

Ueber die Bewegung
des
Firnes und der Gletscher.

Von
Dr. Fr. Pfaff.

Mit 8 Holzschnitten und einer Steindrucktafel.

Ueber die Bewegung

des

Firnes und der Gletscher.

Dr. Fr. Par.

Mit 3 Holzschnitten und einer Steinbohrung.

Verl. v. H. C. F. A. L. W. K. N. B. H. A. M.

Ueber die Bewegung

des

Firnes und der Gletscher.

Von

Dr. Fr. Pfaff.

Als die Gletscher die Aufmerksamkeit der Naturforscher auf sich zogen, wurde auch sofort die, wenn auch für kurze Beobachtung unmerkliche, doch aus ihren Wirkungen sehr auffallend hervortretende Fortbewegung derselben als das Wichtigste dieser wunderbaren Naturerscheinung erkannt. Wie so oft in naturwissenschaftlichen Fragen finden wir auch hier die Theorie der Beobachtung weit vorausseilen, und ehe noch irgend welche Messungen der Bewegung angestellt wurden, finden wir schon 2 Theorien über die Ursachen derselben aufgestellt, welche bis auf unsere Zeiten ihre Vertreter gefunden haben und später als Gleitungstheorie und Dilatationstheorie bezeichnet wurden. Letztere wurde zuerst von Scheuchzer in seinen Itinera alpina 1723 entwickelt, erstere von Altmann 1751 und von Gruner 1760 zuerst ausgesprochen. Saussure und Charpentier vertraten die Gleitungstheorie, Agassiz die Dilatationstheorie. Erst mit dem 4ten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts begann die zur Begründung einer Theorie unerlässliche genauere Beobachtung und wurde mit bewunderungswürdiger Energie und Ausdauer mehr als 20 Jahre hindurch von verschiedenen Beobachtern, unter denen vor Allen Agassiz die ausgedehntesten Beobachtungsreihen auf dem Aargletscher anstellte, fortgesetzt. Neben ihm haben Forbes,

die Gebrüder v. Schlagintweit, Tyndall ebenfalls sehr eingehende Untersuchungen über die Gletscherbewegung vorgenommen. Durch dieselben haben sich zunächst ganz bestimmte Gesetze für die Bewegung herausgestellt, nemlich

1) dass ähnlich der Bewegung des Wassers in einem Strome die Geschwindigkeit in der Mitte und an der Oberfläche grösser sei, als am Rande und in der Tiefe;

2) dass sie im Sommer viel rascher erfolge, als im Winter, und

3) sehr ungleich sei an verschiedenen Stellen.

Die Art und Weise der Beobachtung, wie sie zur Ermittlung dieser Gesetze allein angewendet wurde und von einem Einzelnen auch nur angewendet werden kann, nemlich mit Hülfe eines Theodolithen die Fortbewegung einer Reihe von Pfählen zu bestimmen, die ursprünglich in einer geraden Linie quer über den Gletscher aufgestellt wurden, liess die Frage unentschieden, ob die Bewegung ununterbrochen vor sich gehe, oder ruckweise, ebenso, ob nicht auch zuweilen in vertikaler Richtung eine Bewegung der Oberfläche stattfinde. Das erstere zu bestimmen, war mir 1873 durch Beobachtungen am Aletschgletscher möglich,¹⁾ aus denen hervorging, dass die Bewegung ununterbrochen, wenn auch ungleichmässig vor sich gehe. Ob auch eine Bewegung in vertikaler Richtung erfolge, darüber liegen für den Gletscherstamm noch keine Beobachtungsreihen vor.

Schon die Thatsache, dass sich der Gletscher auch im Winter vorwärts bewege, lässt die Dilatationstheorie, nach welcher es in den Haarspalten des Gletschers gefrierendes Schmelzwasser ist, welches den Eisstrom vorwärts schiebt, als höchst unwahrscheinlich erscheinen; auch die Beobachtung, dass die Bewegung ununterbrochen vor sich gehe, ist kaum mit derselben zu vereinigen. Aber auch die Gleitungstheorie, nach welcher sich der Gletscher allein durch die Schwere vorwärts bewegt, fand noch viele Bedenken, und es muss als ein sehr bedeutender Fortschritt auf dem Gebiete der Gletscherkunde bezeichnet werden, dass Forbes mit aller Energie die Plasticität oder, wie er es nannte, Viscosität des Eises als wesentlich bei der Fortbewegung mitwirkend hin-

1) Sitzungsberichte der phys. med. Societät zu Erlangen, 1874.

stellte. Und in der That drängt sich Jedem, der die Gletscher in der Natur beobachtet, dieser Gedanke so überwältigend auf, dass schon 1773 Bordier aus Genf bei Besprechung des Gletscherphänomens annahm, dass das Eis „nicht für eine vollkommen starre und unbewegliche Masse, sondern für einen Haufen erstarrten Stoffes, ähnlich wie erweichtes Wachs, das bis zu einem gewissen Grade biegsam und dehnbar sei, anzusehen sei“.

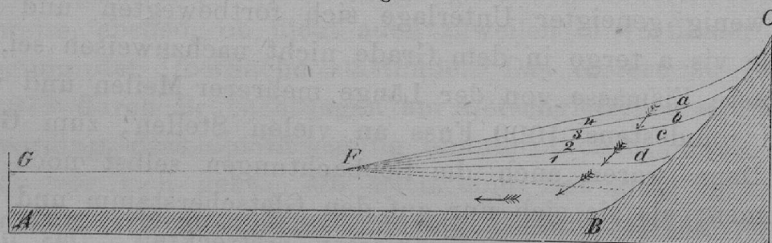
Die Gebrüder v. Schlagintweit, Tyndall und v. Helmholtz zeigten später auch, dass bei sehr starkem Drucke Eisstückchen zu einem klaren Eiscylinder verwandelt werden können in Folge der merkwürdigen von Faraday entdeckten s. g. Regelation des Eises, und ebenso in beliebige Formen gepresst werden können.

Dennoch fand auch jetzt noch diese Gleitungstheorie noch manche Gegner, und in der That war auch von 2 Seiten her ein Angriff auf sie sehr leicht. Einmal machte man darauf aufmerksam, dass Gletscher auf sehr wenig geneigter Unterlage sich fortbewegten und dass ein Druck, eine vis a tergo in dem Grade nicht nachzuweisen sei, um eine so ungeheuerere Eismasse von der Länge mehrerer Meilen und von einer Dicke von mindestens 1000 Fuss an vielen Stellen, zum Gleiten zu bringen. Dann waren auch die Beobachtungen selbst noch insofern unvollkommen, als sie sich nur auf den Gletscherstamm und nicht auf die ungleich ausgedehnten Firnmassen erstreckten. Das brachte es natürlich auch mit sich, dass eine scharf und bestimmt formulirte Erklärung der Gletscherbewegung nicht gegeben werden konnte. „Der Gletscher ist eine unvollkommene Flüssigkeit oder ein zäher Körper, welcher in Abhänge von gewisser Neigung hinuntergedrängt wird durch den natürlichen Druck seiner Theile“. Ueber diese allgemeine, von Forbes mit diesen Worten gegebene Erklärung kam man nicht hinaus.

