

(Comptes Rendus IX. Congrès géol. internat. de Vienne 1903.)

*Ducenten F. Åkerblom
vån skapdigen
från författaren.*

Zur
Technik der Gletscheruntersuchungen.

Von

Axel Hamberg

(Stockholm).



WIEN 1904.

Gesellschafts-Buchdruckerei Brüder Hollinek, Wien, III., Erdbergstraße 3.

Zur Technik der Gletscheruntersuchungen.

Von Axel Hamberg (Stockholm).

Die praktischen Erfahrungen über Gletscheruntersuchungen, die ich mir hier erlaube weiteren Kreisen bekannt zu machen, habe ich während langjähriger Arbeiten in Schwedisch-Lappland erworben. Daß Gletscher in Schweden vorkommen, ist überhaupt nur wenig bekannt. Die ersten wurden jedoch schon im Jahre 1807 von dem berühmten Botaniker Göran Wahlenberg am Sulitelma entdeckt. Durch die Arbeiten schwedischer Kartographen in den siebziger Jahren und des Staatsgeologen Dr. Svenonius in den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts wurde eine noch größere Zahl von Gletschern in den gebirgigen Teilen von Nordschweden bekannt. Eine ausführlichere Untersuchung irgendeines dieser Gletscher fand jedoch nicht statt.

Eine Praxis für derartige Arbeiten hatte sich deshalb bei uns nicht herausgebildet, als ich im Jahre 1896 meine Untersuchung der wichtigsten Hochgebirgsgegend von Lappland, der Umgegend von Sarektjokko, speziell wegen der dortigen zahlreichen Gletscher anfang¹⁾. Dieses Gebiet, das etwa hundert Gletscher enthält, von denen ungefähr die Hälfte im Anfange meiner Arbeiten noch vollkommen unbekannt war, umfaßt einen großen Teil des Landes zwischen den beiden Hauptzweigen des Lule-Elf und bildet das wichtigste Quellengebiet desselben. Zur Zeit, als ich dieses Unternehmen anfang, waren die schönen Arbeiten über Tiroler Gletscher von Finsterwalder, seinen Schülern und Nachfolgern noch nicht veröffentlicht, und ich befand mich betreffs Praxis und Theorie zunächst auf dem Standpunkte, auf welchen sie die Forscher der alpinen Gletscher in den vierziger und fünfziger Jahren gebracht hatten. Seit dieser Zeit hat bis zu den neunziger Jahren dieser Zweig der Wissenschaft verhältnismäßig nur wenig Fortschritte gemacht. Im Laufe der Untersuchungen fand ich aber bald, daß viele Verbesserungen und Erweiterungen der alten Methoden möglich, wünschenswert oder sogar notwendig waren.

¹⁾ Sarjekfjällen, En geografisk undersökning. Ymer 1901. Seite 145—204 und 223—276. Referate in Petermanns Mitteilungen 1903, Geologisches Centralblatt, Band II, 1902 und La Géographie 1903.

Die Erscheinungen, die wir Gletscher nennen, beruhen bekanntlich hauptsächlich auf dem Übergewichte des gefallenen Schnees über den geschmolzenen und verdunsteten in den oberen Teilen der Gletscher, auf der plastischen Umformung oder Bewegung des Gletschereises und auf dem Überhandnehmen des Schmelzungsprozesses im Zungengebiet. Der erste und dritte dieser Faktoren sind hauptsächlich von dem Klima abhängig und bedingen durch Vermittlung des zweiten die Ausdehnung und Mächtigkeit der Gletscher. Bei der systematischen Untersuchung der Gletscher eines Gletschergebietes scheinen mir die Bestimmungen dieser drei Faktoren in erster Linie wichtig, wenn auch andere Beobachtungen von großem Interesse sein können. Ich will mich deshalb auf die Methoden für die Ermittlung dieser drei Faktoren beschränken.

Näher angegeben sind die zu bestimmenden Größen, die wir besprechen wollen, folgende:

1. Der Betrag der mittleren jährlichen Akkumulation im Firngebiete;
2. der Betrag der mittleren jährlichen Abschmelzung im Zungengebiete;
3. die mittlere jährliche Bewegungsgeschwindigkeit in beiden Gebieten.

Ich fange gleich mit den Akkumulationsbestimmungen an. Für diese scheinen bis jetzt eigentliche Methoden zu fehlen, obgleich jedoch einzelne Beobachtungen dieser Art schon vorliegen. Hierzu sind zu rechnen diejenigen älteren Angaben über die Dicke des jährlichen Schneelagers, die von der Voraussetzung ausgehen, daß jeden Sommer nur eine Schmelzrinde entstehe. Alle derartigen Angaben dürften aber sehr unsicher sein, da die Sommersaison im allgemeinen keine ununterbrochene Schmelzperiode bildet und der übrige Teil des Jahres häufig keine ganz ununterbrochene Kälteperiode darstellt. Eine wirkliche Methode wäre möglicherweise auf die Benutzung solcher aus Holzstangen zusammengesetzten Signale zu gründen, wie der sogenannten Stangendreikanten, die Blümcke und Heß¹⁾ bei den Messungen der Bewegungsgeschwindigkeit im Akkumulationsgebiete des Hintereisferners benutzten. Die Stangendreikanten scheinen sich aber nicht gut dazu zu eignen, weil sie von dem sich anhäufenden und zusammensinkenden Schnee zerdrückt werden. Besser dürften dann einzelne Stangen sein, wie sie von der Rhonegletschervermessung

¹⁾ Untersuchungen am Hintereisferner. Wissenschaftliche Ergänzungshefte zur Zeitschrift d. Deutsch. u. Österr. Alpenvereines. Band I, Heft 2, Seite 50.

