

K 11

BEGLEITWORT ZUR KARTE DES VERNAGTFERNERS 1:10.000 VOM JAHRE 1969

Von RÜDIGER FINSTERWALDER, München

Mit 4 Abbildungen und einer Kartenbeilage

ZUSAMMENFASSUNG

Der Vernagtferner in den Öztaler Alpen (Tirol) hat nach den terrestrisch-photogrammetrischen Kartierungen durch S. Finsterwalder im Jahre 1889, O. v. Gruber 1912 und H. Schatz 1938 im Jahre 1969 eine genaue Kartierung nach Luftbildern erfahren. Das Ergebnis ist eine vierfarbige Karte im Maßstab 1:10.000, die diesem Heft beiliegt. Sie ist als topographische Karte mit zusätzlichem geodätischen und glaziologischen Inhalt konzipiert. In dem Begleitwort zur Karte werden die angewandten Vermessungsmethoden erläutert und die kartographischen Darstellungsmittel diskutiert.

SUMMARY: EXPLANATION OF THE MAP OF VERNAGTFERNER, SCALE 1:10,000, SURVEY 1969

The Vernagtferner in the Öztaler Alps (Tirol) has been mapped after terrestrial-photogrammetric surveying by Sebastian Finsterwalder in 1889, Otto von Gruber in 1912, and Heinrich Schatz in 1938.

The new, four-colored map in the scale 1:10.000 enclosed in this issue was composed from aerial photographs of 1969. It was conceived as topographical map with additional geodetic and glaciological content. The methods of survey are explained and the means of cartographic representation are discussed.

RESUME: PREFACE A LA CARTE DU VERNAGTFERNER 1:10.000 DE 1969

Les levés du Vernagtferner dans les Alpes d'Oetztal (Tirol) qui avaient été faits par S. Finsterwalder (1889), O. v. Gruber (1912) et H. Schatz (1938) sur la base de la photogrammétrie terrestre furent suivis, en 1969, par un levé exact au moyen de la photographie aérienne. Le résultat en est une carte 1:10.000 en quatre couleurs qui se trouve jointe à ce fascicule. Il s'agit d'une carte topographique avec des suppléments géodésiques et glaciologiques. Les méthodes de levé et les moyens de représentation cartographique sont discutées dans le texte accompagnant la carte.

1. EINLEITUNG

Die Kommission für Glaziologie bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften hat sich kurz nach ihrer Gründung im Jahre 1963 als eines ihrer Arbeitsgebiete den Vernagtferner in den Öztaler Alpen (Tirol) ausgewählt. Nicht unwesentlich hat zur Wahl dieses Gletschers die Tatsache beigetragen, daß für ihn eine verhältnismäßig lange Reihe von Beobachtungen verschiedenster Art und mehrere Gesamtkartierungen vorlagen (H. Hoinkes, 1969). Nach der ersten großmaßstäbigen Aufnahme mittels Meßtischphotogrammetrie, durch S. Finsterwalder (1897) in den Jahren 1888/89 erfolgten weitere Aufnahmen nach der Methode der Stereophotogrammetrie durch den bekannten Photogrammeter O. von Gruber im Jahre 1912 (bisher unveröffentlicht), und H. Schatz im Jahre 1938 (ebenfalls noch nicht veröffentlicht). Im Jahre 1966 wurde der Gletscher in Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität München und der Kommission für Glaziologie nochmals terrestrisch photogrammetrisch bearbeitet und schließlich 1969 im Rahmen der Internationalen Hydrologischen Dekade vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen in Wien auch beflogen. Die sehr genau durchgeführte Stereokartierung auf Grund der Luftbilder des Gletscherflugs 1969 reizte zu einer

kartographischen Bearbeitung, die im Rahmen einer Diplomarbeit an der TU München 1971/72 verwirklicht werden konnte und dieser Zeitschrift beiliegt.

Die Karte liefert zum einen eine genaue Bestandsaufnahme des Gletschers und seiner Umgebung im Sinne einer topographischen Grundkarte im Maßstab 1:10.000, zum andern dient sie zur Erläuterung des von der Kommission für Glaziologie an diesem Gletscher durchgeführten und geplanten Arbeitsprogramms. Darüber hinaus soll sie auch als Vorschlag für die Ausgestaltung von Gletscherkarten allgemein aufgefaßt und zur Diskussion gestellt werden. Zum besseren Verständnis und zur Beurteilung der Karte hinsichtlich Genauigkeit, Inhalt und Darstellungsweise, werden im folgenden einige ergänzende Anmerkungen gemacht.

2. VERMESSUNGSARBEITEN

Die Aufnahme des Gletschers erfolgte zum größten Teil mittels Luftphotogrammetrie und einigen ergänzenden terrestrisch-photogrammetrischen Standlinien. Der Bildflug vom 4. Oktober 1969 wurde mit einer Weitwinkelkammer 15/23 in einer Höhe von 6900 m über dem Meeresspiegel durchgeführt, wodurch sich für das Kartengebiet ein mittlerer Bildmaßstab von 1:25.000 ergab. Zur Kartierung genügten je drei Bilder aus zwei benachbarten Flugstreifen, also insgesamt vier Stereomodelle. Die Bilder hatten in den Firngebieten ab etwa 3200 m Meereshöhe wegen Schneebedeckung der Hochlagen ungenügende Durchzeichnung, weshalb diese Gebiete nach dem Bildflug noch mit dem Phototheodoliten TAF zusätzlich aufgenommen wurden. Dabei wurden günstige Beleuchtungsverhältnisse abgewartet und darauf geachtet, daß die Aufnahmeentfernungen unter zwei Kilometer blieben. So war es möglich auch diese Gebiete auszuwerten, ohne daß künstliche Kontraste wie bei der Aufnahme der Aletschkarte (P. Kasser und H. Roethlisberger 1966) geschaffen werden mußten. Die Firnflächen sind beim Vernagtferner allerdings wesentlich kleiner als beim Aletschgletscher; außerdem konnten sie von den weit in den Gletscher hineinreichenden Felskämmen gut eingesehen werden.

Für die ergänzenden terrestrischen Aufnahmen wurde nur ein Teil der in der Karte ausgewiesenen Standlinien verwendet. Das gesamte Standliniensystem läßt eine praktisch lückenlose Kartierung des Gletschers zu, die etwa in Zeitabständen von 5 Jahren vorgesehen ist. Für die jährliche, zur Haushaltsbestimmung notwendige Festlegung der Altschneelinie am Vernagtferner genügen bereits die Standlinien am Schwarzkögele (Abb. 1) und auf den Guslarspitzen (K. Brunner und H. Rentsch 1972, Abb. 1a—c) bzw. am Vernagtgrat (Abb. 2).

Zur Bestimmung der Paßpunkte für die Luftaufnahmen und der Phototheodolitstandpunkte war es notwendig, ein Dreiecksnetz im Anschluß an die Punkte der österreichischen Katastertriangulation aufzubauen. Die wichtigsten Punkte wurden mit Signalen versehen, bestehend aus 2 m langen, 5 cm starken Aluminiumrohren und zwei gekreuzten Zieltafeln, ebenfalls aus Aluminium (Abb. 3). Die Signale wurden zentrisch gesetzt, mit Draht verspannt und mit einem Steinmann versehen. Die Vermarkung geschah durch Bohrlöcher und Farbflecke. Der Hauptvorteil dieser Art von Signalen liegt in der leichten Transportierbarkeit, so daß sie auch auf schwieriger zugänglichen Punkten noch aufgestellt werden können. Sie erwiesen sich bisher über einen Zeitraum von sieben Jahren als sehr stabil, lediglich ein Signal wurde des öfteren vom Blitz beschädigt.

Da verschiedene Punkte der Vermessungen aus den Jahren 1889, 1912 und 1938 aufgefunden wurden — es handelte sich meist um Steinmänner — konnten auch die

alten Netze an das neue angeschlossen werden. Auf diese Weise war es möglich, die verschiedenen Auswertungen zu vergleichen und Flächen- sowie Volumenänderungen des Gletschers in den Zeiträumen 1889—1912—1938—1969 festzustellen (K. Brunner und H. Rentsch 1972). Eine Zusammenstellung der Koordinatenwerte vom Jahre 1969 findet sich in Tab. 1. Die Paßpunkte für die Luftbildauswertung waren vor der Befliegung zum Teil durch weiße Kreise von durchschnittlich einem Meter Durchmesser signalisiert, wobei die Farbe auf Felsflächen aufgetragen wurde. Für jedes der vier Stereomodelle waren genügend Paßpunkte vorhanden, so daß sich eine Aero-triangulation erübrigte (insgesamt 10 signalisierte und 5 natürliche Punkte).

Tabelle 1: Koordinatenwerte 1969

Nr. und Punktbezeichnung	y	x	H	Bemerkungen
Dreieckspunkte				
1. Mittlere Guslarspitze	37 482,84	88 784,78	3128,1	KT.-Stein
2. Vorderes Plattei	39 026,46	91 416,60	3237,2	KT.-Stein
3. Platteigrat	39 125,15	91 923,17	3143,0	Metallsignal
4. Schwarzwandspitze	34 624,60	92 994,67	3465,1	Metallsignal
5. Hintergraslspitze	36 424,74	91 198,19	3323,8	Metallsignal
6. Schwarzkögele	38 006,68	92 097,28	3078,8	Metallsignal
7. Gletschermitte	36 422,09	92 612,71	3033,2	Metallsignal
Standlinienpunkte (A-Punkt)				
1. Vernagtgrat, Nord	35 979,94	93 137,82	3239,0	Steinmann
2. Petersengrat, Süd	38 269,08	93 568,94	3210,2	Steinmann
3. Petersengrat, Nord	38 310,31	93 676,36	3245,5	Steinmann
4. Schwarzkögele, Nord	38 005,20	92 159,46	3074,7	Steinmann
5. Hintere Guslarspitze	37 007,02	88 840,88	3147,1	Steinmann
ferner die Dreieckspunkte Nr. 1, 3, 6 und 7.				
Standpunkte für Pegel einmessung				
1. Vernagtgrat, Süd	35 996,84	92 999,26	3227,2	Steinmann
2. Unterm Schwarzkögele, Nord	37 345,16	92 396,73	2933,3	Steinmann
3. Unterm Schwarzkögele, Mitte	37 507,88	92 198,01	2928,1	Steinmann
4. Unterm Schwarzkögele, Süd	37 658,31	92 017,41	2875,0	Steinmann
5. Gletschermitte, West	35 931,13	92 456,43	3085,5	Steinmann
6. Moräne	37 075,85	91 754,41	2857,7	Steinmann

ferner der Dreieckspunkt Nr. 7 und die Standlinienpunkte Nr. 2 und 4.

Es handelt sich um österreichische Landeskoordinaten (Gauß-Krüger-System M 28), sämtliche Höhen beziehen sich auf den Boden.

Die Herstellung des Höhenlinienplans geschah am Aviographen Wild B8 des Instituts für Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität München im Maßstab 1:10.000 bei einem Abstand der Schichtlinien von 10 m. Über die Genauigkeit der Linien, insbesondere auf dem Gletscher, läßt sich schwer eine exakte Angabe machen, da hierzu eine Vergleichsmessung höherer Genauigkeit zum Zeitpunkt der Luftaufnahme notwendig gewesen wäre. Aus dem Vergleich zwischen mehrfach gezogenen Linien und den Anschlußdifferenzen zwischen terrestrisch-photogrammetrischer und luftphotogrammetrischer Auswertung läßt sich jedoch folgern, daß die bei der Karte des Aletschgletschers geforderte Genauigkeit von $m_h = \pm (1+3 \cdot \operatorname{tg} \alpha)$ [m] etwa eingehalten werden konnte (m_h = mittlerer Höhenfehler einer Höhenlinie, α = Geländeneigung nach der Formel von Koppe).



Abb. 3: Signal auf der Schwarzwandspitze (3465 m) gegen Weißkugel (3739 m).
Photo O. Reinwarth am 28. Juli 1965.

3. KARTOGRAPHISCHE BEARBEITUNG

Die vorliegende Karte des Vernagtferners ist als topographische Karte mit zusätzlichem glaziologischen und geodätischen Inhalt gedacht. Sie beschränkt sich nicht auf die Darstellung des eigentlichen Gletschergebiets sondern schließt auch seine unmittelbare Umgebung ein, etwa die den Gletscher überragenden Felskämme und das Vorfeld. Erstere gehören zum Ernährungsgebiet des Gletschers, letzteres ist als ehemals oder als zukünftig vergletscherte Fläche, insbesondere wegen der Moränenwälle älterer Stände von allgemeinem glaziologischen Interesse.

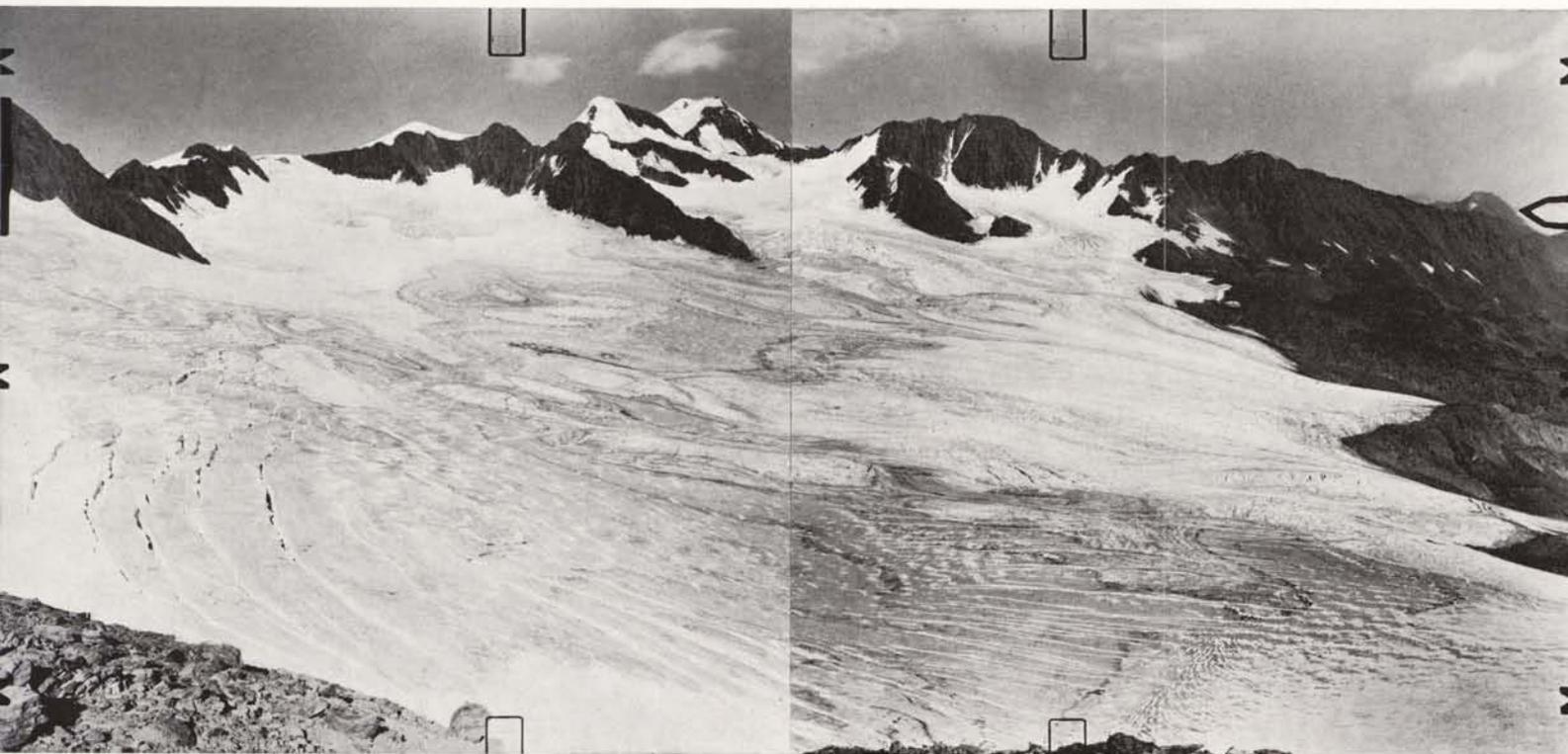
Die kartographischen Ausdrucksmittel wurden bewußt einfach gehalten. Man beschränkte sich auf vier Farben, nämlich Blau zur Darstellung der Gletschergebiete und des Gewässers, ein gebrochenes Schwarz für das unvergletscherte Gebiet, Rot für zusätzliche glaziologische und geodätische Angaben und einen grauen Flächenton zur Ausscheidung der Felsgebiete. Auf eine Schummerung wurde verzichtet, da die kartographische Darstellung bei dieser Inselkarte an den Gratlinien der Gletscherumrandung aufhört und der plastische Effekt deshalb gering geblieben wäre. Zu den einzelnen Farbauszügen ist folgendes zu bemerken:

→
Abb. 4: Orthophotokarte des Vernagtferners (Ausschnitt) im Maßstab 1:10.000. Weitwinkel-
aufnahme (15/23) aus 6900 m Höhe über N. N. Breite der Entzerrungsstreifen 4 mm, Blende
1 mm. Hergestellt am Orthoprojektor GZ 1 der Technischen Universität Stuttgart. Aus-
wertung von Dipl.-Ing. H. Reutsch. Druck: Bayerisches Landesvermessungsamt München.





Abb. 1: Standlinie Schwarzkögele gegen Hochvernagtspitze (3536 m, Bildmitte) und Fluchtkogel (3500 m, links). Photo H. Rentsch am 6. Sept. 1971.



←
Abb. 2: Standlinie Vernagtgrat gegen Brochkogel (3628 m) und Wildspitze (3772 m). Photo H. Rentsch am 6. September 1971.

BLAU: In blauer Farbe sind die Schichtlinien auf Schnee und Eis gehalten, wobei zum Eis auch Toteis gerechnet wird. Da das Gebiet intensiv begangen worden war, sind diese Toteisstellen trotz starker Schuttbedeckung gut bekannt. Einzelne, auch kleinere Firnflächen außerhalb des eigentlichen Gletschergebiets sind wegen ihrer Beziehung zur klimatischen Schneegrenze ebenfalls vollständig ausgewiesen. Da die blauen Schichtlinien die Abgrenzung der Schnee- und Eisflächen nur ungenau liefern, wird zu deren Verdeutlichung eine eng gestrichelte blaue Linie verwendet. Die Firngrenze und Altschneelinie zum Zeitpunkt des Bildflugs gibt eine lang gestrichelte bzw. strichpunktierte Linie wieder. Auf die Kennzeichnung der Eis-, Firn- und Altschneeflächen durch Blautöne, wie sie auf verschiedenen thematischen Gletscherkarten der jüngsten Zeit angewandt wird, ist im Hinblick auf den topographischen Charakter der Karte verzichtet worden. Die gewählten Linien definieren diese Flächen eindeutig, ohne das Relief zu sehr zu beeinflussen.

