

Der Hintereisferner 1893 bis 1922.

Ein Beitrag zur Lösung des Problems der Gletscherbewegung.

Von **Hans Hess** in Nürnberg.

(Hierzu Taf. II—VIII.)

Inhaltsübersicht: Vorbemerkung S. 145. — Topographie des Eises S. 146 — Ablation S. 154. — Bewegungsmessungen S. 156. — Ergebnis der Tiefbohrungen S. 163. — Rekonstruktion der Querschnitte S. 166. — Das Längsprofil S. 172. — Energieverteilung im Hintereisferner S. 176. — Firnfeldlose Gletscher S. 186. — Energieverteilung im Rhonegletscher S. 187. Schwankung der Energie und der Drucke bei der letzten Schwankung des Hintereisferners S. 190. Energie- und Druckverteilung im Hintereisferner beim Maximalstand von 1848 S. 200. — Zukünftige Beobachtungen S. 202. — Bemerkungen zu den Tafeln II—VIII S. 202.

Vorbemerkung. Die Arbeiten, deren Ergebnis hier vorgelegt wird, umfassen den Zeitraum von 1893 bis 1922, also fast drei Jahrzehnte. Bis 1913 war Adolf Blümcke an ihrer Durchführung beteiligt; seit seinem 1914 erfolgten Tod blieb mir allein die Fortsetzung der Messungsreihe. Es war nicht nur Ausdauer im Sammeln und Verwerten des Beobachtungsmateriales notwendig, sondern auch Ausdauer im Gewähren von Geldbeihilfen, welche die Bezwingung der Feldarbeit erforderte. Diese Opfer, vom Hauptausschuß des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins bereitwillig gebracht, waren zeitweise recht beträchtlich, da außer den reinen Vermessungsarbeiten an der Eis- und Geländeoberfläche auch Tiefbohrungen ausgeführt wurden, für welche die notwendige Maschinerie erstellt und unter nicht ganz einfachen Bedingungen zur hochgelegenen Arbeitsstätte gebracht werden mußte. Mit dem Erfolg dieser Bohrungen erhielt die Gletscherforschung den Vorteil der Beherrschung der dritten Dimension des untersuchten Gletschers.

Wie für die Erfordernisse der Feldarbeit, so hat auch für die Drucklegung der Resultate der Hauptausschuß des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins den Hauptteil der Kosten getragen. Dieser Körperschaft, aber auch dem Bayrischen Topographischen Bureau, dem Konsortium Luftbild-Stereographik G. m. b. H. in München, sowie der Sektion Nürnberg des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins und der Kunst-

anstalt C. A. Pocher in Nürnberg, welche den Druck der Karte und der anderen Beilagen in freigebiger Weise gefördert haben, sei hier für den Dienst, den sie der Gletscherkunde leisteten, der wohlverdiente Dank ausgesprochen.

Topographie des Eises. Im Jahre 1899 konnten A. Blümcke und ich einen ersten Bericht über die seit 1893 laufenden Arbeiten am Hintereisferner der Öffentlichkeit übergeben¹⁾. Seitdem wurden die Arbeiten stetig weitergeführt. Es galt neben der regelmäßigen jährlichen Wiederholung der Geschwindigkeitsmessungen an den Steinlinien und der Ablationsbestimmungen an 18 Holzstangen in erster Linie das von uns erprobte Bohrverfahren weiter auszubilden, so daß die Durchlochung des Gletschers auch an seinen tiefsten Stellen, also bis etwa 300 m hinab möglich würde. Daß und wieweit die Lösung dieser Aufgabe gelang, ist bereits bekannt und soll in einem besonderen Abschnitt dieser Abhandlung erläutert werden. Vom Jahre 1901 an wurden zu Beginn unserer Ferien und gegen Ende derselben, also in den Tagen um den 20. Juli und Anfang September jedes Jahres die Positionen der bei den Ablationsbohrlöchern als Geschwindigkeitsmarken gebrauchten Holzstangen eingemessen, so daß Sommer- und Wintergeschwindigkeiten getrennt angegeben werden konnten. Zu diesem Zweck mußte die Genauigkeit der Positionsbestimmung etwas vergrößert werden und deshalb hat sich vor allem Blümcke der mühsamen Arbeit einer sorgfältigen Verbesserung und neuen Ausgleichung des Netzes unterzogen, deren Ergebnis in der Koordinatenliste steckt, welche S. 148 abgedruckt ist. Die reine Vermessungsarbeit wurde noch dadurch erweitert, daß die Geschwindigkeitsmessungen auch auf das Firngebiet ausgedehnt wurden. 1905 fand eine Neuaufnahme der gesamten Gletscheroberfläche statt — tachymetrisch für die Zunge und die unteren flachen Teile des Firngbietes, photogrammetrisch für die steilen Firnteile und ihre Felsenumrahmung. Das bei dieser Gelegenheit gewonnene Plattenmaterial war so reichlich, daß außer dem Hintereisgletscher selbst noch der Obere Berg, der ganze Hang der Hintereisspitzen mit den eingelagerten Hängegletschern, der untere und mittlere Teil des Kesselwandfeners, sowie Guslarberg und Kreuzberg bis zur Kammhöhe kartographiert werden konnten. Unter Verwendung des photogrammetrischen Meßverfahrens hat sich die Karte langsam entwickelt. Sie war 1913 zum größten Teil fertig und fand in diesem und dem folgenden Jahre

¹⁾ Untersuchungen am Hintereisferner. 2. Wiss. Ergänzungsheft zur Ztschr. des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins. München 1899.

noch eine Ergänzung durch Einbeziehung des Firnfeldes des Kesselwandferners, dessen Vermessung durch Benutzung des Kesselwandhauses der Sektion Mark Brandenburg des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins recht bequem gestaltet wurde.

Von 1910 an zeigte sich am Ende des Kesselwandferners immer deutlicher der Zerfall des unteren Teiles des Gletschers, so daß eine völlige Lostrennung dieses Eisstromes von seinem Nachbar, mit dem er viele Jahrzehnte vereint weiter talauswärts zog, zu erwarten war. 1914 war diese Trennung vollzogen; das kleine Kärtchen Taf. III oben gibt eine Darstellung des damaligen Zustandes in der unmittelbaren Umgebung des Gletscherendes. Die Weiterführung der Aufnahme wurde damals durch den Kriegsausbruch, der auch uns zur Heimkehr zwang, verhindert. In den folgenden Jahren trat eine Umkehr in der Tendenz der Bewegung des Kesselwandferners ein; doch sind nur für 1917, 1918, 1919 und 1920 kartographische Bilder über den Stand des inzwischen wieder vorgeschrittenen Gletschers gewonnen worden. Diese Kärtchen auf Taf. III in 1:10 000 umfassen auch noch das Ende des Hintereisgletschers und sind recht wertvoll geworden für die Beurteilung der Vorgänge, welche sich in der Masse dieses Gletschers seit 1914 vollzogen haben. Die Geschwindigkeitsmessungen, welche unter der Einwirkung der Kriegsverhältnisse meist nur bis 2 km vom Gletscherende aufwärts ausgedehnt werden konnten, ließen erkennen, daß ein Vorstoß stattfand, und die starke Zunahme der Geschwindigkeiten von 1918 bis 1919 legte es nahe, eine Neuaufnahme der gesamten Gletscheroberfläche durchzuführen. Sie sollte 1920 vorgenommen werden. Unterkunftsschwierigkeiten, welche wegen Verfall des Hochjochhospizes eingetreten waren, und allgemeine Teuerung erschwerten die Durchführung dieses Planes; doch konnten recht gute photogrammetrische Aufnahmen gewonnen werden. Ein günstiger Umstand erlaubte es, aus diesen, von drei kleinen Standlinien aus gemachten Aufnahmen — im ganzen sechs Plattenpaare — die Karte von 1920 mit dem Stereoautographen zu konstruieren. Mein Sohn Gustav war nach Vollendung seiner Studien beim Konsortium Luftbild-Stereographik G. m. b. H.-München als Ingenieur tätig geworden. Seinem Interesse an der Gletscherforschung und seiner Sachkenntnis ist diese Karte von 1920 zu danken, deren Herstellung im wesentlichen während seiner Freistunden erfolgte. Die Karte gibt ein vorzügliches Bild vom damaligen Zustand des Gletschers. War schon die aus den Messungen von 1905 entstandene Karte gegenüber der von 1894 eine Verbesserung, insofern die auf den photographischen Bildern des Firn-

gebietes sehr reichlich sichtbaren Spalten eine formenreichere Darstellung dieses Gebietes erlaubten, so ist der Fortschritt in dieser Richtung noch beträchtlich größer geworden. Auch im Sommer 1920 konnten die weit hinauf ausgeaperten Firnfelder bei gutem Wetter aufgenommen werden, und da beim Konstruieren der Höhenschichten mit Hilfe des Stereoaographen außer dem Spaltenreichtum auch noch der Stereoeffekt, d. h. das räumliche Bild der gesehenen Landschaft für deren Darstellung ausgenützt werden kann, so war es möglich, auch die nichtzerklüfteten, rundlicheren Formen des Firnfeldes mit großer Sicherheit wiederzugeben.

Tab. 1 Koordinatentafel des Hintereisferners.

	x	y	z
Weißkugel	13042,25	14259,61	3736,9
Langtauferer Spitze	11519,16	13302,10	3459,5
Vordere Hintereisspitze	8672,27	10458,16	3438,4
Im hinteren Eis	8768,13	14785,35	3269,6
Mutspitze, Stange	7700,67	10566,11	3257,1
Krahwand	7452,05	17510,03	3251,3
Teufelseck, Stange	10455,16	15586,97	3226,9
Hannes	10395,11	13290,66	3191,6
Teufelseck, Steinmann	10874,17	15698,54	3175,4
Nock	6666,3	9704,3	3152,5
Mittlere Guslarspitze	5497,65	9963,86	3126,0
Steinmann III im Oberen Berg	7539,52	13482,79	3109,2
Mutspitze Steinmann	7175,95	10820,05	3038,9
Steinmann II im Oberen Berg	6587,52	12780,09	3005,1
X.	9470,74	12673,72	2924,9
Steinmann I im Oberen Berg	6105,72	12471,83	2921,5
Steinmann unter der Mittleren Guslarspitze	5201,67	10447,37	2909,3
VIII.	7110,25	12355,21	2688,0
IV.	6431,58	12083,24	2657,7
V.	6913,47	12189,91	2652,8
III.	6151,17	11991,00	2632,7
VI.	5826,36	11053,99	2585,1
II.	5801,92	11914,58	2584,7
E'	5264,3	12054,5	2583,7
E	5230,03	12197,96	2580,0
Hospiz	4797,91	11954,83	2441,9
VII.	4858,33	11337,61	2408,6
I.	4306,67	11369,93	2298,7

Die Genauigkeit der Karte wurde von mir an mehreren Stellen geprüft, für welche die Koordinaten sicher bekannt sind; so konnte

z. B. die Stelle des Signales X aus den Photographien nicht angegeben werden; die nachträgliche Eintragung in den Höhenschichtenplan brachte eine scharfe Übereinstimmung der aus der Karte entnehmbaren Höhe mit der aus der Ausgleichung erhaltenen. Wo sich kleine Abweichungen zwischen den älteren Darstellungen und der Karte 1920 ergaben, hat bei genauer Prüfung diese Recht behalten, so daß ich unbedenklich für das Felsgebiet die Sicherheit der Karte von 1920 jener der Karte von 1894 vorziehe. In allen wesentlichen Teilen stimmen jedoch beide Karten innerhalb der Zeichnungsgenauigkeit überein. Für Firn und Zunge kann eine solche Übereinstimmung, der Natur des bewegten Materiales nach, nicht bestehen.

Die Karte von 1920 gibt, wohl als erste Darstellung eines Gletschers, mit völliger Genauigkeit den Verlauf aller sichtbaren Spalten an. Es zeigt sich vor allem im Zungengebiet der Zusammenhang zwischen den Spaltensystemen und den Neigungsverhältnissen der Gletscheroberfläche. Im Firn ist der Reichtum an Spalten wohl größer, als er in der Karte zum Ausdruck kommt, weil eben die Schneedecke noch eine große Zahl von ihnen verhüllt. Über die Anordnung der Spalten wird später, bei Erörterung der Bewegungsverhältnisse von 1918 bis 1920, noch näheres zu sagen sein.

Diese Karte von 1920 hat den Vorzug mit Hilfe eines Minimums an photogrammetrischem Material entstanden zu sein. Zur Konstruktion der Höhenlinien im Firn dienten drei Standlinien, deren eine in etwa 3270 m Höhe zwischen den Punkten »im hinteren Eis« 3269,7 und 3264,8 liegt, während die beiden anderen zwischen den Punkten 2792,2, 2791,3 und 2775 auf den ebenen Teilen der Gletscherzunge gewonnen sind. Von der ersten aus konnten mit Hilfe von drei Plattenpaaren unter äußerster Ausnutzung des Stereogrammen die ganzen westlichen und südwestlichen Hänge des Firnfeldes sowie der Vernaglwandferner gewonnen werden. Eine vierte Stereobasis liegt am Guslarhang mit den Endpunkten 2909,3 beim Steinmann vor der Mittleren Guslarspitze und dem höchsten Punkt 3126,0 dieses Berges. Die Auswertung auch dieses Plattenpaares stellt eine Höchstleistung dar, weil die große Höhendifferenz an den Bearbeiter besondere Anforderungen stellte und weil noch auf sehr große Distanz sowohl Zunge als Firnteile mit völliger Sicherheit erhalten wurden. Konstruktion und Zeichnung des autogrammetrisch hergestellten Kartenmaterials erforderten einen Zeitaufwand von etwa 80 Stunden. Das ist nicht mehr, sondern sogar etwas weniger als die Zeit, welche ich zur photogrammetrischen Konstruktion des Zungenendes und des unteren Teiles des Kessel-

wandfegers aus etwa 300 Einzelpunkten von den Punkten II, E' und Hospiz aus notwendig hatte. Man bemerkt den großen Vorsprung, den die stereoautogrammetrische Arbeit mindestens hinsichtlich des Zeitaufwandes gewährt. Nimmt man die Vorteile hinsichtlich der Linienführung und Wiedergabe der Formen, von denen oben die Rede war, hinzu, so ist der technische Fortschritt des neuen Verfahrens genügend erwiesen. Kann bei künftigen Gletscherstudien der Stereoautograph günstig verwendet werden, dann wird die Gletscherforschung daraus großen Vorteil ziehen können; denn es ist zur genauen Verfolgung der Vorgänge im strömenden Eis unbedingt erforderlich, an einem Gletscher in Zwischenzeiten von höchstens drei Jahren den Stand der Gletscheroberfläche bis ins oberste Firngebiet durch genaue Vermessungen zu kartographieren. Es wird somit bei Anwendung der Autogrammetrie eine wesentliche Entlastung der Gletscherforscher eintreten, welche zur Beschaffung des Kartenmaterials als Unterlage für die eigentlichen Studien bisher einen außerordentlichen Zeitaufwand nötig hatten.

In der Absicht über Änderungen der Lage und Ausdehnung der Spaltensysteme möglichst sicheren Aufschluß zu erhalten, wurde 1922 von einer Stereobasis am Guslarhang und je einer solchen bei den Signalen Hochjochhospiz I und II aus neu photogrammetriert. Auch die Karte dieses Zustandes der Gletscheroberfläche bis zur Höhe 2750 m liegt fertig vor. Aus dem nun 29jährigen Beobachtungszeitraum, seit dem Jahre 1894, verfügen wir also über drei Karten des ganzen Gletschers: 1894, 1905 und 1920 und eine Anzahl kleinerer Karten von mehr oder minder ausgedehnten Teilen der Gletscherzunge. Es ist ein anscheinend reiches Material, das in bezug auf Anzahl der Karten des Zungenendes nur durch das für den Rhonegletscher übertroffen wird. Und doch hat sich gezeigt, daß die Zwischenzeiten für die Aufnahmen des Firnfeldes zu lang sind. Vergleicht man nämlich die drei vollständigen Karten untereinander, so erhält man für 1894 bis 1905 durchwegs ein Einsinken der Gletscheroberfläche, das in dem Gebiet zwischen 2500 m und 3400 m fast gleichmäßig 10 m ausmacht. Unterhalb 2500 m war die Einsenkung noch beträchtlicher, was sich auch in einem Höherliegen des Gletscherendes und einem Arealverlust des Fegers ausdrückt. Dieses Einsinken wäre mit dem allgemeinen Rückgang des Gletschers und der allmählichen Verminderung der Eisgeschwindigkeiten in gutem Einklang. Der Vergleich der Karten 1905 und 1920 aber zeigt für den von der Weißkugel herabkommenden Hauptzufluß ein weiteres Einsinken, das zwischen 3000 und 3100 m Höhe 20 m

und mehr ausmacht. In der Zwischenzeit konnte aber durch Einmessung einzelner Punkte gerade in diesem Gebiet eine Hebung gegen die Oberfläche von 1905 festgestellt werden und außerdem fand der Massentransport statt, welcher den kleinen Vorstoß des Gletschers von 1918 bis 1919 verursachte. Die Firnoberfläche muß zeitweise beträchtlich höher gelegen haben als 1905 und 1920, damit die für den Vorstoß nötigen Massen angesammelt werden konnten. Alles, was über die Bewegungsverhältnisse des Eises in der Gletscherzunge bekannt ist, deutet darauf hin, daß die Firnoberfläche weit unruhiger ist, als es nach den drei Karten zum Ausdruck kommt. Nur an einigen Stellen über 3100 m Höhe im Hauptfirn erweist die Karte 1920 Anhäufungen gegenüber 1905. Häufig zeigt sich dagegen eine Hebung der Firnoberfläche auf der Karte 1920 in der stark bewegten und zerklüfteten Decke der Ostflanke der Langtauferer Spitze und fast durchgängig im Zuflußgebiet, das zwischen diesem Berg und der Hochvernaglwand liegt. Hier, auf dem Langtauferer Zufluß, ist der durchschnittliche Betrag der Hebung zwischen 2900 und 3200 rund 8 m; über 3200 m gibt der Höhenlinienverlauf eine Senkung der Oberfläche gegen 1905 zu erkennen, die allerdings nur stellenweise auftritt und wenige Meter beträgt. Auf der Gletscherzunge ist zwischen 2500 m und 2750 m eine Hebung der Oberfläche mit dem Höchstbetrag 10 m (bei 2500), von 2750 m aufwärts bis zu 2900 m eine allmählich zunehmende Senkung eingetreten. Abwärts von 2500 m ist auf der Karte von 1920 gegenüber der von 1905 der Einfluß der durch den Vorstoß bewirkten Schwellung noch unbemerklich, weil eben hier die Senkung seit 1905 ziemlich beträchtlich war.

Die Karte der Zunge von 1922 gibt gegen 1920 eine allgemeine Senkung der Eisoberfläche, welche zwischen 2500 und 2700 m Höhe fast 10 m, abwärts von 2500 m weniger, bei 2350 m 0 m ausmacht; bei 2850 bis 2900 m dagegen ergibt sich eine leichte Schwellung. Die relativ starke Einsenkung innerhalb der zwei Jahre erklärt sich aus der großen Abnahme der Eisgeschwindigkeiten und der für 1920 bis 1922 bedeutend über dem Durchschnitt liegenden Abschmelzung des Eises. Der Senkung der Oberfläche entspricht auch eine Verschmälerung der Zunge, welche hauptsächlich in einer Verlegung des linken Gletscherrandes zum Ausdruck kommt; sie beträgt zwischen dem Kesselwandferner und der Gegend unterhalb Signal X, also längs einer Strecke von fast 3,5 km rund 20 m. Am schuttbedeckten rechten Rand, längs des Oberen Berges, ist die Verschmälerung viel geringer; sie beträgt im Mittel kaum 5 m. Schuttbedeckung und schwächere

Insolation wegen Beschattung durch den Oberen Berg sind die Ursachen dieses Unterschiedes an beiden Gletscherrändern. Das Gletscherende ist von 1920 bis 1922 stationär geblieben, doch hat bis zur Höhenlinie 2430 am linken Rand eine Verschmälerung bis zu 35 m stattgefunden; von hier bis zur Einmündung des Kesselwandfeners war der Rand beide Jahre an der gleichen Stelle. Die Schuttdecke der großen Mittelmoräne ist im Lauf der letzten Jahre immer mehr gegen den linken Rand abgerutscht; seit 1918 ist von etwa 2450 m bis zum Gletscherende das bewegte Eis an dieser Stelle fast schutfrei; die letzten Reste des noch Spuren der Naht enthaltenden Eises, welches die Einmündung des Kesselwandfeners passiert hat, schmelzen bei 2450 bis 2455 m aus. Im Jahre 1922 endete die längs der Mittelmoräne deutlich verfolgbare Naht zwischen dem Langtauferer Zufluß und dem von der Weißkugel kommenden Hauptgletscher in dem Winkel bei der großen rechten Seitenmoräne des Kesselwandfeners. Das heißt nichts anderes, als daß der Langtauferer Zufluß immer mehr an Mächtigkeit gegenüber dem Hauptgletscher eingebüßt hat. Das Eis des letzteren gewann bei der Einmündung des Kesselwandfeners und abwärts davon einen Teil des Gletscherbettes, der bei früherem, höheren Gletscherstand noch von Eis eingenommen war, das aus der Langtauferer Mulde und auch vom Kesselwandfener stammte. Dieser Verbreiterung der Eismasse, welche von etwa 2600 m an beginnt, entspricht auch das Auftreten des unteren großen Längsspaltensystemes, das sich bis an den linken Gletscherrand erstreckt, seine Hauptursache wohl aber in der starken Richtungsänderung hat, die sich hier im Talweg vollzieht.

