

**Separat-Abdruck**

**aus dem Neuen Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Palaeontologie  
Jahrg. 1900. Bd. II.**

# Weitere Versuche über die Translationsfähigkeit des Eises, nebst Bemerkungen über die Bedeutung der Structur des grönländischen Inlandeises.

Von

**O. Mügge** in Königsberg in Preussen.

Mit 4 Figuren.

---

Die Beobachtungen v. DRYGALSKI'S über die Structur des grönländischen Inlandeises und seine unrichtigen Folgerungen daraus (welche er auch in seiner inzwischen erschienenen Erwiderung [dies. Jahrb. 1900. I. p. 71] auf meine Kritik [dies. Jahrb. 1899. II. p. 123] aufrecht erhält) haben mich veranlasst, die früheren Experimente über die Translationsfähigkeit des Eises (dies. Jahrb. 1895. II. p. 211) in diesem Winter wieder aufzunehmen und namentlich den Versuch zu machen, den zur Translation nöthigen Druck zu messen und den Einfluss der Temperatur festzustellen. In letzterer Hinsicht sind sie auch diesmal wegen der vielfachen und sprunghaften Änderung der Witterung fehlgeschlagen, dagegen ist es geglückt, wenigstens Annäherungswerthe für den Translationsdruck zu erhalten und das Beobachtungsverfahren etwas zu vervollkommen, so dass die Translationen am Eis nunmehr bequem demonstrirbar sind.

An die Darstellung dieser und einiger anderer, das Gefrieren des Wassers betreffender Versuche, ist in Hinsicht auf v. DRYGALSKI'S Erwiderung eine nochmalige Kritik seiner Ansichten geknüpft, auf eine weitere Erörterung der strittigen Fragen werde ich, solange nicht neue Thatsachen bekannt werden, nicht eingehen.

Die Translationsversuche sind wie folgt angestellt:

In ein etwa 3 cm dickes, 30 : 60 cm grosses Buchenbrett sind am Rande auf 3 Seiten senkrechte Einschnitte von rechteckigem Umriss und etwa 3 cm Tiefe bei 0,7—1,5 cm Breite gesägt, ihr Abstand beträgt etwa 6—9 cm. Das Brett konnte an einer Mauer in horizontaler Lage in 1,2 m Höhe über dem Erdboden so angeschraubt werden, dass Sonnenbestrahlung ausgeschlossen war.

Das Eis wurde in einer tiefen, in den Boden gegrabenen Wanne in etwa 10 cm dicken Platten erhalten; die passend

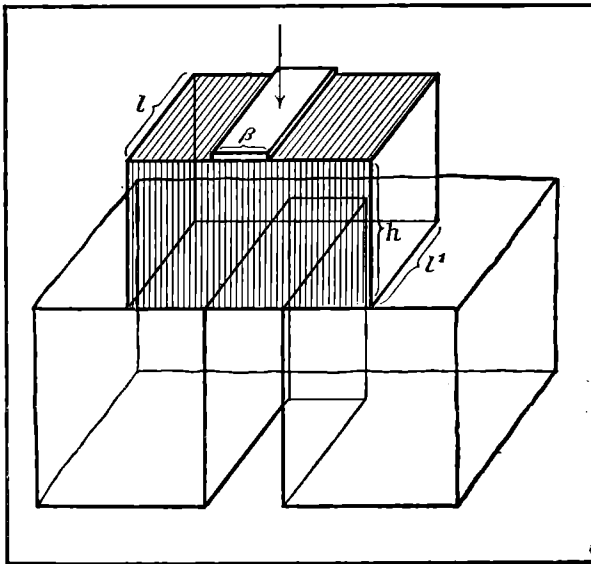


Fig. 1.

gesägten Stücke wurden auf einer erwärmten Eisenplatte geglättet und sorgfältig auf ihre optische Homogenität und Orientirung geprüft, die als brauchbar befundenen Stücke waren, zuweilen bis auf einige Luftbläschen, vollkommen klar, ihre Oberfläche glatt und eben, sie erschienen durchaus einheitlich, die Grenzen der (mit ihren optischen Axen parallel gestellten) Individuen machten sich in keiner Weise bemerklich. Die Eisstückchen, welche die Form gerader Parallelepipede von einigen Centimeter Kantenlänge hatten, wurden nahe dem Rande des Brettes über einen Einschnitt gelegt, wie es Fig. 1

in natürlicher Grösse für eine Stelle des Randes zeigt; bei den genannten Dimensionen des Brettes kann man mit etwa 6 Eisstückchen gleichzeitig experimentiren.

Die Belastung erfolgte stets mittelst eines an dünner Schnur aufgehängten Gewichtes (in der Regel 5 kg); um das Gewicht möglichst gleichmässig über eine Fläche von bekannter Grösse zu vertheilen, wurden zwischen Schnur und Eis ebene Messingplättchen von etwa 1 mm Dicke gelegt, ihre Breite ( $\beta$ ) schwankte zwischen etwa 0,4 und 1 cm, ihre Länge war nahe gleich der oberen Breite  $l$  der Eisstückchen (Fig. 1)<sup>1</sup>.

Um Translation zu bewirken, wurden die Eisstücke so geschnitten und aufgestellt, dass die Basisfläche (0001) vertical und parallel der Längsrichtung der Einschnitte verlief (die Lage von (0001) ist in den Figuren durch Schraffirung angedeutet). Bezeichnet man die Dicke des Eisstückchens (in Centimeter) oben mit  $l$ , unten mit  $l_1$ , seine Höhe mit  $h$ , so ist sein Querschnitt parallel zur Translationsfläche gleich  $\frac{1}{2}(l + l_1) \cdot h$ ; ist die Breite des Messingplättchens  $\beta$ , die Belastung 5 kg, so beträgt der Druck pro Quadratcentimeter  $\frac{5}{l \cdot \beta}$  kg, also annähernd  $\frac{5}{l \cdot \beta}$  Atmosphären. Der pro Quadratcentimeter Translationsquerschnitt wirksame Druck  $D$  beträgt daher in Atmosphären:

$$D = \frac{5}{l \cdot \frac{1}{2}(l + l_1) \cdot \beta \cdot h} = \frac{10}{l(l + l_1) \cdot h \cdot \beta}$$