An Kleinformen des Gletschers gelangen, soweit im Luftbild ersichtlich, zur Darstellung: Gletscherspalten, Bergschründe, Schmelzwasserrinnen und Gletschermühlen. Als graphisches Ausdrucksmittel dient die Strichzeichnung und bei größeren Spalten auch eine blaue Flächenfüllung. Durch Keilschraffen sind ferner Steilabfälle im Eis und Firn gekennzeichnet, wobei es sich meist um vom Wind gebildete Formen handelt, etwa nördlich der Guslarspitzen und des Schwarzkögele.

SCHWARZ: Die Farbe Schwarz ist dem eisfreien Gebiet vorbehalten. Die einheitliche Äquidistanz der Höhenlinien von 10 m ist auch dort im allgemeinen gewahrt. Lediglich in sehr steilen Gebieten, wo die Scharung der Linien zu eng und graphisch nicht mehr reproduzierbar ist, sind sie bis auf die Zähllinien zugunsten eines Scharungersatzes in Form von Senkrechtschraffen nach Brandstätter (1957) weggelassen. In Felsgebieten ergänzen Kantenlinien die Schichtlinien, wobei negative Kanten durch kurzes Aussetzen der Schichtlinien an den Kantenansätzen gekennzeichnet sind. Ferner sind die Felsgebiete durch eine schwarze Begrenzungslinie und einen grauen Flächenton hervorgehoben.

Ausführlich ist auch die Schuttbedeckung, sowohl Gehänge- als auch Moränenschutt, wiedergegeben. Durch unterschiedliche Dichte der Punktierung und Platzierung der Punkte in der Falllinie wird versucht, die wirkliche Verteilung und Anordnung des Schuttmaterials auszudrücken. Bei Moränenwällen wird ein leichter Schattierungseffekt durch die Punktierung erreicht, so daß sich Moränenzüge verfolgen lassen, die durch die Schichtlinien allein nicht zum Ausdruck kämen. Da auf dem Kartenblatt kaum Vegetationsgelände vorhanden ist, wurde auf die Einführung einer gesonderten Vegetationsplatte verzichtet. Die Grasflächen am sog. Hintergrasl und am Plattel sind durch schwarze Signaturen angedeutet.

ROT: Die im Rotaufdruck enthaltenen glaziologischen und geodätischen Einrichtungen sind in der Legende eindeutig beschrieben, so daß sich weitere Bemerkungen erübrigen. Es sei nur darauf hingewiesen, daß durch Weglassen dieses Aufdrucks eine sog. „topographische Ausgabe“ entsteht, die im Unterschied zu den üblichen topographischen Karten dieses Maßstabs lediglich die sich jährlich stark ändernde Firngrenze und Altschneelinie enthält. Sie könnte als Grundlage für weitere „thematische“ Karten dienen.

Insgesamt ist festzustellen, daß die vorliegende kartographische Bearbeitung doch einen nicht unerheblichen Aufwand erfordert. Sie wird deshalb wohl nur auf die Kartierung einzelner Gletscher beschränkt bleiben. Für Massenkartierungen, etwa

zur Anlage eines Gletscherkatasters nach dem österreichischen Gletscherflug vom Jahre 1969 müssen einfachere Methoden angewandt werden. Als Möglichkeiten bieten sich hierzu der einfarbige Schichtlinienplan oder das Orthophoto mit einkopierten Höhenlinien an. Am Beispiel des Vernagtferners wurden in dieser Richtung bereits erfolgversprechende erste Versuche mit Orthophotos gemacht (Rüd. Finsterwalder 1972), wovon Abb. 4 eine Probe gibt.

Die Fertigstellung und Herausgabe der Karte ist nur durch die Mitwirkung und enge Zusammenarbeit verschiedener Dienststellen und Einzelpersonen gelungen: Der Bildflug erfolgte durch das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien; die Überlassung der Bilder geschah dankenswerterweise durch das Hydrographische Zentralbüro beim österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien. Die geodätischen, photogrammetrischen und kartographischen Arbeiten erfolgten in engem Zusammenwirken zwischen dem Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität München und der Kommission für Glaziologie bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, wobei der photogrammetrische Teil weitgehend von Herrn Dipl.-Ing. H. Rentsch, der kartographische Teil von Herrn Dipl.-Ing. K. Brunner, beide München, geleistet wurde. Die Finanzierung hat weitgehend die Deutsche Forschungsgemeinschaft getragen. Allen Beteiligten sei hiermit herzlicher Dank ausgesprochen.

LITERATUR

- Brandstätter, L., 1957: Exakte Schichtlinien und topographische Geländedarstellung. Sonderheft 18 der Österreichischen Zeitschrift für Vermessungswesen, Wien.
- Brunner, K. und H. Rentsch, 1972: Die Änderungen von Fläche, Höhe und Volumen am Vernagt- und Guslarferner von 1889—1912—1938—1969. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Bd. VIII, H. 1—2, S. 11—25.
- Finsterwalder, Rüd., 1972: Orthophotos zur Gletscherkartierung. Bildmessung und Luftbildwesen 1972, S. 148—152.
- Finsterwalder, S., 1897: Der Vernagtferner. Wiss. Ergänzungshefte zur Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, 1. Bd. -- 1. Heft. Graz.
- Hoinkes, H., 1969: Surges of the Vernagtferner in the Ötztal Alps since 1599. Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 6, No. 4 part 2, p. 853—851.
- Kasser, P. u. H. Roethlisberger, 1966: Some Problems of Glacier Mapping experienced with the 1:10.000 Map of the Aletsch Glacier. Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 3, No. 6, p. 799—809.

Manuskript eingegangen am 22. Juni 1972, Ergänzungen am 6. Juli 1972.

Anschrift des Verfassers: Dr. Ing. Rüdiger Finsterwalder
Technische Universität München
Institut für Photogrammetrie und Kartographie
Arcistraße 21, D-8000 München 2

DIE ÄNDERUNGEN VON FLÄCHE, HÖHE UND VOLUMEN AM VERNAGT- UND GUSLARFERNER VON 1889—1912—1938—1969

Von K. BRUNNER und H. RENTSCH, München

Mit 4 Abbildungen und 3 Kartenbeilagen

ZUSAMMENFASSUNG

Mit den Aufnahmen des Vernagt- und Guslarfeners in den Jahren 1889, 1912, 1938 und 1969 sind die Gletscherstände als topographische Kartierungen zu verschiedenen Zeitpunkten festgehalten. Durch Vergleich der Karten, die gleichzeitig die frühe Entwicklung der Photogrammetrie veranschaulichen, sind Gletscherschwankungen über große Zeiträume erfassbar. Nach einer Überprüfung der einzelnen Karten auf deren Vergleichbarkeit wurden die Gletscheränderungen auch zahlenmäßig belegt.

Damit besteht die Möglichkeit, Analogien und Gegensätze im Verhalten des Vernagt- und Guslarfeners in einzelnen Höhenzonen in den durch die Kartierungen vorgegebenen Perioden zu diskutieren. Als Grundlage hierfür sollten zweckmäßig die mittleren jährlichen Höhenänderungen Verwendung finden, da diese das Verhalten des Gletschers am sichersten beschreiben. Neben dieser zahlenmäßigen Erfassung des Verhaltens des Vernagt- und Guslarfeners wurden für die Perioden 1889—1912, 1912—1938 und 1938—1969 drei Karten thematischen Inhalts angefertigt. Sie enthalten eine Darstellung der Änderungen der Gletscherfläche und -dicke mittels verschiedener Farbbänder. Die hier gewählte Darstellung wird dann den entsprechenden Karten vom Aletsch- und Mattmarkgletscher gegenübergestellt. Unterschiede in den Darstellungsmethoden wurden kritisch gewürdigt.

THE CHANGES IN AREA, ELEVATION AND VOLUME OF VERNAGTFERNER AND GUSLARFERNER BETWEEN 1889—1912—1938—1969

By mapping the Vernagtferner and the neighbouring Guslarferner (Ötztal Alps, Austria) in 1889, 1912, 1938, and 1969 the state of this glacier system was recorded exactly at different times. The comparison of these maps allows quantitative analyses of the changes of both glaciers for the corresponding time intervals. Determination of these changes, expressed by vertical shrinkage, change in volume and area for consecutive altitude zones reveals the individual behaviour of both glaciers for different periods.

To demonstrate the changes of area and altitude distribution of Vernagtferner and Guslarferner for the given time intervals 1889—1912, 1912—1938, and 1938—1969 three special maps were produced, each representing the contour lines of the respective surveys. The changes in both area and altitude were separately marked by using different colours for the displacement of contour lines and for changes in glaciated area.

The methods of variation of glaciers used for the three special maps of Vernagtferner and Guslarferner are critically discussed and compared with analogous maps of Aletschgletscher and Mattmarkgletscher in the Swiss Alps.

Der Vernagtferner gehört zusammen mit dem Guslarferner zum vergletscherten Bereich im Einzugsgebiet des Vernagtbaches, der in die Rofener Ache mündet. Noch im Jahre 1889 vereinigte beide Gletscher eine gemeinsame Zunge, die auch in der von S. Finsterwalder durchgeführten Gesamtkartierung zu erkennen ist. Bei späteren Gletschergesamtaufnahmen von 1912, 1938 und 1969 wurde neben dem Vernagtferner jeweils auch der Guslarferner erfaßt und in topographischen Karten mit Höhenschichtlinien dargestellt. Durch diese glücklichen Umstände bestand die Möglichkeit, aus dem Vergleich dieser Karten die Gletscherschwankungen über relativ große Zeiträume für beide Gletscher zu messen.

I. ZAHLENMÄSSIGE ANGABEN

Aus der Lageänderung der Schichtlinien und Gletschergrenzen, gleichbedeutend mit der Änderung der Gletscheroberflächentopographie, sind Flächenveränderungen mit einem Polarplanimeter gemessen, Volumen- und mittlere Höhenänderungen nach den von Richard Finsterwalder (1953) abgeleiteten Beziehungen

$$dV = \Delta F_{\text{Mittel}} \times \Delta h \quad \text{und} \quad dh = \frac{dV}{F_{\text{Mittel}}}$$

berechnet worden.

ΔF bezeichnet die Differenzfläche, die durch zwei Schichtlinien gleicher Meereshöhe verschiedener Jahrgänge begrenzt wird und bis zur äußersten Gletschergrenze reicht. F , die Zonenfläche, wird durch zwei Schichtlinien mit dem Abstand Δh desselben Jahrganges und der dazugehörigen Gletschergrenze eingeschlossen. Die Flächenmittel errechnen sich einerseits aus oberer und unterer Differenzfläche einer Höhenzone, andererseits aus den Zonenflächen von 2 Jahrgängen. In Tabelle 1 sind die Planimetrier- und Rechenwerte festgehalten.

II. VERGLEICHBARKEIT DER TOPOGRAPHISCHEN KARTEN

Vor Ermittlung der Zahlenwerte ist zu prüfen, ob das Kartenmaterial im Sinne einer zuverlässigen Aussage vergleichbar ist. Dazu ist es nötig, wie folgend beschrieben

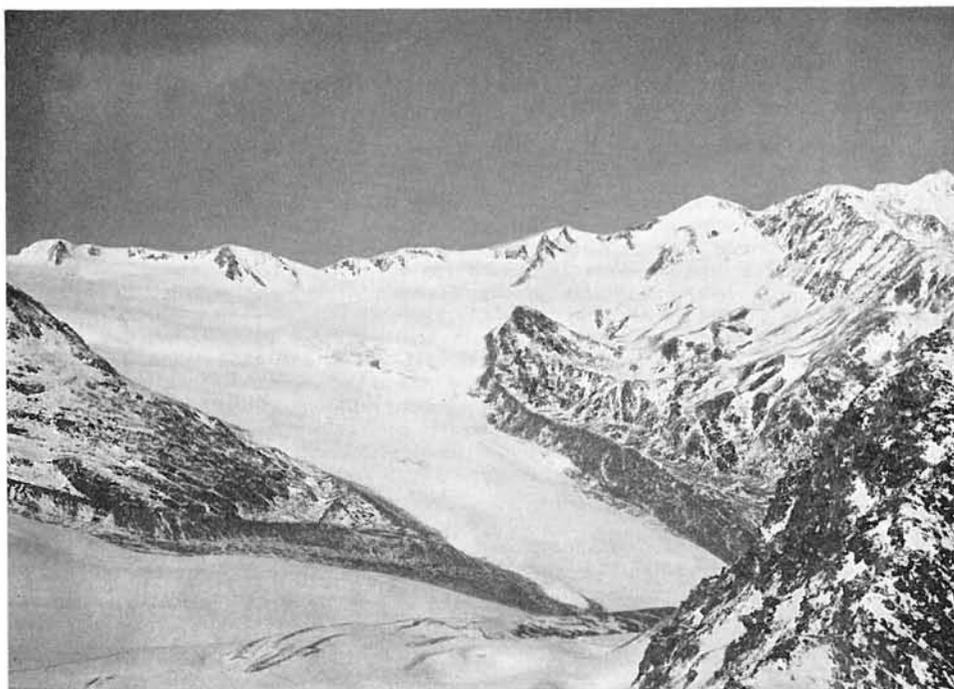


Abb. 1: Der Vernagtferner von der Standlinie Hintere Guslarspitze — Mittlere Guslarspitze. Im Vordergrund die Zunge des Guslarferners. Rechts im Bild Brochkogel (3628 m) und Wildspitze (3772 m).
a) Aufnahme O. v. Gruber, Sommer 1912.



b) Aufnahme H. Schatz, 30. Juli 1938.



c) Aufnahme H. Rentsch, 10. September 1968.

wird, die Aufnahme- und Auswerteverfahren zu bewerten und die Karten systematisch zu überarbeiten. Die Ergebnisse sind durch die drei beigelegten Kartenblätter veranschaulicht.

1. DIE KARTE VON 1889, 1:10.000

S. Finsterwalder (1897) erkannte, daß für gletscherkundliche Forschungen, denen er sich mit großem Interesse widmete, geometrisch richtige Karten unentbehrlich sind. Er wählte 1889 den Vernagtferner für eine Gletschergesamtaufnahme aus und brachte die Meßtischphotogrammetrie zur Anwendung, da in dem schwierigen Gelände aus Erfahrung die Tachymetrie vielfache Unzulänglichkeiten gebracht hätte. Grundlage seiner Vermessungsarbeit war die Entwicklung eines trigonometrischen Netzes mit gut signalisierten Punkten, angeschlossen an das damalige System der Landesvermessung. Die Theorie des Meßverfahrens stand fest, Instrumente, Methoden der Aufnahmen und Verwertung der Feldmessungen mußte er sich selbst schaffen. Es gab noch kein photogrammetrisches Auswertegerät. Schichtlinien entstanden nach topographisch charakteristischen Leitlinien und durch Interpolationen zwischen Punkten, die — meistens mit einer Überbestimmung — nach den orientierten Meßbildern konstruiert wurden. Dieses Konstruktionsverfahren ist gegenüber der linienweisen Auswertung mit räumlichen Doppelbildauswertegeräten benachteiligt. Die Schichtlinien sind geometrisch ungenauer, im Felsgebiet schematisiert. Bei Zuordnungsschwierigkeiten der Punkte in verschiedenen Meßbildern und ungünstigen Schnitten der Konstruktionsstrahlen können vielfach systematische Fehler auftreten. Durch äußerste Sorgfalt konnte S. Finsterwalder diese Mängel stark reduzieren. Eine Kontrolle ist durch Vergleich mit der von Rüdiger Finsterwalder (1972) beschriebenen Karte von 1969 gegeben. Diese ist, nach dem Auswerteverfahren beurteilt, homogener und zuverlässiger, auch gegenüber den topographischen Karten von 1912 und 1938. Bei dem Vergleich, für den identische trigonometrische Punkte in beiden Karten grundlegend sind, müssen sich gleichwertige Schichtlinien im festen Gelände decken. Ebenso sollen kleine Ausaperungen und kleine Firnflecken außerhalb der geschlossenen Gletscherfläche lagemäßig übereinstimmen. Daß auch diese Kleinformen ihre Örtlichkeit bewahren, zeigen die gegenübergestellten Meßbilder (Abb. 1a—c), die wegen gleicher Orientierung zu verschiedenen Zeitpunkten wertvolle Bilddokumente sind. Der Kontrolle entsprechend war es möglich, Felspartien — besonders in Gratnähe — zu korrigieren, was sich zwangsläufig auf die anschließenden Schichtlinien im Gletscher übertrug. Auffallend war jedoch nur die abweichende Form des Brochkogeles nach SW und problematisch die Deutung der Schichtliniendifferenzen unterhalb des Schwarzkögele nach NW und orographisch rechts der Zunge des Vernagtferners. In den beiden letzten Fällen wurden die Schichtlinien unverändert gelassen und die Gletschergrenze erweitert, da die Oberflächenänderung am naheliegendsten auf schuttbedecktes Toteis, das die Zunge berührte, hinweist.

Toteis-, Firn- und Schneeflächen sind, soweit nicht durch erkennbare Unterbrechungen vom Gletscher getrennt, bei allen überarbeiteten Auswertungen dargestellt und zahlenmäßig erfaßt. Liegen sie außerhalb dieses Gletschergebietes, jedoch vom Vergleichsstand überdeckt, sind sie ebenso ausgewiesen, ohne zur Gletscherfläche gezählt zu werden.

S. Finsterwalder hat in seiner Karte die Konstruktionspunkte notiert und gibt damit einen Überblick zur Punkteverteilung. Die niedrige Punktdichte im Bereich der Firn-

mulden weist auf die Schwierigkeiten hin, daß bei der photographischen Abbildung gleichmäßig schneebedeckter Flächen Einzelheiten nur mangelhaft erkennbar wiedergegeben werden. Die danach konstruierten Schichtlinien büßen an Genauigkeit ein. Soweit bei der Kontrolle dieser Linien Abweichungen in der Geländeform auftraten, erhielten sie vertretbare Korrekturen¹. Insgesamt gesehen weist die Karte nur wenig Mängel auf, und es ist kein Zeichen von Resignation, wenn 80 Jahre später zu sagen ist, daß sie den folgenden, nach moderneren Verfahren der Bildmessung erstellten Karten an Genauigkeit kaum nachsteht. Otto v. Gruber (1939) nennt die Arbeit grundlegend für die terrestrische Photogrammetrie und würdigt damit treffend die wissenschaftliche Leistung S. Finsterwalders.