Von etwa 1912 an, seitdem der Kesselwandfener sich vom Hintereis zu trennen begann, traten an dieser Stelle immer stärker die Randspalten auf, welche sich später weiter in die Gletschermitte als Längsspalten fortsetzten. Während der Zeit maximaler Eisbewegung 1918 und 1919 und auch vorher, während der Zunahme der Eisgeschwindigkeit, hatten diese Längsspalten nur geringes Ausmaß, vor allem geringe Breite und das Begehen des Eises war nicht erschwert. Mit dem fast durch die ganze Masse der Gletscherzunge gleichzeitig einsetzenden starken Nachlassen der Eisbewegung erfolgte zwischen 1919 und 1920 die Ausbildung der in der Karte 1920 verzeichneten Spaltensysteme, welche dem Wandern auf dem bis dahin fast ganz harmlosen Hintereisgletscher erhebliche Hindernisse brachten und die Einmessung der Geschwindigkeitsmarken teilweise unmöglich machten.

In den kleinen Kärtchen des Zungenendes (Taf. III) tritt das allmähliche Vorschreiten der Schwellung seit 1917 deutlich zutage.

Das Hauptinteresse beanspruchen diese Kärtchen, weil sie das Verhalten des vorschreitenden Kesselwandfeners zeigen, der förmlich auf die Eismassen seines Nachbarn hinaufkriecht. Von 1920 an tritt am linken Rand dieses Gletschers deutlich die Tendenz zur Umbiegung seines Eises in die Richtung des Haupttales auf; doch zeigt sich 1922 im ganzen schon eine merkliche Verschmälerung der Kesselwandzunge, so daß wohl kaum auf eine länger dauernde gemeinsame Strömung der beiden Gletscher zu rechnen ist; denn am Hintereisende treten ja, wie erwähnt, bereits wieder Anzeichen starken Schwundes auf und soweit die Photographien Schlüsse erlauben, ist ein größerer Nachschub aus den oberen Partien des Kesselwandfeners in der nächsten Zeit nicht zu erwarten. Messungen über die Bewegung des Eises in diesem Gletscher liegen nicht vor.

Seit 1894 bis zum bisherigen Minimalstand von 1917 hatte sich das Ende des Hintereisgletschers um 305 m weiter zurück und um 20 m höher verlegt. Von der Linie $x = 6000$ abwärts betrug der Arealverlust des Gletschers, also der Zuwachs des Moränengebietes 18,65 ha. Bis 1920 hatte der Gletscher davon wieder 5,00 ha, bis 1922 weitere 0,10 ha zurückgewonnen. Der kleine Vorstoß brachte von 1918, als das Gletscherende fast dieselbe Stelle einnahm, wie 1917, bis 1922 eine Verlängerung des Gletschers um 42 m.

Nach der Karte von 1905 lassen sich noch einige, die Topographie des Eises betreffende Angaben machen. So findet sich die Gesamtfläche des Kesselwandfeners zu 494,85 ha gegen 528,7 ha, welche ich 1899 nach der Karte der »Reambulierung 1888« ermittelte. Die Horizontalprojektion der von der Kesselwandspitze abwärts ziehenden Kesselwände ist dabei nicht eingerechnet. Von der Fläche des ganzen Gletschers liegen

zwischen Kamm und	3400 m	5,30 ha	
	3400 "	3300 "	53,20 "
	3300 "	3200 "	150,35 "
	3200 "	3100 "	127,80 "
	3100 "	3000 "	60,40 "
	3000 "	2950 "	25,90 "
	2950 "	2900 "	12,30 "
	2900 "	2800 "	27,10 "
	2800 "	2700 "	15,00 "
	2700 "	2600 "	8,90 "
	2600 "	2500 "	5,40 "
	unter 2500 "		3,20 "

Unter 2950 lagen also 1905 nur 97,80 ha gegen 111,3 ha, die seinerzeit nach der »Reambulierung 1888« erhalten wurden. Ein gut Teil der Differenzen zwischen dieser Karte und der meinen scheint also auf den Arealverlust der Zunge des Kesselwandfeners zu kommen, welcher im Laufe von 17 Jahren durch Abschmelzung eintrat. Bei der Beurteilung der Flächenverteilung oberhalb 3000 m ist übrigens zu beachten, daß diese Gebiete nicht 1905, sondern 1914 aufgenommen wurden.

Für den Vernaglwandfener gibt die Karte 1905 eine Fläche von 78,00 ha gegen 79,8 ha im Jahre 1894 und 81,9 ha der Karte 1920; er hat gegen 1905 an seinem linken, nördlichen Rand zwischen 2800 und 3000 m Fläche gewonnen und ist gegen damals auch etwas vorgerückt.

Die Karte 1905 stellt die zwei Hängegletscher am Hintereiskamm mit Flächen von 61,80 ha für den Nachbar des Vernaglwandfeners und 67,70 ha für den von der Vorderen Hintereisspitze kommenden, hochgelegenen Gletscher dar. Die Kreuzfener sind mit 51,80 ha, 93,70 und 124,20 ha angebbar.

Ablation. Die Abschmelzung an der Oberfläche des Gletschers wurde an 23 Stellen der Zunge von 1900 bis 1914 mit ziemlicher Regelmäßigkeit gemessen. An einigen Punkten gehen die Messungen noch weiter zurück. Von 1914 an wurde die Zahl der Marken immer kleiner, weil die Herstellung der kleinen, mit Holzstangen ausgefüllten Bohrlöcher einige Jahre unterlassen werden mußte. Von 1920 an kamen uns die Bohrwerkzeuge, die bis dahin ungestört auf dem Eise überwintern konnten, abhanden — wie die beim Bohrloch von 1904 angesammelten, aus diesem ausgeschmolzenen Röhren. Seitdem sind als regelmäßige Ablationspegel nur die Bohrröhren des tiefen Loches von 1904 und die des Loches von 1910 in Verwendung; dazu kommen seit 1916 die Holzstangen, welche den unteren Teil des 1901 verunglückten Bohrloches ausfüllten und nun allmählich ausschmelzen.

Die Größe der Ablation, welche an den einzelnen Pegeln gemessen wurde, erwies sich als sehr schwankend. Man hat es nicht nur mit einer klimatischen Größe zu tun, die wie etwa die Niederschlagsmenge von Jahr zu Jahr große Abweichungen zeigt, sondern auch mit einer von Insolation und Wind so stark beeinflussten Zahl, daß in einer Querreihe über den Gletscher der Höchstbetrag bald auf der linken, bald auf der rechten Seite des Gletschers, bald in dessen Mitte auftritt. Die längste Beobachtungsreihe kommt dem 40 m-Loch zu, das bereits 1895 zu solchen Messungen verwendet wurde. Die Ergebnisse für dieses Loch sind:

Tab. 2

1895/96	1896/97	1897/98	1898/99	1899/00	1900/01	1901/02	1902/03	1903/04	1904/05
cm									
238	372	661	376	508	516	412	527	414	342

1905/06	1906/07	1907/08	1908/09	1909/10	1910/11	1911/12	1912/13	1913/14
cm								
562	499	600	512	439	568	538	318	360

Der Mittelwert ist 490 cm; die Extreme 238 und 661 cm. In 18 Jahren ist die Bohrstelle um 415 m talwärts geschoben worden und dabei um fast 100 m gesunken; eine der Senkung entsprechende Zunahme der Ablation ist dabei nicht aufgetreten.

Nimmt man die erhaltenen Mittelwerte der Ablation bei allen Meßstellen und ordnet sie den Mittelwerten der Pegelhöhen zu, so erhält man die folgende Übersicht. Der (graphischen) Ausgleichung kann dann in erster Annäherung entnommen werden, daß bei etwa 2900 m Höhe die Ablation aufhört und daß sie am Gletscherende, bei rund 2300 m Höhe den Durchschnittswert 750 cm erreicht.

Tab. 3

	Höhe cm	Ablation cm
Unterste blaue Linie	2370	680
Untere ziegelrote Linie und 3 Bohrlöcher	2410	532
Untere rote Linie	2500	402
Obere ziegelrote Linie	2570	372
Obere blaue Linie	2660	264
4 Stangen	2750	162
Dreikant II	2820	89

Im ganzen ergibt sich ein Mittelwert von 1,25 m Abnahme der Ablation für eine Höhenzunahme von 100 m.

Die Messungen des Auftrages im Firn sind weniger zahlreich; nur für die Jahre 1905/06, dann für 1910/11 und 1911/12 liegen verhältnismäßig sichere Resultate vor. Die zwischen 2819 und 3120 m Höhe auf dem Hauptzufluß des Gletschers verteilten 17 Stangensignale ergaben folgende Mittelwerte des Auftrages in cm Eis (3 m alter Schnee = 1 m Eis).

Tab. 4

Höhe	1905/06	1910/11	1911/12
2850 m.	− 61 cm	+ 10 cm	− 20 cm
2900 „	± 0 „	+ 50 „	+ 20 „
3000 „	+ 100 „	+ 90 „	+ 65 „
3100 „	+ 120 „	+ 125 „	+ 80 „

Mehrere der 6 m langen, 1 m in das Eis eingesenkten Stangen mußten 1911 durch Anbinden neuer Stücke verlängert werden, damit sie für 1912 noch als Pegel brauchbar waren. Die oberste bei 3120 m gestandene war trotzdem 1912 völlig unter Schnee. Die Zahlen wurden nur teilweise durch unmittelbare Messung an der Pegelstange, zum anderen Teil durch Einschneiden des oberen Stangenendes und der Schneeoberfläche von entfernten Instrumentenstandpunkten aus gefunden. Auch der Auftrag ist recht unregelmäßig verteilt. Auf dem Langtauferer Zufluß wurden in den Jahren von 1905 bis 1909 (in einem Fall sogar bis 1911) vier Firnsignale eingemessen, deren 6 m lange Stangen ebenfalls als Schnee- und Ablationspegel dienten. Es fand sich für 1905/06 bei 3090 m Höhe ein Auftrag von 120 cm Schnee (gegen 30 cm, 110 cm und 55 cm in den folgenden 3 Jahren). Beim folgenden Signal, in 3030 m Höhe, ergab sich für 1905/06 ein Auftrag von 20 cm (in den folgenden Jahren, bei gesteigerter Abwärtsbewegung: 110 cm, 0 cm, 50 cm, dann 100 cm und 90 cm). In der Höhe von etwa 2970 m, etwas über dem Eisbruch, wurde dagegen 1905/06 an zwei Stellen die Ablation zu etwa 125 cm gemessen.

Bewegungsmessungen. Aus der Fülle des Beobachtungsmaterials über die Bewegung des Eises gebe ich in Figur 1 eine Übersicht der täglichen Bewegung von 7 Signalen, die in der Hauptstromlinie oder ihr benachbart dahinzogen und in den Jahren 1894 bis 1914, zum Teil fast ununterbrochen, verfolgt werden konnten. Die Verhältnisse während des Krieges erlaubten es nicht, die Messungen auch in das Firnggebiet auszudehnen und fortzuführen. Deshalb bricht die Übersicht mit dem Jahre 1914 ab. Die am linken Rand der Figur 1 angegebenen Zeichen geben die Ausgangslage der Bewegungsmarke durch die Profilvernummer an (vgl. Taf. IV: Bewegungslinien). Die Bezeichnungen Dreikant II, 214 m Loch, 40 m Loch nennen die Marken selbst; für diese Signale sind die Ausgangslagen

Dreikant II	x = 9475,5	y = 13839,2	z = 2855,2 (1894)
214 m Loch	x = 6912,6	y = 11838,2	z = 2610,4 (1904)
40 m Loch	x = 5991,1	y = 11553,0	z = 2505,2 (1895)

Tägliche Bewegung von 7 Signalen.
cm/Tag.

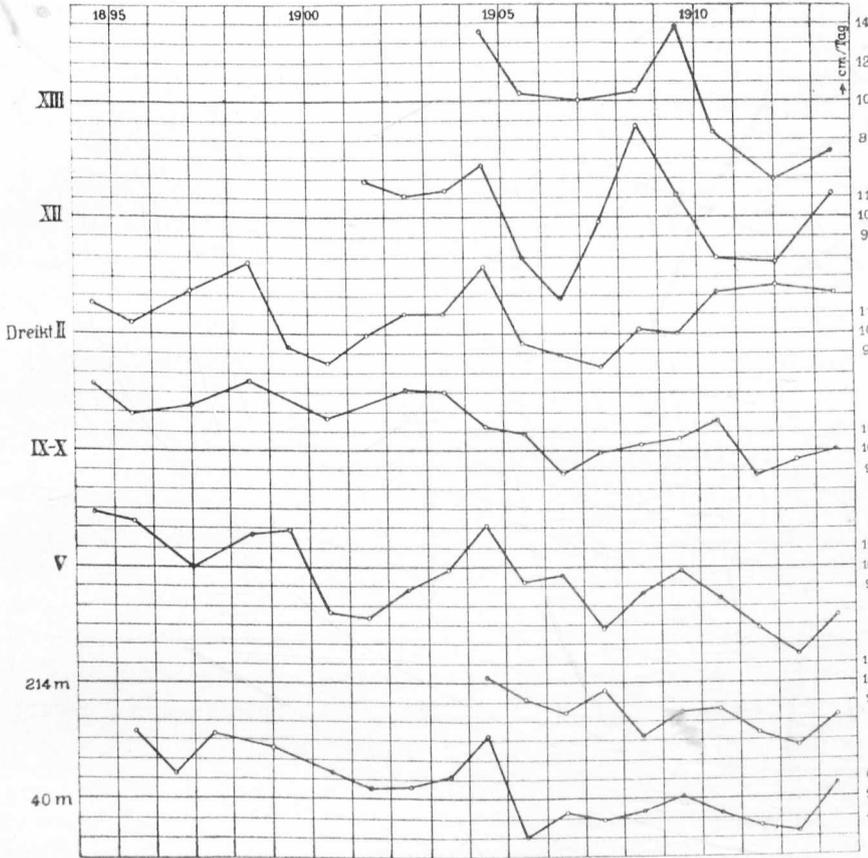


Fig 1.

Aus dem Verlauf der Linien für die zeitliche Änderung der Bewegung in den verschiedenen Höhenlagen läßt sich zunächst schließen: Die Schwankungen der Geschwindigkeit sind bei den hoch, nahe der Firngrenze, gelegenen Marken größer als auf der mittleren und unteren Gletscherzunge. Die Strömung im Firnbecken wird also in ungleichmäßiger Weise von den Eismassen unterhalten, die mit unterschiedlicher Wucht von den steilen Hängen herabkommen. Auch die ungleichmäßige Verteilung der Niederschläge, welche den maximalen Auftrag in einem Jahr in anderer Höhe und für andere Teilgletscher liefert, als im vorausgegangenen, kann für den unregelmäßigen Abfluß des Eises ursächlich sein.

Maxima und Minima ergeben ziemlich genau die gleiche durchschnittliche Dauer einer Schwankung, nämlich 5 Jahre (Maxima 5,1; Minima 4,9), wenn die sieben in Fig. 1 verzeichneten Messungsreihen berücksichtigt werden. Die Tendenz zum Anstieg wie die zur Abnahme der Geschwindigkeit tritt an allen Meßstellen fast gleichzeitig auf. Recht deutlich ist diese Gleichzeitigkeit für die von 1904 bis 1906 beobachtete Abnahme der Geschwindigkeit. Der gleiche Vorgang tritt gegen die Jahrhundertwende mit einer Voreilung in der Höhe 2750 m (Dreikant II) gegenüber den abwärts gelegenen Signalen auf. Dagegen bleibt um 1910 das Maximum beim Dreikant des Profiles XIII gegenüber dem der tiefer gelegenen Marken zurück. Weder aus den Linien der Fig. 1 noch aus den sehr zahlreichen Messungsergebnissen für die Einzelpunkte der über die Gletscherzunge gelegten Steinreihen läßt sich entnehmen, daß eine gesetzmäßige zeitliche Verschiebung der Bewegungsschwankungen von den oberen Teilen des Gletschers gegen das Ende stattfindet. Diese Änderungen vollziehen sich annähernd gleichzeitig durch die ganze Eismasse. Die vier unteren Linien der Figur 1 lassen ein allmähliches Abnehmen der Geschwindigkeit erkennen; das rührt davon her, daß die Bewegungsmarken auf ihrer Wanderung in schwächer bewegte Teile der Zunge kamen; es wurden nicht von Jahr zu Jahr die Geschwindigkeiten in den nämlichen Profilen bestimmt. (Erst nach 1913, als man die Steinreihen neu gelegt hatte, sollten die Marken alljährlich wieder in ihre Ausgangslage zurückgebracht werden. Der Gang der großen Ereignisse hat das 1914 und auch später verhindert.) Die Linie für das Dreikant II zeigt von 1908 an eine starke Abweichung ihres Verlaufes von dem der anderen Linien, weil von da ab das Dreikant in das Gebiet der Querschnittsverengung eintrat, in welchem eine Steigerung der Geschwindigkeit erfolgt. Im übrigen ist bei der Beurteilung der Figur 1 zu beachten, daß in einzelnen Jahren, besonders 1899 und 1912, die Messungen ganz oder teilweise ausfielen. So ist es gerade für Dreikant II und die anderen Firnsignale im Jahre 1912 gegangen. Hätte die Messung stattgefunden, so würde vielleicht die Linie für dies Signal etwas anders verlaufen. So ist es auch für die Stangen und Steinmarken zwischen den Profilen IX und X während der Jahre 1897, 1899 und 1902 sowie für das 40 m tiefe Bohrloch 1899 gewesen. In all diesen Fällen wäre durch die Ausführung der Messungen die schärfere Ausprägung der Maxima und Minima der Geschwindigkeitskurve ermöglicht worden.

Neben der fünfjährigen Schwankung, die sich aus den Beobachtungen am Hintereis ergibt, muß noch die jahreszeitliche Änderung

der Geschwindigkeit erwähnt werden. A. Blümcke und S. Finsterwalder haben darüber schon 1905 einmal berichtet¹⁾. Es handelte sich damals um eine Messungsreihe, die von 1900 bis 1904 lief und mehrmals neben der Feststellung der Markenlagen im Juli auch eine solche im September umfaßte. Diese Messungen hat Blümcke, zum Teil durch O. Gruber unterstützt, später fortgeführt. Das Beobachtungsmaterial, welches über die Jahre 1907 bis 1912 reicht, konnte er noch selbst verarbeiten. Das bisher nicht veröffentlichte Ergebnis habe ich in folgender Tabelle verdichtet.

Verhältnis der Sommer- zur Wintergeschwindigkeit. Tab. 5

	Entfernung vom Gletscherende m	1907	1908	1910	1911	1912	Mittel
Dreikant II	²⁾ 4800	—	0,572	0,846	0,921	0,596	0,734
Stangen	4000	0,767	0,788	0,698	0,848	0,859	0,792
Obere blaue Linie	2700	0,749	0,865	0,782	0,549	0,783	0,756
Obere ziegelrote Linie	1700	0,879	0,817	0,859	0,881	0,963	0,880
Rote Linie	1400	1,175	0,910	1,197	1,160	1,188	1,126
Bohrlöcher	700	0,833	0,917	0,998	0,851	1,190	0,958
Untere ziegelrote Linie	400	1,236	1,228	1,810	1,153	1,340	1,353
Unterste blaue Linie	300	—	1,408	—	—	—	—

Das Gesetz, »daß im unteren Drittel der Zunge (des Hintereisgletschers) die Sommerbewegung überwiegt, weiter hinauf aber bis in die Nähe der Firnlinie die Winterbewegung; sowie daß das Verhältnis beider Bewegungen vom Zungenende gegen das Firnfeld zu regelmäßig abnimmt«, welches Blümcke und Finsterwalder 1905 aussprachen, ist durch diese neue Beobachtungsreihe bestätigt. Nur die Regelmäßigkeit der Abnahme des genannten Verhältnisses erscheint weniger deutlich als in der früher veröffentlichten Zahlenreihe; denn die Mittelwerte für »Bohrlöcher« und »obere blaue Linie« fallen aus der Reihe.

Die durch die reichlicheren Winterniederschläge hervorgerufenen Änderungen der Geschwindigkeit des Eises pflanzen sich also in weniger als einem Jahr vom Firngebiet bis zum Zungenende fort. Das ist in

¹⁾ A. Blümcke und S. Finsterwalder: Zeitliche Änderungen in der Geschwindigkeit der Gletscherbewegung. Sitz.-Ber. d. math.-phys. Kl. d. bayr. Akad. d. Wiss. München 1905. Bd. XXXV, Heft I.

²⁾ Die Entfernungen sind hier, obwohl sie seit 1904 geringer wurden, mit den gleichen Zahlen angegeben wie in der zitierten Abhandlung von Blümcke und Finsterwalder.

guter Übereinstimmung mit dem oben hervorgehobenen Ergebnis der langjährigen Beobachtungsreihe, nach welchem die Ausbreitung solcher Schwankungen »annähernd gleichzeitig« erfolgt. »Annähernd gleichzeitig« heißt also hier soviel wie »innerhalb eines Jahres«. Ob das auch für Gletscher gilt, welche noch länger sind als der Hintereisgletscher, läßt sich nicht sagen, weil entsprechende Messungen an solchen Gletschern bis jetzt nicht vorliegen.

In den Jahren 1914 bis 1922 spielte sich in der ganzen Gletscherzunge ein kleiner Vorstoß ab. Die Geschwindigkeiten begannen anfänglich langsam, später rasch bis zum Jahr 1919 zu wachsen, und zwar fast gleichzeitig über die ganze Zunge hin. Ich gebe auch hier eine Übersicht für die Bewegungsmarken im Stromstrich, da die Messungen vielfach, besonders in den letzten Jahren, auf das Mittelgebiet der Steinreihen beschränkt wurden.