angewandt werden. Die Ergebnisse dieser langjährigen Vermessung sind bis jetzt nur durch ziemlich knappe Mitteilungen bekannt¹⁾, aber nach denselben zu urteilen, scheinen sowohl für die Ablations- als auch für die Akkumulationsbestimmungen in das Eis gebohrte Stangen benutzt zu werden. Sollen sie für Akkumulationen von etwa 4 m benutzt werden und für ein ganzes Jahr ausreichen, dürften sie ziemlich lang und schwer werden müssen, denn sie müssen wohl wenigstens 2 m tief ins Eis gebohrt werden und der hinausragende Teil braucht zumindest 1 oder 2 m länger als die vermutete Akkumulation zu sein. Für die Akkumulationsbestimmungen der lappländischen Gletscher sind solche eingebohrte Stangen indessen unter keinen Umständen zu verwenden, denn dort bleibt der Schnee noch im Sommer und Herbst sehr weich, und von einer Bildung des Firneises findet man auch in mäßigen Tiefen unter der Oberfläche keine Spuren. Ein Bohren würde also durchaus unnötig sein, denn man könnte jedenfalls die Stangen schon mit den Händen tief genug in den Schnee treiben, aber wegen der losen Beschaffenheit des Schnees würden sie sicherlich umfallen.

Die ersten von mir an lappländischen Gletschern benutzten Akkumulationsmesser waren aus Bambus angefertigt, etwa wie Fig. 1 zeigt. Zwei Bambusse wurden kreuzweise auf die Oberfläche des Schnees gelegt, am Kreuzungspunkte wurde das vertikale Rohr, mit welchem die Messungen angestellt werden sollten, befestigt und in der vertikalen Stellung durch Stage von dünnem Drahtseil festgehalten, welche an den mit Steinen beschwerten Enden des Bambuskreuzes festgebunden waren. Der vertikale Bambus war, wenn eben aufgestellt, 5—8·5 m lang. Die längsten Bambusrohre benutzte ich in den höchsten Teilen des Akkumulationsgebietes, die kürzeren in den niedrigeren Teilen, wo die Akkumulation geringer ist. In Abständen von etwa 1·6—2 m waren Marken angebracht, um die Messungen zu erleichtern.

Die Benutzung der Bambusse für diesen Zweck ist aber mit mehreren Übelständen verbunden. Wenn trocken, sind die Bambusse sehr fest, aber in feuchtem Zustande nicht mehr so fest. Bei wiederholtem Trocknen und Durchnässen bersten sie bald und werden auch dadurch weniger fest. Mehrere Ständer aus Bambus habe ich nicht wiedergefunden, wahrscheinlich weil sie abgebrochen waren. Die Drahtseilstage sind dadurch unzweckmäßig, daß sie dem Zusammensinken des Schnees im Wege stehen und dabei zerreißen können.

²⁾ Vergl. Hagenbach-Bischoff, Vermessungen am Rhonegletscher. Verhandlungen des VII. internationalen Geographenkongresses, Berlin 1899, Band II, Seite 269, sowie die Berichte der eidgenössischen Gletscherkommission in jedem Jahrgange der Verhandlungen der schweizerischen naturforschenden Gesellschaft von 1895 an.

Ein dritter Übelstand besteht darin, daß das vertikale Rohr nicht leicht verlängert werden kann. Ist es zu kurz, um sicher für ein ferneres Jahr zu reichen, so muß man einen ganz neuen Ständer aufstellen.

Diese Übelstände habe ich im letzten Jahre durch die Wahl eines anderen Materials und durch zweckmäßige Anordnungen zu beseitigen versucht. Ich bin dabei zu folgenden Vorrichtungen gelangt.

Statt des Bambus benutzte ich Stahlröhren von derselben Sorte, wie sie für Fahrräder benutzt wird. Die Stahlröhren sind kaum schwerer und etwa ebenso fest wie die Bambusse, bersten nicht bei wiederholtem

Fig. 1.



Akkumulationsmesser aus Bambus.

Naßwerden und Trocknen und sind leichter als sie durch Ansetzen eines neuen Stückes zu verlängern.

Zwei 3 m lange Röhren (vergl. Fig. 2) bilden den Fuß, durch eine Vorrichtung aus Schmiedeeisen wird die vertikale Röhre daran befestigt. Diese besteht zunächst aus einem 4 m langen Stück. An das Ende können sowohl andere gleich weite Röhrenstücke als auch ziemlich leichte konische Spitzen von 2—3 m Länge angefügt werden. Die Spitzen sind nicht — wie im Bilde — gleichmäßig konisch, denn derartige würden schwierig herzustellen sein, sondern verjüngen sich von dem dicken bis zum schmalen Ende stufenförmig in zwölf gleich

langen Absätzen. Der Zweck der Spitzen ist der, den Ständern eine genügende Länge zu geben, ohne zugleich das Gewicht des oberen Teiles erheblich zu vergrößern.

