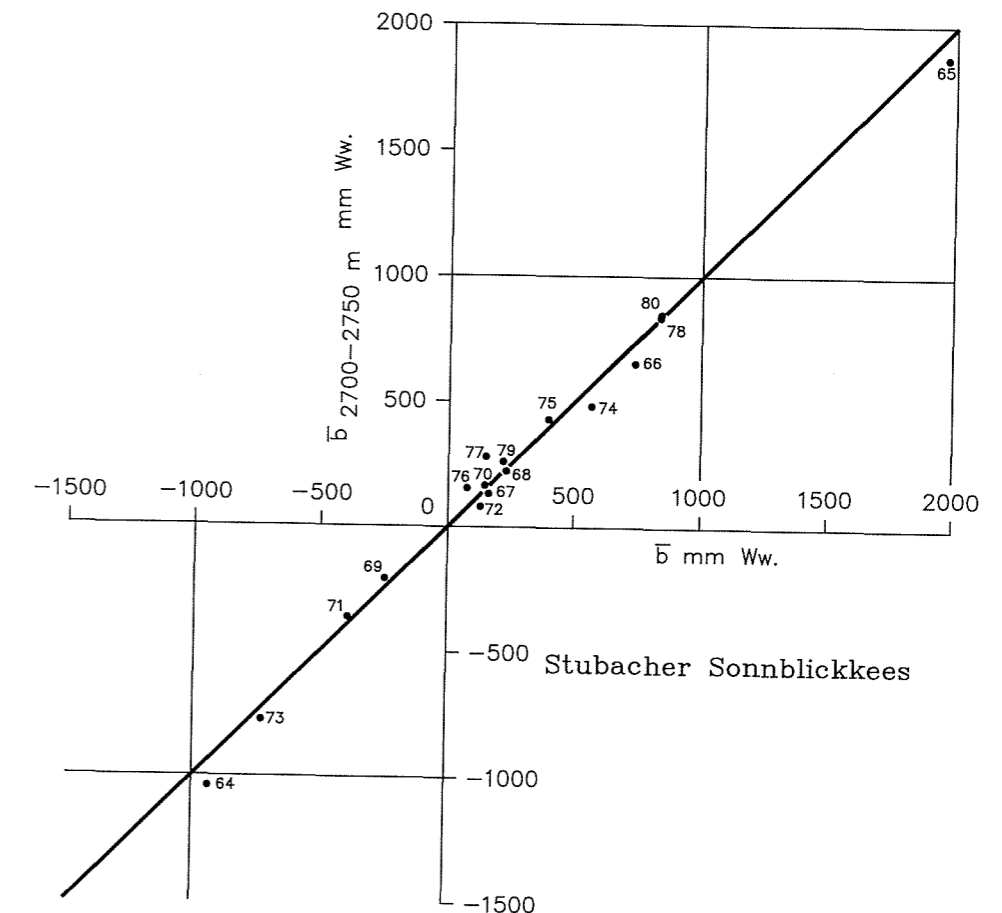


Abb. 4: Der Zusammenhang zwischen der spez. Bilanz des gesamten Sonnblickkeeses (\bar{b}) und der spez. Bilanz in der Höhenstufe 2700–2750 m ($b_{2700-2750}$)

Wenn gute Kartierungen der jährlichen maximalen Ausaperung zur Verfügung stehen, läßt sich beim Sonnblickkees über eine Abschätzung oder Vorzeichenbestimmung der Bilanz (Günther 1982, S. 23) hinaus mit den aufgezeigten Zusammenhängen zwischen S_c/S und \bar{b} sowie \bar{b}_c und \bar{b}_a die jährliche Massenbilanz mit hinreichender Zuverlässigkeit berechnen.

4. DIE MASSENÄNDERUNG DES SONNBlickKEESES

Die jährliche Massenbilanz des Sonnblickkees zeigt teilweise starke Schwankungen (Abb. 5). Während der 30jährigen Meßreihe waren 12 Haushaltsjahre negativ und 18 mehr oder weniger positiv.

