

UNTERSUCHUNGEN ZUM MASSENHAUSHALT DES VERNAGTFERNERS (ÖTZTALER ALPEN) 1965—1968

Von O. REINWARTH, München

Mit 4 Abbildungen

INHALTSÜBERSICHT

	Seite
1. Einleitung	44
2. Das Arbeitsgebiet	46
3. Zur Methodik der Massenhaushaltsbestimmung	48
a) Die zeitliche Integration	49
b) Die flächenmäßige Integration	50
4. Ergebnisse	53
5. Literaturverzeichnis	61

ZUSAMMENFASSUNG

Der Vernagtferner zählt mit vier kartographischen Gesamtaufnahmen, zahlreichen älteren Messungen der Fließgeschwindigkeit und des Zungenverhaltens sowie neueren glaziologischen, hydrologischen und geophysikalischen Untersuchungen zu den wissenschaftlich gut erschlossenen Gletschern der Ostalpen. Seit 1965 bilden Messungen zur Ermittlung der Massenbilanz den Schwerpunkt des Vernagtprogrammes. Die Grundlagen der auf der glaziologischen Methode basierenden und auf das feste Haushaltsjahr bezogenen Massenbilanzuntersuchungen werden näher beschrieben. Ebenso werden Meß- und Analysenverfahren ausführlich dargestellt. Als Ergebnis der abschließend bearbeiteten ersten drei Massenhaushalte, von denen zwei deutlich positiv (1965/66 und 1967/68) und einer annähernd ausgeglichen (1966/67) waren, wurde ein Massenzuwachs des Gletschers von 12,6 Mill. m³ Wasser, entsprechend einem spezifischen Wert von 135 g/cm² oder 2,5% der aktuellen Gletschermasse, festgestellt.

Zur Erläuterung der besonderen Merkmale der Massenbilanz des Vernagtferners werden die vorliegenden Ergebnisse mit entsprechenden Werten vom Hintereis- und Langtalerferner verglichen. Die systematischen Abweichungen können weitgehend durch die unterschiedliche Verteilung der Flächenanteile der Gletscher in Abhängigkeit von der Höhe erklärt werden.

Der Verlauf der spezifischen Nettobilanz mit der Höhe ist charakterisiert durch einen etwa linearen Gradienten im Ablationsbereich und eine nahezu höhenunabhängige Verteilung im Akkumulationsbereich. Die Ähnlichkeit dieser Beziehung für die einzelnen Jahre läßt auch für den Vernagtferner einen engen Zusammenhang von mittlerer spezifischer Massenbilanz, der mittleren Höhe der Gleichgewichtslinie und der Flächenverhältnisse von Akkumulationsgebiet zu Gesamtfläche oder zu Ablationsgebiet erwarten. Die Maximalhöhe von ca. 3000 m NN der mittleren Gleichgewichtslinie für den ausgeglichenen Zustand ordnet den Massenhaushalten der drei Folgejahre durchwegs negative Werte zu, der Haushalt von 1971/72 ist etwa ausgeglichen anzunehmen.

MASS BALANCE STUDIES ON THE VERNAGTFERNER (ÖTZTALER ALPEN) 1965—1968.

SUMMARY

With four complete surveys and numerous other former and current investigations the Vernagtferner belongs to the well explored glaciers in the Eastern Alps. Since 1965 mass budget measurements form the basic part of the Vernagt research program. For the determination of the mass budget the glaciological method, referred to the fixed date system, is used. The principles of the mass balance studies as well as measurements and analyses are discussed. In the three years from 1965 to 1968 two distinct positive budgets (1965/66 and 1967/68) and

one that was approximately balanced added a total of 12.6 mill. m³ of water to the glacier, corresponding to 135 g/cm² as specific value, or approximately 2.5 per cent of the actual mass.

Mass balance data of Vernagtferner so far were compared with corresponding values of Hintereisferner and Langtalerferner. The differences can be explained mainly by the different distribution of glacier area with altitude of the three glaciers. The Hintereisferner and Langtalerferner, representing typical valley glaciers, show a rather even area-altitude distribution, whereas the Vernagtferner has a pronounced share in area within a limited range in altitude, mainly within 3000–3200 m a. s. l.

The altitude dependence of the specific net budget shows an about linear gradient within the ablation zone. In the accumulation region the specific net budget is nearly independent of altitude. Provided the net budget curve has a similar shape each year, a relation between mean specific net budget and mean height of the equilibrium line and with the area ratios S_c/S and S_c/S_a can also be assumed for the Vernagtferner. With a mean height of the equilibrium line of about 3000 m a. s. l. for a balanced budget, the mass balance of the following three years is expected to be continuously negative, 1971/72 again comes close to a balanced budget:

I. EINLEITUNG

Die gletscherkundliche Forschung hat in den letzten Jahren zweifellos eine Neuorientierung erfahren. Die über lange Zeit vorherrschende geographisch-beschreibende Arbeitsweise widmete vor allem den beobachtbaren Veränderungen der Gletscher, die sich am augenfälligsten im Zungenbereich darbieten, besondere Aufmerksamkeit. Die zunehmende Anwendung physikalischer, speziell kernphysikalischer Meß- und Analysenverfahren ist kennzeichnend für das Bemühen um das Verständnis der verschiedenen im Gletscher und an dessen Oberfläche wirksamen Prozesse. Der Versuch, das dynamische Verhalten eines Gletschers als Funktion der verschiedenen Prozesse durch ein numerisches Modell zu approximieren, ist die konsequente Fortsetzung dieser Bemühungen (Budd and Jenssen 1971). Sowohl die älteren Beobachtungen wie die modernen Messungen und Modellrechnungen dienen indessen vornehmlich dem gleichen Ziel, nämlich die im Gletscher und dessen Verhalten gespeicherte Information über die klimatische Umwelt und deren Veränderungen zu nutzen und bilden deshalb zusammen unentbehrliche Beiträge, wenn die Gletscher-Klimabeziehungen eine vollständige Beschreibung und Erklärung finden sollen.

Nicht alle Angaben über frühere Gletscherstände und deren Veränderungen sind gleichwertig. Sie haben vielmehr dann einen besonderen Wert, wenn sie quantitative Aussagen für den gesamten Gletscher ermöglichen und sich nicht auf das Zungenverhalten beschränken. Solche Angaben lassen sich mit ausreichender Genauigkeit aus dem Vergleich von wiederholten genauen Kartierungen desselben Gletschers ableiten.

Das Verfahren, über den Vergleich der in angemessenem zeitlichen Abstand zumeist mit Hilfe terrestrisch-photogrammetrischer Aufnahmen erstellter Schichtlinienpläne eines Gletschers zu quantitativen Angaben über die Veränderung des Gletschers im dazwischenliegenden Zeitintervall zu gelangen, wurde von R. Finsterwalder (1953) entwickelt und auf zahlreiche Gletscher der Ostalpen angewandt. Die Veränderung des Gletschers wird dabei beschrieben durch die mittlere Höhenänderung, Flächen- und Volumensänderungen für den Gesamtgletscher sowie für einzelne konkrete Höhenzonen der Gletscherfläche.

Die Aktualität dieses Verfahrens, das als „geodätische Methode“ in die Massenhaushaltsbestimmung einbezogen wurde, bestätigen mehrere neuere Beiträge, die methodische Weiterentwicklungen beinhalten oder spezifische Anwendungen des Verfahrens darstellen. So wurde die von R. Finsterwalder (1954) praktizierte Appro-

ximation der Differenzvolumina durch prismatische Körper und der von W. Hofmann (1958) modifizierten Berechnungsweise durch die Erfassung der volumetrischen Veränderung fester Körper ohne Einschränkung bezüglich der Dimension, Oberflächengestalt und Umrißformen wesentlich erweitert (Lesca 1971). Als spezifische Anwendungen sind die Auswertungen der volumetrischen Veränderungen vom Großen Aletschgletscher zur Kontrolle der nach der hydrologischen Methode ermittelten Bilanzwerte (Kasser 1959) und analoge Auswertungen für den Hintereisferner zum Vergleich mit den nach der glaziologischen Methode bestimmten Massenhaushalten (Lang und Patzelt 1971) zu betrachten. Nach der Fertigstellung der neuen Karte des Vernagtferners 1969 (Rüd. Finsterwalder 1972) wurden nunmehr auch für diesen Gletscher und den benachbarten Guslarferner die Werte der geometrischen Größen zur Beschreibung der Veränderung der Gletscher in den Zeitintervallen zwischen den verschiedenen Gesamtaufnahmen dieser Gletscher (1888/89, 1912, 1938, 1969) ausgewertet und diskutiert (Brunner und Rentsch 1972). Schon vorher war eine Berechnung der Gesamtvolumensänderung für diese Intervalle, jedoch nach einem anderen Verfahren, von H. Miller (1971) vorgenommen worden. Eine frühere Bearbeitung der Volumensänderung für den Zeitabschnitt 1912 bis 1938 erfolgte durch F. Ebert (1966). Vorläufige Angaben über die aus den Vermessungen ableitbaren Flächenveränderungen finden sich bei H. Hoinkes (1969).

Die Anwendung der „geodätischen Methode“ auf den Vernagtferner bot sich wegen der wiederholten genauen Vermessungen dieses Gletschers unmittelbar an. Dabei wurde neben der Ermittlung der Zahlenwerte unter Berücksichtigung aller Kriterien für eine exakte Vergleichbarkeit der kartographischen Unterlagen eine spezielle Form der kartographischen Wiedergabe dieser Veränderungen versucht (vgl. Anlage 2, 3 und 4 dieses Bandes), ähnlich vergleichbaren Darstellungen für den Großen Aletschgletscher (Kasser 1967) und den Mattmarkgletscher (Kasser 1972).

Die quantitative Beschreibung des Gletscherverhaltens nach der „geodätischen Methode“ begegnet verschiedenen prinzipiellen Einwänden: Änderungsbeträge über größere Zeitabschnitte sind zwar mit hinreichender Sicherheit nachweisbar, jedoch wurden die zugrundeliegenden Vermessungen zeitlich meist zufällig festgelegt und entsprechen daher in den seltensten Fällen einer Extremsituation des Gletscherstandes. Die abgeleiteten Änderungen von Fläche und Volumen sind deshalb mittlere Werte für ein bestimmtes durch die Vermessungen gegebenes Zeitintervall und somit nur beschränkt charakteristisch. Änderungsbeträge über kleinere Zeitabschnitte begegnen dem Einwand von der Genauigkeit her für gesicherte Aussagen über das Verhalten des Gletschers nicht auszureichen. Hinzu kommen weitere Schwierigkeiten, die einer Anwendung der „geodätischen Methode“ zur Ermittlung der Massenänderungen eines Gletschers über kürzere Zeitabschnitte entgegenstehen.