Das erste Jahr kommt die Spitze unmittelbar auf die 4 m lange

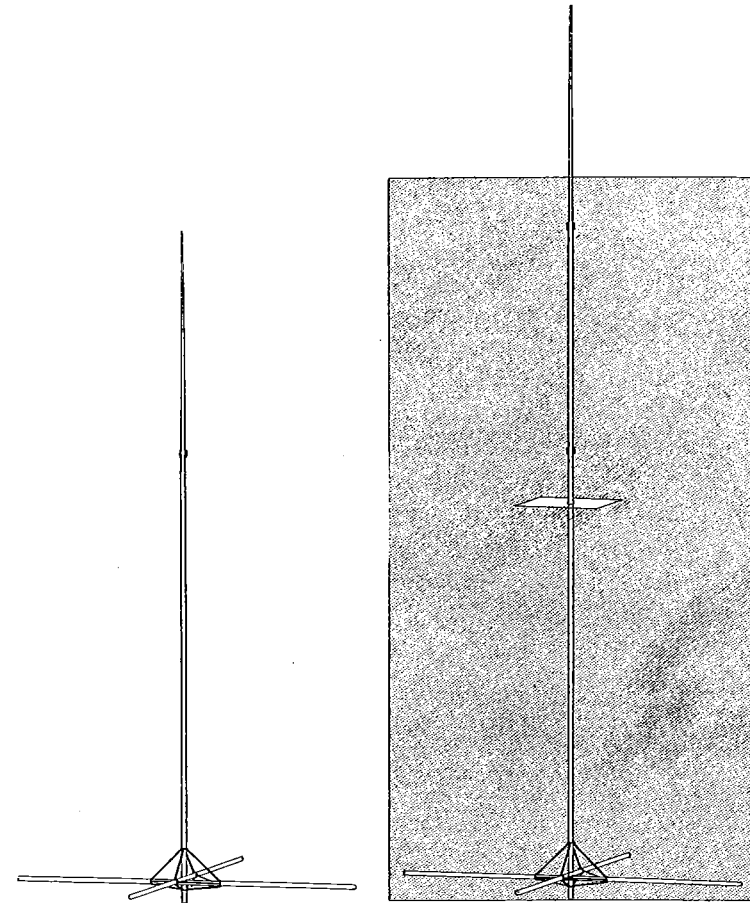


Fig. 2.

Fig. 3.

Fig. 2. Neu aufgestellter Akkumulationsmesser aus Stahlröhren.

Fig. 3. Derselbe im dritten Sommer.

(Zum Teil perspektivisch, zum Teil im Durchschnitt. $\frac{1}{107}$ der natürlichen Größe)

Röhre (Fig. 2), da die Schneeakkumulation höchstens 6 m betragen dürfte. Im folgenden Sommer finde ich nun einen größeren oder geringeren Teil der Spitze oder sogar der Röhre über dem Schnee und kann daraus die Dicke des Schneelagers berechnen. Sobald das

spezifische Gewicht nach untenstehender Methode bestimmt worden ist, wird der Ständer für das kommende Jahr hergerichtet, wie folgt. Die Spitze wird abgenommen und eine Scheibe von Eisenblech, die in der Mitte ein Loch hat, über das Rohr geschoben, um die augenblickliche Schneeoberfläche zu markieren. Danach verlängere ich die Röhre um ein ebenso dickes — je nach Bedarf — 2, 3, 4 etc. *m* langes Stück, auf dessen oberes Ende die Spitze wieder aufgesteckt worden ist.

Im dritten Sommer ist natürlich die Blechscheibe im Schnee begraben (Fig. 3), aber die durch Graben oder Sondieren zu ermittelnde Tiefe, in welcher sie liegt, entspricht offenbar der Dicke der Schneeschicht des verflossenen Jahres. Diese Beobachtungen scheinen mir beliebig lange fortgesetzt werden zu können, wenn man nur jeden Sommer die Röhre genügend verlängert und eine neue Scheibe zum Markieren der jedesmaligen Schneeoberfläche des Sommers auflegt. Die einzelnen Jahresschichten des Schnees werden in dieser Weise zwischen zwei Eisenscheiben eingeschlossen und mit dem Ständer in die sich häufenden Schneemassen begraben werden. Doch fehlen noch genügende Erfahrungen darüber, wie lange die Kontinuität der Beobachtungen ohne größere Schwierigkeiten beibehalten werden kann.

Die von mir benutzten Röhren haben einen Durchmesser von 32 *mm* und eine Wandstärke von 1.2 *mm*. Die Wandstärke der Spitzen am dicken Ende ist 0.9 *mm*. Bei einer Länge von nicht mehr als 6 *m* dürften diese Ständer auch den heftigsten Stürmen widerstehen können. Wenn mit Raufrost stark beladen, könnten sie aber von einem Sturm abgebrochen werden. An Stellen mit starker Raufrostbildung sind daher größere Ständer zu nehmen.

Wenn ich mit diesen Bestimmungen die Ermittlung der an der betreffenden Stelle sich mit dem Gletscher vereinigenden Quantität des Niederschlages bezwecke, muß ich auch Bestimmungen über die Dichte des Schnees ausführen. Nachdem die Dicke der Schicht ermittelt ist, lasse ich deswegen eine hinlänglich tiefe Grube mit einem Spaten graben, was übrigens eine ziemlich mühsame Arbeit ist. Eine 2 *m* tiefe Grube erfordert etwa eine Stunde Arbeit eines Mannes. Aus den Wänden der Grube nehme ich mit einem Zylinder von starkem Eisenblech, der etwa 6.5 Liter hält, Proben des Schnees, die mit einer Federwaage gewogen werden. Derselbe Zylinder wird auch leer und mit Wasser gefüllt gewogen und danach wird das spezifische Gewicht berechnet.

Ich lasse hier einige im Akkumulationsgebiete des Mikagletschers ausgeführte Bestimmungen der Dicke und Dichte der im Sommer liegenden Schneeschicht folgen, da ähnliche Angaben in der Literatur sehr selten sind.

Meereshöhe in Meter	Zeitperiode	Dicke der Schnee- schicht in Meter	Tiefe der Probe in Meter	Spezifisches Gewicht der Probe	Entsprechende Wasserhöhe der Schneeschicht in Meter
1500	4. Aug. 1900 bis 25. Aug. 1901	1.16	—	etwa wie in 1490 <i>m</i> für die- selbe Periode	0.63
1500	25. Aug. 1901 bis 2. Sept. 1902	2.10	0.0 1.0 2.0	0.524 0.566 0.588	1.18
1490	4. Aug. 1900 bis 25. Aug. 1901	1.03	0.0 0.5 1.0	0.382 0.595 0.591	0.56
1490	25. Aug. 1901 bis 2. Sept. 1902	1.90	—	etwa wie in 1500 <i>m</i> für die- selbe Periode	1.06
1410	4. Aug. 1900 bis 25. Aug. 1901	1.24	0.0 0.5 1.0	0.428 0.554 0.565	0.67
1410	2. Sept. 1902 bis 29. Juli 1903	4.51	0.5 1.0 2.0	0.593 0.578 0.633	2.8
1340	2. Sept. 1902 bis 29. Juli 1903	2.35	0.5 1.5	0.578 0.597	1.38

Noch am Ende des Sommers übersteigt die Dichte des Schnees auch in der Tiefe von 2 *m* kaum 0.6. Auf den lappländischen Gletschern bildet sich also im Akkumulationsgebiete in der Nähe der Oberfläche überhaupt kein Firneis.

