

ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 36.

1. *Über die Plastizität des Eises;*
von Hans Hess.

Gelegentlich eines Vortrages über „Probleme der Gletscherkunde“¹⁾ konnte ich über die vorläufigen Ergebnisse einer Versuchsreihe berichten, die ich 1906 als eine Art Fortsetzung früherer Untersuchungen²⁾ ausgeführt habe. Der Zweck der Versuche von 1906 war die Erkundung der Ursache davon, daß die Ausflußgeschwindigkeit des Eises bei konstantem Druck und konstanter Temperatur stetig wächst; er wurde aber damals nicht erreicht. Zur Fortsetzung der Versuche wurde mir 1908 vom Kgl. bayr. *Staatsministerium* ein besonderer Betrag für Anschaffung von Preßformen, Umgestaltung der hydraulischen Presse usw. genehmigt. Außerdem erhielt ich durch Hrn. Brauereibesitzer K. Hürner in Ansbach die Gelegenheit, die Arbeiten im Kühlraum seiner Brauerei auszuführen. Nach beiden Stellen bin ich zu besonderem Danke verpflichtet, den ich auch hier gerne erstatte.

Die verwendete hydraulische Presse ist eins der größeren Instrumente dieser Art, die für den Unterricht gebraucht werden. Sie hat 46,4 mm Kolbendurchmesser, eine Hubhöhe von 18 cm und ist mit einem bis 350 kg/cm² zeigenden Manometer (Schäfer & Budenberg-Magdeburg) ausgestattet. Dies Manometer wurde 1908 vor und nach der Versuchsreihe, über deren Ergebnisse hier berichtet werden soll, durch Belastungen an Eisenstangen geprüft. Seine Angaben waren beide Male gleichartig zwischen 7,5 und 10 Proz. zu groß. Die hauptsächlich verwendeten Preßformen waren zylindrische Eisenstücke von 70 mm Außendurchmesser, 12 cm Höhe und 28,0 mm weiter axialer Bohrung von 90 mm Tiefe. In diese Bohrung

1) Vgl. H. Hess, Zeitschrift f. Gletscherkunde 1. p. 249. 1906.

2) Vgl. H. Hess, Ann. d. Phys. 8. p. 405. 1902.

waren die Stempel möglichst genau eingeschliffen, durch welche der Druck auf das in der Form erzeugte Eis übertragen wurde. Die Stempel hatten demnach fast genau 28,0 mm Außendurchmesser. Einer füllte den Lochquerschnitt der Form vollständig aus; die anderen waren der Länge nach durchbohrt und zwar hatten diese Bohrungen 7,95; 11,10; 16,10; 19,25; 22,35 mm Durchmesser. Durch diese axialen Löcher konnte das unter den Ringflächen der Stempel gepreßte Eis abfließen; die entstandenen Eiskerne gingen durch ein in der Deckplatte der Presse angebrachtes Loch in die Höhe. Diese Deckplatte war mit dementsprechend kräftigen Versteifungsrippen versehen, damit sie den großen Drucken widerstehen konnte. — Außer diesen Preßformen kamen noch eine mit 40,4 mm Bohrung und vollem Stempel und die bereits 1906 gebrauchte kleine Form von 10,2 mm Bohrung und vollem, dicht anschließendem Stempel, dann eine Holzform und eine mit Glasfenster versehene rechteckige, aus drei zusammengeschraubten Teilen bestehende Eisenform in Verwendung (vgl. u.). Die zylindrischen Eisenformen waren während der Pressungen von eng anschließenden doppelwandigen Blechgefäßen umgeben, in denen Kältemischungen geeigneter Art (meist Salzwasser mit Eis) untergebracht wurden, so daß das ungepreßte Eis längere Zeit auf fast konstanter Temperatur gehalten werden konnte. Für diese Bäder wurde fast immer die Kältemischung verwendet, in welcher der in der Form enthaltene Eiskern gebildet wurde. In anderen Fällen wurde das Eis in der Form ca. $\frac{1}{2}$ Stunde auf der Temperatur des Bades gehalten, bevor die Pressungen begannen. Während jedes Versuches wurde die Badtemperatur mehrmals abgelesen.

Die axial durchbohrten Stempel, wie sie A. v. Obermayer¹⁾ anwandte, haben gegenüber der früher von mir verwendeten Form mit seitlichen Ausflußöffnungen den Vorzug, daß die Deformation des gedrückten Eises eine einfachere ist, also leichter verfolgt werden kann; deshalb habe ich die Einrichtung übernommen. Die Stempel ohne Durchbohrung bieten nahezu den Grenzfall, daß das Eis und das bei den Pressungen aus ihm entstehende Wasser am Ausweichen gehindert sind.

1) Vgl. A. v. Obermayer, Wiener Ber. 113, IIa. April 1904.

Doch fließt zwischen Stempel und Form immer etwas ab. Bei der Durchführung der Versuche von 1906—1907 wurde ich von meinem Schüler Hrn. Johannes Heckel unterstützt, dem hauptsächlich die Beobachtung der Manometerangaben und das Aufschreiben der von mir zugerufenen Zahlen über das Eindringen der Stempel und der Zeitangaben zufiel. Diese Arbeit übernahm 1908 mein ältester Sohn, dessen Zuverlässigkeit, ebenso wie die seines Vorgängers, ausreichende Proben bestand. Ich selbst habe die Pressungen so ausgeführt, daß die Schwankungen des Manometers während einer Abwärtsbewegung des Pumpenkolbens möglichst klein (bei großen Drucken höchstens 10 kg/cm^2 , bei geringeren weniger) waren. Die für je eine Minute Versuchsdauer aufgeschriebenen Mittelwerte der Drucke wurden stets so berechnet, daß dem Höchstdruck, der in dieser Zeit auftrat, das größere Gewicht beigelegt wurde. Die Vorrückungsgeschwindigkeit des Stempels wurde dadurch bestimmt, daß von 30 zu 30 Sekunden oder auch von Minute zu Minute die Entfernung zwischen Grund- und Deckplatte der Presse abgelesen wurde.

Das Eis in den Preßformen wurde aus destilliertem Wasser erzeugt, daß nur wenig Luft enthielt. Eine Rostbildung in der Form konnte jedoch nicht völlig vermieden werden. Die dadurch bewirkte Verunreinigung des Eises hat wohl einiges zu den Ungleichartigkeiten der Beobachtungsergebnisse beigetragen.

Die sehr wichtige direkte Bestimmung der Temperatur des unter Druck befindlichen Eises konnte ich leider nicht durchführen, weil mir sowohl ein geeignetes Galvanometer, dessen Ausschläge ein in den Preßstempel eingebautes Thermoelement veranlaßt, fehlte und weil ich auch keinen zweiten Gehilfen zur Verfügung hatte. Der Versuch, der kleinen Presse ein sicher selbstschreibendes Manometer anzufügen, das den einen Gehilfen teilweise ersetzt hätte, brachte kein brauchbares Ergebnis. Bei den rasch verlaufenden Pressungen war es natürlich unmöglich, das unter Druck befindliche Eis auch nur annähernd auf konstanter Temperatur zu erhalten. Die zwischen Bad und gepreßtem Eis entstandene Temperaturdifferenz veranlaßte aber bei den Eisenformen immer eine Wärmeströmung. So mußte also die Temperatur des Eises in der Form stets zwischen der Badtemperatur und der dem Druck entsprechen-

den Schmelztemperatur des Eises liegen. Wie die wahrscheinliche Eistemperatur indirekt ermittelt wurde, ist weiter unten näher erläutert.

Würde keine Wärmeleitung stattfinden, so müßte das unter Druck stehende Eis adiabatisch seine Temperatur längs der Schmelzkurve erniedrigen, wenn bei den Pressungen durch den eindringenden Stempel das Eis verflüssigt wird. Wäre die Wärmeleitung so günstig, daß jede durch Druck bewirkte Temperaturänderung sofort durch Wärmezufuhr aufgewogen würde, so würde bei jeder Temperatur des Eises die kleinste Drucksteigerung über den Schmelzdruck genügen, um den Stempel mit beliebiger Geschwindigkeit eindringen zu lassen. Für diesen isothermen (idealen) Vorgang würde die Schmelzkurve völlig ausreichen, um den Übergang von Eis in Wasser unter Druckwirkung zu beschreiben. Im praktischen Falle aber wird die Schmelzkurve durch eine Schmelzfläche ersetzt, die erst für große Stempelgeschwindigkeiten sich dem Zylinder anschmiegt, dessen Leitlinie die Schmelzkurve ist, entlang dessen Mantellinie die Schmelz(Stempel-)geschwindigkeit sich ändert. Die sichere Kenntnis der Schmelzkurve des Eises war demnach eine notwendige Voraussetzung für die Beurteilung meiner Versuchsergebnisse.

Da Hrn. Tammanns Versuche mit Stempeln ausgeführt wurden, für welche der Querschnitt der Druckfläche etwa $\frac{13}{14}$ von dem der Preßform war, da also hier auch bei hohen Drucken ein Fließen, aber nicht notwendigerweise ein Schmelzen des Eises eintreten mußte, so glaubte ich die von Tammann experimentell gefundene Schmelzkurve stimme mit der theoretischen nicht vollständig überein; denn diese würde erst bei einem völlig dicht schließenden Stempel erhalten. Ich habe deshalb zunächst eine *Berechnung der Schmelzkurve* in folgender Weise durchgeführt. Aus dem zweiten Hauptsatz folgt die bekannte Gleichung

$$(I) \quad \frac{\partial q}{\partial t} = c - C + \frac{q}{T},$$

worin T die absolute Temperatur eines Gemisches von Eis und Wasser, q die Schmelzwärme, C die spezifische Wärme des Eises und c die spezifische Wärme des Wassers bedeutet.

Für die spezifischen Wärmen c und C besteht nun die Beziehung:

$$(II) \quad \begin{cases} c - C = c_p - C_p - \frac{\varrho}{\sigma - s} \cdot \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} - \frac{\partial s}{\partial t} \right) \\ \quad \quad \quad = c_p - C_p - \varrho \cdot f(t), \end{cases}$$

wobei c_p und C_p die spezifischen Wärmen bei konstantem Druck, σ und s die spezifischen Volumina von Wasser und Eis bedeuten. Die Schmelzwärme ϱ ist in diesen Gleichungen mit dem der Temperatur T entsprechenden Werte einzusetzen; sie ist selbst eine Funktion der Temperatur und daher

$$(III) \quad \varrho = \varrho_0 + t \cdot \frac{\partial \varrho}{\partial t}$$

in erster Annäherung.