In seiner ausführlichen Darstellung der Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern diskutiert H. Hoinkes (1970) sehr eingehend die Möglichkeiten und Unzulänglichkeiten der „geodätischen Methode“ zur Ermittlung von Massenänderungen. Die Kritik an diesem Verfahren besteht vor allem darin, daß ohne Kenntnis der Verteilung der Vertikalkomponente der Bewegung für die gesamte Gletscheroberfläche, selbst bei plausiblen Annahmen über die Dichtewerte der im Akkumulationsbereich des Gletschers festgestellten Volumenzunahme, keine Angaben zur Massenbilanz möglich sind.

Daß eine rein geometrische Arbeitsweise eine unzureichende Behandlung des Problems darstellt, erkannte auch R. Finsterwalder, der in einer Kombination der von ihm als „Alpine Schule“

der Gletscherforschung bezeichneten geodätischen Arbeitsweise und der als „Skandinavische Schule“ apostrophierten Anwendung direkter glaziologischer Messung, einen erfolgversprechenden Weg zur Behandlung der hier anstehenden Fragen sah (R. Finsterwalder 1961). Er war deshalb um eine Erweiterung der von ihm und seinen Mitarbeitern durchgeführten Untersuchungen, die ausschließlich auf der Anwendung der „geodätischen Methode“ beruhten, nach parallelen Untersuchungen, die auf der glaziologischen Methode basieren, bemüht. Diese Bemühungen führten schließlich 1962 zur Einrichtung der Kommission für Glaziologie bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, die zunächst mit Bestimmungen des Massenhaushaltes nach der glaziologischen Methode am Schneeferner/Zugspitze und Langtalerferner/Ötztal begann und 1965 den Vernagtferner mit in ihr Massenhaushaltsprogramm einbezog. Daneben werden von der Kommission für Glaziologie die geodätischen Aufnahmen von Ostalpengletschern im Sinne R. Finsterwalders fortgeführt. Über die Probleme und Ergebnisse der Massenhaushaltsuntersuchungen am Vernagtferner soll im folgenden berichtet werden.

2. DAS ARBEITSGEBIET

Zur Erstellung eines Weltinventars perennierender Eis- und Schneemassen als ein Teilprogramm der Internationalen Hydrologischen Dekade 1965–1974 wurde eine Klassifikation und Beschreibung der Gletscher nach 6 Merkmalsgruppen, denen jeweils entsprechende Kennzahlen zugeordnet sind, empfohlen (UNESCO/IASH 1970 A). Nach diesem System wird der Vernagtferner durch die Kennung 520111 beschrieben, wobei die Zahlen im einzelnen bedeuten: 5 = Talgletscher mit deutlich abgrenzbarem Einzugsgebiet; 2 = gegliedertes Akkumulationsbecken, das einen Gletscherstrom speist; 0 = keines der Gletscherfront-Merkmale zutreffend; 1 = relativ ungestörtes Längsprofil; 1 = im wesentlichen durch Schnee- und Driftschneeablagerungen ernährt; 1 = Zunge zeigt deutlichen Rückgang von mehr als 20 m/Jahr. Durch die beiden ersten Angaben wird die besondere Form des Vernagtfernens nur unzureichend erfaßt. Charakteristisch für diesen Gletscher ist vielmehr das weit ausladende, durch einige Felsgrate untergliederte Firnbecken und die zwar breite, aber sehr kurze Gletscherzunge, die flach auslaufend alle Kennzeichen eines stark zurückgehenden Gletschers aufweist. Der vom Gletscher überdeckte Höhenbereich beträgt ca. 900 m mit dem Hinteren Brochkogel (3628 m NN) als höchstem Punkt und dem in der Karte von 1969 noch mit 2717 m NN angegebenen Zungenende als tiefstem Punkt. Die mittlere Höhe des Gletscherareals liegt bei 3140 m NN. Den maximalen Längserstreckungen vom Zungenende etwa zum Schwarzwandjoch oder Taschachhochjoch, die je ca. 3 km betragen, steht eine Breite des Gletschers von mehr als 5 km gegenüber. Insgesamt läßt sich die Form des Vernagtfernens recht gut zu einem Kreissektor von 150° Öffnung (Zentriwinkel) mit einem Radius von 3 km abstrahieren, wobei der winkelhalbierende zum Zentrum deutende Radius eine SSE-Orientierung aufweist.

Während bei den geodätisch-kartographischen Gesamtaufnahmen stets die beiden im Vernagtgebiet angeordneten Gletscher, der Vernagt- und Guslarferner, berücksichtigt wurden, sind die glaziologischen Arbeiten auf den ca. 9,5 km² großen Vernagtferner beschränkt. Die früher gebrauchte Unterteilung in den Großen- bzw. Hochvernagtferner und den Kleinen Vernagtferner, die auch noch im 1951 erschienenen „Blatt Weißkugel-Wildspitze“ 1:25.000 des Alpenvereinskartenwerkes der Ötztaler und Stubai Alpen, wenn auch in unrichtiger Weise, eingetragen ist, erübrigt sich, nachdem der den Kleinen Vernagtferner bildende Anhang des Gletschers inzwischen bis auf einige Firn- und Eisreste abgeschmolzen ist.

Als Kleiner Vernagtferner wurde der durch die Einsenkung zwischen Schwarzkögele und Platteikogel entwässernde Teil des Ferners bezeichnet, nicht aber der vom

Petersengrat und dem vom Brochkogeljoch zum Vorderen Brochkogel ziehenden Kamm umschlossene Teil des Firnbeckens, wie dies in der AV-Karte der Fall ist. Eine das Gletscherbecken durchziehende Felsschwelle, die früher an ihrer am steilsten aufragenden Stelle den „Großen Eisbruch“ verursachte, wurde an dieser Stelle zunächst als Felsfenster sichtbar. Nach Angaben von S. Finsterwalder und H. Hess (1926) wurde hier der Fels 1912 erstmals teilweise frei (vgl. Brunner und Rentsch Abb. 1a, S. 12), 1918 aber wieder völlig vom Eis überflossen. Nach H. Schatz (1935) konnte das Felsfenster 1934 erstmalig beobachtet werden. In der Karte des Vernagtferners von 1938 wird eine weitere, die Eisoberfläche durchbrechende Felsinsel als Teil dieser Schwelle erkennbar. Die Karte von 1969 (vgl. Anlage I) zeigt eine deutliche Gliederung des Vernagtferners in zwei durch diese Schwelle getrennte Bereiche. Der Eisabfluß aus dem größeren nordöstlich der Schwelle gelegenen Bereich erfolgt derzeit nur durch eine Einsenkung im unteren Drittel der Schwelle. Diese besondere Struktur der Topographie des Felsuntergrundes, wie sie durch die seismischen Messungen von H. Miller (1971) für den gesamten Gletscher genau untersucht wurde, wird mit zur Erklärung der allgemein bekannten, durch wiederholte rasche Vorstöße in das Rofental gekennzeichneten Verhaltensweise des Vernagtferners herangezogen. Diese als „surges“ interpretierten Vorstöße (Hoinkes 1969) und deren katastrophale Folgen für das gesamte Ötztal durch die Ausbrüche des vom Vernagtferner gestauten Rofener Eissees sicherten diesem Gletscher stets allgemeine Aufmerksamkeit und das Interesse der Wissenschaft seit dem Beginn gletscherkundlicher Studien in den Ötztaler Alpen.

Ausführliche Darstellungen der Historie des Verhaltens des Vernagtferners finden sich bei S. Finsterwalder (1897) und R. v. Srbik (1939). Eine kurze und übersichtliche Zusammenstellung aller wesentlichen Daten und Fakten, ergänzt durch die Wiedergabe von eindrucksvollen Bilddokumenten zu verschiedenen Phasen der Gletschervorstöße, enthält die bereits genannte Arbeit von H. Hoinkes (1969). Während die Vorstöße des Gletschers in das Rofental durch zahlreiche Zeugnisse belegt sind, liegen nur spärliche Informationen über die zwischenzeitlich eingenommenen Minimalstände vor. Durch zahlreiche Messungen genau erfaßt und durch Bildfolgen gut dokumentiert ist hingegen der Übergang aus der Rückzugsphase von 1890 bis zu dem 1898 einsetzenden und bis 1902 anhaltenden Vorstoß, der zwar ein auf nur wenige hundert Meter beschränktes Vorrücken der Zunge bewirkte, aber mit einer beachtlichen Aufhöhung des Eises im Zungenbereich verbunden war. Zu den bekannten Bilddokumenten dieses Vorstoßes zählen besonders die in der Zeit von 1897 bis 1902 jährlich von zwei Punkten im Vernagtgebiet aus aquarellierten Ansichten des Vernagt- und Guslarferners von R. Reschreiter. Die bekanntere Bildfolge vom „Breslauer Weg“ ist bei Ambach (1963) wiedergegeben. Die zur gleichen Zeit im wesentlichen von S. Finsterwalder, A. Blümcke und H. Hess vorgenommenen Messungen der Höhen in einem Zungenlängsprofil und der Fließgeschwindigkeiten in einem Querprofil nahe der Zungenwurzel lassen mit den heutigen Kenntnissen den Vorstoß von 1898 bis 1902 wegen der Divergenz der Fließgeschwindigkeit des Eises und der mehr als doppelt so großen Verlagerungsgeschwindigkeit der Schwellung der Eisdicke als kinematische Welle erkennen (Hess 1904).

Jährliche Messungen der Fließgeschwindigkeiten im Zungenbereich sowie der Form und Position des Zungenrandes wurden praktisch kontinuierlich weitergeführt, wobei nach H. Hess vor allem H. Schatz, der diese Arbeiten ab 1931 betreute und sie 1938 durch eine neue Gesamtaufnahme von Vernagt- und Guslarferner erweiterte (Brunner und Rentsch 1972), besondere Verdienste zukommen. Die Zusammenstellung aller bis 1962 vorliegenden Arbeiten im Bereich des Vernagtferners enthält eine glaziologische Bibliographie für die zentralen Ötztaler Alpen (Rudolph 1963).