Ich gehe jetzt zu den Ablationsbestimmungen über. Diese werden wohl nunmehr fast ausschließlich durch Messung der Abschmelzung von Bohrlöchern ausgeführt, sei es nun, daß sie durch Holzstäbe gefüllt oder leer gelassen sind. Diejenige Methode, die sich auf das allmähliche Auftragen von Eispartien, die durch schlechte Wärmeleiter geschützt sind, gründet, wird wohl nunmehr kaum angewandt, obgleich vielleicht auch mit ihrer Hilfe gute Resultate zu erhalten wären.

Das Bohren im Gletschereise hat durch die gelungenen Versuche von Blümcke und Hess in den letzten Jahren bekanntlich eine für die Gletscherforschung bedeutungsvolle Entwicklung erfahren. Diese tiefen Bohrlöcher, die außerhalb meines Erfahrungskreises liegen, sind aber eigentlich nicht für die Ermittlung der Ablation bestimmt, sondern vielmehr für Tiefmessungen. Für die Ablationsbestimmungen auf den Gletschern, die jeden Sommer wenigstens einmal besucht werden können, genügen

in Lappland Löcher von etwa 4 m Tiefe. Das Bohren so kurzer Löcher ist eine ziemlich einfache Sache, da aber Angaben über die praktische Ausführung der Gletscheruntersuchungen außerordentlich sparsam sind und der Anfänger in den meisten Fällen wohl nur nach mißlungenen Versuchen ein praktisches Verfahren findet, gestatte ich mir, die von mir benutzte Methode zum Bohren im Eise kurz zu erwähnen. Verschiedene Konstruktionen von Bohrern sind vorgeschlagen, wie Löffelbohrer, Spiralbohrer und Meißelbohrer; ich habe die letzteren vorgezogen, die ja auch beim Gesteinsbohren mit der Hand die gebräuchlichsten sind. Das Bohrmehl entfernt sich bei der Anwendung eines Meißelbohrers sehr gut, wenn das Loch nur mit Wasser gefüllt ist, denn bei jedem Hammerschlage spritzt es mit dem Wasser heraus.

Um Gewicht beim Transport zu sparen, lasse ich diese für Bohrungen im Eise bestimmten Meißelbohrer zum größten Teile aus Holz anfertigen. Jeder Bohrer besteht aus einem Stabe von gutem Holz (z. B. der Esche), an dessen einem Ende (Fig. 5) die aus Stahl angefertigte Schneide befestigt ist, während an anderen ein stählerner Schutz gegen die Schläge des Hammers angebracht ist. Wenn der Holzstab aus ausgezeichnetem Material ist, bietet er genügende Festigkeit und Dauerhaftigkeit. Ich habe fünf Jahre lang dieselben Bohrer benutzt, ohne daß die Stäbe beschädigt worden sind, nur die Deckel, welche die Hammerschläge aufnehmen, und einige Schrauben habe ich durch neue ersetzen müssen. Für ein Loch von 4 m sind vier Bohrer nötig, von denen der längste 4.15 m lang, die übrigen um je 1 m kürzer sind. Der längste Bohrer muß für den Transport in zwei Teile zerlegt werden können, die nach Art der Fig. 4 mittels eines Eisenrohres wieder zusammengesetzt werden. Ein tüchtiger und des Gesteinsbohrens kundiger Mann kann nach dieser Methode ein Loch von 4 m in einer Stunde bohren. Für tiefere Löcher als 5—6 m dürfte die Methode kaum brauchbar sein, denn dann würde es gewiß zu mühsam sein, diese Bohrer mit der Hand zu drehen.

Der Boden des Loches ist der Normalpunkt für die Ablations-

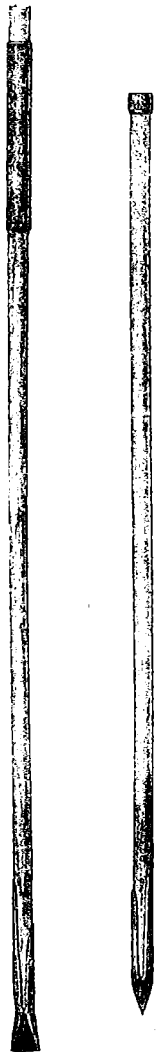
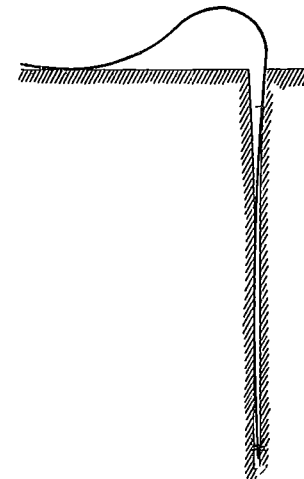


Fig. 4 und 5.
Meißelbohrer aus
eisenbeschlagenen
Holzstäben.
($\frac{1}{10}$ der natür-
lichen Größe.)

bestimmungen. Dieser Punkt kann sich verrücken, zum Beispiel wenn sich der untere Teil des Loches unter dem Drucke des Eises verschließt, dann hebt sich der Boden, oder wenn das Loch kurz ist und voll Wasser steht, dann kann durch Konvektionsströmungen das warme Wasser der Oberfläche den Boden des Loches schmelzen und merkbar senken. Zur Vermeidung des ersteren Übelstandes werden von anderen Gletscherforschern, wie Held am Rhonegletscher, Blümcke und Hess am Hintereisferner, Holzstäbe in die Löcher gesteckt. Wenn man aber den Boden des Loches belastet, tritt auch eine Schmelzung daselbst ein, denn der Druck erniedrigt den Schmelzpunkt. Besonders tritt diese Fehlerquelle hervor, wenn die unteren Enden der Stäbe aus wärmeleitendem Material, wie Eisen, bestehen. An die Kontakt-

Fig. 6.