Tab. 6 Geschwindigkeiten in Meter/Jahr.

	Höhe m	1913/14	1914/15	1915/16	1916/17	1917/18	1918/19	1919/20	1920/21	1921/22
40-m-Loch	2408	11,5	23,0	18,3	25,7	45,8	—	—	—	—
Untere ziegelrote Linie, Punkt 7	2438	20,0	29,0	25,7	29,9	51,3	—	—	—	—
Grüne Linie, Punkt 8	2527	28,9	44,2	41,4	55,5	77,8	109,1	68,8	49,4	13,5
Untere rote Linie, Punkt 9	2564	33,9	—	90,2	64,1	84,3	126,6	72,7	44,1	21,8
153-m-Loch	2557	30,8	—	85,6	63,4	83,8	124,8	60,1	36,5	23,2
214-m-Loch	2570	29,4	—	90,4	65,1	82,2	121,5	64,0	44,0	22,3
Mittlere blaue Linie, Punkt 8	2600	33,1	—	103,8	63,4	—	—	—	48,2	—
Obere ziegelrote Linie, Punkt 10	2635	35,0	← 189,5	—	—	296,2	—	—	—	—
Blaugrüne Linie, Punkt 9	2689	37,8	109,0	—	80,8	94,7	123,0	91,1	46,5	14,2
Bohrloch von 1910	2685	—	—	—	75,1	97,5	112,0	70,2	46,1	13,8
Obere blaue Linie, Punkt 9	2720	←	240,3	—	—	302,2	—	—	—	—
Stange β	2747	37,1	← 187,8	—	—	81,5	118,6	77,9	—	—
Dreikant II	2811	44,6	←	—	—	379,3	—	—	57,5	—

Man bemerkt, daß die Tendenz zu größerer Geschwindigkeitsänderung bei allen Marken fast gleichzeitig im gleichen Sinne, wenn auch nicht im gleichen Ausmaß auftritt. Bei näherem Zusehen erkennt man aber ziemlich beträchtliche Unregelmäßigkeiten; so haben die benachbarten Punkte »9 der unteren roten Linie« und »153-m-Loch« zeitweilig ein ungleich starkes Anwachsen bzw. Abklingen der Bewegung; das gleiche kann für »Punkt 9 der blaugrünen Linie« und »Bohrloch von 1910« gesagt werden. Bei Dreikant II ist ein ziemlich beträchtliches Zurückbleiben gegenüber der Stange β festzustellen,

welche 1905 um 780 m weiter unten ihre Wanderung begann. 1920 betrug der Abstand der Profile des Dreikants II und der Stangen nicht mehr 780 m, sondern 870 m; der Gletscher ist in dem Zwischengebiet gestreckt worden, weil das Eis aus dem breiteren Firnbecken in die schmale Zungenform gepreßt wird. Die Unregelmäßigkeiten, welche die Verschiebungen der einzelnen Geschwindigkeitsmarken zeigen, treten nur in dem Zeitraum der großen Geschwindigkeiten hervor. Das beweist, daß die Eisbewegung im Falle eines, wenn auch nur kleinen, Vorstoßes an den verschiedenen Stellen verschieden schnell den geänderten Bedingungen angepaßt wird. Man gewinnt den Eindruck, als ob die ruhige, gleichmäßige Strömung durch eine ruckweise Bewegung abgelöst wird; im Laufe längerer Zeit (2—3 Jahre) gleichen sich aber die Unregelmäßigkeiten wieder aus, so daß eine bei Beginn des Vorstoßes wohlgeordnete Steinreihe auch nach dessen Ablauf wieder ziemlich geordnet verläuft.

Nach der fünfjährigen Periode wäre ungefähr um 1914 bis 1915 ein neues Maximum der Geschwindigkeit zu erwarten gewesen. Statt dessen trat der eben erörterte Vorstoß auf. Da 1921 bei den Signalen im Profil X bereits wieder eine Vergrößerung der Geschwindigkeit sich ankündigte, ist es möglich, daß der Zustand geringer Bewegung, der aus den Messungen 1921/22 folgt, nicht lang anhält. Dann würde sich die Schwankung 1914 bis 1922 annähernd mit der fünfjährigen Periode vereinigen. Es wäre deshalb recht wertvoll gewesen, wenn die geplanten Nachmessungen 1923 hätten stattfinden können. Vermutlich ist die 5jährige Periode in den Abflußbedingungen des Eises, nicht in Niederschlags- oder Ablationsschwankungen begründet (vgl. hierzu S. 155); dann würde sie dem entsprechen, was ich früher die orographische Periode nannte. Ihre Interferenz mit der Niederschlagsperiode würde die außerordentlich großen Vorstöße des Gletschers bedingen.

Der Hauptzweck, der bei der andauernden Fortsetzung der Geschwindigkeitsmessungen verfolgt wurde, war die Sicherstellung des Verlaufes der Bewegungslinien. Das Resultat der Bemühungen ist in Tafel IV niedergelegt, welche die Züge der beobachteten Signale auf der Zunge und im Firngebiet enthält. (Die Stellungen der Steinreihen sind darin nicht angegeben, damit die Übersicht nicht leidet. Nur für einzelne besondere Signale, wie tiefe Bohrlöcher mit Gestänge oder die Stangen und Dreikante im Firn sind die Bewegungslinien gestrichelt eingetragen.) Leider mußte der Maßstab dieser Tafel klein (1:25 000) genommen werden; so kommen die kleinen Unregelmäßigkeiten für

die einzelnen Signale, welche bei großem Maßstab gut erkennbar sind, nicht zur Darstellung. Da es sich aber im ganzen nur um kleine Unregelmäßigkeiten handelt, so entspricht der Zug der Bewegungslinien, wie ihn die Tafel zeigt, doch recht genau der Wirklichkeit. Es ist übrigens wichtig zu bemerken, daß da, wo sich die jüngeren Teile von Bewegungslinien hoch gelegener Marken mit den älteren Teilen der entsprechenden Linien tiefer gelegener Marken begegnen, fast durchweg entweder völlige Deckung oder recht gutes Parallelgehen stattfindet. Auch die Periode des Vorstoßes, in welcher die Geschwindigkeit den dreifachen Betrag der vorausgehenden »normalen« erreichte, hat darin keine Änderung gebracht. Nur gegen das Gletscherende, hauptsächlich bei der Einmündung des Kesselwandfeners, hat sich im Lauf der letzten Jahre der Zug der Bewegungslinien gegen die frühere Zeit etwas gegen den linken Gletscherrand verschoben. Daran ist, wie schon bei Besprechung der »Karte 1922« bemerkt wurde, die gegenüber dem Hauptzufluß geringer gewordene Mächtigkeit des Langtauferer Zuflusses schuld — neben dem Schwinden des Kesselwandfeners, der trotz seines nach 1914 erfolgten Anwachsens seinen früheren Einfluß nicht mehr ausüben kann. Diese Änderung im Lauf der Bewegungslinien, die übrigens nur durch den Verlauf der Naht in der »Karte 1922« (strich-punktierte Linie längs des Rückens der großen Mittelmoräne) und je einen Stein der unteren roten und grünen Steinreihen teilweise verfolgt werden kann, ist in der Tafel IV nicht dargestellt. Hier ist vielmehr der Verlauf der Bewegungslinien eingetragen, wie er dem Stande des Gletschers von 1905—1906 entspricht, weil diese Zeichnung für die Rekonstruktion der Talquerschnitte verwendet wurde, welche sich auf die Beobachtungen von 1905/06 an der Gletscheroberfläche stützt und durch die bei den Tiefbohrungen gewonnenen Resultate kontrolliert wird.

Im Firn des Hauptzuflusses kann für den zentralen Teil der Verlauf der Bewegungslinien auf Grund der von 1894 bis 1899 und dann von 1905 bis 1914 verfolgten Verschiebungen der Stangen und Dreikante mit einiger Sicherheit angegeben werden — wenigstens bis zur Höhe 3120 m. Für die größeren Höhenlagen bis hinauf zu Randkluft und Grat mußte die Verteilung der Bewegungslinien »gefühlsmäßig« erfolgen, wobei allerdings der Zug und die vermutliche Herkunft einiger Innenmoränen, die im mittleren und unteren Zungengebiet ausschmelzen, sowie die Verteilung des ganzen Einzugsgebietes auf die einzelnen Teilgletscher einen bestimmenden Einfluß hatten. — Da auch auf dem Langtauferer Zufluß streckenweise der Zug von Be-

wegungsmarken bekannt ist, konnte auch hier die Zuordnung der Teile des Firngebietes zu den auf der Zunge angenommenen Teilgletschern in einer Weise erfolgen, welche der Wirklichkeit ziemlich nahe kommen dürfte.

Die Region maximaler Geschwindigkeit auf der Zunge lag 1905/06 ziemlich im gleichen Bereich wie 1894/95; aber damals war die größte Geschwindigkeit 51 m zwischen Profil VII und VIII; 1905/06 war das Maximum an derselben Stelle, aber nur mit 38,2 m gemessen. Während des Vorstoßes wurde dies Gebiet der stärksten Eisbewegung allmählich weiter abwärts verlegt, und im Abklingen des Vorstoßes ist es bis in die unteren Teile der Zunge, zwischen die Profile III und II, gelangt. Übrigens waren die größten Geschwindigkeiten, welche 1905/06 gemessen wurden, nicht auf der Zunge, sondern im Firn gefunden, wo in der Höhe 3045 m eine jährliche Verschiebung von 51,0 m ermittelt wurde. Hier hat die Firnoberfläche verhältnismäßig großes Gefälle. Weiter abwärts, in flacheren Teilen der Firnmulde, ging die Geschwindigkeit im Stromstrich auf 30 m herab; aber an Stellen größerer Neigung war sie stets wieder größer: 38 m, 40 m. Allem Anschein nach erweist sich im Firn eine Neigungsänderung von größerem Einfluß auf den Betrag der Vorwärtsbewegung als in der allerdings viel flacher auslaufenden Zunge.

Ergebnis der Tiefbohrungen. Durch die an 12 Stellen gelungene Durchlochung der Zunge des Hintereisgletschers erweist sich das für diesen Gletscher vorliegende Beobachtungsmaterial überlegen gegenüber dem an anderen Gletschern gewonnenen, selbst gegenüber dem, das für den mit großer Sorgfalt studierten Rhonegletscher vorliegt. Es ist zwar über die Bohrarbeiten und ihre Erfolge und Mißerfolge bereits früher jährlich, einmal sogar zusammenfassend¹⁾ in der Zeitschrift für Gletscherkunde berichtet worden. Die für die weitere Verarbeitung notwendige Sichtung des Materiales und die am Gletscher selbst in den letzten Jahren gemachten Beobachtungen geben jedoch Veranlassung, auf einige Korrekturen hinzuweisen, welche die früheren Mitteilungen erfahren müssen.

Da sind zunächst die Angaben zu ändern, welche die im Jahre 1899 hergestellten Bohrlöcher betreffen. Wir erreichten damals Tiefen von 66,5 und 84,5 m und glaubten bis auf die Gletschersohle hinab gekommen zu sein. Die Bohrlöcher wurden nach Herausnahme des Gestänges mit eisenbeschuitten Holzstangen ausgefüllt, die nicht an-

¹⁾ Zeitschr. f. Gletscherkunde 4 S. 66.

einander vorbeigleiten konnten. Diese Stangen dienten als Geschwindigkeitsmarken und Ablationspegel; die letzten von ihnen sind, an beiden Stellen, im Jahre 1918 ausgeschmolzen — aber ihr Ende lag noch 25, bzw. 15 m über dem Felsen der Talsohle. Dementsprechend muß die wirkliche Tiefe des Gletschers an den beiden Bohrstellen von 1899 mit 92 bzw. 100 m statt mit 66,5 bzw. 84,5 m angesetzt werden. — Auch das im Jahre 1902 in der Höhe 2611 m mit einer Tiefe von 153 m gewonnene Loch kann nicht bis zum Grund gereicht haben. Ein sicherer Anhalt für die Abschätzung des Fehlers besteht nicht; bis die untersten in diesem Loch steckenden Holzstangen abschmelzen, wird noch ein Zeitraum von 18 bis 20 Jahren vergehen. Erst dann wird man die Korrektur angeben können. Dieses Bohrloch muß also für weitere Verwendung außer acht bleiben. — Das im Jahre 1903 auf der rechten Talseite erhaltene Bohrloch von 36 m gibt die wirkliche Tiefe des damaligen Eises an der Stelle nicht an. Die abwärts davon abschmelzende Eismenge, aus deren Größe bei der Rekonstruktion der Profile die Eisdicke an der Bohrstelle nun mit weitgehender Sicherheit bestimmt werden kann, verlangt eine beträchtlich größere Tiefe als 36 m. Also kann auch diese Bohrprobe nicht verwendet werden.

Sonst ist in der folgenden Tabelle gegenüber den schon früher mitgeteilten Bohrtiefen keine Änderung vorgenommen worden, obwohl angenommen werden darf, daß wir in verschiedenen Fällen auf Steine der Grundmoräne, aber nicht auf den festen Fels des Gletscherbettes gekommen sind. Der hierbei auftretende Fehler wird kaum größer als 2 bis 3 m sein.

Tab. 7 Lage der Bohrlöcher.

	Bohrtiefe m	wirkliche Tiefe m	x	y	z	Grund m
1899	66,5	92	5777,0	11623,5	2469,5	2377
	84,5	100	5758,1	11423,3	2468,0	2368
1903	38,0	38	7056,4	11503,4	2596,1	2558
	118,0	118	7020,9	11600,7	2603,2	2485
	116,0	116	6859,9	11934,0	2609,9	2494
1904	184,0	184	6897,7	11872,0	2607,4	2423
	214,0	214	6912,6	11838,2	2610,4	2396
1906	91,8	92	8315,1	12231,8	2711,7	2620
	97,2	97	8304,2	12274,3	2714,2	2617
1908	138,7	139	8314,5	12357,4	2725,6	2587
1909	223,7	224	8240,1	11423,0	2728,5	2505

Die Positionen sind in Taf. IV »Bewegungslinien« eingetragen.

Außer den eben erwähnten gelungenen Durchbohrungen mit ihren in der Tabelle 7 zusammengestellten Ergebnissen wurden noch vielfach mißlungene Versuche gemacht. Es sei hier insbesondere der sieben Wochen währenden Anstrengungen gedacht, die 1910 unternommen wurden, um den Gletscher in der Region größter Geschwindigkeit zu durchbohren. Obwohl wir bis zu 95 m Tiefe an einem Tag zu gewinnen gelernt hatten, wurden wir trotz häufiger Wiederholung des Bohrversuches immer wieder abgewiesen, bevor mehr als 110 m Tiefe erreicht waren, während über 300 m hätten erreicht werden müssen. Wir hatten uns zwar auf Grund früherer Erfahrung mit 60 m Röhren von 110 mm Weite versehen, welche zum Ausbüchsen des Bohrloches verwendet wurden; aber trotzdem es uns gelang, die Ausweitung des Loches bis zu 90 m Tiefe zu erreichen und die zusammengeschaubten Ausbüchröhren bis annähernd zu dieser Tiefe zu versenken, konnten wir es nicht verhindern, daß in noch größerer Tiefe neue Spalten im stark bewegten Eis durch das Bohrloch rissen.

Dieser Mißerfolg veranlaßte mich, während der folgenden Jahre in Nürnberg verschiedene Versuche anzustellen, welche zur Ausbildung einer »elektrischen Bohrmethode« führen sollten. Es war angestrebt, elektrische Energie durch einen schwer schmelzbaren Widerstand zu senden, der einem geeigneten Senkkörper eingebaut war. Die elektrische Energie sollte in Wärme umgesetzt werden, welche unter dem Senkkörper das Eis schmelzen sollte. Es stellte sich aber heraus, daß es kaum möglich ist, die Schmelzwirkung auf einen Bereich zu beschränken, dessen Durchmesser nicht wesentlich größer als der des Senkkörpers ist, und außer dem, daß wir bis jetzt (1924) über kein Material verfügen, welches auf längere Zeit und unter Bedingungen, wie sie im lufthaltigen, spaltenreichen Gletschereis gegeben sind, diesen Umsatz von Energie aushalten würde. — Man wird daher, falls Gletscherbohrungen irgendwo neu durchgeführt werden sollten, doch auf das rasche Arbeit erlaubende mechanische Bohrverfahren angewiesen sein, das von uns angewandt wurde. Es ist in den »Études glaciologiques: Tirol autrichien« (Paris 1909, Ministère d'Agriculture) durch die Herren Bernard und Flusin eingehend beschrieben worden. Die beiden Herren hatten 1906 den amtlichen Auftrag erhalten, unseren Arbeiten beizuwohnen. Nachher führten wir durch Benützen der Ausbüchröhren eine Verbesserung des Verfahrens ein; eine zweite fand dadurch statt, daß wir an Stelle der bis dahin verwendeten zweistiefeligen Pumpe eine rasch laufende Rotationspumpe (Exprespumpe) verwendeten, welche 100 Liter Wasser pro Minute zu fördern vermochte.

Sie wurde durch einen dreipferdigen Benzinmotor (Fafnir-Aachen) angetrieben. Dieser war übrigens der erste seiner Art, der in einer Höhe von 2700 m in Gang gebracht wurde (1907). Im Flachland war der Motor völlig zufriedenstellend ausprobiert worden; aber in der dünnen, kalten Höhenluft auf dem Gletscher wurde er »bergkrank«. Es mußte durch Änderungen am Vergaser die richtige Sauerstoffzuführung ausgesucht werden; als dies gelang, war der Fafnir wieder gesund. Die gewonnenen Erfahrungen konnten für die Vergaserkonstruktion der Flugzeugmotoren benutzt werden.

Einen besonderen Erfolg der Tiefbohrungen darf ich betonen. Wir haben 1908 nahe an der Stelle, an der wir 1909 bis zum Grund kamen, eine Tiefe von 162,8 m erreicht; unter Erscheinungen, wie sie auftraten, wenn der Bohrer auf die Gletschersohle (oder die Grundmoräne) kam, war ein weiteres Vordringen verhindert. Für diese Stelle war aber auf Grund der Profilrekonstruktionen eine Tiefe von etwa 230 m vorausbestimmt worden. Im folgenden Jahre wiederholten wir die Bohrung an der gleichen Stelle mit dem gleichen Ergebnis wie 1908; als aber das ganze Bohrgerüst um 10 m seitlich verschoben wurde, gelang es, im Eis die Tiefe von 223,7 m zu erreichen. Das Prinzip, auf dem die Profilrekonstruktion beruht, war glänzend bewährt befunden.

Die Rekonstruktion der Querschnitte. Setzt man den Gletscher als stationär voraus, denkt man sich also alle zeitlichen Änderungen von Auftrag im Firn, Geschwindigkeit der Bewegung, Abtrag im Abschmelzgebiet und somit auch im Stande der Oberfläche gleich Null, so ergibt sich, daß stets die gleiche Eismenge aus dem Firn in einem gewissen Zeitraume nachgeschafft werden muß, die in dem gleichen Zeitraume im Zungengebiet schmilzt. Ordnet man nach S. Finsterwalder¹⁾ jedem Flächenelement des Sammelgebietes ein Flächenelement des Abschmelzbereiches derart zu, daß je zwei solcher Elemente durch unter sich und zur Gletschersohle nahezu parallele Stromlinien verbunden sind, so kann die Bewegung des Eises als stationäre Strömung behandelt werden. Für diese gilt dann die Äquivalenzbedingung $A \cdot \Delta F = a \cdot \Delta f$, in welcher A den Auftrag, a die Ablation (senkrecht zu ΔF bzw. Δf gemessen), ΔF und Δf die korrespondierenden Flächenelemente sind. Schneidet man das ganze System der auf diese Weise erhaltenen Stromlinien durch eine zu ihnen senkrechte Fläche, so wird auch diese durch die Stromlinien in Flächen-

¹⁾ Vgl. Finsterwalder, »Der Vernagtferner«. Wiss. Erg.-Hefte zur Zeitschrift des D. u. Ö. A. I. S. 47 ff. München 1897; Hess, »Die Gletscher«. Braunschweig 1904. S. 325 ff.

elemente $\Delta\varphi$ zerlegt und die Menge $A \cdot \Delta F$, die in einem gewissen Zeitraum von dem Stromfaden aufgenommen wird, muß gleichzeitig den Schnitt $\Delta\varphi$ dieses Fadens mit einer bestimmten Geschwindigkeit v passieren. Schneidet man das Stromliniensystem durch zwei solche Flächen, dann muß sein $v_1 \cdot \Delta\varphi_1 = v_2 \cdot \Delta\varphi_2$. Das ist die für das Gletscherinnere geltende Äquivalenzbedingung. Die beiden Gleichungen können miteinander verbunden werden, da auch die Gletscheroberfläche alle Stromfäden schneidet. Wenn also auf der Zungenoberfläche an der Stelle Δf die Abschmelzung gemessen wurde und für einen Profilschnitt am oberen Ende des Δf die Geschwindigkeit v_1 bekannt ist, so kann aus $a \cdot \Delta f = v_1 \cdot \Delta\varphi_1$ die Größe des Flächenelementes $\Delta\varphi_1$ berechnet werden. Kennt man (aus der Karte) die Breite des Δf , die mit der von $\Delta\varphi$ gleich ist, so kann die Tiefe ermittelt werden, welche der in Δf ausmündende Stromfaden im angenommenen Profil haben muß. Wenn also an möglichst vielen Stellen der Zunge Abschmelzung und Geschwindigkeit für den gleichen Zeitraum gemessen werden, so lassen sich die Tiefen (= Dicken) aller Stromfäden an ihren Ausmündungsstellen ermitteln. Ebenso gelingt es, die Tiefen der Stromfäden an ihren Eintrittsstellen in den Gletscher zu berechnen, wenn im Firn an möglichst vielen Punkten die Größe des Auftrages und die Oberflächengeschwindigkeit für den nämlichen Zeitraum bekannt sind.