Während nun die ersteren Bedenken gegen diese Theorie durch nähere und genauere Bestimmung der Plasticität des Eises gehoben werden konnten, bedurfte es, um die Mangelhaftigkeit der Theorie und unserer Kenntnisse nach der zweiten Seite zu ergänzen, einer Untersuchung des Verhaltens des Firns an einem grösseren Gletscher. Sie erschien um so nöthiger, als nicht nur die Art und Weise der Bewegung des Gletscherstammes, sondern auch die Structurverhältnisse desselben,

die ebenfalls zu so viel Discussionen Veranlassung gaben, wesentlich von dem Verhalten des Firnes beeinflusst werden müssen und a priori das Verhalten des Firns nicht erschlossen werden kann. Das Auftreten von Blöcken, die hoch oben auf den Firn fielen, am Ende des Gletschers zeigt uns nur, dass sich auch die Firnmassen nach abwärts bewegen, aber durchaus nicht, wie dieselben vorwärts rücken. Offenbar sind hier 2 Möglichkeiten denkbar, nemlich einmal, dass die oberflächlichen Schichten des Firnes einfach thalabwärts rutschen und sich dabei allmählich in Eis verwandeln, oder dass die oberflächlichen Schichten allmählich in die Tiefe sinken, unter der Oberfläche sich in Eis umwandeln und durch den Druck der jedes Jahr neu auffallenden oberflächlichen Schichten, sowie durch die Schwere auf dem geneigten Grunde hervorquellen und als Gletschereis unterhalb der Firnlinie erscheinen. Nach der letzteren Ansicht würden wir folgendes Bild erhalten:

Fig. 1.



Es stelle $A B C$ (Fig. 1) einen Längsschnitt durch einen Gletscher dar, in dem von $G—F$ der Gletscherstamm, von $F—C$ der Firn sich ausbreite. Es sei bei F die Firnlinie, d. h. die Linie, unterhalb welcher nur Eis, oberhalb welcher nur Firn angetroffen wird, so giebt uns F den Punkt an, an welchem die jährlich auffallenden Schneemassen sich am Ende des Sommers auskeilen. Auf dem Durchschnitte, den wir uns am Ende des Sommers gemacht denken, werden daher die einzelnen Schichten alle einen keilförmigen Durchschnitt erkennen lassen. Offenbar werden aber die tieferen von den höheren gedrückt, und um so stärker, je dicker die Ueberlagerung wird. Durch diesen Druck werden sie nicht nur verdichtet und in Eis umgewandelt, sondern gezwungen, nach der einzigen freien Stelle thalabwärts nach A zu auszuweichen. So wird die Firnschichte a nach und nach in die Lage $b c$ gelangen und die Firn-

massen werden den durch die Pfeile angedeuteten Weg nach abwärts und vorwärts einschlagen.

Die erörterten Verhältnisse liessen es im höchsten Grade wünschenswerth erscheinen, wenigstens eine Versuchsreihe im Firne selbst anzustellen, um zu sehen, wie sich die Bewegung desselben verhalte. Man musste im Voraus darauf gefasst sein, dass nur eine geringe Bewegung stattfinden würde, da die Firnmassen oberflächlich eine viel grössere Ausdehnung besitzen, als der Eisstrom des Gletschers, zu dem sie sich verhalten, wie ein Quellsee zu dem daraus hervorgehenden Flusse, und da die Bewegung des Gletschers selbst bekanntlich nur eine sehr geringe ist. Dennoch durfte man erwarten, dass diese Bewegung in einem Tage schon wohl messbar werden könnte, wenn man nur grössere Instrumente anwendete, die auch geringere Verrückungen sicher zu constatiren erlaubten.

Zu den Beobachtungen wählte ich wieder den Aletschgletscher, nicht nur wegen früherer Bekanntschaft mit demselben, sondern auch, weil er der grösste ist, in gewisser Beziehung auch als einer der regelmässigsten bezeichnet werden kann und auch die Ausrüstung zu einem mehrtägigen Aufenthalte im Firn von dem nahe seinem Ufer im Mittellauf stehenden Jungfrau-Hotél verhältnissmässig leicht erhalten werden kann. Die Munificenz Sr. Majestät des Königs Ludwig II. bot die Mittel, Alles so vorzubereiten, wie es nur für die Lösung der gestellten Aufgabe nöthig erschien. Geht man einmal daran, sich an die Untersuchung des Firnes zu machen, so bieten sich eine so grosse Menge von Fragen dar, dass ein Einzelner nicht daran denken kann, sie alle auch nur oberflächlich beantworten zu wollen, und auch künftige Forscher auf diesem noch fast ganz unangebauten Felde werden nicht umhin können, sich auf die Lösung einiger derselben zu beschränken. Ich hatte mir vorgenommen, durch die Beobachtung auf folgende Fragen Antwort zu erhalten:

I. Wie verhält sich die Bewegung des Firnes, und zwar in dreierlei Beziehung, nemlich findet

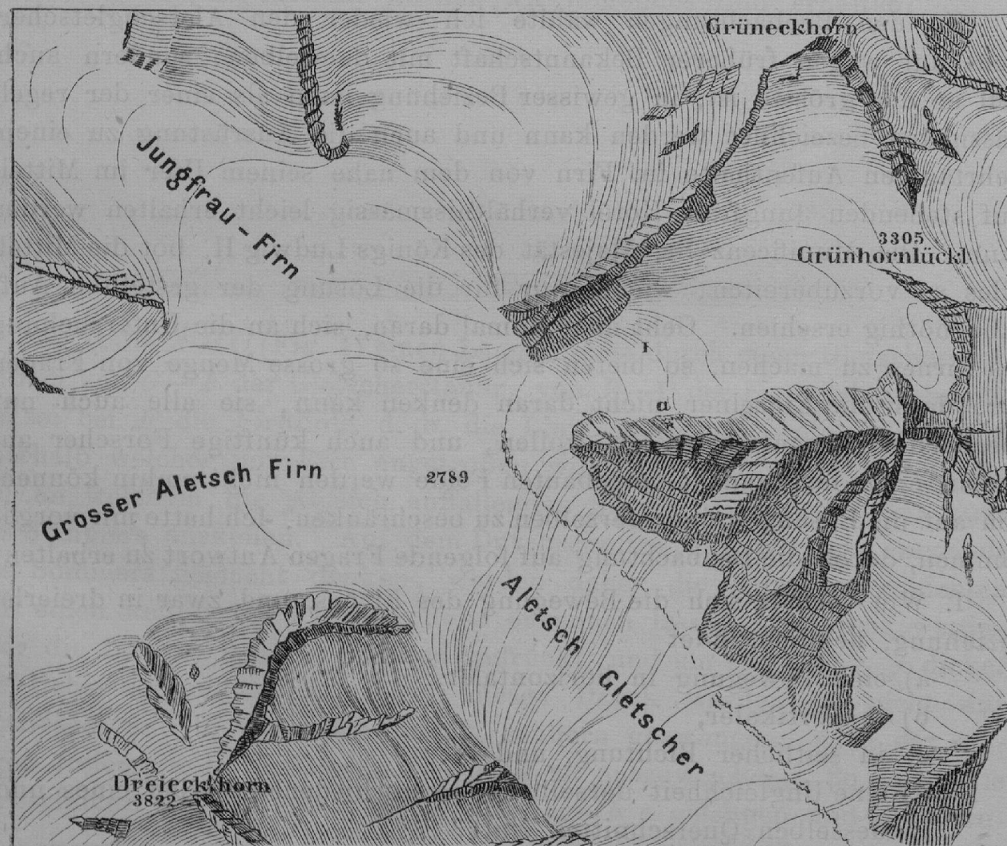
- a) eine Bewegung in horizontaler,
- b) in vertikaler,
- c) in seitlicher Richtung, und
- d) eine Ungleichheit derselben an verschiedenen Stellen eines und desselben Querschnittes statt?

II. Findet in der That ein Uebergang von Firn in festes Eis durch den Druck der überlagernden Schichten nach der Tiefe zu statt?

I.

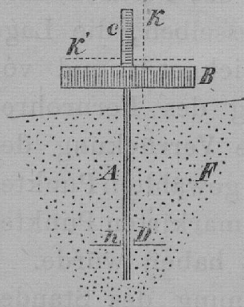
Die Beobachtungen zur Ermittlung dieser Fragen wurden nun in folgender Weise angestellt. Als Object der Beobachtung wurde der von der Grünhornlücke herabsteigende Firnstrom des Aletsch gewählt, da sich an dem südlichen Rande desselben das Ufer sehr passend zur Aufstellung der Instrumente und eines Zeltcs zeigte, zwei Erfordernisse, welche sich in der Firnregion weniger oft an einer Stelle vereinigt finden, als man vielleicht glaubt. Die Verhältnisse dieser Firnmasse

Fig. 2.



giebt die Figur 2, die im Maassstabe von 1 : 50,000 entworfen ist. Die grösste Breite beträgt 2500 Meter, ihre grösste Länge bis zum Concordienplatz, wie die Stelle genannt wird, an welcher die verschiedenen Firnströme des Aletsch zusammenkommen, 2700 Meter. Der Flächeninhalt dieser Firnabtheilung beträgt nach meinen Messungen auf der Dufour'schen Karte 3,3 Millionen Q.-Meter. Die Breite des Armes betrug hier 850 Meter, die Neigung der Oberfläche 10 Grade. Der Querschnitt bildete eine flache Wölbung ähnlich der einer Chaussee, doch etwas stärker gekrümmt. Auf einem solchen Querschnitte wurden nun 2 in Centimeter getheilte Scalen aufgestellt, die erste (I Fig. 2) 275 Meter, die zweite auf dem höchsten Punkte des Querschnittes 290 Meter von der ersten, also 560 Meter vom Ufer entfernt. Die Scalen waren doppelt

Fig. 3.



in der Art, wie es Fig. 3 veranschaulicht, welche zugleich die Befestigung derselben erkennen lässt. An einer 1,2 Meter langen Blechröhre A war eine breitere Skala, B, mit senkrechten Strichen, und eine schmalere, C, mit horizontalen befestigt. Die Röhre ging bei D durch eine mit einer Hülse versehenen Platte von Weissblech, die durch einen Holzstift h, der durch die Mitte der Röhre und die Hülse hindurchging, an die letztere befestigt war.¹⁾ Die Aufstellung wurde in der Art vorgenommen, dass ein Loch in den Firn F gegraben wurde, in welches die Röhre mit der Platte senkrecht gestellt wurde. Dann wurde das Loch wieder fest mit Firn ausgefüllt.

Zur Beobachtung der beiden Scalen und zur Bestimmung ihrer Bewegung sowohl in horizontaler, wie in vertikaler Richtung mussten 2 vollkommen unverrückt bleibende Fernrohre angewendet werden. Ich hatte zu diesem Zwecke dieselben, bei a Fig. 2, auf einem und demselben Stative, einem starken Dreifusse, in der Art befestigt, dass sie sowohl horizontal wie vertikal sich leicht drehen und feststellen liessen und ähnlich einem Theodolithen nach der Klemmung durch eine Mikro-

1) Es geschah dies deswegen, um die Platten nach Beendigung des Versuches im Firn lassen und doch die Scalen herausnehmen zu können. Bei starkem Ziehen brach der dünne Holzstift und die Röhre konnte ohne diese herausgezogen werden.

eterschraube noch etwas bewegt werden konnten. Die horizontale Stellung der horizontalen Drehachse wurde durch eine Libelle controlirt. Dadurch war es möglich, die Fäden im Kreuze genau auf einen beliebigen Theilstrich einzustellen, im Anfange beiläufig der durch die punktirten Linien $k k'$ entsprechenden Stellung. Das eine Fernrohr, ein Fraunhofer'sches, hatte ein 3zölliges Objectiv, das andere, für die nähere Scala verwendete, war ein Steinheil'sches mit einem 2zölligen Objectiv. Mit beiden konnte noch ein halber Centimeter sehr scharf unterschieden werden. Um sich von dem unverrückten Stande der Fernrohre zu überzeugen, war auf dem grossen noch ein kleines angebracht, welches um eine auf dem Fernrohre befestigte senkrechte Achse gedreht und leicht festgeklemmt werden konnte. Mit diesem kleinen Fernrohre wurde nun vor dem Beginne der Beobachtungen ein ausgezeichneter Punkt der gegenüberliegenden Bergwand aufgesucht und hierauf das Fernröhrchen festgeklemmt. Dieser Punkt, sowie die Umgebung desselben, die Lage der Spalten in den Felsen, wurde dann genau abgezeichnet²⁾ und vor jeder Beobachtung der Scalen zunächst die Stellung des Fernrohres durch das kleine controlirt, indem auch eine kleine Verrückung des grossen Fernrohres bei der bedeutenden Entfernung des gewählten Punktes am jenseitigen Ufer ein sehr starkes Heraustreten des markirten Punktes aus dem Fadenkreuze des kleinen Fernrohres erzeugt haben würde.