Während die Zungenvermessungen nunmehr von H. Schneider weitergeführt werden, hat ab 1965 die Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften zu einer wesentlichen Intensivierung der wissenschaftlichen Arbeiten im Vernagtgebiet beigetragen, die zunächst mit der Einrichtung eines auf die österreichische Katastertriangulation bezogenen Fixpunktnetzes begannen, an das alle noch vorhandenen Punktsignalisierungen der Ver-

messungen von 1889, 1912 und 1938 angeschlossen wurden (Niedermeier 1967). Im Jahre 1966 folgte eine terrestrisch-photogrammetrische Gesamtaufnahme durch H. Rentsch. Die zur gleichen Zeit begonnenen glaziologischen Arbeiten wurden 1968 durch Registrierungen der meteorologischen Größen Wind, Temperatur und Feuchte während der Ablationsperiode an einer in 3075 m NN gelegenen Station ergänzt und ab 1970 durch Registrierung des Niederschlags im Gletschervorfeld erweitert. Die aktuellen Bemühungen gelten der Errichtung einer Abflußmeßstation an einer dafür besonders geeigneten Stelle des Vernagtbaches. Sporadische Einzelmessungen des Abflusses nach der Farbverdünnungsmethode mit Rhodamin WT als Tracersubstanz (Behrens 1971) werden vom Physikalischen Institut der Universität Innsbruck betreut. Sie stehen im Zusammenhang mit einem glazial-hydrologischen Forschungsprogramm im Rofental (Behrens *et al.* 1971). Über die 1966 und 1967 durchgeführten refraktionsseismischen Untersuchungen wird an anderer Stelle dieses Bandes berichtet (Miller 1972).

3. ZUR METHODIK DER MASSENHAUSHALTSBESTIMMUNG

Die Massenhaushaltsermittlung nach der glaziologischen Methode sowie die ihr zugrundeliegenden Begriffe, die zunächst von M. Meier (1962) genauer definiert worden waren, erfuhren ebenfalls eine ausführliche und kritische Darstellung von H. Hoinkes (1970). Die gelegentlich anzutreffenden Schwierigkeiten im Verständnis der Definitionsgrößen entfallen, wenn man unmittelbar von der Messung ausgeht. Meßgröße ist der an verschiedenen Stellen der Gletscheroberfläche gemessene Betrag der spezifischen Massenbilanz b , angegeben in cm Wasseräquivalent (= Gramm/cm²). Die Integration der Meßgröße $b = \int_t \dot{b} dt$, die selbst das Zeitintegral über alle auf die

Flächeneinheit bezogenen Massenänderungen $\dot{b} = \frac{db}{dt}$ in einem noch zu definierenden Zeitintervall darstellt, über die gesamte Gletscherfläche S ergibt dann die gewünschte Massenbilanz B des Gletschers. Sie ist somit definiert durch das Doppelintegral:

$$B = \int_S \int_t \dot{b} dt dS$$

Das Vorzeichen von b kann negativ oder positiv sein, je nachdem, ob ein Massenverlust, bewirkt nahezu ausschließlich durch Schmelzung mit nachfolgendem Abfluß und Verdunstung oder ein Massenzuwachs durch Ablagerung von Niederschlag oder Aufeisbildung für den betreffenden Punkt des Gletschers resultiert. Zur Vereinfachung soll weiterhin folgende Bezeichnungsweise angewandt werden: negative Werte von b werden mit Ablation a bezeichnet, der Bereich auf dem Gletscher mit negativen b -Werten mit Ablationsgebiet S_a und die Dauer des Auftretens von negativen b -Werten mit Ablationsperiode. Positive b -Werte werden als Akkumulation c bezeichnet, der Bereich auf dem Gletscher, in dem die b -Werte positives Vorzeichen haben, wird entsprechend Akkumulationsgebiet S_c genannt und die Zeit des Auftretens überwiegend positiver b -Werte Akkumulationsperiode. Es ist jedoch äußerst wichtig, zu beachten, daß es sich hier nur um die Vereinbarung einer Terminologie handelt, nicht aber um Definitionen. Die Definitionen dieser Größen, wie sie allgemein verbindlich im Technical Paper in Hydrology No. 5 (UNESCO/IASH 1970 B) enthalten sind, entsprechen somit nicht der hier gebrauchten Bezeichnungsweise von Ablation und Akkumulation. Indessen sind die beiden Größen gemäß ihrer exakten Definition auf die Praxis der Haushaltsbestimmung kaum anwendbar, da die getrennte Erfassung aller ablativen und akkumulativen Vorgänge in ihrer tagesperiodischen und jahreszeitlichen Schwankung sowie der witterungsbedingten Variabilität kaum möglich ist. Als Folge resultiert eine mit der Dauer der Meßperiode, d. h. dem Zeitintervall zwischen zwei Messungen zunehmende Diskrepanz zwischen

der gemessenen Ablation bzw. Akkumulation und deren tatsächlichen Beträgen, wie dies von H. Hoinkes (1970) bereits deutlich gemacht wurde.

a) DIE ZEITLICHE INTEGRATION

Die Integration über alle ablativen und akkumulativen Vorgänge zur Ermittlung der spezifischen Massenbilanz b an einem Punkt des Gletschers für ein bestimmtes Zeitintervall erfolgt unmittelbar durch die Feststellung des Änderungsbetrages (=Netto-betrag), von der jeweils zu Beginn und zum Ende des Zeitabschnittes ausgeführten Messung. Die Summierung über die Zeit reduziert sich damit auf die Festlegung der Meßperiode, für welche der Massenhaushalt angegeben werden soll.

Die Massenhaushaltsuntersuchungen am Vernagtferner sind generell auf das Haushaltsjahr als Meßperiode bezogen. Eine weitergehende Unterteilung, vor allem in Sommer- und Winterbilanz, ist, abgesehen von den prinzipiellen Schwierigkeiten, denen die Ermittlung dieser Teilhaushalte begegnet, wegen der Vervielfachung des dafür erforderlichen Bedarfs an Feldarbeiten nicht möglich. Die Feststellung der Winterakkumulation, wie sie regelmäßig gegen Ende April vorgenommen wird, kann aus Gründen, die von H. Hoinkes (1970) ausführlich dargelegt wurden, nicht als Ermittlung der Winterbilanz gelten.

Von den beiden Möglichkeiten der Definition des Haushaltsjahres (UNESCO/IASH 1970B), nämlich durch das „stratigraphic system“, wonach die Grenzen des Haushaltsjahres durch die stratigraphischen Merkmale der spätsommerlichen Oberflächenschicht im Akkumulationsgebiet des Gletschers festgelegt werden und in diesem Fall das Haushaltsjahr deshalb als „natürliches Haushaltsjahr“ bezeichnet wird oder das „fixed date system“, in welchem Beginn und Ende des Haushaltsjahres einem festen Datum zugeordnet sind, wird die letztere angewandt.

Mit dem „festen Haushaltsjahr t_f “, das analog dem hydrologischen Jahr mit dem 1. Oktober beginnt und entsprechend mit dem 30. September endet, werden weiterhin folgende Bezeichnungen vereinbart: der Jahreswert b_n , definiert durch das Integral

$$b_n = \int_{t_f}^{\cdot} \dot{b} \, dt$$

wird spezifische Netto-Bilanz genannt, die Integration dieser Größe für

die gesamte Fläche des Gletschers S ergibt den Netto-Massenhaushalt B_n , die Summierung über das Ablationsgebiet S_a liefert die Nettoablation B_a und entsprechend gilt als Nettoakkumulation B_c der analoge Wert, bezogen auf das Akkumulationsgebiet S_c .

Es sei an dieser Stelle abermals auf die ausführliche Diskussion dieser Fragen durch H. Hoinkes (1970) verwiesen, der in diesem Zusammenhang die Anwendung des festen Haushaltsjahres für die Massenhaushaltsuntersuchungen am Hintereisferner begründet. Durch ein erweitertes System von Definitionen und die Einführung zusätzlicher Begriffe wurde inzwischen das bekannte Schema der Massenhaushaltsfunktionen so ergänzt, daß die Beziehung zwischen den beiden unterschiedlich definierten Haushaltsjahren hergestellt werden kann (Mayo *et al.* 1972). Die starke Abstraktion der natürlichen Gegebenheiten, die diesem erweiterten Schema zugrunde liegt, läßt dessen praktische Anwendung wenig aussichtsreich erscheinen.

Für die Arbeiten am Vernagtferner kommt zu den beiden wesentlichen Argumenten, die für das „fixed date system“ anzuführen sind, nämlich der eindeutigen und einheitlichen Definition der zeitlichen Integrationsgrenzen für die Massenbilanz des Gesamtgletschers und der rationelleren Gestaltung der Feldarbeiten als weiterer Gesichtspunkt hinzu, daß es aus Gründen der Vergleichbarkeit nicht sinnvoll wäre,

in einem dem Hintereiserner eng benachbarten Arbeitsgebiet gleichartige, jedoch auf unterschiedlichen Systemen basierende Untersuchungen auszuführen. Dies gilt umso mehr, als die Massenhaushaltsuntersuchungen vom Vernagtferner und deren Ergebnisse einem übergeordneten Forschungsprogramm, der Erfassung des Wasserhaushaltes eines stark vergletscherten Einzugsgebietes, hier definiert durch den Pegel Vent in der Rofenache (Hoinkes 1959) sowie dem glazial-meteorologisch-hydrologischen Forschungsprogramm im Rofental während der Internationalen Hydrologischen Dekade (Hoinkes 1970a) eingeordnet sind.

In Jahren mit stark defizitären Massenbilanzen sind die Überlegungen, die sich an die unterschiedlichen Definitionen des Haushaltsjahres knüpfen, zumeist weniger bedeutsam. Die Ablationsperiode reicht in diesen Fällen bis weit in den Herbst hinein und die verschmutzte Oberflächenschicht, die den Bezugshorizont im „stratigraphic system“ bildet, entspricht allgemein auch der Oberfläche am Ende des hydrologischen Jahres, das mit den im „fixed date system“ festgelegten Jahresgrenzen identisch ist. Geringfügige zeitliche Verschiebungen des Endes der Ablationsperiode gegenüber dem Ende des festen Haushaltsjahres sind von geringer Bedeutung, da die täglichen Ablationsbeträge zu dieser Zeit nahezu vernachlässigbar klein sind.