Wenn man nun aus einem Profil in das andere übergehen will und mit Hilfe der Gleichung $v_1 \Delta\varphi_1 = v_2 \Delta\varphi_2$ unter Beachtung der Breitenänderung die Dicke des Stromfadens im Profil 2 bestimmt, so berechnet sich diese leicht, sobald die Annahme gemacht wird, daß auch für den unterhalb des Profiles 1 ausmündenden Stromfaden im Profil 2 die Oberflächengeschwindigkeit v_2 besteht. Unter Benutzung dieser Annahme kommt man daher zu einer schrittweisen Verfolgung der einzelnen Stromfäden von Profil zu Profil und schließlich zur Bestimmung der einzelnen Profiltiefen, welche herrschen müßten, wenn für alle senkrecht untereinander gelegenen Punkte eines Querschnittes die Oberflächengeschwindigkeit Geltung hätte, wenn also die Eisgeschwindigkeit unabhängig von der Dicke des Eisstromes wäre. — Auf Grund dieser Überlegung habe ich seinerzeit aus den Messungsergebnissen für 1894—1895 die Querschnitte des Hintereisgletschers rekonstruiert, und zwar zunächst die eben erwähnten Minimaltiefen der einzelnen Teilgletscher, in welche mit Hilfe der Bewegungslinien der ganze Eisstrom zerlegt gedacht wurde. Unter Berücksichtigung einer Reihe erfahrungsmäßig bekannter Verhältnisse gelang es mir

damals neben den Minimaltiefen auch die wahrscheinlichen Tiefen und damit auch die wahrscheinlichen Querschnittsformen auf Tafel VI in »Untersuchungen am Hintereisferner« anzugeben. Diese wahrscheinlichen Tiefen wurden zunächst, da sie anscheinend zu groß waren, mit einigem Mißtrauen aufgenommen. Die Tiefbohrergebnisse haben aber die annähernde Richtigkeit jener wahrscheinlichen Querschnittsformen erwiesen.

Das vorhandene Beobachtungsmaterial habe ich nun benutzt, um eine neue Rekonstruktion der Profile durchzuführen. Benutzt wurden die Bestimmungen von Ablation und Geschwindigkeit in zehn Profilen der Zunge für den Zeitraum 1905/06, weil für diesen auch die Karte der Gletscheroberfläche vorhanden ist. Benutzt wurde vor allem das System der durch die Beobachtungsreihe 1894 bis 1920 verfolgten

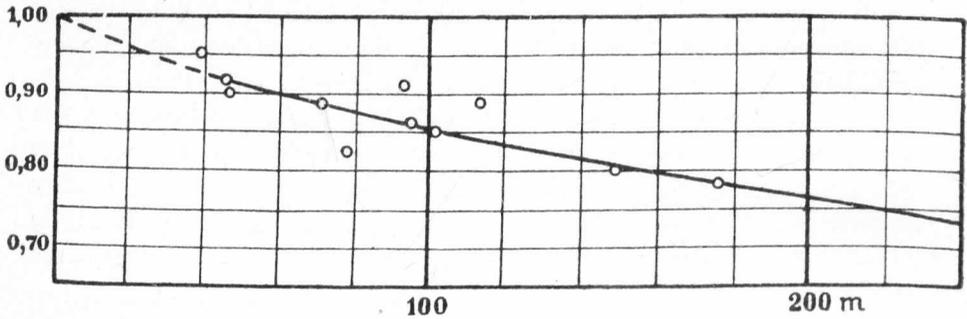


Fig. 2. Verhältnis mittlere Geschwindigkeit : Oberflächengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Minimaltiefe (Abszissenachse).

Bewegungslinien, wie es in Tafel IV dargestellt ist. Das Wertvollste aber liefern die Bohrerergebnisse, da sie die durch Rechnung gefundenen Eistiefen auf die wirklichen Eistiefen umzurechnen gestatten. Es konnten aus den elf sicheren Bohrerergebnissen und dem durch den starken Rückgang des Gletschers in seiner wirklichen Gestalt bekannt gewordenen untersten Profil AB hinreichend viele Einzelbedingungen (vgl. Tab. 8 und die Kreise in Fig. 2) angegeben werden, mit denen die Ausgleichungskurve der Figur 2 erhalten wurde. Sie wurde für die Konstruktion der Profile allgemein zugrunde gelegt.

Die Berechnung der Minimaltiefen gestaltete sich übrigens nicht so einfach, wie es nach den obigen Ausführungen für den stationären Gletscher der Fall sein müßte. Weil in Wirklichkeit der Hintereisferner nicht stationär ist, mußte die Einsenkung der Gletscheroberfläche berücksichtigt werden. Der Betrag kann nur aus den Bestimmungen der Höhenlage der Pegel entnommen werden. Man hat, um hier

möglichst geringe Fehler zu erhalten, die Einmessung dieser Ablationspegel jährlich auf die nämlichen Netzpunkte bezogen und mindestens nach 5, häufig nach 6 und 7 Richtungen gemessen. Der mittlere Höhenfehler blieb trotzdem fast 0,5 m. Diese Unsicherheit bleibt daher auch für die Bestimmung der Einsenkung und haftet damit auch den errechneten Minimaltiefen an. Dazu kommt, daß im Jahre 1905/06 die Ablation sehr ungleichmäßig war. Die zu einer Steinreihe gehörigen Pegel zeigten bald am linken, bald am rechten Rand, bald in der Mitte die größte Abschmelzung. Deshalb konnten zur bequemeren weiteren Behandlung auch die Linien gleicher Ablation nicht mit großer Sicherheit gezogen werden. Der Erfolg dieser Unsicherheiten war, daß ich fünf Versuche zur Rekonstruktion der Profile machen mußte, bis es endlich gelang, in allen Fällen die Bohrtiefen mit den durch Rechnung gefundenen so in Einklang zu bringen, daß eine für alle Stellen des Gletschers brauchbare Beziehung zwischen der Minimaltiefe und der wirklichen Tiefe sich ergab.

Die folgende Tabelle enthält für die einzelnen Bohrstellen als »wirkliche« Tiefe die auf die Oberfläche von 1905 bezogene Tiefe.

Tab. 8

	1905		Verhältnis
	Wirkliche Tiefe m	Minimal- tiefe m	
38-m-Loch	41	39	0,95
92-m- „	80	71	0,89
100-m- „	90	79	0,88
116-m- „	110	95	0,86
118-m- „	120	102	0,85
91,8-m- „	94	78	0,83
97,2-m- „	101	93	0,92
139-m- „	136	113	0,89
184-m- „	187	149	0,80
214-m- „	215	160	0,75
224-m- „	226	176	0,78
Profil A B	52	47	0,90
„ „	50	46	0,92

Die Zahlen der 3. und 4. Spalte dieser Tabelle entsprechen den markierten Punkten in Figur 2. Die zwischendurch gezogene Ausgleichungslinie entspricht den Beobachtungsergebnissen am besten. In allen Fällen, auch bei den verworfenen Rekonstruktionsversuchen,

hat sich übrigens herausgestellt, daß die Minimaltiefe wesentlich kleiner ist, als die durch die Bohrungen ermittelte wirkliche Tiefe. Daraus folgt zwingend, daß die mittlere Geschwindigkeit für alle Punkte einer Vertikalen im Eis kleiner ist, als die Oberflächengeschwindigkeit. Es muß deshalb die Bodengeschwindigkeit des Eises erst recht kleiner als die Oberflächengeschwindigkeit sein. Die genauere Prüfung der Verhältniszahlen der 4. Spalte in der Tabelle 8 zeigt auch noch, daß der Wert des Verhältnisses mittlere Geschwindigkeit : Oberflächengeschwindigkeit um so mehr gegen 1 rückt, je geringer die Tiefe des Gletschers ist; er schwankt in dem durch Bohrungen kontrollierten Teil der Gletscherzunge zwischen 100 und 75 %. Die Bodengeschwindigkeit bewegt sich also zwischen 100 und 50 % der Oberflächengeschwindigkeit, wenn man zunächst als Funktion für die Änderung der Geschwindigkeit mit der Tiefe einfache Proportionalität annimmt. Die extrapolierte Ausgleichskurve läßt annehmen, daß an den tiefsten Stellen des Gletschers, für welche die Minimaltiefe etwa 240 m, die wirkliche etwas über 320 m beträgt, der Wert des Verhältnisses noch weiter sinkt, so daß für die tiefsten Stellen die Grundgeschwindigkeit etwa 45 % der Oberflächengeschwindigkeit ausmacht. Dies gilt zunächst für den Zustand des Gletschers von 1905/06.

Als weiteren Beleg für die Abnahme der Eisgeschwindigkeit von der Oberfläche gegen den Untergrund führe ich die Schrägstellung an, welche seit etwa 1908 an den ausschmelzenden Stangen der unteren Bohrlöcher (von 1899) und an dem Gestänge des 214 m tiefen Loches von 1904 beobachtet und gemessen wurde. Die Schrägstellung war in allen drei Fällen so, daß das obere, über das Eis aufragende Ende der Stange in der Bewegungsrichtung weiter vorgerückt erschien, als das Bohrloch. Die Differenz wurde von Jahr zu Jahr größer befunden. 1908 war die Neigung der Stange beim 86-m-Loch etwa mit $\text{tg } \alpha = 10$, dagegen 1917 mit $\text{tg } \alpha = 2,5$, 1918 mit rund 2, der Neigungswinkel gegen den Horizont also mit etwa 64° anzugeben. Beim Gestänge des 214-m-Loches wurde auf 2,0 m Rohrlänge 1922 eine Horizontalverschiebung um etwa 40 cm beobachtet; das gibt einen Neigungswinkel von rund 78° . Von ähnlicher Größe war auch der Neigungswinkel der Stangen am zweiten Bohrloch von 1899.

Aus den Messungen der Geschwindigkeiten und der Ablation für 1918/19, die sich allerdings auf den achsialen Teil der Gletscherzunge beschränken, konnte unter Berücksichtigung der Karte des

Zungenendes von 1918, der »Karte 1920« und der Höhenmessungen in den mittleren und oberen Teilen der Zunge für 1918 und 1919 die Minimaltiefe der vier Teilgletscher abgeleitet werden. Daraus und aus der den Profilformen von 1905 entsprechenden wirklichen Tiefe ließ sich dann das Verhältnis Minimaltiefe : wirkliche Tiefe = mittlere Geschwindigkeit : Oberflächengeschwindigkeit bestimmen. Auch aus den Angaben für 1894/95 konnte dieses Verhältnis neu errechnet werden. Die erhaltenen Werte sind für die vier mittleren Teilgletscher und die zwei Profile IX und V im folgenden zusammengestellt.

Profil IX.

Tab. 9

	Minimaltiefe			Wirkliche Tiefe			Verhältnis			
	1894 m	1905 m	1918 m	1894 m	1905 m	1918 m	1894	1905	1918	
Teilgletscher 7—8 . .	245	231	277	326	318	316	0,75	0,73	0,88	
„ 8—9 . .	230	228	284	317	309	307	0,73	0,74	0,92	
„ 9—10 . .	226	224	282	309	301	299	0,73	0,74	0,94	
„ 10—11 . .	215	207	259	289	280	278	0,75	0,74	0,92	
	Mittel:							0,74	0,74	0,92

Profil V.

Tab. 10

	Minimaltiefe			Wirkliche Tiefe			Verhältnis			
	1894 m	1905 m	1918 m	1894 m	1905 m	1918 m	1894	1905	1918	
Teilgletscher 7—8 . .	178	161	176	224	214	220	0,80	0,75	0,88	
„ 8—9 . .	180	160	186	221	211	217	0,81	0,76	0,86	
„ 9—10 . .	178	159	190	210	200	206	0,85	0,77	0,92	
„ 10—11 . .	170	141	177	185	175	181	0,92	0,80	0,98	
	Mittel:							0,85	0,77	0,91

Die mittlere und daher auch die Grundgeschwindigkeit macht demnach einen weit größeren Bruchteil der Oberflächengeschwindigkeit aus, wenn die Bewegung des Eises, wie 1918, eine lebhaftere ist, als wenn diese, wie 1905/06, nur schwache Verschiebungen bewirkt. Die »fließende« Bewegung, das Voreilen der Oberschichten des Eises gegenüber den Unterschichten ist also beim vorschreitenden Gletscher relativ kleiner, als bei dem mit geringer Bewegung im Schwund befindlichen. Je größer die Geschwindigkeit wird, um so mehr bewegt sich der Gletscher als Ganzes mit relativer Verminderung der Geschwindigkeitsunterschiede innerhalb der Eismasse. Die Vermutung,

welche ich in »Die Gletscher«, S. 344, auf Grund der Rekonstruktionsversuche des vorrückenden Vernagtferners aussprach, ist durch diese Ergebnisse vollständig bestätigt. Auf Tafel V. welche die rekonstruierten Querschnitte darstellt, sind außer den gestrichelten Linien, welche die »Minimaltiefe« für 1905/06 angeben, auch strichpunktierte Linien in die Querschnitte gezeichnet. Sie entsprechen der Minimaltiefe für den Bewegungszustand von 1918/19.

So wird es verständlich, warum der Vorschub einer größeren Eismenge ohne wesentliche Hebung der Gletscheroberfläche in den oberen Zungenprofilen stattfinden konnte. Auf den physikalischen Grund für den Vorgang soll später eingegangen werden (S. 197).

Auf eine Erscheinung, die sich in der Nähe des Profiles III am Hang des »Oberen Berg« vollzog, sei noch besonders verwiesen. Hier haben sich seit langen Jahren in dem Schutt der alten Seitenmoränen tiefe Rinnen ausgebildet, welche sich auch im Schutt, der auf dem Eis lagert, noch fortsetzten. In diesen Rinnen zogen gegen Ende des Hochgebirgswinters Lawinen vom Oberen Berg herab. Gelegentlich des Vorstoßes 1914 bis 1922 trat hier am Gletscherrand auch wieder verstärkte Eisbewegung auf, so daß der untere auf dem Eis liegende Teil der Schuttrinnen gegen den auf unbeweglichem Untergrund um etwa 150 m (für zwei benachbarte Rinnen) talab verschoben wurde. Dies konnte bei der Zeichnung der »Karte 1922« festgestellt werden. Im Zeitraum 1914 bis 1922 erfolgte in der Achse des Gletschers beim Profil III eine Verschiebung von insgesamt 533 m. Somit hat während des Vorstoßes die Randgeschwindigkeit durchschnittlich 28% der achsialen Geschwindigkeit betragen. Es ist das einer der sehr wenigen Fälle, in welchen bis jetzt die wirkliche Randgeschwindigkeit gemessen werden konnte. Er zeigt, daß es keineswegs zulässig ist, die Randgeschwindigkeit (und auch die Bodengeschwindigkeit) zu Null anzunehmen, wie es bei Aufstellung mathematischer Formeln zur theoretischen Behandlung der Gletscherbewegung schon mehrfach getan wurde.

Das Längsprofil. Die zur Ermittlung der Profiltiefen angewandte Methode kann nun, da Geschwindigkeits-, Ablations- und Auftragsmessungen bis weit in den Firn hinauf vorliegen und der Lauf der Bewegungslinien ziemlich sicher angegeben werden kann, auch auf das obere Zungen- und auf das Firngebiet übertragen werden — wenigstens in den achsialen Teilen der beiden Hauptzuflüsse. Unter Berücksichtigung der Änderungen, welche die Höhenlage der Oberfläche von 1905 bis 1906 erfahren hat, ermittelte ich für 11 weitere

Profile zunächst die mittleren und darauf nach der Kurve Figur 2 die wirklichen Eistiefen und konnte damit das Längsenprofil bis zur Höhe von 3120 m im Stromstrich (Teilgletscher 8—9) zeichnen. Von dieser Höhe an bis zum Grat wurde die Weiterführung der dem Untergrund entsprechenden Linie unter allmählicher Angleichung an die Oberflächenlinie vollzogen. Die Eistiefen sind also für diese oberste, etwa 1 km lange Strecke des Längsprofils durch Schätzung gewonnen. Sie wurden zur Grundlage für die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten in den durch die Höhenschichtlinien 3200, 3300, 3400 m der Oberfläche gehenden Querschnitten des mittleren Teilgletschers. Da für den Hintereisgletscher Schneepegel in größerer Höhe als 3120 m nicht eingesetzt wurden, fehlen direkte Messungsergebnisse zur Bestimmung des Auftrages in den obersten Teilen des Weißkugelfirnes. Es wurde unter Anlehnung an die in der Schweiz angestellten Messungen der Niederschlagsmengen im Firngebiet¹⁾ eine Auftragsgröße von 1,2 m Eis bis zur Höhe 3300 m, von 1,4 m bis zu 3400 m und von 1,8 m bis zur Randkluft angenommen. Auf die Firnfläche des mittleren Teilgletschers, wie sie durch die Bewegungslinien abgegrenzt ist, kommt dann eine angebbare Niederschlagsmenge von 314500 m³ fürs Jahr — bis zum Profil XVII, dessen Tiefenangabe sich noch auf Beobachtungen der Geschwindigkeit und des Auftrages stützt. Für den aus Breite und Tiefe bestimmten Profilquerschnitt errechnet sich eine mittlere Eisgeschwindigkeit von 32,2 m für den Abfluß der 314500 m³, welche mit der durch das schrittweise Vorgehen von den unteren Profilen her erhaltenen genau übereinstimmt. Damit ist wenigstens die Zulässigkeit der gemachten Annahme erwiesen. Aus Profilbreite und abzuführender Eismenge konnte dann für die Querschnitte in 3200, 3300 und 3400 m Höhe die mittlere Profilgeschwindigkeit berechnet werden. Damit ist zum erstenmal das Längsprofil eines Gletschers in allen seinen Ausmaßen mit einer möglichst sicheren Ausnutzung zahlreicher und zuverlässiger Messungsergebnisse am Ort erhalten worden. Ich habe auch für die anderen achsialen Teilgletscher des Weißkugelzuflusses und für den mittleren des Langtauferer Zuflusses die Konstruktion des Längsprofils durchgeführt.

Die damit erhaltenen Angaben über die Höhenlagen des Untergrundes und die entsprechende Beachtung der Neigungsverhältnisse der Gletscheroberfläche gaben die Unterlage für den Versuch einer

¹⁾ Vgl. J. Maurer: »Ergebnisse unserer höchsten Niederschlagssammler im Firngebiet«. Meteorolog. Zeitschr. 1915. S. 16 und f.

Karte des ganzen Gletscherbettes, die in Tafel VI (auf der Rückseite von Taf. IV) abgedruckt ist. Die Karte des eisfrei gedachten Hintereistales ist unabhängig von der 1899 gegebenen Darstellung des Gletscheruntergrundes gezeichnet. Dennoch stimmen die beiden Karten im wesentlichen überein. Die zwischen 2500 und 2600 m auftretenden steilen Trogwände, denen nach oben flachere Partien des Talgehänges, das jetzt vom Eis bedeckt ist, folgen, sind auch in der neuen Karte gut zu erkennen. Bei der Einmündung des Kesselwandferners ist, weil aus dem Profil IIa die Eistiefen an dieser Stelle gut ermittelt wurden, die Übertiefung des Haupttales gegenüber dem kleineren Seitental besser ausgedrückt, als in der Karte von 1899. Aus dem 1914 eingemessenen (Taf. III), damals eisfreien Untergrund des Kesselwandfernerendes sind zudem mehrere Höhenangaben genau bekannt, so daß die Sicherheit der Darstellung von 1923 wesentlich größer, als jener von 1899 ist. In dieser älteren Karte hatte ich bei Profil III, hauptsächlich aber zwischen den Profilen V und IX Schwellen angedeutet, so daß im Mittelzug des Tales von Profil IX an auswärts zunächst ein Anstieg der Talsohle auftritt. In der Karte von 1923 ist diese Schwelle nicht mehr da; aber auf eine Strecke von ziemlicher Länge bleibt der Talweg fast horizontal. Da es sich nur um wenige Meter Höhendifferenz handelt, läßt sich angesichts der Fehler, welche die Tiefenbestimmung hat, nicht entscheiden, welche der beiden Darstellungen die richtige ist. Ich habe die neuere bevorzugt.