2. DIE KARTE VON 1912, 1:10.000

Das Jahr 1912 brachte eine Neuvermessung des Gletschergebietes durch Otto v. Gruber. S. Finsterwalder veranlaßte den Studenten und späteren Assistenten am Physikalischen Institut der Technischen Hochschule München, sich seit 1905 an systematischen Gletschervermessungen zu beteiligen. Bei Aufnahme und Auswertung führte O. v. Gruber als Neuerung die terrestrische Stereophotogrammetrie ein. Es existierte bis dahin noch kein praktisch ausgeführtes Beispiel auf dem Gebiet der Gletschervermessung nach diesem Verfahren. 1908/09 war bei Zeiß in Jena nach der Erfindung von E. v. Orel das erste räumliche Doppelbildauswertegerät, der Orel-Zeiß'sche Stereoautograph entwickelt worden, das zuverlässige und besonders für Hochgebirgsvermessungen rationelle Auswertungen ermöglichte. Bei der Firma Stereographik in Wien — O. v. Gruber gehörte dem Unternehmen seit Herbst 1913 an — entstand die Vernagtkarte 1912 mit Schichtlinien von 10 m Abstand (G. Heß, 1942). Das zur Vermessung 1889 entwickelte trigonometrische Netz schloß O. v. Gruber an die neue Tiroler Landesvermessung an. Er erweiterte es und sicherte die Signalisierung und Vermarkung. Dadurch war grundlegend der Vergleich mit dem Gletscherstand von 1889 gesichert. Das um 2 m niedrigere Höhenniveau dieser Aufnahme ist im Schichtlinienbild des beigelegten Kartenblattes und bei den Zahlenwerten berücksichtigt. Die Standlinien waren für eine lückenlose Auswertung angeordnet (s. Abb. 2). Es wurde darauf geachtet, daß die Aufnahmeentfernungen im Firm unter 1000 m blieben, um die schon erwähnten Auswerteschwierigkeiten optimal zu reduzieren. Trotzdem mußte sich die Neuschneeaufgabe, die 1912 in einem kalten Sommer das Gesamtgebiet (s. Abb. 1a) überzog, als hinderlich erweisen. Bei der Gegenüberstellung zum Vergleichsmaterial 1889 und 1938 waren deshalb Korrekturen ab der Höhe von 3200 m für die Gletschergrenzen und Schichtlinien im Firm nötig. Die Schichtlinien im festen Gelände stimmten mit denen von 1969, die für alle beigelegten Kartenblätter übernommen wurden, befriedigend überein. Eine Änderung der orographisch rechten Zungenlage schien im Sinne der bei der Karte von 1889 beschriebenen Korrektur angebracht. Darauf wiesen auch an der interpretierten Grenze in der Originalauswertung unterbrochene Wasserrinnen hin.

3. DIE KARTE VON 1938, 1:10.000

Diese Karte steht hinsichtlich Aufnahme und Auswertung in enger Beziehung zu der von 1912. Die Triangulation zur Bestimmung von Aufnahmeestandpunkten und

¹ Dabei sei erwähnt, daß das Problem der Wiedergabe kontrastarmer Oberflächen nicht ein typischer Nachteil der Meßtischphotogrammetrie ist, sondern alle photogrammetrischen Verfahren belastet.

Vernagtferner 1912
Übersicht der terrestrisch-photogrammetrischen Standlinien

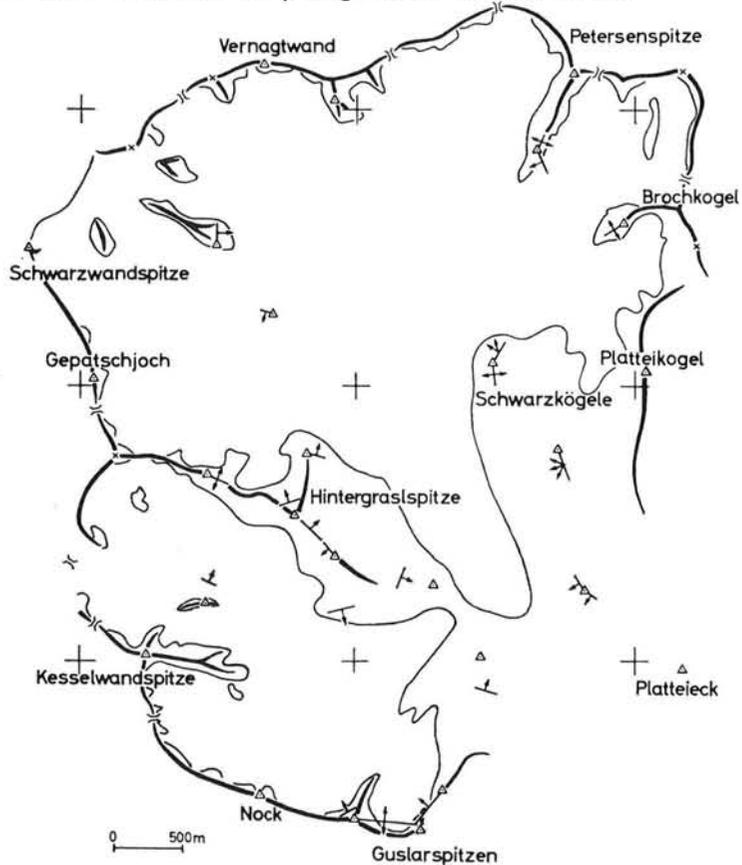


Abb. 2: Terrestrisch-photogrammetrische Standlinien Vernagtferner 1912 (O. v. Gruber).

Paßpunkten schloß an die von 1912 erhalten gebliebenen Punkte an. Dabei wurde Wert auf die Auffindung der alten Standlinien, deren Anordnung und Anzahl sich bewährt hatten, gelegt (s. Abb. 3). Die Punkteberechnungen erfolgten jedoch erst 1965 am Institut für Photogrammetrie- und Kartographie der Technischen Hochschule München, ebenso die Auswertungen am dortigen Orel-Zeiß'schen Stereoauto-graphen. Daß dieses wertvolle Vergleichsmaterial über die Kriegsjahre hinweg zum größten Teil erhalten blieb, ist der Gewissenhaftigkeit von H. Schatz zu danken. Er war sich der Verantwortung gegenüber einer wissenschaftlichen Aufgabe, die er frei gewählt hatte, bewußt. Er stellte seine sorgfältig geführten Feldbücher und umfangreiches Bildmaterial zur Verfügung. Es fehlte nur das Bildpaar, welches das Hintergrasl mit geringem angrenzenden vergletscherten Gebiet von Guslar- und Vernagtferner erfaßte. Diese Lücken in der Auswertung konnten nach den Originalauswertun-

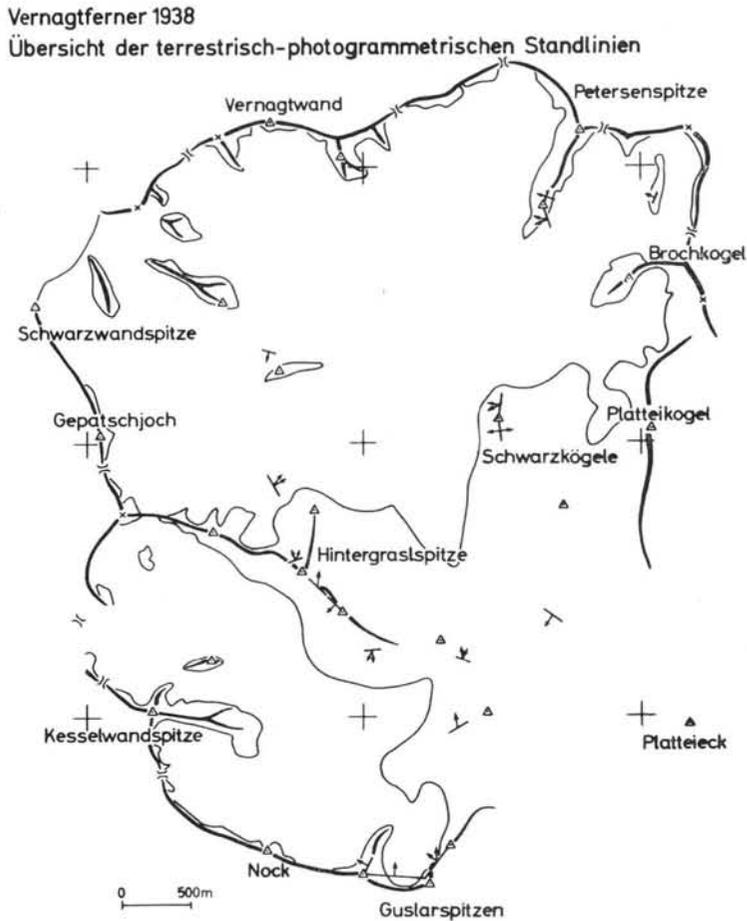


Abb. 3: Terrestrisch-photogrammetrische Standlinien Vernagtferner 1938 (H. Schatz).

gen 1:10.000 von E. Schneider der Österr. Alpenvereinskarte 1942 ergänzt werden. Bei der Vergleichskartierung wurde die Niveaudifferenz von -1 m gegenüber der Vermessung von 1969 berücksichtigt. Im NO-Teil des Vernagtferners waren Korrekturen nötig, da die Lage der Paßpunkte Petersenspitze, Petersengrat und Brochkogel nicht eindeutig erkennbar war. An dieser Stelle sei erwähnt, daß H. Schatz sich der glaziologischen Forschungsarbeit am Vernagt- und Guslarferner schon vor 1938 widmete und ihr danach treu blieb.

Auf die Bewertung der Karte von 1969 wurde mehrfach hingewiesen, bleibt noch zu erwähnen, daß bei der kartographischen Darstellung der Gletscherveränderungen geringfügige Generalisierungen der Gletschergrenze angebracht waren.

Ein abschließendes Urteil ergeht zugunsten der Vergleichbarkeit: gemeinsame trigonometrische Punkte für alle Karten sind vorhanden (das ermöglichte bei allen

Beilagen die Eintragung des Gauß-Krüger-Netzes), systematische Abweichungen sind durch Kontrollmöglichkeit reduzierbar, die Genauigkeit der Schichtlinien ist zufriedenstellend. Letztere ist auf eine Größenordnung zu begrenzen, damit die Objektivität gewahrt bleibt. Abschätzend gelten für zufällige Höhen- und Lagegenauigkeiten der Schichtlinien für den überwiegenden Teil des Gletschers die Beziehungen

$$m_H = \pm (1+3 \times \text{tg}\alpha) [\text{m}] \quad \text{und} \quad m_L = \pm (3+1 \times \text{ctg}\alpha) [\text{m}]$$

(m_H ist der mittlere Fehler der Höhe, m_L der mittlere Fehler der Lage einer Schichtlinie, α ist die Neigung der Oberfläche.)

die etwa der graphischen Genauigkeit (in den Karten 0,3 mm) entsprechen. Auf darauf fußenden theoretischen Überlegungen sind die Angaben für Volumen- und Höhenänderungen mit Unsicherheiten von nicht mehr als 10% eines durchschnittlichen Wertes behaftet. Danach sind beispielsweise die Mittelwerte der Höhenänderungen genauer, als es die Schichtliniengenauigkeit zunächst erwarten läßt. Die Unsicherheiten liegen bei wenigen Dezimetern und für die Angaben pro Jahr bei wenigen Zentimetern. Verständlicher wird dies durch die Vorstellung, daß sich die Mittelwerte aus vielen Einzelmessungen entlang einer Höhenzone ergeben. Das kommt in diesem Falle einer vielfachen Wiederholung einer Einzelmessung gleich. Die Planimetrierunsicherheiten sind mit berücksichtigt. Diese haben ein geringes Gewicht. Darauf weisen die kleinen Widersprüche hin, die sich aus der gegenseitigen Abhängigkeit von Zonen-, Differenzflächen und Flächenänderungen am Gletscherand ergeben (zwei benachbarte Höhenzonen haben eine Differenzfläche gemeinsam, zwei Vergleichsdarstellungen die Höhenzonen eines Jahrganges). Die Widersprüche sind nach einem ausgleichenden Rechenverfahren auf die einzelnen Flächen verteilt. Diesen Genauigkeitsbetrachtungen widersprechen Differenzen, die sich aus der Gegenüberstellung gleicher Volumen- und Flächenangaben zum Vernagt- und Guslarferner 1889–1912 in der Arbeit von Richard Finsterwalder (1953) und zum Vernagtferner 1889–1936 bei H. Hoinkes (1969) ergeben. In beiden Fällen handelt es sich nachweislich um systematische Ungenauigkeiten. Richard Finsterwalder fehlten die maßhaltigen photographischen Kopien des Entwurfsoriginals von 1889. Er arbeitete mit der stark deformierten gedruckten Ausgabe, die beim Vergleich mit 1912 keine Werte hoher Genauigkeit erwarten ließ. Er berücksichtigte deshalb die 2 m Niveaudifferenz nicht gesondert. Außerdem hatte er keine Kontrollauswertung, die Korrekturen rechtfertigte. H. Hoinkes übernahm einerseits teilweise die Angaben nach Richard Finsterwalder, andererseits stellte die Kommission für Glaziologie, München, Zahlenwerte zur Verfügung. Dabei fiel die Volumensänderung 1938–1966, abschätzend von 3000 m Höhe bis zur obersten Gletschergrenze linear interpoliert, zahlenmäßig wesentlich zu hoch aus. Die Interpolation wäre hinsichtlich der zehnprozentigen Genauigkeit von 100 zu 100 m Höhe zulässig gewesen (bei den in diesem Heft angegebenen Zahlenwerten wurde eine Auswahl der Schichtlinien mit 50 m-Äquidistanz gewählt). Die unterschiedlichen Angaben zu gleichen Flächenänderungen sind durch Interpretationsabweichungen bedingt. Auf Volumen- und Höhenänderungen haben sie keinen bedeutenden Einfluß.

III. VERHALTEN DES VERNAGT- UND GUSLARFERNERS VON 1889–1969

Die mittleren jährlichen Höhenänderungen geben von den gewonnenen Zahlenwerten am sichersten Hinweise auf das Verhalten eines Gletschers. Sie beziehen sich für alle Höhenzonen auf ein und denselben Einheitswert (Volumen/1 m² × 1 Jahr) und lassen

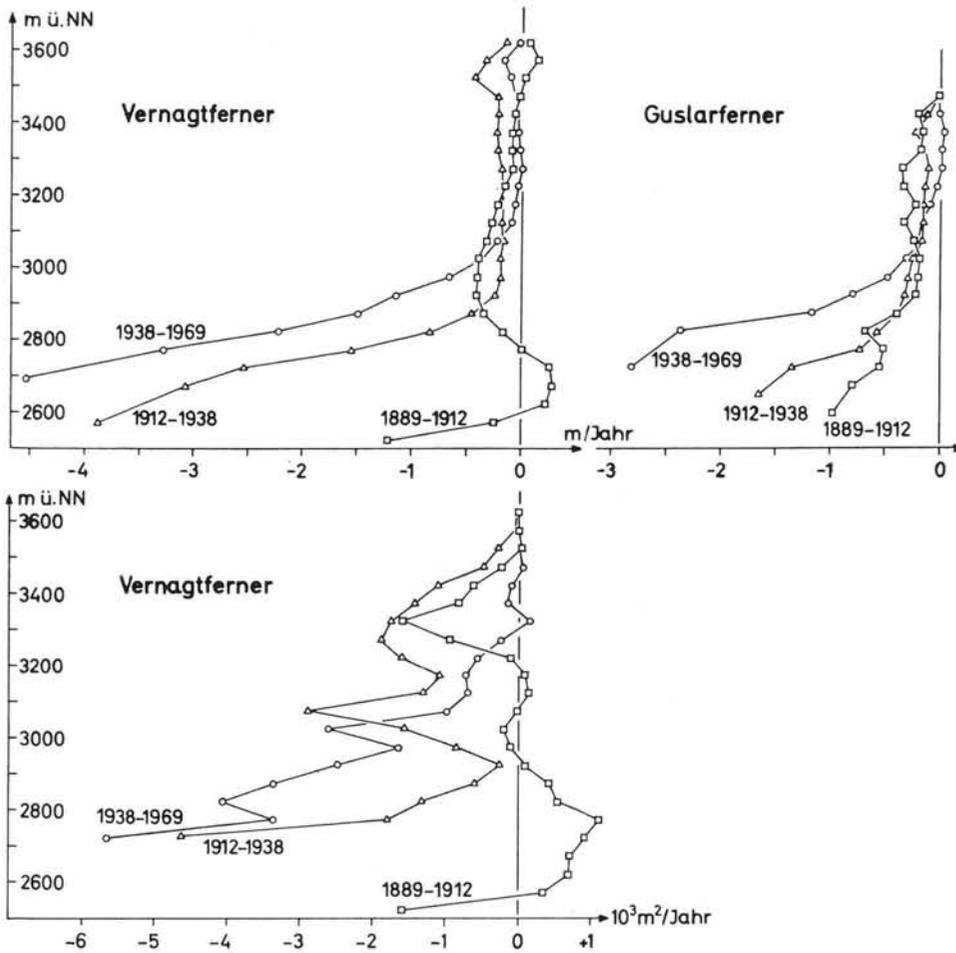


Abb. 4: Oben: mittlere jährliche Höhenänderungen dh der Gletscheroberfläche, bezogen auf die Zonenflächenmittel der Perioden.

Unten: mittlere jährliche Änderungen der Zonenflächen dF am Gletscherrand (eingeschlossen durch die Gletschergrenzen und die Schichtlinien des jüngeren Gletscherstandes).

deshalb eine detaillierte Deutung zu. Die graphische Darstellung (Abb. 4) soll die Sichtung dieser Werte erleichtern. Zunächst wird das Verhalten des Vernagtferners in den bezeichneten Perioden erläutert und danach der Guslarferner dementsprechend gegenübergestellt.

1. VERNAGTFERNER

In der Zeit von 1889—1912 zeigt er am Zungenende negative, im mittleren Zungenbereich von 2600 m bis nahezu 2800 m Höhe positive Höhenänderungen. In mittlerer Höhe von 2850—3200 m sind sie verstärkt negativ, während sie im oberen Bereich

Tabelle 1: Vernagtferner und Guslarferner:

Zonenflächen in 50m-Stufen für die Jahre 1889, 1912, 1938 und 1969.

Änderungen der Zonenflächen, des Volumens und mittlere Änderungen der Höhe der Gletscher-
oberfläche für die Perioden 1889–1912, 1912–1938 und 1938–1969.