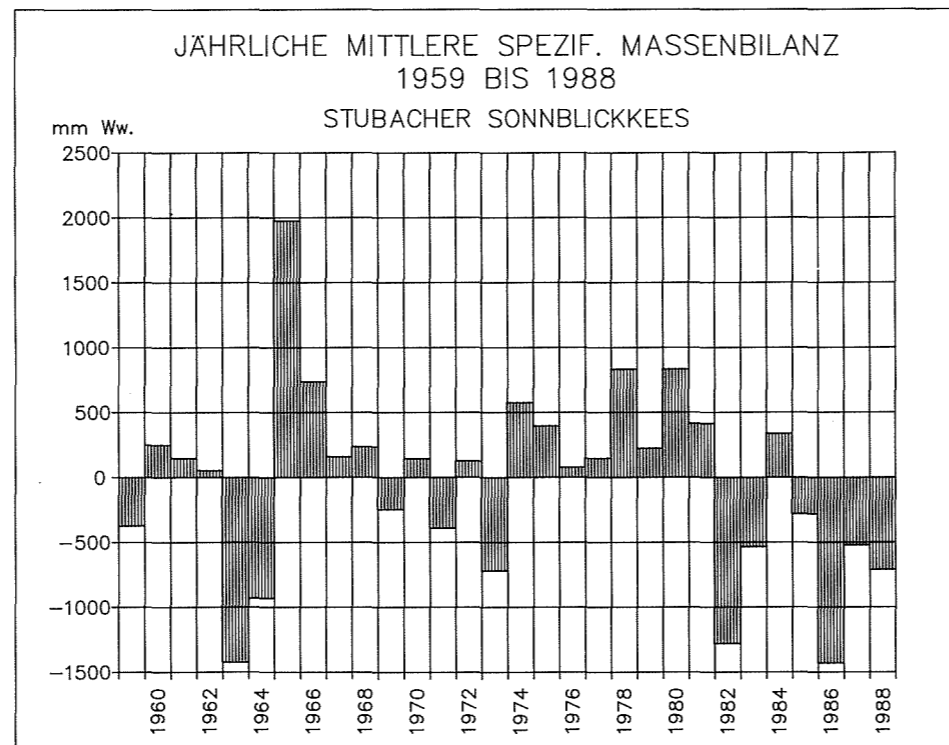


Abb. 5: Die jährlichen Schwankungen der mittleren spezifischen Nettomassenbilanz des Sonnblickkeeses 1959 bis 1988 (in mm Wasserwert)

Extrem positiv war das Haushaltsjahr 1964/65 (+1976 mm Ww), stark negativ waren die Jahre 1985/86 (-1432 mm), 1962/63 (-1426 mm) und 1981/82 (-1282 mm). Das Sonnblickkees zeigt ein exzessives Massenbilanz- und Umsatzverhalten aufgrund des Gletschertyps (Slupetzky 1974) und seiner Zuordnung zu einem subozeanischen Gletschergebiet (Günther und Widlewski 1986). Den extremst negativen Haushalt hatte das Sonnblickkees nach bisherigen Berechnungen im Jahr 1946/47

mit -2500 mm Ww (Günther, pers. Mitt. vom 24. 6. 1982). Beim Sonnblickkees können offensichtlich Extremwerte um ± 2500 mm auftreten. Am Alpenhauptkamm können in Nordexposition hohe Winterniederschläge kombiniert mit hohen Sommerniederschlägen mit einem hohen Anteil an festem Niederschlag zu einem extremen Jahresmassenzuwachs führen, umgekehrt kann die Abfolge: sehr geringer Winterniederschlag und ein warmer, strahlungsreicher Sommer eine extrem negative Jahresmassenbilanz bewirken; der jährliche Massenumsatz ist jeweils entsprechend hoch.

Die Massenänderung des Sonnblickkees zeigt bis 1964 einen Massenverlust, von 1965 bis 1968 eine erste und von 1974 bis 1981 eine zweite Phase von Massengewinn (Abb. 6). Von 1982 bis 1988 fand ein starker Massenabbau statt.