Weist der Gletscher zu Beginn des neuen Haushaltsjahres nach dem „fixed date system“ bereits eine merkliche Neuschneeauflage auf, die durch keine deutliche Schichtgrenze von den nachfolgenden Winterschneeschnitten getrennt ist und somit keine Einordnung des Jahresbeginns vom 1. Oktober in die stratigraphische Schichtabfolge ermöglicht, ist dieses System dem stratigraphischen in gewisser Hinsicht unterlegen. Hierzu ist zweierlei anzufügen: Zunächst ist die auftretende Abweichung in den Akkumulationsbeträgen relativ gering, denn die zu berücksichtigende Neuschneeauflage vom Herbst des Vorjahres ist allgemein klein gegen den Akkumulationsbetrag, der aus den winterlichen bis frühsummerlichen Schneeeablagerungen resultiert. Zum anderen ist es mit einfachen Mitteln möglich, diesen Mangel des Systems zu beseitigen. In der Praxis wird dabei so verfahren, daß der Wasserwert des Neuschnees, der sich über der als Bezugshorizont dienenden sommerlichen Oberflächenschicht befand, bei der im folgenden Jahr an gleicher Stelle durchgeführten Schneeprofilmessung als Korrekturwert vom Gesamtwasserwert abgesetzt wird. Die Schneeprofilmessungen am Vernagtferner zeigten jedoch, daß die Berücksichtigung des vollen Betrages des Wasserwertes der herbstlichen Neuschneeauflage als Korrektur nicht in jedem Fall zutreffend ist. Vielmehr wird offensichtlich durch Schmelzprozesse in der Schneedecke auch ein Teil der Neuschneeschnitte abgebaut, so daß die Neuschneekorrektur entsprechend zu reduzieren ist. Diese Reduzierung wird im Gebiet des Vernagtfernens mit Hilfe von Markierungen der Schneeoberfläche an mehreren Stellen des Gletschers gewonnen. Die eingefärbten Stellen selbst sind durch Anschluß an die Akkumulationspegel festgelegt.

b) DIE FLÄCHENMÄSSIGE INTEGRATION

Um den Massenhaushalt gemäß der Definitionsgleichung bestimmen zu können, ist es erforderlich, die Messung der spezifischen Massenbilanz b an beliebig vielen Punkten des Gletschers vorzunehmen. Diese Forderung ist nicht erfüllbar. Für den Vernagtferner stellt sich die Frage vielmehr in der Form, welcher Mindestaufwand erforderlich ist, um den Massenhaushalt dieses Gletschers mit ausreichender Genauigkeit angeben zu können. Im folgenden werden die angewandten Verfahren zur Ermittlung der Flächenwerte näher erläutert.

Die Bestimmung der Flächenwerte des Massenhaushaltes des Vernagtferners erfolgt nach dem als Flächenmethode (Kasser 1967) bezeichneten Verfahren. Die wichtigsten Schritte zur Erlangung der Flächenwerte sind nachfolgend zusammengefaßt:

1. Messung von b an einer ausreichenden Zahl von Punkten auf dem Gletscher sowie Kartierung der auf dem Gletscher erkennbaren Linien für spezielle Werte von b , nämlich $b = 0$ (Gleichgewichtslinie) und $b_{\text{Eis}} = 0$.
2. Übertragung der Meßwerte und der Grenzlinien in eine großmaßstäbliche möglichst aktuelle Gletscherkarte und Analyse von Bereichen auf der Karte, für welche der spezifische Massenhaushalt b innerhalb gewisser Intervalle bleibt, gleichbedeutend mit dem Zeichnen von Isolinien des Massenhaushaltes für konkrete Werte von b .
3. Planimetrische Auswertung dieser durch Isolinien des Massenhaushaltes bzw. durch den Gletscherrand abgegrenzten Bereiche für feste Höhenintervalle und nachfolgend die rechnerische Ermittlung der Haushaltsbeträge unter Berücksichtigung von Maßstabsfaktoren und Planimeterkorrekturen.

Die einzelnen Punkte bedürfen noch einiger Erläuterungen:

Die Messung der spezifischen Massenbilanz erfolgt im Ablationsgebiet mit Hilfe von Ablationspegeln. Als solche werden Rundholzstangen von 20 mm Durchmesser verwendet, die aus Elementen von jeweils 2 m Länge flexibel zusammengefügt sind. Mit dem Dampfbohrer nach F. Howorka (1965) werden die Pegelstangen zwischen 4 und 8 m tief in das Eis eingebohrt, je nach den entsprechend der Höhenlage auf dem Gletscher zu erwartenden Ablationsbeträgen. Die Pegel selbst tragen eine Markierung, die sie als wissenschaftliche Meßeinrichtung ausweisen, nachdem sie gelegentlich als Wegmarkierung mißverstanden wurden. Die Markierung ist zusätzlich mit einer Bezifferung versehen.

Die Umrechnung des als Längenzunahme in cm des freien Endes der Pegelstange gemessenen Abschmelzbetrages in den entsprechenden Wasserwert erfolgt mit einem angenommenen Dichtewert von 0.9 g/cm^3 . Die Verwendung eines genauer bestimmten Dichtewertes, etwa des von W. Ambach (1956) angegebenen Wertes von 0.89 g/cm^3 , erscheint der begrenzten Ablesegenauigkeit der Pegel nicht angemessen.

Das Pegelnetz hat einer Reihe von z. T. einander widersprechenden Forderungen zu genügen. So muß das Pegelnetz ausreichend dicht sein, um zuverlässige Flächenwerte der Ablation bestimmen zu können. Um den Wartungsaufwand zu beschränken, sollten Pegel jedoch nur in der notwendigen Anzahl gesetzt werden. Die Pegel müssen, um einer idealen Verteilung nahe zu kommen, möglichst gleichmäßig über das Ablationsgebiet verteilt sein. Aus Sicherheitsgründen sind jedoch schwer zugängliche Spaltengebiete oder abgelegene Randzonen weniger dicht mit Pegeln besetzt als andere gut zugängliche Bereiche. Da schließlich aus der wiederholten Vermessung der Pegelpositionen Werte der Oberflächengeschwindigkeit abgeleitet werden, ist die Anordnung der Pegel auf dem Vernagtferner nicht ausschließlich unter dem Gesichtspunkt möglichst repräsentativer Ablationsmessungen erfolgt, sondern als Kompromiß von Ablations- und Geschwindigkeitsmessungen gesehen worden. Entsprechend sind die Pegelpunkte teils unregelmäßig verteilt, teils in (Quer-) Profilen angeordnet. Zur Ablationsmessung weist die Karte des Vernagtferners von 1969 (vgl. Anlage 1 dieses Bandes) insgesamt 53 Pegel aus, nachdem die Untersuchungen 1965 zunächst mit einem 37 Pegel umfassenden Netz begonnen wurden. Die Reduktion dieser Pegelzahlen auf eine mittlere Pegeldichte ist zwar möglich, die

Angabe ist jedoch wenig repräsentativ und nicht geeignet, eine Beurteilung der Güte der ermittelten flächenhaften Ablationsbeträge zu ermöglichen. Die erforderliche Mindestzahl von Pegeln wird wesentlich vom Relief der Gletscheroberfläche und dessen Gliederung in Groß- und Kleinformen bestimmt. Besonders im Fall eines ausgeprägten Kleinreliefs durch starke Wellungen und Zerfurchungen der Gletscheroberfläche können erhebliche Diskrepanzen zwischen der mit Pegeln gemessenen und auf die Grundrißfläche des Gletschers bezogenen Ablation und der aus Abflußdaten gewonnenen Menge der Abschmelzung resultieren (Kasser pers. Mitteilung).

Die Kenntnis der genauen Position der Meßpunkte von Ablation und Akkumulation zu deren Eintragung in die entsprechende Karte, die als Arbeitsgrundlage unerlässlich ist, bedeutet eine der Voraussetzungen für die flächenmäßige Analyse der Haushaltswerte. Die Bestimmung der Standpunkte der Ablationspegel wird jährlich gegen Ende des Sommers vorgenommen, obgleich die Versetzung der Pegel durch die Fließbewegung des Eises in Bezug auf die Änderung der Ablation entlang der Bahnelemente bei den geringen Fließgeschwindigkeiten des Vernagtferners allgemein vernachlässigbar ist. (Die bisher beobachteten Maximalwerte der Eisbewegung erreichen in einem Querprofil zwischen Signal Untergrasl und Gletschermitte 24 m/Jahr.) Indessen dienen diese Pegelvermessungen, die jeweils von 3 Punkten der Felsumrahmung oder von Felsinseln im Gletscherbereich durch Vorwärtseinschnitte vorgenommen werden, wie schon erwähnt, zusätzlich der Ermittlung von Oberflächengeschwindigkeiten. Die Standpunkte für die Pegelvermessung sind in der Karte des Vernagtferners 1969 enthalten.

Etwas unsicherer war die Fixierung der Positionen der Schneeschächte, die zur Rücklagenbestimmung dienten. Deren Lage auf dem Gletscher wurde zumeist nur durch einfache Kompaßvisuren ermittelt. Wenn auch wegen der, verglichen mit den Ablationsbeträgen, allgemein geringeren Änderung der Akkumulationsbeträge die Bestimmung der Meßstelle nicht mit der gleichen Genauigkeit zu erfolgen brauchte wie im Falle der Ablationspegel, so erwies sich diese Art der Lagebestimmung doch als zu ungenau. Vor allem entfiel sie bei Wetterbedingungen ohne entsprechende Sichtverhältnisse völlig. Ein weiterer Mangel war der fehlender exakter Vergleichbarkeit der Rücklagenwerte verschiedener Jahre, wenn die Messungen nicht innerhalb eines begrenzten lokalen Bereichs wiederholt wurden. So wurden im Sommer 1967 zusätzlich 10 Firnpegel gesetzt, die aus Alurohren von 80 mm Durchmesser bestehen und jeweils um 2-m-Elemente verlängert werden können. Die Positionen von 1969 sind ebenfalls in die Karte des Vernagtferners 1969 eingetragen. Sie ermöglichen es, die Ermittlung von Fließgeschwindigkeiten bis in das Firngebiet auszudehnen.

