

DER EISHAUSHALT AM HINTEREISFERNER IN DEN JAHREN 1952/53 UND 1953/54

O. SCHIMPP

SUMMARY

Measurements on 54 gauges brought dates of the seasonal fluctuations of the glacier movement. The vertical component of the movement was especially determined. The length of the tongue of the Hintereisferner does not correspond to the alimentation in the firn-area, but is the rest of a passed glacier-stand. The vertical movement, along with annual accumulation and ablation data, gives a new solution to calculate the glacier-economy separated for alimentation- and ablation-area. This shows the real relations between alimentation and economy.

EINLEITUNG :

Die starken Veränderungen, die die Gletscher in geschichtlicher Zeit erfahren haben und besonders der auch dem Laien deutlich erkennbare Gletscherrückgang der letzten hundert Jahre, hat die Frage nach der Art und den Ursachen dieser Gletscherschwankungen aufgeworfen.

Aus den meteorologischen Daten lassen sich diese Ursachen aus mehreren Gründen nicht ablesen. Da nur an wenigen Orten seit hundert Jahren eingehende meteorologische Messungen vorgenommen werden und die Meteorologie zu diesem Zweck mit fünfzigjährigem Mittel arbeiten muß, sind die Unterlagen nicht ausreichend. Außerdem sind die Gletscherschwankungen, beziehungsweise die Änderungen der Ernährung, von einer Reihe von Faktoren abhängig, dem Niederschlag und seiner Verteilung, der Temperatur und der Strahlung. Eine kleine Änderung an einem dieser Faktoren, die durch Mittelwerte überhaupt noch nicht bestimmbar ist, kann bereits so große Schwankungen bewirken, wie sie in den letzten hundert Jahren stattgefunden haben. Da alle Faktoren gemeinsam die Gletscherschwankungen bestimmen, sind ihre Veränderungen um so kleiner und um so weniger bestimmbar. Der Umstand, daß der Gletscher bereits feinste Klimaschwankungen anzeigt, hat die glaziologische Forschung weiter an Bedeutung gewinnen lassen.

Da die Gletscherkunde heute noch nicht in der Lage ist, die Ursache der Gletscherschwankungen zu klären, ist es ihre Aufgabe, Material verschiedenster Art zusammen zu tragen, das in der Zukunft einmal eine Lösung des Problems ermöglichen soll. Die beste Möglichkeit eine umfassende und genaue Aussage über die Ernährung eines Gletschers zu machen, ist die Bestimmung einer Massenbilanz also des Gletscherhaushaltes. Besonders H. W. von Ahlmann hat in Wort und Schrift gefordert, Gletscheruntersuchungen so durchzuführen, daß sie eine Haushaltbestimmung ermöglichen.

Eine neue Möglichkeit einer genauen Bestimmung der Massenbilanz ergab sich aus den Untersuchungen des Verfassers am Hintereisferner (Ötztaler Alpen) in den Jahren 1952-54. Die vertikale Komponente der Gletscherbewegung ist mit einer Arbeitsgrundlage dieser Methode. Wie unten im einzelnen ausgeführt wird hat sie den Vorteil für jeden Punkt des Gletschers, an dem gemessen wurde, gesondert die Jahresbilanz zu bestimmen. Sie erfordert aber für die Gesamtbilanz eine große Zahl genauer Messungen.

Auch die Teiluntersuchungen dieser Arbeit, besonders die der jahreszeitlichen

Schwankung der Gletscherbewegung und der vertikalen Bewegungskomponente brachten neue Gesichtspunkte. Vom Herbst 1952 bis zum Herbst 1954 wurden durchschnittlich jeden zweiten Monat 54 Pegel eingemessen, um die Gletscherbewegung in der horizontalen und der vertikalen Komponente zu bestimmen. An den selben Pegeln wurde auch die Ablation, beziehungsweise die Akkumulation gemessen. Die Pegel waren in 8 Profilen am Hauptgletscher und in je einem Profil an den drei Seitengletschern angeordnet. Die Messung erforderte sieben verschiedene Theodolitstandpunkte. Daneben konnten noch Versuche einer Messung der tageszeitlichen Änderungen der Fließgeschwindigkeit und einer Bestimmung der Bewegung am Untergrund des Gletschers gemacht werden.

Die Wahl des Hintereisferners zum Arbeitsgebiet für diese Untersuchungen erfolgte aus mehreren Gründen. An keinem anderen Gletscher der Ostalpen sind bereits seit so vielen Jahren und in solchem Umfang Forschungen durchgeführt worden. Der Hintereisferner stellt durch seine gleichmäßige Gestalt beinahe das Modell eines Gletschers dar. Die dynamischen Verhältnisse sind daher verhältnismäßig einfach. Es war außerdem eine Erleichterung der Arbeit, daß das Begehen des Hintereisferrners geringe bergsteigerische Anforderungen stellt.

Im zweiten Arbeitjahr wurde diese Arbeit mit anderen Untersuchungen koordiniert und auch andere Wissenschaftler eingeladen, am Hintereisferner ihre Studien zu betreiben. Diese Arbeitsgemeinschaft erhielt eine Unterstützung durch die Bayrischen Innkraftwerke, die Deutsche Forschungsgemeinschaft und den Deutschen Alpenverein. Meine Arbeit wurde vor allem durch Prof. R. Finsterwalder mit Rat und Tat unterstützt. Der Deutsche Alpenverein stellte mir als Messinstrument einen Wild T2 zur Verfügung. Der Treuhandverwalter der deutschen Alpenvereinshütten, Hofrat M. Busch gewährte große Vergünstigungen für den Aufenthalt am Hochjochhospiz.

DIE GLETSCHERFORSCHUNG AM HINTEREISFERNER :

Durch eine große Zahl von Untersuchungen, die für die Gletscherkunde von grundlegender Bedeutung sind, ist der Hintereisferner allgemein bekannt geworden. Im folgenden soll die Bedeutung dieser Arbeiten kurz unterstrichen werden.

