

Lopatkina, A. P., 1967: Conditions of accumulation. S. 577—588.

Manskaya, S. M. und L. A. Kodina, 1963: A possible role in the concentration of uranium. S. 370—382.

Scheminzky, F., 1959: Über Urananreicherung. S. 117—132.

Szadecsky-Kardoss, E. und A. Földvary, 1955:

Szalay, S., 1952: MTA Musaky Tudományok

Szalay, A., 1954: The enrichment of uranium. Acad. Sci. Hung., 2, S. 299—311.

Manuskript eingegangen am 16. Februar 1971.

Anschrift der Verfasser: Dr. Heinz Felber und Dr. Friedrich Hernegger, Institut für Radiumforschung und Kernphysik der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Boltzmann-gasse 3, 1090 Wien.

DIE VOLUMENÄNDERUNG DES HINTEREISFERNERS (ÖTZTALER ALPEN) IM VERGLEICH ZUR MASSENÄNDERUNG IM ZEITRAUM 1953—1964

Von H. LANG, Zürich und G. PATZELT, Innsbruck

Mit 5 Abbildungen

ZUSAMMENFASSUNG

Die Volumenänderung des Hintereisferners wurde mit der geodätischen Methode für den Zeitraum 1953—1962 (H. Lang) und unabhängig davon für den Zeitraum 1953—1964 (G. Patzelt) bestimmt. Die Ergebnisse wurden mit den aufsummierten Jahreswerten der Massenbilanz verglichen, die mit der glaziologischen Methode erhalten worden sind. Es stehen dem geodätisch ermittelten Volumenverlust und dem daraus berechneten Massenverlust von $-35,24 \times 10^6 \text{ m}^3$ Wasser (9 Jahre), bzw. $-51,65 \times 10^6 \text{ m}^3$ Wasser (11 Jahre) der glaziologisch bestimmte Massenverlust von $-33,33 \times 10^6 \text{ m}^3$ Wasser, bzw. $-50,12 \times 10^6 \text{ m}^3$ Wasser gegenüber. Die gute Übereinstimmung innerhalb von 5% bzw. 3% weist darauf hin, daß die Ergebnisse der glaziologischen Methode nicht durch systematische Fehler verfälscht sind.

Die mittlere, auf die ganze Gletscherfläche bezogene Höhenänderung ergab $-0,44 \text{ m/Jahr}$ (1953—1962) und $-0,54 \text{ m/Jahr}$ (1953—1964). Für die mittlere Vertikalkomponente der Gletscherbewegung im Zeitraum 1953/62 wurde im Ablationsgebiet (Fläche unter 3000 m Meereshöhe) ein Wert von $+0,38 \text{ m/Jahr}$ erhalten, womit 26,3% der abgeschmolzenen Eismassen ersetzt werden. Das Akkumulationsgebiet (über 3000 m) hat eine mittlere Vertikalkomponente von $-0,34 \text{ m/Jahr}$. Der aus Nettoakkumulation und Gletscherbewegung berechnete und der geodätisch ermittelte Massenzuwachs im Firngebiet stimmen ebenfalls befriedigend überein.

SUMMARY: THE CHANGE OF VOLUME OF THE HINTEREISFERNER (ÖTZTAL ALPS) AS COMPARED TO ITS CHANGE OF MASS IN THE PERIOD 1953—1964.

The change of volume of the Hintereisferner has been determined by the geodetic method for the period 1953—1962 (H. Lang), and independently also for 1953—1964 (G. Patzelt). The results are compared to the sum of the yearly balances derived from the glaciological method. The geodetic method yields a net mass loss of $-35,24 \times 10^6 \text{ m}^3$ water in nine years and $-51,65 \times 10^6 \text{ m}^3$ water in eleven years, while the corresponding results of the glaciological method are $-33,33 \times 10^6 \text{ m}^3$ and $-50,12 \times 10^6 \text{ m}^3$, respectively. The good agreement to within 5 per cent and 3 per cent indicates that the results of the glaciological method are not influenced by any systematic error.

The mean change of height of the entire area of the glacier was $-0,44 \text{ m per year}$ (1953—1962) and $-0,54 \text{ m per year}$ (1953—1964). The mean vertical component of glacier movement in the period from 1953 to 1964 in the ablation area (area below 3000 m altitude) was $+0,38 \text{ m per year}$, which replenished 26,3 per cent of the ablated ice mass. The accumulation area has a mean vertical component of $-0,34 \text{ m per year}$. There is satisfactory agreement between the mass gain in the firn region as determined geodetically and the gain computed from net accumulation and vertical motion.

1. EINLEITUNG

Der jährliche Massenhaushalt des Hintereisferners (Ötztaler Alpen, Tirol) wird seit dem Haushaltsjahre 1952/53 mit Hilfe der glaziologischen Methode bestimmt, wobei die Nettoakkumulation und die Nettoablation als Komponenten der Haushaltsgleichung durch direkte Messungen auf der Gletscheroberfläche erfaßt werden (H.

Hoinkes, 1970, a, b). Dabei treten arbeits- und meßtechnische Schwierigkeiten auf, die nicht einfach zu lösen sind. Es ist deshalb wichtig, die Ergebnisse der direkten Messungen mit anderen unabhängigen Verfahren zu prüfen. Da vom Hintereisferner mehrere, mittels terrestrischer Photogrammetrie aufgenommene Karten ausgewertet vorlagen, war es naheliegend, mit der geodätischen Methode die Volumenänderung des Gletschers für einen Zeitraum von mehreren Jahren zu bestimmen und das Ergebnis mit den aufsummierten Jahreswerten der Massenbilanz nach der glaziologischen Methode zu vergleichen.