Abends um 6 $\frac{1}{2}$ Uhr konnte die erste Aufzeichnung des Standes der Scalen gemacht werden. Sie wurden von da mit Ausnahme der Nachtstunden stündlich oder alle 2 Stunden aufgeschrieben und ergaben folgende Verrückungen in den nebenbezeichneten Stunden. Ein — bedeutet in der Reihe der die horizontale Bewegung anzeigenden Zahlen, dass die Bewegung rückwärts, also dem Ursprunge des Gletschers zu-gekehrt erfolgt war, in der Reihe der die vertikale Verschiebung anzeigenden, dass sie nach oben erfolgte, also ein Aufsteigen der Scala stattfand. Unter H stehen die Zahlen für die horizontale, unter V die für die vertikale Bewegung der auf der Mitte des Firnstromes errichteten

1) Namentlich wenn man nicht stündliche Beobachtungen macht, dürfte das genaue Aufzeichnen sehr zu empfehlen sein, da mit dem wechselnden Stande der Sonne das Bild eines solchen Punktes sich so verändern kann, dass ohne Hülfe einer solchen Zeichnung derselbe dann schwer noch als derselbe zu erkennen ist.

Scala, unter II dieselben Grössen der dem Ufer näheren und zwar in Centimetern.

Leider wurde das Wetter schon am Nachmittage des dritten Tages so rauh, zugleich machten Hagel, Schneegestöber und heftige Winde jede Beobachtung unmöglich, so dass ich, da auch am 4ten kein Zeichen der Besserung des Wetters eintrat, den Rückzug antreten musste. Die Versuche über Verdunstung und Ablation wurden dadurch auch in ihren Resultaten unsicher, weswegen ich sie übergehe.

Stunde.	I			II	
	h.	v.		h.	v.
6 ^h 30	0	0		0	0
8 ^h	12	0,25		8	2
2ter Tag					
5 ^h	28	0,75		4	4
7 ^h	12	0,5		4	0
9 ^h	4	—2		0,5	—1,5
10 ^h	4	—8		2	—2
11 ^h	2	6		—4	0
1 ^h	0,25	7		—2	1,5
3 ^h	—10	17		1	3,5
4 ^h	6	1		1	0,5
5 ^h	1	1		1	0,25
6 ^h	—3	1		0	1
7 ^h	4	2		1	0,5
8 ^h	—6	2,5		—2	1,0
3ter Tag					
5 ^h	15	34		20	14
6 ^h	3	—2,5		1	2
7 ^h	6	—2,5		2	3
8 ^h	6	—0,5		2,5	1
9 ^h	6	—3		1	1
10 ^h	0	8		—1	0,5
11 ^h	8	2		0,5	2
12 ^h	6	8		1	—2
1 ^h	0	4		0	0,5
2 ^h	0	6		0	3
	104,25	82,5		41,5	35,75
					15*

Die beiliegende Tafel I giebt in graphischer Darstellung diese Bewegung, zu der wir folgende Bemerkungen zu machen haben. Es ergibt sich daraus:

1) Dass in der That am Firne eine sehr energische vertikale Bewegung neben der horizontalen sich bemerklich macht;

2) dass auch für den Firn das Gesetz gilt, nach welchem sich die dem Ufer näheren Punkte langsamer vorwärts bewegen, als die in der Mitte, und zwar sowohl für die horizontale, wie für die vertikale Bewegung;

3) der Gang der Bewegung, so verschieden er auch nach den einzelnen Beobachtungen erscheint, zeigt doch ziemlich viele Aehnlichkeiten, namentlich das Verhältniss der vertikalen zur horizontalen Bewegung ist in beiden Fällen nahezu gleich; mit Vernachlässigung der Bruchtheile wäre es gleich, wenn die Summe in II h 44 wäre, statt 41;

4) es ergibt sich ferner daraus, wie ungenügend zur Bestimmung der eigenthümlichen Bewegungserscheinungen des Firnes eine Beobachtung, die nur zweimal oder gar nur einmal in 24 Stunden gemacht wird, sein würde. Selbst eine von 6 zu 6 Stunden aufgezeichnete Beobachtung würde uns ein ganz anderes Bild geben. Würde man z. B. am 2. Tage um 5 Uhr Früh und um 3 Uhr Nachmittags beobachtet haben, so würde man die Scala sehr langsam um 2 cm. vorwärts und ebensoviel abwärts gerückt angenommen haben, während sie in Wirklichkeit eine, wie die Figur zeigt, höchst complicirte Bewegung ausführte. Wir können daher die scheinbar so einfache Bewegung bei Nacht auch nicht sicher als geradeso erfolgt annehmen, wie es die punktirte Linie angiebt, sondern nur das Gesamteresultat derselben, wie es durch dieselbe in der Tafel angedeutet ist. Ob auch an dem eigentlichen Gletscherstamme ein ähnlicher Wechsel in der Richtung der Bewegung stattfindet, geht aus den bisherigen Beobachtungen nicht hervor, da dieselben meist nur von 24 zu 24 Stunden oder von 12 zu 12 Stunden angestellt wurden, und da sie immer eine ganze Pfahlreihe quer über den Gletscher in ihrem Vorwärtsrücken bestimmen sollten, wurde und konnte auch gar nicht eine Bewegung in vertikaler Richtung erkannt werden.

Wenn auch die Beobachtungen in ähnlicher Weise, wie ich sie anstellte, selbst in noch kürzeren Intervallen vorgenommen und aufgezeichnet würden, so hätte man doch in einer Beziehung immer noch kein richtiges

Bild von der Bewegung der Punkte des Firnes, an denen die Scaln aufgestellt wurden, indem eine seitliche, von der Mitte des Gletschers nach dem Ufer zu vor sich gehende Bewegung, wenn sie genau in der Richtung der Achse des Fernrohrs erfolgt, sich gar nicht bemerklich macht, überhaupt die an der Scala beobachtete Vorwärtsbewegung nur dann die wirkliche Bewegung vollständig anzeigt, wenn dieselbe genau senkrecht zur Fernrohrachse, d. h. genau in der Richtung der Längsachse des Firn- oder Gletscherstammes erfolgt. So lange die Breite oder richtiger der Querschnitt desselben sich gleich bleibt, wird auch eine seitliche Bewegung kaum in erheblicher Weise auftreten können, dagegen ist sie wohl bemerklich, wo sich die Gletscher ausbreiten. Dass auch im Firn dieselbe auftrate, konnte ich in folgender Weise erkennen:

Am ersten Morgen wurde um die auf der Mitte des Firnes befestigte Scala ein Quadrat in der Weise abgesteckt, dass die Röhre den Mittelpunkt desselben bildete und die 4 Ecken desselben je 20 Meter von dem Mittelpunkte entfernt der Art bezeichnet wurden, dass 2 in die Längsrichtung des Firnarmes zu liegen kamen, 2 auf den Querschnitt des Gletschers. Nach 3mal 24 Stunden wurde das Quadrat wieder gemessen. Es ergab folgende Veränderungen: Bezeichnen wir die 4 Ecken mit a, b, c, d , von denen a und c auf der Längsachse, b und d auf dem Querschnitte des Gletschers lagen und zwar a weiter thalabwärts als c , b näher dem Ufer, auf welchem ich beobachtete, C die Röhre, den Mittelpunkt des Quadrates, so ergab die Messung, dass Ca um 24 Ctm. länger, Cc um 5 Ctm. kürzer als 20 Meter geworden war; die Querdiagonale hatte in ihren beiden Hälften an Länge zugenommen und zwar Cb um 25 Ctm., Cd um 48 Ctm.; die Längsdiagonale war also um 73 Ctm. länger geworden, während die Längsdiagonale nur um 19 Ctm. an Ausdehnung gewonnen hatte.¹⁾ In Beziehung auf die letztere geht aus der Messung hervor, dass eine Ungleichheit in der Abwärtsbewegung der 3 Punkte in der Art stattfand, dass offenbar a und c sich schneller bewegten als der Mittelpunkt C des Quadrates, aber auch

1) Ich habe es unterlassen, durch eine Figur diese Veränderung darzustellen, weil im Kleinen das richtige Verhältniss schwer darzustellen wäre. Würden wir die Diagonale 10 Ctm. lang zeichnen, so würde die Verlängerung von 19 Ctm. nur $\frac{1}{2}$ Mm. in der Zeichnung betragen.

b und d , denn die bei der 2ten Messung von b nach d gespannte Schnur ging um 15 Ctm. von C entfernt (näher an a) an der Röhre vorbei, ebenso ging die gerade Linie von a nach c auf der Seite von b an der Röhre, und zwar um 24 Ctm. von C entfernt vorbei.

Es geht aus diesen Beobachtungen jedenfalls soviel hervor, dass auch verhältnissmässig kurze Strecken von einander entfernte Punkte, wie die Eckpunkte unseres Quadrates, dessen Diagonalen 40 Meter lang waren, eine Ungleichheit der Bewegung erkennen lassen, und dass entschieden auch eine Lateralbewegung, eine Verschiebung der Firntheile nach den Seiten hin Statt habe. Natürlich lässt sich aus solchen Beobachtungen, wie die der Veränderung unseres Quadrates, nur die relative Lageveränderung der Eckpunkte bestimmen, um das wirkliche Fortrücken nach der Länge und Breite zu bestimmen, müsste wenigstens von einem dieser Punkte die Verschiebung nach der Länge und Breite bekannt sein. Von einem Beobachtungsstandpunkte aus lässt sich aber das nicht ermitteln, da von demselben immer nur die Verückung in einer auf der Visirlinie senkrechten Richtung bestimmt werden kann, wenn man nicht zugleich über Mittel verfügt, welche die Distanz der Scala vom Beobachtungsort bis auf Millimeter genau zu messen gestattet, deren Anwendung übrigens bei der Beschaffenheit des Terrains kaum möglich sein dürfte. Dagegen könnte die Seiten- und Längsbewegung sehr wohl bestimmt werden, wenn gleichzeitig von 2 Beobachtern aus 2 verschiedenen Stellen ein und dieselbe Scala verfolgt würde.

Fassen wir das schliessliche Resultat der mancherlei Bewegungen in horizontaler und vertikaler Richtung für die ganze Beobachtungszeit zusammen, vergleichen wir also die Lage des Mittelpunktes der Scala am Anfang und am Ende der Beobachtung, so finden wir, dass derselbe in $43\frac{1}{2}$ Stunden auf der Scala A der Firnmitte um 104 Ctm. vorwärts und um 82,5 Ctm. in senkrechter Richtung abwärts, derselbe Punkt der dem Ufer näheren Scala B um 41,5 Ctm. vorwärts und um 35,75 Ctm. abwärts sich verrückt hatte. Es kommt demnach im Mittel auf

	pro Stunde	pro Tag
für <i>A</i> horizontal	2,4	57,6
vertikal	1,9	45,6
für <i>B</i> horizontal	0,95	22,8
vertikal	0,82	19,68

Der Betrag der Bewegung ist ein ziemlich bedeutender, ähnlich der Schnelligkeit, welche der Gletscher weiter unten in seinem Eisstrom erkennen lässt. Die ungleich grössere Neigung des Firnstromes an der Beobachtungsstelle, die 10^0 betrug, wird diese verhältnissmässig grosse Schnelligkeit nicht befremdlich erscheinen lassen.

Vergleichen wir die Lage des Mittelpunktes der Scala auf Tafel I mit der Lage am Ende der Beobachtungsreihe, so sehen wir, dass, wenn auch auf Umwegen, in der That eine sehr energische Abwärtsbewegung der Firnschichten Statt findet. Verbinden wir die beiden genannten Punkte, Anfang und Ende der Beobachtung durch eine gerade gestrichelte Linie (S. 1 u. S. 2 der Tafel), so bildet dieselbe für die Scala *A* einen Winkel von 39^0 , für *B* von 40^0 , Winkel, welche dem in Fig. 1 S. 110 durch die Pfeile angezeigten vollständig gleichkommen. Die angeführten Beobachtungen sprechen also entschieden für die S. 110 als möglich angenommene Theorie, dass die Firnmassen in horizontaler und in vertikaler Richtung sich fortbewegen, und dass die oberflächlichen Schichten allmählich in die Tiefe wandern.

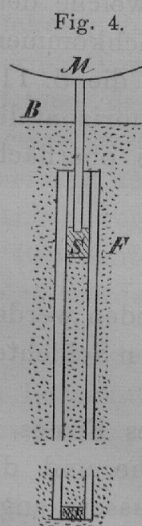
II.

Die zweite Frage, welche durch die Beobachtung entschieden werden sollte, war die, ob schon durch den Druck der oberflächlichen Schichten auf die tieferen sich diese letzteren in Eis verwandelten.