Weil die Karte nun bis in die obersten Gebiete des Gletscherbettes reicht, kommt auch der Talschluß selbst mit seinen drei Stufen (im Weißkugelzufluß) zur Darstellung. Die unterste Stufe entspricht den schon erwähnten Trogwänden; die nächste, bei 2800 m, ist die Fortsetzung der Steilstufe, mit welcher sich die Langtauferer Spitze aus dem Hintereistal erhebt; sie ist an der Einmündung des Langtauferer Zuflusses unterbrochen. Dabei tritt die Übertiefung des Haupttales gegenüber diesem kurzen Seitental gut in Erscheinung. Dem bei 3000 m gelegenen obersten Absatz des Talschlusses entsprechen weiter abwärts auch einige Stellen größeren Gefälles auf der linken Talseite: die Stufe zwischen 2800 und 2900 m, über welche der Langtauferer Zufluß in prächtiger Kaskade abfällt, und die Stufe, welche sich zur Hintereisalm und zum Schliff- und Schottergebiet der kleinen Kargletscher des Hinteiskammes emporzieht und in den oberen Steilhängen des Guslarberges ihre Fortsetzung findet. Die Felsrippen zwischen den erwähnten Hängegletschern, der Kamm Vordere Hintereisspitze — Mutspitze und die Felshänge der Langtauferer Spitze, fallen

auch stufenweise ab, so daß Gefällsknicke einander zugeordnet werden können. Auf dem Hang des oberen Berges sind wegen des stark verwitterten Gesteines solche korrespondierende Knicke nicht zu finden. Nur die Gratlinie selbst zeigt hier Abstufungen, die mit denen des Hintereis- und Guslarhanges zur Rekonstruktion alter Talböden verwendet werden können. Auch in den vom Kreuzgrat herabziehenden Felsrippen, sowie im Kreuzhang finden sich, trotz der hier sehr starken Verwitterung, noch Spuren alter Talböden, die mit denen des Hintereistales verbunden werden können. Da jedoch die ganze mir vorliegende Karte dieses Gebietes vorläufig nicht abgedruckt werden kann, schließlich auch noch Ergänzungen bis zum Venter Becken erwünscht wären, soll hier auf die Erörterung dieser morphologischen Besonderheiten verzichtet werden. Hinweisen möchte ich aber noch auf die Einbuchtung, welche sich am Westabhang der hinteren Guslar Spitze und dem Steilabfall des Grates zwischen diesem Berg und dem Nock zeigt. Sie ist meines Erachtens ein Ergebnis glazialer Erosion, hervorgerufen durch die Schürfarbeit, welche der von der Vorderen Hintereisspitze herabströmende, nach Osten drängende Kesselwandferner bei seiner Umbiegung nach Süden in dem leicht angreifbaren Gestein erzeugt. Die Schichten, deren Köpfe hier freiliegen, fallen mit schwacher Neigung gegen Norden ein.

Der Formenreichtum in den Firnbecken der Hauptzuflüsse des Hintereisgletschers ist wahrscheinlich noch größer, als er in der Karte zum Ausdruck kommt; doch können vorläufig weitere Einzelheiten nicht mit guter Begründung angegeben werden. Was jetzt an Unterteilung der großen Mulden eingezeichnet ist, wurde unter Berücksichtigung der oberflächlichen Spaltensysteme angegeben, welche in der Karte von 1920 eingetragen sind.

Eine Kombination der Höhenschichtlinien der Karte des eisfreien Hintereistales mit jenen der Karte des Gletschers (1905) läßt die Kubatur der ganzen Eismasse des Gletschers zu. Sie ergibt den Betrag von 1076,5 Millionen m^3 Eis. (Kesselwand- und Vernaglwandferner sind dabei nicht berücksichtigt.)

Gelingt es in späterer Zeit für das obere Firngebiet durch direkte Messungen von Eistiefe, Auftrag und Oberflächengeschwindigkeit sichere Daten an die Stelle der von mir benutzten Schätzungen zu setzen, so mag der Versuch dieser Karte des eisfreien Hintereistales wohl manche Verbesserung erfahren. Im Jahre 1914 war geplant, entsprechende Stangensignale im oberen Firn zu setzen. Der Tod A. d. Blümckes und der Ausbruch des Krieges haben die Durch-

führung der Arbeit verhindert. Bei Fortdauer der jetzigen Verhältnisse dürfte die neue Inangriffnahme noch gute Weile haben.

Energieverteilung im Hintereisferner. Die Klärung der bei dem Vorstoß des Hintereisgletschers gefundenen Bewegungsverhältnisse, besonders auch das überraschend von 1919 bis 1920 eingetretene Aufreißen der Spaltensysteme haben den Wunsch nahe gelegt, über die Kräfteverteilung in der ganzen Eismasse und die Änderung dieser Verteilung möglichst gute Auskunft zu erhalten. Ich bin bei den Überlegungen zu einem, wie ich glaube, brauchbaren Ergebnis gelangt, das im folgenden mitgeteilt werden soll.

Es sei in Fig. 3 AB die Projektion einer $a = 1$ m dicken vertikalen Platte des Gletschers, welche senkrecht zu dessen Längsrichtung steht,

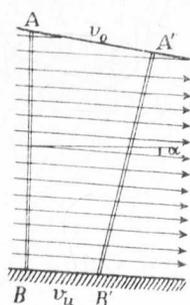


Fig. 3.

die Breite b und die Tiefe $AB = T$, also den Querschnitt $Q = b \cdot T$ hat. Nach Ablauf einer gewissen Zeit, etwa eines Jahres, sei sie nach $A'B'$ verschoben worden. Punkt A hat also die Oberflächen-, Punkt B die Grundgeschwindigkeit. Dann kann, wenn die unter sich und zum Untergrund parallel laufenden Stromlinien den Winkel α mit dem Horizont einschließen, die bei der Verschiebung der Platte mit der mittleren Geschwindigkeit V_m Meter pro Jahr, also um die Wegstrecke V_m , durch das Gefälle gewonnene Arbeit mit

$$Q \cdot a \cdot 910 \cdot V_m \cdot \sin \alpha \text{ mkg}$$

angegeben werden (1 m^3 Eis wiegt 910 kg). Denkt man sich die Bewegung während des Jahres gleichförmig, so wird die in der Sekunde zurückgelegte Wegstrecke $v_m = \frac{V_m}{31,6 \cdot 10^6}$ Meter und damit die sekundliche Gefällsleistung

$$g = Q \cdot a \cdot 910 \cdot \frac{V_m}{31,6 \cdot 10^6} \cdot \sin \alpha \text{ mkg/sek.}$$

In diesem Ausdruck sind die Strecken a , b , T und V_m in Metern zu verwenden, der Querschnitt Q in Quadratmetern.

Zur Überwindung der Bodenreibung, welche im Jahr längs des Weges V_u , in der Sekunde also auf der Strecke $\frac{V_u}{31,6 \cdot 10^6}$ m erfolgt, ist die sekundliche Arbeitsleistung

$$r = Q \cdot a \cdot 910 \cdot \frac{V_u}{31,6 \cdot 10^6} f \cdot \cos \alpha \text{ mkg/sek}$$

erforderlich. Hier ist f der bis jetzt unbekannt Koeffizient der Reibung zwischen dem bewegten Eis und dem Felsuntergrund.

Nimmt man den Übergang von der jährlichen Oberflächenverschiebung V_o zur Grundverschiebung V_u linear an und sieht man für die zurückgelegte Wegstrecke vom Massenverlust der Platte durch die Ablation ab, so kann die durch die innere Reibung verursachte Deformation als einfache Schiebung betrachtet werden, bei welcher der untere Plattenrand B jährlich um die Strecke $V_o - V_u$, also pro Sekunde um $\frac{V_o - V_u}{31,6 \cdot 10^6}$ cm gegenüber dem oberen Rand A zurückgehalten wird. Diese Schiebung wird durch eine am Boden wirkende Kraft hervorgebracht, welche proportional der Breite b und der Dicke a der Eisplatte, sowie der Verschiebung $\frac{V_o - V_u}{31,6 \cdot 10^6}$ cm/sek und dem experimentell bestimmten Koeffizienten μ der inneren Reibung ist; der Tiefe $T = AB$ des Gletschers ist diese Kraft umgekehrt proportional. Da sie längs des Weges $\frac{V_o - V_u}{31,6 \cdot 10^6}$ cm wirkt, so ist die zur Überwindung der inneren Reibung erforderliche sekundliche Leistung

$$s = \frac{a \cdot b}{T} \cdot \left(\frac{V_o - V_u}{31,6 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot \frac{\mu}{10^5} \text{ mkg/sek,}$$

wobei a , b , T , $(V_o - V_u)$ in cm und μ in $\frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{sek}}$ angenommen sind.

Der Nenner 10^5 rührt von der Umwandlung der cmg in mkg her. Werden die Strecken in Metern gemessen, so wird

$$s = \frac{a \cdot b}{T} \cdot \frac{(V_o - V_u)^2}{10^{14}} \cdot \mu \text{ mkg/sek,}$$

da $31,6^2$ nahezu 1000 ist. $V_o - V_u$ ist, wie aus obigem hervorgeht, die Differenz der jährlichen Geschwindigkeiten an Oberfläche und Grund (in m). Nach den Ergebnissen der experimentellen Feststellungen sind für μ Werte von der Ordnung 10^{10} bis 10^{14} , bzw. 10^{12} zulässig¹⁾.

Für den Hintereisgletscher, bzw. seine Teilgletscher, sind auf Grund der aus den Profilen und dem Plan der Bewegungslinien entnehmbaren Daten für 1905/06 die Größen g , r und s bei den einzelnen Profilen berechnet. Für das zwischen zwei Profilen liegende Gletscherstück wurde je das arithmetische Mittel der beiden Profilwerte als der Durchschnittswert der drei Energieanteile g , r und s angenommen. Da für jede 1 m dicke Querschnittsplatte des Gletschers das gleiche gilt, wie für die zwei den Profilen zugeordneten Endplatten, so ergibt

¹⁾ Vgl. H. Heß: »Die Gletscher«, S. 16 ff., und B. Weinberg in Ztschr. f. Gletscherkunde 1 S. 345.

das Produkt jener drei Mittelwerte mit der Länge des (Teil-)Gletscherstückes den diesem ganzen Stück zukommenden Betrag der drei sekundlichen Energieanteile g_m , r_m und s_m . Weil diese Berechnung auf Grund des Längsprofils und der Bewegungslinien für den ganzen Teilgletscher ausgeführt werden kann, so wird auf diesem Weg die gesamte Gefällsleistung G und der Aufwand für Überwindung der Reibungswiderstände $W = R + S$ innerhalb des ganzen Teilgletschers gefunden. Diese beiden Energiebeträge müssen einander gleich sein.

$$G = R + S = W$$

Das ist die Bedingung, welche nun dem Versuch zur Bestimmung der für f und μ gültigen Werte zugrunde gelegt wurde, da andere Arbeitsleistungen in der Gletschermasse, wie etwa die für allmähliche Temperaturerhöhung im Firn notwendige, gegenüber den beiden genannten verschwindend klein sind. Es wurde nun unter Annahme verschiedener Wertepaare für f und μ , z. B. $f = \frac{1}{3}$, $\mu = 1 \cdot 10^{10}$; dann $f = \frac{1}{10}$ mit $\mu = 1 \cdot 10^{10}$; $\mu = 5 \cdot 10^{11}$, $f = \frac{1}{20}$; $\mu = 1,2 \cdot 10^{12}$, $f = \frac{1}{30}$ die schrittweise Integration in oben angegebener Weise durchgeführt. Am besten entsprechen die Werte $\mu = 1 \cdot 10^{12} \frac{g}{cm \cdot sek}$; $f = 0,05$. Der

erstere stimmt zu den experimentellen Messungsergebnissen verschiedener Beobachter. Der Wert für f kam mir sehr klein vor; er ist nur etwa doppelt so groß wie der Reibungskoeffizient für Stahl auf Eis. Aber als ich mit diesen beiden Werten die Berechnung der Energiebeträge für die Teilgletscher 6—7 und 11—12 durchführte, bekam ich beim ersten Versuch brauchbare, mit dem für 8—9 übereinstimmende Ergebnisse. Auch die zwischenliegenden Teilgletscher des Hauptstromes lieferten gute Anschlußwerte. Für den Mittelteil des Langtauferer Gletschers mußte ich die anfänglich angenommenen Bewegungslinien in ihre auf Tafel IV gezeichnete Form umändern; dann trat auch hier der gewünschte Erfolg ein. Es erscheint mir also richtig, die beiden Werte $\mu = 1 \cdot 10^{12}$ und $f = 0,05$ als für den Hintereisferner, wahrscheinlich, wie später dargetan wird, für alle alpinen Gletscher gültig anzusehen.

Die folgende Übersicht gibt für die Profile des zwischen den Bewegungslinien 8 und 9 (vgl. Taf. VI) liegenden Teilgletschers die aus den Karten, den Tiefenberechnungen und dem Längsprofil entnommenen Werte für Breite b , Tiefe T , Oberflächen- und Grundgeschwindigkeit, sowie den $\sin \alpha$ für die Bodenfläche an. Dazu kommen

dann noch die mit Hilfe von $\mu = 10^{12} \frac{g}{\text{cm} \cdot \text{sek}}$ und $f = 0,05$ berechneten Werte von g , r , s . Die letzte Spalte enthält die in der Bewegungsrichtung wirksamen Drucke (vgl. S. 181). Alle Zahlen beziehen sich auf den Zustand des Gletschers von 1905/06.

Tab. 11

Profil	b	T	V_0	V_u	sin α	g	s	r	w	D
	m	m	m/Jahr	m/Jahr		mkg/sek			mkg/sek	kg/cm ²
AB . . .	55	50	17,0	14,0	0,040	0,05	0,10	0,05	0,15	0,30
I . . .	56	95	20,0	15,0	60	16	15	11	26	0,95
II . . .	56	120	25,0	17,0	37	15	30	16	46	1,62
IIa . . .	58	142	28,0	18,0	77	41	41	21	62	1,65
III . . .	55	167	31,0	19,0	63	41	46	25	71	2,25
IV . . .	52	200	33,0	18,2	38	29	50	27	77	3,55
V . . .	52	212	35,0	19,0	40	34	63	30	93	5,10
VI . . .	50	231	36,0	18,0	43	38	66	30	0,96	6,12
VII . . .	50	245	38,0	18,4	30	30	73	33	1,06	7,00
VIII . . .	50	270	39,0	17,0	17	18	77	33	1,10	8,25
IX . . .	48	309	36,0	15,2	19	18	62	32	0,94	11,70
X . . .	49	311	38,0	17,0	55	0,63	66	35	1,01	12,20
XI . . .	60	335	31,4	12,6	56	0,71	56	38	0,94	13,60
XII . . .	66	314	30,3	13,1	110	1,42	53	39	0,92	12,35
XIII . . .	60	282	36,0	16,0	85	1,07	76	41	1,17	12,20
XIV . . .	65	260	34,0	15,6	85	1,03	74	40	1,14	12,45
XV . . .	60	233	38,0	19,2	135	1,55	0,82	38	1,20	14,60
XVI . . .	66	148	50,0	32,0	180	2,08	1,28	45	1,73	11,80
XVII . . .	80	149	36,5	23,5	150	1,54	0,79	40	1,19	11,80
XVIII . . .	130	90	25,0	18,4	300	2,18	71	30	1,01	12,75
XIX . . .	165	65	21,0	17,0	390	2,46	41	25	0,66	11,25
XX . . .	220	55	13,0	11,0	0,500	2,08	0,16	0,19	0,35	7,45

Man bemerkt, daß der in der vorletzten Spalte angegebene Gesamtwiderstand $w = s + r$ bis zum Profil XI hin größer ist, als die örtliche Gefällsleistung g , während von Profil XI aufwärts diese Leistung überwiegt. Aus den oberen Regionen des Gletschers kommt also der Energievorrat, der zur Überwindung des Widerstandes im Bereich der Gletscherzunge verbraucht wird. Figur 1 und 2 der Tafel VII veranschaulichen den Zusammenhang. Figur 2 gibt das Längsprofil des Teilgletschers 8—9; Figur 1 enthält je in der Mitte zwischen zwei Querschnitten die Mittelwerte von g und w . Die von der ausgezogenen Linie und der Abszissenachse eingeschlossene Fläche stellt die gesamte Gefällsleistung G längs des ganzen Teilgletschers dar. Die

von der Achse und der gestrichelten Linie begrenzte Fläche gibt den Gesamtwiderstand $W = R + S$. Beide Flächen sind gleich groß und entsprechen je 8475 mkg/sek. In den oberen Gletschergebieten greift die Gefällsfläche über die Widerstandsfläche hinaus; der Überschuß stellt den Gesamtbetrag der durch den zwischen den Profilen XI und X liegenden Ausgleichsquerschnitt hindurch wandernden Energiemenge dar. Im unteren Gletschergebiet übertrifft die Widerstandsfläche jene der Gefällsleistung. Der Überschuß ist die zur Überwindung des Widerstandes in der Zunge verbrauchte Gesamtenergie. Die beiden Überschußflächen müssen natürlich auch gleich groß sein, sie bedeuten 2190 mkg/sek. Die strichpunktierte Linie trennt R, den Reibungswiderstand am Grund, von dem darüberliegenden S, dem Widerstand der inneren Reibung.

Für den Weißkugelfuß 8—9 liegt 1905/1906 der Ausgleichsquerschnitt anscheinend nahe an der Firnlinie; er ändert seine Lage innerhalb des Gletschers mit dessen Bewegungsverhältnissen. Für die Zeit der Schwankung 1914—1922 z. B. ergeben sich folgende Lagen:

Tab. 12

	Höhe des Ausgleichs- querschnittes m.	Tiefe m	Druck kg/cm ²		Höhe des Ausgleichs- querschnittes m	Tiefe m	Druck kg/cm ²
1914/15 . .	2794	320	10,4	1918/19 . .	2813	330	9,6
1915/16 . .	2818	334	10,6	1919/20 . .	2807	329	12,9
1916/17 . .	2815	332	9,5	1920/21 . .	2779	312	17,8
1917/18 . .	2813	330	10,2	1921/22 . .	2792	321	14,9

In dieser Zeit war die Firnlinie immer in der Nähe von Profil XII, bei 2840 m (vgl. hierzu die Tabelle S. 192). Die Verschiebung der Lage des Ausgleichsquerschnittes gegen Profil XII ist in den Diagrammen Tafel VIII erkennbar. Für den mittleren Teilgletscher des Langtaufferer Zuflusses lag 1905/06 der Ausgleichsquerschnitt in der Höhe 3080 m; die Höhe der Firngrenze ist hier bei rund 3000 m gewesen. Es besteht also keine Übereinstimmung in der Lage von Ausgleichsquerschnitt und Firngrenze. Bei der völlig verschiedenen Bestimmung beider Begriffe ist das ja von vornherein nicht zu erwarten.

Der Ausgleichsquerschnitt teilt den Gletscher in zwei Abschnitte verschiedenen Verhaltens. Im oberen Teil überwiegt die Gefällsleistung,

der Schub; im unteren Teil überwiegt der Widerstand, die Bremsung. Man kann also, von den Bewegungsverhältnissen der Eismasse ausgehend, den Gletscher in ein Schubgebiet und ein Bremsgebiet zerlegen, so wie er, von den Niederschlagsverhältnissen ausgehend, in ein Nähr- und ein Zehrgebiet geteilt wird.

Ermittelt man die Flächenstücke des Überschusses vom Beginn des Gletschers an der Weißkugel bis zu den einzelnen Profilen, so erhält man die Beträge der freien Energie, welche an jedem der Profile in den abwärts gelegenen Gletscherteil einwandern. (Der andere Teil der Gefällsleistung ist jeweils durch die bis zum betrachteten Profil aufgetretenen Widerstände verbraucht.) Der Quotient dieser Energiebeträge durch die mittlere Profilgeschwindigkeit (= Weg während des für die Energiebeträge angegebenen Zeitraums von einer Sekunde) gibt den Gesamtdruck, der in der Strömungsrichtung auf die Profilfläche wirkt. Denkt man sich diesen Druck gleichmäßig über die bekannte Profilfläche verteilt, so erhält man den Druck auf die Flächeneinheit (vgl. die letzte Spalte der vorstehenden Tab. 11), der in der Bewegungsrichtung wirkt. Es ist, streng genommen, nur die zur Überwindung der inneren Reibung erforderliche Energie gleichmäßig über die Profilfläche verteilt. Der zur Bezwingung der Bodenreibung erforderliche Energiebetrag kann einem auf die alleruntersten Teile der Profilfläche konzentrierten Druck zugeschrieben werden, da er ja an der Bodenfläche selbst umgesetzt wird. Aber bis zu welcher Tiefe vom Boden aufwärts reicht die Wirkung gerade dieses Energieumsatzes in die Gletschermasse? Darüber können wohl Annahmen gemacht werden; sicheres läßt sich jedoch nicht sagen. Die auf Überwindung der Bodenreibung verwendete Energiemenge ist zudem für die einzelnen Querschnitte nur etwa der dritte Teil des hier auftretenden Gesamtwiderstandes. So ist es bei der unzulänglichen Kenntnis, die wir von den intimeren Vorgängen am Gletschergrund haben, wohl ausreichend, wenn auch der für die Überwindung der Bodenreibung notwendige Anteil der wandernden Energie gleichmäßig über die ganze Profilfläche verteilt in Rechnung gestellt wird. — Zu dem in der Richtung der Strömungslinien wirkenden Bewegungsdruck D kommt an jeder Stelle des Gletschers noch der der überlagernden Eisschichte entsprechende Vertikaldruck. Aus beiden Komponenten kann nach Größe und Richtung der Gesamtdruck an einem beliebigen Punkt der Eismasse erhalten werden. Für Punkte einer Vertikalen im Profil XI des Teilgletschers 8—9 erhält man diese Anordnung der Drucke:

Oberfläche fast horizontal	13,6 kg/cm ²
110 m Tiefe, 40° Neigung	17,5 „
220 „ „ 60° „	25,4 „
330 „ „ 70° „	34 „

Der am Boden der 330 m dicken Eisschichte auftretende Vertikaldruck von 30 kg/cm² wird durch den Bewegungsdruck von 13,6 kg/cm² auf rund 34 kg/cm² Gesamtdruck gesteigert. Je größer die Tiefe des Gletschers, um so geringer wird der Einfluß des (gleichmäßig verteilten) Bewegungsdruckes auf den Gesamtdruck. In Tiefen bis zu 148 m, in welche sich die seinerzeit in den Bohrlöchern am Hintereisgletscher gemachten Temperaturmessungen erstreckten, macht sich aber die Drucksteigerung infolge des Bewegungsdruckes doch beträchtlich geltend. Damit ist ein Umstand im Einklang, auf den ich seinerzeit aufmerksam wurde, den ich aber doch nicht als »mit Sicherheit beobachtet« ansah. Es waren nämlich alle gemessenen Temperaturen etwas niedriger als nach dem Vertikaldruck allein zu erwarten gewesen wäre; gerade für die Messungen in den größeren Tiefen waren die Abweichungen zwischen berechneten und beobachteten Temperaturen am größten, so daß sie den zulässigen Beobachtungsfehler stark überschritten (vgl. Heß, Die Gletscher S. 153). Damals war ich aber über die Größenordnung des Bewegungsdruckes noch ganz im unklaren. Heute erscheint es mir völlig berechtigt, jene Abweichungen der beobachteten von den berechneten Temperaturen auf Rechnung des Bewegungsdruckes zu setzen.