Bei der geodätischen Methode werden aus Schichtlinienplänen die Höhenänderungen der Gletscheroberfläche und damit die Volumenänderung des Gletschers zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten berechnet. Diese vor allem von R. Finsterwalder gepflegte Richtung der Gletscherforschung ermöglichte „Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückganges an Ostalpengletschern“ (R. Finsterwalder 1953). Für den Hintereisferner wurden die vollständigen photogrammetrischen Aufnahmen aus den Jahren 1894, 1920 und 1940 quantitativ ausgewertet. Aus den für die genannten Zeiträume errechneten mittleren Höhenänderungen der Oberfläche des Gletschers können mittlere spezifische Massenbilanzen berechnet werden, wenn man annimmt, daß die Unterschiede in der vertikalen Dichteverteilung auf dem schneebedeckten Teil des Gletschers unerheblich sind. Bei einem zeitlichen Abstand zwischen den Meßaufnahmen von 26 bzw. 20 Jahren dürfte diese Annahme bei einem alpinen Gletscher zulässig sein. Dagegen sind bei Zeitabständen von nur wenigen Jahren zwischen zwei photogrammetrischen Aufnahmen Unterschiede in der vertikalen Dichteverteilung im Firngebiet zu berücksichtigen, weil in diesem Fall die obersten Jahresschichten im Akkumulationsgebiet mehr ins Gewicht fallen und dort die Unterschiede in der vertikalen Dichteverteilung am größten sein können. Da im schneebedeckten Teil des Gletschers auch die Höhe der Oberfläche mit vertretbarem Aufwand nicht hinreichend genau bestimmt werden kann, ist die geodätische Methode zur Ermittlung der Massenbilanz für einzelne Haushaltsjahre wenig geeignet.

Im Rahmen des Meßprogrammes für photogrammetrische Aufnahmen ausgewählter Ostalpengletscher, das vom Institut für Photogrammetrie an der Technischen Hochschule München ab 1950 durchgeführt wurde, ist der Hintereisferner 1953, 1962 und 1964 vollständig aufgenommen worden. Auf Anregung von Prof. R. Finsterwalder hat H. Lang im Jahre 1963, als Mitarbeiter der Kommission für Glaziologie an der Bayerischen Akademie der Wissenschaften die Karten von 1953 und 1962 verglichen. Unabhängig davon und ohne Kenntnis der Auswertung und der Ergebnisse von H. Lang, hat G. Patzelt im Winter 1970 am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck den Volumsverlust aus den Karten von 1953 und 1964 berechnet. Die Ergebnisse beider Auswertungen und der Vergleich mit den glaziologischen Haushaltswerten werden hier vorgelegt und diskutiert.

2. DIE MITTLERE HÖHEN- UND VOLUMENÄNDERUNG IM ZEITRAUM 1953–1962 (H. Lang)

Die terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen des Hintereisferners am 4. 9. 1953 und am 13. 9. 1962 kamen bei günstigen Bedingungen zustande; die Gletscherfläche zeigt in beiden Fällen eine minimale Schneebedeckung und einen ähnlichen Zustand der Ausaperung (Abb. 1. u. 2). Die beiden Aufnahmen von 1953 und 1962 wurden



Abb. 1: Der obere Teil des Hintereisferners am 4. 9. 1953 mit Weißkugel (3738 m) und Langtauferspitze (3529 m). Photogrammetrische Aufnahme des Institutes für Photogrammetrie, Topographie und allgemeine Kartographie der Technischen Hochschule München.

speziell zusammenhängend ausgewertet¹. So konnte aus den Schichtlinienplänen im Maßstab 1:10.000 die Höhenänderung der Gletscheroberfläche mit großer Genauigkeit bestimmt werden. Bei der Berechnung der Höhenänderungen und der Volumenänderung wurde dasselbe Verfahren wie bei den früheren Berechnungen durch R. Finsterwalder verwendet, um vergleichbare Resultate zu erhalten. Da der Hintereisferner eine relativ einfache Oberflächengestalt aufweist, sollten die verwendeten Formeln genügen. Kontrollen durch punktwises Ausmessen der Höhenänderung ergaben keine nennenswerten Abweichungen.

Die Höhenänderungen dh für Höhenstufen von $\Delta h = 100$ m wurden nach der Beziehung

$$dh = \frac{\Delta F_1 + \Delta F_2}{F_1 + F_2} \cdot \Delta h \quad (1)$$

berechnet. ΔF_1 bzw. ΔF_2 sind die Flächen, die sich aus der Verschiebung der Höhenlinien auf dem Gletscher zwischen zwei Aufnahmen ergeben (z. B. ΔF_1 : Fläche

¹ Auswertung durch H. Baumert und H. Lang am Institut für Photogrammetrie, Topographie und allgemeine Kartographie der Technischen Hochschule München.



Abb. 2: Aufnahme wie Abb. 1 am 13. 9. 1962. Der Hintereisferner zeigt einen ähnlichen Stand der Ausaperung wie 1953. Photogrammetrische Aufnahme des Institutes für Photogrammetrie, Topographie und allgemeine Kartographie der Technischen Hochschule München.



Abb. 3: Aufnahme wie Abb. 1 und 2 am 20. 9. 1964. Der Hintereisferner ist deutlich stärker ausgeapert als 1953 und 1962. Die Gletscherflächen unterhalb 3000 m sind nahezu frei von Schnee und Firn. Photogrammetrische Aufnahme von H. Rentsch, Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.

zwischen der Schichtlinie 2700 m im Jahr 1953 und im Jahre 1962; und ΔF_2 : das Entsprechende für die Schichtlinie 2800 m).

F_1 bzw. F_2 sind die Flächen der Höhenstufen (z. B. F_1 : Fläche zwischen 2700 m bis 2800 m im Jahr 1953; F_2 : das Entsprechende für das Jahr 1962).

Die Höhenänderungen dh in den einzelnen Höhenstufen wurden nur über den Gletscherstand von 1962 berechnet, um die verfälschenden Randeffekte auszuschließen. Die Volumenänderung dV für die einzelnen Höhenstufen erhält man aus

$$dV = dh \cdot \frac{F_1 + F_2}{2} \quad (2)$$

Setzt man obigen Ausdruck für dh ein, ergibt sich

$$dV = \frac{\Delta F_1 + \Delta F_2}{2} \cdot \Delta h \quad (3)$$

Bei der Berechnung der Volumenänderung sind die Randpartien inbegriffen. In Tabelle 1 (1953—1962) sind die wesentlichen Ergebnisse der Flächenauswertung und der Berechnung zusammengestellt.