Es kam zunächst darauf an,  $D$  möglichst zu steigern, um Translation in kürzester Zeit zu bewirken und so bequem demonstrieren zu können. Es wurde daher der Translationsquerschnitt möglichst verkleinert und die Messingplättchen möglichst schmal genommen (oder, wenn eine Messung von  $D$  nicht beabsichtigt war, ganz fortgelassen). Um Ersteres zu

<sup>1</sup> Will man verhindern, dass die Translation (während einer Zeit, wo nicht beobachtet werden kann) zur völligen Herausschiebung des belasteten Theiles führt, wünscht man vielmehr die Translation in einem bestimmten Stadium zu demonstrieren, so empfiehlt es sich, die Einschnitte des Brettes, über welche das Eis zu liegen kommt, nach unten convergiren zu lassen, und ihren Abstand so zu nehmen, dass das herausgeschobene Stück sich festklemmt, oder besser, unter dem Brettrand mit den Ausschnitten eine Leiste mit nur schmalen Einschnitten für die Schnur zu befestigen.

erreichen, ohne die Tragfähigkeit der Stäbe zu überschreiten, wurde  $h$  möglichst gross,  $l + l_1$  möglichst klein gemacht, und um auch dann noch die Messingplättchen möglichst sicher auflegen zu können, wurde der Querschnitt // (0001) nicht rechteckig oder trapezförmig, sondern dreieckig ( $l_1 = 0$ ) gewählt. Damit ferner Stäbe mit derartigem Querschnitt sich ebenso sicher wie andere aufstellen liessen, wurde ein parallelepipedisches Eisstück nur an der Belastungsstelle, durch Ausschmelzen, auf die genannte Form gebracht (Fig. 2). Das Ausschmelzen geschieht zweckmässig an den eben geschliffenen Seitenflächen

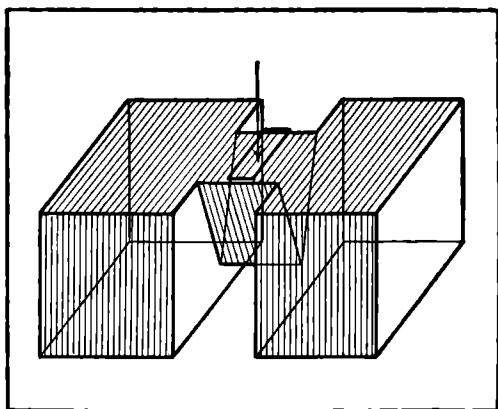


Fig. 2.

von etwa 1—2 cm dicken Eisenplatten, deren grosse Oberfläche zum Ausschmelzen und Glätten der Parallelepiped dient; es ist in wenigen Minuten zu machen.

(Bei einem Eisstückchen mit  $h = 1,8$ ,  $l = 0,8$ ,  $l_1 = 0$  [Messingplättchen fortgelassen] war die Translation schon nach 5 Minuten deutlich, und betrug nach 20 Minuten bereits 5 mm, Temperatur  $-2^{\circ}$ .)

Um ferner den zur Translation nöthigen Minimalwerth von  $D$  zu finden, wurde von dem nach früheren Beobachtungen geschätzten Werthe  $D = 10$  Atmosphären ausgegangen und nach und nach etwa 30 Eisstückchen von immer grösserem Translationsquerschnitt oder mit grösseren Werthen von  $\beta$  (bei constantem Gewicht) untersucht. Ihre Dimensionen wurden zwischen Zirkelspitzen gemessen, ich schätze auf etwa 0,5 mm

genau. Eine grössere Genauigkeit ist schwer zu erreichen, da die Kanten der Eisstückchen sich während der Bearbeitung, denn auch während der Messung etwas zurunden, die Dimensionen sich endlich auch während der Versuchsdauer selbst (namentlich wenn die Luft recht trocken ist) merklich verkleinern, ohne dass der Betrag der Verdunstung sich ermitteln liesse.

Die folgende Tabelle enthält neben den Werthen von  $D$  Angaben über den Eintritt und Betrag der Translation und die Temperatur. ( $l$  schwankte zwischen 0,48 und 1,98,  $l_1$  zwischen 0 und 2,16,  $h$  zwischen 1,62 und 3,90,  $\beta$  zwischen 0,38 und 0,96 cm.)

$D$

23,3	völlig herausgeschoben nach $\frac{3}{4}$ St. $t = -4^\circ$ .
19,3	1 mm nach 1 St. $t = -2^\circ$ .
12,3	sehr deutlich nach 2 St. $t = -2^\circ$ .
11,6	deutlich nach $\frac{3}{4}$ St. $t = -2^\circ$ .
10,4	fast völlig nach $\frac{3}{4}$ St. $t = -4^\circ$ .
9,4	keine nach $1\frac{1}{2}$ St.; sehr stark nach 20 St. $t = -2\frac{1}{2}^\circ$ .
9,3	keine nach 30 St. $t = -6^\circ$ .
8,7	keine nach 5 St. $t = -6^\circ$ ; 15 mm nach 20 St. $t = -13^\circ$ .
7,8	erheblich nach 1 St. $t = -4^\circ$ .
5,8	schwach nach 4 St., sehr stark nach 6 St. $t = -3^\circ$ .
5,0	wenig nach 2 St. $t = -5^\circ$ .
5,0	deutlich nach 2 St. $t = -2^\circ$ .
4,1	wenig nach 2 St.; schwach nach 4 St. $t = -2^\circ$ .
4,0	keine nach $2\frac{1}{2}$ St. $t = -6^\circ$ .
3,4	1 mm nach 3 St.; 10 mm nach $5\frac{1}{4}$ St. $t = -1^\circ$ .
3,1	keine nach 24 St. $t = 0^\circ$ ; schwach nach 32 St. $t = -4^\circ$ .
3,1	keine nach $2\frac{1}{4}$ St. $t = -6^\circ$ .
2,5	keine nach 8 St.; gering nach 27 St. $t = -3^\circ$ .
2,0	schwach nach 24 St. $t = -15^\circ$ ; 8 mm nach 51 St. $t = -7^\circ$ .
1,5	keine nach 24 St. $t = -13^\circ$ ; schwach nach 51 St. $t = -7^\circ$ .
1,47	sehr schwach nach 7 St.; $t = -1^\circ$ ; sehr stark, 8,5 mm, nach 22 St. $t = -2,5^\circ$ .
1,2	2 mm nach 48 St.; der Stab war aber inzwischen etwas abgethaut.
1,1	} keine nach 48 St. $t = 0^\circ$ , z. Th. $t = -12^\circ$ .
1,0	
0,5	
0,5	