Die Gleichungen (I), (II) und (III) liefern also:

$$(IV) \quad \frac{\partial \varrho}{\partial t} = \frac{c_p - C_p - \varrho_0 \left(f(t) - \frac{1}{T} \right)}{1 + t \left(f(t) - \frac{1}{T} \right)}.$$

Zur Bestimmung der Werte von c_p wurde die für die spezifische Wärme des Wassers von Barnes aufgestellte Formel

$$c_p = 0,99733 + 0,0000035(37,5 - t)^2 + 0,0000001(37,5 - t)^3$$

benutzt, welche nach Barnes und Cooke¹⁾ auch für unterkühltes Wasser gilt. Durch Extrapolation wurden aus den Versuchsergebnissen von Regnault und von Person für die spezifische Wärme des Eises die C_p -Werte erhalten. Der Ausdehnungskoeffizient des unterkühlten Wassers wurde nach Weidners²⁾ ausgeglichenen Messungsergebnissen benutzt; während Plückers, Petterssons und Dewars Messungen über die Ausdehnung des Eises zur Ermittlung von s_t verwendet wurden. Es ergaben sich

$$\sigma_t = 1,000136 - 0,000062 t + 0,000011 t^2,$$

$$s_t = 1,091147 + 0,000187 t + 0,000001 t^2,$$

also

$$\sigma_t - s_t = -0,091011 - 0,000249 t + 0,000010 t^2$$

1) H. F. Barnes u. L. Cooke, Phys. Rev. 15. p. 65. 1902; auch Chwolson's Lehrbuch 3. p. 185.

2) Weidner, Pogg. Ann. 29. p. 300. 1866; Chwolson's Lehrbuch 3. p. 134.

und

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} - \frac{\partial s}{\partial t} = -0,000249 + 0,000020 t.$$

So wurden die in Tab. 1 enthaltenen Einzelwerte von $\partial \varrho / \partial t$ und die von ϱ gefunden, wobei $\varrho_0 = 79,25$ gesetzt wurde. [Dieser Regnaultsche Wert verdient nach Leduc¹⁾ den Vorzug unter den verschiedenen Messungsergebnissen.] Die bekannte Beziehung

$$(V) \quad \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\varrho}{A \cdot T \cdot (\sigma - s)} \quad \text{bzw.} \quad p' = \frac{426 \cdot \varrho}{10000 \cdot T(\sigma - s)}$$

endlich, in welcher p den Druck, A das Wärmeäquivalent bedeuten, wurde zur Ermittlung der Druckänderung p' benutzt, die nötig ist, damit die Temperatur des Eis-Wassergemisches um 1° geändert werde.

Tabelle 1.

t	c_p	C_p	$\partial \varrho / \partial t$	ϱ	p'	p
0°	1,009	0,538	0,544	79,25	136,2	0
— 1	1,011	36	532	78,71	136,0	136,2
— 2	1,012	34	518	78,18	136,0	272,2
— 3	1,013	32	504	77,66	135,8	408,2
— 4	1,015	30	492	77,16	136,0	544,0
— 5	1,016	28	475	76,67	136,0	680,0
— 10	1,023	18	400	74,45	138,0	1364,0
— 15	1,030	08	327	72,63	141,0	2060,0
— 20	1,037	499	200	71,32	146,5	2776,0

Den auf diesem Wege schrittweise berechneten Werten des Überdruckes p haftet noch eine nicht unbeträchtliche Unsicherheit an, die hauptsächlich auf die geringe Genauigkeit zurückzuführen ist, mit welcher die Änderung der spezifischen Wärme des Wassers angegeben werden kann. Die Bestimmungen von Barnes z. B. ergeben für $t = -5^\circ$ den Wert $c_p = 1,0158$, seine Formel liefert $c_p = 1,011$, während aus den von Marinelli ausgeführten Messungen, die der Formel von Bartoli und Stracciati entsprechen, $c_p = 1,0099$ folgt. In obiger Tab. 1 wurde Barnes' Beobachtungsergebnis benutzt. Im ganzen zeigt sich, daß die berechnete Schmelzkurve des Eises von 0 bis -5° als gerade Linie

$$p = -136 t.$$

1) A. Leduc, Soc. franç. de phys. 2./II. 1906.

von -5 bis -20° als schwach gekrümmte Kurve

$$p = -136t + 0,04t^2$$

mit guter Annäherung angegeben werden kann. Nur zwischen -3 und 0° ist die Schmelzkurve schwach gegen die Druckachse gekrümmt; bei tieferen Temperaturen wendet sie sich von dieser Achse weg. Dieser Verlauf bleibt derselbe, wenn man die innerhalb der bisherigen Beobachtungsergebnisse über die spezifische Wärme des Eises zulässigen Änderungen in den oben gemachten Annahmen vornimmt. Auch die Annahme C_p für 0° sei noch beträchtlich größer als 0,538, etwa gleich 0,58, die noch am ehesten zulässig erscheint, würde in den p -Koordinaten der Schmelzkurve nur unwesentliche Verschiebungen von ca. 1 Proz. bewirken, ohne den Krümmungssinn der Kurve zu ändern.

Die von Tammann gegebene Interpolationsformel

(a)
$$p = -140,0t + 2,11t^2,$$

welche seiner experimentell gefundenen Schmelzkurve entsprechen soll, gibt gegenüber der oben „berechneten“ Schmelzkurve Abweichungen zwischen 18 und 30 Proz. nach oben. Sie stimmt auch mit den Tammannschen Beobachtungsergebnissen nicht überein. Diesen paßt sich die durch

(b)
$$p = -129,0t - 1,4t^2$$

dargestellte Kurve entschieden besser an. Sie gibt allerdings gegen die berechnete Schmelzkurve Abweichungen von 11 bis 27 Proz. nach unten.

Man erhält

	aus Tammanns Versuchen	aus Formel (b)	aus Formel (a)	für die ber. Schmelzkurve
für $t = -5^{\circ}$	$p = 615 \text{ kg}$	610 kg	753 kg	680 kg
— 10	1115	1150	1611	1364
— 15	1625	1620	2575	2060
— 20	2042	2020	3644	2776

Die Abweichungen zwischen Tammanns experimentell bestimmten Drucken und denen der berechneten Schmelzkurve sind teils auf die Ungenauigkeiten der für die Berechnung benutzten Konstanten des Eises, zum anderen Teil darauf zurückzuführen, daß die Tammannschen Drucke nicht ganz die Schmelzdrucke sind, weil sie, wie später gezeigt wird, relativ kleinen Schmelzgeschwindigkeiten entsprechen.

Um darüber Aufklärung zu erhalten, ob bei dem die Preßform möglichst dicht schließenden Stempel Wasser oder ein Gemisch von Wasser und kleinen Eispartikeln zwischen Formwandung und Stempel zum Abfließen kam, verwendete ich zunächst eine von zwei Eisenbändern zusammengehaltene Form aus Buchsbaumholz mit ca. 16 cm Außendurchmesser und 27,8 mm Bohrung. Der hölzerne Stempel hatte an den Stirnflächen kurze Eisenschuhe von 27,5 mm Durchmesser. Diese Form und der Stempel wurden vor den Preßversuchen in Leinöl gesotten, so daß sich die Holzporen möglichst gut mit Öl ausfüllten, nachdem vorher die Luft ziemlich gut ausgepumpt war.

Mit dieser Form konnten zwei Versuche ausgeführt werden, die folgende Ergebnisse lieferten:

Tabelle 2.

Versuch I.		Versuch II.	
Eistemperatur $-0,1^{\circ}$.		Eistemperatur 0° .	
Stempelweg mm/min.	Druck kg/cm ²	Stempelweg mm	Druck kg/cm ²
8,5	250	6,5	229
7,0	280	4,0	240
6,0	322	4,5	250
7,0	343	2,0	255
8,0	395	4,0	290
9,0	408	4,0	303
9,0	408	4,0	343
Am oberen Rande des Loches tritt weder Eis noch Wasser aus; aber das Leinöl wurde aus dem Holze herausgepreßt.		4,0	369
		3,5	382
		4,0	382
		4,0	382
		4,0	374
		4,0	358
		4,0	382
		4,5	382
		4,5	395

Beim Nachlassen des Druckes hebt sich die Form vom Preßtisch ab; unter ihr bildet sich ein Eiskern von 3 mm Breite und 10 mm Höhe. Die Form ist zerrissen. Während des Pressens dringt wieder Leinöl aus dem Holz.

Weder beim ersten, noch beim zweiten Versuch kam am oberen Rande der Bohrung dieser Form etwas zum Ausfließen. Man hat daher die stetige Zunahme des Druckes bei fast gleich bleibender Geschwindigkeit des Stempels darauf zurückzuführen, daß das verdrängte Schmelzprodukt teils bei der Entlastung zwischen Stempel und Formwandung fest wurde und zum anderen Teil in die Holzporen eindrang, wo es wahrscheinlich auch fest wurde. Die Pressung des Eises fand bei fast völlig dicht schließendem Stempel und beinahe ohne jede Wärmezufuhr von außen statt (wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit des Holzes). Das Eis mußte also unter dem Druck immer niedrigere Temperaturen annehmen, daher auch die ständige Zunahme des Druckes. Daß diese Temperaturerniedrigung eintrat, zeigt das Gefrieren des durch die zerborstene Form ausdringenden Preßproduktes. Andererseits zeigt das während der Pressungen um die ganze Form herum als feiner Sprühregen austretende Öl, daß in die Poren des Holzes wirklich *Wasser* eingedrungen ist, daß also wirklich das Eis bei den angewandten Drucken verflüssigt wurde.

Um zu sehen, ob diese Verflüssigung auch dann eintritt, wenn das vom eindringenden Stempel verdrängte Material bequemer abfließen kann als in dem Falle der Holzform, ließ ich eine rechteckige Eisenform herstellen, von welcher zwei gegenüber liegende Wände im unteren Teil durch 12 mm starke Glasplatten ersetzt waren. Im oberen Teil der Form wurde der Stempel geführt, der den unteren Teil nur zur Hälfte ausfüllte. Man konnte hier die während der Pressung erfolgenden Vorgänge direkt wahrnehmen. Es zeigte sich an der Unterfläche und an der Seite des eindringenden Stempels ein schmaler, kaum $\frac{1}{2}$ mm breiter heller Streifen, der beim Nachlassen des Druckes fast augenblicklich verschwand. Man konnte außerdem deutlich sehen, daß das Eis dem eindringenden Stempel wie eine Flüssigkeit ausweicht, da die feine Säule, von Luftbläschen und zersplitterten Kristallen, welche die Achse des Eisprismas kennzeichnet, sich abbog und seitlich verschob (vgl. Fig. 1).

Waren die Seitenteile der Form, also auch die Glasplatten, nur 3 mm voneinander entfernt (auch der Stempel hatte dann 3 mm Dicke), so konnte im Polarisationsapparat das farbige

Mosaik verschieden orientierter Eiskristalle wahrgenommen werden. (Bei 6 mm dickem Eis und Stempel war davon nichts zu sehen.) Diese Farben zeigten sich in dem hellen Streifen an den Stempelflächen nicht. Hier tritt also Wasser auf. Bei dem dritten Versuch, den ich mit dieser Fensterform machte, wurde am Manometer ein Druck von 16 kg/cm^2 abgelesen. Unter der $48,4 \text{ mm}^2$ großen Stempeldruckfläche stand also das Eis, das ursprünglich -7° hatte, unter einem Druck von

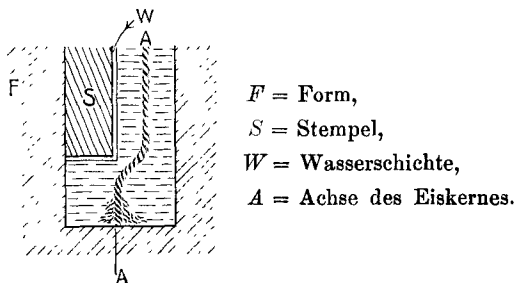


Fig. 1.

rund 560 kg/cm^2 . Als durch Abschluß des oberen Teiles der Form durch den eindringenden Stempel das Eis am Ausweichen gehindert und der Druck auf etwa 700 kg/cm^2 gestiegen war, zerbrachen die Glasplatten und die Experimente mit dieser Form hatten ihr Ende erreicht. Die Existenz der schmalen Wasserschicht am Stempel erscheint mir aber erwiesen und damit die Richtigkeit der Annahme, daß unter dem eindringenden Stempel das Eis verflüssigt wird.