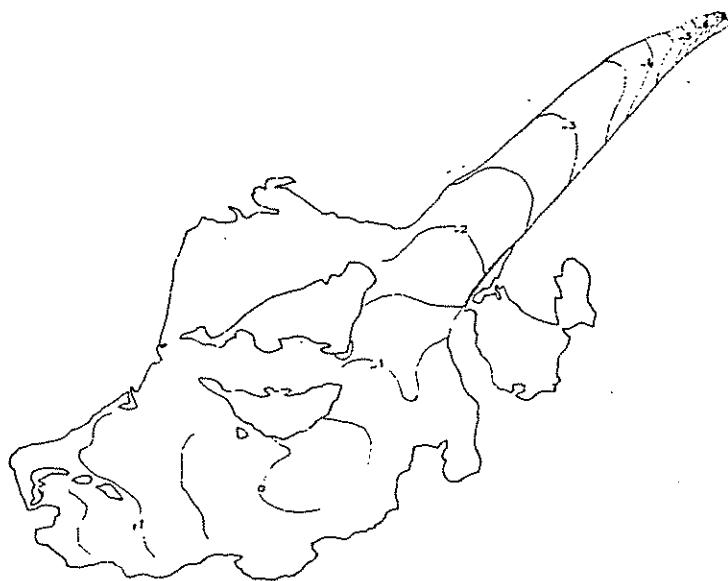
Bereits 1847 wurden durch die Brüder Schlagintweit an der Zunge des Hintereisferrners Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt (lit. 15).

Im Sommer 1893 begannen A. Blümcke und H. Hess eine Untersuchungsreihe, die bis zur Gegenwart praktisch ohne Unterbrechung fortgeführt wurde. Einige ihrer Arbeiten stellen Pioniertaten dar und wären selbst mit den heutigen Hilfsmitteln nur unter größtem Einsatz durchführbar. Das Besondere dieser Arbeiten liegt darin, daß sie, obwohl die intensive Gletscherforschung erst am Beginn war, auf jene Fragen eingestellt waren, die heute noch im Brennpunkt des Interesses stehen.

A. Blümcke und H. Hess haben 1894 mit der Karte des Hintereisferrners 1:10000, die eine der ersten Gletscherkarten überhaupt ist, ein wertvolles Dokument geschaffen (lit. 8). Von 1884 bis 1910 wurden eine Reihe von Tiefbohrungen versucht, von denen trotz einfacher Mittel und häufigen widrigen Umständen 12 den Untergrund des Gletschers erreichten. Die Fließgeschwindigkeit wurde an der Zunge mit Hilfe von Steinlinien im Firngebiet an Signalen bestimmt.

1900-1904 untersuchte eine Meßreihe von A. Blümcke und S. Finsterwalder an 18 Pegeln die Unterschiede zwischen Sommer- und Wintergeschwindigkeit. Die vertikale Komponente der Gletscherbewegung wurde estmals gemessen (lit. 6,7).

Nach dem Tode von A. Blümcke im Jahr 1914 wurden die Arbeiten von H. Hess allein weitergeführt. In den Jahren 1917, 1918 und 1919 entstanden kleine Schichtpläne vom Zungenende, die mit der Karte von 1920 den kleinen Gletschervorstoß dieser



Karte 1 — Auftrag und Abschmelzung am Ende des Haushaltsjahres 1952/53 in Metern.

Jahre anschaulich wiedergeben. Die Karte 1:10000 die H. Hess 1920 aufnahm, ist eine der ersten stereophotogrammetrischen Karten überhaupt (lit. 12, 13). Weiteres wertvolles Material lieferten die seismischen Messungen von H. Mothes 1926 und 1928.

Vom Jahre 1932 an übernahmen H. Schatz und Prof. Vietoris die jährlichen Nachmessungen. Ihnen ist es zu danken, daß 1934 im Bereich des Hintereisferners einige Totalisatoren aufgestellt wurden, die seither wertvolle Daten liefern. Auch über die Jahre des zweiten Weltkrieges wurden die Beobachtungen fortgesetzt.

Im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft arbeiteten im Sommer 1954 H. Hoinkes, N. Untersteiner an Strahlungsbilanzmessungen und Frau Dr. Dirmhirn an Albedomessungen. Mitglieder des Institutes für Geophysik der Universität München führten unter der Leitung von O. Förtsch ausgedehnte seismische Messungen durch.

Im Herbst 1954 übernahm H. Hoinkes einen Teil der Pegel der Arbeitsgemeinschaft für vorbereitende Untersuchungen zum geophysikalischen Jahr. Pläne für weitere Forschungen in den nächsten Jahren lassen hoffen, daß der Hintereisferner auch weiterhin ein Schwerpunkt der ostalpinen Gletscherforschung bleiben wird.

DIE KARTOGRAPHISCHEN UNTERLAGEN :

Die für die Arbeit notwendige Kartengrundlage verdanke ich Prof. R. Finsterwalder. Durch Angehörige seines Institutes wurde im Herbst 1953 der gesamte Hintereisferner photogrammetrisch aufgenommen und im Maßstab 1:10000 ausgewertet. Zusätzliche Aufnahmen der Zunge im Herbst 1952 und im Herbst 1954 ermöglichen, die Stände der Hintereiszunge in allen drei Jahren darzustellen. Das

Gebiet wurde von fünf Standlinien aus aufgenommen. Die Berechnung des Netzes erfolgte im Koordinatensystem der Alpenvereinsvermessung.

Die Karten von A. Blümcke und H. Hess von 1894 und 1920, die Alpenvereinskarte von 1940 und der Schichtplan von 1953 bieten die Möglichkeit über die Volums-, Höhen- und Flächenänderungen des Gletschers genaue Angaben zu gewinnen. Diese Untersuchungen hat bereits Prof. R. Finsterwalder durchgeführt (lit. 10).

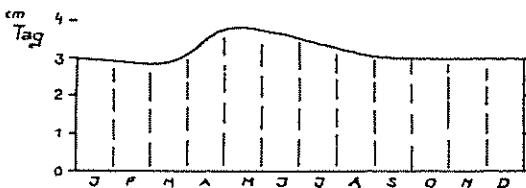


Diagramm 1 — Jahreschwankung der Bewegung. Profil VIII, 3400 m.

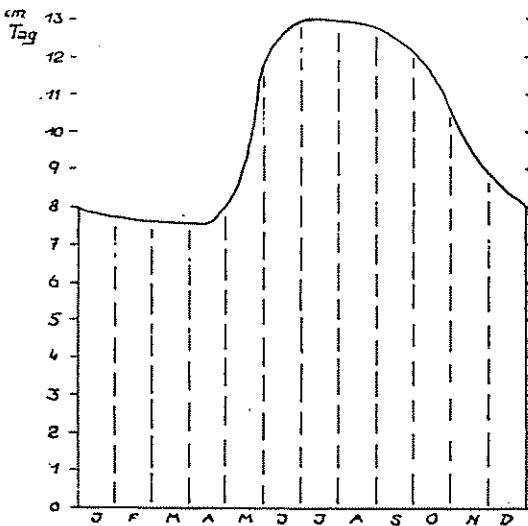


Diagramm 2 — Jahreschwankung der Bewegung. Profil VI, 3000 m.