Es geht daraus hervor, dass die Translation im Allgemeinen um so schneller eintritt, je grösser  $D$  ist, und dass ein Druck von 1,5 Atmosphären hinreicht, um die

Reibung bei Translation längs einem Querschnitte von 1 qcm zu überwinden. Dieser Druck ist nur  $\frac{1}{7}$  des früher benutzten. Die Tiefe, in welcher im Gletschereis von einer Korngrösse von etwa 1 qcm Translationsquerschnitt ( $//$  0001) Bewegung lediglich infolge Druck des überlagernden Eises eintritt (auch wenn das Gewicht desselben sich möglichst gleichmässig vertheilt), beträgt demnach nur etwa 17 m, eine Tiefe, in welcher die Druckschmelzung, auch wenn die Temperatur des Eises nicht unter  $0^{\circ}$  liegt, äusserst gering ist.

Eine Abhängigkeit der Bewegung von der Temperatur ist aus der Tabelle nicht zu erkennen, indessen war es, wie bemerkt, nicht möglich, systematische Beobachtungen nach der Richtung anzustellen. Sinkende Temperatur scheint jedenfalls die Translation nicht erheblich zu erschweren, in einigen Fällen trat vielmehr Translation erst nach längerer Einwirkung des Gewichtes ein, obwohl die Temperatur inzwischen erheblich gesunken war. Die herausgeschobenen Stücke zeigten die Translationsstreifung öfter in grosser Schönheit, in keinem Falle Änderung der optischen Orientirung.

Es ist oben angenommen, dass der Translationswiderstand der Grösse des Translationsquerschnittes proportional ist und nur von diesem abhängt, obwohl dies nach den Beobachtungen von SELLA und VOIGT (dies. Jahrb. 1895. I. -241-) über die Zerreiessungsfestigkeit des Steinsalzes nicht selbstverständlich erscheint. Für die in der Tabelle angezeigte grosse Ungleichheit der Belastung bei Eintritt der Translation sind aber vermuthlich mehr noch als die von der Form und dem Bau des Versuchsstückes abhängige Beschaffenheit der Oberflächenschicht die krystallographische Orientirung der Translationsrichtung (zu den Nebenaxen) und kleine Abweichungen von optischer Homogenität und der geforderten Orientirung verantwortlich zu machen; vielleicht wird der Eintritt der Translation auch durch kleine Erschütterungen (Stösse), Verletzungen der Oberfläche u. a. begünstigt.

Jedenfalls ist aber die Grösse des  $D$ , welche im Ganzen als Maass der inneren Reibung für gleitende Bewegung  $//$  (0001) gelten kann, ausserordentlich klein gegenüber jenen Widerständen, welche das Eis einer Zerreiessung seiner (0001) par-

alleen Schichten entgegengesetzt. Um auch für diese ein Maass zu gewinnen, wurden Eisstäbe (wie auch früher schon, dies. Jahrb. 1895. II. p. 222—223) so belastet, dass (0001) zwar wieder vertical stand, aber nicht parallel, sondern quer zur Richtung der Einschnitte des Brettes. Der belastete Querschnitt wurde (wie bei den eingangs erwähnten Versuchen zur Erzielung möglichst schneller Translation) möglichst klein bei möglichst grosser Tragfähigkeit gewählt, hatte also die in Fig. 3 gezeichnete Form und Orientierung gegenüber (0001), (dessen Lage wieder durch Schraffirung angedeutet ist); das Messingplättchen war natürlich möglichst schmal. Derartig orientirte Stückchen vertrugen einen Druck bis

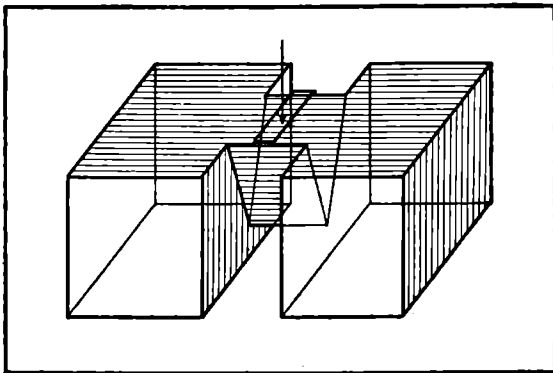


Fig. 3.

zu 70 Atmosphären pro Quadratcentimeter des verticalen Querschnittes, also fast das 50fache desjenigen, welcher sonst Translation hervorrief, ohne dass nach 10 Stunden Bewegung eintrat. Erst nach 24stündiger und längerer Belastung zeigten sich die Stückchen stark deformirt, und zwar hatten sie sich unter der belasteten Stelle nach vorn oder hinten herausgebogen, ähnlich wie dies auch bei einem Packet aufrecht gestellter und stark belasteter Etiquetten eintreten würde, wenn die Blättchen nicht ganz genau vertical gerichtet wären oder der Druck zeitweilig ausserhalb ihrer Ebene wirken würde.