a) DIE HÖHENÄNDERUNG IN EINZELNEN HÖHENSTUFEN

Bei der Berechnung des dh für die untersten Höhenstufen 2400 m — 2500 m wurde auch die 50 m Höhenlinie berücksichtigt, um diesen relativ steil abfallenden Teil der Gletscherzunge mit dem stärksten Höhenverlust besser erfassen zu können. Mit einem dh von rund -57 m, bzw. -46 m in den 9 Jahren von 1953 bis 1962 ist dieser Zeitraum als ausgesprochene Schwundperiode zu bezeichnen. Das Einsinken der Gletscheroberfläche betrifft allerdings nur die Zunge bis etwa 3000 m. Der obere Teil des Gletschers, das Akkumulationsgebiet, zeigt in diesem Zeitraum eine deutliche Aufhöhung mit einem Maximum von nahezu 3 m in der Höhenstufe 3200—3300 m. Zum Vergleich sind die mittleren jährlichen Höhenänderungen für jede Höhenstufe von 100 zu 100 m berechnet worden und den entsprechenden von R. Finsterwalder (1953) angegebenen Resultaten für die Zeiträume 1894—1920 und 1920—1940 in Tabelle 1 gegenübergestellt; in Abb. 4 sind diese Werte graphisch dargestellt. Dabei zeigen die beiden ausgesprochenen Rückzugsperioden 1920—1940 und 1953—1962 einen ähnlichen Verlauf des Einsinkens der Gletscheroberfläche als Funktion der Meereshöhe; der unterste Teil der Gletscherzunge ist vor allem im zuletzt erfaßten Zeitabschnitt sehr stark geschwunden. Besonders bemerkenswert ist der Vergleich mit den Höhenänderungen in der Zeit 1894—1920; das Einsinken wurde am Beginn und gegen Ende dieses Zeitraumes durch je einen kurzen Gletschervorstoß unterbrochen. Entsprechend gering waren die Höhenverluste, die maximal nur $-0,59$ m/Jahr am Gletscherende betragen. Erstaunlich ist daher, daß gerade in dieser Zeit des geringen Einsinkens der gesamte Gletscher bis ins Akkumulationsgebiet hinauf davon erfaßt wurde, während in einer Zeit einheitlichen starken Einsinkens der Gletscherzunge der oberste Teil des Gletschers eher wieder eine Tendenz zum Wachsen anzeigt. Dieses bereits in den Resultaten von R. Finsterwalder angedeutete Gletscherverhalten wird durch das neuere Ergebnis bestätigt. Der Grund dafür dürfte in der Abnahme der Geschwindigkeit der Gletscherbewegung zu suchen sein. Dies geht aus den bereits seit dem vorigen Jahrhundert am Hintereisferner ausgeführten wertvollen Messungen der Geschwindigkeit der Gletscherbewegung hervor (H. Hess 1924, H. Schatz 1941,

Tabelle 1: Volumenänderung und Höhenänderung 1953—1962 und die Höhenänderungen 1894—1920 und 1920—1940.

Höhenstufen m ü. M.	F_{1953} $10^6 m^2$	F_{1962} $10^6 m^2$	dV (1953—1962) $10^6 m^3$	dh^a (1953—1962) m	dh^a (1953—1962) m/Jahr	dh^b (1894—1920) m/Jahr	dh^b (1920—1940) m/Jahr
2370,5 ^c	0,002	—	0,013	— (6,50)	—	—	—
2383,5 ^d	0,008	0,011	0,413	— (17,93)	—	—	—
2400	0,051	0,035	2,575	— 56,98	— 6,33	— 0,59	— 3,70
2450	0,086	0,086	4,200	— 46,12	— 5,12	—	—
2500	0,369	0,305	— 10,150	— 28,24	— 3,14	— 0,46	— 2,96
2600	0,677	0,655	— 11,150	— 17,17	— 1,91	— 0,44	— 2,22
2700	1,043	0,966	— 12,750	— 12,83	— 1,43	— 0,42	— 1,22
2800	1,155	1,030	— 7,950	— 6,98	— 0,78	— 0,39	— 0,42
2900	1,445	1,394	— 0,250	— 0,18	— 0,02	— 0,42	— 0,14
3000	1,601	1,612	2,950	— 1,82	+ 0,20	— 0,37	— 0,15
3100	1,577	1,697	3,300	— 1,95	+ 0,22	— 0,36	— 0,02
3200	0,933	0,975	2,750	— 2,83	+ 0,31	— 0,29	+ 0,01
3300	0,675	0,699	1,450	— 2,10	+ 0,23	— 0,11	+ 0,01
3400	0,213	0,223	— 0,250	— 1,14	+ 0,13	— 0,02	+ 0,02
3500	0,053	0,059	0,005	— 0,84	— 0,09	—	—
3600	0,039	0,037	0	— 0	± 0	—	—
(3700)	—	—	—	—	—	—	—
Σ	9,927 ^e	9,784 ^e	— 39,156	— 3,97	— 0,44	— 0,38	— 0,63
\bar{F}	9,856 (1953—1962)						
$dh_m = \frac{\Sigma dV}{\bar{F}}$							

^a dh nur über Fläche von 1962 berechnet. ^b Nach R. Finsterwalder 1953, Z. f. Glkde. II, 2: 189—239. ^c Zungenende 1953. ^d Zungenende 1962. ^e Diese Gesamtflächen müssen nicht mit anderen bereits veröffentlichten Werten genau übereinstimmen, da einige Randpartien nicht eindeutig begrenzt werden können.

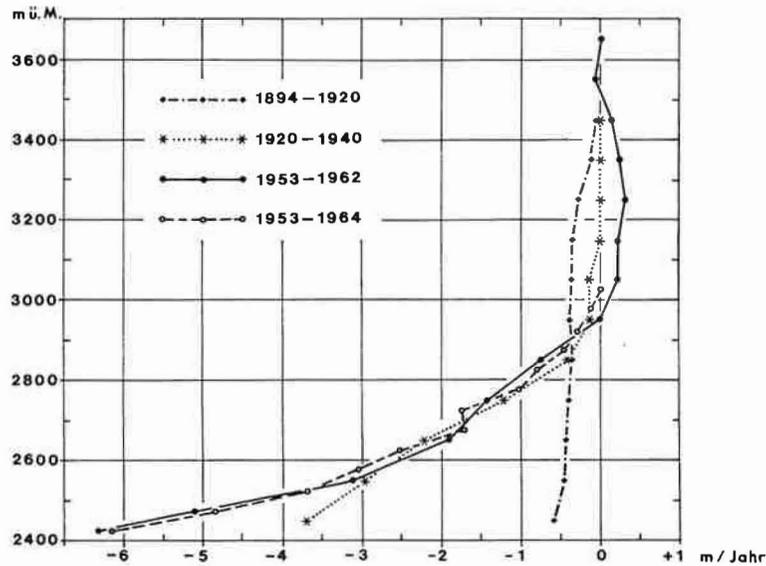


Abb. 4: Die mittlere Höhenänderung dh (in m/Jahr) in Abhängigkeit von der Meereshöhe in 100 m - Höhenstufen für die Zeiträume 1894—1920, 1920—1940, 1953—1962 und in 50-m-Höhenstufen für den Zeitraum 1953—1964.