Änderungen der Zonenflächen am Gletscherrand
in 10^3 m^2
(eingeschlossen durch die Gletschergrenzen
und die Schichtlinien des jüngeren Standes)

Zonenflächen in 10^3 m^2

Höhenzone	Vernagtferner				Guslarferner				Vernagtferner			Guslarferner		
	1889	1912	1938	1969	1889	1912	1938	1969	1889– 1912	1912– 1938	1938– 1969	1889– 1912	1912– 1938	1938– 1969
3650–3600	4	5	4	4					0	0	0			
3600–3550	12	12	10	8					0	- 1	0			
3550–3500	56	55	35	34					+ 1	- 8	0			
3500–3450	215	204	187	182	4	5	4	4	- 5	- 12	- 2	+ 1	- 1	0
3450–3400	314	292	252	251	32	27	23	22	- 14	- 29	- 3	0	- 1	- 1
3400–3350	366	348	304	298	70	71	53	51	- 19	- 37	- 5	+ 1	- 8	- 3
3350–3300	660	600	522	535	163	155	140	136	- 37	- 40	+ 5	0	- 17	- 4
3300–3250	1.138	1.101	1.039	1.039	246	207	203	200	- 22	- 49	- 8	- 9	- 1	- 2
3250–3200	1.280	1.199	1.144	1.082	242	263	237	218	- 2	- 41	- 18	- 3	- 15	- 10
3200–3150	1.422	1.392	1.368	1.345	342	318	315	285	+ 2	- 28	- 22	- 9	- 2	- 8
3150–3100	1.440	1.404	1.354	1.259	369	335	315	298	+ 3	- 34	- 22	- 12	- 21	- 7
3100–3050	1.376	1.369	1.304	1.192	501	519	432	378	0	- 75	- 31	+ 1	- 52	- 28
3050–3000	1.011	1.041	1.009	880	538	543	511	422	- 4	- 40	- 81	+ 3	- 18	- 49
3000–2950	670	746	776	638	464	487	443	367	- 3	- 22	- 51	+ 16	- 52	- 49
2950–2900	428	451	424	408	455	444	425	295	+ 2	- 7	- 77	0	- 9	- 44
2900–2850	293	343	303	230	366	332	318	233	+10	- 15	-104	- 9	- 38	-127
2850–2800	243	276	208	109	172	192	123	67	+12	- 34	-126	- 14	- 79	-129
2800–2750	192	237	135	55	101	116	93	10	+25	- 46	-105	- 12	- 27	-116
2750–2700	110	142	82	14	68	56	35		+20	- 120	-176	- 6	- 33	-104
2700–2650	132	143	20		50	38	1		+16	- 98	- 91	- 16	- 54	- 4
2650–2600	111	120			31	5			+16	- 163		- 37	- 14	
2600–2550	81	58			7				+ 8	- 136		- 9		
2550–2500	22	10							- 37	- 33				
Gesamt	11.576	11.548	10.480	9.563	4.227	4.113	3.671	2.986	-28	-1.068	-917	-114	-442	-685

Tabelle 1: Fortsetzung

Höhenzone	Änderungen des Volumens in 10 ⁹ m ³						Mittlere Änderungen in der Höhe der Gletscheroberfläche bezogen auf die Flächenmittel der Perioden in m und m/Jahr											
	Vernagtferner			Guslarferner			Vernagtferner						Guslarferner					
	1889- 1912	1912- 1938	1938- 1969	1889- 1912	1912- 1938	1938- 1969	1889-1912		1912-1938		1938-1969		1889-1912		1912-1938		1938-1969	
3650-3600	+ 7	- 14	0				+ 1,6	+0,07	- 3,0	-0,12	0,0	0,00						
3600-3550	+ 40	- 88	- 38				+ 3,4	+0,15	- 8,1	-0,31	- 4,3	-0,14						
3550-3500	+ 42	- 480	- 82				+ 0,8	+0,03	- 10,6	-0,41	- 2,4	-0,08						
3500-3450	- 100	- 960	- 150	0	0	0	- 0,5	-0,02	- 4,9	-0,19	- 0,8	-0,03	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00
3450-3400	- 435	- 1.335	- 152	- 125	- 78	0	- 1,4	-0,06	- 4,9	-0,19	- 0,6	-0,02	- 4,2	-0,18	- 3,1	-0,12	0,0	0,00
3400-3350	- 590	- 1.715	- 120	- 232	- 342	+ 60	- 1,7	-0,07	- 5,3	-0,20	- 0,4	-0,01	- 3,3	-0,14	- 5,5	-0,21	+ 1,2	+0,04
3350-3300	- 1.138	- 2.800	+ 72	- 532	- 498	+ 102	- 1,8	-0,08	- 5,0	-0,19	+ 0,1	0,00	- 3,7	-0,16	- 3,4	-0,13	+ 0,7	+0,02
3300-3250	- 2.132	- 4.150	+ 472	- 1.695	- 518	+ 92	- 1,9	-0,08	- 3,9	-0,15	+ 0,5	+0,02	- 7,5	-0,33	- 2,5	-0,10	+ 0,5	+0,02
3250-3200	- 4.460	- 4.878	- 435	- 1.842	- 865	- 122	- 3,6	-0,16	- 4,2	-0,16	- 0,4	-0,01	- 7,3	-0,32	- 3,5	-0,13	- 0,5	-0,02
3200-3150	- 7.200	- 5.110	- 1.568	- 1.632	- 1.178	- 860	- 5,1	-0,22	- 3,7	-0,14	- 1,2	-0,04	- 4,9	-0,21	- 3,7	-0,14	- 2,9	-0,09
3150-3100	- 8.935	- 5.408	- 3.480	- 2.558	- 1.178	- 1.642	- 6,3	-0,27	- 3,9	-0,15	- 2,7	-0,09	- 7,3	-0,32	- 3,6	-0,14	- 5,4	-0,17
3100-3050	- 10.015	- 5.552	- 7.378	- 2.710	- 2.045	- 2.565	- 7,3	-0,32	- 4,2	-0,16	- 5,9	-0,19	- 5,3	-0,23	- 4,3	-0,16	- 6,3	-0,20
3050-3000	- 9.252	- 5.062	- 10.595	- 2.265	- 3.290	- 4.240	- 9,0	-0,39	- 4,9	-0,19	- 11,2	-0,36	- 4,2	-0,18	- 6,2	-0,24	- 9,1	-0,29
3000-2950	- 6.498	- 3.472	- 13.975	- 2.062	- 3.442	- 5.950	- 9,2	-0,40	- 4,6	-0,18	- 19,7	-0,64	- 4,3	-0,19	- 7,4	-0,28	- 14,7	-0,47
2950-2900	- 4.108	- 2.632	- 14.635	- 2.168	- 3.518	- 8.788	- 9,4	-0,41	- 6,0	-0,23	- 35,1	-1,13	- 4,8	-0,21	- 8,1	-0,31	- 24,4	-0,79
2900-2850	- 2.540	- 3.778	- 12.320	- 3.050	- 3.210	- 9.870	- 8,0	-0,35	- 11,7	-0,45	- 46,2	-1,43	- 8,7	-0,38	- 9,9	-0,38	- 35,9	-1,16
2850-2800	- 1.000	- 5.252	- 10.882	- 2.800	- 2.355	- 6.998	- 3,9	-0,17	- 21,7	-0,83	- 68,6	-2,21	- 15,4	-0,67	- 14,9	-0,57	- 73,5	-2,37
2800-2750	+ 5	- 7.470	- 9.605	- 1.278	- 1.995	- 4.358	0,0	0,00	- 40,1	-1,54	- 101,0	-3,26	- 11,8	-0,51	- 19,1	-0,73		
2750-2700	+ 758	- 7.362	- 6.275	- 760	- 1.602	- 1.815	+ 6,0	+0,26	- 65,9	-2,53			- 12,3	-0,54	- 35,0	-1,35	- 88,7	-2,81
2700-2650	+ 882	- 6.518	- 1.788	- 792	- 878	- 19	+ 3,4	+0,28	- 79,9	-3,07	- 140,0	-4,52	- 18,1	-0,79	- 43,4	-1,67		
2650-2600	+ 575	- 6.098		- 408	- 81		+ 5,0	+0,22					- 22,3	-0,97				
2600-2550	- 390	- 3.078		- 65			- 5,6	-0,24	- 100,6	-3,87								
2550-2500	- 450	- 280					- 28,0	-1,22										
Gesamt	-56.934	-83.492	-92.924	-27.034	-27.073	-46.973	- 4,9	-0,21	- 7,6	-0,29	- 9,3	-0,30	- 6,5	-0,28	- 7,0	-0,27	- 14,1	-0,46

bis zum Gletscherrand nur auf geringe Verluste hinweisen. Diese Verteilung unterscheidet sich bis auf den oberen Bereich deutlich von den Verteilungen der Perioden 1912—1938—1969, die ähnlich verlaufen. Dementsprechend hat die Zunge 1912 bis 1938 hohe Verluste, die in der Zeit von 1938—1969 sich noch steigern. Bei 3100 m ist für beide Perioden das Einsinken gleich groß und stark reduziert. Von da ab weiter aufwärts wird diese Größenordnung nahezu beibehalten. In der jüngsten Periode sind dabei überwiegend die geringsten Verluste zu verzeichnen, die stärksten treten in der Zeit von 1912—1938 auf.

Nachdem der Vernagtferner von 1889—1897 zurückgegangen war, fand von 1898 bis 1902 ein Vorstoß von einem Kilometer am Zungenende statt (H. Heß, 1904, S. 296 bis 301 sowie S. Finsterwalder und H. Heß, 1926). Im Jahre 1912 war noch ein Rest der vorgestoßenen Eismasse vorhanden, die das Firnbecken vorwiegend im mittleren Gletscherbereich teilweise entleert hatte. Danach setzte der Gletscherrückgang ein, der sich bis 1969 — von geringen Schwankungen abgesehen — fortsetzte. Die Zunge erhielt keinen außergewöhnlichen Nachschub mehr und schmolz rasch ab. Der um 1920 bei vielen Alpengletschern beobachtete Vorstoß blieb beim Vernagtferner aus. Allerdings war ein verzögerter Rückgang zu beobachten.

2. GEGENÜBERSTELLUNG DES GUSLARFERNERS

Der Guslarferner zeigt in den Perioden 1912—1938—1969 nahezu gleiche Tendenzen wie der Vernagtferner. Nur in der Zeit von 1912—1938 ist in mittlerer Höhe von 2900—3050 m ein stärkeres Einsinken und auf der Zunge bis 2800 m ein geringer Verlust zu verzeichnen. Beide Erscheinungen sind nicht besonders ausgeprägt. Dagegen unterscheidet sich in der Periode 1889—1912 die Verteilung der mittleren jährlichen Höhenänderungen beider Gletscher erheblich. Die Zunge des Guslarfeners hat nur negative Höhenänderungen, die in der Höhe von 2700 bis 2800 m etwas abgeschwächt sind. Im mittleren Gletscherbereich von 2900—3100 m ist das Einsinken geringer, nach oben hin ab 3200 m Höhe etwas größer als beim Vernagtferner. Den Perioden 1912—1938—1969 des Guslarfeners ist jedoch diese Verteilung angeglichen. Lediglich hat er in der Periode 1889—1912 gegenüber den Vergleichsperioden von 3050 m Höhe bis zur Zunge hin geringere und nach oben hin höhere Verluste. Wie beim Vernagtferner hat die jüngste Periode von 3100 m Höhe aufwärts die kleinsten Rückgangsraten.

Der Guslarferner hatte in der Zeit von 1898 bis 1900 nur eine kleine Anschwellung der Zunge zu verzeichnen (S. Finsterwalder und H. Heß, 1926). Lediglich geringe Mengen Eis flossen aus dem gesamten Firngebiet nach unten. Ebenso ist ein kleiner Vorschub 1920 an Hand der liegendebliebenen Moränen nachweisbar. Der Schub muß aus dem mittleren Gletscherbereich gekommen sein.

Bleibt zum Schluß noch zu erwähnen, daß Volumens- und Flächenänderungen zur Beurteilung des Gesamtverhaltens eines Gletschers wertvolle Hinweise geben. Für eine eingehendere Erfassung des Verhaltens eines Gletschers über eine Zeitperiode eignen sich jedoch die mittleren jährlichen Höhenänderungen als spezifische Werte bedeutend besser.

Dies soll auch aus der Gegenüberstellung der Abb. 4 unten — mittlere jährliche Zonenflächenänderungen am Gletscherrand — mit Abb. 4 oben — mittlere jährliche Höhenänderungen — entnommen werden. Um diesen Vergleich der beiden Abbildungen zu erleichtern, wurde ein geeigneter Umrechnungsfaktor gewählt. Flächen- und Volumensänderungen berücksichtigen die unterschiedliche Länge und Breite der

Höhenzonen ebensowenig, wie die Neigungsverhältnisse des Untergrundes am Gletscherrand. Außerdem sind diese Änderungen mit einer etwaigen Lageverschiebung der einzelnen Zonen korreliert. Solche Lageverschiebungen einer Zone können sich aber wegen Änderung der Neigungsverhältnisse innerhalb einer Zone und am Gletscherrand auf die Größe der Flächen- und Volumenswerte auswirken.

IV. KARTOGRAPHISCHE DARSTELLUNG DER SCHWANKUNGEN DES VERNAGT- UND GUSLARFERNERS

Die Veränderungen des Vernagtferners (einschließlich Guslarferner) zwischen 1889 und 1969 wurden in drei Kartenblättern im Maßstab 1:10.000 dargestellt, und zwar

- Blatt 1: die Periode von 1889—1912,
- Blatt 2: die Periode von 1912—1938,
- Blatt 3: die Periode von 1938—1969.

Die Darstellung in drei Blättern wurde gewählt, da ein Kartenblatt mit den insgesamt vier Gletscherständen unleserlich geworden wäre. Weiters ist so eine Fortsetzung der Gletscherstandskarten möglich.

Die einzelnen Kartenblätter sind so gestaltet, daß die Gletschergrenze und die Höhenschichtlinien (Äquidistanz 50 m) des jeweils älteren Gletscherstands schwarz, diejenigen des jüngeren blaugrün dargestellt sind. Fallen Gletschergrenze beziehungsweise Höhenschichtlinien (gleicher Meereshöhe) beider Stände zusammen, erhielten sie die schwarze Farbe des jeweils älteren Gletscherstands. Für das eisfreie Umland wurde in der gleichen Äquidistanz eine Höhenschichtliniendarstellung in grauer Farbe gedruckt; die zwischen den Zeitpunkten der beiden Aufnahmen des Gletschers eisfrei gewordenen Gebiete sind ebenfalls mit grauen Höhenschichtlinien dargestellt. Entsprechend sind im Falle der Vergrößerung der Gletscherfläche die Schichtlinien des einstmals eisfreien Geländes in grauer Farbe ausgewiesen; dies tritt insbesondere im Blatt 1 (1889—1912) an den Flanken der Zunge des Vernagtferners auf.

Die Flächenänderung des Gletschers und die Änderung der Gletscherdicke zwischen den beiden Gletscherständen in den einzelnen Kartenblättern wurde mit Farbbändern veranschaulicht. Die Darstellung der Änderung der Gletscherdicke (Differenzflächen) mittels Farbbändern erfolgte nur bei den 100m-Schichtlinien, um eine Überlagerung der Farbbänder (auf den beiden Zungen) zu vermeiden. Im Bereich des zwischen den beiden Gletscherständen eines Kartenblatts eisfrei gewordenen Gebiets sind die Farbbänder zur Darstellung der Änderung der Gletscherdicke einerseits durch die grauen Höhenschichtlinien des eisfreien Gebietes und andererseits durch die Schichtlinien desjenigen Gletscherstands, der die größte Mächtigkeit aufweist, begrenzt. Dies tritt insbesondere bei den beiden Gletscherzungen auf. Die Bänder erhielten im Falle der Abnahme der Gletscherfläche und der Gletscherdicke eine blaugrüne, im Falle der Zunahme eine rote Flächentönung. Die Bänder, die die Änderung der Gletscherflächen (Flächen zwischen den Gletschergrenzen beider Gletscherstände) aufzeigen, wurden in jeweils helleren, die Bänder, die die Änderung der Gletscherdicke zeigen, in dunkleren Flächenfarben gedruckt.

Neben den aufgeführten Gletscherständen enthalten die drei Kartenblätter noch Zungenlagen weiterer Zeitpunkte. Im Blatt 1 (1889—1912) sind die Lagen der Zungen von Vernagt- und Guslarferner von 1895 nach A. Blümcke und H. Heß (1897), im Blatt 2 (1912—1938) die Zungenlagen von 1929 nach H. Heß (1930) und

von 1934 nach H. Schatz (1935) wiedergegeben. Im Blatt 3 (1938—1969) sind die Zungenlagen von 1949 und 1958 eingezeichnet; letztere stellen eine Auswahl aus einer größeren Anzahl von Zungenlagen dar, die nach dem zweiten Weltkrieg von H. Schatz und H. Schneider bestimmt wurden und bisher unveröffentlicht blieben.

Wertvolle Anregungen für die Gestaltung der drei Kartenblätter als Ausdrucksmittel für Gletscherschwankungen waren die Karte des Aletschgletschers, Maßstab 1:25.000 (erschienen 1966) und die Karte des Mattmarkgletschers, Maßstab 1:10.000 (erschienen 1971). Beide Karten sind herausgegeben von der Eidgenössischen Landestopographie Wabern-Bern und der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (Beilagen zu P. Kasser, 1967 und P. Kasser, in Druck). Die Karte des Aletschgletschers stellt die Gletscherschwankungen einer Periode von 30 Jahren (1926/27—1957) dar. Die Änderungen der Gletscherdicke ist auch hier mittels Farbbändern, und zwar an allen Höhenschichtlinien (Äquidistanz 100 m) aufgezeigt. Durch den geringen Horizontalabstand der 100-m-Schichtlinien im Maßstab 1:25.000 treten allerdings auf den Zungen Überlappungen der Farbbänder auf. Die Gletschergrenzen der beiden Gletscherstände sind punktiert dargestellt, was die Karte etwas schwer lesbar macht. In der Karte des Mattmarkgletschers sind zwei Gletscherstände (1956—1967) mit vollständiger Höhendarstellung (Äquidistanz 10 m) zusammengedruckt. Die Farbbänder an den Höhenschichtlinien zur Darstellung der Schwankungen der Gletscherdicke sind jeweils an den 50-m-Schichtlinien zu finden. Da die Periode mit 11 Jahren gering ist, bleiben die Farbbänder schmal. Neben den Gletschergrenzen (ausgezogene Linien) sind zusätzlich noch Schneeflächengrenzen (eng punktiert) wiedergegeben. Eine Darstellung der Flächenänderungen des Gletschers mittels Farbbänder wurde bei den beiden Karten nicht angewendet. Nachteilhaft erscheint die Tatsache, daß das unvergletscherte Umland in der selben Farbe wie einer der beiden Gletscherstände dargestellt ist. Einheitlich sind in beiden Karten die Farbbänder zur Veranschaulichung der Zunahme der Gletscherdicke grün, die der Abnahme gelb gedruckt. Diese Farbgebung wurde bei den Karten des Vernagtferners nicht übernommen, um die Anzahl der Druckplatten gering zu halten.

Insgesamt sind die beschriebenen Gletscherkarten aus der Schweiz inhaltsreicher (kleine Äquidistanz in Bezug auf den Maßstab) als die entsprechenden Kartenblätter des Vernagtferners. Da gleichzeitig mit den Gletscherstandskarten des Vernagtferners eine topographische Karte des Vernagtferners im Maßstab 1:10.000 mit dem Gletscherstand von 1969 erschien, konnte man sich bei den drei Gletscherstandskarten auf eine Äquidistanz von 50 m beschränken. Die Karten gewinnen dadurch an Lesbarkeit.

Die kartographische Bearbeitung der Karten wurde durch einen Sachbeitrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bonn-Bad Godesberg, ermöglicht, die Mittel für den Druck der Kartenblätter stellte die Gesellschaft der Freunde der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, zur Verfügung. Beiden Institutionen sei für die gewährte Unterstützung gebührend gedankt.