Die Ermittlung der Energieverteilung wurde auch für die übrigen zentralen Teilgletscher zwischen den Bewegungslinien 6 und 12 durchgeführt, da der Verlauf dieser Bewegungslinien im Firngebiet durch die Geschwindigkeitsmessungen hinlänglich gesichert erscheint (vgl. Taf. IV). Das Ergebnis ist, wie bereits erwähnt wurde, in guter Übereinstimmung mit dem für den Teilgletscher 8—9 erhaltenen. Auch die Berechnung des Bewegungsdruckes ist mit der für 8—9 ausgeführten im Einklang. Die größten Drucke ergeben sich für die Teilgletscher 6—7 und 7—8 zwischen den Profilen XV und X. Sie steigen bis zu 18,9 kg/cm² (Profil XII, 6—7) an; für den Teilgletscher 11—12 sind die Drucke zum Teil beträchtlich (bis zu 30%) kleiner als für 8—9; längs der Strecke XV bis VII besteht aber auch hier gute Übereinstimmung mit 8—9. In Figur 3 der Tafel VII ist das zusammenfassende Resultat enthalten; es sind die Mittelwerte der erhaltenen Drucke als Ordinaten an den einzelnen Profilstellen aufgetragen. Die damit bestimmte Kurve macht den Eindruck einer fast ausgeglichenen Linie, so daß man das

Ergebnis wohl als vertrauenswürdig betrachten darf. Die in Figur 4 gegebene ausgereckte Horizontalprojektion des zentralen Gletschergebietes zeigt übrigens, daß der maximale Druck (Fig. 3) genau an die Stelle der größten Einengung fällt, welche die Eismasse auf ihrem Weg zu passieren hat.

Für die randlichen Teilgletscher fehlt es vor allem an Geschwindigkeitsmessungen im Firn; deshalb wurde für sie die auch auf das Firngebiet ausgedehnte Energieberechnung unterlassen. Diese Berechnung wurde jedoch für den aus der Mitte des Langtauferer Zuflusses kommenden Teilgletscher 14—15 angestellt und auch daraus der Flächendruck in den Einzelprofilen gewonnen. Für die flachen Teile des Firns und den Eisbruch fanden sich Drucke, welche von 10,7 bis 8,0 kg/cm² abnahmen. In den Profilen X bis VI herrschen hier wesentlich kleinere Drucke (7,35—1,5 kg/cm²), als in den Teilgletschern 8—9 und 11—12 des zentralen Gebietes. Man darf also sagen: in der Achse des Gletschers herrscht ein größerer Bewegungsdruck als in den Randgebieten. Ein Resultat, das wohl von vornherein erwartet werden durfte. Trägt man in jedem Profil senkrecht zur Profillinie die gefundenen Größen der Bewegungsdrucke an den Mitten der Teilgletscher auf und wendet man das für den linken Gletscherrand gewonnene Ergebnis sinngemäß auch auf das rechtseitige Randgebiet an, so erhält man für die Profile der Gletscherzunge folgende Mittelwerte des Bewegungsdruckes:

Tab. 13

	kg/cm ²		kg/cm ²		kg/cm ²
X	10,20	VI	5,70	IIa	1,83
IX	9,80	V	4,36	II	1,35
VIII	7,90	IV	3,48	I	1,02
VII	6,86	III	2,15	A B	0,42

Diese Übersicht zeigt recht gut die zu erwartende Abnahme des Bewegungsdruckes gegen das Gletscherende. Sie gibt zusammen mit der Kurve der Druckverteilung im Längsprofil (Taf. VII Fig. 3) ein der bisherigen Erfahrung entsprechendes Resultat. Damit rechtfertigt sich das Verfahren, nach welchem dies Ergebnis gewonnen wurde, von selbst. Obwohl jeder Teilgletscher als ein von seinen Nachbarn unabhängig strömendes Gebilde behandelt wurde (gemäß der Strömungstheorie), ist doch durch die Beachtung der aus den Beobachtungen stammenden Bewegungslinien, der wechselnden Profiltiefen und Geschwindigkeiten der innerhalb der Gletschermasse bestehende

Zusammenhang vollständig gewahrt worden. Das erhaltene Ergebnis ist in letzter Linie ein glatter Beweis für die Richtigkeit der der Finsterwalderschen Strömungstheorie zugrunde liegenden Voraussetzung, nach welcher die Bewegung im Gletschereis als wirbelfreie Strömung aufgefaßt wird, bei der die einem Stromfaden (Teilgletscher) anfänglich zugeordneten Massenelemente diesem während der ganzen Bewegung zugeordnet bleiben.

Für den Kesselwandferner existieren nur zwei Geschwindigkeitsmessungen und zugehörige Ablationsbestimmungen aus dem Jahre 1905/06, und zwar ziemlich nahe der Einmündung in den Hintereisgletscher. Der genaue Verlauf von Bewegungslinien ist unbekannt; denn es ist äußerst schwierig, in dem stark zerklüfteten Zungengebiet dieses Gletschers zuverlässige Bewegungsmessungen anzustellen. Doch habe ich auf Grund von Analogien den vom Fluchtkogel herabziehenden, fast achsialen Teilgletscher abgegrenzt und unter Beachtung der südlichen Exposition der Zunge Annahmen über die Ablation in den einzelnen Höhenlagen gemacht. Die Messungen auf dem Langtauferer Zufluß und am Vernagtferner gaben brauchbaren Anhalt dafür. Auch für den Auftrag im Firn mußten mangels Messungen Werte angenommen werden, die sich an die allgemeine Erfahrung anschließen. Da infolge des Rückganges des Kesselwandfernners ein Teil der 1905 vom Gletscher bedeckten Fläche eisfrei wurde, so kann an einer der Stellen, für welche die Geschwindigkeit bekannt ist, die Eisdicke für 1905 angegeben werden. Auf Grund dieser Daten und der Beziehung $V_m = 0,86 V_0$ wurden dann einige Versuche angestellt, um eine brauchbare Verteilung der Geschwindigkeiten im Längsprofil und die Eistiefen zu erhalten. Sie lieferten ein Resultat, das in der folgenden Tabelle und in Figur 5 und 6 der Tafel VII mitgeteilt ist.

Tab. 14

Profil	Ablation m/Jahr	b m	T m	V_0 m/Jahr	V_u m/Jahr	sin α	g s r			W
							mkg/sek			
2500	6,2	52	45	41	33	0,32	0,73	0,74	0,09	0,83
2600	6,0	50	60	54	39	0,40	1,60	1,87	19	2,06
2700	4,5	45	85	62	45	31	1,86	1,52	25	1,77
2800	3,2	48	90	65	47	34	2,38	1,73	28	2,01
2900	1	55	105	60,5	43,5	22	1,86	1,51	36	1,87
3000	0,5	55	115	57,5	40,5	18	1,62	1,23	38	1,61
3100	— 0,5	75	120	44	32	12	1,13	0,90	41	1,31
3200	— 0,8	140	100	24,5	17,5	13	1,06	0,69	35	1,04
3300	— 1,2	220	60	16,5	12,5	14	0,76	0,59	23	0,82
3400	— 1,9	250	35	7	5	0,53	0,78	0,29	0,06	0,35

Man erkennt aus dem Längsprofil Fig. 6 die Lage der Querschnitte sowie den stufenweisen Abfall des Eises in der Zunge. Die darüber gezeichnete Figur 5 gibt ähnlich wie Figur 1 die Energieverteilung. Es zeigt sich, daß die wandernde Energie, soweit sie aus den steilen Firnlagen stammt, bis zur Mitte des ersten Eisbruches fast verbraucht ist. Der obere Teil des Kesselwandfernners verhält sich ähnlich wie das oberhalb eines Wehres gestaute Wasser, das eben noch soviel Bewegungsenergie besitzt, daß es über die Wehrkante weggeschoben wird. Im und unter dem ersten Eisbruch tritt wieder neuer Energiegewinn auf, der ausreicht, um die Eisbewegung im unteren Teil der Gletscherzunge aufrecht zu halten.

Die Auswertung des Leistungsdiagrammes ergibt $G = W = 6120$ mkg/sek; der Betrag der wandernden Energie ist $E = 290$ mkg/sek; davon entfallen 140 mkg/sek auf den oberen, 150 mkg/sek auf den unteren Teil des Gletschers. Das Ergebnis der Tiefenbestimmung, welches sich im Längsprofil zeigt, erscheint nicht unmöglich. Von besonderem Interesse ist der Verlauf der beiden Linien, welche die Fläche des Leistungsdiagrammes begrenzen. Sie decken sich beinahe. Würden sie völlig zusammenfallen, so wäre der Betrag der wandernden Energie zu Null geworden; d. h. in jedem Punkt des angenommenen Teilgletschers würde gerade soviel an Bewegungsenergie gewonnen, als zur Überwindung des Widerstandes gebraucht wird. Der obere Teil des Kesselwandfernners hat also nahezu ein (für die gegenwärtigen Niederschlagsmengen) ausgeglichenes Gefälle. Im unteren Teil kann das Gefälle nicht als ausgeglichen angesprochen werden.

Die Bedingung für das ausgeglichene Gefälle des Gletscherbettes, die Gleichheit der Beträge für Bewegungsenergie und Widerstand an jeder Stelle, führt unter Verwendung von $V_m = 0,86 V_o$, $V_u = 0,72 V_o$ nach einfacher Reduktion aus den Gleichungen S. 176 und 177 zu der Beziehung:

$$\frac{V_c}{T^2} = 0,0316 \cdot \sin \alpha - 0,00132 \cos \alpha$$

Da man Tiefen und Neigungsverhältnisse des Untergrundes nur für wenige Gletscher kennt, wird diese Gleichung zunächst nur geringe praktische Bedeutung haben. Wendet man sie z. B. auf den Hintereisferner an unter der Voraussetzung, daß für die Horizontalprojektion der Oberfläche die Niederschlagsmenge und die Ablation nach Größe und Verteilung gleich der gegenwärtigen bleiben, so kann für einen Gletscher von der gleichen Tiefe des Eises und der nämlichen Geschwindigkeitsverteilung, wie sie das Hintereis hat, das Längsprofil

mit ausgeglichenem Gefälle gefunden werden. Man erhält ein ziemlich flaches Gebilde mit schwach \sim förmig gekrümmter Basis. Der Wendepunkt dieser Bodenlinie ist beim Profil XI, wo die Bodenneigung nur $2^{\circ} 53'$ betragen würde; erst wenn in den oberen Firnpartien die steilen Grate und Wände bis zu 500 m weiter abgetragen sind als jetzt und wenn gegen das Ende des Gletschers eine Tieferlegung des Bettes bis zu 100 m stattgefunden hat, wird bei gleichbleibender Höhe des Untergrundes in der Gegend der Profile X und XI der Zustand des ausgeglichenen Gefälles eingetreten sein. Wenn aber ein solcher Abtrag des Gebirges stattfand, dann sind wohl auch die Niederschlagsverhältnisse wesentlich andere geworden, so daß die Voraussetzungen für das erhaltene ideale Längsprofil kaum mehr gegeben sind. Immerhin zeigt dieses ideale Längsprofil, daß Gletscher, welche aus flachen Firnfeldern kommen und in Täler mit geringer, nach außen etwas zunehmender Neigung abfließen, den Bedingungen ausgeglichenen Gefälles am nächsten kommen. Plateaugletscher und die Eisdecken der polaren Gebiete dürften in diese Kategorie zu nehmen sein.

Firnfeldlose Gletscher. Eine Art Gegenstück zu solchen Gletschern mit ausgeglichenem Gefälle bilden die firnfeldlosen Gletscher, auf welche durch die Pamir-Expedition des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins 1913 die Aufmerksamkeit gelenkt wurde. Sie sind durch W. Deimler in einigen Fällen stereo-photogrammetrisch aufgenommen und unter anderem in der Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins 1914 S. 57 von R. v. Klebelsberg beschrieben worden. Von einem, dem Borolmas-Gletscher, konnte O. v. Gruber eine Höhenschichtenkarte in 1:20000 konstruieren. Dieser ist zu entnehmen, daß der steile Hängefirn in mehreren schmalen Rinnen zwischen Pik Severzoff und Pik Rickmers von etwa 5500 m bis zu 4100 m mit fast gleichmäßiger Neigung von 52° abfällt. Mit mächtigen Lawinenkegeln sitzt diese Schubmasse auf der von 4100 bis 3600 m in etwa 5,5 km Länge und mit etwa 600 m Breite bei fast gleichbleibender Neigung von rund 6° talauswärts ziehenden Gletscherzunge. Die Firngrenze liegt nur wenig unterhalb der Stelle, wo bei 4100 m der fast unvermittelte Übergang vom steilen Schubgebiet zum flachen Bremsgebiet stattfindet. Die geringe Neigung des Talbodens (6°) ist wohl hinreichend, um die Bodenreibung zu überwinden; die für Bezwingung der inneren Reibung erforderliche Energie stammt aus dem Schubgebiet. Dem entspricht auch das Ergebnis zweier Geschwindigkeitsmessungen, welche W. Deimler bei rund 4000 m, nahe am Ursprung der Gletscherzunge, und beim Zu-

sammenfluß der beiden großen Teile des Gletschers in 3850 m Höhe veranstaltete. Er fand für die erste Stelle 95,8, für die zweite, 2,5 km abwärts gelegene, 89,8 m/Jahr¹⁾. Man hat den Eindruck, als ob die Gletscherzunge als Ganzes mit einer für die ganze Masse fast gleichbleibenden Geschwindigkeit vom steilen Firn talauswärts gequetscht würde. Rezente Moränen, die beiderseits der Gletscherzunge verlaufen und noch etwa 4 km vom heutigen Gletscherende auf das Hochland von Tuptschek talaus ziehen, zeigen, daß zu Zeiten außerordentlichen Niederschlagsreichtums in den Hochlagen vom Schubgebiet beträchtliche Eismassen wegbefördert werden.

Energieverteilung im Rhonegletscher. Dieser ist zweifellos der am sorgfältigsten seit einer langen Reihe von Jahren studierte Eisstrom. Die 1916 von der Schweizer Gletscherkommission herausgegebene Denkschrift über die Vermessungen am Rhonegletscher hat einige Karten als Beilagen, in welchen die Bewegungslinien der einzelnen, für die Geschwindigkeitsmessung verwendeten Steine der fünf Profilvereihen und die Wege mehrerer Stangen sorgfältig verzeichnet sind, die als Bewegungssignale im Firn dienten. Es sind außerdem in Tabellen die gemessenen jährlichen Wege der Bewegungsmarken, sowie die Beträge von Akkumulation im Firn und Ablation auf der Zunge (seit 1885) mitgeteilt. Was für diesen Gletscher unbekannt ist, das ist die Tiefe des Eises, weil Bohrungen dort nicht veranstaltet wurden. Für das seit dem großen Vorstoß von 1818 eisfrei gewordene Gebiet wären zwar die Tiefen ziemlich genau bekannt; aber es fehlen zusammengehörige Daten über die damalige Eisbewegung und über die Abschmelzung auf der Gletscherzunge. Ich habe trotzdem versucht, nach den Erfahrungen am Hintereis auf Grund des vorhandenen reichlichen Beobachtungsmateriales vom Rhonegletscher das Verhalten des achsialen Teilgletschers, der vom Weißnollen (3436 m) herabzieht, zu prüfen. Die beiden abgrenzenden Bewegungslinien decken sich mit denen der Nummersteine 26 des roten und 28 des gelben Profils auf der Gletscherzunge. Sie wurden sinngemäß nach den Bewegungslinien der Stangen V, VI, XIV und XV bis zum oberen Großfirnprofil und von hier so weiter geführt, daß die eine beim Punkt 3284,8, die andere bei der Höhenlinie 3440 m den Grat erreicht. Sie münden auf der Gletscherzunge (Stand von 1874) beim rechten Rand des Hauptgletschertores die eine, beim

¹⁾ Vgl. O. v. Gruber: Topographische Ergebnisse der Pamir-Expedition des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins 1913 in Internat. Archiv f. Photogrammetrie Bd. VI 1923. Sond.-Abdr. S. 20.

Punkt 1781 die andere aus. Für den Stand von 1874 müssen die Bewegungslinien etwas näher beisammen bleiben, als es nach der Fortsetzung der Linien 28 und 26 über das grüne Profil abwärts angedeutet ist, weil die Eismasse damals noch nicht so in die Breite fließen konnte wie bei dem reduzierten Stand zu Beginn der 80-er Jahre. Die Breiten in den Profilen des Teilgletschers sind damit nach den Karten 1:5000 und 1:25000 des Rhonegletschers bestimmt. Außer den für die Vermessungen verwendeten Profilen habe ich noch einen Querschnitt durch den Eisbruch und einen oberhalb vom Eisbruch, dann einen zwischen gelbem und rotem Profil und noch zwei im oberen Zungen- und im Firngebiet eingeschaltet. Für diese wurden die Zahlen für Geschwindigkeit und Ablation durch Interpolation gemäß der Karte 1:5000, bzw. nach den Tabellen der Denkschrift S. 88 und S. 147 und 148 gewonnen. Dabei wurde in den Profilen »2906« und »oberer Großfirn« die Geschwindigkeit zu 66 und 69 m statt 60 und 63 m angesetzt, weil die Achse des Gletschers, also der untersuchte Teilgletscher, sich etwas schneller bewegt, als die benachbarte Stange XIV.

Die auf diese Weise gewonnenen Zahlen sind, genau genommen, nicht einem wirklich beobachteten Zustand des Rhonegletschers zugeordnet; sie können aber einen für etwa 1874 möglichen Zustand beschreiben. Keinesfalls sind sie weit von der Wirklichkeit entfernt. Da seit 1874 der unterste Teil des Gletschers abgeschmolzen ist, kann die Tiefe des Eises für damals aus der Karte 1:5000 entnommen werden, weil 1874 die Eisoberfläche bis zum »blauen Profil« zum erstenmal durch P. Gosset und E. Weiß genau vermessen wurde. Aus den unter V₀ mitgeteilten Oberflächengeschwindigkeiten, die aus den Beobachtungen bekannt sind, wurde unter Benutzung von $V_m = 0,86 V_0$ (bzw. $0,87 V_0$), wie für den Hintereisferner ermittelt, zunächst die Eistiefe für jedes Profil gewonnen, weil aus dem Abstand je zweier Profile, der mittleren Gletscherbreite und der Größe der Ablation (wirkliche Ablation — Einsenkung) die durch jeden Querschnitt im Laufe des Jahres fließende Eismenge berechnet werden konnte. Trägt man die erhaltenen Eistiefen in das Längsprofil, Tafel 6 der Denkschrift ein, so zeigt sich ein Verlauf des Untergrundes von geradezu überraschender Wahrscheinlichkeit. Wie für den Hintereisgletscher wurden auch hier die Eistiefen für den obersten Teil des Firns, für den Messungen fehlen, nach dem vermutlichen Verlauf des Untergrundes geschätzt. Das Längsprofil liefert dann für jeden Querschnitt den Wert von $\sin \alpha$ und damit auch die letzte der für die Berechnung

der Energieverteilung notwendigen Größen. Die nachfolgende Übersicht enthält außer den verwendeten gegebenen Größen auch die Tiefen und die berechneten Energien. Tab. 15

Profil	l	b	T	Ablation	Ein- senkung	V _m	V _o	Trans- portierte Menge	sin α	g	s	r	Freie Energie	Druck
	m	m	m	m	m	m/Jahr	m/Jahr	1000 m ³					mkg/sk	kg/cm ²
Ende . . .	—	130	—	15	10	—	—	—	—	—	—	—	0	0
Schwarz . . .	340	115	62	13	8	29,2	33	208	0,021	0,126	1,19	0,26	207	3,7
Grün . . .	360	108	120	11,9	5,3	36,5	41,5	474	0,039	0,53	0,90	0,59	553	3,7
Blau . . .	250	95	130	10,6	5,0	50,1	58,5	616	0,082	1,45	1,87	0,50	812	4,1
Belvedere . . .	470	75	35	6,7	4,0	232	243	724	0,470	9,80	10,40	0,83	1549	8,1
17—31*) . . .	380	70	124	5,0	2,4	101	116	796	0,074	1,69	5,18	1,07	2614	9,4
Gelb . . .	725	77	144	4,5	1,4	88	101	961	43	1,19	3,63	1,27	5224	17,0
22—27*) . . .	645	72	181	4,0	1,0	86	99	1105	56	1,78	2,72	1,37	7204	20,4
Rot . . .	625	72	195	3,3	0,4	89	102	1235	57	2,03	2,49	1,54	8622	21,8
2668 . . .	998	76	224	2,5	0,3	83	95	1398	54	2,17	1,92	1,73	10527	23,6
U. Gr. F. . .	1390	65	275	1,3	0,2	88	101	1506	40	1,74	1,55	1,85	12407	25,8
2905 . . .	975	80	312	— 0,8	0,3	57	66	1428	66	2,72	0,83	1,72	12892	28,6
Ob. Gr. F. . .	795	81	282	— 1,1	0,3	59	69	1343	0,090	3,48	1,15	1,60	12342	28,9
3000 . . .	650	83	270	— 1,3	0,2	56,5	66	1263	0,170	6,18	1,11	1,51	10102	25,6
3100 . . .	515	125	200	— 1,7	0,2	46,5	54	1161	0,467	15,70	1,41	1,40	6652	18,1
3200 . . .	360	193	185	— 2,0	0,1	29,2	34	1042	0,232	7,00	1,04	1,33	4132	12,6
Grat . . .	1160	425		— 2,5	0		—	0						

Das Leistungsdiagramm gibt glatte Gleichheit der Flächen für G und W und den maximalen Betrag der wandernden freien Energie zu 12892 mkg/sek für das Profil »2906«, welches ziemlich genau mit dem Ausgleichsquerschnitt zusammenfällt. Die Linie der Gefällleistung zeigt starken Anstieg in den oberen Firnregionen; von 3000 m allmähliches Abfallen bis zum Profil »17—31«; die große Neigung im Gletscherbruch bedingt neuerlichen Anstieg. Die Linie des Widerstandes verläuft allmählich ansteigend bis in die Gegend des Eisbruches; hier erhebt sie sich stark über die Achse, um gegen das Gletscherende, ähnlich der anderen Linie, abzufallen. Im Eisbruch ist somit der Hauptwiderstand zu überwinden, obgleich hier das große Gefälle neuen Zuwachs der Gefällsenergie bringt. Der stärkste Bewegungsdruck tritt, wie die vorstehende Tabelle zeigt, im Großfirn auf, wo zwischen Tälistock-Scheidfluh und den Abhängen des Galenstockes eine beträchtliche Einschnürung der strömenden Masse stattfindet. Er ist fast doppelt so groß wie der Höchstdruck im Hintereis.