Versuche, die Translationsfähigkeit nach verschiedenen Richtungen in (0001) miteinander zu vergleichen, konnten auch jetzt wegen der Unmöglichkeit, die Richtungen in (0001)



zu unterscheiden, nicht angestellt werden. Indessen ergibt sich die Verschiebbarkeit nach allen Richtungen in (0001) auch daraus, dass eine kreisrunde, rings am Rande unterstützte und in der Mitte belastete Scheibe // (0001) sich nach längerer Zeit etwas (unelastisch) durchbog. Ferner geht dies daraus hervor, dass nach einem weiteren Versuche längs (0001) nicht nur geradlinige, sondern auch Drehbewegungen möglich sind. Stellt man durch

Ausschmelzen einen in der Mitte stark verjüngten drehrunden Eiskörper her von dem in Fig. 4 gezeichneten (horizontalen) Längsschnitt (parallel der mit der optischen Axe zusammenfallenden Rotationsaxe), lässt denselben mit dem verjüngten Theil (bei *a*) aufrufen,

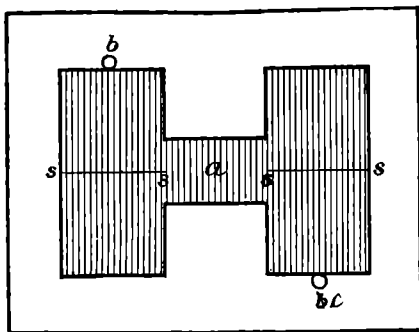


Fig. 4.

während in den eingeschmolzenen Metallringen bei *b* und *c* Gewichte angreifen, so zeigen sich nach einigen Stunden die ursprünglich in gerader Verlängerung hintereinanderliegenden Markenstriche *ss* (welche mittelst Stahllineals eingeschmolzen sind) gegeneinander verschoben (aber beide noch merklich parallel). Der Versuch wurde leider schon 4 Stunden nach Beginn der Belastung gestört, als die Verschiebung der beiden Marken gegeneinander erst 0,5 cm betrug und konnte nicht mehr wiederholt werden. (Die Temperatur betrug während des Versuchs  $-1$  bis  $-2^{\circ}$ .)

Die Resultate aller dieser Versuche sind, wie man erkennen wird, in voller Übereinstimmung mit den früher mitgetheilten<sup>1</sup>, bieten auch qualitativ nichts Neues. Es ist daher nicht recht verständlich, wie DRYGALSKI nach Kenntnissnahme der früheren Translationsversuche in seiner Erwiderung in dies. Jahrb. 1900. I. p. 71 vermuthen kann, die Translation

<sup>1</sup> Dies. Jahrb. 1895. II, namentlich p. 219 und 222. Die Vorrede des Grönlandwerkes ist datirt von December 1897.

am Eis sei eine besondere Erscheinungsform der Druckschmelzung. Er spricht p. 72 seiner Erwiderung von einer „sogenannten“ Translationsfähigkeit als einer Art von Plasticität, p. 73 meint er: „die Versuche von McCONNEL und MÜGGE zeigen lediglich Umformungen an und berühren in keiner Weise den Punkt, ob dieselben nicht vielleicht auch selbst durch innere Verflüssigungen möglich geworden sind“; p. 80: „... drittens, dass man auch nach den MÜGGE'schen Versuchen noch nicht weiss, wie weit die Translationen selbst mit der Verflüssigung und Wiederverfestigung zusammenhängen“, p. 81: „dass die als Translationsfähigkeit bezeichnete Plasticität des Eises mitwirken kann, ist möglich, keinesfalls kann sie aber Alles erklären, und es wird immer noch nothwendig sein, festzustellen, wie weit sie überhaupt unabhängig von Verflüssigungen ist. Wenn sie dadurch bedingt wird, hätten wir in der Translation keine besondere Art von Verschiebung infolge einer Plasticität ohne Aggregatwechsel<sup>1</sup> zu sehen, sondern nur eine bestimmt gerichtete Äusserung derjenigen Vorgänge, auf welchen die Bewegungsfähigkeit des Eises zum grossen Theil beruht. Wir hätten dann in den McCONNEL-MÜGGE'schen Versuchen nur das interessante Resultat, dass Verflüssigungen unter Druck am leichtesten längs den Basisflächen entstehen . . . .“ Endlich lautet der Schlusssatz seiner Erwiderung: „Die in der Translationsfähigkeit begründete Plasticität des Eises ist vielleicht nichts Anderes als die Ausdehnung der an den Korngrenzen ansetzenden Lockerung des Gefüges durch Verflüssigung oder Druck auf die Grundform der Eiskrystalle, nämlich auf die dünnen Plättchen, welche die Körner bilden. Hierauf deuten auch die Schmelzfiguren hin.“

Diese Vorstellungen v. DRYGALSKI's sind mit den früheren und jetzigen Versuchen völlig im Widerspruch. Zunächst ist zu bedenken, dass jene Verschiebbarkeit der Krystalltheile längs bestimmten Ebenen, für die ich vor 11 Jahren die Bezeichnung Translation vorschlug, nicht etwa bloss eine Eigen-

---

<sup>1</sup> Soll wohl heissen Aggregatzustand. — Es ist übrigens die Translation nicht als eine Folge von Plasticität zu betrachten, sondern umgekehrt die Verbiegbarkeit als Folge von Translationsfähigkeit, die Plasticität als Folge einer Fähigkeit zu Translationen nach mehreren Ebenen und Richtungen.

schaft des durch Druckschmelzung ausgezeichneten Eises ist, sondern zahlreichen anderen Substanzen, leicht-, schwer- und völlig unschmelzbaren ebenso, z. Th. in noch höherem Grade zukommt, dass demnach keine Veranlassung besteht, etwa allgemein Translationsfähigkeit und Schmelzbarkeit in Beziehung zu setzen. Es liegt aber bisher auch gar kein Grund vor, einen Zusammenhang zwischen Translation und „inneren“ Verflüssigungen beim Eis anzunehmen, wo Blatt für Blatt der krystallisirten Substanz unter Erhaltung ihrer bestimmten krystallographischen Eigenschaften, Orientirung und Oberflächenbeschaffenheit, und unter Erzeugung ausgezeichneter Translationsstreifen nach und nach vorgeschoben wird<sup>1</sup>, wo bestimmt geordnete Einschlüsse nach der Translation in bestimmter, der stattgehabten Verschiebung entsprechender Anordnung sich wiederfinden (dies. Jahrb. 1895. II. p. 219. Taf. IV Fig. 2—5), wo Translation bei Temperaturen vor sich geht, welche zur Schmelzung einen Druck von 1000 Atmosphären verlangen würde, wo selbst das 50fache des sonst wirksamen Druckes dann zur Translation nicht ausreicht, wenn die vorgeschobenen Lamellen die feste Unterlage treffen würden oder erst zerrissen werden müssten, die Druckschmelzung aber nicht im Mindesten behindert sein würde, wo endlich bei den zahlreichen Versuchen von Druckschmelzung nichts beobachtet ist. Wenn nun v. DRYGALSKI gleichwohl auch ferner in der Translation nur eine Art Druckschmelzung sieht, wird es an ihm sein, den Nachweis dafür zu liefern. Bis dahin wird man daran festhalten müssen, dass Translation und Druckschmelzung unabhängig voneinander die Bewegung der Gletscher beeinflussen.