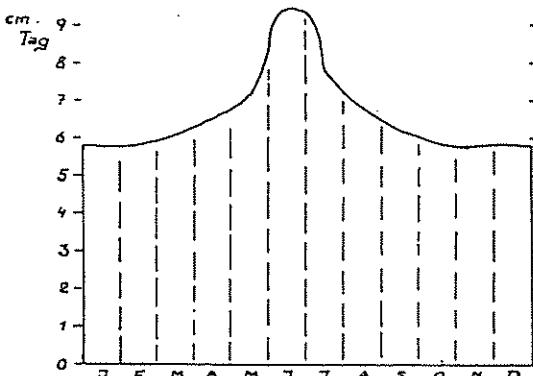


Diagramm 3 — Jahreschwankung der Bewegung. Profil V, 2900 m.

DIE HORIZONTALE KOMPONENTE DER GLETSCHERBEWEGUNG:

Als eine der bestimmenden Faktoren für die Gletscherdynamik und ihre wechselseitige Beziehung zu den Gletscherschwankungen, war die Gletscherbewegung das wichtigste Untersuchungsobjekt dieser Arbeit.

Aus den vielen Möglichkeiten zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit mußte jene Methode gewählt werden, die einfache Handhabung mit verhältnismäßig großer Genauigkeit verbindet. Diese Bedingungen werden am besten erfüllt, wenn die Bewegung aus Winkeländerungen bestimmt wird.

Um die Fehler aus der oft ungünstigen Lage der Theodolitstandpunkte zum Profil ausschalten zu können, wurden die Winkel auf eine senkrecht zur Fließrichtung stehende Nullrichtung reduziert. Die Entfernung wurde aus den beiden Neigungswinkeln zu den zwei Enden eines 1 m langen, senkrecht stehenden Pegelteiles errechnet.

Ein Vergleich der Durchschnittsgeschwindigkeiten im Längsverlauf des Gletschers zeigt die größte Bewegung nicht im Mittelteil des Gletschers, im Bereich der größten Mächtigkeit des Eises, sondern bereits ober der Firnlinie in einer Höhe von 3000 m. Die Geschwindigkeitsabnahme von der Mitte zum Rand eines Profiles verläuft in einer parabolischen Kurve. Fast im ganzen Gletscherbereich tritt in der Profilmittie eine kleine aber deutliche Geschwindigkeitsabnahme auf. Sie erklärt sich aus den beiden großen Firnbecken und den daraus entstehenden zwei Teilströmen.

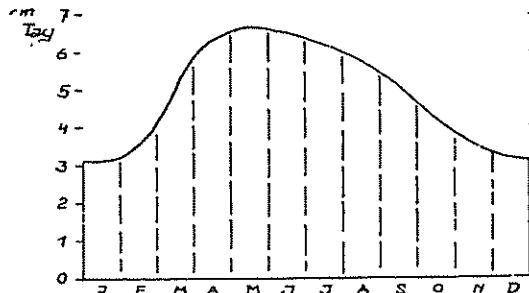


Diagramm 4 — Jahreschwankung der Bewegung. Profil III, 2750 m.

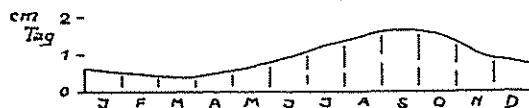


Diagramm 5 — Jahreschwankung der Bewegung. Profil I, 2400 m.

Durch Mitteln der zwei Untersuchungsjahre und durch Ausgleichen grober Sprünge im Bewegungsgang entstanden Schwankungskurven eines Repräsentationsjahres. Der Ausschlag der jahreszeitlichen Schwankung kann 100 % des Jahresmittels betragen. Beim Vergleich dieser Diagramme (Diagramme 1-5) in der Längsache des Gletschers zeichnen sich deutlich starke Verschiebungen ab. Besonders stark wird der Zeitpunkt des Geschwindigkeitsmaximums verlagert. Auch Form und Amplitude der Schwankung ändern sich von Profil zu Profil. Im oben Firngebiet erhöht sich Ende April, Anfangs Mai die Geschwindigkeit bis zu 25 % über den Jahresdurchschnitt. In den folgenden Monaten nimmt sie langsam wieder ab. In einem Profil bei 3000 m ist die Schwankung breit und mächtig, im Profil 100 m tiefer ist die Geschwindigkeitserhöhung noch stark aber nur mehr einen Monat wirksam. Gletscherabwärts werden die Schwankungen wieder breiter aber auch flacher. An

der Zunge, wo das Bewegungsmaximum in den September fällt, ist der Geschwindigkeitsanstieg flach, der Abfall steiler. In einem Querprofil sind die Jahreskurven der Schwankungen ähnlich. Eine Bewegungsänderung tritt gegenüber dem Stromstrich in den Randbereichen des Profils bis zu einem Monat verspätet auf.

Wenn man für jeden Monat Punkte gleichen Schwankungszustandes in eine Karte einträgt zeigt sich daß die Geschwindigkeitserhöhungen sich wie eine Druckwelle gletscherabwärts fortpflanzen. (Schwankungszustand = zunehmende oder abnehmende Geschwindigkeit, Bewegungsmaximum oder Minimum.) Die im Mai, zur Zeit der höchsten Schneelage, in den oberen Firngebieten entstehenden Zonen von Maxima wandern mit einer Geschwindigkeit von 50-70 m pro Tag gletscherabwärts. Die Druckwellen von den kurzen Seitengletschern erreichen den Mittelteil des Gletschers lange bevor die Druckwelle aus dem Hauptfirngebiet in diesen Bereich gelangt. Kurze Zeit laufen zwei Zonen von Maxima parallel gletscherabwärts. Die obere Zone scheint dann ihre Kraft zu verlieren und löst sich im Juli im Bereich der Firmlinie auf. Die untere Welle läuft weiter und erreicht im September die Zunge. Im November bildet sich im Mittelteil des Gletschers eine große Zone von Minima. Sie teilt sich im Jänner, ein Teil wandert ins Firngebiet, der andere zur Zunge.

Ein Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit mit den Werten der Meßreihe von A. Blümcke und S. Finsterwalder (lit. 6) läßt sich nur dann durchführen, wenn man den gewaltigen Gletscherrückgang berücksichtigt. Die Bewegung ist mit dem Rückzug des Gletschers langsamer geworden. Der Gang der jahreszeitlichen Schwankung ist, so weit sich das aus dem damaligen Vergleich zwischen der Sommerbewegung und der Bewegung des übrigen Jahres feststellen läßt, gleich geblieben. Auch die Untersuchungen von W. Pillewizer (lit. 14) am Mittelbergferner ergaben ähnliche Verhältnisse.