LITERATUR

- Blümcke, A. u. H. Heß, 1897: Die Nachmessungen am Vernagtferner. Anhang zu Finsterwalder, S., 1897: Der Vernagtferner. Wissenschaftl. Erg. hefte z. Zeitschr. d. D. u. Ö. Alpenvereins, 1. Bd., 1. Heft, S. 99—112.
- Finsterwalder, Richard, 1953: Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückgangs an Ostalpengletschern. Z. f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie Band II, Heft 2, S. 189—239.
- Finsterwalder, Rüdiger, 1972: Begleitwort zur Karte des Vernagtferners 1:10.000 vom Jahre 1969, Z. f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie, Band VIII, Heft 1—2, S. 5—10.
- Finsterwalder, S., 1897: Der Vernagtferner. Wissenschaftliche Ergänzungshefte zur Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, 1. Band — 1. Heft, S. 1—96, Graz.
- Finsterwalder, S. u. H. Heß, 1926: Über den Vernagtferner. Festschrift zum fünfzigjährigen Bestehen der Sektion Würzburg des Deutschen u. Österreichischen Alpenvereins, S. 30—41, Würzburg.
- Gruber, Otto von, 1939: Zur Frage der Bibliographie für Photogrammetrie. Photogrammetria, Nr. 1, S. 78—86.
- Heß, H., 1904: Die Gletscher. F. Vieweg, Braunschweig.
- Heß, H., 1930: Beobachtungen am Hintereis- und Vernagtferner 1919—1929. Z. f. Gletscherkunde, Band XVIII, S. 220—226.
- Heß, G., 1942: Professor Dr. Otto von Gruber gestorben. Photogrammetria, Nr. 2, S. 35—41.
- Hoinkes, H., 1969: Surges of the Vernagtferner in the Ötztal Alps since 1599. Canadian Journal of Earth Sciences, Volume 6, Number 4, S. 753—861.
- Kasser, P., 1967: Fluctuations of Glaciers 1959—1965. International Association of Scientific Hydrology and UNESCO.
- Kasser, P. (im Druck): Fluctuations of Glaciers, Volume 2, 1965—1970. International Association of Scientific Hydrology and UNESCO.
- Schatz, H., 1935: Nachmessungen am Hintereis- und Vernagtferner im Sommer 1934. Z. f. Gletscherkunde, Band XXIII, 1935, S. 108—114.

Manuskript eingegangen am 24. Juli 1972.

Anschrift der Verfasser: Dipl.-Ing. Kurt Brunner
Technische Universität München
Institut für Photogrammetrie und Kartographie, Arcisstraße 21,
D-8000 München 2
Dipl.-Ing. Hermann Rentsch
Kommission für Glaziologie der
Bayerischen Akademie der Wissenschaften
Marstallplatz 8, D-8000 München 22

ERGEBNISSE VON MESSUNGEN MIT DER METHODE DER REFRAKTIONS-SEISMIK AUF DEM VERNAGT- UND GUSLARFERNER

Von HEINZ MILLER, München

Mit 7 Abbildungen und einer Kartenbeilage

ZUSAMMENFASSUNG

Im August 1966 und im September 1967 wurden von einer Arbeitsgruppe des Instituts für Angewandte Geophysik der Ludwig Maximilians Universität München auf dem Vernagt- und Guslarferner in den Ötztaler Alpen Messungen mit der Methode der Refraktions-Seismik durchgeführt, um das Volumen der Gletscher und die Form des Untergrundes zu bestimmen. Die Auswertung wurde im wesentlichen nach Standard-Verfahren durchgeführt und auf ein Zweischicht-Modell beschränkt. Es wurde entlang von Profilen mit einer Gesamtlänge von etwa 26 km gemessen und ein Schichtlinienplan des Untergrundes konstruiert. Dieser Plan diente zusammen mit der Karte der Oberfläche von 1966 zur Bestimmung des Volumens. Es beträgt 635 Mill. m³. Davon entfallen 567 Mill. m³ auf den Vernagtferner und 68 Mill. m³ auf den Guslarferner. Das heutige Volumen ist etwa halb so groß wie zur Zeit der größten Ausdehnung der beiden Gletscher um 1845. Der Volumenrückgang konnte anhand von vier Karten der Oberfläche aus den Jahren 1889, 1912, 1938 und 1966 bestimmt werden. Es zeigt sich ferner, daß die beiden Gletscher seit 1845 immer nach dem gleichen Verhältnis (87% der Vernagtferner und 13% der Guslarferner) Masse zur Gesamtmasse des Systems beisteuern. Die beiliegende Karte „Vernagtferner: Gletscherbett und geologische Übersicht“ zeigt in einem Zusammendruck die Ergebnisse petrographischer und refraktions-seismischer Untersuchungen. Man findet im Gebiet des Vernagtfernern drei Gesteinstypen: Amphibolite, Biotit-Plagioklas-Gneise und mineralreiche Glimmerschiefer. Eine Korrelation der seismischen Geschwindigkeiten mit den Gesteinskörpern konnte nicht gefunden werden.

RESULTS OF REFRACTION SEISMOLOGY ON VERNAGTFERNER AND GUSLARFERNER

SUMMARY

In August 1966 and in September 1967 refraction-seismic measurements have been carried out by a team of the Institute for Applied Geophysics of the University of Munich on the Vernagtferner and Guslarferner in the Ötztal Alps with the aim to determine the volume, and to obtain bedrock topography for the whole area covered with ice as accurately as possible. Both glaciers are known as surging glaciers, at such a time forming one common tongue. Total length of refraction profiles is approximately 26 km and some 200 shots with charges between 0.25 and 15 kg were fired. Assuming a two layer model a bedrock contour map was drawn and the volume obtained as of 1966. Due to interpolation between the profiles and due to the limits of accuracy imposed by the refraction method the small scale topography of course is lost, but the large scale one should be preserved.

The bedrock map shows some prominent similar features of bottom topography. Both glaciers have a threshold structure at approximately the same elevation. There is a deep basin behind the threshold on the Guslarferner (some 50 m) and a shallower one on the Vernagtferner with a depth of up to 25 m. Both thresholds are situated where the glacier basin becomes narrower and both are in the region of the equilibrium line of the glaciers during quiet periods between surges. Total volume in 1966 was calculated to be 635×10^6 m³, with 567×10^6 m³ for the Vernagtferner and 68×10^6 m³ for the Guslarferner. This volume is about half of that in 1845. Always since 1845 the ratio of the volumes of both glaciers has remained constant (Vernagtferner 87 per cent, Guslarferner 13 per cent). This is interesting to note, since it clearly shows that both glaciers form an "inphase" system although their exposition is quite different. The error in ice thickness for a single point on the glacier is 15 per cent at the most, the value for the volume however is estimated to be accurate within 10 per cent since summing over a large number of single values reduces the statistical error inherent in evaluating refraction-seismic profiles.

The accompanying map „Vernagtferner: bedrock contour and lithological sketch map ” is a composite print of petrographic and refraction-seismic data. There are three different types of bedrock: amphibolites, gneiss, rich in biotite and plagioclase, and mica schists. These rocks form the major constituents of three zones (bounded by dashed lines in the map). No correlation is found between zones of different rock units and velocities of seismic waves, which are also shown in the map as red numbers alongside the seismic profiles. Each number gives the mean p-wave velocity in meters per second for the particular profile. The blue lines are contour lines for the glacier surface as of 1969, allowing the reader to obtain ice thickness for each point on the glacier. These data however will be accurate only to ± 20 per cent due to the uncertainty inherent in the interpretation of refraction seismic data of this particular kind.

EINLEITUNG

In der Gletscherforschung treten immer wieder spezielle Probleme auf, zu deren Lösung die Kenntnis der Eismächtigkeiten beziehungsweise der Form des Gletscherbettes einen Beitrag liefern kann. Eines dieser Probleme ist das der Gletscherbewegung und insbesondere das der surges.

Vernagt- und Guslarferner sind bekannt dafür, daß sie viermal während der letzten 350 Jahre Vorstöße mit surge Charakter unternommen haben. Diese Vorstöße sind sehr gut dokumentiert. An anderer Stelle ist ausführlich über den Ablauf dieser surges berichtet (S. Finsterwalder, 1897; H. Hoinkes, 1969; H. Miller, 1968). Darüberhinaus gibt es Karten der Oberfläche beider Gletscher aus den Jahren 1889, 1912, 1938, 1966 und 1969. Diese Karten bilden eine hervorragende Grundlage zum Studium der Veränderungen beider Gletscher während der letzten 100 Jahre. Allerdings kann auf der Grundlage der Karten allein nur die relative Veränderung bestimmt werden. Die Ergänzung der vorhandenen Daten durch eine Volumenbestimmung ermöglicht Aussagen über die gesamte Veränderung.

Die Theorie der Gletscherbewegung ist soweit entwickelt, daß es möglich ist, auch dreidimensionale Modellrechnungen durchzuführen (W. J. Campbell und L. A. Rasmussen, 1969; W. F. Budd und D. Jenssen, 1971). Diese Modellrechnungen können dann auf einen wirklichen Gletscher angewandt werden bzw. daran geprüft werden, wenn unter anderem die Topographie des Gletscherbettes bekannt ist. Hierfür scheinen Vernagt- und Guslarferner besonders geeignet, da lange Beobachtungsreihen vorliegen, aus denen Volumensänderungen und zum Teil auch Fließgeschwindigkeiten bestimmt werden können. Die vorliegende Untersuchung hatte zum Ziel, die noch fehlenden Parameter—Topographie des Gletscherbettes und gegenwärtiges Gesamtvolumen — zu bestimmen.

FELDDARBEITEN

Die Feldarbeiten wurden im August 1966 und im September 1967 von einer Gruppe des Instituts für Angewandte Geophysik der Ludwig-Maximilians-Universität München durchgeführt. Die Lage der Profile und Sprengpunkte ist aus Abb. 1 ersichtlich. Es war versucht worden, möglichst die gesamte Fläche der beiden Gletscher zu erfassen. Die Profile wurden so angeordnet, daß viele Kreuzungspunkte entstanden, die der Kontrolle bei der Auswertung dienen sollten.

Die Sprengpunkte sowie einzelne Zwischenpunkte auf den Profilen wurden durch Vorwärts-Einschnitte von bekannten und im österreichischen Landeskoordinaten-Netz festgelegten Punkten aus eingemessen. Damit sind die Profile ihrer Lage und Höhe nach bestimmt. Als Sprengstoff wurde hauptsächlich Gelatine Donarit I und Adhaesit, ein Plastiksprengstoff, verwendet. In den Firngebieten wurde die Ladung

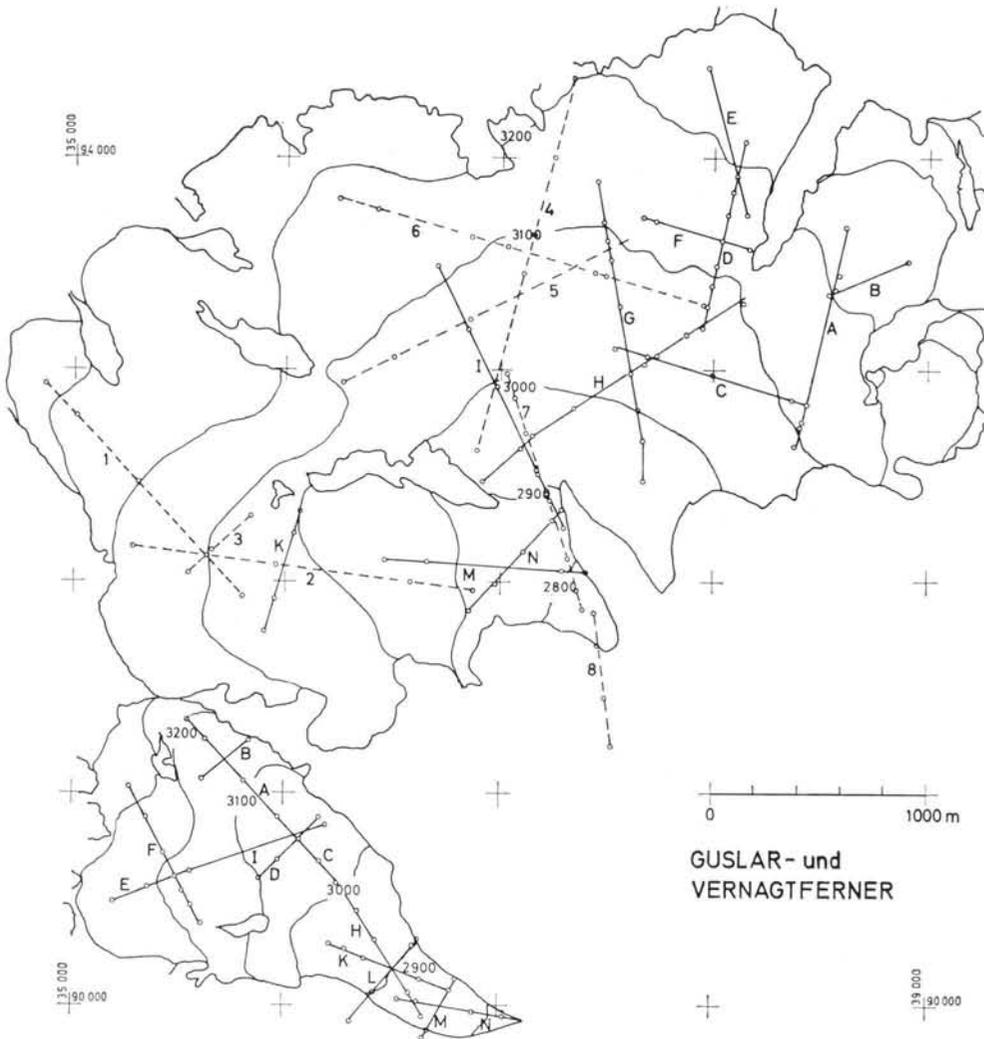


Abb. 1: Lageplan der Profile.

Die Profile aus dem Jahr 1966 sind durch gestrichelte Linien und Zahlen, die von 1967 durch ausgezogene Linien und Buchstaben gekennzeichnet. Die Kreise geben die Sprengpunkte wieder.

fig. 1: Map showing the location of the refraction profiles.

The profiles of 1966 are marked by dashed lines and numbers, the ones of 1967 by solid lines and letters. Circles indicate shotpoints.

etwa 1 Meter tief vergraben, in den schneefreien Bereichen brachten bereits Aufleger so gute Ergebnisse, daß auf das Bohren von Löchern verzichtet werden konnte.

1966 wurde eine 12spurige Aufnahmeapparatur (Eigenbau des Instituts für Angewandte Geophysik) mit Lichtschreiber und Galvanometern verwendet, 1967 8 Ein-

heiten von MARS 66 (Magnetband-Apparatur für Refraktions-Seismik. H. Berckhmer, 1970). Insgesamt standen 24 Kanäle zur Verfügung, von denen einer für die Registrierung des Sprengmomentes verwendet wurde. Somit konnten bei jeder Sprengung 23 seismische Spuren registriert werden. Als Schwingungsaufnehmer dienten bei beiden Meßkampagnen Hall-Sears Geophone, Typ HS-1 mit einer Eigenfrequenz von 4,5 HZ.

MESSPRINZIP UND AUSWERTEVERFAHREN

Das Verfahren der Refraktions-Seismik beruht darauf, daß an einer Grenzfläche im Untergrund, an der die Ausbreitungs-Geschwindigkeit seismischer Wellen sprunghaft nach unten zunimmt, sogenannte Mintrop- oder Schmidt'sche Kopfwellen entstehen, die an dieser Grenzfläche mit der Geschwindigkeit der tieferen Schicht geführt werden. Da die Geschwindigkeit der zweiten größer ist als die der ersten Schicht, wird diese geführte Welle ab einer bestimmten Entfernung vom Sprengpunkt die allein in der ersten Schicht gelaufene Welle überholen und den ersten Einsatz im Seismogramm erzeugen. Die Abb. 2 zeigt dieses Überholen in einer Seismogramm-Montage. Mit zunehmender Entfernung vom Schußpunkt rückt der zweite Einsatz im Seismogramm immer näher an den ersten heran, bis in etwa 450 m Entfernung die geführte Welle den Ersteinsatz erzeugt. Für ebene Grenzflächen und konstante Geschwindig-

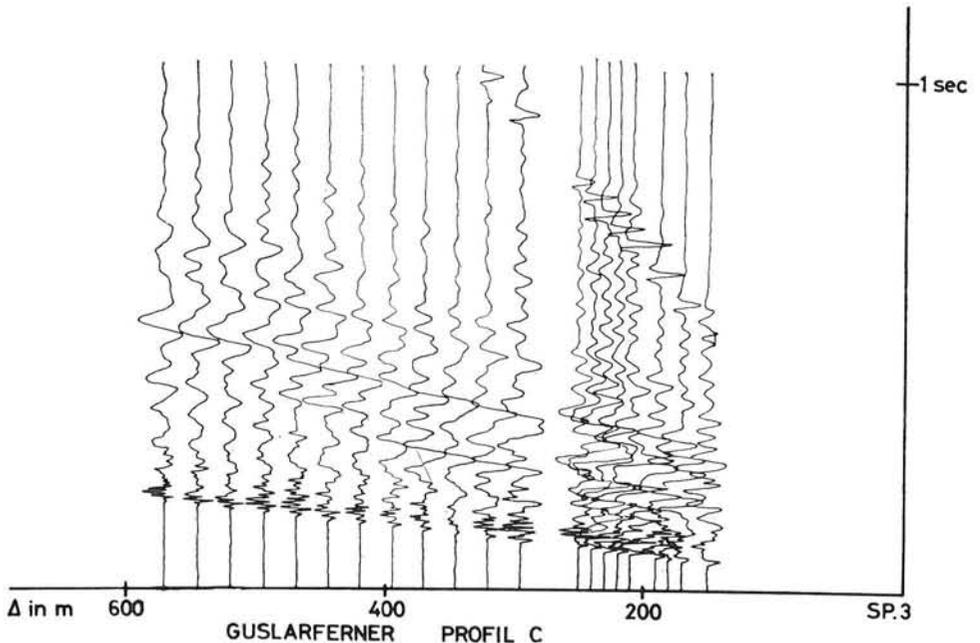


Abb. 2: Seismogramm-Montage der Sprengung am Schußpunkt GC3.
fig. 2: Seismogram-section of the shot at shotpoint 3 on profile C in the middle part of Guslarferner showing arrivals of the refracted wave becoming first arrivals at shotpoint-receiver distance of approximately 450 meters.

keit läßt sich alleine aus dieser Überholentfernung die Mächtigkeit der ersten Schicht bestimmen. Zur Festlegung geneigter Grenzflächen benötigt man Sprengungen an beiden Enden eines Profils. So lassen sich auch Grenzflächen mit Morphologie bestimmen. Hierfür gibt es verschiedene Auswerteverfahren die auf einer Rekonstruktion entweder der Wellenstrahlen oder der Wellenfronten beruhen. Für die Auswertung der vorliegenden Messungen wurde ein Verfahren verwendet, das die Abweichungen von einer mittleren Grenzfläche bestimmt, die als eben angenommen wird. Dieses Verfahren der Verzögerungs-Zeiten ist ausführlich bei H. Miller (1968) beschrieben. Das Auflösungsvermögen aller refraktions-seismischen Verfahren bezüglich der Unregelmäßigkeiten der Grenzflächen ist beschränkt und hängt im wesentlichen von der Frequenz des erzeugten Signals und vom Geophonabstand ab. Je hochfrequenter das Signal, umso kürzer ist die Wellenlänge, und umso genauer lassen sich bei genügender Bandbreite der Registrierapparatur (L. C. Pakiser und J. S. Steinhart, 1964) die Einsatz-Zeiten festlegen. Je geringer der Geophonabstand, umso mehr Information fällt an.