*) Nummern von Netzpunkten der Karte.

Im Eisbruch dagegen, wo man von vornherein wohl den größten Bewegungsdruck erwartet, zeigt die Rechnung verhältnismäßig geringe Drucke. Es ist eben nicht der Druck, sondern der Energieaufwand entscheidend für das Geschehen innerhalb der Gletschermasse. Das wird recht deutlich, wenn man die Verhältnisse verfolgt, die während der letzten Schwankung im Hintereisferner bestanden.

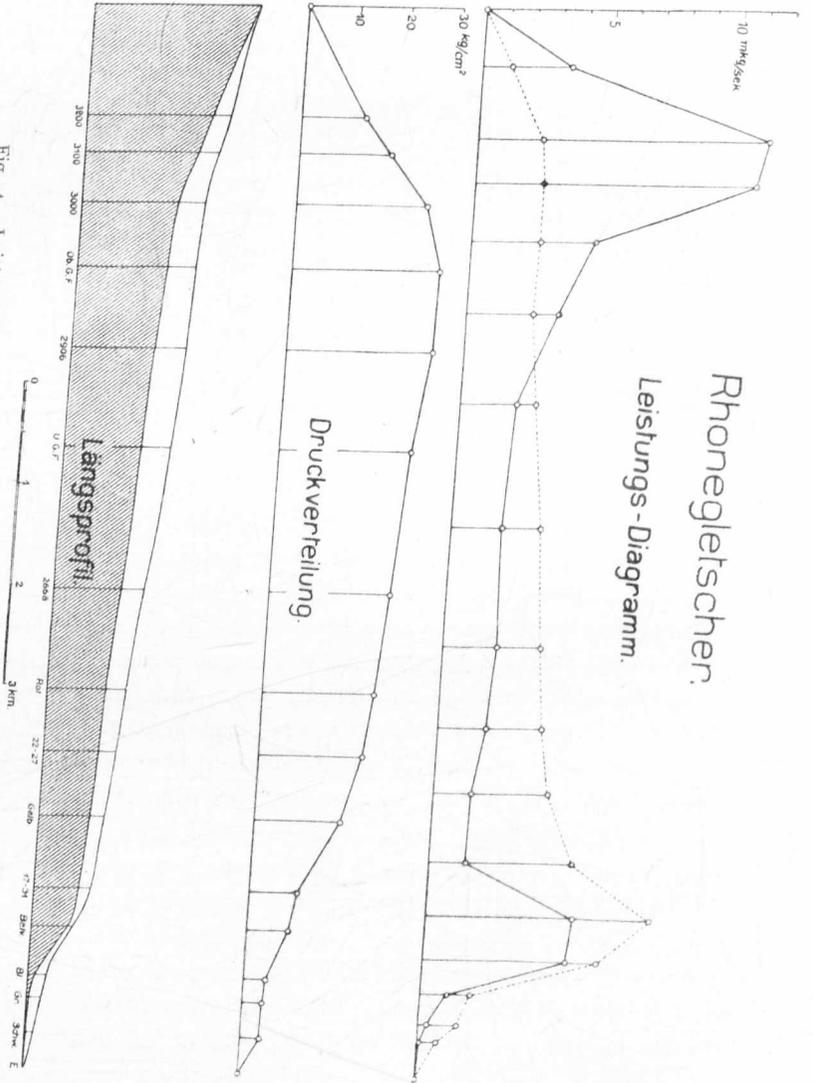


Fig. 4. Leistungsdiagramm, Druckverteilung und Längsprofil des Rhonegletschers. Die ausgezogene Linie des Leistungsdiagrammes stellt die Verteilung der Gefällleistung im Längsschnitt des Gletschers dar, die punktierte Linie die negative Leistung der Reibung in der Masse des Eises und am Grunde. Bezüglich der im Längsschnitt eingetragenen Profilzeichnungen sei auf die in Band XII dieser Zeitschrift S. 3 abgedruckte Karte des Rhonegletschers in 1 : 75 000 verwiesen.

Schwankung der Energie und der Drucke bei der letzten Schwankung des Hintereisferners. Die Tafel VIII gibt die Übersicht der Leistungsdiagramme für den Zeitraum des Vorstoßes und des Abschwellens, welche dem Teilgletscher 8—9 zugeordnet sind. Danach war

Tab. 16

	die Gefällsleistung mkg/sek	die freie Energie mkg/sek		die Gefällsleistung mkg/sek	die freie Energie mkg/sek
1914/15	12840	2015	1918/19	25130	5430
1915/16	12680	2420	1919/20	13040	4000
1916/17	21750	3420	1920/21	9500	2530
1917/18	21930	4300	1921/22	2760	720

Man bemerkt, daß die Gefällsleistung sowohl, wie besonders die freie Energie, deren Höchstwert angegeben ist, eine Schwankung zeigen, welche mit jener der beobachteten Geschwindigkeiten des Eises recht gut übereinstimmt. Dem allmählichen Anstieg folgt auch hier von Ende 1918 an ein rascher Abfall, und die starke Reduktion der Gesamtenergie sowohl als auch der wandernden Energie von 1921 bis 1922 zeigen, ebenso wie das Verhalten der Eisgeschwindigkeiten, daß nach einer kurzen außerordentlichen Leistung des Gletschers fast ein Ruhezustand in die Eismasse gekommen ist. Verfolgt man dagegen die Druckänderungen, die sich während der Schwankung in den einzelnen Profilen des Hintereisgletschers vollzogen haben, so erhält man die Zahlenreihe der Tab. 17 S. 192.

Daraus ergibt sich, daß in der Zeit des Abschwellens höhere Drucke in der gesamten Eismasse herrschten als während des Vorstoßes; ja selbst für 1922 ist wenigstens in den mittleren Teilen des Gletschers der Druck größer als für 1918/19, obgleich der Gletscher nur ganz geringe Bewegung zeigt. Es ist eben der zurückgelegte Weg auch kleiner geworden, und da die freie Energie als Differenz der Gefällsleistung und des Widerstandes (bis zum einzelnen Messungsquerschnitt hin) erscheint, so bleibt diese relativ groß, weil der Betrag der inneren Reibung sich mit dem Quadrat von $\Delta v = V_m - V_u$ verändert.

Die Angaben über die Energieverteilung über das ganze Längsprofil sind nicht durchaus auf unmittelbare Messungsergebnisse gestützt. Nur für das Gebiet der Zunge bis zum Profil IX, zweimal auch bis X, liegen für 1914—1918 Messungen vor; nur 1918, 1920 und 1921 wurden solche bis zum Profil XI ausgedehnt. Das Verhalten des Firngbietes während der Vorstoßperiode konnte also nur indirekt

Tab. 17

Profil	Drucke in kg/cm ²							
	1914/15	1915/16	1916/17	1917/18	1918/19	1919/20	1920/21	1921/22
XX . . .	3,3	4,3	3,1	4,6	1,1	4,4	4,5	3,3
XIX . . .	4,7	5,6	4,0	5,7	1,2	7,9	7,6	3,9
XVIII . . .	5,3	5,6	3,6	6,2	2,9	17,8	9,4	6,2
XVII . . .	5,0	4,9	3,5	6,3	4,4	29,4	10,2	7,4
XVI . . .	4,4	5,0	4,0	4,4	6,4	17,0	10,4	7,3
XV . . .	5,0	5,8	5,2	6,4	8,7	14,6	11,6	8,3
XIV . . .	5,4	7,4	6,1	7,2	9,3	13,1	12,9	9,6
XIII . . .	6,2	8,5	6,9	7,9	9,2	12,2	14,3	11,4
XII . . .	7,8	9,9	8,3	9,5	9,5	12,8	15,6	13,2
XI . . .	8,9	10,7	9,1	10,2	10,1	14,2	14,4	13,2
X . . .	9,9	10,9	9,8	10,2	9,9	13,0	16,5	14,5
IX . . .	9,3	8,8	8,1	9,0	8,2	11,7	15,5	12,8
VIII . . .	7,7	7,3	6,3	7,4	6,8	9,9	13,9	11,7
VII . . .	6,2	6,1	5,2	6,5	5,8	8,7	12,2	11,3
VI . . .	5,1	5,4	4,4	6,2	4,9	7,4	10,7	9,8
V . . .	4,5	4,7	3,9	5,5	4,2	6,3	9,8	8,5
IV . . .	3,6	3,6	2,7	4,5	3,2	5,3	7,9	6,8
III . . .	2,9	2,8	1,5	3,4	2,5	3,9	6,4	5,1
IIa . . .	2,4	2,7	0,8	2,6	2,2	3,6	5,0	4,5
II . . .	1,4	2,5	0,7	2,0	1,8	2,8	3,0	4,4
I . . .	0,2	1,7	0,4	1,3	0,4	2,3	0,4	1,9

erschlossen werden. Für die Zunge war aus den eingemessenen Punkten sowie aus den vorhandenen Kartenbildern die Änderung der Oberflächenhöhe und damit auch die Änderung in der Dicke des Eises bekannt. Um gleiches auch für den Firn zu gewinnen, habe ich unter möglichen Annahmen über Niederschlagsauftrag und Einsenkung der Oberfläche eine Reihe von Rechnungsversuchen durchgeführt, bei denen die Grundgleichung, wie sie oben aufgestellt wurde, erfüllt sein sollte. Die Versuche ließen schließlich als einzige brauchbare Unterlage für die Betrachtung der Vorgänge während der Schwankung diese Annahme zu: Vor Beginn des verstärkten Abflusses lag die Oberfläche im Firn zum Teil um 10—15 m höher als im Jahre 1905/06. Während des Vorstoßes sank die Firnoberfläche allmählich bis zu den Höhen von 1920 und darunter, welche durchschnittlich etwa 8 m niedriger sind als die von 1905/06. — Eine graphische Veranschaulichung kann für dies Verhalten nur in großem Maßstab gegeben werden; es verbietet sich deshalb eine Wiedergabe an dieser Stelle. Als Ersatz teile ich im folgenden die Höhenlagen der Querprofil-

mitten für den Teilgletscher 8—9 mit. Man entnimmt aus der Tabelle leicht, welche Gebiete des Firns die für den kleinen Vorstoß notwendigen Massen geliefert haben.

Tab. 18

Höhenlage der Gletscheroberfläche. — Teilgletscher 8—9.

Profil	1905/06	1914/15	1915/16	1916/17	1917/18	1918/19	1919/20	1920/21	1921/22	Schwankung 1914—1922 m
XX	3400	3415	3413	3412	3410	3408	3406	3403	3401	— 14
XIX	3300	3313	3311	3309	3306	3303	3301	3300	3300	— 13
XVIII	3200	3210	3208	3207	3203	3201	3196	3199	3197	— 13
XVII	3125	3134	3132	3131	3128	3125	3120	3120	3119	— 15
XVI	3040	3049	3048	3047	3044	3041	3036	3033	3033	— 16
XV	2985	2992	2991	2990	2988	2986	2981	2977	2977	— 15
XIV	2945	2950	2949	2948	2947	2948	2943	2939	2939	— 11
XIII	2910	2914	2913	2913	2911	2913	2909	2906	2906	— 8
XII	2845	2847	2847	2848	2847	2848	2844	2842	2841	— 7
XI	2825	2828	2828	2829	2828	2829	2826	2825	2822	— 7
X	2770	2771	2773	2775	2775	2774	2773	2771	2769	— 6
IX	2730	2728	2729	2733	2733	2734	2732	2730	2726	— 2
VIII	2695	2693	2693	2697	2697	2699	2693	2695	2692	— 1
VII	2665	2662	2662	2666	2666	2669	2669	2666	2660	— 2
VI	2635	2633	2633	2635	2636	2638	2642	2636	2629	— 4
V	2610	2606	2606	2609	2610	2615	2620	2612	2607	+ 1
IV	2580	2572	2572	2576	2580	2586	2591	2584	2579	+ 7
III	2540	2531	2531	2535	2540	2550	2553	2549	2544	+ 13
IIa	2495	2485	2485	2488	2495	2504	2504	2500	2497	+ 12
II	2450	2437	2437	2435	2445	2454	2453	2452	2452	+ 15
I	2415	2394	2392	2385	2393	2403	2413	2425	2415	+ 21

Ich will nicht behaupten, daß die von mir hier gegebene Darstellung die einzige Möglichkeit bedeutet, den Verlauf des Eisflusses zwischen 1914 und 1922 zu erklären. Aber weil ich infolge der verschiedenen, wieder aufgegebenen Kombinationen den Zusammenhang zu übersehen gelernt habe, glaube ich, daß meine Darstellung dem wirklichen Ablauf der Eisbewegung recht nahe kommt. Außer der wegen des Einsinkens der Firnoberfläche nach abwärts wandernden Eismenge kommt noch die durch die Niederschläge anfallende Eismenge mit in Bewegung. Hierüber fehlen, wie früher schon bemerkt wurde, Messungen an Ort und Stelle. Es mußten Annahmen gemacht werden, die mit der Erfahrung, d. h. in diesem Fall mit den Ergebnissen der nächstgelegenen Hochstationen für Niederschlagsmessung, vereinbar sind. So dürfte für den größten Betrag des Niederschlages,

der in der Beobachtungszeit gefallen und in die Gletschermasse aufgenommen wurde, nicht mehr als das 1,8fache des für die letzten 30 Jahre gefundenen Mittelwertes angesetzt werden; denn die an vielen Stellen vorgenommenen Niederschlagsmessungen, insbesondere auch die der alpinen Hochstationen, zeigen, daß die Maxima nur das 1,8fache des Mittelwertes erreichen. — Wenn die Ablation auf der Gletscherzunge auch bei den Profilen IX und X noch Werte von 1 oder mehr Metern erreichte, so wurde die wohl berechtigte Annahme gemacht, daß auch in den Profilen XI und XII noch Ablation an Stelle von Auftrag getreten war und auch für die größeren Höhen ein gegen den Mittelwert (1905/06) verminderter Auftrag bestand. Wie zum Teil mit Hilfe der vorstehenden Zahlentafel über die Höhenänderung der Firnoberfläche verfolgt werden kann, erhält man also folgendes Bild über das Verhalten des Gletschers von 1914 bis 1922:

Einsinken der Firnoberfläche bis herab zum Profil XIII um 2 bis 1 m in den Jahren 1915/16 und 1916/17; gleichzeitig Hebung der Zungenoberfläche um 1 bis 4 m zwischen den Profilen XII und IIa; weiter abwärts bewirkt die Ablation, trotz zunehmender Geschwindigkeit des Eises, noch Einsinken der Eisoberfläche.

1917/18 geht das Einsinken der Firnoberfläche in verstärktem Maße weiter und wird bis zum Querschnitt XI bemerkbar. Bis zum Profil VII bleibt die Eishöhe dieselbe wie im Vorjahr; abwärts bis zum Gletscherende erfolgt Hebung der Oberfläche bei steigender Geschwindigkeit des Eises. 1918/19 vollzieht sich in den obersten Firngebieten eine weitere Senkung um 2 bis 3 m; zwischen Profil XIV und IX schwankt die Oberfläche um 1 m auf oder ab; von Profil VIII an abwärts verstärkte Hebung der Zungenoberfläche und weitere Steigerung der Geschwindigkeit.

Die Hebung hält von Profil VI an abwärts auch 1919/1920 noch an, während gleichzeitig im mittleren Teil des Firns noch starke Senkung, teilweise bis 5 m, stattfindet. Im ganzen Zungengebiet nimmt die Geschwindigkeit ab; es bilden sich in der vorher fast völlig geschlossenen Eismasse große Spaltensysteme aus (vgl. die Karte des Gletschers von 1920). Im folgenden Jahr tritt die Senkung mehr im unteren Firngebiet auf; bei Profil VIII zeigt sich eine vorübergehende Anschwellung; weiter abwärts sinkt die Zungenoberfläche um Beträge bis zu 6 m ein; nur am Gletscherende ist noch ein Massenzuwachs festgestellt. Die Geschwindigkeit des Eises hat weiter abgenommen. Die Zerklüftung der Zunge ist ziemlich dieselbe wie 1920.

1921/22 ist selbst hier Einsinken an Stelle der Hebung getreten. Die ganze Gletscheroberfläche vom Profil XII bis zum Ende liegt um durchschnittlich 4 m, stellenweise um 7 m, bei Profil I sogar um 10 m niedriger als im Vorjahr und hat vielfach die Höhenlage von 1914/15 unterschritten. Im Firngebiet ist die Senkung mehrfach bis unter die Höhen von 1905/06 gegangen. Die Bewegung der Zunge ist weit schwächer als jemals in den vorhergehenden 29 Jahren.

Das Firnfeld ist also (von der hypothetischen Oberfläche 1914/15 an) langsam ausgelaufen, bis der Stand von 1905/06 erreicht bzw. unterschritten war, und die Veränderungen im Firn haben sich fast gleichzeitig (d. h. in weniger als einem Jahre) durch entsprechende Änderungen in Bewegung und Höhenlage der Zunge geltend gemacht.

In einem mit starker Überhöhung (1 : 5) im großen Maßstab 1 : 5000 gezeichneten Längsprofil des achsialen Zungengebietes, in dem die Positionen der eingemessenen mittleren Nummernsteine aller beobachteten Steinreihen eingetragen sind, kommt die Schwankung in der Höhenlage der Zungenoberfläche schön zum Ausdruck. Aber auch in dieser Darstellung zeigt sich, daß die zunehmenden Geschwindigkeiten schon von 1914/15 an eine Hebung der Eisoberfläche für den größten Teil der Zunge bewirken und daß bereits 1915/16 die Hebung bei den untersten Steinreihen einsetzt; deutlich tritt sie hier, besonders am Gletscherende selbst, allerdings erst 1916/17 auf. Man gewinnt also bei der Beurteilung der gesamten Vorgänge nicht den Eindruck, als wenn eine Welle von oben nach unten den Gletscher durchlaufen hätte; vielmehr scheint die im Firn ausgelöste Veränderung in der Bewegungstendenz sich sehr schnell auf die ganze Masse des Gletschers übertragen zu haben. Die gesteigerte Bewegung im Firn bewirkt eine fast gleichzeitige Zunahme der Geschwindigkeiten an allen Stellen der Eismasse, die nun eine gegen das Ende der Zunge zunehmende Schwellung erfährt.

Ich habe übrigens, nebenbei bemerkt, beim Aussuchen der Kombinationen für die Bewegung der Firnoberfläche 1914 bis 1922 auch den Fall betrachtet, daß die Niederschlagsmenge eines Jahres hauptsächlich während des Winterhalbjahres anfallen und ihre Wirkung mit einiger Verzögerung gegen die Zunge hin fortschreiten soll. Doch gelang es mir nicht, auch bei der Annahme einer außerordentlich großen, dem doppelten Mittelwert entsprechenden Niederschlagsmenge eine die gestellten Bedingungen erfüllende Verteilung der Geschwindigkeiten im Firn zu finden. Damit die bei den Veränderungen auf der Gletscherzunge festgestellten Massenverschiebungen

stattfinden konnten, mußte unbedingt mehr Eis verfügbar sein, als selbst ungewöhnlich großen Niederschlagsmengen eines Jahres entspricht. Das bedingt von selbst die Annahme einer Massenaufspeicherung im Firn und rechtfertigt auch die für die vorausgegangene Darstellung zugrunde gelegte Ausgangsoberfläche des Firnes.