Die Vergleiche zeigen, daß die Ergebnisse dieser Messung eine verallgemeinernde Verwendung finden können. Der Einbau der gewonnenen Werte in eine Theorie der Gletscherdynamik muß von einem erfahrenen Physiker vorgenommen werden.

DIE VERTIKALE KOMPONENTE DER GLETSCHERBEWEGUNG :

Die einzige Arbeit, die den vertikalen Anteil der Bewegung untersuchte und auch seine Bedeutung für die Gletscherdynamik berücksichtigte, war die Meßreihe von A. Blümcke und S. Finsterwalder 1900-1904 (lit. 7).

Da die Gletscheroberfläche im Firngebiet und an der oberen Zunge annährend konstant bleibt, muß die vertikale Bewegungskomponente den größten Teil der Akkumulation und Ablation kompensieren, das heißt im Firnfeld den Betrag des Auftrags abtransportieren und an der Zunge annährend die Abschmelzung ergänzen.

Die Messung der vertikalen Komponente der Gletscherbewegung brachte nur zum Teil die gewünschten Ergebnisse. Infolge großer Fehler durch die Refraktion war es nicht möglich, die jahreszeitlichen Schwankungen zu untersuchen. Durch Auswahl großer Meßzeiträume, konnte dennoch die für die Haushaltberechnung notwendige Arbeitsgrundlage gewonnen werden.

Die Berechnung erfolgte aus der Entfernung und dem Tangens des Höhenwinkels. Die Differenz der gewonnenen Höhen ergibt, nach Addition der Korrekturen aus der Instrumentenhöhe und den Veränderungen am Meßpegel, die vertikale Bewegung. Aus der horizontalen und der vertikalen Komponente konnte die Neigung der Bewegung errechnet werden.

In Firngebiet zeigt die Bewegung eine stärkere Neigung nach unten. Gletscherabwärts verläuft die Fließrichtung immer flacher. An den seitlichen Zungenrändern und am Zungenende konnte eine sogar relativ zum Horizont aufwärts gerichtete Bewegung festgestellt werden.

Der tatsächliche Einfluß der vertikalen Bewegung auf den Gletscherhaushalt wird von der Neigung der Bewegung im Bezug auf die Oberfläche des Gletschers gekennzeichnet. Im Bereich der 2900 m — Höhenlinie verläuft die Bewegung parallel zur Gletscheroberfläche. Nach dem oben gesagten entspricht dies der Firmlinie. Im Firngebiet nimmt die Neigung des Einsinkens nach oben und nach den Seiten hin zu. Gletscherabwärts wird das Aufsteigen der Bewegungslinien aus der Oberfläche immer stärker geneigt.

Auch in diesem Fall ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den Meßwerten von A. Blümcke und S. Finsterwalder. Im oberen Zungenbereich sind die Neigungen sogar absolut gleich geblieben.

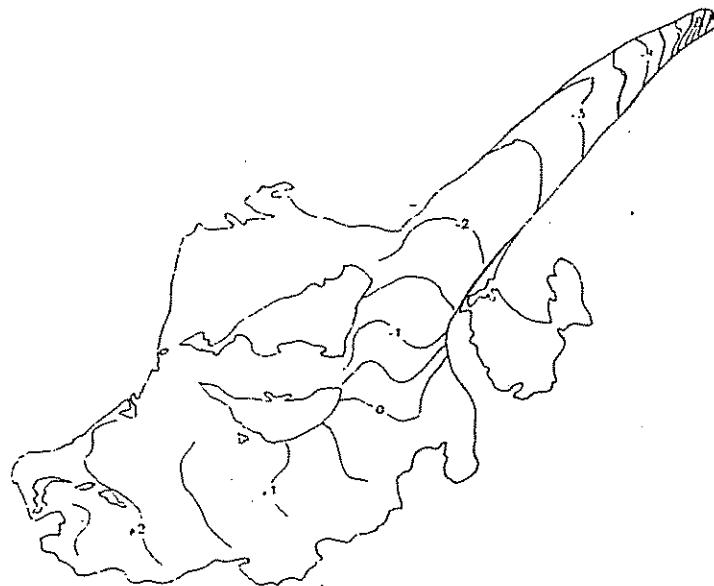
Das in gewissem Sinne gesetzmäßige Verhalten der vertikalen Bewegungskomponente ergab eine neue Möglichkeit einer genauen Berechnung des Gletscherhaushaltes. Begründung und Anwendung folgt im Kapitel der Haushaltsberechnung.

AKKUMULATION UND ABLATION:

Die Kenntnis des Auftrags und der Abschmelzung, als bestimmende Faktoren des Gletscherhaushaltes, ist eine notwendige Grundlage zur Berechnung der Massenbilanz.

An den 54 Pegelstangen der Geschwindigkeitsmessung wurde auch die Akkumulation oder Ablation gemessen. Durch mehrere Schneedichtemessungen wurde besonders zur Zeit der höchsten Schneelage und am Ende des Haushaltjahres die Schneedecke ihrer Masse nach bestimmt.

Die Jahresendwerte der Jahre 1952/53 und 1953/54 sind in den Karten 1 und 2 dargestellt. Ein Vergleich der beiden Jahre zeigt, daß bis zu einer Höhe von 2700 m



Karte 2 — Auftrag und Abschmelzung am Ende des Haushaltjahres 1953/54 in Metern.

die Ablation fast ganz gleich geblieben ist. Die Unterschiede in der Ernährung der zwei Jahre machen sich erst in den oberen Gletschergebieten deutlich bemerkbar. Die Firmlinie liegt im Sommer 1954 100-150 m tiefer und auch der Firnüberschuß ist durchschnittlich 1 m mächtiger als im Vorjahr. Der Unterschied der beiden Jahre ist auch deutlich aus Diagramm 6 ersichtlich, das die Kurve aus Ablation und Seehöhe darstellt.