Auch sonst scheinen mir die Differenzen zwischen v. DRYGALSKI'S und meinen Auffassungen hinsichtlich der Ursachen

<sup>1</sup> und nicht etwa wie bei dem TYNDALL'schen Versuch ein Durchschmelzen des feinen belasteten Drahtes durch das Eis und sofortiges Wiederverkitten des letzteren durch das gefrierende Schmelzwasser in der Furche oberhalb des Drahtes stattfindet.

der Gletscherbewegung erheblich tiefergehend als v. DRYGALSKI annimmt. p. 500 des Grönlandwerkes heisst es gegenüber EMDEN, welcher auf ein Wachsthum der Gletscherkörner ohne Verflüssigung geschlossen hatte, folgendermaassen<sup>1</sup>:

„Der positive Grund, weswegen ich eine vorübergehende Verflüssigung zur Erklärung des Kornwachsthums annehme, liegt nun darin, dass in den unteren geschichteten Theilen des Inlandeises nicht allein ein Wachsthum stattgefunden hat, sondern auch sehr häufig eine Anordnung der optischen Hauptaxen senkrecht zur Schichtung. Wenn das Wachsthum dadurch erfolgt, dass die Molecüle des einen Kornes die des anderen in ihre Lage trocken herüberziehen, bleibt zu erklären, wie in den geschichteten Theilen gerade die senkrecht zur Schichtung orientirten Körner bestehen bleiben. Eine Erklärung hierfür finde ich nicht in der Annahme einer trockenen Umlagerung, wohl aber dann, wenn ich einen Durchgang durch den flüssigen Zustand annehme.“

Danach steht und fällt für v. DRYGALSKI die Erklärung des Kornwachsthums durch vorübergehende Verflüssigung mit seiner Erklärung über die Ursache der orientirten Lagerung der Gletscherkörner in den geschichteten Theilen. Diese ist nun nach v. DRYGALSKI dadurch bedingt, dass das Schmelzwasser in ihnen unter Druck wieder gefroren ist, und zwar soll der Druck hier auf die sich ausscheidenden Eiskrystalle ebenso orientirend gewirkt haben wie bei der Teicheisbildung, wo er eintritt, nachdem die Wasserfläche durch eine zusammenhängende Eisschicht hermetisch abgeschlossen ist. Da hier somit der Angelpunkt der v. DRYGALSKI'schen Auffassung liegt, muss ich auf den Vorgang des Gefrierens in Teichen nochmals zurückkommen.

Der in ringsum geschlossenen Wassermassen beim Gefrieren entstehende Druck ist richtungslos, aber natürlich zu den Wandungen, also auch zur Unterfläche des Eises, überall

---

<sup>1</sup> Ich citire die Stelle jetzt vollständig, da v. DRYGALSKI meine Bemerkungen zu derselben auf p. 74 seiner Erwiderung trotz des Gebrauchs von Anführungszeichen weder wörtlich noch sinngemäss wiedergegeben hat. — Der hier gesperrt gedruckte Theil des Citats ist es auch bei v. DRYGALSKI.

senkrecht<sup>1</sup>. Wie aber ein solcher Druck die Orientirung der flüssigen Theile bei ihrer Anordnung zu Krystallen beeinflussen soll, ist mir, ich kann es nur wiederholen, unverständlich. Da die feste Eisdecke nach v. DRYGALSKI lediglich insofern von Einfluss sein soll, als sie die Druckrichtung bestimmt, wird man sie, ohne an der Wirkung etwas zu ändern, auch durch andere feste Körper ersetzen dürfen, bei denen ja auch die Druckrichtung senkrecht zur Oberfläche liegen wird. Lässt man nun aber z. B. hermetisch verschlossene, mit Wasser gefüllte starkwandige Flaschen etc. zerfrieren, so findet man in den cylindrischen Querschnitten des Eises auch nicht die Spur einer regelmässigen krystallographischen Orientirung desselben gegenüber der Wandung. Auch sonst ist bei Krystallausscheidungen unter hohem Druck niemals Derartiges beobachtet, obwohl bei den in der Tiefe erstarrenden Gesteinen in der Nähe der Saalbänder, ebenso bei künstlichen Nachbildungen von Mineralien unter hohem Druck, bei den Neubildungen unter den Tiefseesedimenten Gelegenheit genug dazu gegeben wäre.

v. DRYGALSKI wird zu seiner Annahme u. A. dadurch geführt, dass die senkrecht zur Oberfläche stengligen Individuen einer dickeren Teicheisscholle sich nicht von ihrer Oberfläche bis zur Unterfläche verfolgen lassen, woraus er dann schliesst, dass die unteren Theile unabhängig von den oberen gewachsen seien. Indessen ist ein solches Nichtzusammenhängen an den zerfallenden Eismassen — denn nur an diesen treten die Grenzen der Individuen hervor — gar nicht mit einiger Sicherheit festzustellen. Geradeso wie im Dünnschliff schriftgranitischer oder ophitisch struirter Gesteine Partien eines Minerals, die durch gleiche Auslöschung, gleiche Lage der Spaltrisse etc.