Wie aber kommt die Aufspeicherung zustande? In der Zeit von 1893 bis 1914 war, wenn von kleineren Schwankungen abgesehen wird, die Eisbewegung in der Zunge des Hintereisferners immer geringer geworden, so daß sie von anfänglich 51 m in der Region stärkster Bewegung auf etwa 32 m/Jahr herabsank. 1905/06 war hier 38 m gemessen, und das Energiediagramm ist auf der Grundlage berechnet, daß der vermutliche gesamte Niederschlag sofort nach seinem Anfall auch in die Bewegung des Gletschers einbezogen wird, die sich unter der Herrschaft der Reibungskoeffizienten

$$\mu = 10^{12} \frac{g}{\text{cm} \cdot \text{sek}} \text{ und } f = \frac{1}{20}$$

vollzieht. Soll eine Aufspeicherung im Firn eintreten können, so muß der Vorgang so sein, daß die bestehende Bewegung unterhalten wird, wenn nur ein Bruchteil der anfallenden Niederschläge in sie einbezogen wird, während der andere zur Massenansammlung im Firn, zur Hebung der Oberfläche dient. Ist bei Beginn dieser Ansammlung die Eisgeschwindigkeit recht gering, so wie sie z. B. 1921/22 gefunden wurde, dann besteht innerhalb des Gletschers ein schwacher Massentransport, und es wird verständlich, daß sich ein beträchtlicher Teil der Niederschläge im Firn anhäuft. Nun ist ja in den Jahren 1911 bis 1912 in der Tat die Eisgeschwindigkeit von rund 41 m (1910—11) auf 29 m gesunken (in 2660 m Höhe) und hat sich nur langsam wieder etwas gehoben, bevor der Vorstoß einsetzte (vgl. Fig. 1). Man kann also damit rechnen, daß von 1912 an ein (verstärktes) Ansammeln im Firn eingetreten ist.

Die Eismengen, welche während der Vorstoßperiode der Gletscherzunge zugeführt wurden und hier die Hebung der Oberfläche brachten oder durch die Ablation entfernt wurden, sind wesentlich größer als die, welche im Zeitraum normalen Abflusses aus dem Firnbecken kamen. Sie sind bekannt, weil die Veränderungen der Zungenoberfläche und die Größe der Ablation gegeben sind. Es sind die gleichen Mengen, welche den »Ausgleichsquerschnitt« passierten. Für den Teilgletscher 8—9 hatten sie folgende Beträge: (s. Tab. 19).

Während der sieben Jahre von 1914 bis 1920, für welche der gesteigerte Abfluß bestand, macht dieser rund das 16fache von dem

Tab. 19

	Trans- portierte Menge m ³ /Jahr	Geschwindigkeit im Ausgleichs- querschnitt m/Jahr		Trans- portierte Menge m ³ /Jahr	Geschwindigkeit im Ausgleichs- querschnitt m/Jahr
1914/15 . . .	713000	38	1919/20 . . .	950000	54
1915/16 . . .	712000	37	1920/21 . . .	523000	30
1916/17 . . .	1221000	60	1921/22 . . .	158000	9,4
1917/18 . . .	1320000	72	1905/06 . . .	450000	22,0
1918/19 . . .	1698000	95	1848	1048000	65

des Jahres 1905/06 aus. Säntis und Zugspitze notieren für den Zeitraum Niederschlagsmengen, die zwar im allgemeinen größer sind als die für 1921; doch ist die Differenz nicht bedeutend, jedenfalls nicht so groß, daß daraus auf so beträchtliche Zunahme der Schneemassen im Hintereisferner geschlossen werden könnte, welche die für den gesteigerten Abfluß nötigen Massen geliefert hätte. Im Januar 1917 waren vielleicht auch für den Hintereisfirn außerordentliche Schneemengen angefallen; denn damals gab es auf der Südseite der Alpen ungewöhnlich viel Schnee. Da der Hintereisfirn an der Wetterscheide liegt, kann er wohl von den abnormen Niederschlagsverhältnissen von damals gewonnen haben. Im Sommer 1917 lagen auch 28 große Lawinenreste im Venter Tal, die starke Wegzerstörungen verursachten. Sonst sind meistens nur 2 bis 3 Lawinenreste zwischen Vent und Heiligen Kreuz zu beobachten. Jedenfalls trat 1918/19 ein verstärktes Anwachsen der Geschwindigkeiten im Zungengebiet auf, welches vielleicht als Folge der großen Schneemengen des Jahres 1917 angesehen werden muß. Jedoch sind auch diese ungewöhnlich großen Niederschläge nicht für den im Hintereisgletscher aufgetretenen Massentransport ausreichend gewesen. Es muß der Anstau im Firn stattgefunden haben, den ich für die Betrachtung der Abflußverhältnisse während der Jahre 1914 bis 1922 zugrunde gelegt habe. Die physikalische Möglichkeit für das Aufstauen erscheint mir gegeben durch den beträchtlichen Zuwachs, den der Bewegungsdruck innerhalb dieses Gletschers bei reduzierter Abflußgeschwindigkeit erfährt (vgl. Tabelle 17 S. 192). Diese hauptsächlich in den mittleren Teilen des Firnes auftretende Drucksteigerung bringt eine Verminderung der inneren Reibung zustande, weil der Anteil der flüssigen Phase in dem Gemisch Eis-Wasser, das den Gletscher bildet, vergrößert wird. Dadurch wächst die gegenseitige Verschiebbarkeit der Gletscher-

körner, die Plastizität nimmt zu. Das muß sich besonders in den bodennahen Eisschichten geltend machen, in welchen der Energieumsatz zur Überwindung der Bodenreibung wirksam wird. Hier tritt der stärkste Zuwachs der Strömungsgeschwindigkeit auf, so daß nicht nur die mittlere Querschnittsgeschwindigkeit zunimmt, sondern auch eine relativ immer größer werdende Annäherung dieser letzteren an die Oberflächengeschwindigkeit eintritt. Umgekehrt muß bei der starken Geschwindigkeitsabnahme, welche am Abschluß des Vorstoßes beobachtet wurde, die Zustandsänderung im Eis sich gerade auch bei den bodennahen Schichten am stärksten bemerklich machen. Das Gleiten über den Untergrund wird relativ am stärksten verringert; in den randlichen Gebieten tritt ein förmliches Stoppen des bewegten Eises ein. Auf diese Bremsung an der Auflagefläche der Eismasse, die noch mit einer gewissen Trägheit weiter strömt, ist wohl in erster Linie das plötzliche Aufreißen der großen Spaltensysteme zurückzuführen, das wir zwischen 1919 und 1920 feststellen konnten. Die Lage dieser Spaltensysteme entspricht in der Hauptsache den Stellen, an denen kleine Änderungen in der Neigung des Untergrundes auftreten, wo also die Gefällsleistung merklichen Zuwachs erfährt (vgl. die Werte von $\sin \alpha$ in Tab. 11 auf S. 179 und das Längsprofil auf Tafel V). Daß diese Spaltensysteme wie an den Ort gebunden erscheinen, geht sehr klar aus einer Vergleichung der Karten von 1922 und 1920 hervor. Stellt man sich eine Pause des Spaltenverlaufs auf der einen Karte her und legt sie auf die andere, so findet man (wenigstens bei den Originalen, die so gut wie keine Verzerrung des Papiere haben) fast vollständige Deckung; kaum $\frac{1}{2}$ mm beträgt die größte beobachtbare Verlagerung, obwohl in dem Zeitraum das Eis Verschiebungen von 50 und mehr Meter erfahren hat, die im Maßstab der Karte 5 mm und darüber ausmachen. Die 1920 gerissenen Spalten sind also wieder geschlossen und bis 1922 durch neue, die an der Stelle der alten entstanden, ersetzt worden. Übrigens war die Zerklüftung des Eises 1922 doch etwas schwächer, der Gletscher deshalb auch etwas leichter begehbar, als 1920.

Zwischen den Profilen XI und X verläuft ein fast senkrecht zur Strömungsrichtung gehendes Spaltensystem. Das deutet darauf hin, daß hier in der Bewegungsrichtung die stärksten Wirkungen auf die Eismasse erfolgen. Es ist das die Region stärksten Bewegungsdruckes (vgl. Taf. VII Fig. 3), die Stelle, an welcher der Gletscher die für das Durchfließen des engsten Querschnittes nötige Zusammenpressung und Streckung erfährt. Zwischen Profil IX und X ist weder 1920 noch 1922 auf dem Hauptzufluß eine Zerklüftung bemerkbar gewesen.

Unterhalb Profil VIII beginnt die vorher fast horizontale Talsohle ein leichtes Gefälle anzunehmen, während gleichzeitig ein, wenn auch schwaches, seitliches Auseinanderfließen des Eises erfolgt. Hier kommt das erste Spaltendurcheinander. Das ist die Gegend, in welcher 1910 die vergeblichen Bohrversuche in der Region stärkster Bewegung gemacht wurden. Damals war allerdings von der Zerklüftung, wie sie jüngst entstand, nichts zu merken. Aber die Neubildung von Spalten, fortwährendes Zerreißen der Eismasse durch schmale Risse, wurde auch damals festgestellt. Beim Profil VI tritt eine neue Vergrößerung des Gefälles auf (zwei zueinander fast senkrechte Systeme zerlegen die Eismasse in prismatische Klötze von 10 bis 30 m Seitenlänge). Das untere ausgedehnte System hat neben der Gefällsvergrößerung bei Profil III noch das »In-die-Breite-Gehen«, sowie die Umbiegung des Gletschers um den Abhang des Oberen Berges als Ursachen, soweit die Formen des Bettes in Betracht kommen. Das Stoppen am Untergrund ist aber die in den Bewegungsverhältnissen des Eises liegende Ursache für das plötzliche Auftreten und die große Ausdehnung dieser Spalten gewesen.

Zerlegt man, wie es bei der Berechnung geschieht, den Widerstand W in seine Summanden: innere Reibung S und Bodenreibung R , und zeichnet man sie in die Leistungsdiagramme ein, so ergibt sich aus diesen folgende Übersicht:

Tab. 20

	W	R	S	R : W
	mkg/sek			%
1914/15	12840	4690	8150	36,5
1915/16	12680	5160	7520	40,5
1916/17	21750	9320	12430	43,0
1917/18	21930	10640	11290	48,5
1918/19	25130	14310	10820	57
1919/20	13040	6920	6120	53
1920/21	9560	4260	5300	44,5
1921/22	2760	1260	1500	45,5

Der Anteil der Bodenreibung am Gesamtwiderstand wächst mit zunehmender Geschwindigkeit des Eises und wird für die Zeiten stärkster Bewegung sogar größer als die auf innere Reibung geleistete Energie. Das hängt natürlich auf das engste zusammen mit der Änderung, welche das Verhältnis $v_m : v_o$ erfährt, und entspricht genau der Feststellung, daß mit wachsender Geschwindigkeit sich die mittlere Querschnittsgeschwindigkeit der Oberflächengeschwindigkeit nähert.

Noch deutlicher tritt der Einfluß der Bodenreibung hervor, wenn man die Betrachtung auf den abwärts vom Ausgleichsquerschnitt gelegenen Teil des Gletschers beschränkt. Man findet

Tab. 21

	E	W ₁	S ₁	R ₁	R ₁ : W ₁	R ₁ : S ₁
	mkg/sek				%	
1914/15	2015	3940	2140	1800	45,5	0,84
1915/16	2420	4720	2480	2240	47,5	0,92
1916/17	3420	6930	3010	3920	56,5	1,30
1917/18	4300	8850	4030	4820	54,5	1,19
1918/19	5430	12050	4530	7520	62,5	1,66
1919/20	4000	7860	3860	4000	51	1,04
1920/21	2530	4560	2590	1970	43,5	0,76
1921/22	720	1470	880	590	40	0,67

Im Bremsgebiet ist also tatsächlich für die Zeiten des Vorstoßes die Bodenreibung von ausschlaggebender Bedeutung. Sie überschreitet sogar den Betrag der freien Energie E, wie der Vergleich der Reihen E und R₁ zeigt. Man beachte besonders, daß trotz starker Abnahme der Gesamtenergie und auch der freien Energie im Jahre 1919/20 die Bodenreibung R₁ noch größer ist als die innere Reibung S₁. Diese hat von 1918/19 auf 1919/20 um 670 mkg/sek, die Bodenreibung aber um 3520 mkg/sek abgenommen; die Grundgeschwindigkeit ist eben wesentlich kleiner geworden, während die Schiebung innerhalb der Eismasse noch beträchtlich ist. Erst 1920/21 zeigt auch diese starke Abnahme, die sich 1921/22 noch fortsetzt, so daß nun bei der geringen Bewegung des Eises die zur Überwindung der inneren Reibung erforderliche Energie wieder viel größer ist als die von der Bodenreibung verbrauchte. Von dem Bremsen an der Auflagefläche zu reden, erscheint damit völlig gerechtfertigt.

Energie- und Druckverteilung im Hintereisferner beim Maximalstand von 1848. Es ist noch von Interesse, die Verhältnisse näher zu prüfen, wie sie für den Maximalstand von 1848 bestanden haben. Man kennt aus dem Verlauf der Moränenzunge ziemlich gut die Höhenlage der Eisoberfläche von damals, und da sowohl für das nun eisfreie Gebiet wie für den heutigen Gletscher die Eistiefen angebbar sind, so konnte unter Zugrundelegung der Erfahrungen über Ablation und Auftrag zunächst die durch die Profile strömende Eismenge, daraus die mittlere Eisgeschwindigkeit und auch die Verteilung der Geschwindigkeit an der Oberfläche des Teilgletschers 8—9 ermittelt werden. Für Profil IX wurde Ablation und Auftrag gleich Null

angenommen. Weiter aufwärts mußte durch Auftrag und Einsinken der Oberfläche die Eismenge gewonnen werden, welche durch den Ausgleichsquerschnitt geht. Die Zahlenreihen sind im folgenden angegeben:

Tab. 22

Profil	Seehöhe	b m	T m	Abla- tion m	jährliche transportierte Menge 1000 m ³	V _m m	V _o m	g		Freie Energie mkg/sek	Druck kg/cm ²
								w	g		
XX . .	3388	220	58	— 3	86	7	8	1,24	0,26	256	9
XIX . .	3291	165	69	— 3	233	20,5	23,5	2,62	1,14	586	7,9
XVIII . .	3194	130	94	— 3	383	31,4	36	3,31	1,59	1061	8,8
XVII . .	3114	80	154	— 3	546	45	52	2,37	1,66	1593	9,1
XVI . .	3032	66	154	— 3	665	65	75	3,46	2,52	2058	9,8
XV . .	2903	60	240	— 3	747	52	60	2,90	1,90	2503	10,6
XIV . .	2951	65	268	— 2	810	46,5	53,5	1,98	1,68	2635	10,3
XIII . .	2914	60	290	— 2	886	51	58,5	2,17	1,55	3080	11,0
XII . .	2852	66	323	— 2	957	45	52	3,02	1,62	3570	11,8
XI . .	2830	60	345	— 2	1004	49	56,5	1,62	1,62	3686	11,6
X . .	2792	49	334	— 1	1048	64	74	1,66	1,84	3338	10,2
IX . .	2752	48	332	0	1048	66	76	0,51	1,86	2568	7,7
VIII . .	2720	50	298	1	1022	68,5	79	0,56	2,00	1835	5,8
VII . .	2693	50	278	1,5	1010	72	83	0,86	2,09	1497	4,8
VI . .	2670	50	266	2	966	72,5	83,5	1,29	2,08	1191	3,9
V . .	2652	52	258	2,5	933	68	78,5	1,07	1,99	967	3,3
IV . .	2620	52	250	3	877	67,5	77,5	0,96	1,90	700	2,5
III . .	2610	55	242	3,5	811	61	70	1,47	1,73	592	2,3
IIa . .	2590	58	240	4	750	54	62	1,66	1,54	543	2,3
II . .	2562	56	232	5	681	52,5	60,5	0,72	1,43	485	2,2
I . .	2540	56	217	6	599	49	56,5	1,01	1,20	368	1,9
AB . .	2500	55	190	7	512	49,5	57	0,59	1,27	233	1,4
Z . .	2440	56	160	8	376	43	49	0,08	1,07	92	0,8
Y . .	2360	56	130	9	182	25	29	0,04	0,49	42	0,7
Ende . .	2220			10	0						

Sowohl diese Tabelle wie das Leistungsdiagramm erweisen für den Höchststand des Gletschers ähnliche Bewegungsverhältnisse, wie sie 1919/20 nach dem erreichten maximalen Vorschub auftraten. Die grundlegenden Annahmen über die Ablation auf der Zunge können als normal für das Beobachtungsgebiet betrachtet werden. Die Zahlen für den um die Einsenkung vermehrten Auftrag im Firn ergeben sich fast zwangsläufig aus der Festlegung der Firngrenze und des Ausgleichsquerschnittes. Der Verlauf der Bewegungslinien, welche den Teilgletscher abgrenzen, wurde wie der für 1905/06 angenommen und über das 1848er Gletscherende sinngemäß fortgeführt. Der Ab-

stand von Profil AB nach Profil Z ist 310 m, der von Z bis Y 390 m; von Y bis zum Ende 330 m. Die Bodenneigung in Z ist mit $\sin \alpha = 0,07$, die in Y mit $\sin \alpha = 0,08$ aus der Karte 1905 zu entnehmen.

Die gesamte Bewegungsenergie des Teilgletschers 8—9 für das 1848er Maximum ergibt sich wie der Gesamtwiderstand zu 16090 mkg/sek. Davon treffen 9080 mkg/sek oder 56,5% auf die Bodenreibung, der Rest auf die innere Reibung. Für den Teil abwärts vom Ausgleichsquerschnitt sind die entsprechenden Zahlen 8400 mkg/sek, 5200 mkg/sek und 62% — in völliger Übereinstimmung mit den Bewegungsverhältnissen nach dem 1920 erreichten Hochstand. Ob die Vorgänge um 1848 wirklich so verliefen, wie sie hiernach erscheinen, läßt sich mangels jeder brauchbaren Messung aus jener Zeit leider nicht sagen. Insbesondere bleibt es natürlich fraglich, ob die für den Vorstoß von 1848 nötige Eismasse einem länger währenden Aufstau im Firn oder einer Reihe aufeinander folgender Jahre mit außergewöhnlich großen Niederschlagsmengen zugeschrieben werden muß. Damals erfolgte ein ziemlich allgemeines Anwachsen der Alpengletscher, so daß also die letztere Möglichkeit sehr wahrscheinlich ist. Zieht man noch das Ergebnis in Betracht, welches kürzlich durch A. Huber über »Niederschlagsmessungen auf dem Plattachferner und der Zugspitze«¹⁾ veröffentlicht wurde, so wächst diese Wahrscheinlichkeit. Nach diesen Messungsergebnissen dürfen die Schneemengen, welche in den Firngebieten aufgefangen und abgelagert werden, beträchtlich größer, mehr als doppelt so groß angesetzt werden als die auf freien Gipfelstationen gemessenen. Hier verweht der Wind einen großen Teil des Schnees vom Rande des Meßgefäßes; innerhalb der von hohen Graten umsäumten Firnmulde ist die Luftbewegung schwächer und deshalb die abgefangene Schneemenge größer.

Auch für die Betrachtung der Vorgänge im Hintereisferner während der Schwankung 1914 bis 1922 müssen diese Huberschen Ergebnisse beachtet werden. Es dürfen die im Firngebiet angefallenen Schneemengen weit größer angesetzt werden, als es von mir geschah; dann werden eben die Schwankungen in der Höhenlage der Gletscheroberfläche geringer, als ich sie (vgl. Tabelle S. 193) angenommen habe — auf die Annahme eines längere Zeit hindurch andauernden Aufstauens der Eismasse im Firn wird aber doch nicht verzichtet werden können. Leider fehlen eben gerade für die Periode 1914 bis 1922 Messungen im Firn überhaupt und solche des Auftrages

¹⁾ Deutsches Meteorolog. Jahrbuch für Bayern 1923

insbesondere. Eine Änderung der von mir gemachten Annahmen führt daher wohl zu einer Änderung im Betrag der Hebung und Senkung der Firnoberfläche, aber nicht zu einer größeren Sicherheit des Resultates. Der Qualität nach bleibt dieses erhalten.

Zukünftige Beobachtungen. Damit komme ich zu dem Resultat, daß trotz der nach mancher Richtung wertvollen Ergebnisse, welche die nun 29jährige Beobachtungsreihe am Hintereisgletscher geliefert hat, die Fortsetzung der Messungen an diesem Gletscher unbedingt erfolgen sollte. Man kann sich im wesentlichen auf Geschwindigkeits- und Ablationsmessungen an 3 bis 4 Punkten im Stromstrich auf der Zunge beschränken; im Firn aber müssen die Messungen von Geschwindigkeit und Auftrag bis zur Höhe von 3400, ja 3500 m ausgedehnt werden, und hier sollten sie, solange der Zug der Bewegungslinien auf den steilen Seitenhängen im Teufelseck und an der Langtaufferer Spitze nicht sichergestellt ist, auch außerhalb des Stromstriches stattfinden. Neben der möglichst genauen Einmessung der Bewegungsmarken (bei der auch der Dezimeter geehrt werden muß) sind häufiger wiederholte photogrammetrische Aufnahmen der ganzen Firnoberfläche erforderlich, aus denen mit Sicherheit die hier auftretenden Veränderungen ermittelt werden können. Dann wird die in dieser Abhandlung auf Grund der Finsterwalderschen Strömungstheorie gegebene näherungsweise Lösung des Problems der Gletscherbewegung die wünschenswerte Verfeinerung erfahren können.

Bemerkungen zu den Tafeln. Durch ein bedauerliches Versehen — die Korrekturen der Tafeln wurden weder dem Herausgeber noch dem Verlag vor dem Druck vorgelegt — sind bei den Tafeln III bis VIII die Maßstäbe fortgeblieben. Sie werden hier nachgetragen.

Taf. III. Maßstab 1:10000. Abstand der Koordinatenkreuze bei 1922 1 km.

Taf. IV. Maßstab 1:25000.

Taf. V. Querschnitte in 1:10000, Längsprofil 1:20000. Das Längsprofil ist in zwei Teilen dargestellt, so daß der untere Teil nach rechts hin an den oberen anschließt.

Taf. VI (auf der Rückseite von Taf. IV gedruckt). Maßstab 1:25000.

Taf. VII. Längenmaßstab für Fig. 1 bis 4 1:40000, für Fig. 5 und 6 1:25000.

Taf. VIII (auf der Rückseite von Taf. VII gedruckt). Längenmaßstab 1:50000.