Um einige Sicherheit für die Beurteilung der Temperatur des gepreßten Eises zu erhalten, benutzte ich eine breite Preßform von 40 mm Durchmesser mit möglichst dicht schließendem Stempel. Quer durch den Hohlraum des Preßzylinders zog nahe am Boden ein Messingrohr, in welches das Gefäß eines sehr empfindlichen Thermometers gesteckt war, das zwischen -10 und 0° in Zehntelgrade geteilt war, von denen jeder fast 2 mm umfaßte. Man konnte also Hundertstelgrade ziemlich sicher schätzen. Das Quecksilbergefäß des Thermometers war außen mit Alkohol bzw. mit Quecksilber umgeben, damit die Temperaturänderungen des gepreßten Eises möglichst günstig auf das (nicht mitgepreßte) Thermometer übertragen werden konnten.

Vier Versuche ergaben folgende Ablesungen:

Tabelle 3.

1. Eis von 0°. Lufttemperatur + 1°.

Dauer der Pressung	Stempel- weg	Eis- dicke	Druck kg/cm ²	Ablesung am Thermom. <i>a</i>	Theoret. Schmelz- temp. <i>b</i>	Diffe- renz <i>a-b</i>
30 Sek.	2 mm	19 mm	75	-0,15°	-0,55°	0,40°
30 „	2 „	17 „	106	-0,47	-0,78	0,31
30 „	2 „	15 „	153	-0,65	-1,13	0,48
30 „	2 „	13 „	208	-0,77	-1,53	0,76

2. Eis von 0°. Lufttemperatur + 1°.

20 Sek.	1,5 mm	13,0 mm	128	-0,33°	-0,94°	0,61°
5 „	0,3 „	11,7 „	142	-0,42	-1,04	0,62
30 „	1,0 „	10,7 „	142	-0,65	-1,04	0,39
40 „	1,7 „	9 „	155	-0,75	-1,14	0,39
30 „	2,0 „	7 „	155	-0,82	-1,14	0,32

3. Eis von 0°. Lufttemperatur + 1,5°.

30 Sek.	9 mm	19 mm	240	-0,35°	-1,77°	1,42°
30 „	3 „	16 „	290	-0,78	-2,13	1,35
30 „	4 „	12 „	343	-0,82	-2,45	1,63
30 „	2 „	10 „	393	-1,45	-2,90	1,45
30 „	3 „	7 „	357	-1,85	-2,63	0,78

4. Eis von 0°. Hg am Thermometer. Lufttemperatur + 1,5°.

30 Sek.	3 mm	27 mm	182	-0,53°	-1,34°	0,61°
30 „	3 „	24 „	207	-0,80	-1,52	0,72
30 „	3 „	21 „	215	-0,95	-1,58	0,63
30 „	3 „	18 „	217	-1,05	-1,59	0,54
30 „	3 „	15 „	218	-1,12	-1,60	0,48
30 „	3 „	12 „	225	-1,25	-1,65	0,40

Noch einige solcher Pressungen wurden gemacht, aber die erlangten Resultate scheinen weniger zuverlässig als die der vorstehend mitgeteilten Versuche. Auch hier sind die Zeitbestimmungen und die einzelnen Stempelwege nicht besonders genau. Das ist nicht zu verwundern, wenn man beachtet, daß ich während der Pressungen die Stempelverschiebung, den Gang des Uhrzeigers und hauptsächlich den des Quecksilberfadens im Thermometer zu verfolgen hatte, während

mein Gehilfe, dem die Beobachtung der Manometerschwankungen oblag, außer den hierauf bezüglichen Zahlen auch die ihm von mir zugerufenen zu notieren hatte.

Aus den vier oben mitgeteilten Versuchen ergibt sich, daß die gepreßte Eismasse als Ganzes ziemlich rasch die durch den Druck bewirkten Temperaturänderungen aufnimmt. Doch bleiben die Angaben des Thermometers immer etwas hinter den nach der Theorie zu erwartenden Temperaturen zurück. Das rührt nur teilweise von der Trägheit des Thermometers bzw. von der Leitung aus dem Eis durch Messing und Glas zum Quecksilber des Instrumentes her; zum größeren Teil kommt diese Differenz wohl davon, daß nicht die *ganze* Eismasse die dem Druck entsprechende Temperaturerniedrigung erfährt, oder mit anderen Worten, daß nicht die ganze Eismasse unter dem an der Stempelfläche herrschenden Druck steht. In der Tat zeigen Versuch 2, 3 und 4 ziemlich deutlich, daß jene Differenz um so kleiner wird, je dünner die zwischen Thermometer und Stempel liegende Eisschicht ist. Besonders aus Versuch 4 ergibt sich, daß bei einer Eisdicke 0 auch die Temperaturdifferenz verschwinden würde. Es scheint mir daher die Annahme berechtigt, daß an der Druckfläche des Stempels genau die von der Theorie geforderte, dem Druck entsprechende Temperaturerniedrigung eintritt; in einiger Entfernung von der Druckfläche ist die Temperaturänderung geringer, so daß innerhalb der gepreßten Eismasse ein Temperaturgefälle besteht. Bei kleineren Drucken, bis etwa 150 kg/cm^2 , ist dieses klein, ca. $0,06^\circ$ pro mm; bei zunehmendem Druck wird es größer, etwa $0,17^\circ$ bei 400 kg/cm^2 .

Versuch 2 und 4 zeigen jedoch auch, daß bei annähernd gleichbleibendem Druck die Differenz zwischen den Angaben des Thermometers und der theoretischen Temperaturänderung um so kleiner wird, je länger die Pressung dauert und daß nach etwa 8 Min. (bei Versuch 4) die Differenz verschwinden würde. Diesem Umstand ist wohl die größere Bedeutung beizulegen; er wurde auch bei der Korrektur der Temperaturen beachtet.

Während der vier Pressungen war die Form nicht mit einem Bade umgeben; es wird aber von der etwas über 1° warmen Luft doch wohl immer Wärme an den Preßzylinder

und dann auch an das gedrückte Eis von niedriger Temperatur abgegeben worden sein, so daß auch aus diesem Grunde die Thermometerangaben höher als die zu erwartenden Temperaturen waren.

Um den *Einfluß der Wärmeleitung* zwischen Bad und gepreßtem Eis beurteilen zu können, stellte ich folgende Betrachtung an. An der Stempeldruckfläche herrsche die dem Druck entsprechende Schmelztemperatur; weiter abwärts steige die Temperatur des Eises entsprechend dem vorhin erwähnten Gefälle etwas an. Die Eismasse sei senkrecht zur Druckrichtung in parallele Platten zerlegt, welche ihrer Dicke nach dieselbe Temperatur haben. In radialer Richtung ströme in jede Platte von der Formwandung, die auf der konstanten Temperatur des Bades gehalten sei, Wärme in das Eis, so daß bei stationärem Zustand die Temperatur im Abstand x von der Formwandung durch die Gleichung

$$t = \theta \cdot e^{-ax} \cdot \frac{r}{r-x}$$

gegeben wäre. In dieser bedeutet θ die Temperaturdifferenz zwischen Formwandung und gepreßter Eisschichte, r den Radius der Zylinderöffnung und

$$a = \sqrt{\frac{h}{k} \cdot \frac{u}{q}}.$$

h/k ist das Verhältnis des äußeren und inneren Wärmeleitungsvermögens; es wurde willkürlich gleich $1/30$ genommen. u ist der Umfang, q der Querschnitt eines um x von der Formwandung abstehenden zylindrischen Plattenschnittes, also

$$u = 4(r-x)\pi + 2d, \quad q = 2(r-x)\pi \cdot d$$

und daher

$$\frac{u}{q} = \frac{2}{d} + \frac{1}{(r-x)\pi},$$

so daß

$$a = \sqrt{\frac{1}{30} \left(\frac{2}{d} + \frac{1}{(r-x)\pi} \right)},$$

worin d die Dicke der betrachteten Eisplatte ist. Nimmt man diese klein, $1/10$ bis $1/100$ mm, wobei die größeren Dicken den kleinen Stempelgeschwindigkeiten entsprechen, so kann das Glied $1/(r-x)\pi$ gegen den anderen Summanden vernachlässigt werden. Die *mittlere* Temperatur für die ganze Fläche

des vollen Stempels, sowie die für die Ringflächen der durchlochten Stempel werden dann, wie eine leichte Überlegung ergibt, durch die Gleichung

$$t_m = \int_{x=0}^{x=r-r_1} \theta \cdot e^{-x \sqrt{\frac{2h}{dk}}} \cdot \frac{2r dx}{r^2 - r_1^2}$$

gegeben; man hat also

$$t_m = - \frac{2r}{r^2 - r_1^2} \cdot \theta \cdot \sqrt{\frac{2h}{dk}} \cdot \left(1 - e^{-(r-r_1) \sqrt{\frac{2h}{dk}}} \right),$$

worin r der äußere Radius, r_1 der Innenradius eines Stempelrohres ist. Daraus erhielt ich für Plattendicken von $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{20}$ mm für die Temperaturkorrekturen folgende Verhältniszahlen:

Bohrung in mm	0	8	11	16	19	22
Korrektur in ‰	100	98	95	90	85	75

Zur genaueren Bestimmung der Korrektur für den vollen Stempel wurde t_m für verschiedene Werte von d berechnet; den besten Anhalt gaben jedoch die Resultate der drei Pressungen, welche am 22. und 23. Mai 1908 mit möglichst gleich bleibenden Geschwindigkeiten ausgeführt wurden. Diese Ergebnisse enthält die folgende Tab. 4.

Tabelle 4.

Zylinder mit 28,0 mm Bohrung.

Tag	Bad-temp.	Druck kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer der Pressung	Druck- schmelz- temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
22. V.	0,0	70		30''	0,53	-0,13°
		102		„	0,77	0,40
		150	in 6 Min.	„	1,12	0,70
		200	51 mm	„	1,50	1,05
		270	möglichst	„	2,02	1,50
		320	gleich-	„	2,40	1,92
		375	mäßig	„	2,82	2,40
		410		„	3,08	2,77
		480	0,142	„	3,60	3,35
		525	mm/sec	„	3,95	3,75
		575		„	4,30	4,20
		625		„	4,70	4,70

Tabelle 4 (Fortsetzung).