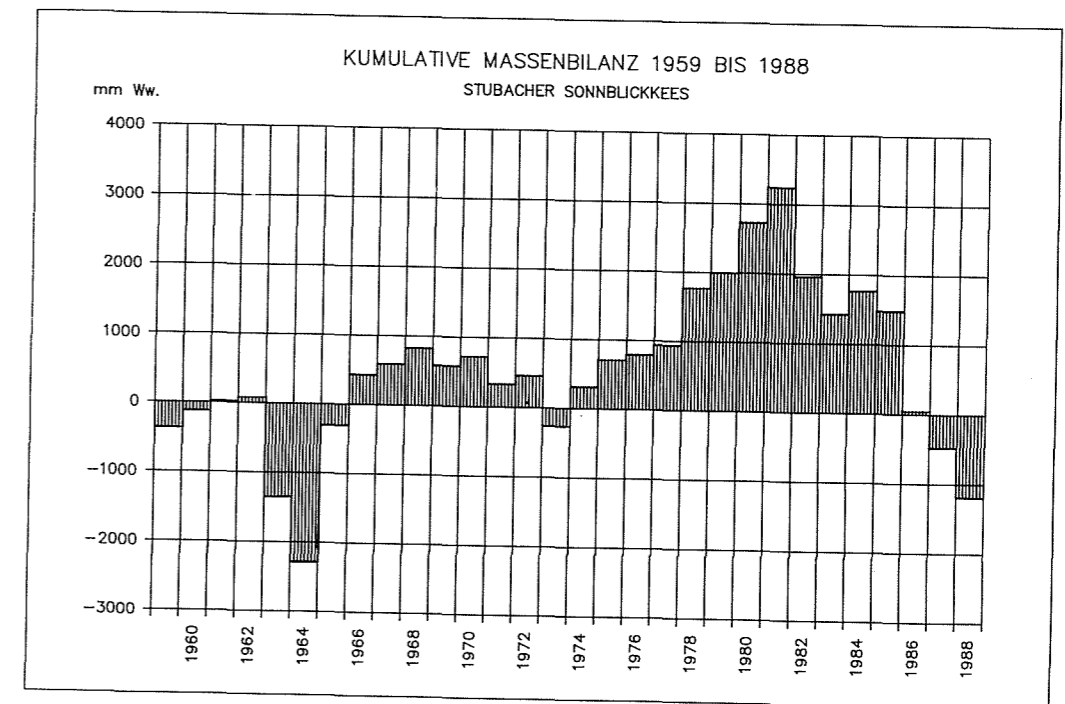


Abb. 6: Die kumulative Massenänderung des Sonnblickkeeses von 1959 bis 1988 (mm Wasserwert)

Von 1965 bis 1981 betrug der Massenzuwachs 9,836 Mio. m^3 ($\bar{b} = 5522$ mm) und der Massenverlust von 1982 bis 1988 - 7,767 Mio. m^3 ($\bar{b} = 4428$ mm Ww). Der Massenaufbau im Zeitraum von 17 Jahren wurde innerhalb von 7 Jahren wieder um 80 % abgebaut.

Während der 30jährigen Meßreihe hat das Sonnblickkees 1986 wieder jene Masse erreicht, die es 1958 hatte. Die durchschnittliche spezifische Nettomassenbilanz im Zeitraum 1959-1988 betrug 40 mm Ww (30jähriges Mittel), 1964-1988 +7 mm (26jähriges Mittel), 1965-1981 +325 mm (17jähriges Mittel) und 1982-1988 633 mm (7jähriges Mittel).

Mit Beginn der direkten Messungen am Sonnblickkees konnte mit dem zuerst

erfaßten, negativen Haushaltsjahr 63/64 das (damalige) Ende einer Periode des Massenverlustes und ab 1965 bis 1981 eine Phase des Massengewinns erfaßt werden.

Das Sonnblickkees hat auf den Massenzuwachs mit einem Vorstoß reagiert. Die Gletscherstirn rückte von 1973 bis Juli 1982 insgesamt 25 m vor, wobei eine Moräne aufgeschoben wurde. Von 1981 bis 1988 schmolz die Zunge — mit Unterbrechungen — 11,3 m zurück.

DANK

Die Forschungen am Stubacher Sonnblickkees wurden während der IHD und des IHP vom Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung über die Österreichische Akademie der Wissenschaften und über das Hydrographische Zentralbüro beim Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft gefördert. Ab 1981 wird das Programm über den Hydrographischen Landesdienst beim Amt der Salzburger Landesregierung unterstützt. — W. Schröter (†) und L. Mauelshagen, Bonn, führten die photogrammetrischen Auswertungen des Gletschers von 1982 durch. — Bei der Berechnung der Bilanzen ab 1981 haben I. Hofer und J. Strobl mitgewirkt. — W. Gruber stellte reprofähige Abbildungen her. Allen Mitarbeitern und Förderern des Gletscherforschungsprogrammes sei auch an dieser Stelle gebührend gedankt.