Auf den Profilen des Jahres 1966 betrug der Geophonabstand zwischen 75 und 100 m, im Jahre 1967 zwischen 10 und 25 m. Allgemein kann gesagt werden, daß die Morphologie des Untergrundes durch das Auswerteverfahren abgeflacht erscheint. Unregelmäßigkeiten, deren Länge in Profilrichtung kleiner als etwa 20 m ist, können nicht erkannt werden.

DIE AUSBREITUNGS-GESCHWINDIGKEITEN DER LONGITUDINALWELLEN IM EIS UND IM UNTERGRUND

Für eine möglichst genaue Auswertung ist ein großer Unterschied in den Geschwindigkeiten zwischen dem Liegenden und Hangenden wünschenswert. Für den Guslar- und Vernagtferner trifft dies leider nicht zu. Die Ausbreitungs-Geschwindigkeiten liegen für den Untergrund zwischen 4000 und 5100 m/sec. Die Werte für das Eis liegen zwischen 3000 und 3700 m/sec. F. Thyssen (1967) gibt für Gletscher und Inlandeise eine Formel an, die die Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit V in Abhängigkeit von der Eismächtigkeit angibt:

$$V = 3.75 - 0.5 \times e^{-9 \times 10^{-5} \nu H} \text{ in km/sec}$$

mit: ν dominierende Frequenz des ersten Impulses im Seismogramm und

H: Eismächtigkeit in Metern.

Bedingung für die Gültigkeit dieser Formel ist jedoch, daß sich im Gletscher nicht eine Raumwelle ausbreitet, sondern eine Plattenwelle, die dann entstehen kann, wenn die Mächtigkeit des Hangenden vergleichbar mit der Wellenlänge wird. Wie E. Brückl, G. Gangl und P. Steinhauser (1971) am Hallstätter Gletscher nachgewiesen haben, muß es nicht zur Ausbildung einer Plattenwelle kommen. Zwar liegt für den Vernagt- und Guslarferner die durchschnittliche Wellenlänge — abgeleitet aus der dominierenden Frequenz des ersten Einsatzes und der Ausbreitungsgeschwindigkeit — zwischen 45 und 90 m, und ist damit durchaus vergleichbar mit der Mächtigkeit; dennoch wird auf die Korrektur der Geschwindigkeit nach der obigen Formel verzichtet, da der Einfluß der doch relativ mächtigen Firnbedeckung auf die Geschwindigkeiten sich nicht quantitativ fassen läßt und sehr viel größer ist, als die anzubringende Korrektur.

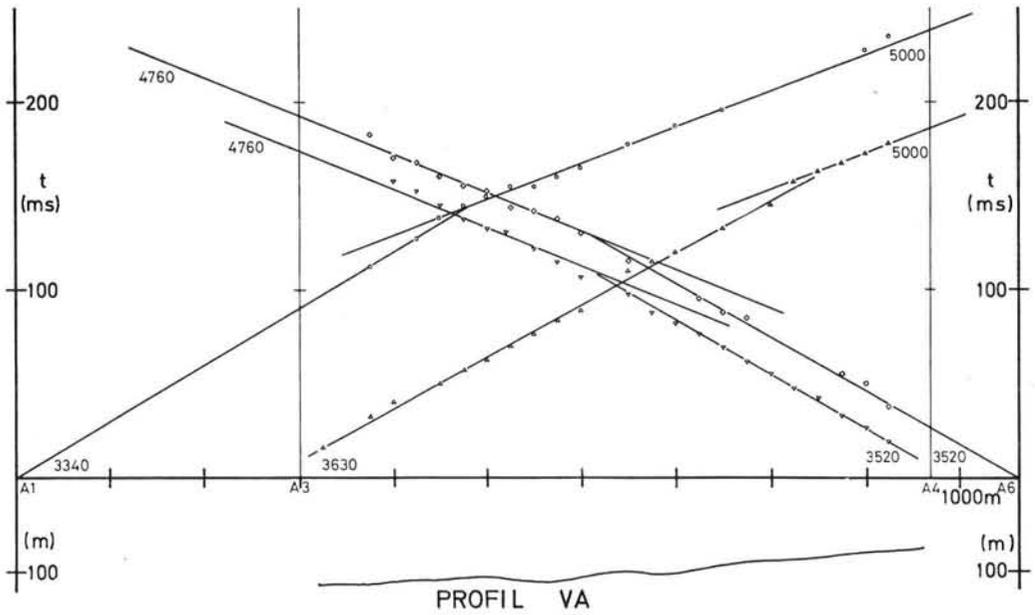


Abb. 3: Laufzeitdiagramm des Profils A auf dem Vernagtferner.

fig. 3: Travel-time diagram of profile A on the Vernagtferner. This diagram is representative of most profiles.

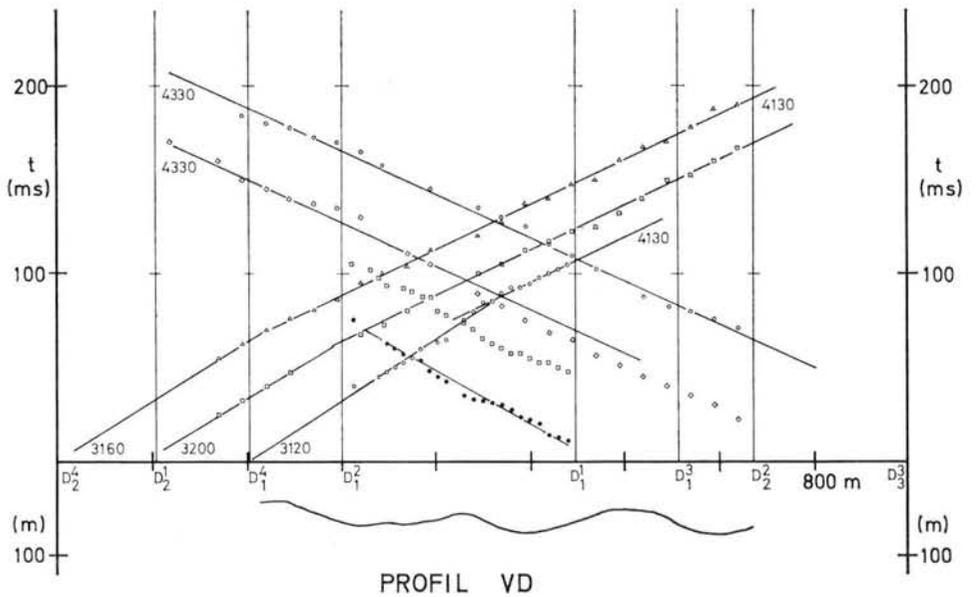


Abb. 4: Laufzeitdiagramm des Profils D auf dem Vernagtferner.

fig. 4: Travel-time diagram of profile D on the Vernagtferner. Note that bedrock can be constructed from arrivals originating from more than two different shots.

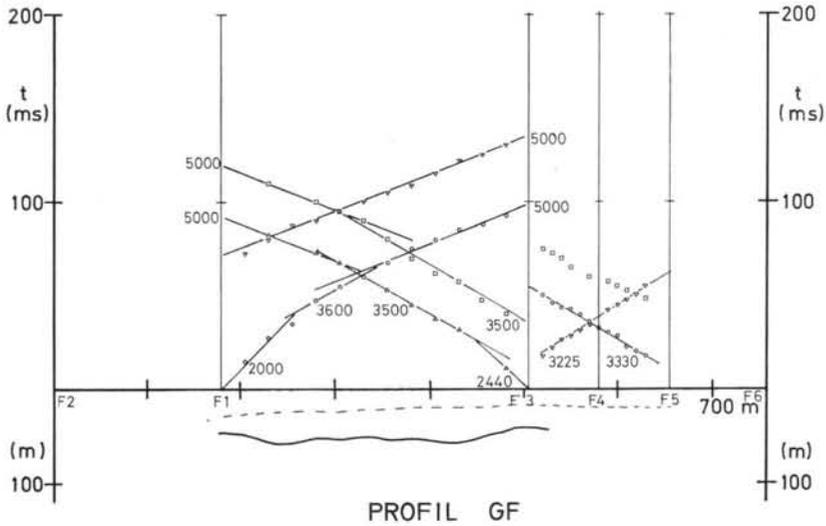


Abb. 5: Laufzeitdiagramm des Profils F auf dem Guslarferner. Die Auswertung wurde als Dreischichtenfall vorgenommen. Die gestrichelte Linie entspricht der Grenze zwischen Firn und Eis.

fig. 5: Travel-time diagram of profile F on the Guslarferner. The dashed line gives the boundary between firn and ice. Such a boundary has only been detected in this profile and in profile E which is shown in the next figure.

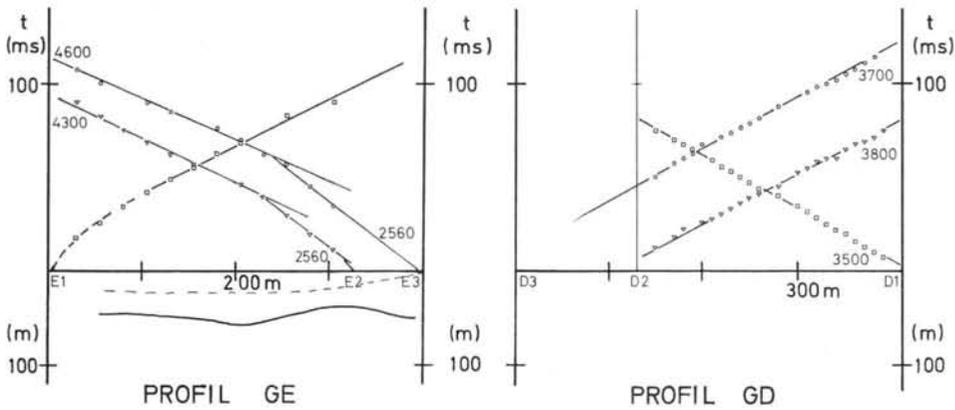


Abb. 6: Laufzeitdiagramme der Profile D und E auf dem Guslarferner.

fig. 6: Travel-time diagrams of the profiles D and E on the Guslarferner. No arrivals of a refracted wave could be detected on profile D and therefore no results could be obtained.

An dieser Stelle muß darauf hingewiesen werden, daß die Auswertung unter der Annahme eines Zweischichtenfalles durchgeführt wurde. O. Förtsch und H. Vidal (1956a, b, 1958, 1968a, b) und P. Giese (1963) finden allerdings eine Zwischenschicht

zwischen Eisunterkante und Felsoberkante. Dies würde einem Dreischichtenfall entsprechen. Der Zwischenschicht wird dort eine P-Wellen-Geschwindigkeit von etwa 3800 bis 4600 m/sec zugeordnet. Diese Zwischenschicht soll aus durch den Druck der überlagernden Eismassen verfestigtem Schutt bestehen, der vom Gletscher während einer Rückzugsphase aussedimentiert wurde. Hier wird die Ansicht vertreten, daß die Geschwindigkeiten von 3800 bis 4600 m/sec — zumindest für den Vernagtferner — durchaus anstehendem Gestein zugeordnet werden können, zumal solche Werte in der Umgebung des Vernagtferners sowie an den aus dem Gletscher ragenden Felsfenstern mit der Refraktions-Seismik gemessen wurden (H. Miller 1968). E. Brückl (persönliche Mitteilung) vertritt die Ansicht, daß diese Geschwindigkeiten auf die obersten 10 bis etwa 150 m des Gletscherbettes beschränkt sind, und daß es sich bei den Geschwindigkeiten um und über 5000 m/sec um härteres und kompakteres Gestein handelt, welches vornehmlich die Schwellen des Untergrundes bildet. Über eine Geschwindigkeitsverteilung mit der Tiefe im Untergrund können hier keine Aussagen gemacht werden. Die vorhandenen Messungen reichen nicht aus, um diese Frage zu klären. Es wird jedoch vermutet, daß eine Zunahme der Geschwindigkeit mit der Tiefe vorliegt. Ob diese Zunahme stetig ist, oder ob eine weitere Schichtgrenze in einiger Tiefe vorliegt, kann nicht entschieden werden. E. Brückl und G. Gangl (1971) haben jedoch am Sonnblickkees eine solche Schichtgrenze gefunden. Der Grund für die verschiedenen Ansichten über die mögliche Existenz einer Zwischenschicht liegt darin, daß der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Eis und Untergrund sehr klein ist. Dies bedingt weiterhin, daß im Laufzeitdiagramm die Neigungen der mittleren Ausgleichsgeraden sich nur geringfügig unterscheiden. (Siehe Abb. 3, 4, 5, 6). Dies kann, da die Grenzfläche Morphologie aufweist, sehr leicht einen Drei-Schichtenfall als richtig erscheinen lassen. Vielfach läßt sich auf Grund der Laufzeitkurven allein nicht entscheiden, ob es sich um einen 2- oder 3-Schichtenfall handelt. Deshalb müssen andere Informationen für die Wahl des Modells herangezogen werden, wie z. B. die oben erwähnten Messungen der Geschwindigkeit im Anstehenden.

BEMERKUNGEN ZU DEN LAUFZEITDIAGRAMMEN

In den Abb. 3, 4, 5 und 6 werden Laufzeitdiagramme und Auswertungen von Profilen gezeigt, die Besonderheiten aufweisen oder als repräsentativ für alle angesehen werden können. Die Profile VA und VD sind Beispiele für die Mehrzahl aller Profile. Zu bemerken ist allgemein, daß meist ein Teil eines jeden Profils aus den Laufzeiten von vier verschiedenen refraktierten Wellen bestimmt werden konnte; dies bedeutet größere Genauigkeit in der Festlegung der Tiefenlage, da durch Mittelung die statistischen Fehler in der Bestimmung der Laufzeiten verringert werden.

Die Profile GE und GF wurden anders als alle anderen, nämlich als 3-Schichtenfälle behandelt. Hier wurde eine Grenzfläche erfaßt, die auf Grund der P-Wellen-Geschwindigkeiten von im Mittel 2200 m/sec für die erste und 3500 m/sec für die zweite Schicht, als Grenzfläche zwischen Firn und Eis angesehen wird. (Diese Grenzfläche ist in den Abb. 5 und 6 strichliert eingetragen). Das Profil GD konnte nicht ausgewertet werden, da keine Einsätze einer refraktierten Welle zu erkennen sind.

SCHICHTLINIENPLAN DES UNTERGRUNDES

Aus den Profilschnitten wurden in Abständen von je 100 m die absoluten Höhen entnommen — als Referenzfläche diente die Gletscheroberfläche von 1966 — und in einen Plan eingetragen. Aus diesen Werten wurde der Schichtlinienplan (Abb. 7)

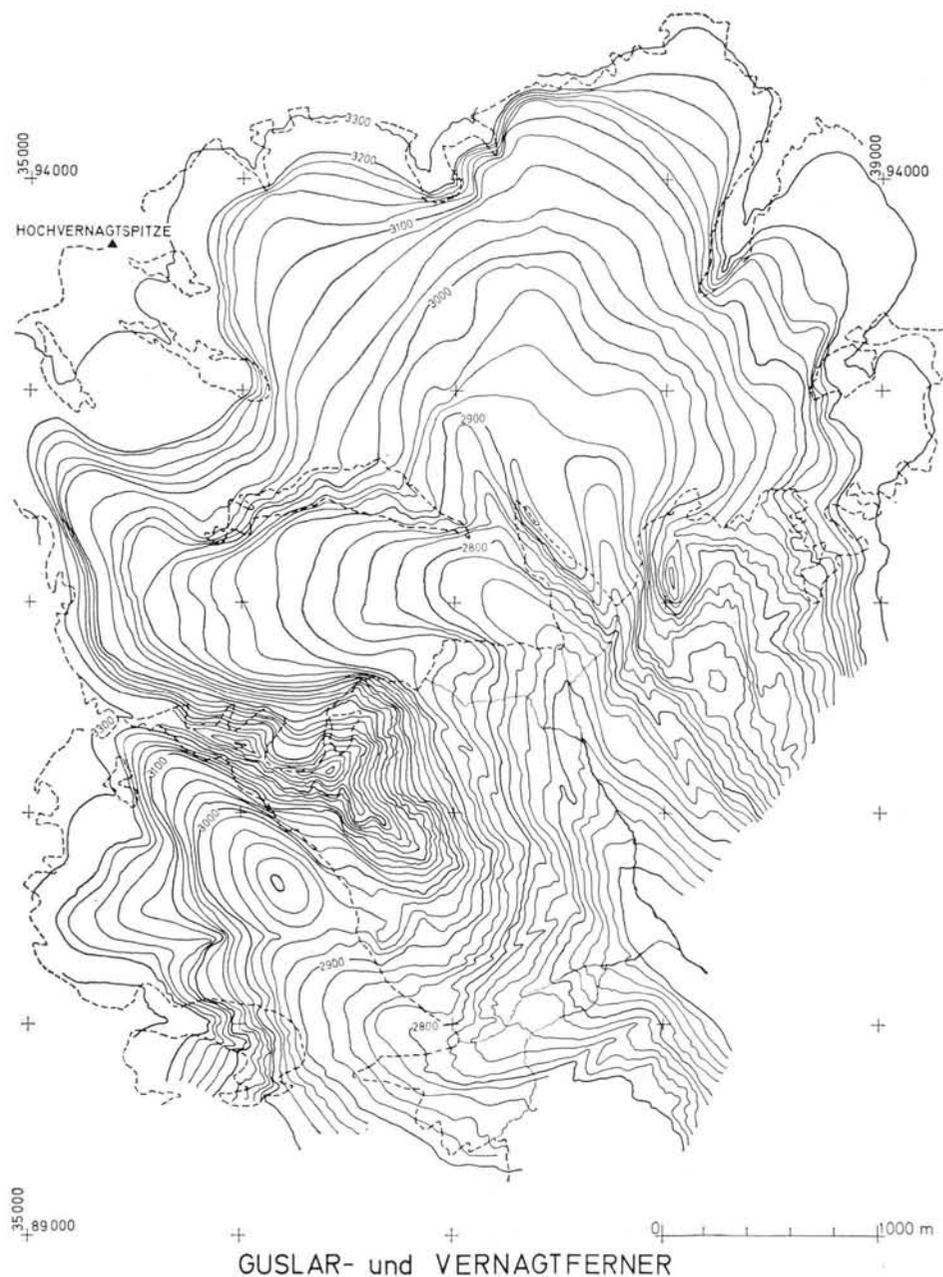


Abb. 7: Schichtlinienplan des Felsuntergrundes von Guslar- und Vernagtferner. Der Eisrand ist durch die gestrichelten Linien angegeben.

fig. 7: Contour map of bedrock beneath Guslar- and Vernagtferner. This map has been obtained by taking absolute heights from the evaluated profiles using the 1966 surface as reference, plotting these values in a plane and interpolating between them. Dashed lines give the ice-edge.

gezeichnet. Zusätzliche Anhaltspunkte für die Interpolation zwischen den bekannten Punkten werden vom Verlauf der Schichtlinien der Oberflächenkarte gegeben. Die Erfahrung zeigt, daß Stufen und Schwellen ihr Abbild in der Gletscheroberfläche haben. Der Verlauf der Höhenschichtlinien für das von Eis bedeckte Gebiet ist wesentlich glatter als für den eisfreien Teil. Dies ist zu erwarten, da zum einen das Verfahren der Auswertung eine Mittelung darstellt, zum anderen die Interpolation zwischen den Profilen eine weitere Glättung bedeutet. Für die Höhenlage zwischen 3200 und 3300 Meter sind die 20 m Höhenlinien nicht eingetragen, da hier keine seismischen Mächtigkeits-Bestimmungen mehr vorliegen. Die 3300 m Höhenlinie wurde aus dem eisfreien Gebiet in den Gletscherbereich extrapoliert.