Tag	Bad-temp.	Druck kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer der Pressung	Druck- schmelz- temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
22. V.	0,0	52		10"	0,39	- 0,10°
		140		"	1,05	0,42
		230		"	1,73	0,88
		280	43 mm in	"	2,10	1,15
		330	2,5 Min.	"	2,48	1,62
		372	sehr	"	2,80	1,95
		425	gleich-	"	3,18	2,39
		475	mäßig	"	3,56	2,55
		500		"	3,75	2,90
		540	0,287	"	4,05	3,30
		560	mm/sec	"	4,20	3,55
		580		"	4,35	3,90
		600		"	4,50	4,10
		630		"	4,73	4,45
		655		"	4,92	4,70
23. V.	0,0	90	0,100	1'	0,67	0,2
		170	0,100	"	1,3	0,8
		212	0,110	"	1,6	1,1
		275	0,100	"	2,1	1,8
		345	0,110	"	2,7	2,4
		383	0,130	"	2,9	2,9

Die unter Benutzung der verschiedenen Hinweise erhaltenen Korrekturwerte sind in Fig. 2 enthalten.

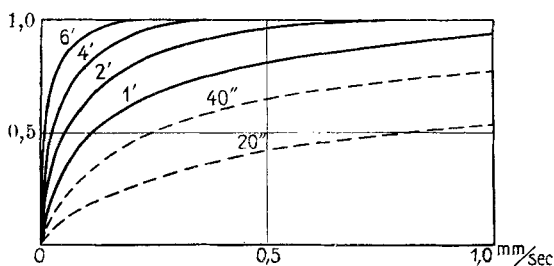


Fig. 2.

Es wurde also z. B., wenn die Verschiebungsgeschwindigkeit des Stempels 0,3 mm/sec betrug und die Pressung eine Minute dauerte, die Badtemperatur um 0,7 der Differenz

zwischen Bad- und Druckschmelztemperatur gegen die letztere hin geändert, während bei gleicher Geschwindigkeit, aber 6 Min. Versuchsdauer, die ganze Temperaturdifferenz als Korrektur eingesetzt wurde. Für die durchlochten Stempel wurden die aus Fig. 2 gewonnenen Beträge mit den oben angegebenen Verhältniszahlen multipliziert; für den kleinen Zylinder wurde als Reduktionsfaktor 0,67, für den 40,4 mm-Zylinder 1,4 benutzt.

Mit diesen Korrekturen wurden die in den folgenden Tabellen angegebenen „wahrscheinlichen“ Temperaturen des Eises während der Pressungen erhalten.

In Tab. 5 sind zunächst die Messungsergebnisse mitgeteilt, die ich im Jahre 1906 mit dem kleinen Zylinder von 10,2 mm Bohrung erhielt. Diese Zusammenstellung, welche nach den Temperaturen des Eises geordnet ist, läßt den Zusammenhang zwischen Druck, Temperatur und Schmelzgeschwindigkeit noch nicht klar erkennen. Trägt man aber die beiden letzteren Koordinaten in ein Netz auf und fügt jedem Punkt die Größe des Druckes bei, so gewinnt man durch Interpolation leicht die Isobaren bzw. deren Projektion in die Temperatur-Geschwindigkeits-Ebene und bemerkt damit den ziemlich gleichmäßigen Verlauf der Schmelzfläche im untersuchten Gebiet. Einige Versuchsergebnisse für sehr tiefe Temperaturen lassen vermuten, daß dieser Verlauf auch unterhalb -20° noch im wesentlichen derselbe bleibt.

Tabelle 5.

1906. Kleiner Zylinder, 10,2 mm Bohrung.

Bad-temp.	Druck kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer	Druck- schmelz- temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
— 2,0	500	0,52	1'	— 3,8°	— 3,0°
0,0	580	0,40	2	— 4,3	— 3,1
— 1,8	520	0,50	2	— 3,9	— 3,1
— 1,5	550	0,67	1	— 4,1	— 3,1
— 0,1	590	0,52	1	— 4,4	— 3,2
— 3,5	325	0,20	1	— 2,4	— 3,3
— 1,5	590	0,55	2	— 4,4	— 3,5
— 0,1	800	1,13	2	— 6,0	— 4,8
— 0,5	790	1,23	1	— 5,9	— 4,8
— 10,0	570	0,14	9	— 4,3	— 4,8

Tabelle 5 (Fortsetzung).

Bad-temp.	Druck kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer	Druck- schmelz- temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
— 3,9 ⁰	780	0,51	1'	— 5,8 ⁰	— 5,0 ⁰
— 9,0	570	0,10	10	— 4,3	— 5,1
— 6,0	690	0,23	4	— 5,2	— 5,5
— 6,2	770	0,32	1	— 5,8	— 6,0
— 4,0	950	1,00	1	— 7,1	— 6,1
— 6,0	950	1,30	20''	— 7,1	— 6,2
— 6,8	790	0,30	1'	— 5,9	— 6,2
— 5,2	980	0,80	1	— 7,3	— 6,5
— 6,3	970	0,73	1	— 7,3	— 6,7
— 9,0	800	0,28	6	— 6,0	— 6,7
— 7,6	820	0,17	1	— 6,3	— 7,1
— 7,6	980	0,52	2	— 7,3	— 7,4
— 11,0	680	0,11	6	— 5,1	— 7,4
— 0,1	1100	1,11	2,5	— 8,2	— 7,4
— 10,5	1010	0,33	3	— 7,6	— 8,5
— 10,5	1000	0,33	3	— 7,6	— 8,5
— 12,5	950	0,23	5	— 7,2	— 8,8
— 8,5	1200	1,03	1	— 9,0	— 8,8
— 8,5	1200	0,95	1	— 9,0	— 8,9
— 11,5	840	0,11	4	— 6,3	— 9,0
— 14,0	900	0,16	7	— 6,8	— 9,0
— 9,7	1120	0,42	1	— 8,4	— 9,1
— 9,3	1200	0,60	1	— 9,0	— 9,2
— 11,0	1195	0,35	1	— 9,0	— 10,1
— 13,0	1080	0,26	3	— 8,1	— 10,1
— 10,5	1330	0,77	1	— 10,0	— 10,3
— 11,5	1230	0,37	1	— 9,2	— 10,4
— 11,0	820	0,01	1	— 6,2	— 10,6
— 13,0	1000	0,10	3	— 7,5	— 10,7
— 13,5	1140	0,22	2	— 8,5	— 10,8
— 12,0	1370	0,60	1	— 10,2	— 11,0
— 14,0	1200	0,23	1	— 9,0	— 11,3
— 13,0	1050	0,04	3	— 7,9	— 11,6
— 12,5	1380	0,33	1	— 10,4	— 11,7
— 11,9	1570	1,44	1	— 11,8	— 11,9
— 12,5	1600	1,16	1	— 12,0	— 12,3
— 13,5	1500	0,55	1	— 11,2	— 12,2
— 12,8	1020	0,015	1	— 7,8	— 12,3
— 13,0	1390	0,30	40''	— 10,4	— 12,3
— 14,0	1100	0,07	1'	— 8,3	— 12,4

Tabelle 5 (Fortsetzung).

Bad-temp.	Druck kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer	Druck- schmelz- temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
-15,0°	1240	0,13	2'	- 9,3°	-12,5°
-15,0	1660	0,87	1	-12,5	-13,3
-14,5	1680	0,85	1	-12,6	-13,4
-15,0	1270	0,09	1	- 9,9	-13,5
-15,3	1680	0,85	1	-12,6	-13,6
-16,0	1400	0,18	3	-10,5	-13,7
-14,5	1220	0,02	1	- 9,2	-14,2
-15,8	1680	0,33	1	-12,6	-14,6
-17,5	1760	0,38	4	-13,2	-15,1
-15,4	1960	1,20	50''	-14,7	-15,2
-15,8	1960	1,00	1'	-14,7	-15,4
-17,5	1910	0,52	1	-14,4	-15,9
-18,0	1800	0,31	1	-13,8	-16,0
-18,5	1600	0,15	1	-12,0	-16,2
-17,6	1470	0,05	1	-11,0	-16,3
-18,0	1570	0,08	1	-11,8	-16,3
-19,0	2160	0,80	1	-16,2	-17,3
-18,0	2280	0,98	1	-17,1	-17,7
-26,0	1700	0,10	4	-12,8	-19,9
-20,4	1760	0,005	1	-13,2	-20,2
-28,0	1820	0,07	3	-13,6	-21,0
-25,5	2450	0,33	3	-18,3	-21,0
-26,5	2500	0,30	3	-18,8	-22,2
-28,0	2600	0,33	1	-19,5	-24,0

Zylinder mit 8,12 mm Bohrung.

- 80°	3300	0,15	1'	-22,6°	- 58°
- 70	4000	0,15	1	-30,2	- 50
- 60	4500	0,14	1	-34,0	- 46
- 50	6000	0,10	1	-45,3	- 46,5
-184	5000	0,04	1	-38	-154
„	6400	0,04	1	-48	-143 *

* Stempel krumm.

Für diese letzten 6 Fälle sind natürlich die Temperaturen des gepreßten Eises ganz unsicher; auch die Druckschmelztemperaturen sind nur durch kaum zulässige Extrapolation der be-

rechneten Schmelzkurve annähernd ermittelt. Nach Tammanns Ergebnissen könnten bei den beobachteten Drucken und den zugehörigen Badtemperaturen nur Eis II oder III bestehen, doch auch diese Modifikationen nicht im Schmelzzustand. Aber der stetig, unter starkem Krachen eindringende Stempel, der selbst die niedrige Badtemperatur (wenigstens annähernd) besaß, zeigt doch eine sehr bedeutende Volumänderung an. Beim Nachlassen des Druckes wurde der Stempel um 8 mm (bei -50°) und um 1,5 mm bei -184° gehoben; d. h. es wurde im letzten Fall die halbe, im ersten etwa ein Viertel der Volumänderung wieder rückgängig gemacht. Am oberen Rand der Zylinderöffnung traten feine Eiskristalle aus. Ob auch bei diesen niedrigen Temperaturen eine Verflüssigung des Eises eintrat, erscheint sehr fraglich. Die trotz steigender Temperatur enorm anwachsenden Drucke lassen vielmehr auf starke Kompression der neuen Eismodifikationen schließen. Die Form enthielt für den Versuch zwischen -80 und -50° ca. 4 ccm Eis, für den Versuch bei der Temperatur der flüssigen Luft ca. 2,6 ccm Eis. Bleibt Verflüssigung ausgeschlossen, so würde bei der sehr kleinen Menge Eisnadeln, die oben am Preßzylinder ausgetreten sind, das Eindringen des Stempels im ersten Fall eine Volumänderung von 40 Proz., im zweiten Fall von 6 Proz. bedeuten. Die erstere Zahl ist mit Tammanns Bestimmungen, die zwischen 17 und 20 Proz. ergaben, schwer verträglich; bei der letzteren handelt es sich nur um eine geringe Volumänderung, da die Verkrümmung des dünnen Stempels eine weitere Fortsetzung der Pressung verhinderte.

Mit dem kleinen Zylinder konnte ich 1906 wegen der hohen Lufttemperatur im Arbeitsraum ($4-6^{\circ}$ C.) und wegen der geringen Drucke, die am Manometer kaum sicher ablesbar waren, nicht mit kleinen Schmelzgeschwindigkeiten und bei Temperaturen nahe an 0° arbeiten. Da aber gerade in diesem Bereich der Verlauf der Schmelzfläche besonderes Interesse hat, wurden 1907 und hauptsächlich 1908 die Versuche mit größeren Formen und unter besseren Temperaturverhältnissen des Beobachtungsraumes weiter geführt. Die Ergebnisse mit einer Form von 28,0 mm Bohrung und einer zweiten von 40,4 mm sind, soweit sie bei fast dicht schließendem Stempel erhalten wurden, in der folgenden Tab. 6 mitgeteilt.