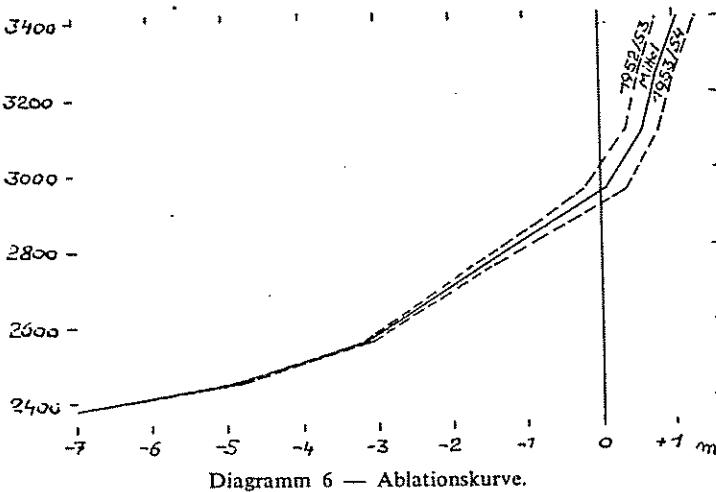


Diagramm 6 — Ablationskurve.

Die Schneedichtemessungen ergaben für die höchste Schneelage im Mai eine durchschnittliche Dichte von 0,35 und für das Ende der Ablationsperiode eine Dichte von 0,5.

Durch Planimetrieren der in Karten eingetragenen Flächen kann man die absoluten Mengen der Akkumulation und Ablation bestimmen. Reduziert man die errechneten Volumen auf die Dichte von Wasser 1,0 und extrapoliert sie auf die gesamte Gletscherfläche, so erhält man für 1952/53: Auftrag +1,56 Mill. m³, Abschmelzung — 10,20 Mill. m³, Gesamtverlust — 8,84 Mill. m³. Für 1953/54: Auftrag +3,53 Mill. m³, Abschmelzung — 8,49 Mill. m³, Gesamtverlust — 4,96 Mill. m³. Das zweite Jahr zeigt also, trotz vollkommen verändertem Ernährungszustand, noch einen großen Verlust in der Massenbilanz. Das Albationsgebiet ist unverhältnismäßig groß. Die Überlänge der Zunge entspricht einem früheren Gletscherstand. Durch eine neue Methode muß also versucht werden, diese Zahlen in ihrer wahren Bedeutung für den Gletscherhaushalt auszuwerten.

DER HAUSHALT DES HINTEREISFERNERS IN DEN JAHREN 1952/53 UND 1953/54:

Wie schon in der Einleitung gesagt wurde, bietet eine Haushaltsberechnung die Möglichkeit, die Wirkung eines Jahres auf den allgemeinen Ernährungszustand des Gletschers in einer klaren Form zahlenmäßig auszudrücken.

Besonders H. W. son Ahlmann ist es zu danken, daß die Bedeutung einer Haushaltsberechnung für die glaziologische Forschung erkannt wurde. Bei allen seinen Expeditionen (Nordschweden, Spitzbergen und Island; lit. 1-5) hat er die Bilanzbestimmung zum folgerichtigen Endziel seiner Arbeiten gemacht. Er bestimmt

möglichst genau für den ganzen Gletscher Menge und Dichte des Jahresüberschusses der Akkumulation und die Ablation. Bezieht man die Werte auf die Dichte von Wasser 1,0 und subtrahiert man das abgeschmolzene Volumen vom Volumen der Akkumulation so ergibt sich die Massenbilanz. Diese Methode berücksichtigt jedoch in keiner Weise, daß eine Veränderung im Ernährungszustand eines Gletschers sich, je nach Größe desselben, erst nach einer kürzeren oder längeren Zeitspanne über den ganzen Gletscher bemerkbar macht. Die Ergebnisse einer solchen Berechnung bringen wohl die absoluten Zahlen der Volumenänderung. Sie können den Zustand des Gletschers nur dann charakterisieren, wenn er seit einer Reihe von Jahren sich zurückzog, stationär blieb oder vorstieß.

Eine Haushaltsberechnung muß daher die verzögerte Auswirkung in den unteren Teilen des Gletschers ausschalten und die Ernährungslage des Firngebietes gesondert betrachten. Das heißt, sie muß das Verhältnis des Jahresüberschusses der Akkumulation zum jährlichen Abfluß aus dem Firngebiet untersuchen.

Die Arbeit von R. Finsterwalder (lit. 9) erfüllt die gestellten Forderungen dadurch, daß er den nach Lagally aus den Oberflächengeschwindigkeiten im Profil der Firnlinie errechneten Eisdurchfluß zur Menge des Akkumulationsüberschusses in Beziehung setzt. Trotz der Schwierigkeit nach Lagally halbwegs sichere Werte für den Eisdurchfluß zu berechnen, wurde diese Methode besonders auf Expeditionen mit Erfolg angewandt.

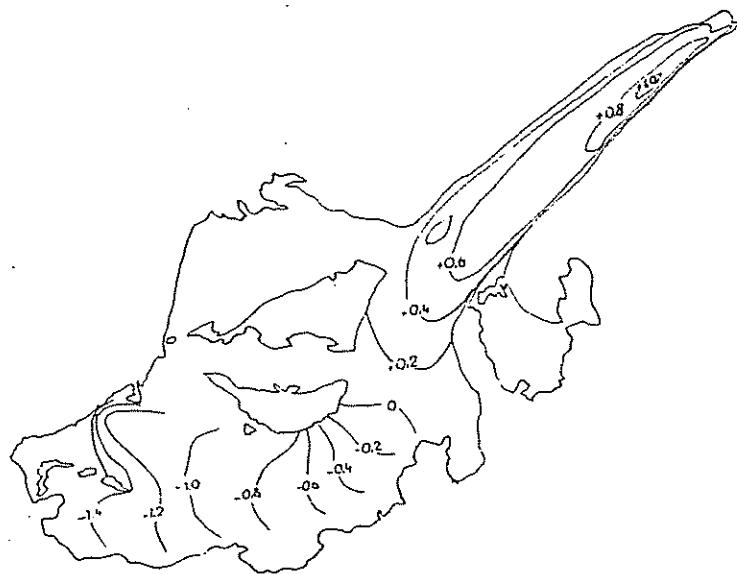
Aus der großen Zahl der oben genannten, verschiedenartigen Messungen am Hintereisferner ergab sich eine neue Möglichkeit zur Berechnung des Gletscherhaushaltes. Diese Methode benützt die vertikale Komponente der Gletscherbewegung. Sie gründet sich auf zwei grundsätzlich Feststellungen:

Da an einem stationären Gletscher die Oberfläche von Jahr zu Jahr konstant bleibt, muß zu ihrer Erhaltung der Auftrag oder die Abschmelzung von der vertikalen Bewegung ausgeglichen werden. Im Nährgebiet muß also im Jahr die infolge der vertikalen Bewegungskomponente einsinkende Firnmasse dem Betrag entsprechen den der Jahresüberschuß der Akkumulation bringt. Demgemäß ergänzt im Zehrgebiet das, infolge der vertikalen Bewegungskomponente relativ zur Oberfläche aufsteigende Eis, den Verlust durch die Ablation. Durch Vergleich der Beträge von Auftrag oder Abschmelzung mit den Beträgen der vertikalen Bewegung, kann der Ernährungszustand für jeden einzelnen Punkt des Gletschers, von dem entsprechende Messungen vorliegen, bestimmt werden.