1953). Obwohl die Meßpunkte für den gesamten Zeitraum seit 1894 nicht direkt vergleichbar sind, läßt sich doch abschätzen, daß im Vergleich zur Oberflächengeschwindigkeit des Zeitraums 1953—1962 die Geschwindigkeiten im Zeitraum 1920 bis 1940 im Mittel ungefähr doppelt so groß und im Zeitraum 1894—1920 etwa 3 bis 5 mal größer waren. Da eine enge Beziehung zwischen der vertikalen und der horizontalen Komponente der Gletscherbewegung besteht, ermöglicht eine geringere nach unten gerichtete Komponente der Eisbewegung im Akkumulationsgebiet bei sonst gleichen Bedingungen eher eine Aufhöhung in diesem Teil des Gletschers. Der gleichzeitig verminderte Eistransport bewirkt geringere Werte der nach oben gerichteten Komponente der Eisbewegung in der Gletscherzunge und kann dort die Ablation entsprechend weniger ausgleichen. Damit wird besonders deutlich, daß der Verlauf der Höhenänderung über den gesamten Höhenbereich bei einem alpinen Talgletscher nur unter Berücksichtigung der gletschermechanischen Vorgänge interpretiert werden darf.

b) DIE MITTLERE JÄHRLICHE HÖHENÄNDERUNG UND VOLUMENÄNDERUNG

In der folgenden Tabelle 2 sind die Volumenänderungen des Hintereisferners und die entsprechenden mittleren jährlichen Höhenänderungen dh_m für die Zeiträume 1953—1962 und 1953—1964 zusammen mit den Angaben von R. Finsterwalder (1953) für die Perioden 1894—1920 und 1920—1940 aufgeführt. Die mittlere jährliche Höhenänderung dh_m bezieht sich auf den Mittelwert der Gletscherfläche des betreffenden Zeitraumes, ist also definiert als

$$dh_m = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sum dV}{F_1 + F_2} \quad (4)$$

$\sum dV$ = gesamte Volumenänderung des Gletschers in dem betreffenden Zeitraum
 F_1, F_2 = Gesamtfläche des Gletschers zu Beginn bzw. am Ende des Zeitraumes
 n = Anzahl der Jahre.

Tabelle 2: Volumenänderung und mittlere jährliche Höhenänderung des Hintereisferners in den berechneten Zeiträumen.

		1894—1920	1920—1940	1953—1962	1953—1964
$\sum dV$	$10^6 m^3$	-111,80	-137,49	-39,16	-58,47
F^1/F^2	km^2	11,54/11,29	11,29/10,47	9,93/9,78	9,86/9,66
n	Jahre	26	20	9	11
dh_m	m	-0,38	-0,63	-0,44	-0,54

Diese auf den gesamten Gletscher bezogenen spezifischen Werte des mittleren Einsinkens zeigen deutlich das Anhalten des Gletscherschwundes bis 1964, mit dem Maximum im Zeitraum 1920—1940. Die größten spezifischen Einsinkbeträge der Oberfläche müssen für den Zeitraum 1940—1953 vermutet werden, die am Hintereisferner zwar nicht bestimmt worden sind, aber nach den Ergebnissen vom Aletschgletscher, der in diesen Jahren den stärksten Massenverlust zu verzeichnen hatte, angenommen werden können (P. Kasser 1967, H. Hoinkes 1970a, Abb. 5). Es ist bemerkenswert, daß am Hintereisferner der Verlust an Volumen seit 1953 nur noch die Gletscherzunge betrifft, während die Firnareale eher einen ausgeglichenen Zustand aufweisen. Der deutlich höhere negative Wert $dh_m = -0,54$ m für den Zeitraum 1953—1964 (s. Tab. 2) im Vergleich zu dem Wert von $dh_m = -0,44$ m für den Zeitraum 1953—1962 ist leicht zu verstehen, da das Haushaltsjahr 1963/64 mit einer spezifischen Massenbilanz von $-1,24$ m (Wasseräquivalent, ermittelt nach der glaziologischen Methode, H. Hoinkes 1970a, Tab. 2) den weitaus stärksten negativen Massenhaushalt für den Hintereisferner seit 1953 brachte.

3. DIE MITTLERE HÖHEN- UND VOLUMENÄNDERUNG IM ZEITRAUM 1953—1964 (G. Patzelt)

Für die Berechnung stand der gleiche Original-Schichtlinienplan des Jahres 1953, den H. Lang verwendet hatte, zur Verfügung und im selben Maßstab 1:10.000 eine Planpause der Aufnahme vom 20. 9. 1964. Die stark ausgeaperten und deshalb strukturreichen Firn- und Altschneeflächen (Abb. 3) ließen eine sehr verlässliche photogrammetrische Auswertung zu². Die Paßpunkte beider Karten zeigten im mm-Bereich liegende Abweichungen, die möglicherweise auf Papierverzug zurückzuführen sind. Deshalb wurden die Schichtlinienpläne in den jeweiligen Höhenstufen an den Isohypsen der Felsflächen zur Deckung gebracht.

² Auswertung durch H. Rentsch, Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, am Institut für Photogrammetrie, Topographie und allgemeine Kartographie der Technischen Hochschule München. Für die Überlassung der Pläne ist der Verfasser Herrn Rentsch zu großem Dank verpflichtet.