Tabelle 6.

Zylinder von 28,0 mm Bohrung.

Tag	Bad-temp.	Druck reduziert kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer der Pressung	Druck- schmelz- temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
8. II. 07	-0,2°	295	0,16	1'	-2,2°	-1,2°
		340	0,14	1	-2,5	-1,6
		352	0,14	1	-2,6	-2,1
		375	0,13	1	-2,8	-2,5
	-0,7	230	0,13	1'	-1,7	-1,1
		258	0,12	1	-2,0	-1,5
		288	0,12	1	-2,2	-1,9
		320	0,13	1	-2,4	-2,2
9. II.	-1,0	444	0,30	1	-3,3	-2,5
		490	0,24	1	-3,7	-3,2
		545	0,21	1	-4,1	-3,6
	-4,3	440	0,06	1	-3,3	-4,0
		470	0,07	1	-3,6	-4,0
	-4,1	488	0,08	2	-3,7	-3,9
		560	0,12	1	-4,2	-4,2
	-4,0	650	0,18	1	-4,9	-4,9
10. II.	-2,7	368	0,083	1	-2,8	-2,75
	-2,5	413	0,088	3	-3,1	-2,9
	-2,4	413	0,088	3	-3,1	-3,1
	-2,2	610	0,183	1	-4,6	-4,5
11. II.	-1,1	245	0,075	2	-1,8	-1,4
		280	0,075	3	-2,1	-1,8
	-1,0	212	0,050	4	-1,6	-1,5
		240	0,033	2	-1,8	-1,8
	-1,0	715	0,865	1	-5,4	-5,1
	-2,1	239	0,033	2	-1,8	-1,9
	-2 0	540	0,267	1	-4,1	-3,9
	27. IV. 08	-0,2	162	0,133	1	-1,25
237			0,100	2	-1,8	-1,3
260			0,083	1	-2,1	-1,7
380			0,167	1	-2,9	-2,4
420			0,100	1	-3,2	-3,2
400			0,117	1	-3,1	-3,1
28. IV.	-0,2	139	0,133	1	-1,1	-0,5
		187	0,100	1	-1,4	-0,9
		139	0,067	1	-1,3	-0,9
		435	0,160	1	-3,3	-2,8

Tabelle 6 (Fortsetzung).

Tag	Bad. temp.	Druck reduziert kg/cm ²	Geschw. mm/sec.	Dauer der Pressung	Druck- schmelz- temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
30. IV. 08	-0,2°	44	0,083	1'	-0,3	-0,3°
		67	0,067	1	-0,5	-0,4
		118	0,033	1	-0,9	-0,8
		150	0,042	2	-1,1	-1,1
		187	0,045	3	-1,4	-1,4
1. V.	-1,6	248	0,100	1	-1,9	-1,7
		290	0,100	2	-2,1	-2,0
		355	0,083	2	-2,6	-2,6
	-1,0	470	0,117	1	-3,5	-3,5
2. V	-0,6	550	0,45	1	-4,2	-3,5
		710	0,35	1	-5,5	-5,0
	-1,0	237	0,217	1	-1,8	-1,4
		340	0,133	1	-2,5	-2,1
		395	0,150	1	-3,0	-2,6
4. V.	-1,0	140	0,067	1	-1,2	-1,1
		140	0,037	3	-1,2	-1,1
		188	0,054	1	-1,4	-1,4
		265	0,058	1	-2,0	-1,9
	-0,2	67	0,067	1	-0,5	-0,3
		90	0,037	1	-0,7	-0,4
		110	0,042	1	-0,9	-0,6
		140	0,033	1	-1,1	-0,9
		190	0,091	1	-1,4	-1,3
5. V.	-1,0	90	0,05	2	-0,7	-0,9
		118	0,02	4	-0,9	-0,9
		275	0,10	2	-2,1	-2,0
		360	0,11	2	-2,7	-2,7
6. V.	-0,8	310	0,200	1	-2,3	-1,6
		338	0,133	1	-2,5	-2,0
		385	0,133	1	-2,9	-2,5
7. V.	-0,7	435	0,267	1	-3,3	-2,4
	-0,0	67	0,083	1	-0,5	-0,2
		90	0,042	3	-0,7	-0,4
		118	0,047	3	-0,9	-0,9
		310	0,183	1	-2,3	-2,3

Tabelle 6 (Fortsetzung).

Tag	Bad-temp.	Druck reduziert kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer der Pressung	Druck- schmelz- temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
8. V. 08	0,0°	45	0,117	1'	-0,3°	-0,1°
		67	0,058	1	-0,5	-0,2
		90	0,100	1	-0,7	-0,5
„	0,0	348	0,196	2	-2,6	-1,7
„	0,0	360	0,367	1	-2,7	-1,9
		380	0,167	1	-2,9	-2,2
9. V.	0,0	760	0,533	1	-5,7	-4,6
	0,0	260	0,217	1	-2,0	-1,1
		288	0,133	1	-2,2	-1,5
		360	0,142	1	-2,8	-2,2
11. V.	0,0	140	0,217	1	-1,1	-0,6
		165	0,133	1	-1,3	-0,8
		212	0,100	1	-1,6	-1,1
„	0,0	90	0,083	1	-0,7	-0,2
		130	0,075	1	-1,0	-0,5
		176	0,083	1	-1,4	-1,0
		250	0,092	1	-1,9	-1,5
		310	0,125	1	-2,2	-2,1
		350	0,110	1	-2,7	-2,7
13. V.	0,0	90	0,080	3	-0,7	-0,2
„	0,0	102	0,133	1	-0,8	-0,3
		170	0,083	1	-1,3	-0,8
		212	0,100	1	-1,6	-1,1
		190	0,075	1	-1,4	-1,1
		267	0,092	1	-2,0	-1,8
		310	0,109	1	-2,3	-2,3
15. V.	-0,1	19	0,075	1	-0,14	-0,06
		42	0,083	1	-0,3	-0,2
„	0,0	90	0,350	20''	-0,7	-0,2
	-0,1	34	0,050	1'	-0,3	-0,1
		45	0,045	2	-0,3	-0,2
		360	0,325	1	-2,6	-2,2
„	0,0	120	0,400	10''	-0,8	-0,2
	0,0	248	0,533	45	-1,8	-1,0
	0,0	350	0,750	80	-2,7	-1,6

Tabelle 6 (Fortsetzung).

Tag	Bad-temp.	Druck reduziert kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer der Pressung	Druck-schmelz-temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
14. V. 08	-0,1°	47	0,110	1'	-0,4°	-0,2°
		70	0,083	1	-0,5	-0,3
		107	0,067	1	-0,8	-0,6
		147	0,067	1	-1,1	-0,9
		172	0,070	3	-1,3	-1,3
	-0,1	47	0,080	2	-0,4	-0,2
	-0,1	350	0,267	1	-2,6	-1,7
	-2,0	130	0,010	2	-1,0	-1,4
	-3,4	340	0,050	3	-2,6	-3,0
	-3,1	225	0,016	4	-1,7	-2,4
	0,0	45	0,033	2	-0,3	-0,17
		45	0,050	3	-0,3	-0,15
16. V.	0,0	500	0,725	20''	-3,8	-2,7
18. V.	0,0	500	0,733	15	-3,8	-2,5
	0,0	400	0,600	10	-3,0	-2,0
	0,0	250	0,300	30	-1,9	-1,0
	0,0	310	0,430	50	-2,3	-1,5
Zylinder mit 40,4 mm Bohrung.						
26. V.	0,0	120	0,110	1'	-0,9	-0,5
		260	0,075	1	-1,9	-1,5
	0,0	80	0,059	1	-0,4	-0,2
		167	0,059	1	-1,2	-0,96
		240	0,075	1	-1,8	-1,7
		295	0,075	1	-2,3	-2,3
27. V.	0,0	22	möglichst gleich- mäßig 12 mm in 1'	5''	-0,16	-0,02
		45		5	-0,34	-0,07
		70		5	-0,53	-0,15
		81		5	-0,61	-0,20
		115		5	-0,86	-0,36
		165		5	-1,24	-0,61
		178		5	-1,33	-0,75
		238		5	-1,78	-1,11
		262		5	-1,96	-1,37
		286		5	-2,15	-1,66
		310		5	-2,32	-1,90
		360		5	-2,70	-2,35
		800	0,200	1'	-2,2	-1,8

Tabelle 6 (Fortsetzung).

Tag	Bad-temp.	Druck reduziert kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer der Pressung	Druck-schmelz-temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
27. V. 08	0,0°	98	0,450	15''	-0,75°	-0,22°
..	0,0	63	0,310	15	-0,47	-0,14
„	0,0	45	0,042	1'	-0,35	-0,15
		50	0,025	1	-0,38	-0,23
		63	0,042	1	-0,49	-0,42
		74	0,033	1	-0,58	-0,42
		85	0,017	1	-0,65	-0,60
		110	0,025	1	-0,85	-0,80
		124	0,033	1	-0,96	-0,86
		186	0,033	1	-1,43	-1,43
30. V.	0,0	112	0,200	20''	-0,84	-0,30
	0,0	120	0,400	25	-0,90	-0,32
	0,0	62		ca. 6''	-0,46	-0,06
		96	12 mm		-0,72	-0,15
		128	in 1'		-0,96	-0,27
		150	möglichst		-1,13	-0,46
		188	gleich-		-1,41	-0,65
		216	mäßig		-1,62	-0,90
		242	0,200		-1,82	-1,25
		278	mm/sec		-2,08	-1,52
		311			-2,34	-1,90
		356			-2,67	-2,30

Die Angaben der Tab.6 wurden zur genaueren Zeichnung der Schmelzfläche in der Nähe von 0° benutzt. Daß die mit den verschiedenen Preßformen erhaltenen Resultate sich doch zu einem einheitlichen Bilde zusammenfügen, ist wohl als Beweis für die Richtigkeit der angewandten Temperaturkorrekturen anzusehen.

Als wesentliche Eigenschaften zeigt die damit dargestellte Schmelzfläche:

1. Bei konstanter Temperatur wächst die Schmelzgeschwindigkeit mit zunehmendem Druck sehr schnell.

2. Bei konstantem Druck wächst die Schmelzgeschwindigkeit sehr rasch mit steigender Temperatur.

3. Konstante Schmelzgeschwindigkeit bedingt ein starkes Anwachsen des Druckes mit sinkender Temperatur.

Gegenüber der *theoretischen* Schmelzfläche, welche nahezu durch eine die Geschwindigkeitsachse enthaltende, gegen die $t-v$ -Ebene geneigte Ebene dargestellt ist, zeigt die „*praktische*“ Schmelzfläche in zweifacher Hinsicht auffallende Abweichungen. Einmal ist diese Fläche für die Temperaturen in der Nähe von 0° stark gekrümmt und die Drucke, welche die experimentelle Bestimmung ergab, liegen z. T. beträchtlich über den theoretischen Schmelzdrucken. Der Hauptgrund für diese Abweichung scheint mir darin zu liegen, daß die gemessenen Drucke immer Mittelwerte für einen längeren Zeitraum (Minimum 5 Sek.) darstellen, innerhalb dessen die durch den Druck veranlaßte Temperaturerniedrigung wieder eine Steigerung des Druckes bedingt usw., wenn die Schmelzgeschwindigkeit gleich bleiben soll. Sie gelten also eigentlich für niedrigere, als die angegebenen Temperaturen. In Tab. 6 findet man, daß die Schmelzgeschwindigkeit am Anfang der Experimente immer größer ist, als späterhin. Diese Beobachtung veranlaßte mich, eine Reihe von Pressungen bei ganz kurzer Druckwirkung auszuführen; dabei ist allerdings die Bestimmung der Vorrückungsgeschwindigkeit des Stempels weniger genau als sonst. Aber das Resultat war doch eine beträchtliche Verminderung der Druckwerte für das Gebiet der hohen Temperaturen; dies zeigt besonders deutlich ein Vergleich der Fig. 3 mit der entsprechenden Darstellung meiner älteren Versuchsergebnisse.¹⁾ Es ist also anzunehmen, daß bei noch kürzerer Druckdauer noch kleinere Drucke für die einzelnen Werte der Schmelzgeschwindigkeit resultieren, so daß eine bessere Annäherung an die theoretische Schmelzfläche eintritt.