Die Kartierung der Linien, die die Bereiche mit Eis- und gegebenenfalls Firnablation abgrenzen, ermöglichen die terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen des Vernagtferners von gletschernah angelegten Standlinien. Photographische Aufnahmen alleine vermögen diesem Zweck nicht zu genügen, hingegen helfen Luftbilder oft noch, die terrestrischen Aufnahmen mit größerer Sicherheit zu interpretieren, besonders bei einer Vielzahl von angeschnittenen Schichtabfolgen im Bereich der Firnablation, wie sie im Ausschnitt des Orthophotoplanes vom Vernagtferner 1969 (Rüd. Finsterwalder 1972) erkennbar sind. Die Erfahrung indessen hat gelehrt, die photogrammetrischen Aufnahmen relativ früh zu erstellen und nicht bis zum Ende der Ablationsperiode bzw. des Haushaltsjahres zu warten, da das Risiko des Verlustes

dieser Information durch einen herbstlichen Neuschneefall in keinem Verhältnis zu dem Gewinn steht, der aus der Kenntnis der exakten Lage der Grenzlinien resultiert. Dies gilt umso mehr, als sich die Lage dieser Grenzen nach dem Abklingen der hoch- und spätsommerlichen Ablationsbedingungen zumeist nur mehr geringfügig verändert. Charakteristisch für den Vernagtferner ist das Verbleiben eines weitgehend zusammenhängenden, wenn auch stark mäandrierenden Verlaufs der Grenzlinien, wie dies in der Vernagtkarte 1969 erkennbar ist. Daneben treten in stets wiederkehrender Folge Aperstellen in verschiedenen Zonen des Firnbeckens auf, deren Ausdehnung je nach der Intensität der Ablation variiert, deren Form und Anordnung sich jedoch als konservative Eigenschaften erweisen. Diese Erhaltung von Aper- und Rücklagenfiguren entspricht weitgehend analogen Beobachtungen an anderen Gletschern, so am Hintereisferner (Hoinkes und Lang 1962) und Stubacher Sonnblickkees, wo sie von H. Slupetzky (1971) wiederholt kartiert und analysiert wurden. Am Kesselwandferner wurden von H. Queck (1966) die „Gesetzmäßigkeiten“ in der Rücklagenverteilung benutzt, um mit Hilfe von Schneeprofilmessungen über mehrere Jahresschichten fehlende Haushaltswerte zu interpolieren. (Es scheint indessen sinnvoller, in diesem Zusammenhang von einer Regelmäßigkeit statt von einer Gesetzmäßigkeit zu sprechen, als welche sowohl H. Queck als auch H. Slupetzky den Zusammenhang zwischen der Art der Ausaperung und der Topographie der Gletscheroberfläche sehen.) Es sei hier noch bemerkt, daß die Bezeichnung „glaziologische Methode“ primär als die Definition eines Verfahrens zur Haushaltsermittlung zu betrachten ist. Die praktische Durchführung der erforderlichen Feldarbeiten schließt einen beachtlichen Teil geodätischer Messungen ein.

Mit den in die Karte eingetragenen Meßwerten und Grenzlinien können Isolinien des spezifischen Massenhaushaltes für konkrete Werte von b konstruiert und damit die Gesamtfläche des Gletschers in Einzelflächen konstanten mittleren spezifischen Massenhaushalts unterteilt werden. Im Ablationsgebiet erfolgt dabei die Zeichnung von Isolinien von 50 zu 50 cm Wasserwert. Als Flächenmittel wird der arithmetische Mittelwert der beiden begrenzenden Isolinienwerte verwendet. Analog wird im Akkumulationsgebiet verfahren. Der Abstand der Isolinien von b beträgt hier jedoch nur 20 cm Wasserwert. Die Beibehaltung des gleichen Isolinienabstandes wie im Ablationsgebiet würde hier zu einer unzulässig groben Erfassung der Akkumulationsverteilung führen, selbst bei der im Vergleich zu den Ablationsmessungen sehr geringen Zahl von Rücklagenbestimmungen.

4. ERGEBNISSE

Die abschließend bearbeiteten Massenhaushalte der Jahre 1965/66 bis 1967/68 gestatten noch keine verallgemeinernden Aussagen. Als wichtiges Ergebnis kann jedoch vorweggenommen werden, daß mit den beiden positiven Haushalten von 1965/66 und 1967/68 sowie dem etwa ausgeglichenen Haushalt von 1966/67, die zusammen mit dem ebenfalls deutlich positiv anzunehmenden Haushalt des Vernagtferners für 1964/65 die markanteste Unterbrechung des seit langem bestehenden Trends mehr oder minder starker Massenverluste darstellen, eine Ausnahmesituation erfaßt wurde.

Für Massenhaushaltsuntersuchungen bedeutet es allerdings eine besondere Erschwerung, die Arbeiten mit einem positiven Haushalt beginnen zu müssen. Die Rücklagenverteilung kann in diesem Fall nur aus den Schneeprofilmessungen ermittelt werden,

ohne die Struktur der Rücklagenmuster bzw. der Ausaperungsverhältnisse als Hilfsinformation verwerten zu können. Mit zunehmender Erfahrung und speziell mit der Kenntnis der Rücklagenverteilung des ersten deutlich negativ bestimmten Massenhaushaltes von 1968/69 ergab sich die Notwendigkeit, die früheren Analysen (Queck 1967) zu überarbeiten. In Tab. 1 sind die negativen (Nettoablation) und positiven (Nettoakkumulation) Anteile der Massenbilanz und deren Summenwerte (Netto-Massenhaushalt) sowie die zugehörigen Flächenwerte und spezifischen Werte enthalten.

Tabelle 1: Die Massenbilanz des Vernagtferners für die Jahre 1965/66 bis 1967/68

	1965/66	1966/67	1967/68
Nettoablation			
Fläche 10^3 m^2	584,7	2813,9	1374,3
Betrag 10^3 m^3	- 740,4	- 1957,6	- 1157,8
Spez. Wert g/cm^2	- 126,6	- 69,6	- 84,2
Nettoakkumulation			
Fläche 10^3 m^2	8968,5	6717,1	8147,7
Betrag 10^3 m^3	+ 9649,7	+ 2746,7	+ 4028,3
Spez. Wert g/cm^2	+ 107,6	+ 40,9	+ 49,4
Netto-Massenbilanz			
Fläche 10^3 m^2	9553,2	9522,0	9522,0
Betrag 10^3 m^3	+ 8909,3	+ 789,1	+ 2870,5
Spez. Wert g/cm^2	+ 93,3	+ 8,3	+ 30,1
Mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie m über NN			
	2935	3015	2995
Flächenverhältnisse			
S_c/S	0,94	0,71	0,86
S_c/S_a	15,34	2,39	5,93

Für den Vernagtferner resultiert aus den drei angeführten Haushalten ein Massengewinn von $12,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ Wasser, entsprechend einem spezifischen Wert von $135 \text{ g}/\text{cm}^2$. Setzt man die aktuelle Gesamtmasse des Vernagtferners auf Grund der Volumensbestimmung von Miller (1971) mit rund $500 \times 10^6 \text{ m}^3$ Wasser an, so entspricht der Massengewinn dieser drei Haushalte einem Zuwachs von 2,5% der Gesamtmasse. Der für die gleichen Jahre summierte Nettomassengewinn des Hintereisferners (nach Hoinkes 1970) erreicht mit $6,34 \times 10^6 \text{ m}^3$ nur den halben Betrag. Die Abb. 1 zeigt den Vergleich der mittleren spezifischen Ablation und Akkumulation sowie der spezifischen Bilanz vom Vernagtferner mit dem ca. 9 km^2 großen Hintereisferner, dessen mittlere Höhe 100 m geringer als die des Vernagtferners ist, und dem ca. 3 km^2 großen Langtalerferner, der im Mittel fast 300 m weniger hoch liegt. Diese beiden Ferner repräsentieren typische Talgletscher mit einem hoch gelegenen, relativ kleinen Firngebiet und einer schmalen, langgestreckten und weit herabreichenden Gletscherzunge. Die systematischen Unterschiede zwischen den einzelnen Gletschern, besonders für 1966/67 und 1967/68, werden weitgehend aus der verschiedenen Flächen-Höhenverteilung, wie sie in Abb. 2 durch die hypsometrischen Kurven für diese

Gletscher wiedergegeben ist, verständlich. Zusätzlich sind in Abb. 2 die Höhen der Gleichgewichtslinien der betrachteten Jahre markiert.

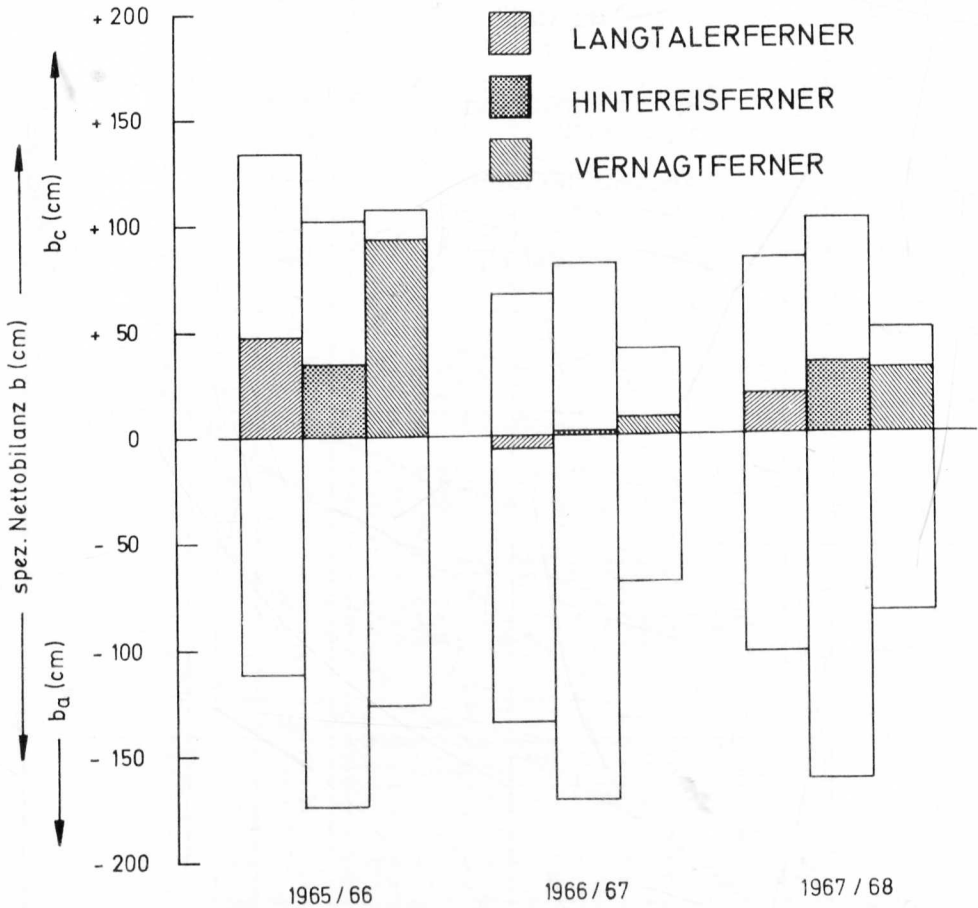


Abbildung 1: Vergleich der mittleren spezifischen Werte von Nettoablation, Nettoakkumulation und Nettobilanz (cm Wasser) für den Langtaler-, Hintereis- und Vernagtferner für die Haushaltsjahre 1965/66–1967/68.