<sup>1</sup> Sehr gross kann dieser Druck in natürlichen Becken wegen der Störungen der Krystallisation an den Ufern etc. natürlich nicht werden. Ein Druck von auch nur einer Atmosphäre dürfte bei grösseren Becken auch aus dem Grunde kaum vorkommen, weil er alsbald zu einer Durchbiegung der Eisdecke nach oben führen würde gleich derjenigen einer gleich ausgedehnten nur an den Rändern unterstützten, sonst ganz hohl liegenden Eistafel, die nicht nur ihr eigenes Gewicht zu tragen hat, sondern überall noch mit einer Schicht von 76 cm Quecksilber belastet ist. Der nächste Effect eines solchen (von unten kommenden) Druckes wäre vermuthlich die völlige Lossprengung der Eisdecke von den Ufern.

sich als demselben Individuum angehörig erweisen, völlig voneinander getrennt erscheinen können, kann dies auch auf Querschnitten von Eis, und zwar wegen der sehr viel roheren Beobachtungsmethode, offenbar noch viel leichter der Fall sein. (Es ist aber allerdings zu erwarten, dass bei dem ungestörten und langsamen Wachsthum an der Unterseite grösserer Eisdecken die schon an der Oberfläche überwiegende Orientirung der Individuen nach unten immer mehr die Herrschaft gewinnen wird, vergl. darüber p. 93 Anmerkung.)

Aber selbst wenn v. DRYGALSKI'S Beobachtungen in diesem Punkte unanfechtbar wären, würde daraus noch keineswegs folgen, dass nun der Druck die Ursache der orientirten Stellung der Eisindividuen wäre. Es ergibt sich vielmehr, wie schon früher betont wurde, dass der Druck gar keine nothwendige Bedingung für jene Orientirung ist, denn sie zeigt sich ebenso bei künstlich offengehaltenen wie ganz zugefrorenen Teichen, sie findet sich bei letzteren auch ganz ungestört durch die ganze Dicke des Eises, obwohl der Druck während des Gefrierens wiederholt gleich Null wird, nämlich stets, wenn die Eisdecke bei einer längeren Frostperiode von innen gesprengt wird. Andererseits lässt sich zeigen, dass Wachsen unter Druck die geforderte Orientirung auch dann nicht nach sich zieht, wenn die feste Wand nicht Glas, sondern Eis ist, letzterem also Gelegenheit gegeben ist, unter Druck fortzuwachsen. Es wurde dazu folgender Versuch angestellt:

In der Wasserfläche des Gefrierbottichs wurde in der Mitte eine dicke Platte optisch einheitlichen Eises so zum Schwimmen gebracht, dass die obere ebene Fläche, auf der wie gewöhnlich die optische Axe senkrecht stand, horizontal lag, während zugleich in die untere Fläche derselben Platte durch warme runde Metallstücke eine Menge Vertiefungen eingeschmolzen wurden, so dass die Unterfläche schliesslich ganz unregelmässig gestaltet war; rund herum wurde eine Menge unregelmässig klein geschlagenen Eises auf dem Wasser zum Schwimmen gebracht und das Ganze bei starkem Frost gefrieren gelassen. Es bildete sich bald ein hermetischer Verschluss der Wasserfläche, wie sich auch daraus ergab, dass die Eisdecke mehrere Male während der folgenden Tage von innen aufgesprengt wurde. Als das seinen Grenzen nach

markirte mittlere Eisstück nach mehreren Tagen von dem übrigen Eis wieder getrennt wurde, zeigte sich, dass die neu angewachsenen Theile seiner Unterfläche trotz ihrer auch jetzt noch unregelmässigen Form alle die gleiche und dieselbe Orientirung hatten wie der ältere Theil, nämlich die optische Axe senkrecht zur Oberfläche, obwohl der Druck im Wasser jetzt alle möglichen Orientirungen gehabt hatte, nur nicht die parallel zur optischen Axe, welche nach v. DRYGALSKI das Wachsthum in dieser Richtung bewirken soll. Die um das mittlere grössere Eisstück schwimmenden kleineren hatten dagegen ein ganz wirres Aggregat geliefert, obwohl seine Unterfläche fast ganz eben geworden war und der Druck hier also wenigstens in den letzten Stadien des Wachstums die beste Gelegenheit gehabt hätte, Eis von der Orientirung des Teicheises zu liefern<sup>1</sup>. Es liegt mithin gar keine Veranlassung vor, mit v. DRYGALSKI den Druck als Ursache der orientirten Stellung des Teicheises anzunehmen, er kann es vielmehr nach Vorstehendem gar nicht sein, während nichts im Wege steht, zuzugeben, dass die Orientirung dadurch zu Stande kommt, dass die in ruhigem Wasser horizontal mit

---

<sup>1</sup> Dass auch in solchen wirren Eisaggregaten bei länger andauerndem Wachsthum diejenigen Individuen zur Vorherrschaft gelangen, deren Basis der unteren Gefrierfläche, also der horizontalen, parallel liegt, ist, wie schon oben angedeutet, wohl möglich und sogar deshalb wahrscheinlich, weil die Basisfläche in allen Krystallisationen des Eises vorherrscht, vermuthlich deshalb, weil sie den Angriffen des Wassers (als Flüssigkeit und Dampf) gegenüber von allen Krystallflächen bei Weitem die widerstandsfähigste ist. Es zeigt sich dies in der Form der stets nach (0001) tafeligen oder (z. B. bei Raufrost) wenigstens nach einer Richtung in (0001) stängeligen Schneekrystalle, ebenso in der Form der sogen. Eisblumen an Fensterscheiben (deren Blättchen und Fiederchen nach einer Richtung in (0001) gestreckt sind), endlich in der Form der TYNDALL'schen Schmelz- (d. h. Ätz-) Figuren. Die einzige mir bekannte Ausnahme von dieser Form bilden die klaren Eiskugeln, welche zuweilen, vielleicht bei raschem Umschlag der Witterung, fallen. Manche (z. B. am 3. Januar 1900 hier beobachtete) bestehen wie die von RINNE (dies. Jahrb. 1897. I. 259) beschriebenen, aus wenigen unregelmässig gegeneinander abgegrenzten Individuen, in anderen (z. B. hier im Spätherbst 1898 gefallenen) war jede Kugel ganz einheitlich. Sie mögen vielleicht, wie RINNE annimmt, aus unterkühlten und rasch erstarrten Regentropfen entstanden sein.

der Basis schwimmenden Eistäfelchen in dieser Orientirung nach unten weiterwachsen.