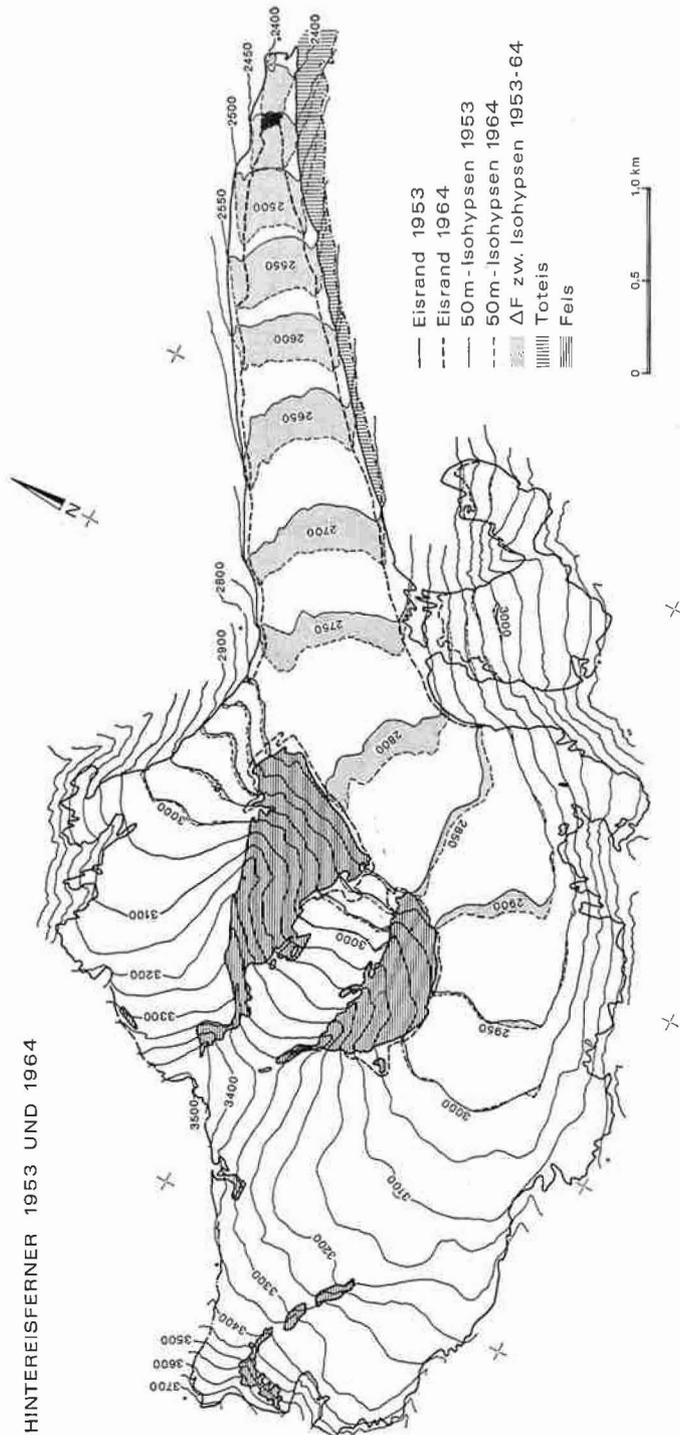


Abb. 5: Karte des Hintereisferners nach den Schichtlinienplänen 1:10.000 der Aufnahmen 1953 und 1964.

a) DIE HÖHENÄNDERUNG EINZELNER HÖHENSTUFEN

Die Höhenänderung dh wurde nach Formel (1) für Höhenstufen von 50 zu 50 m über der Gletscherfläche von 1964 berechnet (Abb. 5). Die Teilflächen ΔF und F wurden mit zwei verschiedenen Planimetern mindestens je 5mal ausgemessen und damit Planimetrierfehler möglichst ausgeschlossen. Da jedoch der Eisrand nicht immer eindeutig definiert ist, ergaben sich für die Flächen von 1953 geringfügige Abweichungen gegenüber den Werten von H. Lang. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Die hohen negativen dh -Werte im ganzen Zungenbereich für den Zeitraum 1953—1964 sind kennzeichnend für eine Periode allgemeinen starken Gletscherrückganges. Die Höhenänderung nimmt über 2850 m rasch ab. Die 3000 m Isolyhsen decken sich nahezu und in den Höhenstufen darüber ist kein signifikanter Höhenunterschied auszuwerten. Die Isolinien über 3000 m kreuzen sich zwar mehrfach, doch liegen die Differenzen innerhalb der Einpaß-, Zeichen- und Meßgenauigkeit. Die Aufhöhung, die H. Lang über 3000 m auf der Karte von 1962 fand, ist in den Jahren 1963 und 1964 bei stark negativem Massenhaushalt abgebaut worden (Abb. 5). Eine gute Kontrolle der errechneten mittleren Einsinkbeträge ist in zwei Höhenstufen mit Hilfe der beiden Steinlinien 3 und 6 möglich, die durch H. Schatz und Mitarbeiter seit 1931 regelmäßig nachgemessen werden. Die Höhenstufe 2500—2550 m ergab zwischen 1953 und 1964 ein mittleres dh von $-40,58$ m, die Profilinie 3 ist im selben Zeitraum im Mittel von 14 Meßpunkten um $43,92$ m eingesunken³. Da die Linie nahe am unteren Rand der Höhenstufe in ca. 2500 m Höhe liegt, ist der gegenüber dem Flächenmittel größere Einsinkbetrag vernünftig. Für das dh der Höhenstufe 2650 bis 2700 m wurden $-18,72$ m errechnet, für die Profilinie 6 in ca. 2670 m Höhe aus 20 Meßpunkten ein mittleres Einsinken von $17,82$ m (vgl. Fußnote 3).

b) DIE VOLUMENÄNDERUNG 1953—1964

Die Volumenänderung wurde in Höhenstufen von 50 zu 50 m unter Einbeziehung der ausgeaperten Randpartien nach der Methode von R. Finsterwalder (Formel 3) und zusätzlich nach der Methode von W. Hofmann bestimmt. W. Hofmann (1958, S. 53) nähert den berechneten Eiskörper mit der Formel

$$dV = \frac{\Delta H}{3} (\Delta F_1 + \Delta F_2 + \sqrt{\Delta F_1 \cdot \Delta F_2}) \quad (5)$$

einem Kegelstumpf an, wobei ΔH die Äquidistanz und ΔF_1 und ΔF_2 die Flächen zwischen den Höhenlinien des alten und neuen Gletscherstandes an der jeweiligen oberen und unteren Begrenzung der Höhenstufe sind.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 enthalten. Von den einzelnen Höhenstufen hat die Stufe von 2650—2700 m auf Grund der großen Fläche den stärksten Volumsverlust ergeben. In den Bereich zwischen 2600 und 2800 m fallen etwa 50% des Gesamtverlustes. Insgesamt hat der Hintereisferner zwischen 1953 und 1964 nach Formel (3) $58,27 \times 10^6 \text{ m}^3$ Eis, nach Formel (5) $57,39 \times 10^6 \text{ m}^3$ Eis an Volumen verloren. Die Methode von Hofmann ergibt einen um 1,5% geringeren Volumsverlust, als das Verfahren von Finsterwalder. Da nach Hofmann mit einer gerade für den unteren Zungenbereich besseren Näherung gerechnet wird, ist die $\sum dV = 57,39 \times 10^6 \text{ m}^3$