Während sich die Flächen von Hintereis- und Langtalerferner relativ gleichmäßig über ein großes Höhenintervall verteilen, bestimmen für den Vernagtferner die großen Verebnungsflächen im mittleren Höhenniveau die Form der hypsometrischen Kurve. Auf das Höhenintervall 3000–3200 m NN entfallen bereits 50% der Gesamtfläche, 65% liegen im Bereich 2900–3200 m NN, dem Intervall, in welchem allgemein die Höhenlage der Gleichgewichtslinie variiert.

Für den Massenhaushalt ergeben sich aus dieser Situation bestimmte Konsequenzen: Schon einer geringfügigen Höhenverlagerung der Gleichgewichtslinie kommt beim Vernagtferner ein großes Gewicht bezüglich der Verschiebung des Verhältnisses von

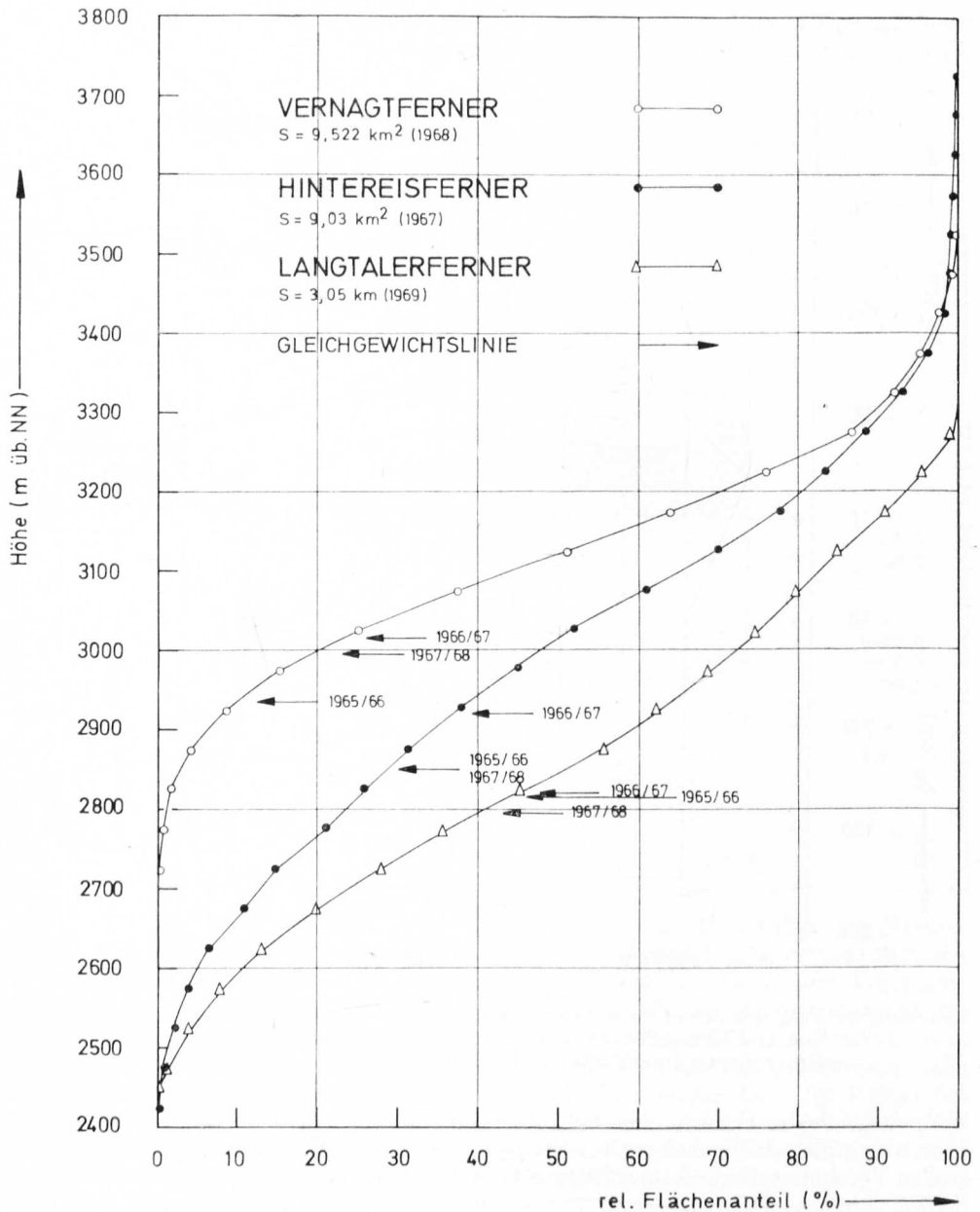


Abbildung 2: Verteilung der Flächenanteile von Vernagt-, Hintereis- und Langtalerferner für sukzessive Inkremente von 50 Höhenmetern, dargestellt durch die Summenkurven der Relativwerte. Die eingetragenen Pfeile markieren die mittleren Höhen der Gleichgewichtslinien der Massenhaushalte für den betreffenden Gletscher in den angegebenen Jahren.

Tabelle 2: Flächenanteile, Anteile der Massenbilanz und Werte der spezifischen Massenbilanz für Höhenstufen von 50 m, bezogen auf die Schichtlinienpläne des Vernagtferners von 1966 und 1968.

Höhenstufe	1965/66			1966/67			1967/68		
	S 10 ³ m ²	B 10 ³ m ³	b g/cm ²	S 10 ³ m ²	B 10 ³ m ³	b g/cm ²	S 10 ³ m ²	B 10 ³ m ³	b g/cm ²
> 2750	23,5	—	-323,4	16,0	—	-56,7	16,0	—	-47,6
2750-2800	57,6	—	-267,0	54,0	—	-154,4	54,0	—	-129,5
2800-2850	112,3	—	-161,0	106,5	—	-244,2	106,5	—	-216,5
2850-2900	240,5	—	-71,8	230,8	—	-392,5	230,8	—	-258,5
2900-2950	417,7	—	-10,7	404,7	—	-484,8	404,7	—	-290,6
2950-3000	648,6	—	-36,9	653,8	—	-254,3	653,8	—	-107,4
3000-3050	919,0	—	-74,2	922,0	—	-66,6	922,0	—	-253,4
3050-3100	1194,9	—	-95,7	1169,8	—	-167,7	1169,8	—	-483,5
3100-3150	1291,8	—	-112,3	1323,7	—	-414,6	1323,7	—	-644,7
3150-3200	1306,7	—	-115,8	1214,9	—	-397,5	1214,9	—	-670,5
3200-3250	1102,7	—	-120,4	1146,9	—	-500,1	1146,9	—	-669,0
3250-3300	979,8	—	-1248,3	1017,6	—	-473,7	1017,6	—	-651,6
3300-3350	515,8	—	-128,6	515,6	—	-158,6	515,6	—	-232,6
3350-3400	289,1	—	-152,2	300,8	—	-42,5	300,8	—	-97,7
3400-3450	237,7	—	-158,3	236,5	—	-58,0	236,5	—	-104,6
3450-3500	169,7	—	-212,8	155,4	—	-87,0	155,4	—	-93,0
3500-3550	35,2	—	-193,5	40,8	—	-9,7	40,8	—	-16,3
3550-3600	7,3	—	-152,0	6,7	—	-0,1	6,7	—	-2,0
3600 <	3,3	—	-109,1	5,5	—	-0,1	5,5	—	-1,7
	9553,2	+ 8909,3	+ 93,3	9522,0	+ 789,1	+ 8,3	9522,0	+ 2870,5	+ 30,1

Akkumulations- zu Ablationsgebiet zu. Da die Bilanzwerte im Bereich der Gleichgewichtslinie im allgemeinen klein sind, die Flächenanteile in der Höhenlage der Gleichgewichtslinie aber dominieren, sind für den Vernagtferner relativ niedrige Werte der spezifischen Nettoablation und -akkumulation zu erwarten.

Der in Abb. 1 dargestellte Vergleich dieser Werte scheint die letztere Annahme mit Ausnahme des Jahres 1965/66 zu bestätigen. In den beiden übrigen Jahren sind die spezifischen Werte des Vernagtferners jeweils kleiner als die der anderen Gletscher, die spezifische Bilanz entspricht etwa der des Hintereisferners. Wegen der größeren mittleren Höhenlage des Vernagtferners würde dies einem stärker defizitären Verhalten dieses Gletschers entsprechen. Die Verhältnisse von 1965/66 sind ebenfalls aus der Flächenverteilung erklärbar. Bei einer Höhe der Gleichgewichtslinie von nur 2935 m NN beschränkt sich das Ablationsgebiet auf den Zungenbereich mit relativ hohen Ablationswerten. Mit mehr als 90% der Gletscherfläche erreicht das Akkumulationsgebiet dagegen eine extreme Ausdehnung. Als Folge davon unterscheidet sich die spezifische Bilanz dieses Jahres nur wenig von der spezifischen Nettoakkumulation. Auffallend ist der relativ niedrige Betrag der spezifischen Nettoakkumulation und Nettobilanz dieses Jahres für den Hintereisferner. Diese Werte stellen auch in der längeren Vergleichsreihe von Hintereis- und Langtalerferner die markanteste Abweichung von der mittleren Relation der Massenhaushalte beider Gletscher dar. Die in Tabelle 1 angegebenen Werte der Flächenverhältnisse S_c/S und S_c/S_a zeigen für den annähernd ausgeglichenen Haushalt von 1966/67 den Wert von 0.71 bzw. 2.39 und sind damit den bei anderen Gletschern gefundenen Werten für ausgeglichene Bilanzen sehr ähnlich (Hoinkes 1970), doch wachsen die Werte der Flächenverhältnisse für positive Bilanzwerte wesentlich stärker an als z. B. für den benachbarten Hintereisferner.