Wie nun gar der Druck in der Tiefe des Gletschers dazu führen soll, die Orientirung beim Wiedergefrieren des Druckschmelzwassers zu bestimmen, wo er doch gegenüber den bis dahin wirr durcheinander gelagerten und ganz unregelmässig begrenzten Eisindividuen nicht krystallographisch orientirt ist, das wäre auch dann noch ganz unverständlich, wenn man v. DRYGALSKI's irrthümlicher Anschauung hinsichtlich des Teicheises beipflichten könnte.

Ich glaube damit hinreichend gezeigt zu haben, dass zwar nicht die Annahme des Kornwachsthums mittelst Druckschmelzung hinfällig ist, wohl aber v. DRYGALSKI's „positiver Grund“ dafür.

Dagegen sehe ich auch noch in einer anderen, das Kornwachsthum betreffenden Frage einen erheblichen Unterschied zwischen v. DRYGALSKI und mir. Die „Verflüssigungen“, welche p. 487 des Grönlandwerkes im Unterschied von FOREL, HAGENBACH-BISCHOF und EMDEN angenommen werden, sollen „innen selbst entstehen und dahin geführt werden, wo ein genügender Kälteverrath vorhanden ist“<sup>1</sup>. Dieser Kälteverrath soll während des Winters in jenen Theilen des Eises aufgespeichert werden, welche, wie z. B. am Rande, der Druckschmelzung nicht selbst unterliegen (p. 501). In diese wird das in den mittleren tieferen Theilen durch Druck verflüssigte Wasser hineingepresst, kommt zum Gefrieren, giebt dabei Wärme ab und diese theilt sich beim Aufsteigen den randlichen Theilen mit und bewirkt in ihnen Umkrystallisationen. Zur Erklärung des Kornwachsthums werden also Wärmeschwankungen durch Transport von Schmelzwässern angenommen. Ob dies den Thatsachen entspricht, ob das Eis dazu hinreichend imbibitionsfähig ist<sup>2</sup>, ob eine Aufpressung von Schmelzwasser in höhere Theile des Gletschers möglich ist, ob die Innentemperatur des Grönlandeises hoch und die Schmelzwassermenge gross genug dazu ist, mag einstweilen

<sup>1</sup> Sperrdruck wie im Original.

<sup>2</sup> p. 497 wird angenommen, dass gesundes Gletschereis einer Durchtränkung mit Schmelzwasser nicht zugänglich ist.



dahingestellt bleiben, jedenfalls ist aber in diesem ganzen Prozesse von Schwankungen des Druckes von Korn zu Korn, die nach meiner Auffassung für ihr Wachsthum so wesentlich sind, gar keine Rede. Meiner Ansicht nach rührt das Grösserwerden des Gletscherkornes vom Firn bis zur Gletscherstirn daher, dass die grösseren Körner das Schmelzwasser der kleineren an sich ziehen, bei v. DRYGALSKI wird dagegen p. 496 ausgeführt, dass das Wachsthum „nur bis zu einer bestimmten, verhältnissmässig niedrigen Grenze geht, welche unter Umständen schnell erreicht ist und schon an der Oberfläche häufig gefunden wird, und nicht ein ständiges allgemeines Wachsthum stattfindet“.

Noch viel weniger kann ich v. DRYGALSKI darin beipflichten, dass die Kornstructur für die Gletscherbewegung gleichgültig ist, die Gletscher sich also ebenso bewegen würden, wenn sie aus nur einem einzigen oder wenigen riesigen Eisindividuen beständen. Da es nach v. DRYGALSKI's Erwiderung p. 84 scheinen könnte, als hätte ich seine Darlegungen in dieser Hinsicht missverstanden, gebe ich ihm wieder selbst das Wort (p. 525): „... und auch die Kornstructur als solche muss dabei [nämlich bei der Eisbewegung] als unwesentlich erscheinen, wie auch EMDEN betont, weil die nachweisbaren Umlagerungen sich nicht an den Korngrenzen vollziehen, sondern ganze Kornsysteme betreffen. Die vollkommene Umkrystallisation in den Schichten ist dafür der beste Beweis . . .“ Während also der Gletscher nach meiner Auffassung erst durch seine Kornstructur gleichsam zu einem Wesen wird, das „100 Gelenke zugleich“ regt, und während erst dadurch bei der Kleinheit des einzelnen Kornes im Verhältniss zum ganzen Gletscher jene dem Fliessen vergleichbare Bewegungsfähigkeit entsteht, der Grad der Beweglichkeit daher auch durch die Korngrösse mit bedingt erscheint, ist die Kornstructur nach v. DRYGALSKI bei der Mechanik der Eisbewegung „unwesentlich“<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Ich gehe auf v. DRYGALSKI's Widerlegung, soweit sie meine Kritik der Structur des Meereises und die FOREL'sche Streifung betrifft, nicht ein, da erstere für die Theorie der Gletscherbewegung gleichgültig und eine Entscheidung über die Natur der FOREL'schen Streifen vorläufig nicht möglich ist.

Nach dem Vorstehenden kann ich endlich nicht zugeben, wie v. DRYGALSKI p. 72 seiner Erwiderung meint, dass seine Darlegungen durch mich höchstens erweitert, nicht aber als haltlos oder unrichtig erwiesen seien. Der Satz, in welchem v. DRYGALSKI zum Schluss aller seiner Ausführungen seine Meinung über die Ursache der Bewegungsfähigkeit des Gletschereises zusammenfasst, und dem man demnach wohl eine besondere Bedeutung beilegen darf, lautet (p. 526): „. . . bin ich zu der Ansicht gelangt, dass die Eisbewegung ganz allgemein und von wenigen Ausnahmefällen abgesehen, die sich, wie die Niederbrüche des Hochlandeises, von vornherein als anderweitige Erscheinungen charakterisiren, auch ausschliesslich auf einem steten Wechsel des Aggregatzustandes beruht.“ Hier stellt also v. DRYGALSKI keineswegs, wie es p. 72 seiner Widerlegung heisst, bei der Bewegungsmechanik des Eises Druckverflüssigung und Regelation „in den Vordergrund“, sondern andere wesentliche Factoren, Kornstructur und Plastizität erscheinen ausgeschlossen.