5. LITERATUR

- Aellen, M. und M. Funk, 1988: Massenbilanz des Griesgletschers von 1961 bis 1986. Vergleich verschiedener Bestimmungsverfahren. Mitt. d. Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgen. Techn. Hochschule Zürich, S. 9—50.
- Fluctuations of Glaciers, 1977, 1985, 1988: Int. Assoc. of Hydrological Sciences (Int. Comm. of Snow and Ice, IAHS/UNEP/UNESCO, III (1970—1975), IV (1975—1980), V (1980—1985), World Glacier Monitoring Service, Zürich.
- Günther, R., 1982: Möglichkeiten zur Berechnung des Massenhaushaltes am Beispiel Mittel- und Nordeuropäischer Gletscher und deren Verhalten 1949/59—1978/79. Diss. Math.-Naturwiss. Fak. Univ. Bonn, 214 S.
- Günther, R. und D. Widlewsky, 1986: Die Korrelation verschiedener Klimaelemente mit dem Massenhaushalt alpiner und skandinavischer Gletscher. Zeitschrift f. Gletscherkunde und Glazialgeologie, Bd. 22, H. 2, S. 125—147.
- Hofer, I., 1984: Indirekte Methoden zur Bestimmung des Massenhaushaltes von Gletschern. Hausarbeit am Inst. f. Geographie d. Univ. Salzburg, 57 S.
- Hoinkes, H., 1970: Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. Ergebnisse der Meßreihe Hintereisferner (Ötztaler Alpen) 1953—1968. Z. f. Glkde. u. Glaz. Geol., Bd. 6, 1970, S. 37—90.
- Hoinkes, H., 1971: Über Beziehungen zwischen der Massenbilanz des Hintereisferners (Ötztaler Alpen, Tirol) und Beobachtungen an der Klimastation Vent. Annalen der Meteorologie, Neue Folge, Nr. 5, S. 259—164.
- Kuhn, M., G. Kaser, G. Markl, U. Nickus und F. Pellet, 1985: Hydrologische und glaziologische Untersuchungen im Ötztal 1952—1982. Inst. f. Meteorologie und Geophysik der Univ. Innsbruck, Abt. f. Glazial- und Polarmeteorologie. 104 S.
- Meier, M. F., 1963: Proposed definitions for glacier mass budget terms. Journal of Glaciology, Vol. 4, No. 35, p. 649—650.
- Meier, M. F. and A. S. Post, 1962: Recent variations in mass net budgets of glaciers in western North America. Comm. of Snow and Ice, IASH Publ. No. 58, pp. 63—77.
- Palgov, N. N., 1962: The relation between glacier retreat and the position of the firn line with special reference to the Zentralny Tuyuksu Glacier. Comm. of Snow and Ice, IASH Publ. No. 58, pp. 40—48.
- Slupetzky, H., 1971: Der Verlauf der Ausaperung am Stubacher Sonnblickkees (Hohe Tauern) —

- Ergebnisse der Kartierung der temporären Schneegrenze. Mitt. Österr. Geogr. Ges. Bd. 113, H. 1, S. 3—24.
- Slupetzky, H., 1974: Untersuchungen zur Massenbilanz eines Hanggletschers. Ergebnisse und Schlußfolgerungen aus der Meßreihe 1963/64—1970/71 vom Stubacher Sonnblickkees (Hohe Tauern). Z. f. Glkde. u. Glaz. Geol., Bd. 10, S. 11—69.
- Slupetzky, H., 1976: Der spezifische Nettomassenumsatz von Gletschern — Aussagen und Anwendungsmöglichkeiten. Deut. Ges. f. Polarforschung, Vortragsprogramm d. 10. Int. Polartagung, Zürich. S. 36—37.
- Slupetzky, H., 1979a: Massenhaushaltswerte vom Stubacher Sonnblickkees für die Jahre 1971/72 bis 1977/78. Z. f. Glkde. u. Glaz. Geol. Bd. 15, H. 1, S. 87—93.
- Slupetzky, H., 1979b: Die Massenbilanz des Filleckkees (Hohe Tauern) von 1964 bis 1978. Ein Beitrag zur Charakterisierung des Massenbilanz- und Umsatzverhaltens von sehr kleinen Gletschern. Mitt. d. Versuchsanst. f. Wasserbau, Hydrol. u. Glaziol. d. ETH Zürich, Nr. 41, S. 281—299.
- Slupetzky, H., 1981: Massenhaushaltswerte vom Stubacher Sonnblick- und Filleckkees für die Jahre 1978/79 und 1979/80. Z. f. Glkde. u. Glaz. Geol. Bd. 17, H. 2, S. 223—226.
- Slupetzky, H., 1987: Der Massenzuwachs des Stubacher Sonnblickkees (Hohe Tauern). Beitrag des Instituts für Geographie der Univ. Salzburg zum IHP 1975—1980. Archiv f. Lagerstättenforschung, Geolog. Bundesanstalt, Bd. 8, herausgg. v. F. Steinhäuser, S. 56—60.
- Steinacker, R., 1979: Rückrechnung des Massenhaushaltes des Hintereisferners mit Hilfe von Klimadaten. Z. f. Glkde. u. Glaz. Geol. Bd. 15, H. 1, S. 101—104.
- Wakonigg, H., 1971: Gletscherverhalten und Witterung. Z. f. Glkde. u. Glaz. Geol. Bd. 7, H. 1—2, S. 103—123.

Manuskript eingelangt am 29. Mai 1989

Anschrift des Verfassers: Ao. Univ.-Prof. Dr. Heinz Slupetzky
Institut für Geographie der Universität Salzburg
Abteilung für Schnee- und Gletscherkunde
Hellbrunnerstraße 34
5020 Salzburg