Die andere Abweichung zeigt sich in der Nähe der Temperaturenachse. Es ergibt sich, daß der Stempel in die Eismasse eindringt, auch wenn die Drucke ganz beträchtlich unterhalb der theoretischen Schmelzdrucken liegen. Da aber das Vordringen des dicht anschließenden Stempels, wie ich glaube, sicher gestellt zu haben, auf einer Verflüssigung der verdrängten Eismasse beruht und die Erscheinung bei kleinen

1) H. Hess, Zeitschr. f. Glkde. 1. p. 251.

Stempelgeschwindigkeiten von der bei größeren äußerlich nicht verschieden ist, so sagt die Gestalt der praktischen Schmelzfläche nichts anderes, als daß das Eis flüssig wird, wenn auch der Druck noch tief unter dem eigentlichen Schmelzdruck liegt. Dies wurde auch von G. Tammann gefunden, der sein Ergebnis in die Worte zusammendrängt: Das Eis ist zum

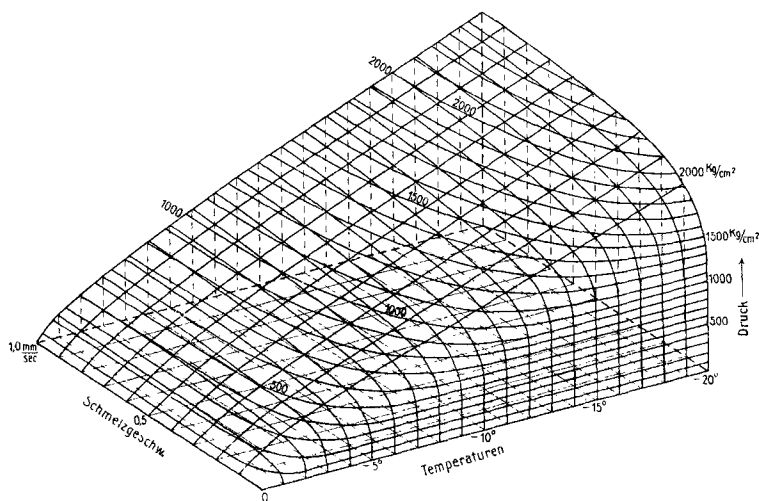


Fig. 3. Schmelzfläche des Eises.

Fließen wie geschaffen.¹⁾ Auch 1902 habe ich schon das Gleiche gefunden; aber ich hatte doch immer den Verdacht, es sei diese Erscheinung wenigstens z. T. auf die durch die Formwandungen hindurch stattfindende Wärmeleitung zurückzuführen. Nach der Ausgleichung der hier mitgeteilten Beobachtungsergebnisse ist diese Wärmewirkung in ausreichendem Maße berücksichtigt — aber die Krümmung der Isobaren, welche für kleine Schmelzgeschwindigkeiten in der Richtung der abnehmenden Temperaturen auftritt, ist geblieben. Das Eis schmilzt also, auch bei niedrigen Temperaturen, schon unter relativ geringen Drucken und es hat außerdem den Anschein, daß erst ein gewisser Druck erreicht sein muß, bevor

1) G. Tammann, Schmelzen und Erstarren p. 175.

das Eindringen des Stempels möglich ist. Für diese Minimaldrucke würde sich annähernd die Beziehung

$$p_{\min.} = -70 t - 2 t^2 \text{ kg/cm}^2$$

aus meinen Versuchen ergeben.

Hrn. Tammanns Experimente führen zu einem ähnlichen Resultate; er konnte mit seinem feineren Meßapparate noch viel kleinere Stempelgeschwindigkeiten bestimmen als ich bei meiner Einrichtung; erst von etwa $p_{\min.} = -10 t \text{ kg/cm}^2$ würde nach seinen Angaben¹⁾ eine meßbare Verschiebung des Stempels erfolgen.

Über die Ursache dieses Schmelzens bei Drucken, die weit unter dem Schmelzdruck liegen, konnte ich völlig sichere Auskunft durch das Experiment nicht gewinnen. Ein Erklärungsversuch wird weiter unten gegeben werden. Hier sei nur bemerkt, daß die beiden Abweichungen der praktischen Schmelzfläche von der theoretischen wesentlich durch die Dimensionen der verwendeten Apparate und durch die Methode der Messung bestimmt sind; daher werden die von verschiedenen Beobachtern experimentell gefundenen Schmelzflächen nur qualitativ übereinstimmen.

Benutzt man die von Hr. Tammann gefundenen Werte der Ausflußgeschwindigkeit bei gewissen, möglichst konstant gehaltenen Temperaturen zur Konstruktion der Isothermen einer Fläche, die den Zusammenhang zwischen Druck, Temperatur und Ausflußgeschwindigkeit angibt, so findet man eine mit der korrigierten Schmelzfläche qualitativ übereinstimmende Fläche. Schon hieraus läßt sich der Schluß ziehen, daß auch bei den Tammannschen Versuchen das Eindringen des Stempels in das diesen überfließende Eis, auf eine Verflüssigung des letzteren an der Druckfläche zurückzuführen ist.

Wie sehr dieser Schluß gerechtfertigt ist, geht aus den Beobachtungsergebnissen hervor, welche mit den durchlochten Stempeln erhalten wurden. Sie sind in den folgenden Tab. 7 enthalten und in den Figg. 4—8 übersichtlich dargestellt. Diese Figuren, in denen die Isobaren 100, 200 und 300 kg/cm^2 der praktischen Schmelzfläche als punktierte Linien eingetragen

1) Vgl. l. c. p. 571.

sind, zeigen, daß auf der Druckfläche des eindringenden Stempels eine Verflüssigung des Eises stattfindet. Die angegebenen Drucke sind die auf die Ringfläche des Stempels reduzierten Manometerangaben; die dadurch erhaltenen Isobaren (die ausgezogenen Linien) fallen mit denen der Schmelzfläche fast zusammen. Daß sie es nicht ganz tun, liegt wohl an der nicht völlig, sondern nur annähernd zutreffenden Korrektur der Temperatur des gepreßten Eises.

Tabelle 7.

Öffnung 8 mm.

Tag	Bad-temp.	Druck reduziert kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer der Pressung	Druck- schmelz- temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
22. IV. 08	-1,2°	348	0,733	1'	-2,6°	-2,4°
28. IV.	0,0	340	0,833	1	-2,6	-2,3
	0,0	105	0,250	30''	-0,8	-0,3
	0,0	130	0,125	2'	-1,0	-0,7
	0,0	200	0,300	1	-1,5	-0,9
	0,0	450	1,033	1	-3,4	-3,2
30. IV.	-1,0	295	0,167	2	-2,2	-1,9
		„	0,150	4	-2,2	-2,1
		„	0,116	5	-2,2	-2,2
	-0,8	178	0,051	12	-1,2	-1,2
4. V.	-0,5	273	0,32	1	-2,1	-1,6
		348	0,25	3	-2,6	-2,3
	-0,5	410	0,22	4	-3,1	-2,9
11. V.	-0,1	382	0,59	1,5	-2,9	-2,6
	0,0	273	0,35	1	-2,1	-1,4
	0,0	330	0,33	2	-2,5	-2,1
	0,0	355	0,40	3	-2,7	-2,5
	0,0	140	0,15	1	-1,1	-0,6
	0,0	192	0,13	3	-1,4	-1,0
	0,0	390	0,47	2	-2,9	-2,6
13. V.	0,0	360	0,45	2	-2,7	-2,4
	0,0	140	0,133	1	-1,1	-0,6
	0,0	250	0,255	2	-1,9	-1,6
	0,0	350	0,351	2	-2,6	-2,3

Tabelle 7 (Fortsetzung).

Tag	Bad-temp.	Druck reduziert kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer der Pressung	Druck- schmelz- temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
15. V. 08	-0,1°	60	0,058	2'	0,5°	-0,3°
		230	0,450	1	-1,7	-1,1
		380	1,000	1	-2,9	-2,6
„	-2,5	360	0,10	5	-2,7	-2,7
20. V.	0,0	180	0,65	30''	-1,2	-0,6
	0,0	285	0,80	40	-2,2	-1,5
	0,0	98	0,40	20	-0,75	-0,2
	0,0	210	0,15	3'	-1,6	-0,3
Öffnung 11,3 mm.						
21. IV. 08	-1,2°	345	0,37	3'	-2,6	-2,5
22. IV.	-1,0	328	0,583	2	-2,5	-2,3
	-0,5	192	0,116	3	-1,4	-1,2
		265	0,600	1	-2,0	-1,7
27. IV.	-0,2	295	0,590	1,5	-2,2	-2,0
	„	295	0,920	1	-2,2	-2,0
7. V.	-1,0	350	0,600	1,5	-2,6	-2,4
	0,0	290	1,030	1	-2,2	-2,0
9. V.	0,0	75	0,25	30''	-0,6	-0,2
		110	0,10	3'	-0,8	-0,5
		270	0,19	5	-2,0	-0,9
		96	0,133	1	-0,7	-0,35
		265	0,633	1	-2,0	-1,6
11. V.	-0,1	310	0,725	80''	-2,3	-2,1
12. V.	0,0	280	0,867	1'	-2,1	-1,9
„	0,0	180	0,125	1	-1,4	-0,8
		220	0,160	2	-1,7	-1,2
		300	0,720	3	-2,3	-2,3
13. V.	0,0	260	0,430	1	-2,0	-1,5
		275	0,370	2	-2,1	-1,8
	0,0	130	0,125	1	-1,0	-0,6
		205	0,191	2	-1,5	-1,2
		230	0,185	3	-1,7	-1,4
		280	0,375	4	-2,1	-2,0

Tabelle 7 (Fortsetzung).