Man hat bisher stets eine allmähliche Umwandlung des Firnes in Gletschereis durch den Schmelzungsprocess an der Oberfläche und das Gefrieren dieses die tieferen Firnkörner überziehenden Wassers angenommen. Nun ist es ganz sicher, dass auch in der Firnregion noch die oberflächlichen Schichten im Sommer etwas schmelzen, aber dennoch findet dieser Process in so geringem Maasse Statt, dass eine tiefgreifende Vereisung im Firne nicht eintreten kann und in der That auch nicht beobachtet wird. Nun tritt aber das feste Gletschereis, soweit

die tiefsten Spalten einen Einblick in den Gletscher gestatten, schon ganz nahe der Firnlinie in gewaltiger Dicke auf. Dieses Eis kann unmöglich bis in die grössten Tiefen hinab durch die Oberflächenschmelzung und wiederholte E isrindenbildung aus diesem Schneewasser um die Firnkörner herum entstanden sein. Für dieses erscheint die Annahme viel einfacher, dass durch den Druck der neuen Firnlager die alten in Eis verwandelt werden. So viel mir bekannt ist, hat man dem Drucke keine oder nur eine sehr untergeordnete Rolle bei der Bildung des Gletschereises zugeschrieben; ich möchte dem Drucke die grösste, wenn auch nicht ausschliessliche Wirkung dabei zutheilen. Versuche, die ich über die Plasticität des Eises im vorigen Winter angestellt hatte,³⁾ machten mir diese Annahme von der Wirkung des Druckes auf den Firn sehr wahrscheinlich und ich hatte daher Vorkehrungen getroffen, um im Firn selbst die Richtigkeit derselben zu prüfen.

Es wurde zu diesem Behufe in eine Glasröhre von 7,25 Mm. im Lumen und 35 Ctm. Länge ein stählerner Stempel *s* (Fig. 4) eingepasst,



an dem oben eine kleine Messingschale *M* befestigt war, die zur Aufnahme von Gewichten diente. Die unten geschlossene Glasröhre wurde nun mit dem Firn bis auf einige Centimeter an ihrem oberen Rand gefüllt und in senkrechter Stellung so in den Firn *F* eingesenkt, dass die Schale bis *B* vom Firn bedeckt war, und rings herum um die Schale und die Gewichte Schollen von zusammengebackenem Firn gelegt. Auf die Schale wurde ein Gewicht von 300 Grm. gelegt. Dadurch wurde der Druck auf den Firncylinder im Innern der Glasröhre, in Atmosphären ausgedrückt, ziemlich genau $\frac{4}{5}$ Atmosphären, das entspricht dem Drucke einer Wassersäule von 8,5 Meter Höhe. Das spezifische Gewicht des Firnes schwankt zwischen 0,6 und 0,3, eine Bestimmung des spezifischen Gewichts des Firnes, den ich hier verwendete, war 0,4. Demnach war der von mir angewendete Druck entsprechend dem einer Firnlage von 17 Meter Dicke.

3) Sitzungsberichte der physik. medic. Societät zu Erlangen 1875.

Nach einigen Stunden schon hatte sich der Stempel in der Röhre fast bis an die Schale gesenkt, was mich bewog, ihn herauszunehmen und frischen lockeren Firn nachzufüllen, und einige Male wiederholt wurde. Als ich drei Tage diesen Druck hatte einwirken lassen, wurde die Glasröhre aus dem Firne herausgenommen und es zeigte sich nun der untere Theil der Röhre vollständig von einem klaren und compacten Eiscylinder erfüllt, der nur im oberen Ende ein poröses, zelliges Ansehen hatte, was offenbar dem Umstande zuzuschreiben ist, dass die bei dem letztmaligen Nachfüllen eingebrachte Firnmasse noch nicht lange genug dem Drucke ausgesetzt war. Wäre es möglich gewesen, den Druck noch einen ganzen Tag einwirken zu lassen, so würde sich wohl auch diese oberste Lage noch in compactes Eis verwandelt haben.

Ich glaube aus diesen Versuchen den Schluss ziehen zu dürfen, dass, je nachdem man das spezifische Gewicht des Firnes zu 0,3 oder 0,6 annimmt, in einer Tiefe von 25 bis zu 13 Metern der Firn in Eis übergeht, womit übrigens nicht gesagt sein soll, dass nicht schon vielleicht ein noch geringerer Druck, wenn er nur länger wirkt, dieselbe Umwandlung des Firnes in Eis erzeugt.

So viel geht unter allen Umständen aber daraus hervor, dass wir die grossen Firnmulden in der Tiefe nicht von Firn, sondern von Eis angefüllt anzunehmen haben.

Wenn ich eben sagte, dass vielleicht schon ein geringerer aber länger wirkender Druck hinreichen dürfte, um Firn in Eis zu verwandeln, so stützt sich diese Vermuthung auf die schon oben erwähnten Versuche über die Plasticität des Eises, deren Resultate ich, ehe ich an die Erörterung der Frage nach der Ursache der Gletscherbewegung gehe, noch kurz voranzuschieken habe. Die Beobachtung der Gletscher selbst, ihre eigenthümliche Bewegung durch bald enge, bald weite Thäler, das Anschmiegen der Eismasse an alle Unebenheiten zeigte, so zu sagen, durch einen von der Natur im Grossen angestellten Versuch in überzeugender Weise die Plasticität des Eises. Die oben schon erwähnten Versuche von Schlagintweit, Tyndall und Helmholtz liessen erkennen, dass durch sehr starken Druck Eisstückchen zu einer zusammenhängenden Masse vereinigt, durch verhältnissmässig enge Oeffnungen gepresst und im beliebige Formen gebracht werden können. Man

nahm nun von der einen Seite an, dass der Druck der höher gelegenen Gletschertheile, namentlich des Firnes den Eisstrom vorwärts presse, dagegen wurde von andrer Seite geltend gemacht, dass eine so colossale Eismasse, wie sie ein mehrere Meilen langer Gletscher darstellt, unmöglich von einer verhältnissmässig geringen Masse, wie der Firn vorwärts gedrückt und durch die Thalengen hindurchgedrängt werden könne. Ebenso wenig, behauptete man, könne auf einer nur wenig Grade geneigten Unterfläche, wie die mancher Gletscher in ihrem Unterlaufe, sich die Masse durch die Schwere allein vorwärts bewegen ohne eine besondere *vis a tergo*, und wie, sagten die Gegner der Gleitungstheorie, hätten sich erst die ungeheuer langen alten Gletscher z. B. der Rhonegletscher durch das enge, gewundene Rhonethal bei einer Neigung desselben von nur wenigen Minuten bis über den Genfer See hinaus ohne eine andere drängende Kraft bewegen können?