Anhand dieser Karte sind einige markante Strukturen zu erkennen. Der Vernagtferner ist deutlich in zwei Teile gegliedert; der südwestliche Teil ist als typische Talform mit steilen Hängen ausgebildet. In diesem Teil ist das Eis relativ mächtig. Der flächenmäßig größere Teil im Nordosten ist ein teilweise sehr flaches Becken, das nach unten durch eine Felsschwelle, die sich vom Schwarzkögele nach NW erstreckt, begrenzt wird. Diese Schwelle ist unterbrochen durch eine bis zu 60 m tiefe Rinne, durch die derzeit das Eis aus dem Becken fließt. Die Schwelle verliert sich jedoch ziemlich bald im flachen Becken. Oberhalb der Felsschwelle ist das Gletscherbett bis 25 m übertieft. Im Bereich des Punktes (R = 38.000, H = 94.000) befindet sich an der Oberfläche eine Spaltenzone, deren Ursache ein Rücken im Untergrund zu sein scheint. Im Schichtlinienplan ist hiervon nichts dargestellt, da wegen der Spaltenzone kein Profil darübergerlegt werden konnte und daher auch keine Anhaltspunkte für die Eismächtigkeit vorhanden sind.

Der Untergrund des Guslarferners weist ebenfalls eine Schwelle quer zur Fließrichtung auf. Die Höhe der Schwelle ist 2950 m, das Becken dahinter ist um 50 m übertieft. Aus diesem Becken steigt der Untergrund ziemlich steil gegen das Firnbecken unterhalb des Kesselwandjochs an. Dieses Firnbecken wieder ist relativ flach und leicht talförmig. Die größten Eistiefen am Guslarferner (über 100 m) findet man im Bereich der Vortiefe.

ERLÄUTERUNGEN ZUR KARTE „VERNAGTFERNER: GLETSCHERBETT UND GEOLOGISCHE ÜBERSICHT“

Für die Auswertung der Refraktions-Seismogramme schien es wünschenswert, einige Anhaltspunkte über die Verteilung der Gesteinsarten zu haben, da dies zusätzliche Information über die zu erwartenden Geschwindigkeiten der seismischen Wellen im Refraktor bedeutet.

Von einer Arbeitsgruppe des Instituts für Mineralogie und Petrographie der Universität Innsbruck wurde daher eine Kartierung der Gesteine in der Umrahmung des Gletschers durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der Kartenbeilage 5 zusammen mit dem Schichtlinienplan der Felsoberfläche unter dem Gletscher sowie seiner Umgebung dargestellt.

Im wesentlichen können 3 Gesteinstypen unterschieden werden: gebänderte Amphibolite, massige Biotit-Plagioklas-Gneise und mineralreiche Glimmerschiefer (mit Staurolith und Disten). Dementsprechend kann das Gletscherbett in 3 Zonen aufgliedert werden. Die wahrscheinlichen Grenzen zwischen diesen Gesteinstypen sind strichliert eingetragen. Allerdings findet man in den einzelnen Zonen nicht allein die in der Legende angeführten Gesteine, sondern an manchen Orten Wechsellagerungen aller drei oder nur von zweien der oben genannten Gesteine. Auf welch kurzen

Strecken die Gesteinstypen wechseln, soll am Beispiel eines Profils verdeutlicht werden. (Tabelle 1.)

Tab. 1: Beispiel für enge Wechsellagerung.

Mächtigkeiten sind senkrecht zum Streichen der beinahe seigeren Schichtung gemessen, also wahre Schichtmächtigkeiten.

Es werden drei Gesteine unterschieden:

Typ A: mineralreiche Glimmerschiefer

Typ B: heller massiger Gneis

Typ C: Glimmerschiefer

10,7 m A 1,1 m B 2,7 m A 5,5 m A 1,0 m B 3,1 m A 0,3 m B 1,5 m A 0,9 m B	1,7 m A 0,7 m B 1,3 m A 3,8 m B 0,4 m C 7,4 m B 4,5 m C 2,1 m B 17,0 m C	3,8 m C 1,5 m A 4,5 m C 4,3 m B 18,7 m B 8,3 m A 5,0 m A 15,5 m C 4,7 m B
--	--	---

Da in jeder Zone alle genannten Gesteinstypen zu finden sind, liegt die Vermutung nahe, daß bei der verwendeten Methode der Refraktions-Seismik von Zone zu Zone keine allzugroßen Unterschiede in den Geschwindigkeiten der seismischen Wellen gemessen werden. Dies wurde durch die Ergebnisse der Messungen bestätigt.

In der Karte sind die Profile der Refraktions-Seismik in roter Farbe eingetragen. Die Zahl, die an jedes Profil geschrieben ist, gibt die mittlere Geschwindigkeit der P-Welle im Untergrund entlang des entsprechenden Profils in m/sec an. Man erkennt keine Abhängigkeit der Geschwindigkeit von den Gesteinskörpern oder von deren Streichrichtung. Da an Gesteins-Proben aus dem Untersuchungsgebiet eine Anisotropie der Geschwindigkeiten der seismischen Wellen gemessen wurde (Miller 1968), können die Differenzen der Werte durch das unterschiedliche Azimut und verschiedene Lage der Profile erklärt werden. Darüber hinaus kann erwartet werden, daß die Geschwindigkeiten in verschiedenen — auch räumlich eng begrenzten — Gebieten sich stark voneinander unterscheiden, da die Zerstörung der obersten Meter des Gesteins durch die Erosion des Gletschers je nach vorgegebener Klüftung verschieden ist. (Foster 1971.)

In blaugrünem Farbton sind die Höhenlinien der Gletscheroberfläche von 1969 in die Karte eingezeichnet. Dies ermöglicht dem Betrachter eine direkte Bestimmung der Eismächtigkeiten für jeden Punkt des Gletschers. Dabei muß jedoch beachtet werden, daß die so entnommenen Eisdicken mit einem Fehler von bis zu 20% behaftet sein können. Mit dieser Genauigkeit konnten die Eisdicken aus der Refraktions-Seismik bestimmt werden.

DAS EISVOLUMEN UND SEINE VERÄNDERUNGEN

Aus der Karte des Untergrundes wurde zusammen mit der Oberflächenkarte das Eisvolumen berechnet. Dazu wurde ein quadratisches Gitternetz mit einer Maschenweite von 100 m über die Gletscher gelegt und die Eismächtigkeit an jedem Gitterpunkt bestimmt. Das Volumen wurde dann aus der Eismächtigkeit und der Grundfläche der Quader (10.000 m²) berechnet. Eine solche Zerlegung lieferte eine genügende Genauigkeit des berechneten Volumens, da die Oberfläche wie auch die

Grenzfläche über eine Entfernung von 100 m recht gut linear angenähert werden kann. Dasselbe Verfahren wurde angewendet, um die Volumensänderungen des Guslarferners für die Zeiträume zwischen zwei kartographischen Aufnahmen zu bestimmen. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 2 bis 4 zusammengefaßt. Die Werte für die Flächen- und Volumensverluste des Vernagtferners sind aus H. Hoinkes (1969) entnommen. Die Flächenverluste des Guslarferners wurden durch Planimetrieren ermittelt. Das Volumen des Vernagtferners, bezogen auf die Oberfläche von 1966, beträgt $567,4 \text{ Mill. m}^3 \pm 10\%$, das des Guslarferners $68 \text{ Mill. m}^3 \pm 10\%$. Der Fehler ist im wesentlichen geschätzt und stützt sich auf die Genauigkeit der Mächtigkeiten-Bestimmung mit der Methode der Refraktions-Seismik. In dem Wert für das Volumen des Guslarferners ist das Volumen des sogenannten „Kleinen Guslarferners“ (unterhalb Kesselwandspitze und Guslarspitzen) nicht enthalten. Er trägt heute kein Eis mehr zur Zunge bei und daher wurden dort keine Eismächtigkeiten gemessen.

In der Tab. 2 ist auch der Wert der Fläche dieses Gebietes ($1,45 \text{ km}^2$) für das Jahr 1966 nicht mehr berücksichtigt. Wohl aber sind die Volumensänderungen auch für diesen Teil bestimmt worden, da er früher einen größeren Beitrag zur Zunge des Guslarferners lieferte. Es zeigte sich jedoch, daß es eine Möglichkeit gibt, eine Abschätzung für das heutige Volumen des Kleinen Guslarferners zu geben. In der Tab. 4, Spalte 9, ist der Anteil des Vernagt- und Guslarferners am Gesamtvolumen in Prozent angegeben. Dabei fällt auf, daß dieses Verhältnis für die Jahre 1889, 1912 und 1938 mit 87:13 konstant geblieben ist; lediglich 1966 ist es 89:11. Nimmt man an, daß die Konstanz der Verhältnisse der Volumina auch für 1966 noch gültig ist, dann kann so das Volumen des Kleinen Guslarferners bestimmt werden. Demnach würde es ca. 17 Mill. m^3 und die mittlere Mächtigkeit 12 m betragen. Um diesen Betrag von 17 Mill. m^3 müßte dann das Gesamtvolumen in der Tab. 4 erhöht werden. Da dieser Betrag unterhalb der Fehlergrenze liegt, wurde aber darauf verzichtet. Berücksichtigt man diese Werte aber bei der Berechnung der mittleren Eismächtigkeit des Guslarferners für das Jahr 1966, so erhält man einen Wert von 22,3 m für den gesamten Gletscher. Dieser Wert paßt besser in die Reihe der sinkenden mittleren Eismächtigkeiten (Tab. 2, Spalte 9) und ist deshalb in Klammern aufgeführt.

Die Konstanz der Volumen- und Flächenverhältnisse beider Gletscher zeigt deutlich, daß beide ein gleichphasiges System bilden und auf klimatische Einflüsse ähnlich reagieren. Dafür spricht auch die Tatsache, daß surges, die das Rofental erreichten, nur dann möglich waren, wenn beide Gletscher eine erhöhte Aktivität zeigten, d. h. wenn beide Gletscher zugleich Eis für die jeweilige surge beisteuerten. Es ist daher zu vermuten, daß der Grund für den surge-Mechanismus in den besonderen Formen des Gletscherbettes zu suchen ist. Schon S. Finsterwalder (1897) weist darauf hin, daß der Vernagtferner aus einem großen Becken ein enges Tal speist. Ähnlich sind die Verhältnisse beim Guslarferner. Bei beiden Gletschern liegt diese Verengung des Querschnittes in einer Höhe von etwa 2800 m. Etwa 100 m bis 150 m darüber liegen dann — wiederum bei beiden Gletschern — die Schwellen, welche den Eisfluß aus den Akkumulations-Gebieten beeinflussen. Man muß die Frage stellen, ob diese Schwellen allein ausreichend sind, um den Eisfluß so zu steuern, daß über längere Zeit die großen, oberhalb liegenden Akkumulations-Gebiete „gestaut“ werden können, so daß sich genügend Eis für eine surge ansammeln kann.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt müßten oberhalb der heutigen 3000 m Höhenlinie etwa 50 m Eis akkumuliert werden, um das Volumen von 1845 wieder herzustellen. Allerdings müßte ja nicht der gesamte Eisfluß gestaut werden, da durch ein Ausflie-

Tab. 2: Tabellarische Übersicht über einige Daten des Guslarferners
 Erläuterungen im Text

Jahr	Zeitraum in Jahren	Fläche in km ²	Flächenverlust in km ²		Volumen in 10 ⁶ m ³	Volumenverlust in 10 ⁶ m ³		mittlere Dicke in m	Volumen- Flächen- verlust verlust	
			gesamt pro Jahr			gesamt pro Jahr			in Prozent	
1845	44									
1889	23	4,6	0,11	0,005	131	10	0,435	28,5		
1912	26	4,49	0,24	0,009	121	19	0,731	26,9	8%	2,4%
1938	28	4,25	0,45	0,016	102	34	1,21	24	15,7%	5,3%
1966		2,35 (3,8)*			68 (85)*			28,9 (22,3)*	33,3% (16,5%)*	11%

* Mit Berücksichtigung des Kleinen Guslarferners.

 Tab. 3: Tabellarische Übersicht über einige Daten des Vernagtferners.
 Die Daten von 1845 können nicht nach Gletschern getrennt werden.

Jahr	Zeitraum in Jahren	Fläche in km ²	Flächenverlust in km ²		Volumen in 10 ⁶ m ³	Volumenverlust in 10 ⁶ m ³		mittlere Dicke in m	Volumen- Flächen- verlust verlust	
			gesamt pro Jahr			gesamt pro Jahr			in Prozent	
1845	44	13,8	2,4	0,055	1127,4	239	5,4	82		
1889	23	11,4	0,15	0,007	888,4	99	4,3	78	21%	17,4%
1912	26	11,25	0,90	0,035	789,4	92	3,5	70	11%	1,3%
1938	28	10,35	0,75	0,027	697,4	130	4,6	67	12%	8 %
1966		9,553			567,4			59	19%	7 %

 Tab. 4: Tabellarische Übersicht über einige Daten von Guslar- und Vernagtferner.
 Erläuterung im Text.

Jahr	Zeitraum in Jahren	Fläche in km ²	Flächenverlust in km ²		Volumen in 10 ⁶ m ³	Volumenverlust in 10 ⁶ m ³		Volumen in % des ges. Volumens		Fläche in % derges. Fläche	
			gesamt pro Jahr			gesamt pro Jahr		Vernagt	Guslar	Vernagt	Guslar
1845	44	18,4	2,4	0,055	1258	239	5,4				
1889	23	16	0,26	0,011	1019	109	4,7	87%	13%	71%	29%
1912	26	15,74	1,14	0,044	910	111	4,3	87%	13%	71%	29%
1938	28	14,6	1,25	0,045	799	164	5,8	87%	13%	71%	29%
1966		13,35			635			89%	11%	80%	20%

ßen eines gewissen Volumens Teile des jetzigen Ablations-Gebietes durch Aufhöhung zum Akkumulations-Gebiet würden; diese Vergrößerung würde die zusätzliche Ablation an der langsam vorrückenden Zunge kompensieren. Werden durch diese Aufhöhung irgendwelche kritischen Werte erreicht, kann die Zunge beginnen, sehr rasch vorzustoßen. Eine Aufhöhung von 50 m scheint nicht unmöglich zu sein. Für das Jahr 1965/66 wurde für den Vernagtferner von O. Reinwarth (1972) eine Netto-Akkumulation von 9,650 Mill. m³ für eine Akkumulations-Fläche von 8,968 km² errechnet. Dies entspricht einer Erhöhung der Oberfläche um 1 m im Gebiet oberhalb von 2935 m. So würden — grob abgeschätzt — bereits 50 Jahre mit denselben klimatischen Bedingungen wie 1965/66 genügen, um die für eine surge notwendigen Eismassen anzusammeln. All dies gibt jedoch noch keine zwingende Erklärung dafür, daß die beiden Gletscher sich plötzlich sehr rasch bewegen und in kurzer Zeit bis zum Rofental vorstoßen. Diese Frage muß wohl durch Modellrechnungen geklärt werden, wobei erst noch geeignete Randwertbedingungen für die Gleitbewegung des Eises am Untergrund gefunden werden müßten. Die vorliegende Untersuchung kann vielleicht einige Anhaltspunkte für die Behandlung dieses Problems geben.

Herrn Prof. Dr. G. Angenheister danke ich für die Förderung dieser Arbeit, die im wesentlichen auf einer, im Institut für Angewandte Geophysik der Ludwig-Maximilians-Universität München angefertigten, Dissertation beruht. Den Mitarbeitern des Instituts danke ich für ihre Teilnahme an den Feldmessungen und der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung dieser Messungen. Zu besonderem Dank bin ich auch den Herren Prof. Dr. F. Purtscheller, Dr. St. Hoernes und Dr. E. Hoffer sowie Fr. Dr. Ch. Miller verpflichtet, die die petrographische Übersichts-Kartierung durchgeführt haben. Die Herren Dipl.-Ing. K. Brunner und Dipl.-Ing. H. Rentsch haben in dankenswerter Weise die kartographische Gestaltung übernommen. Die Gesellschaft der Freunde der Bayerischen Akademie der Wissenschaften hat die Druckkosten der Karte übernommen. Dafür sei Ihr herzlich gedankt.

LITERATUR

- Berckhemer, H., 1970: MARS 66. Eine Magnetbandapparatur für seismische Tiefensondierung. *Z. f. Geophys.* **36**, 501—518.
- Brückl, E. und G. Gangl, 1971: Refraktionsseismische Gletscherdickenmessungen in den österreichischen Alpen. Vortrag, Tagung der DGG in Karlsruhe.
- Brückl, E., G. Gangl. und P. Steinhauser, 1971: Die Ergebnisse der seismischen Gletschermessungen am Dachstein im Jahre 1968. Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Wien, Heft 9, 31 pp, Wien.
- Budd, W. F. und D. Jenssen, 1971: Numerical modelling of glacier systems. Vortrag, Symposium on Snow and Ice in Mountainous Regions, IUGG Generalversammlung, Moskau.
- Campbell, W. J. und L. A. Rasmussen, 1969: Three-dimensional surges and recoveries in a numerical glacier model. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **6**, No. 4, part 2, 979—986.
- Finsterwalder, S., 1897: Der Vernagtferner. Wissenschaftliche Ergänzungshefte zur Zeitschrift des D. u. Ö. Alpenvereins, **1**, 1, 113 pp. Graz.
- Förtsch, O., H. J. Schneider und H. Vidal, 1955: Seismische Messungen auf dem Gepatsch- und Kesselwandferner in den Ötztaler Alpen. *Gerl. Beitr. z. Geophys.* **64**, 233—261.
- Förtsch, O. und H. Vidal, 1956a: Die Ergebnisse der seismischen Messungen auf dem Hinterseiferner in den Ötztaler Alpen 1954. *Gerl. Beitr. z. Geophys.* **65**, 45—70.

Förtsch, O. und H. Vidal, 1956b: Glaziologische und glazialgeologische Ergebnisse seismischer Messungen auf Gletschern der Ötztaler Alpen 1953/54. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 3, 145–169.

Förtsch, O. und H. Vidal, 1958: Die seismische Vermessung des Großen Gurgler Ferners in den Ötztaler Alpen im Spätsommer 1956. Mit Vorwort von H. Reich. *Gerl. Beitr. z. Geophys.* 67, 1–30.

Förtsch, O. und H. Vidal, 1968a: Die Existenz, Beschaffenheit und Bedeutung einer Zwischenschicht zwischen Gletschereis und Felsuntergrund. *Geol. Rundschau*, 57/3, 1019–1033.

Förtsch, O. und H. Vidal, 1968b: Seismo-glaziologische Untersuchungen im oberen Fischbachtal. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 5/2, 61–88.

Foster, R. J., 1971: *Physical Geology*, 233–237, Charles E. Merrill Company, Columbus.