Tag	Bad-temp.	Druck reduziert kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer der Pressung	Druck- schmelz- temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
14. V. 08	-0,3°	210	0,267	1'	-1,6°	-1,0°
		255	0,250	3	-1,9	-1,6
15. V.	-0,1	230	0,225	2	-1,7	-1,4
		330	0,52	1	-2,5	-2,2
22. V.	0,0	195	0,50	30''	-1,4	-0,7
		93	0,42	20	-0,7	-0,2
		275	0,93	40	-2,1	-1,6
29. V.	0,0	235	0,233	3'	-1,8	-1,5
30. V.	0,0	270	0,525	2	-2,0	-1,8
„	0,0	280	0,103	8	-2,1	-2,1
2. VI.	0,0	260	0,470	1	-2,0	-1,55
		200	0,20	1	-1,7	-1,00
		255	0,24	2	-1,9	-1,50
Öffnung 16 mm.						
18. IV.	-1,4	280	0,667	90''	-2,1	-1,9
21. IV.	-2,4	340	0,58	1,5'	-2,5	-2,5
23. IV.	-1,2	240	0,16	2	-1,8	-1,5
		265	0,130	3	-2,0	-1,7
	-1,0	250	0,175	5	-1,9	-1,8
	-1,7	275	0,933	1	-2,1	-2,0
24. IV.	-0,7	215	0,110	5	-1,6	-1,4
		285	0,583	1	-2,1	-1,6
25. IV.	-0,4	180	0,22	1	-1,4	-1,1
		210	0,08	5	-1,6	-1,3
		290	0,40	1	-2,2	-1,7
	-0,4	140	0,07	4	-1,1	-0,85
		250	0,28	1	-1,9	-1,4
		290	0,75	1	-2,2	-2,0
	-0,5	290	1,22	50''	-2,2	-1,9
	1. V.	-1,3	245	0,07	14'	-1,8
-1,6		175	0,07	4	-1,3	-1,4
-1,5		245	0,16	2	-1,9	-1,75
-1,3		280	0,333	1	-2,1	-1,8
-1,0		350	0,475	40''	-2,6	-1,9
-0,2		205	0,075	6'	-1,5	-1,2
		320	0,300	2	-2,4	-2,0

Tabelle 7 (Fortsetzung).

Tag	Bad-temp.	Druck reduziert kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer der Pressung	Schmelz- druck- temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
12. V. 08	0,0 ⁰	205	0,65	30''	-1,5 ⁰	-0,8 ⁰
	0,0	93	0,15	30	-0,7	-0,2
	0,0	305	0,10	8'	-2,3	-2,1
14. V.	-0,1	185	0,183	1	-1,4	-0,8
		210	0,146	2	-1,6	-1,0
		230	0,192	3	-1,7	-1,3
15. V.	-0,1	100	0,07	2	-0,75	-0,4
		280	0,94	35''	-2,1	-1,3
16. V.	-0,1	155	0,12	2'	-1,2	-0,6
		280	0,61	1	-2,1	-1,5
	0,0	245	0,27	2	-1,8	-1,4
18. V.	0,0	245	0,56	100''	-1,8	-1,5
20. V.	0,0	245	0,383	2'	-1,8	-1,5
23. V.	0,0	150	0,167	1	-1,2	-0,6
		240	0,167	2	-1,8	-1,2
		245	0,200	1	-1,9	-1,0
„	0,0	80	0,150	30''	-0,6	-0,2
		103	0,500	10	-0,8	-0,25
		208	0,750	20	-1,5	-0,8
26. V.	0,0	190	0,200	1'	-1,4	-0,8
27. V.	0,0	35	0,07	1	-0,3	-0,1
		220	0,253	1	-1,7	-1,1
		245	0,290	2	-1,9	-1,5
29. V.	0,0	190	0,200	1	-1,4	-0,8
		245	0,270	3	-1,9	-1,5
30. V.	0,0	190	0,200	1	-1,4	-0,8
		220	0,167	2	-1,7	-1,2
		235	0,183	4	-1,8	-1,4
Öffnung 19,2 mm.						
15. IV.	-1,2	280	0,25	1'	-2,1 ⁰	-1,7 ⁰
		250	0,25	2	-1,9	-1,7
		260	0,32	3	-2,0	-1,8
	-1,1	280	0,37	4	-2,1	-1,9
	-2,0	270	0,43	2,5	-2,0	-2,0
	-2,2	450	0,35	1	-3,4	-3,0
	-2,1	270	0,40	1,5	-2,0	-2,1

Tabelle 7 (Fortsetzung).

Tag	Bad-temp.	Druck reduziert kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer der Pressung	Schmelz- druck- temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
6. V. 08	-0,6 ⁰	270	0,44	1,5'	-2,0 ⁰	-1,5 ⁰
7. V.	-0,9	270	0,60	1,5	-2,0	-1,7
	0,5	270	0,58	1	-2,0	-1,7
8. V.	0,0	130	0,10	2	-1,0	-0,6
		220	0,10	3	-1,7	-1,1
		200	0,12	4	-1,5	-1,0
	0,0	130	0,16	1	-1,0	-0,5
		165	0,11	3	-1,2	-0,8
		220	0,16	2	-1,7	-1,0
	0,0	310	1,11	55''	-2,3	-2,0
9. V.	0,0	265	0,64	90	-2,0	-1,6
16. V.	0,0	85	0,07	2'	-0,6	-0,3
		310	1,05	1	-2,3	-1,9
18. V.	0,0	260	0,56	1,5	-2,0	-1,5
	0,0	260	0,81	1	-2,0	-1,4
19. V.	0,0	145	0,15	2	-1,1	-0,7
		220	0,18	3	-1,7	-1,2
	0,0	95	0,40	20''	-0,7	-0,2
		180	0,55	30	-1,4	-0,6
		220	0,60	30	-1,7	-0,9
20. V.	0,0	265	0,35	2'	-2,0	-1,5
26. V.	0,0	100	0,08	1	-0,7	-0,3
		150	0,07	3	-1,1	-0,6
		170	0,06	4	-1,3	-0,8
		280	0,92	40''	-2,1	-1,4
	0,0	110	0,13	1'	-0,8	-0,4
		225	0,22	1	-1,7	-0,9
		260	0,28	1	-2,0	-1,2
27. V.	0,0	150	0,12	2	-1,1	-0,6
		235	0,42	1	-1,8	-1,2
		265	0,71	35''	-2,0	-1,1
	0,0	110	0,11	1'	-0,8	-0,35
		240	0,43	1	-1,8	-1,2
	0,0	120	0,30	40''	-0,9	-0,4
		200	0,45	40	-1,5	-0,8
		210	0,80	30	-1,6	-0,8

Tabelle 7 (Fortsetzung).

Öffnung 22,3 mm.

Tag	Bad-temp.	Druck reduziert kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer der Pressung	Druck- schmelz- temp.	Wahrscheinl. Temp. des Eises
22. IV. 08	-1,5°	350	0,53	1,5'	-2,6°	-2,2°
2. V.	-0,7	340	1,17	1	-2,5	-2,9
	-1,0	310	0,41	3	-2,3	-2,0
5. V.	-1,0	270	0,30	3	-1,6	-1,4
8. V.	0,0	220	0,14	4	-1,6	-1,1
		310	0,36	4	-2,3	-1,7
9. V.	0,0	210	0,30	1	-1,6	-0,8
		245	0,35	1,5	-1,8	-1,1
14. V.	0,0	125	0,075	4	-1,0	-0,55
		330	1,000	50''	-2,5	-1,7
	-0,1	180	0,083	3'	-1,0	-0,6
		320	0,95	1	-2,4	-1,7
16. V.	0,0	180	0,12	2	-1,3	-0,7
		320	0,57	3	-2,4	-1,8
18. V.	0,0	320	0,86	70''	-2,4	-1,7
		250	0,18	4'	-1,9	-1,3
20. V.	0,0	95	0,20	30''	-0,7	-0,2
		98	0,45	20	-0,75	-0,2
		210	0,65	40	-1,60	-0,9
	0,0	90	0,10	80	-0,70	-0,3
		105	0,20	50	-0,80	-0,3
22. V.	0,0	50	0,07	1'	-0,4	-0,1
		75	0,083	1	-0,6	-0,2
	0,0	250	0,33	3	-1,9	-1,4
	0,0	270	0,53	1	-2,0	-1,2
		310	0,72	1	-2,3	-1,5
23. V.	0,0	170	0,17	1	-1,3	-0,6
		200	0,18	2	-1,5	-0,9
		250	0,22	3	-1,9	-1,3
		320	0,35	4	-2,4	-1,8
	0,0	280	0,11	8	-2,1	-1,8
	0,0	305	0,175	7	-2,3	-2,0
26. V.	0,0	120	0,15	1	-0,9	-0,4
		180	0,18	2	-1,3	-0,75
		185	0,11	3	-1,4	-0,8
		320	0,50	105''	-2,4	-1,7
1. VI.	0,0	300	1,00	1'	-1,9	-1,4
	0,0	100	0,31	1	-0,75	-0,4
		205	0,25	2	-1,5	-0,9

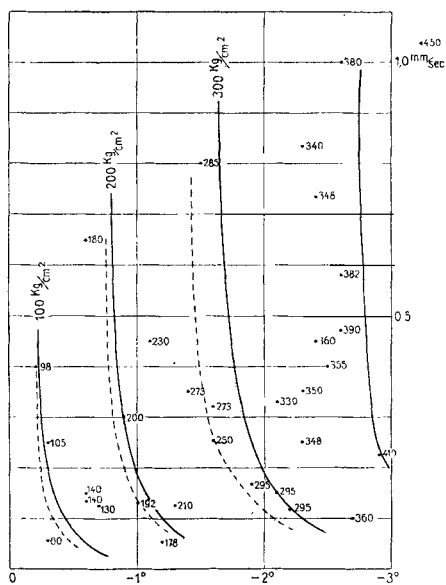


Fig. 4. Öffnung 8 mm.

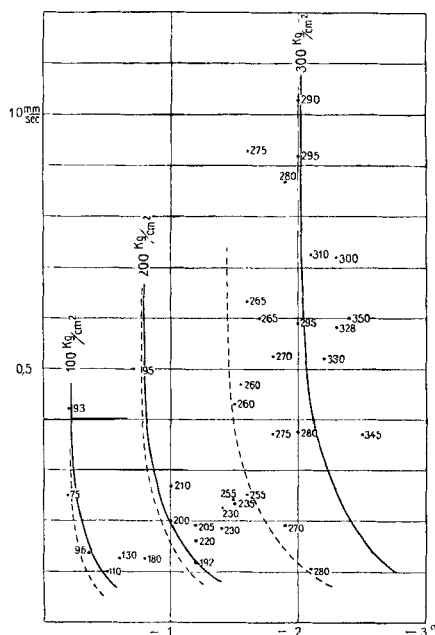


Fig. 5. Öffnung 11,3 mm.

Für eine bessere Temperaturkorrektur wäre ohne Zweifel der Einfluß der in das Innere des Stempelrohres dringenden Eismasse zu berücksichtigen; sichere Anhaltspunkte über die Wärmeverhältnisse dieser Eismasse habe ich bei meinen Experimenten nicht erhalten. Der Versuch nach dieser Richtung die Korrektur zu verfeinern, würde sich also auf mehr oder minder zutreffende Annahmen stützen müssen und trotz verwickelter Rechnungen kaum zu einer Erhöhung der Genauigkeit führen; er wurde deshalb unterlassen.