Der Versuch, die Flächenverhältnisse S_c/S und S_c/S_a sowie die mittlere Höhe der Gleichgewichtslinie als für den Massenhaushalt eines Jahres charakteristische Größen zur Parametrisierung bei der Haushaltsermittlung eines Gletschers zu benutzen, geht von der Annahme der Erhaltung der Beziehung von spezifischer Bilanz in Abhängigkeit von der Höhe aus, unabhängig von der mittleren spezifischen Bilanz. Für die vorliegenden Haushalte enthält Tabelle 2 die Werte der Flächenanteile für Höheninkremente von je 50 m sowie die absoluten und spezifischen Bilanzwerte für diese Bereiche. Die Ergebnisse des Jahres 1966/67 sind in Abb. 3 dargestellt, wobei die Flächenanteile mit Firn- bzw. Eisablation besonders gekennzeichnet sind. Die zugehörige Analyse des Massenhaushaltes von 1966/67 zeigt Abb. 4.

Charakteristisch für die Höhenabhängigkeit der spezifischen Bilanz im Ablationsgebiet in den drei Jahren ist ein etwa linearer Gradient von b , der 117.4 cm/100 m für den ausgeglichenen Haushalt 1966/67 beträgt und für die beiden übrigen Jahre bei 105.4 cm/100 m (1967/68) bzw. 139.3 cm/100 m (1965/66) liegt. Diese Gradienten entsprechen analogen Werten von anderen Gletschern (vgl. Hoinkes 1970). Im Akkumulationsbereich zeigt die spezifische Bilanz allgemein wesentlich geringere Änderungen mit der Höhe oder völlige Höhenunabhängigkeit. Bezieht man die Änderungen in diesem Bereich z. B. auf das von H. Hoinkes (1970) gebrauchte Intervall 3100 bis 3350 m NN, so tritt nur 1965/66 ein positiver Gradient von 8 cm/100 m auf. In den beiden anderen Jahren ist der über dieses Höhenintervall resultierende Änderungsbetrag gleich Null. Im Bereich 3350–3450 m NN tritt eine leichte Abnahme der spezifischen Akkumulation auf. Sie ist bedingt durch die regelmäßig schneefrei werdenden Steilhänge unter der Hochvernagtspitze und dem Hinteren Brochkogel,

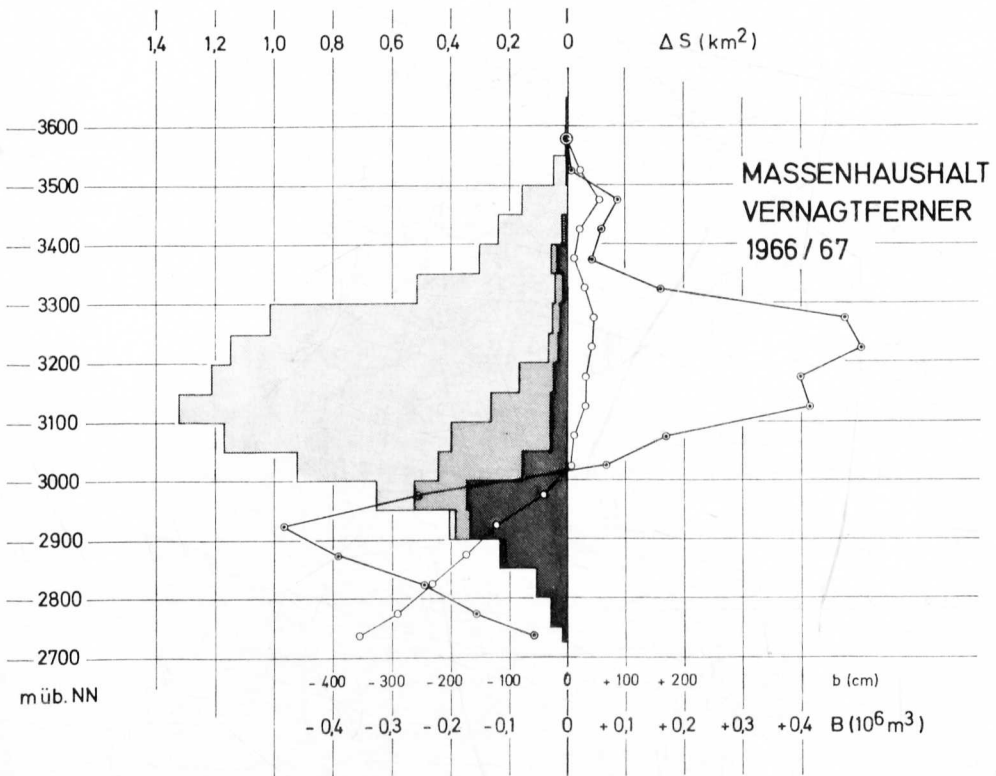


Abbildung 3: Netto-Massenbilanz (in Mill. m^3 Wasser), spezifische Nettobilanz (in cm Wasser) und Flächenwerte (in km^2) des Vernagtferners für den ausgeglichenen Haushalt 1966/67, dargestellt als Funktion der Höhe durch Mittelwerte für Höhenintervalle von je 50 m. Die Flächenanteile mit Akkumulation, Firn- bzw. Eisablation in den einzelnen Höhenbereichen sind durch feine, mittlere bzw. grobe Rasterung kenntlich gemacht. Die für den Massenhaushalt maßgebliche Bedeutung des Höhenintervalls 3000–3300 m NN kommt in der Darstellung deutlich zum Ausdruck.

während darüber die relativ hohen Rücklagenbeträge auf dem der Hochvernagtspitze vorgelagerten Plateau die spezifische Akkumulation nochmals etwas anwachsen lassen (vgl. Abb. 4).

Die hier festgestellten Merkmale der Höhenverteilung der spezifischen Nettobilanz lassen für den Vernagtferner ebenfalls einen deutlichen Zusammenhang von mittlerer spezifischer Massenbilanz, der mittleren Höhe der Gleichgewichtslinie sowie den damit verknüpften Flächenverhältnissen S_c/S und S_c/S_a erwarten. Zu dessen genauerer Bestimmung bedarf es indessen der intensiven Fortsetzung der Bemühungen, über deren Anfänge hier berichtet wurde. Die bisherigen Kenntnisse der Relation von Gleichgewichtshöhe und Massenbilanz sind jedoch ausreichend, um feststellen zu können, daß die drei Folgejahre negative Massenbilanzen aufweisen, wobei der Haushalt 1970/71 der am stärksten negative ist und der von 1969/70 den geringsten

NETTO-HAUSHALT
VERNAGTFERNER 1966 / 67

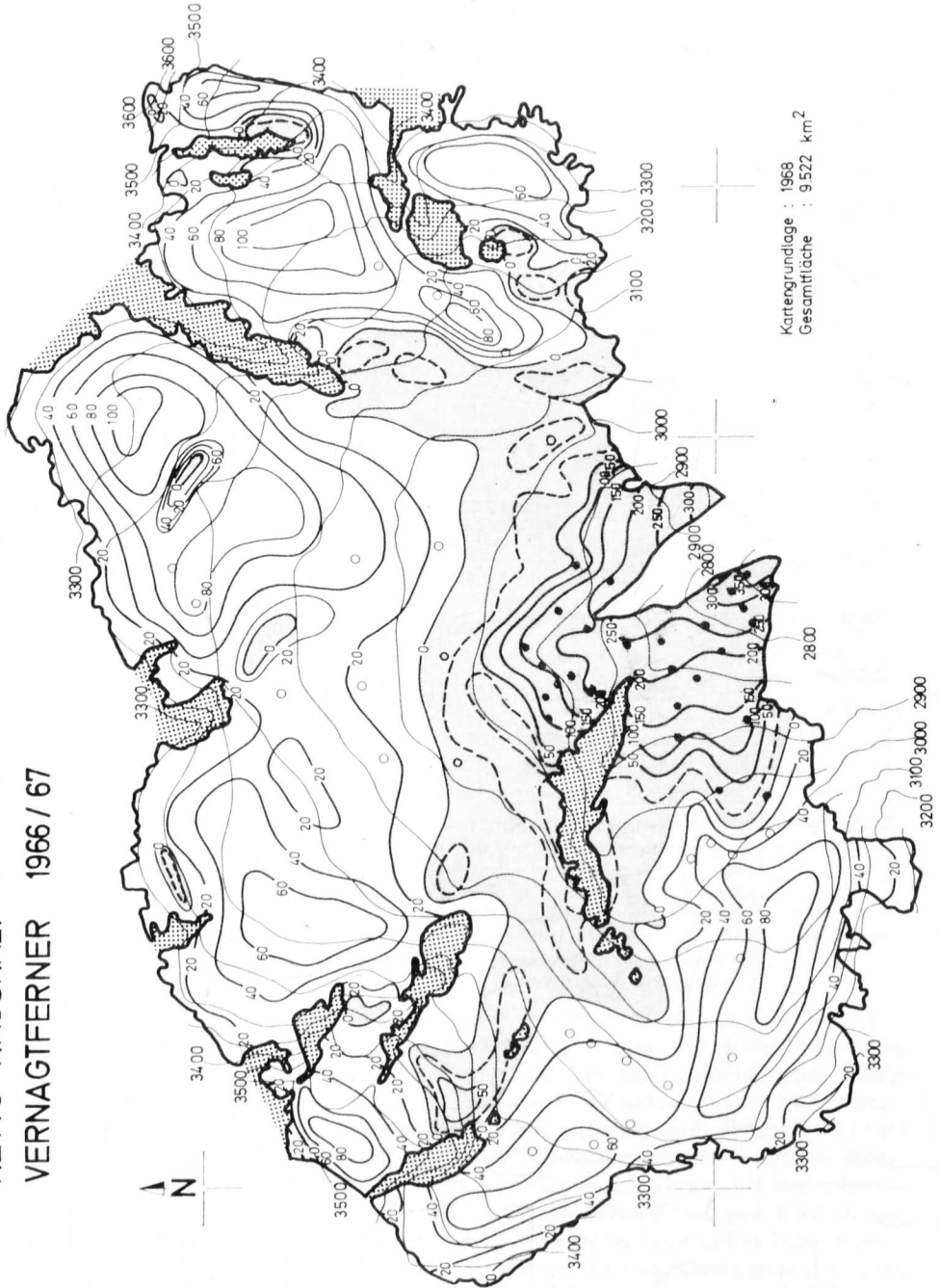


Abbildung 4: Analyse des Massenhaushaltes am Vernagtferner für das Haushaltsjahr 1966/67 (1. 10. 66—30. 9. 67) mit annähernd ausgeglichener Bilanz. Dick eingetragene sind die Isolinien der spezifischen Nettobilanz mit Angaben in cm Wasseräquivalent, dünn gezeichnet die Höhenlinien mit 50 m Äquidistanz. Gestrichelt dargestellt ist die Nulllinie der Eisablation, der fein gerasterte Bereich entspricht dem Ablationsgebiet, grobe Rasterung kennzeichnet Felsflächen. Als Punkte eingetragen sind die Ablationspegel, Kreise bezeichnen die Stellen von Rücklagenmessungen.