Bohrloch mit Rotang, zum Teil herausgeschmolzen.

stelle, wo die Temperaturerniedrigung stattfindet, wird dann immerfort Wärme geleitet und dadurch die Schmelzung beschleunigt. Um allen Druck am Boden des Loches zu vermeiden, stecke ich in das Loch statt eines massiven Stabes einen hinlänglich langen, aber nur 3—4 mm dicken Rotang (Fig. 6), an dessen unterem Ende Stückchen von steifem Stahldraht befestigt sind, die als Widerhaken dienen und den Rotang, der mit Hilfe des längsten Bohrers in das Loch eingeführt wird, an einem bestimmten Punkte festhalten. Der dünne Rotang drückt nicht merklich, weil der herausgeschmolzene Teil sich wie eine Schnur auf die Oberfläche des Eises legt. Wenn sich der Boden des Loches durch Schmelzen senken sollte, so hat das bei dieser Anordnung wenig zu bedeuten, da die Drähte den Rotang festhalten, wenigstens bis das

Loch so stark abgeschmolzen ist, daß es nicht mehr für die Ablationsbestimmungen verwendbar ist.

Die Bambusrohre, Stahlröhren oder Holzstäbe im Akkumulationsgebiete können natürlich auch zu den Bestimmungen der Bewegungsgeschwindigkeit daselbst gebraucht werden. Dazu kann man ebenfalls die Bohrlöcher des Abschmelzungsgebietes benutzen, wenn sie nur genau vertikal gebohrt sind. Da die Bohrlöcher abschmelzen und an ihrer Seite jährlich neue gemacht werden, so müssen dann auch die Fixpunkte der Geschwindigkeitsmessungen jährlich versetzt werden, was un bequem ist. Gewöhnlich hat man auch von den Geschwindigkeitsbestimmungen verlangt, daß sie an möglichst vielen Punkten angestellt werden sollen und deshalb fast immer nur möglichst einfache Marken, deren Anordnung weder kostspielig noch zeitraubend ist, als erkennbare Punkte auf dem Eise verwendet.

Die häufigsten dieser bei Geschwindigkeitsbestimmungen im Abschmelzungsgebiete angewandten erkennbaren Marken sind wohl durch Farbe bezeichnete Steine. Solche benutzte ich auch im Anfange meiner Untersuchungen. Die Messungen selbst führte ich in der Weise aus, daß ich jedesmal mit einem Distanzmesser und einer Latte eine Karte der von den Steinen gebildeten Linie und der in den Gebirgswänden angeordneten Fixpunkte im Maßstabe 1 : 5000 ausführte. Ich fand aber bald, daß ich mit dieser Methode keine genauen Resultate bekommen könnte. Als Beispiele führe ich hier die Messungen an einer auf dem Mikagletscher ausgelegten Steinlinie an.

I Stein- Nummer	II Entfernung vom linken Gletscher- ufer	III Zurückge- legter Weg vom 8. Aug. 1895 bis zum 20. Aug. 1897	IV Zurückge- legter Weg pro Tag im Mittel	V Zurückge- legter Weg vom 28. Juli bis zum 20. Aug. 1897	VI Zurückge- legter Weg pro Tag im Mittel
	m	m	cm	m	cm
1	0	3·5	0·5	—	—
2	61	14·2	1·9	1·7	7·4
3	101	23·5	3·2	2·0	8·7
4	152	31·2	4·2	2·2	9·6
5	200	38·0	5·1	1·7	7·4
6	258	44·5	6·0	2·5	10·9
7	298	49·2	6·6	3·2	14·0
8	348	53·5	7·2	3·7	16·1
9	392	56·5	7·6	4·2	18·3
10	427	56·5	7·6	3·5	15·2
11	488	55·5	7·5	2·0	8·7
12	526	56·0	7·5	2·0	8·7
13	580	56·0	7·5	2·7	11·7

I Stein- Nummer	II Entfernung vom linken Gletscher- ufer	III Zurückge- legter Weg vom 8. Aug. 1895 bis zum 20. Aug. 1897	IV Zurückge- legter Weg pro Tag im Mittel	V Zurückge- legter Weg vom 28. Juli bis zum 20. Aug. 1897	VI Zurückge- legter Weg pro Tag im Mittel
	m	m	cm	m	cm
14	631	52·5	7·1	2·9	12·6
15	682	52·5	7·1	3·0	13·0
16	728	50·0	6·7	3·0	13·0
17	779	47·0	6·3	3·5	15·2
18	834	43·0	5·8	3·0	13·0
19	833	33·5	4·5	—	—
20 (am rechten Ufer) 973		3·0	0·4	—	—

Die vierte Kolonne enthält die Durchschnittsgeschwindigkeiten zweier Jahre, die sechste aber nur die von 23 Sommertagen. Wenn wir diese Kolonnen vergleichen, finden wir, daß die Jahresmittel von den Ufern aus nach der Mitte hin anwachsen, daß die Werte für den Sommer aber nicht nur größer als die Jahresmittel, sondern auch viel unregelmäßiger sind. Infolgedessen entstand bei mir der Gedanke, daß die Steine im Sommer an der Eisoberfläche mehr oder weniger abwärts glitten. Ich legte deshalb an derselben Stelle eine neue Linie von Steinen aus, in der jeder Stein auf einem Dreifuß von Stahldraht (Fig. 8) befestigt war, welcher das Gleiten desselben verhindern sollte. Außerdem verbesserte ich die Messungsmethode, indem ich außer der graphischen Aufnahme auch genaue Winkelmessungen mit einem Universalinstrument vom Endpunkte der Linie ausführte. Die Resultate dieser Bestimmungen waren folgende:

I Stein- Nummer	II Entfernung vom linken Gletscher- ufer	III Zurückge- legter Weg zwischen 25. Juli 1899 und 30. Juli 1901	IV Zurückge- legter Weg pro Tag im Mittel	V Zurückge- legter Weg zwischen 30. Juli und 25. Aug. 1901	VI Zurückge- legter Weg pro Tag im Mittel
	m	m	cm	m	cm
19	50·5	11·77	1·602	0·39	1·48
18	106·0	22·13	3·011	0·78	2·80
17	138·0	28·15	3·830	0·895	3·44
16	186·0	36·66	4·988	1·29	4·97
15	232·0	43·28	5·839	1·71	6·59
14	279·5	48·14	6·550	1·92	7·37
13	330·0	52·55	7·149	1·82	6·99
12	382·0	54·89	7·468	2·035	7·83
11	417·0	56·17	7·643	2·11	8·10
10	473·0	56·73	7·719	1·95	7·49
9	534·0	56·73	7·718	2·29	8·80

I	II	III	IV	V	VI
Stein- Nummer	Entfernung vom linken Gletscher- ufer	Zurückge- legter Weg zwischen 25. Juli 1899 und 30. Juli 1901	Zurückge- legter Weg pro Tag im Mittel	Zurückge- legter Weg zwischen 30. Juli und 25. Aug. 1901	Zurückge- legter Weg pro Tag im Mittel
	m	m	cm	m	cm
8	575.5	55.73	7.582	2.16	8.29
7	623.0	53.62	7.295	2.03	7.81
6	661.5	51.56	7.015	1.90	7.30
5	715.0	48.61	6.613	1.73	6.64
4	777.5	44.75	6.089	1.595	6.13
3	845.5	38.71	5.266	1.39	5.36

Die neue Linie wurde 1899 ausgelegt, aber wegen ungünstiger Schneeverhältnisse mußte ich zwei Jahre warten, bis ich Gelegenheit bekam, in demselben Sommer zwei Messungen ausführen zu können; schließlich gelang es indessen Ich bekam nun als Jahresmittel viel regelmäßiger Werte als vorher, was besonders bei der graphischen Darstellung der Resultate hervortritt. Für den Sommer ist der Unterschied noch größer. Auch ein anderer Umstand ist auffallend. Wenn ich Steine ohne Sperrvorrichtungen benutzte, bekam ich für den Sommer bedeutend größere Bewegungsgeschwindigkeiten als für das Jahr im Mittel. Die Steine mit Sperrvorrichtungen gaben aber ziemlich gleiche Werte für den Sommer wie für das Jahr.

Offenbar hing dies davon ab, daß die Steine ohne Sperrvorrichtungen im Sommer auf dem Eise etwas abgerutscht waren. Die einzelnen Steine sind dabei verschieden weit geglitten, deshalb bekam ich sowohl größere als auch unregelmäßigere Werte für den Sommer als für das ganze Jahr. In den Jahresmitteln treten diese Unregelmäßigkeiten nicht hervor, weil die Steine im Winter festgefroren liegen. Die Winterszeit ist im Gebiete der lappländischen Gletscher lang und kann bis auf 9—10 Monate veranschlagt werden. Die Fehler, welche das Gleiten auf dem Eise verursacht, üben deshalb auf die Werte für das ganze Jahr bei weitem keinen so großen Einfluß wie auf die Bestimmungen des Sommers. Mit lose liegenden Steinen kann man also zwar nicht genaue, aber doch immerhin recht gute Werte der mittleren Bewegung erzielen. Gilt es aber die Bestimmung der Geschwindigkeiten des Sommers, so geben sie beinahe wertlose Resultate. Die Ungenauigkeit, die von der eigenen Bewegung der Steine herrührt, ist natürlich bei langsam fließenden Gletschern, wie es die lappländischen sind, verhältnismäßig beträchtlicher als bei den großen Alpengletschern. Bei sehr geneigter Oberfläche dürfte auch das selbständige Gleiten der Steine beträchtlicher sein als bei flacherer.

An der betreffenden Steinlinie auf dem Mikagletscher war die mittlere Neigung nur etwa 6° , im einzelnen war aber die Oberfläche sehr unregelmäßig und zeigte alle möglichen Neigungswinkel.

Wie bekannt, haben viele ältere Bestimmungen eine bedeutend größere Geschwindigkeit für die Sommermonate gegeben. Die Herren Blümcke und Hess¹⁾, die aus theoretischen Gründen zu der Ansicht gelangt sind, daß jeder Punkt eines stationären Gletschers seine Geschwindigkeit nicht mit den Jahreszeiten ändert, suchen die Erklärung der älteren Angaben in der Ungenauigkeit der Messungen selbst. Ich glaube dagegen, daß das Gleiten der Marken im Sommer die wesentlichste Ursache ist.

Mehrere Gletscherforscher haben jedoch beiläufig bemerkt, daß die Steine auf dem Gletscher nicht still liegen, sondern eine eigene Horizontalbewegung erkennen ließen. Blümcke und Hess²⁾ erwähnen es auch und erklären diese Tatsache durch die Annahme, daß



Fig. 7.

Fig. 8.

Fig. 9.

Verhalten von Steinen und Blechplatten auf einer geneigten und abschmelzenden Eisoberfläche.

die Steine bisweilen Gletschertische bildeten und beim Herabrollen von den Eissäulen kleine Horizontalverschiebungen erlitten. Diese Erklärung trifft aber bei den lappländischen Gletschern nicht zu. So kleine Steine bilden hier keine Gletschertische, sondern schmelzen um sich herum ein Grübchen aus. Am Boden dieses Grübchens gleiten sie aber abwärts (Fig. 7) und liegen also der niedrigeren Wand näher, wo sie den Schmelzungsprozeß beschleunigen.