Betrachtet man näher diese und andre gegen die Gleitungstheorie vorgebrachten Bedenken, so wird man sofort einsehen, dass sie alle darin ihren Grund haben, die Plasticität des Eises als sehr gering anzunehmen und, wie es die bisherigen Versuche allerdings auch nur erkennen liessen, erst bei sehr hohem Drucke hervortretend. Bei geringerem Drucke nahm man an, sei das Eis auch im Grossen, wie es der Augenschein lehre, eine höchst spröde unnachgiebige Masse.

Dies bewog mich, näher zu bestimmen, bei welchem Drucke noch die Plasticität erkenntlich sei, und experimentell zu ermitteln, welches das minimum des Druckes sei, unter dem das Eis seine Form noch ändere.

Es ergab sich aus diesen Versuchen, die ich im Winter 1875 anstellte wo wir hier 14 Tage eine nie über Null steigende Temperatur hatten, dass die Plasticität des Eises wesentlich bedingt sei von der Temperatur und dem Druck, und zwar in der Art, dass Erniedrigung der ersteren sie und zwar sehr rasch herabsetzt, umgekehrt bei steigender Temperatur dieselbe sehr rasch zunimmt.

Ebenso zeigt sich die Dauer des Druckes von wesentlichem Einfluss. Die Plasticität d. h. die Nachgiebigkeit und Formveränderung einer Eismasse durch Druck, wenn der letztere gering, die Temperatur zugleich mehrere Grade unter Null ist, giebt sich oft erst nach 2 und 3 Mal 24 Stunden deutlich zu erkennen. Nahe seinem Schmelz-

punkte ist das Eis aber als ein im höchsten Grade plastischer Körper anzusehen, schon ein Druck von $\frac{1}{30}$ Atmosphäre*) reicht hin, um seine Gestalt zu verändern. Der einzige Unterschied zwischen dem Eise und nach gewöhnlichem Sprachgebrauche plastischen Stoffen ist der, dass das Eis etwas mehr Zeit braucht, um sich in Bewegung zu setzen. Doch zeigt sich die Plasticität bei höherem Drucke, schon bei 2—3 Atmosphären, bei einer dem Schmelzpunkte nahen Temperatur, rasch merklich auftretend. Bei dieser Temperatur dürfte die Plasticität wahrscheinlich bei jedem Druckgrade, auch dem niedrigsten, wenn er nur lange anhält, noch nachzuweisen sein.

Ich glaube, dass nach diesen Versuchen die Ursache der Gletscherbewegung vollkommen klar sein dürfte und dass alle Schwierigkeiten, welche der Theorie von Forbes noch entgegengesetzt werden konnten, als vollständig beseitigt angesehen werden dürfen. Wir können in keiner Weise uns besser eine Vorstellung von der Bewegung eines Gletschers machen, als wenn wir uns dächten, dass alles Eis und Schnee weggenommen und etwa durch eine feuchte, noch eben plastische Lehm-masse ersetzt würde. Als einzigen Grund der Vorwärtsbewegung dieser Masse würden wir die Schwere anzunehmen haben. Je nach der Konfiguration des Bodens kann sich dieselbe als Druck, als Zug, als Abrutschen äussern, und zwar als das eine oder das andere, je nachdem

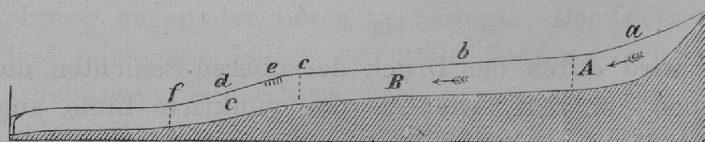


Fig. 5.

2 mit einander verglichene und einander nahe stehende Stellen ein geringeres oder ein grösseres Gefälle erkennen lassen. Es stelle die Figur 5 einen Durchschnitt durch einen Gletscher dar (oder durch ein ähnlich geformtes Gefäss mit Lehm gefüllt), so wird wegen der grösseren Neigung die Masse α sich schneller bewegen, als b und in Folge dessen auf

*) In den Sitzungsberichten der Erlanger Soc. phys. med., März 1875, in welcher diese Versuche mitgeteilt sind, ist durch einen Druckfehler $\frac{1}{3}$ statt $\frac{1}{30}$ gesetzt.

b drücken, *d* dagegen wird wieder mit grösserer Geschwindigkeit sich bewegen als *c* und einen Zug ausüben, der, wenn er grösser ist, als die Kohäsionskraft des Eises, bei *e* Risse erzeugen wird, die unterhalb *f*, wo sich das Verhältniss der Geschwindigkeit der höheren und tieferen Parthien umkehrt, wieder verschwinden müssen. Es braucht wohl kaum der Erwähnung, dass alle diese Fälle durch die Beobachtung an den Gletschern nachgewiesen sind.

Denken wir uns eine solche Masse durch Querschnitte in einzelne Stücke (*A*, *B*, *C*) getheilt, wie es die punktirten Linien angeben, so ist offenbar, dass überall, wo der Boden nicht vollkommen horizontal ist, jedes Stück, wenn es allein vorhanden wäre, sich abwärts bewegen würde. Selbst auf vollkommen horizontaler Unterlage würde noch eine Vorwärtsbewegung Statt finden, so wie die Masse so dick wäre, dass der Druck der oberen Schichten hinreichen würde, eine Verschiebung der Theilchen auf einander zu erzeugen, was an dem Eise wie wir oben sahen, bei einer Temperatur nahe dem Nullpuncte schon bei einem Drucke von $\frac{1}{30}$ Atmosphäre Statt hat. Denken wir uns z. B. eine Eismasse *E* von allen Seiten eingeschlossen und nur auf einer nach *A*

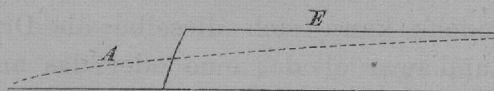


Fig. 6.

hin offen, so wird durch den Druck der oberen Schichten dieselbe eine Form annehmen müssen, wie sie die punktirte Linie angiebt. Die Form der Oberfläche und das Aufhören der Bewegung wird von der Dicke der Masse und dem Plasticitätscoëfficienten, d. h. davon abhängen, wo die Kohäsion und der Druck einander das Gleichgewicht halten.

Wir können somit sagen: Jede Stelle eines Gletschers bewegt sich selbständig durch die Schwere vorwärts, ist aber sowohl durch die vorangehenden Massentheilchen wie durch die nachfolgenden beeinflusst und zwar kann dieser Einfluss ebensowohl ein beschleunigender, wie ein verlangsamer sein. Wenn auch sehr bedeutend modificirt, gelten doch noch die hydrostatischen Gesetze auch für die plastischen Massen in gewissem Grade und zwar in um so höherem, als die plastische Masse

sich dem Zustande der Flüssigkeit mehr nähert. Daraus erklärt sich die vertikale, aufsteigende und dann wieder niedergehende und selbst rückwärtsgerichtete Bewegung, wie wir sie am Firne nachgewiesen haben und wie sie auch wohl noch weiter unten am Gletscherstamme durch Beobachtung gefunden werden dürfte.