Massenverlust der drei Jahre bedingt. Erst das Haushaltsjahr 1971/72, während dessen Ablationsperiode die Altschneelinie nur bereichsweise über die 3000-m-Höhe zurückwich, dürfte erneut einer ausgeglichenen Bilanz nahekommen.

Bereits die ersten hier vorgestellten glaziologischen Ergebnisse der Untersuchungen am Vernagtferner bedeuteten einen beträchtlichen Aufwand an Feldarbeiten und Auswertetätigkeiten. Allen daran Beteiligten, besonders den zahlreichen Helfern aus dem Kreis der Studenten und Mitarbeiter des Instituts für Meteorologie und Geophysik und des Physikalischen Instituts der Universität Innsbruck, des Instituts für Angewandte Geophysik und des Meteorologischen Instituts der Universität München sowie des Instituts für Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität München, sei für ihre Unterstützung gedankt. Besonderer Dank gebührt vor allem Herrn Prof. Hoinkes, der den Arbeiten stets mit wohlwollenden Interesse begegnete und sie durch vielfache Anregungen förderte.

LITERATUR

- Ambach, W., 1956: Zur Bestimmung des Luft- und Schmelzwassergehaltes des Gletschereises. *Zeitschrift f. Gletscherkunde und Glazialgeologie*, Bd. III, H. 3, S. 297—304.
- Ambach, W., 1963: Mechanik des Gletschervorstoßes. „die pyramide“, Jhrg. 11, H. 4, S. 121—128.
- Behrens, H., 1971: Untersuchungen zum quantitativen Nachweis von Fluoreszenzfarbstoffen bei ihrer Anwendung als hydrologische Markierungsstoffe. *Geologica Bavarica*. Bd. 64, S. 120—131.
- Behrens, H., H. Bergmann, H. Moser, W. Rauert, W. Stichler, W. Ambach, H. Eisner, K. Pessl, 1971: Study of the discharge of alpine glaciers by means of environmental isotopes and dye tracers. *Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie*, Bd. VII, H. 1—2, S. 79—102.
- Brunner, K. und H. Rentsch, 1972: Die Änderungen von Fläche, Höhe und Volumen am Vernagt- und Guslarferner von 1889—1912—1938—1969. Mit 3 Kartenbeilagen 1:10.000. *Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie*, Bd. VIII, H. 1—2, S. 11—25.
- Budd, W. F. and D. Jessen, 1971: Numerical modelling of glacier systems. Paper presented at XV. General Assembly of IUGG, Moscow, USSR; Comm. of Snow and Ice, Symposium on Interdisciplinary Studies of Snow and Ice in Mountain Regions, 9—13 August 1971.
- Ebert, F., 1966: Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückgangs am Lewisgletscher im Zeitraum 1934—1963 und am Vernagtferner 1912—1938. Dipl.-Arbeit am Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität, München.
- Finsterwalder, R., 1953: Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückgangs an Ostalpengletschern. *Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie*, Bd. II, H. 2, S. 189—239.
- Finsterwalder, R., 1954: Photogrammetry and glacier research with special reference to glacier retreat in the Eastern Alps. *Journal of Glaciology*, Vol. 2, No. 15, p. 306—312.
- Finsterwalder, R., 1961: Der Haushalt des Hintereisferners (Ötztal). *Review. Journal of Glaciology*, Vol. 3, No. 30, p. 1159—1160.
- Finsterwalder, Rüd., 1972: Begleitwort zur Karte des Vernagtferners 1:10.000 vom Jahre 1969. *Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie*, Bd. VIII, H. 1—2, S. 5—10.
- Finsterwalder, S., 1897: Der Vernagtferner. *Wissenschaftliche Ergänzungshefte zur Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins*, 1. Bd., H. 1, S. 5—96.
- Finsterwalder, S. und H. Hess, 1926: Über den Vernagtferner. In: *Festschrift zum 50jährigen Bestehen der Sektion Würzburg des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins*, S. 30—41.
- Hess, H., 1904: *Die Gletscher*. F. Vieweg Verlag, Braunschweig.
- Hofmann, W., 1958: Der Vorstoß des Nisqually-Gletschers am Mt. Rainier, USA, von 1952 bis 1956. *Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie*, Bd. IV, H. 1—2, S. 47—60.
- Hoinkes, H., 1959: Das glazial-meteorologische Forschungsprogramm in den Ötztaler Alpen. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, Bd. 8, Nr. 54, S. 8—13.

- Hoinkes, H. und H. Lang, 1962: Der Massenhaushalt von Hintereis- und Kesselwandferner (Ötztaler Alpen) 1957/58 und 1958/59. *Archiv f. Meteorologie, Geophysik u. Bioklimatologie*, Ser. B, Bd. 12, S. 284–320.
- Hoinkes, H., 1969: Surges of the Vernagtferner in the Ötztal Alps since 1599. *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 6, No. 4, p. 853–861.
- Hoinkes, H., 1970: Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. *Ergebnisse der Meßreihe Hintereisferner (Ötztaler Alpen) 1953–1968. Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie*, Bd. VI, H. 1–2, S. 37–90.
- Hoinkes, H., 1970a: Ergebnisse des glazial-meteorologisch-hydrologischen IHD-Programmes im Rifental bei Vent 1964–1968. *Österreichische Wasserwirtschaft*, Jhrg. 22, H. 5/6, S. 101–113.
- Howorka, F., 1965: A steam-operated ice drill for the installation of ablation stakes on glaciers. *Journal of Glaciology*, Vol. 5, No. 41, p. 749–750.
- Kasser, P., 1959: Der Einfluß von Gletscherrückgang und Gletschervorstoß auf den Wasserhaushalt. *Wasser- und Energiewirtschaft 1959*, Nr. 6, S. 155–168.
- Kasser, P., 1967: Fluctuations of Glaciers 1959–1965. *International Association of Scient. Hydrology and UNESCO*, Louvain (Belgium).
- Kasser, P., 1972: Fluctuations of Glaciers 1965–1970. *International Association of Scient. Hydrology and UNESCO* (in press).
- Lang, H. und G. Patzelt, 1971: Die Volumenänderung des Hintereisferners (Ötztaler Alpen) im Vergleich zur Massenänderung im Zeitraum 1953–1964. *Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie*, Bd. VII, H. 1–2, S. 39–55.
- Lesca, C., 1971: Metodo generalizzato per la determinazione di variazioni volumetriche con impegno della fotogrammetria e del calcolatore elettronico. *Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano*, Ser. seconda, Nr. 19, p. 281–298.
- Mayo, L. R., M. F. Meier and W. V. Tangborn, 1972: A system to combine stratigraphic and annual mass-balance systems: a contribution to the International Hydrological Decade. *Journal of Glaciology*, Vol. 11, No. 61, p. 3–14.
- Meier, M. F., 1962: Proposed definitions for glacier mass budget terms. *Journal of Glaciology*, Vol. 4, No. 33, p. 252–261.
- Miller, H., 1971: Untersuchungen auf dem Guslar- und Vernagtferner in den Ötztaler Alpen mit der Methode der Refraktions-Seismik und einer Vierpunkt-Methode der Geoelektrik. *Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften der Universität München 1971*.
- Miller, H., 1972: Ergebnisse von Messungen mit der Methode der Refraktions-Seismik auf dem Guslar- und Vernagtferner. *Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie*, Bd. VIII, H. 1–2, S. 27–41.
- Niedermeier, B., 1967: Diplomarbeit aus der Photogrammetrie. *Institut f. Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität, München*.
- Queck, H., 1966: Massenhaushaltsstudien am Kesselwandferner (Ötztaler Alpen). Eine Untersuchung über Gesetzmäßigkeiten in der Rücklagenstruktur und Rücklagenverteilung. *Dissertation Universität Innsbruck 1966*.
- Queck, H., 1968: Ergebnisse der Massenhaushaltsuntersuchungen am Langtalerferner, am Vernagtferner (Ötztaler Alpen) und am Schneeferner in den Jahren 1965/66 und 1966/67. *Kommission f. Glaziologie d. Bayerischen Akad. d. Wissensch. (interner Bericht)*.
- Rudolph, R., 1963: Glacial Bibliography of the Central Oetztal Alps. *Bulletin of the Internat. Assoc. of Scient. Hydrology VIIIe Année*, No. 2, p. 132–139.
- Schatz, H., 1935: Nachmessungen am Hintereis- und Vernagtferner im Sommer 1934. *Zeitschrift f. Gletscherkunde*, Bd. XXIII, S. 108.
- Slupetzky, H., 1971: Der Verlauf der Ausaperung am Stubacher Sonnblickkees (Hohe Tauern). *Ergebnisse der Kartierung der temporären Schneegrenze. Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft*, Bd. 113, H. I/II, S. 1–24.

Srbik, R. v., 1939: Die Gletscher des Venter Tales. In: Das Venter Tal. Verlag F. Bruckmann, München.

UNESCO/IASH, Technical papers in hydrology, 1970 A: 1. Perennial ice and snow masses.

UNESCO/IASH, Paris 1970, p. 1–59.

UNESCO/IASH, Technical papers in hydrology, 1970 B: 5. Combined heat, ice and water balances at selected glacier basins. UNESCO/IASH, Paris 1970, p. 1–20.

Manuskript eingegangen am 7. September 1972, Ergänzungen am 14. und 19. Oktober 1972.

Anschrift des Verfassers: Dipl.-Met. Oskar Reinwarth,
Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissen-
schaften
D-8000 München 22, Marstallplatz 8