Giese, P., 1963: Some results of seismic refraction work at the Gepatsch glacier in the Ötztal Alps. Publ. No. 61 of the I. A. S. H., Commission of Snow and Ice, 154–161.

Hoinkes, H., 1969: Surges of the Vernagtferner in the Ötztal Alps since 1539. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6, No. 4 part 2, 853–861.

Miller, H., 1968: Refraktions-Seismik im Sommer 1966 auf dem Vernagtferner in den Ötztaler Alpen. Diplomarbeit am Institut für Angewandte Geophysik der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Pakiser, L. C. und J. S. Steinhart, 1964: Explosion seismology in the western hemisphere. *Research in Geophysics*, vol. 2, 131–133, The M. I. T. Press.

Reinwarth, O., 1972: Untersuchungen zum Massenhaushalt des Vernagtferners. *Zeitschr. f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie*, 8, S. 43–63.

Thyssen, F., 1967: Die Temperaturabhängigkeit der P-Wellengeschwindigkeit in Gletschern und Inlandeisen. *Zeitschr. f. Geophysik* 33, 65–79.

Manuskript eingegangen am 9. September 1972.

Anschrift des Verfassers: Dr. Heinz Miller, Universität München,
Institut für Angewandte Geophysik, Theresienstraße 41/IV (Block C)
D-8000 München 2

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. m^3 of water to the glacier, corresponding to 135 g/cm^2 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.

1. 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 Jenessen 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) modifizierte 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 Driftschneeeablagerungen ernährt; 1 = Zunge zeigt deutlichen Rückgang von mehr als 20 m/Jahr. Durch die beiden ersten Angaben wird die besondere Form des Vernagtferners 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 Vernagtferners 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 Stubaijer 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 1) 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 Vernagtaches. 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:

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

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 1970B) 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 (= Nettobetrag), 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_i “, 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

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

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 Hintereisferner 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 Winterschneesichten 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 Schneeablagerungen 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 Neuschneesicht abgebaut, so daß die Neuschneekorrektur entsprechend zu reduzieren ist. Diese Reduzierung wird im Gebiet des Vernagtfernners 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 Zerrfurchungen 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 dienen. 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 Massenhaushaltes 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 g/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.

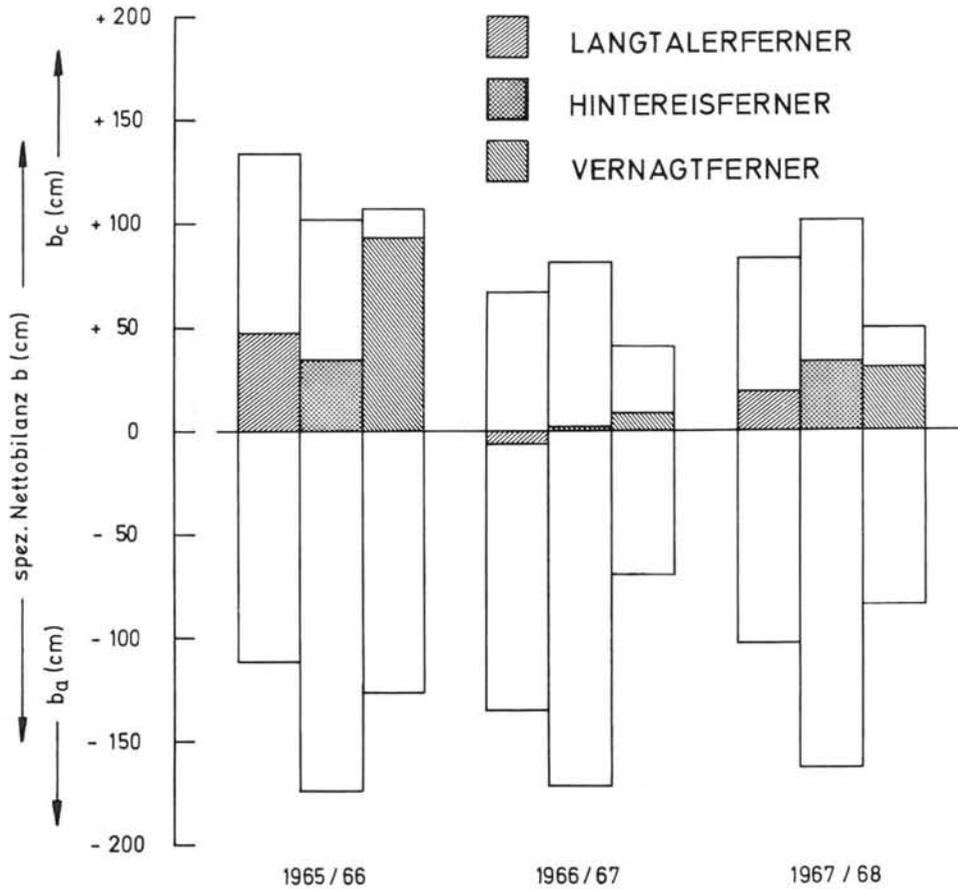


Abbildung 1: Vergleich der mittleren spezifischen Werte von Nettoablation, Nettoakkumulation und Nettobilanz (cm Wasser) für den Langtaler-, Hintereis- und Vernagtferner für die Haushaltsjahre 1965/66–1967/68.

Während sich die Flächen von Hintereis- und Langtalerferner relativ gleichmäßig über ein großes Höhenintervall verteilen, bestimmen für den Vernagtferner die großen Verebnungsflächen im mittleren Höhengniveau 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

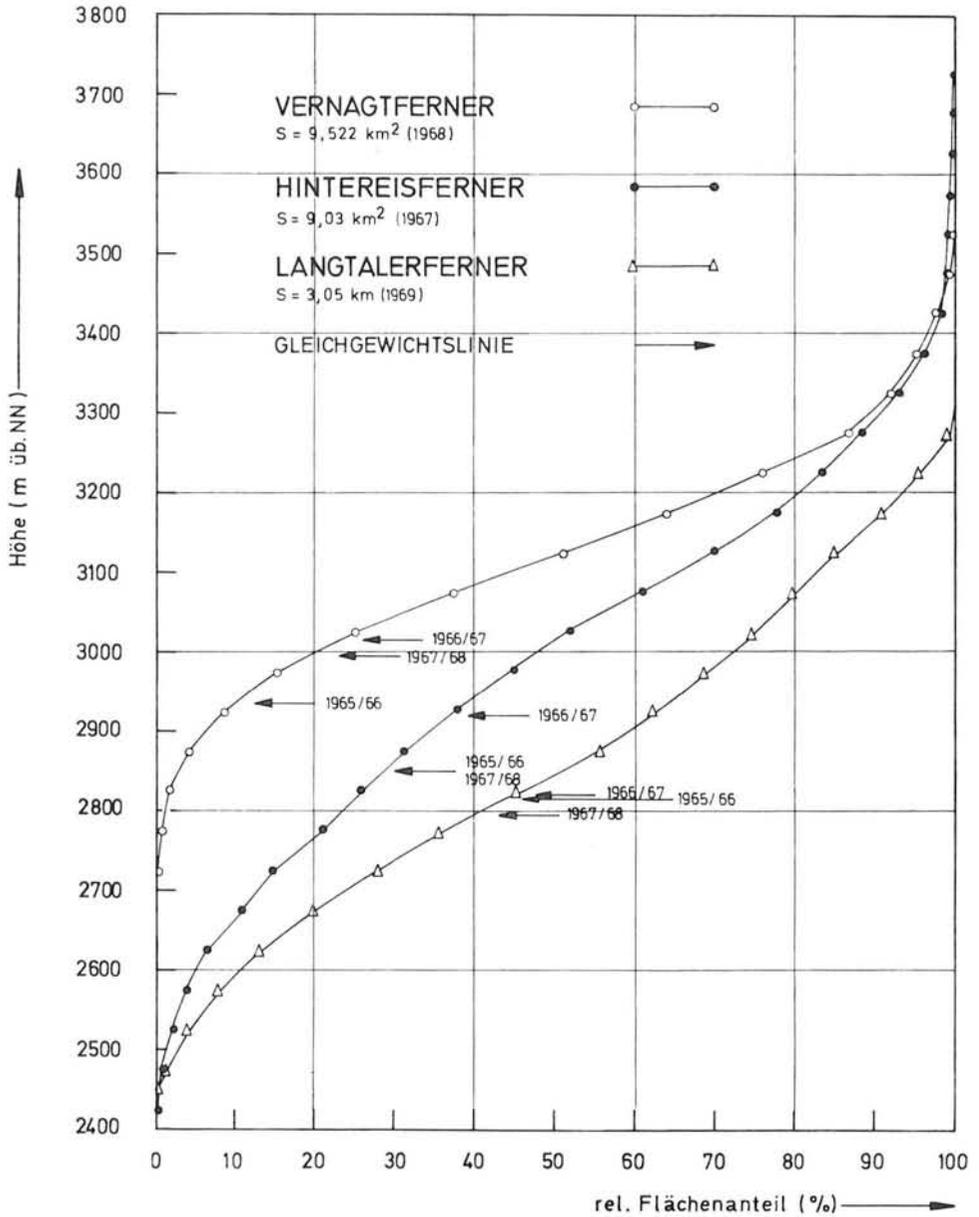


Abbildung 2: Verteilung der Flächenanteile von Vernagt-, Hintereis- und Langtalerferner für sukzessive Inkremente von 50 Höhenmetern, dargestellt durch die Summenkurven der Relativwerte. Die eingetragenen Pfeile markieren die mittleren Höhen der Gleichgewichtslinien der Massenhaushalte für den betreffenden 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	- 76,0	-323,4	16,0	- 56,7	-354,4	16,0	- 47,6	-297,5
2750-2800	57,6	- 153,8	-267,0	54,0	- 154,4	-285,9	54,0	- 129,5	-239,8
2800-2850	112,3	- 180,8	-161,0	106,5	- 244,2	-229,3	106,5	- 216,5	-203,3
2850-2900	240,5	- 172,6	- 71,8	230,8	- 392,5	-170,1	230,8	- 258,5	-112,0
2900-2950	417,7	- 44,5	- 10,7	404,7	- 484,8	-119,8	404,7	- 290,6	- 71,8
2950-3000	648,6	+ 239,4	+ 36,9	653,8	- 254,3	- 38,9	653,8	- 107,4	- 16,4
3000-3050	919,0	+ 681,9	+ 74,2	922,0	+ 66,6	+ 7,2	922,0	+ 253,4	+ 27,5
3050-3100	1194,9	+1143,5	+ 95,7	1169,8	+ 167,7	+ 14,3	1169,8	+ 483,5	+ 41,3
3100-3150	1291,8	+1450,7	+112,3	1323,7	+ 414,6	+ 31,3	1323,7	+ 644,7	+ 48,7
3150-3200	1306,7	+1513,2	+115,8	1214,9	+ 397,5	+ 32,7	1214,9	+ 670,5	+ 55,2
3200-3250	1102,7	+1327,7	+120,4	1146,9	+ 500,1	+ 43,6	1146,9	+ 669,0	+ 58,3
3250-3300	979,8	+1248,3	+127,4	1017,6	+ 473,7	+ 46,5	1017,6	+ 651,6	+ 64,0
3300-3350	515,8	+ 663,4	+128,6	515,6	+ 158,6	+ 30,8	515,6	+ 232,6	+ 45,1
3350-3400	289,1	+ 448,7	+155,2	300,8	+ 42,5	+ 14,1	300,8	+ 97,7	+ 32,5
3400-3450	237,7	+ 376,2	+158,3	236,5	+ 58,0	+ 24,5	236,5	+ 104,6	+ 44,2
3450-3500	169,7	+ 361,2	+212,8	155,4	+ 87,0	+ 56,0	155,4	+ 93,0	+ 59,8
3500-3550	35,2	+ 68,1	+193,5	40,8	+ 9,7	+ 23,8	40,8	+ 16,3	+ 40,0
3550-3600	7,3	+ 11,1	+152,0	6,7	+ 0,1	+ 1,5	6,7	+ 2,0	+ 29,9
3600<	3,3	+ 3,6	+109,1	5,5	- 0,1	- 1,8	5,5	+ 1,7	+ 30,9
	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 Hintere Brochkogel,

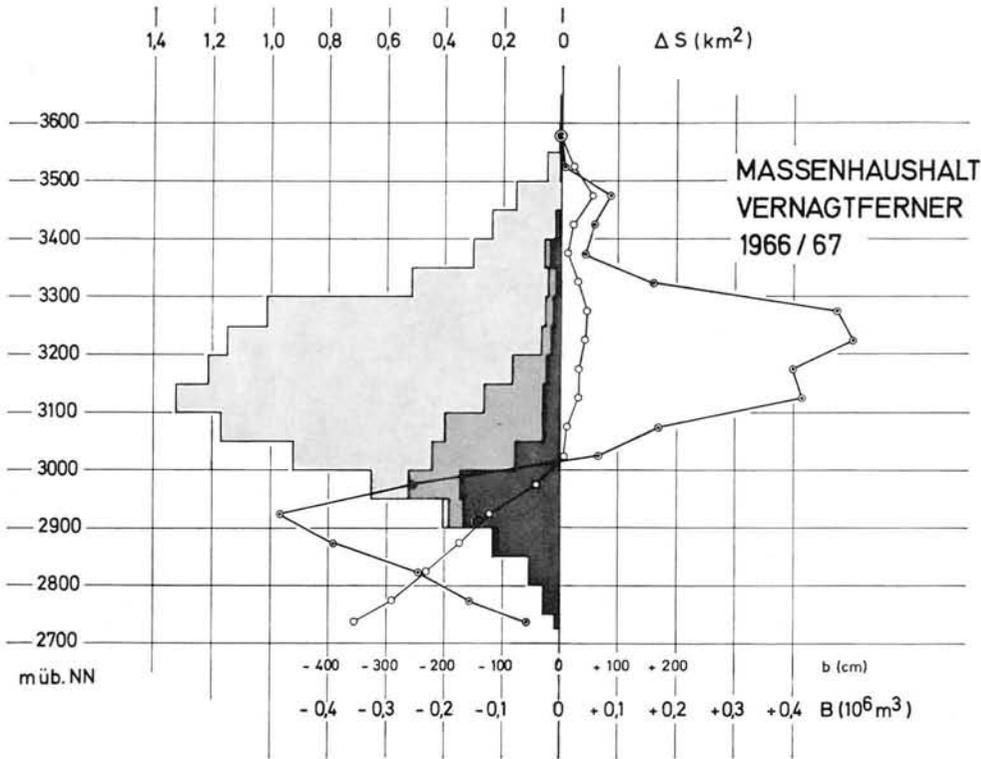


Abbildung 3: Netto-Massenbilanz (in Mill. m³ Wasser), spezifische Nettobilanz (in cm Wasser) und Flächenwerte (in km²) des Vernagtferners für den ausgeglichenen Haushalt 1966/67, dargestellt als Funktion der Höhe durch Mittelwerte für Höhenintervalle von je 50 m. Die Flächenanteile mit Akkumulation, 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

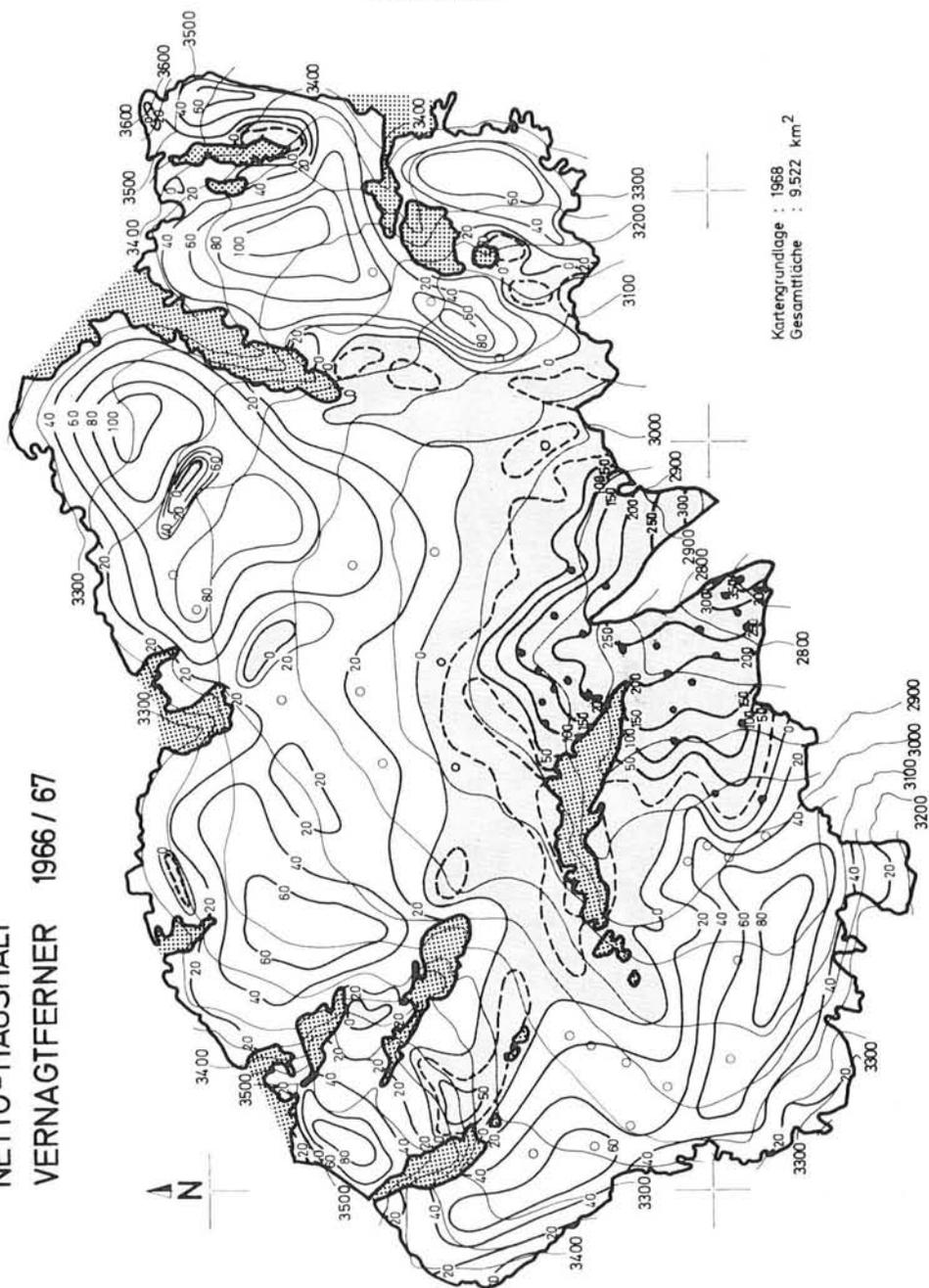


Abbildung 4: Analyse des Massenhaushaltes am Vernagtferner für das Haushaltsjahr 1966/67 (1. 10. 66—30. 9. 67) mit annähernd ausgeglichener Bilanz. Dick eingetragene sind die Isolinien der spezifischen Nettobilanz mit Angaben in cm Wasseräquivalent, dünn gezeichnet die Höhenlinien mit 50 m Äquidistanz. 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. Jenson, 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 Gletscherrückganges an Ostalpen-gletschern. *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 (Öztaler 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 Rofental 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