Die Selbständigkeit der Bewegung jeder einzelnen Parthie des Gletschers und der geringe Einfluss des Druckes höher gelegener Parthien als vorwärtsdrängende Kraft ist uns durch zwei Beispiele in der Natur sehr klar vor Augen gelegt, wie mir kein anderes sonst bekannt geworden ist. Es ist dieses das Verhalten des Aletschgletschers am Mergelinsee und des Gurglergletschers am Langthaler See*). Ein Querschnitt durch den Gletscher und den See, welcher ein kleines Seitenthal des Hauptthales einnimmt, bietet in beiden Fällen folgende Figur dar, nur mit etwas anderen Dimensionen an letzterem. Bei *A* ist der Mergelinsee,

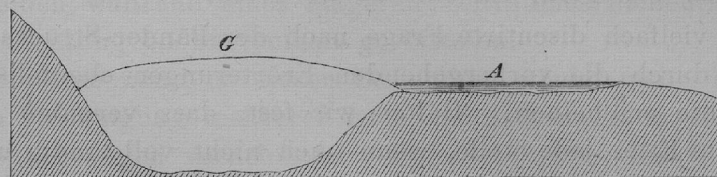


Fig. 7.

G der Gletscher, welcher sich in einer zur Ebene des Papiers senkrechten Richtung gegen den Leser zu bewegt. Der Gletscher hat unterhalb des Sees noch eine Länge von 9500 Metern. Würde diese lange Eismasse erheblichen Widerstand dem Fortrücken der höheren ober dem See gelegenen Massen entgegensetzen, so würde sich der Gletscher sicher viel weiter nach *A* in das kleine Seethal ausbreiten.

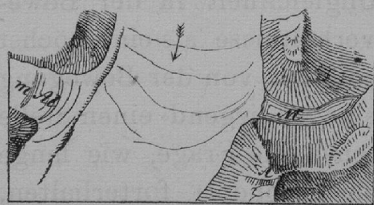


Fig. 8.

Dieses seitliche Ausweichen ist aber so gering, dass der Umriss des Gletscherrandes eine kaum bemerkliche Ausbiegung nach dieser Seite hin erkennen lässt. Nach der Dufourschen Karte ist derselbe genau der beistehenden Figur (8)

entsprechend, in welcher die Richtung des Pfeiles die Richtung der Be-

* Siehe K. Sonklar, die Oetzthaler Gebirgsgruppe. Taf. VIII.

wegung des Gletschers andeutet. *M* Mergelinsee. *A* Aeggischhorn. *m* *Al.* Mittel-Aletschgletscher. Noch eine andere Erscheinung findet ihre einfachste Erklärung durch die oben mitgetheilten Versuche über die Plasticität des Eises und die Steigerung derselben mit steigender Temperatur, nämlich die längst bekannte Thatsache, dass sich die Gletscher in der warmen Jahreszeit ungleich schneller, als im Winter bewegen, aber auch bei grosser Kälte nicht ganz stille stehen. Durch die eben näher entwickelte Erklärung fallen auch alle Schwierigkeiten weg, welche die Bewegung der ungeheuer langen Gletscher der Eiszeit darzubieten scheint. Wir können hier nur wiederholen, dass eine sehr dicke Eismasse — und als eine solche müssen wir jedenfalls diese alten Gletscher annehmen — durch ihre eigene Schwere selbst auf einer horizontalen Unterfläche sich fortbewegen musste, also noch vielmehr auf einer, wenn auch nur schwach geneigten; wie sie die Thäler, durch welche jene alten Gletscher sich bewegten, entschieden darboten.

Die so vielfach discutirte Frage nach der Bänder-Structur der Gletscher wird durch die vorhergehenden Erörterungen ebenfalls in einem anderen Lichte erscheinen. Halten wir fest, dass vermöge der hohen Plasticität des Eises jede Stelle, wenn auch nicht vollständig unabhängig von dem Verhalten der benachbarten Massentheilchen doch in gewissem Grade sich selbständig bewege, in sofern als an jeder Stelle die allgemeine Bewegungsursache sich in besonderer Weise geltend macht, so werden wir die Structur des Gletschers nicht als etwas bleibendes, ein in einer bestimmten Region erzeugtes Phänomen annehmen, sondern als eine Folge des durch ungleiche Geschwindigkeit der Bewegung einzelner Theile erzeugten Druckes und der Spannung, wie es Forbes und Tyndall schon angenommen haben. Die grosse Ungleichheit in der Bewegung einzelner Theile nöthigt uns die Structurverhältnisse als eine höchst wandelbare, fortwährend sich ändernde und lediglich von der Bewegung erzeugte Erscheinung anzusehen. Wie lange eine an irgend einer Stelle hervorgerufene Bänderstructur sich erhält, ebenso die Frage, wie lange etwa die Jahresschichten des Firnes sich noch gesondert forterhalten, dürfte kaum in Allgemeinen beantwortet werden können, es wird das wesentlich davon abhängen, wie diese Massen sich weiter unten bewegen, ob die Neigungsverhältnisse und die übrigen Gestaltungsverhältnisse des

Thales, durch welches sich der Gletscher bewegt, von der Art sind, dass die Bewegung eine sehr ungleiche an verschiedenen Stellen sein muss, oder nicht. In ersterem Falle werden in kurzer Zeit die früher in einer Firnschichte vereinigten Eistheilchen weit von einander getrennt sein, die Schichtung des Firnes wird dann bald spurlos verschwunden sein und die weiter unten auftretende Bänderstructur hat nichts mit derselben mehr zu schaffen.

Gerade in Beziehung auf diese Frage wäre es von dem grössten Interesse, wenn in dem Firne weiter oben und ganz nahe der Firnlinie und dem Gletscherstamme selbst ebenfalls nahe dieser Linie gleichzeitig genaue Beobachtungen an mehreren Querschnitten in ähnlicher Weise angestellt würden, wie die von mir vorgenommenen, und wenn ähnlich wie es Agassiz auf dem Gletscherstamme des Aargletschers anordnete, auch im Firne Signale angebracht würden, welche die Bewegung derselben während eines längeren Zeitraumes namentlich auch in vertikaler Richtung zu bestimmen gestatteten.

Der Einzelne kann in dieser Beziehung wenig mehr leisten, aber durch eine Vereinigung mehrerer nach demselben Plane solche gleichzeitige Beobachtungen vernehmender Forscher würde die Gletscherfrage endlich rasch ihrem vollständigen Abschlusse entgegengeführt werden können.