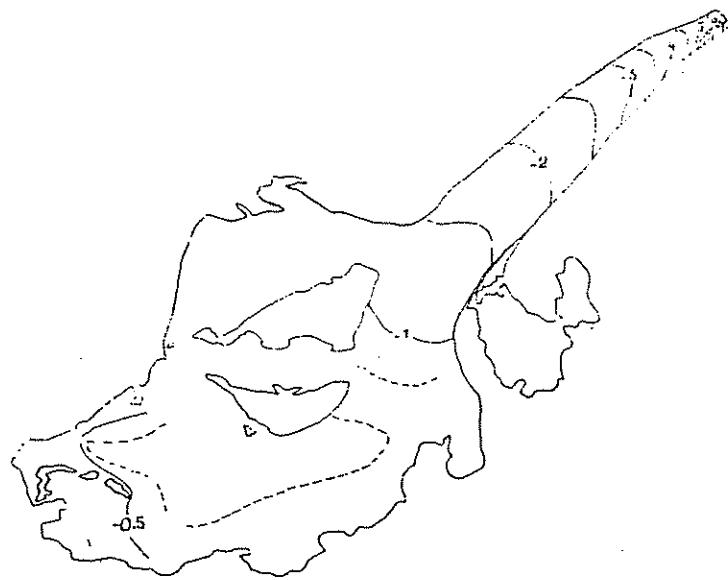
Der folgende Satz behält seine Gültigkeit, auch wenn Auftrag und Abschmelzung, der allgemeine Ernährungszustand des Gletschers und das Größenverhältnis von Firngebiet und Zunge vollkommen außer Acht gelassen werden:

Wenn man die Schmelzung am Untergrund des Gletschers unberücksichtigt läßt, so muß die Volumänderung im Nährgebiet (bezogen auf die Dichte von Wasser 1,0) durch das jährliche Einsinken gleich gross sein, wie die Volumänderung (Dichte 1,0) durch das Aufsteigen der Bewegungslinien aus der Oberfläche im Zehrgebiet. Daher entspricht diese Menge auch dem jährlichen Durchfluß (Dichte 1,0) durch das Querprofil der Firnlinie.

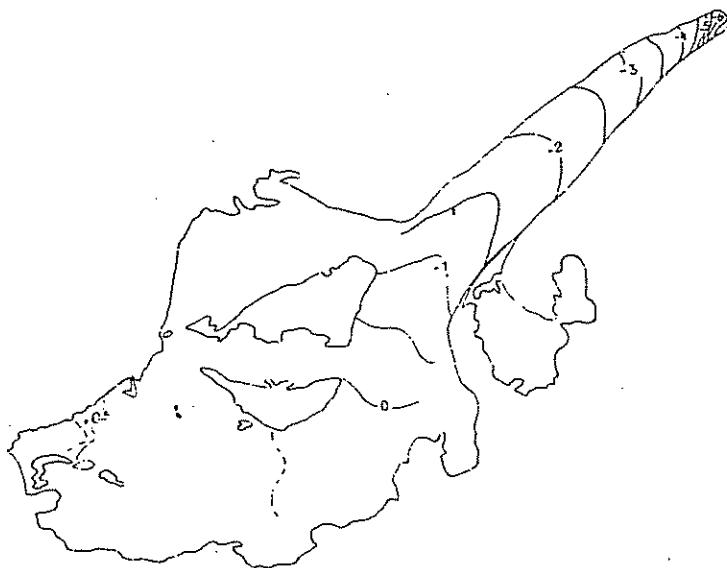
Durch Reduzierung der Werte der vertikalen Bewegungskomponente auf die Gletscheroberfläche erhalten wir die durch sie hervorgerufene Höhenänderung (Karte 3). Positives Vorzeichen bedeutet Aufsteigen der Bewegung aus der Oberfläche, negatives bedeutet Einsinken. Addiert man den Jahreswert aus Akkumulation (+) oder Ablation (-) eines Punktes zum Bewegungswert, so erhält man die Bilanz des betreffenden Punktes. Das ist die Höhenänderung der Jahresoberfläche, resultierend aus Bewegung und Auftrag oder Abschmelzung. Ist also der Bilanzwert negativ, so hat sich die Oberfläche gesenkt und der Ernährungszustand ist daher negativ. Positive Bilanz bedeutet Hebung der Oberfläche und positiven Ernährungszustand. Diese Werte sind in den Karten 4 und 5 dargestellt.



Karte 3 — Die Höhenänderungen durch die vertikale Bewegungskomponente in Metern.



Karte 4 — Punktweise Jahresbilanz 1952/53 aus Auftrag und Eisabtransport, bzw. Abschmelzung und Eisnachschub (in Metern).



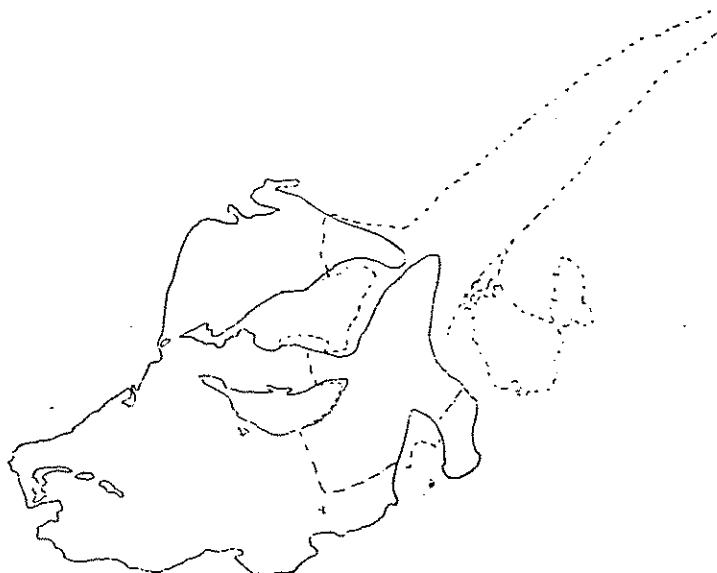
Karte 5 — Punktweise Jahresbilanz 1953/54 aus Auftrag und Eisabtransport, bzw. Abschmelzung und Eisnachschub (in Metern).