³ Diese Angaben sind einer unveröffentlichten graphischen Zusammenstellung der Ergebnisse der Linienvermessung entnommen, die Norbert Schatz bis 1965 fortgeführt hat, wofür hier bestens gedankt sei. Die Werte bis 1961 sind in H. Schatz (1963) veröffentlicht.

Tabelle 3: Volumenänderung und mittlere Höhenänderung von 1953—1964

Höhenstufe m ü. M.	$F_{1953}(F_2)$ km^2	$F_{1964}(F_1)$ km^2	dV (nach Finsterwalder) 10^6m^3	dV (nach Hofmann) 10^6m^3	dh (über F 1964) m	dh_m m/Jahr
2370,5 ^a	0,012	—	(0,090)	(0,090)	—	—
2398,0 ^b	0,051	0,029	2,750	2,274	-68,75	-6,25
2450	0,085	0,080	4,525	4,478	-52,77	-4,80
2500	0,162	0,124	6,100	6,081	-40,58	-3,69
2550	0,208	0,165	6,475	6,474	-33,54	-3,05
2600	0,268	0,247	6,925	6,917	-27,79	-2,53
2650	0,414	0,393	7,625	7,625	-18,72	-1,70
2700	0,383	0,360	7,225	7,220	-19,10	-1,74
2750	0,625	0,568	6,575	6,574	-11,36	-1,03
2800	0,597	0,510	4,200	4,000	-8,60	-0,78
2850	0,548	0,557	2,552	2,534	-4,98	-0,45
2900	0,705	0,644	2,275	2,223	-3,64	-0,33
2950	0,714	0,716	0,950	0,903	-1,50	-0,14
3000						
ganzer Gletscher	9,863	9,657	$\Sigma 58,267$ Eis =52,44 w. e.	$\Sigma 57,393$ Eis =51,654 w. e.		-0,54

^a Zungenende 1953^b Zungenende 1964 \approx 2400 m

dem größeren Wert vorzuziehen. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Angaben von H. Lang und R. Finsterwalder (1953) wird aber auch der nach Formel (3) gefundene Volumsverlust angegeben.

Mit der ΣdV (Finsterwalder) und dem Mittel der Gletscherfläche von 1953 und 1964 wurde nach Formel (4) die mittlere jährliche Höhenänderung dh_m mit $-0,54$ m bestimmt (Tabelle 2) und mit den Werten von H. Lang und R. Finsterwalder verglichen.

4. DER VERGLEICH MIT DEN ERGEBNISSEN DER GLAZIOLOGISCHEN METHODE (H. Lang, G. Patzelt)

Die seit 1952 am Hintereisferner ohne Unterbrechung durchgeführten Bestimmungen der jährlichen Massenbilanz nach der glaziologischen Methode (H. Hoinkes 1970a) ermöglichen den Vergleich der Ergebnisse aus beiden Methoden. Dies ist von besonderem Interesse, weil beide Methoden prinzipiell verschiedene Wege gehen, und außerdem die geodätischen Auswertungen völlig unabhängig voneinander vorgenommen wurden. Die Voraussetzungen für einen Vergleich sind günstig, da die Aufnahmezeitpunkte der photogrammetrischen Vermessung mit dem Ende des Haushaltsjahres (30. September) nahezu zusammenfallen und weil die Gletscheroberfläche in allen drei Fällen stark ausgeapert war. Die Schneebedeckung im Akkumulationsgebiet war vor allem 1953 und 1962 sehr ähnlich (Abb. 1 u. 2), worauf auch die Werte der spezifischen Massenbilanz dieser beiden Haushaltsjahre hinweisen:

Haushaltsjahr	1952/53	1961/62	1963/64
spez. Bilanz mm Wasser	-540	-696	-1244

Um die geodätisch ermittelte Volumenänderung des Gletschers mit den aufsummierten Werten der glaziologischen Massenbilanz vergleichen zu können, machen wir von der Annahme Gebrauch, daß die vertikale Verteilung der Dichte im Firngebiet zur Zeit der photogrammetrischen Aufnahmen vergleichbar war. Damit kann für den Zeitraum 1953—1962 die Umrechnung der Volumenänderung in Massenänderung mit einer mittleren Dichte für Eis von $0,9 \text{ g/cm}^3$ vorgenommen werden.

Im September 1964 war der Gletscher stärker ausgeapert als im September 1953 (Abb. 3). Die Aufnahmen 1953 und 1964 ergaben jedoch über 3000 m keine Höhenänderung. Unter 3000 m zeigten beide Karten nahezu schneefreies Eis, sodaß die ganze Volumenänderung des Vergleichszeitraumes ohne Fehler durch Multiplikation mit $0,9 \text{ g/cm}^3$ in Wasserwert umgerechnet werden kann.

Tabelle 4: Die Massenänderung des Hintereisferners 1953—1962 und 1953—1964.