Ich stimme zum Schluss darin v. DRYGALSKI ganz bei, wenn er in der Einleitung zum Grönlandwerk p. 9 bemerkt, dass Temperaturuntersuchungen in jeder Beziehung in den Vordergrund treten müssen, wenn man die Frage nach der Ursache der Gletscherbewegung entscheiden will. Eine Abschätzung der bewegenden Factoren wird gerade beim Inlandeis ohne Kenntniss seiner Innentemperatur gar nicht möglich sein, wengleich Structuruntersuchungen, wie ja gerade aus v. DRYGALSKI's Beobachtungen hervorgeht, ebenfalls von grosser Bedeutung werden können. Die mittlere Jahrestemperatur liegt in den inneren Theilen Grönlands erheblich unter  $0^{\circ}$ , die Temperatur des Eises bis zu einer gewissen Tiefe also ebenfalls. v. DRYGALSKI bemerkt p. 472, dass in einer Tiefe, welche 30 m kaum überschreiten dürfte, auch die jährlichen Temperaturschwankungen nicht mehr bemerkbar sein werden, in dieser Tiefe wird also constant die mittlere Jahrestemperatur herrschen<sup>1</sup>, für welche v. DRYGALSKI p. 473 —  $20^{\circ}$  annimmt<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Genau genommen eine etwas höhere, entsprechend der thermischen Tiefenstufe des Eises.

<sup>2</sup> Sollten noch niedrigere Temperaturen beim Inlandeis in Frage kommen, so wären die Angaben TAMMANN'S (WIEDEM. Ann. d. Phys. u.

Es wird nun zunächst von der Wärmeleitungsfähigkeit des Eises abhängen, in welcher Tiefe Temperaturen von ca. 0° erreicht werden, für welche ja praktisch (nämlich bei Eismächtigkeiten bis zu etwa 2000 m, deren Druck den Schmelzpunkt um etwa 1,35° erniedrigen würde) allein Druckverflüssigungen in Frage kommen. MIDDENDORF<sup>1</sup> beobachtete in dem gefrorenen Boden von Jakutsk auf je etwa 15,4 m eine Temperaturzunahme um 1° C., nimmt man (was allerdings höchstens eine rohe Annäherung bedeutet) dieselbe Ziffer für das Gletschereis an, so würde (im Innern Grönlands) erst in einer Tiefe von etwa 300 m Druckverflüssigung in Frage kommen können — wenn der Druck sich gleichmässig vertheilt und anderweitige Wärmezufuhr durch Wasser etc. nicht stattfindet. Jedenfalls scheint mir aus dieser überschläglichen Rechnung hervorzugehen, dass im Inlandeis Grönlands Translationen bis zu einer nicht unerheblichen Tiefe der überwiegende Factor bei der Eisbewegung sein können, da sie schon in 17 m Tiefe bei einer Korngrösse von 1 qcm beginnen<sup>2</sup>.

Dass Translationerscheinungen im Inlandeis so deutlich, in den Gletschern der Alpen dagegen anscheinend viel seltener sind, mag z. Th. daran liegen, dass die Mächtigkeit der alpinen Gletscher in der Nähe ihrer Stirn, wo das Eis auch in den tieferen Theilen einer Untersuchung seiner Structur besonders bequem zugänglich ist, meist nur noch eine geringe, seine fließende Bewegung daher auch nur noch unbedeutend ist, während bei den in das Meer auslaufenden und abbrechenden Gletschern Grönlands die fließende Bewegung bis zuletzt eine lebhafte bleibt<sup>3</sup>. Ausserdem mag die deutlichere Translation

Chem. 68. 568, 1899) zu berücksichtigen, nach denen zwischen — 30° und — 40° schon kleine Druckänderungen erheblichen Einfluss auf den Schmelzpunkt des Eises gewinnen.

<sup>1</sup> Nach der Angabe bei PESCHEL-LEIPOLDT, Physische Erdkunde. I. 187.

<sup>2</sup> Das Zurücktreten der Druckschmelzung könnte der Grund dafür sein, dass das Korn der grönländischen Gletscher kaum grösser ist als das viel kleinere alpine Gletscher.

<sup>3</sup> Bemerkenswerth erscheint, dass A. HAMBERG (nach dem Ref. in dies. Jahrb. 1899. II. -45-) zu dem Resultat kommt, dass bei jenen arktischen Gletschern, deren Eis Parallelstructur zeigt, die Bewegung in der Weise erfolge, dass die eine Schicht über die andere hingleite. Das entspricht genau der aus der Translation und Parallelstructur der grönländischen Gletscher für diese von mir gefolgerten Bewegungsart.

hier darauf beruhen, dass das Eis einen grösseren Weg und vermuthlich auch unter grösserem Drucke zurückgelegt hat, das Korn aber trotzdem eher kleiner als grösser ist als in den Alpengletschern.

Das Inland- wie das Gletschereis sind hinsichtlich ihrer Schieferung wie ihres grösseren Kornes gegenüber dem Schnee und Firn etwa zu parallelisiren mit jenen stark gestörten oder in hohe geothermische Tiefenstufen versenkten Theilen der Erdrinde, welche durch regionale Metamorphose ausgezeichnet sind, und wenn man übereinkäme, die Schnee- und Firnmassen den Sedimenten (Präcipitaten) zuzurechnen, müsste man das Inland- und Gletschereis als krystallinische, aus ihnen durch Metamorphose (Umkrystallisation) hervorgegangene Schiefer betrachten. Vielleicht erinnern sich die alpinen und nordischen Geologen einmal, dass auch das Eis gesteinsbildend ist, und widmen ihm ähnlich eingehende Untersuchungen, wie sie in den letzten Decennien so vielen anderen Gesteinen zu Theil geworden sind, deren Verbreitung gegenüber der des Eises z. Th. nur eine sehr unbedeutende ist.

Königsberg i. Pr., 9. April 1900.

---