Auch hier konnten durch Planimetrieren in den Karten die verschiedenen Volumen berechnet werden. Die Werte wurden auf die Gesamtfläche des Gletschers extrapoliert und auf die Dichte von Wasser 1,0 bezogen.

Besonders die Berechnung der Volumsänderung durch die vertikale Bewegungskomponente brachte gute Ergebnisse. Es ergab sich ein Einsinken im Firngebiet von $-2,18$ Mill. m^3 Wasser, das heißt diese Menge wurde auch gletscherabwärts abtransportiert. An der Zunge stiegen durch die vertikale Bewegung Eismengen mit dem Wasserwert von $+2,11$ Mill. m^3 relativ zur Oberfläche auf. Es ergibt sich die unerwartet geringe Differenz von $-0,07$ Mill. m^3 . Diese Differenz würde, wenn die Berechnung fehlerfrei wäre, den Eisverlust durch die Druckschmelze und die Erdwärme am Untergrund darstellen. Das wäre ein durchschnittlicher Verlust von $-0,75$ cm Wasser. Wenn auch in den letzten Jahren der Betrag der Abschmelzung am Untergrund allgemein als sehr klein angenommen wird ist dieser errechnete Wert doch zu gering. Wenn auch die vertikale Bewegung genau gemessen wurde, ergeben sich doch eine Reihe von Fehlerquellen aus der Bestimmung der Oberflächenneigung des Gletschers mit Hilfe der Karte, durch das Interpolieren beim Eintragen und Ungenauigkeiten beim Planimetrieren. Es läßt sich dennoch aus den Werten feststellen, daß trotz der enthaltenen Fehler die oben gemachten Annahmen berechtigt sind. Es ist noch besonders darauf hinzuweisen, daß die errechneten $2,18$ Mill. m^3 Wasser, die im Firngebiet einsinken, auch dem Durchfluß durch das Profil der Firnlinie entsprechen.

Aus den in den Karten 4 und 5 eingetragenen örtlichen Bilanzen, läßt sich für Nährgebiet und Zehrgebiet eine getrennte Haushaltsberechnung durchführen. Für das Haushaltsjahr 1952/53 ergibt sich auch für das Firngebiet ein Verlust von $-3,28$ Mill. m^3 Firn, das sind $-1,64$ Mill. m^3 Wasser. Die Zunge verlor $-8,01$ Mill. m^3

Eis oder $-7,21$ Mill. m^3 Wasser. Das gibt für den gesamten Gletscher einen Verlust von $-8,85$ Mill. m^3 Wasser, oder als Höhenänderung ausgedrückt, einen durchschnittlichen Höhenverlust von -95 cm. Das Haushaltjahr 1953/54 hat jedoch im Firngebiet eine positive Bilanz mit einem Firnüberschuß von $+1,50$ Mill. m^3 oder $+0,75$ Mill. m^3 Wasser. Im Zehrgebiet sind in diesem Jahr $-6,92$ Mill. m^3 Eis, das sind $-6,22$ Mill. m^3 Wasser verloren gegangen. Das ist für den ganzen Gletscher ein Verlust von $-5,47$ Mill. m^3 Wasser oder ein durchschnittlicher Höhenverlust von -59 cm. Auch hier wird, wenn man die Gesamtbilanz des Gletschers betrachtet, der Wert durch die zu lange Zunge und die entsprechend erlahmende Bewegung verfälscht.



Karte 6 — Konstruktion einer dem Ernährungszustand des Gletschers entsprechenden Zunge.

Eine ungefähre Kontrolle der errechneten Werte ergibt sich daraus, daß die Eismasse durch die Bewegung nur verlagert aber nicht verändert wird. Die Gesamtsumme aus Akkumulation und Ablation soll daher mit der Summe der Bilanzberechnung annähernd übereinstimmen. Allerdings ist auch hier die unbekannte Größe der Abschmelzung am Untergrund des Gletschers enthalten. Trotzdem ergibt sich für das Jahr 1952/53 eine erstaunliche Übereinstimmung. Die Summe aus Auftrag und Abschmelzung ergab $-8,84$ Mill. m^3 , die Bilanzberechnung $-8,85$ Mill. m^3 . Die Fehler durch die ungenaue Bestimmung der Oberflächenneigung und durch das Interpolieren beim Eintragen in die Karte, lassen für das Jahr 1953/54 keine so gute Übereinstimmung zu. Aus Akkumulation und Ablation ergibt sich ein Massenverlust, von $-4,96$ Mill. m^3 und aus der Bilanzberechnung ein Verlust von $-5,47$ Mill. m^3 . Ein vollkommen fehlerfreies Arbeiten nach dieser Methode wäre nur mit einem ganz dichten Netz von Meßpegnen und einem riesigen Arbeitsaufwand möglich. Die oben angegebenen gegenseitigen Kontrollen zeigen nur einen maximalen Fehler

von 10 %. Da für eine Haushaltsberechnung auf jeden Fall verschiedene Faktoren nur äußerst schwer zu bestimmen sind, ist dieser Fehler noch tragbar. Diese kontrollierten Ergebnisse beweisen die Richtigkeit der Arbeitshypothese dieser Haushaltsberechnung und zeigen, daß diese Methode auch praktisch anwendbar ist. Die Arbeitsweise dieser Berechnung ermöglicht es also, die Gesamtbilanz so in einzelne Abschnitte aufzuschlüsseln, wie es am Beginn dieses Kapitals gefordert wurde. Diese Methode kann für Nährgebiet und Zehrgebiet, aber bei Bedarf auch für kleinere Gletscherabschnitte, getrennt die Bilanz und damit den Ernährungszustand bestimmen.