	1953/54—1961/62 nach R. Finsterwalder	1953/54—1963/64 nach R. Finsterwalder	1953/54—1963/64 nach W. Hofmann
Geodätische Methode $dV \times 0,9$ in Mio m^3 Wasser	-35,24	-52,44	-51,65
Glaziologische Methode (nach H. Hoinkes 1970a) in Mio m^3 Wasser	-33,33	-50,12	-50,12
Differenz Mio m^3 Wasser	1,91	2,32	1,53
Prozent	5,4	4,4	3,0

Der Vergleich der beiden Methoden kann als sehr befriedigend bezeichnet werden. Die über den Zeitraum von 9 bzw. 11 Jahren resultierende Abweichung von rund 5% bzw. 3% in den Ergebnissen beider Methoden kann nicht ohne weiteres erklärt werden. Bei der glaziologischen Methode sind Fehler vor allem in der flächenmäßigen Bestimmung der Nettoakkumulation denkbar; außerdem mußten einige Jahre mit weniger Beobachtungen im Feld einbezogen werden. Bei der geodätischen Methode sind neben der Unsicherheit in der Umrechnung der Volumenänderung in vergleichbare Massenwerte vor allem Fehler bei der Auswertung der Schichtlinienpläne möglich, die vom Zustand der Gletscheroberfläche bei der Aufnahme und von den Entfernungen zwischen Standlinie und Objekt abhängen. Die Resultate der beiden voneinander unabhängigen Methoden stützen sich gegenseitig. Es wird interessant sein, denselben Vergleich für den Zeitraum ab 1964 durchzuführen, in dem bis jetzt 4 Jahre mit deutlich positiver Massenbilanz aufgetreten sind. Dabei könnte es nützlich sein, auf Grund von Grabungen über einige Jahresschichten im Firngebiet eine Korrekturgröße für den Einfluß der Dichte zu finden, welche nach den Jahren mit positivem Massenhaushalt von größerer Bedeutung sein dürfte.

Eine weitere Überprüfung der Ergebnisse aus den beiden Methoden ist durch Bildung der Differenz von den geodätisch ermittelten Volumenänderungen (Methode Finsterwalder) der beiden Zeiträume 1953—1962 und 1953—1964 und dem Vergleich mit den glaziologisch ermittelten Bilanzen für die Haushaltsjahre 1962—1964 möglich.

Tabelle 5: Die Massenänderung des Hintereisferners 1962—1964 aus der Differenz der Massenänderungen der Zeiträume 1953—1962 und 1953—1964.

		Massenbilanz in 10^6 m^3 Wasser
Geodätische Methode	1953—1964	-52,44
Differenz	1953—1962	-35,24
	1962—1964	-17,20
Glaziologische Methode	1962/63	- 5,52
	1963/64	-11,28
Summe	1962—1964	-16,80

Der geringe Unterschied von 0,40 Mio m^3 Wasser (= 2,3%) in den Ergebnissen der beiden voneinander unabhängigen Methoden darf als Hinweis gelten, daß mit der geodätischen Methode auch für kürzere Zeiträume ein brauchbares Ergebnis zu erzielen ist, wenn man diese als Differenz zweier längerer Perioden erfaßt.

5. DIE BESTIMMUNG DER MITTLEREN VERTIKALKOMPONENTE DER GLETSCHERBEWEGUNG IM ZEHRGEBIET UND IM NÄHRGEBIET (H. Lang)

Aus dem vorhandenen Zahlenmaterial kann auch eine gute Abschätzung der mittleren vertikalen Komponente des Massentransportes im Gletscher erhalten werden. Die Höhenänderungen der Gletscheroberfläche sind ja das Resultat zweier Vorgänge: der Ablation bzw. der Akkumulation und der Gletscherbewegung, die im Akkumulationsgebiet eine nach unten gerichtete, im Ablationsgebiet eine nach oben ge-

richtete Komponente besitzt. Im Zeitraum 1953—1962 ergab sich auf der Gletscherzunge bis zur Höhenstufe 2900—3000 m ein negativer Wert für die Höhenänderung der Gletscheroberfläche. In etwa derselben mittleren Höhe von 2970 m verlief die Gleichgewichtslinie für die nach der glaziologischen Methode errechneten Massenbilanzen in diesem Zeitraum (H. Hoinkes 1970 a). Damit ist es möglich, aus den für den Hintereisferner gefundenen Summen der Nettoablation Σa und dem geodätisch ermittelten Volumenverlust der Gletscherzunge bis zur 3000 m Höhenlinie $\Sigma dV \times 0,9$ für den Zeitraum 1953—1962 die Eismasse Σdm zu berechnen, die infolge der Gletscherbewegung vom Nährgebiet ins Zehrgebiet transportiert wurde und dort als nach oben gerichtete Komponente der Gletscherbewegung einen Teil der durch Ablation entfernten Masse ersetzte. Demnach können wir für den Massenhaushalt der Gletscherzunge schreiben:

$$\begin{aligned} \int \Sigma dV \cdot \rho &= \Sigma dm - \Sigma a \\ \Sigma dm &= \int \Sigma dV \cdot \rho + \Sigma a \end{aligned}$$

Die mittlere Vertikalkomponente \bar{z}_1 für die mittlere Fläche F_1 der Gletscherzunge bis 3000 m ü. M. und im Mittel des betrachteten Zeitraumes von n Jahren ergibt sich dann aus

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{n} \cdot \frac{\Sigma dm}{F_1}$$

Wenn wir die entsprechenden Zahlenwerte für den Zeitraum 1953—1962 einsetzen, erhalten wir die in die Gletscherzunge eingeströmte Eismasse

$$\begin{aligned} \Sigma dm &= (-49,9 \times 0,9) + 60,9 \text{ } 10^6 \text{ m}^3 \text{ Wasseräquivalent} \\ &= 16,0 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ Wasser} \end{aligned}$$

und daraus die mittlere Vertikalbewegung pro Jahr an der Oberfläche der Gletscherzunge (Zehrgebiet bis 3000 m ü. M.):

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{9} \frac{16,0 \times 10^6}{4,7 \times 10^6} \frac{\text{m}^3 \text{ Wasser}}{\text{m}^2} = +0,38 \text{ m/Jahr Wasseräquivalent}$$

Dies bedeutet, daß im Mittel $\frac{16,0 \times 100}{60,9} = 26,3\%$ der Ablation auf der ganzen

Gletscherzunge durch den Eisnachschub aus dem Firngebiet kompensiert worden sind. Der für das gesamte Zehrgebiet bis 3000 m Höhe berechnete Mittelwert der aufwärts gerichteten Vertikalbewegung von 0,38 m/Jahr Wasseräquivalent ist wesentlich kleiner als der von K. Schram (1966) für die Zeit von 1957—1959 aus Messungen an Pegeln und Steinlinien gefundene Mittelwert von 1,50 m/Jahr, entsprechend 1,35m/Jahr Wasseräquivalent, wobei dieser nur für den unteren und an Fläche kleineren Teil der Gletscherzunge gilt. Der Unterschied erklärt sich aus der Abnahme der Vertikalkomponente von der Gletscherzunge nach oben bis zum Wert 0 bei etwa 3000 m ü. M.