Reid³⁾ erwähnt auch das Tischen der Steine und schlägt die Benützung von Blechplatten statt der Steine vor, vielleicht weil die Blechplatten keine Gletschertische bilden würden. Gleichzeitig mit den oben angeführten Versuchen der Sperrvorrichtungen unter den Steinen machte ich auch einige Versuche mit Blechplatten, die in der Nähe

¹⁾ Untersuchungen am Hintereisferner. Wissensch. Ergänzungsh. d. Deutsch. und Österr. Alpenvereines, Bd. I, 2, Seite 45.

²⁾ l. c. Seite 49.

³⁾ Journal of Geology, Bd. III (1895), Seite 287.

der Steine ausgelegt wurden. Die Versuchsperiode umfaßt die Zeit vom 5. August 1900 bis zum 30. Juli 1901. Beobachtungen an gewöhnlichen Steinen wurden ebenfalls ausgeführt. Die Länge des Weges, um welche diese Steine und die Blechplatten während der angegebenen Zeit den Steinen mit Sperrvorrichtungen vorangeeilt waren, ist folgende:

Stein der Reihe auf den Seiten 759 und 760	Stein ohne Sperrvorrichtung	Blechplatte
Nummer	m	m
11	0·1	0·0
9	0·3	0·7
8	0·3	1·3
7	0·4	2·0
6	0·3	3·0
5	1·0	8·7
3	0·3	1·0

Die gewöhnlichen Steine waren also etwa 0·1—1·0 m, die Blechplatten 0·0—8·7 m weiter abwärts getrieben als die Steine mit Sperrvorrichtungen. Die Blechplatten geben daher ein noch weniger genaues Resultat als die gewöhnlichen Steine. Dies dürfte davon abhängen, daß die Platten, weil flach und eben, noch leichter als die Steine in den Schmelzgrübchen weiter gleiten. Tatsächlich schneiden sie sich sogar schief in der Richtung der Neigung ins Eis ein, etwa wie die Fig. 9 zeigt.

Es ist offenbar zweckmäßig, daß die Unterseite möglichst uneben ist. Darauf beruht ebenfalls der Vorteil, welchen die Steine mit den Drahtfüßen darbieten; ein vollkommenes Resultat geben jedoch auch diese nicht, sondern sie gleiten ebenfalls etwas an der Oberfläche abwärts. Dies beweisen folgende Vergleichen mit Bohrlöchern, die am 1. August 1901 an der Steinlinie neben einigen von den Steinen gebohrt wurden. Nach Verlauf von 24 Tagen hatten sich die Steine um folgende Wegstrecken von der Linie der Bohrlöcher entfernt:

Stein mit Sperrvorrichtung	Abgleiten in 24 Tagen
Nummer	m
3	0·0
7	0·0
11	0·15
17	0·2

Zwei von den Steinen waren also an der Linie liegen geblieben, die beiden übrigen 15—20 cm abgeglitten. Von wirklich genauen Bestimmungen der sommerlichen Geschwindigkeiten kann also auch

bei dieser Methode nicht die Rede sein. Diese kleinen Fehler sind in der Tat groß genug, um die Ungleichmäßigkeiten in der fünften und sechsten Kolonne der Tabelle auf den Seiten 759 (unten) und 760 zu erklären. Die für den Sommer gefundene geringe Vergrößerung der Bewegungsgeschwindigkeit liegt ebenfalls vollständig innerhalb der Fehlergrenzen. Damit darf es auch als nicht sicher bewiesen angesehen werden, daß die Bewegungsgeschwindigkeit im Sommer wirklich größer als im Winter sei. Ein geringer Unterschied in dieser Richtung dürfte wohl doch vorliegen.

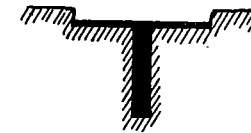


Fig. 10.

Alle obenerwähnten, auf das Eis gelegten Marken haben also für den Sommer ein mehr oder weniger falsches Resultat gegeben. Dies ist auch sehr natürlich, denn auf der schiefen Unterlage muß immer eine Komponente entstehen, die die Marke in der Richtung der Neigung abwärts führt. Es ist sogar ein kleines Problem, eine Form oder eine Konstruktion zu finden, welche die eigene Bewegung relativ zum Eise beseitigen könnte. Ich habe die Lösung in folgender Weise gesucht:

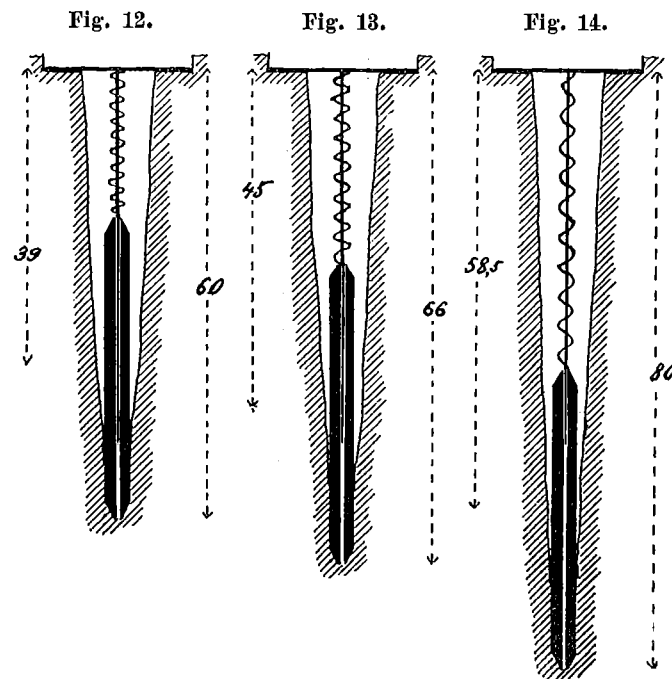


Fig. 11.