Wie bereits erwähnt lassen einige Umstände auf eine Überlänge der Zunge des Hintereisferrers schließen. Die oben angeführten Berechnungen geben uns die Möglichkeit eine Zunge zu konstruieren, die dem Ernährungszustand des Firngebietes entspricht. Dafür müssen notwendigerweise drei Dinge bekannt sein, die Durchflußmengen durch das Profil der Firmlinie (aus der Volumänderung durch die vertikale Bewegung = 2,18 Mill. m^3 pro Jahr), der Untergrund des Gletschers (durch die seismischen Messungen von O. Förtsh und H. Vidal; lit. 11) und die Ablation in den verschiedenen Höhenstufen (Diagramm 6). Es wurde auf empirischem Weg eine Zunge mit einer entsprechenden Oberfläche konstruiert, dass die Ablation gleich dem Nachschub von 2,18 Mill. m^3 war. Die Firmlinie wurde bei 1950 m angenommen. Es entstand eine theoretische Zunge von nur 2100 m Länge zwischen Firmlinie und Gletscherende. Die heutige Zunge hat aber eine Länge von 5300 m. Noch deutlicher zeigt ein Vergleich der Volumen der wahren und der konstruierten Zunge die Überlänge des Hintereisferrers. Während die tatsächliche Zunge 460,8 Mill. m^3 Eis beinhaltet, könnte die jetzige Ernährungslage des Gletschers, entsprechend den gegebenen Formen des Untergrundes, nur eine Zunge mit 97,0 Mill. m^3 Volumen erhalten. Die Zunge ist also um 363,8 Mill. m^3 zu groß. Das Ende der konstruierten Zunge würde direkt unter der Einmündung des Langtauferer-Joch-Ferners liegen, derselbe hätte keine Verbindung mehr mit dem Hauptgletscher. Die konstruierte Zunge ist in der Karte 6 dargestellt.

Nach dem Beweis der Richtigkeit und der Verwendbarkeit dieser Methode, soll diese zuletzt angeführte Berechnung zeigen, daß die Anwendung dieser neuen Art der Haushaltsbestimmung berechtigt und notwendig ist.

ZUSAMMENFASSUNG :

Die vorliegende, 1952-54 am Hintereisferner durchgeführte Arbeit hat die Akkumulation, die Ablation und besonders die Gletscherbewegung, in horizontale und vertikale Komponente getrennt, untersucht. Das Endziel der Arbeit war es, diese Ergebnisse zusammenzufassen und daraus den Gletscherhaushalt der beiden Untersuchungsjahre zu bestimmen.

Die Messung der horizontalen Gletscherbewegung brachte besonders hinsichtlich der zeitlichen und räumlichen Verteilung der Jahresschwankungen neue Gesichtspunkte. Die vertikale Komponente zeigte ein gesetzmäßiges Verhalten, im Nährgebiet ein Einsinken relativ zur Oberfläche, im Zehrgebiet ein Aufsteigen. Die Unterschiede der in den zwei Untersuchungsjahren gemessenen Akkumulation und Ablation lassen erkennen, dass die beiden Jahre für die Ernährung des Gletschers engegengesetzte Wirkung hatten und für die jetzigen Verhältnisse Extreme darstellen. Die Haushaltsberechnung mußte mit einer neuen Methode durchgeführt werden. Da die Überlänge der Zunge des Hintereisferrers einem früheren Hochstand entspricht, war es notwendig, das Mißverhältnis zwischen Nähr- und Zehrgebiet auszuschalten. Mit Hilfe der vertikalen Bewegungskomponente war es möglich, für Firngebiet und Zunge den Haushalt getrennt zu bestimmen und dadurch die wahren Ernährungsverhältnisse aufzuzeigen. Aus den gegebenen Daten konnte eine Zunge konstruiert werden, die

dem Ernährungszustand des Firngebietes entsprechen würde. Sie hätte nur mehr ein Drittel der Länge der heutigen Zunge.

Die Arbeit konnte durch Anwendung neuer Methoden einen Beitrag zur Lösung verschiedener glaziologischer Fragen leisten, sie hat aber besonders in Bezug auf die Gletscherdynamik einige neue Fragen aufgeworfen.

LITERATUR

- (1) H. W:son AHLmann : Scientific results of the Swedish - Norwegian Arctic Expedition in the summer of 1931. Abdruck aus *Geografiska Annaler* 1933, Stockholm 1934.
- (2) H. W:son AHLmann : Researches on snow and ice 1918-1940. *Geogr. Journal* 107, 1946, Seite 11-28.
- (3) H. W:son AHLmann, H. U. SVERDRUP, Hilding OLSSON : Scientific results of the Norwegian-Swedish Spitzbergen-Expedition 1934. Abdruck aus *Geografiska Annaler* 1935, 1936, Stockholm 1936.
- (4) H. W:son AHLmann, Sigurdur THORARINSSON : The Vatna Jökull Glacier. *The Geogr. Review*, Bd. 28, No. 3, Juli 1938, 412-438.
- (5) H. W:son AHLmann, Sigurdur THORARINSSON : Vatna Jökull : Scientific results of the Swedish-Icelandic investigations 1936-37-38. Abdruck aus *Geografiska Annaler* 1937-40, 1943, Stockholm 1943.
- (6) A. BLÜMCKE, S. FINSTERWALDER : Zeitliche Änderungen in der Geschwindigkeit der Gletscherbewegung. — Sitzungsberichte der Bayrischen Akademie der Wissenschaften, Band 25, 1905, Seite 109-131.
- (7) A. BLÜMCKE, S. FINSTERWALDER : Die Gletscherbewegung mit Berücksichtigung ihres senkrechten Anteils. *Z. f. Glkde.* Band 1, 1906-07/, Seite 4-20.
- (8) A. BLÜMCKE, H. HESS : Untersuchungen am Hintereisferner. Wissenschaftl. Ergänzungsheft 2, D. u. Ö. A. V. 1899.
- (9) R. FINSTERWALDER : Eishausalt von Gletschern und Niederschläge in Gletschergebieten. *Geolog. Rundschau*, Band 34, 1944, Heft 7/8, Seite 705-712.
- (10) R. FINSTERWALDER : Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückganges an Ostalpengletschern. *Z. f. Glkde.* Band 2, 1953, Seite 189-239.
- (11) O. FÖRTSCH, H. VIDAL : Glaziologische und glazialgeologische Ergebnisse seismischer Messungen auf Gletschern der Ötztaler-Alpen 1953/54. *Z. f. Glkde.* Band 3, 1956, Seite 145-169.
- (12) H. HESS : Der Hintereisferner 1893-1922. *Z. f. Glkde.* Band 13, 1923/24, Seite 145-203.
- (13) H. HESS : Hintereisfernernachlese. *Z. f. Glkde.* Band 17, 1929, Seite 47-65.
- (14) W. PILLEWIZER : Zur Frage jahreszeitlicher Schwankungen in der Geschwindigkeit der Gletscherbewegung. *Z. f. Glkde.* Band 1, 1950, Seite 29-38.
- (15) H. und A. SCHLAGINTWEIT : Untersuchungen über die physikalische Geographie der Alpen. Verlag Ambrosius Barth, Leipzig 1850.