Aus jährlichen photogrammetrischen Aufnahmen der Gletscherzunge bis 2700 m ü. M. konnte unter Berücksichtigung der Nettoablation bis 2700 m ü. M. für die Zeit 1953—1962 ein Mittelwert der Vertikalkomponente von 1,17 m/Jahr Wasseräquivalent gefunden werden (H. Lang, unveröffentlicht).

Entsprechend der obigen Berechnung läßt sich für das Nährgebiet, d. h. für den Gletscher oberhalb 3000 m ü. M. mit der mittleren Fläche $F_2 = 5,2 \text{ km}^2$ die nach unten gerichtete mittlere Vertikalbewegung pro Jahr bestimmen:

$$\begin{aligned} \bar{z}_2 &= \frac{1}{n} \frac{\Sigma \text{ dm}}{F_2} \\ &= \frac{1}{9} \frac{16,0 \times 10^6}{5,2 \times 10^6} \frac{\text{m}^3 \text{ Wasser}}{\text{m}^2} = -0,34 \text{ m/Jahr Wasseräquivalent} \end{aligned}$$

Ähnlich dem Vorgehen im Zehrgebiet können wir den Massenhaushalt $\Sigma^2 \text{ dV}$ des Nährgebietes mit der Fläche F_2 auffassen als Differenz zwischen der durch die Gletscherbewegung verloren gegangenen Eismasse — dm und der Nettoakkumulation $\Sigma \text{ c}$ im Zeitraum 1953—1962:

$$\begin{aligned} \Sigma^2 \text{ dV} \cdot \rho &= -\Sigma \text{ dm} + \Sigma \text{ c} \\ &= (-16,0 + 27,6) \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ Wasser} \\ &= +11,6 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ Wasser} \end{aligned}$$

Demnach hat das Nährgebiet in diesem Zeitraum einen Massenzuwachs von 11,6 Mio m^3 Wasser erhalten. Die Auswertung der Schichtlinienpläne ergab für diesen Zeitraum für das Nährgebiet (Höhenstufen oberhalb 3000 m ü. M.) eine Volumenzunahme von $\Sigma^2 \text{ dV} = +10,7 \times 10^6 \text{ m}^3$. Unter Benützung der früher gemachten Annahme über die vertikale Dichteverteilung können wir diesen Wert mit $\rho = 0,9$ in Wasseräquivalent umrechnen und erhalten als Resultat der geodätischen Methode für den Gletscher oberhalb 3000 m ü. M. einen Massenzuwachs von

$$\Sigma^2 \text{ dV} \cdot \rho = +9,6 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ Wasser,}$$

der relativ gut mit dem aus Nettoakkumulation und Gletscherbewegung errechneten Wert übereinstimmt. Die Bestimmung der Höhenänderung im Firngebiet nach der geodätischen Methode und die Ermittlung der Nettoakkumulation nach der glaziologischen Methode sind bei beiden Methoden mit den größten Unsicherheiten behaftet. Wenn man davon ausgeht, die Ursache für die Differenz zwischen den Ergebnissen der beiden Methoden allein in Fehlern bei den glaziologischen und bei den geodätischen Messungen im Firngebiet des Gletschers zu suchen, so darf bei der Schwierigkeit des Meßproblems in jenem Teil des Gletschers auch dieser letzte Vergleich als zufriedenstellend bezeichnet werden.

LITERATUR

- Finsterwalder, R. 1953. Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückganges an Ostalpengletschern. Z. f. Gletscherkunde u. Glazialgeol., II, 2: 189—239.
- Hess, H. 1924. Der Hintereisferner 1893—1922. Z. f. Gletscherkunde, XIII, 4/5: 145—203.
- Hess, H. 1930. Beobachtungen am Hintereis- und Vernagtferner 1919—1929. Z. f. Gletscherkunde, XVIII, 1: 220—226.
- Hofmann, W. 1958. Der Vorstoß des Nisqually-Gletschers am Mt. Rainier, USA, von 1952 bis 1956. Z. f. Gletscherkunde u. Glazialgeol., IV, 1/2: 47—60.
- Hoinkes, H. 1970 a. Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. Ergebnisse der Meßreihe Hintereisferner (Ötztaler Alpen) 1953—1968. Z. f. Gletscherkunde u. Glazialgeol., VI, 1/2: 37—90.

Hoinkes, H. 1970 b. Ergebnisse des glazial-meteorologisch-hydrologischen IHD-Programmes im Rofental bei Vent 1964—1968. Österr. Wasserwirtschaft, Jg. 22, 5/6: 101—113.

Hoinkes, H. und H. Lang 1962. Der Massenhaushalt von Hintereis- und Kesselwandferner (Ötztaler Alpen), 1957/58 und 1958/59. Archiv Met., Geoph. u. Biokl., Serie B, 12/1: 284—320.

Kasser, P. 1967. Fluctuations of Glaciers 1959—1965. International Association of Scientific Hydrology and UNESCO, Louvain 1967 (Belgium), Table 11.

Schatz, H. 1941. Hintereis- und Vernagtferner (Ötztaler Alpen). Z. f. Gletscherkunde, XXVIII: 303—306.

Schatz, H. 1953. Nachmessungen im Gebiet des Hintereis- und Vernagtferners in den Jahren 1939—1950. Z. f. Gletscherkunde u. Glazialgeol., II: 135—138.

Schatz, H. 1963. Observations on the Hintereis- and Vernagtferner. Bull. IASH, VIII^e Année No 1: 94—96.

Schram, K. 1966. Untersuchung der vertikalen Komponente der Gletscherbewegung und der Deformation des Eises im Zungengebiet des Hintereisferners. Berichte d. Naturwiss.-Medizinischen Vereines Innsbruck, 54: 75—150.

Manuskript eingegangen am 4. März 1971

Anschriften der Verfasser:

Dr. Herbert Lang, Eidgenössische Technische Hochschule in Zürich, VAW, Abteilung f. Hydrologie u. Glaziologie, CH-8044 Zürich, Voltastraße 24
 Dr. Gernot Patzelt, Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck, A-6020 Innsbruck, Schöpfstraße 41