Wenn wir eine Platte aus Eisenblech auf eine horizontale, abschmelzende Eisoberfläche legen, so schmilzt sie wohl ziemlich genau vertikal ein. Nun könnte man glauben, daß die Platte, wenn man ein Gewicht darunter befestigte, sich vielleicht auch auf einer geneigten Eisoberfläche in der horizontalen Lage erhalten könnte. Wenn man also einen Apparat von der Form der Fig. 10 hätte, könnte man vielleicht glauben, daß die Scheibe sich hier horizontal halten und der Apparat sich genau vertikal einschmelzen würde. Das wäre aber nicht der Fall, denn der Apparat kann nicht sowohl mit der Scheibe (in horizontaler Lage) als auch mit dem Lot gleichzeitig auf dem Eise

ruhen. Wenn das in einem gegebenen Augenblicke der Fall wäre, so würde im nächsten die Schmelzung unter der Platte überhandnehmen und der Apparat auf der Spitze ruhen. Dann würde aber das Gleichgewicht sogleich labil werden und der Apparat eine schiefe Stellung einnehmen, etwa wie die Fig. 11 zeigt.

Um zu bewirken, daß die Scheibe immer gleichzeitig mit dem Lot auf das Eis drücken und dabei ein stabiles Gleichgewicht erhalten bleiben kann, habe ich mir folgende Konstruktion als eine mögliche Lösung der Frage gedacht. Es sei die Scheibe (vergl. Fig. 12—14)



mit dem Lote nicht fest verbunden, sondern das Lot senkrecht zur Scheibe beweglich und an einer Spiralfeder unter derselben aufgehängt. Durch die Spiralfeder wird die Last, mit welcher der Apparat auf das Eis drückt, auf die Unterlage der Scheibe und die Spitze verteilt. Es seien das Gewicht des Lotes 4 kg , das der Scheibe 0.1 kg , die Länge des Lotes 40 cm , der Abstand zwischen Scheibe und Lot bei ungespannter Feder 20 cm , dagegen 40 cm , wenn die ganze Last des Lotes auf der Feder ruht. Das Gewicht der Feder selbst und des im Lote beweglichen Stieles seien hier der Einfachheit wegen unberücksichtigt gelassen.

Wenn das Lot in ein ins Eis gebohrtes Loch gebracht wird, so daß die Scheibe auf der Eisoberfläche ruht, können folgende Grenzfälle des Gleichgewichts entstehen.

Sobald die Feder gar nicht gespannt ist, wie Fig. 12 darstellt, ruht der Apparat auf der Spitze des Lotes. Die ganze Länge ist dann 60 cm , der Unterstützungspunkt befindet sich also in dieser Tiefe unter der Scheibe. Der Schwerpunkt des Apparats liegt aber in 39 cm Tiefe, also 21 cm höher als der Unterstützungspunkt. Dieses Gleichgewicht ist somit labil und der Apparat würde sich bald schräg stellen.

Wenn die Feder 6 cm ausgezogen ist, wie die Fig. 13 darstellen soll, so lastet 1.2 kg des Lotes auf der Scheibe, die übrigen 2.8 kg auf der Spitze des Lotes. Der Aufhängepunkt des Systems befindet sich dann in 45 cm Tiefe und fällt mit dem Schwerpunkte zusammen. Die Stellung des Apparats ist nun nicht mehr labil, sondern indifferent; wegen der Friktion der Scheibe gegen das Eis dürfte sie doch als stabil angesehen werden können.

Wenn zuletzt, wie in der Fig. 14 dargestellt ist, die Feder um 20 cm verlängert worden ist, dann zieht die ganze Schwere des Lotes an der Scheibe. Der Aufhängepunkt des Systems befindet sich also an der Oberfläche, während der Schwerpunkt in 58.5 cm Tiefe liegt. Das Gleichgewicht des Apparats ist deshalb vollkommen stabil.

In allen Zwischenlagen zwischen denjenigen, welche die Fig. 13 und 14 darstellen, ist auch das Gleichgewicht stabil. Das Lot strebt dann immer, die Scheibe in horizontaler Stellung zu halten, und der ganze Apparat dürfte sich dabei vollkommen vertikal ins Eis einschmelzen. Daß er nicht tief einschmilzt, besorgt die Scheibe. Da der Schmelzprozeß unter dem Lote durch den Druck desselben befördert wird, dürfte die Feder einigermaßen gespannt und der ganze Apparat stabil gehalten werden.

Noch fehlt aber eine genügende praktische Prüfung des oben angeführten Vorschlags. Bei einer solchen dürfte sich wahrscheinlich herausstellen, daß die Fähigkeit des Lotes, sich einzuschmelzen, nicht groß genug ist, um eine gute Funktion des Apparats auch auf den schnell abschmelzenden unteren Teilen der Gletscherzunge zu erlauben. Ehe eine genügende praktische Prüfung vorliegt, kann die Methode natürlich nicht empfohlen werden. Für genaue Messungen der Bewegungsgeschwindigkeit zu verschiedenen Jahreszeiten sind also bis auf weiteres nur vertikale Bohrlöcher zu verwenden. Weil die Löcher ja bald vollständig abschmelzen und danach unmöglich wiederzufinden sind, wären für die Geschwindigkeitsbestimmungen des Abschmelzungs-

gebietes jedoch zuverlässige dauernde Marken sehr erwünscht, da eine Verrückung der zu den Messungen dienenden trigonometrischen Punkte sehr lästig ist.

Die hier mitgeteilten Methoden und Erfahrungen hinsichtlich der Untersuchungen der Gletscher haben ihre Anwendung hauptsächlich in den Gegenden, wo sie gemacht worden sind. In Gegenden mit ganz anderen klimatischen Verhältnissen, wie in den Alpen, dürften sie vielleicht zum Teil nicht zweckmäßig sein. Aber in manchen anderen Teilen der Erde könnten sie vielleicht wieder Anwendung finden.