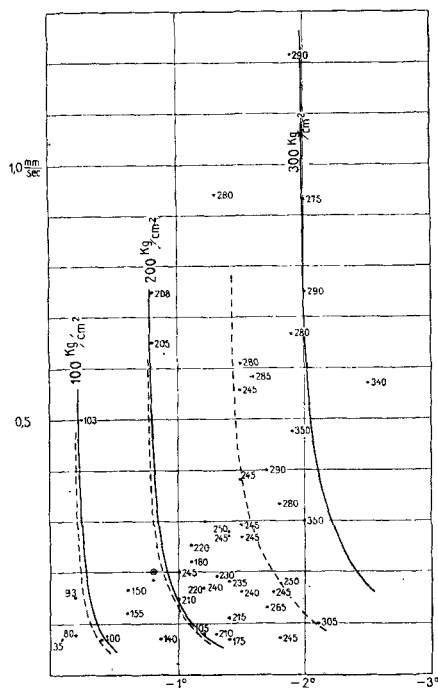


Fig. 6. Öffnung 16,2 mm.

Auch für die einzelnen Ausflußöffnungen ergibt sich aus den Figg. 4—8 deutlich die Krümmung der Isobaren im gleichen Sinne, wie bei der Schmelzfläche, d. h. auch in diesen Fällen tritt bereits ein Schmelzen des Eises ein, bevor der theoretische Schmelzdruck erreicht ist. Zur Erklärung dieser Erscheinung darf die Zusammendrückbarkeit des Eises jedenfalls nur nebenher herangezogen werden. Der wesentliche Grund dafür scheint

mir in der Wärmezufuhr zu liegen, welche der Stempel vermittelt. Die Deckplatte der hydraulischen Presse, gegen welche die Stempel fest anliegen, hat immer eine höhere Temperatur, als das gepreßte Eis. Im Stempel wird daher kurze Zeit, nachdem die Pressung in Gang ist, eine Wärmeströmung von der Presse zum Eis stattfinden und da die Experimente, welche den kleinen Vorrückungsgeschwindigkeiten des Stempels entsprechen, längere Zeit beanspruchen, wenn die Verschiebung

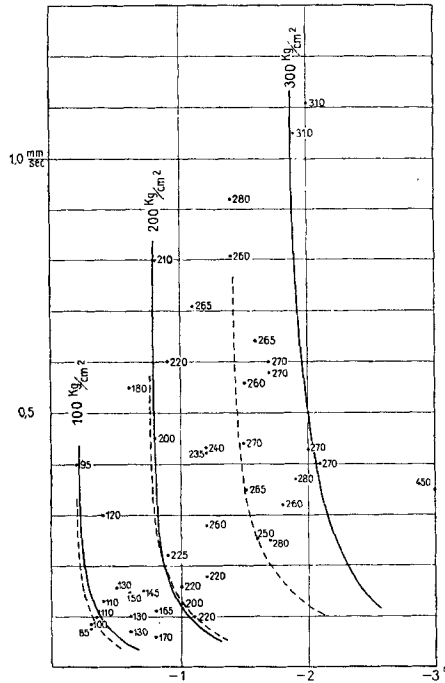


Fig. 7. Öffnung 19,2 mm.

meßbar werden soll, so muß sich der Einfluß des Stempels gerade bei diesen Versuchen am stärksten bemerkbar machen, während für die großen Geschwindigkeiten, bei denen gleich anfangs relativ starke Drücke einsetzen, trotz des größeren Temperaturgefälles dieser Einfluß weniger ins Gewicht fällt; daher auch der asymptotische Anschluß der praktischen Schmelzfläche an die theoretische, der bei den großen Geschwindigkeiten auftritt.

Der aus den durchlochten Stempeln austretende Eiskern war bei Temperaturen nahe an 0° stark wasserhaltig (bei niedrigen Temperaturen zeigte sich nur wenig oder gar kein Wasser mehr in diesem Kerne); häufig war aber der ganze Eiskern außen von einem dünnen ($\frac{1}{2}$ mm dicken) Eisrohr zusammengehalten, während nach dem Innern hin sich eine Teilung in parallele Platten bemerklich machte; zwischen den nach außen hin klaffenden Rändern dieser

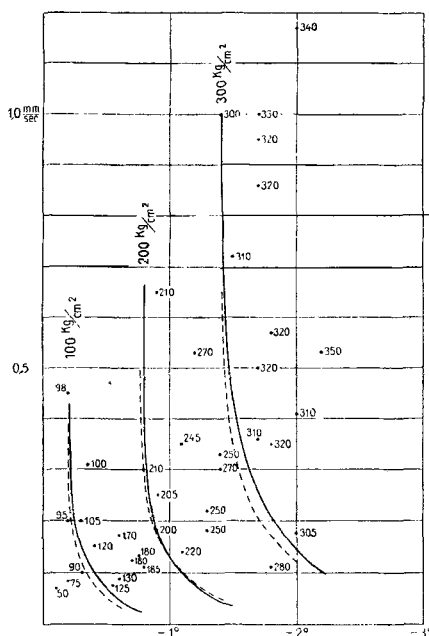


Fig. 8. Öffnung 22,3 mm.

Platten und dem dünnen Rohr wurden die Wassereinschlüsse gehalten. (Dies Aussehen des Eiskernes habe ich bereits früher erwähnt; auch v. Obermayer hat es bemerkt.) Es muß also während der Pressung das durch die Stempelöffnung geförderte Eis in den axialen Partien, da wo der stärkste Zug auftritt (also nahe den Kanten des Stempels), zerreißen; das unter der Druckfläche des Stempels gebildete unterkühlte Schmelzwasser dringt in die entstandenen Risse ein, gefriert bei Entlastung

wieder und bildet damit das Rohr, das den an den Rändern zerrissenen Eiskern umschließt.

In einigen Fällen wurde durch Wägung des Eiskernes, der über die Form hinausragte und des im Stempelhalse sitzenden Stückes die Menge des durch das Stempelrohr hindurch gegangenen Materials im Verhältnis zu der vom Stempel verdrängten Eismenge bestimmt. Ich fand

Bad- temperatur	Ausfluß- öffnung	Stempel- geschwindigkeit	Mengen- verhältnis
- 0,2°	5,6 mm	0,7 mm/sec	44 %
- 0,1	5,6 „	0,1 „	10 „
- 0,2	8,1 „	0,83 „	90 „
- 0,2	8,1 „	0,07 „	23 „
- 0,1	11,2 „	1,10 „	94 „
- 0,1	11,2 „	0,27 „	42 „
- 0,1	11,2 „	0,11 „	20 „

Die als Preßkern austretende Menge war also bei großen Geschwindigkeiten etwa $\frac{9}{10}$ der verdrängten Eismasse; $\frac{1}{10}$ der letzteren ging im flüssigem Zustand zwischen Stempel und Formwandung durch, Je kleiner die Stempelgeschwindigkeit um so größer wird dieser letztere Anteil.

Auch dies weist m. E. darauf hin, daß der Einfluß des Stempels gerade bei den kleineren Geschwindigkeiten ziemlich groß ist. Es erscheint mir daher der Schluß berechtigt, daß das „Erweichen“ des Eises mit Annäherung an den Schmelzpunkt diesem Einflusse des Stempels zuzuschreiben ist, daß es also seinen Grund in der teilweisen Verflüssigung des Eises hat.

Die hier besprochenen Ergebnisse beziehen sich allerdings zumeist auf Eis von nahezu 0°, das bei Druckeinwirkung seinen Zustand längs der Schmelzkurve ändert. Daß aber auch für Eis von niedrigerer Temperatur die Verhältnisse im wesentlichen ebenso liegen, zeigen die Ausflußversuche von 1906, von denen ich hier in Tab. 8 einige anführe. Die damals verwendeten Preßformen hatten, wie oben erwähnt wurde, nahe dem Boden seitliche Ausflußöffnungen; der ganze Vorgang der Bewegung des Eises ist hier deshalb viel verwickelter, als bei den später verwendeten Stempeln. Man bemerkt jedoch, daß anfänglich bedeutende Drucke anzuwenden waren, um das Eis

zum Ausfließen zu bringen. Je nach der Geschwindigkeit, mit welcher der Stempel in die Form eindrang, waren diese Drucke nahezu gleich, oder über dem Schmelzdruck, welcher der Badtemperatur entspricht. Nur bei ganz kleinen Geschwindigkeiten, also wenn der Einfluß des Stempels stark zur Geltung kam, lagen diese Anfangsdrucke relativ niedrig.

Tabelle 8.

Ausflußöffnung 11,15 mm.

Tag	Badtemp.	Druck reduziert kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer der Pressung	Druck-schmelztemp.
6. III. 06	— 4,0°	680	0,103	15''	— 5,2°
		580	0,165	15	— 4,3
	— 3,5	426	0,45	1'	— 3,2
24. III.	— 19,0	960	0,02	2	— 7,1
		760	0,02	2	— 5,7
	— 17,0	790	0,03	2	— 5,9
		790	0,07	3	— 5,9
	— 15,0	750	0,16	4	— 5,6
31. III.	— 9,0	750	0,13	1	— 5,6
		495	0,20	1	— 3,7
		420	0,22	1	— 3,2
	— 7,0	360	0,22	90''	— 2,7
1. IV.	— 5,4	690	0,07	2'	— 5,2
		410	0,07	2	— 3,1
	— 4,5	290	0,08	2	— 2,2
		210	0,08	2	— 1,8
	— 3,6	175	0,08	2	— 1,3

Ausflußöffnung 22,25 mm.

26. III. 06	— 18,0	1400	0,08	2'	— 10,5
		1210	0,10	2	— 9,2
	— 16,4	1050	0,12	2	— 7,9
		975	0,10	2	— 7,4
	— 15,0	840	0,10	2	— 6,3
27. III.	— 14,0	1400	0,23	30''	— 10,5
		1205	0,32	„	— 9,1
	— 13,2	1110	0,32	„	— 8,3
		1090	0,32	„	— 8,2
	— 12,0	1035	0,32	„	— 7,8
		975	0,32	„	— 7,3

Tabelle 8 (Fortsetzung).

Tag	Bad-temp.	Druck reduziert kg/cm ²	Geschw. mm/sec	Dauer der Pressung	Druck- schmelz- temp.
30. III. 06	-7,5°	1450	0,33	30''	-10,9°
		1000	0,40	„	- 7,5
	-7,0	750	0,50	„	- 5,6
		710	0,43	„	- 5,3
	-6,5	650	0,43	„	- 4,9
„	-5,0	650	0,57	„	- 4,9
		580	0,63	„	- 4,0
	-4,5	470	0,67	„	- 3,5

Auch in diesen Fällen erscheint es gerechtfertigt, das „Erweichen“ des Eises auf die Bildung von Schmelzwasser zurückzuführen. Die austretenden Eiskerne waren bis zur Badtemperatur von -10° wasserhaltig; erst bei noch tieferen Temperaturen kamen völlig weiße (nicht klar durchsichtige) am Rande zerklüftete Kerne aus der Form.

Als allgemeines und hauptsächliches Ergebnis der vorliegenden Untersuchung folgt also:

Die Plastizität des Eises ist durch die Wassermenge bedingt, welche es eingeschlossen enthält.

Diese Wassermenge kann, wenn das Eis seinen Zustand adiabatisch längs der Schmelzkurve ändert, berechnet werden. Ist μ der flüssige Anteil der Gewichtseinheit eines Eis-Wassergemisches, so besteht die Gleichung

$$\mu = \frac{C}{q} \cdot T \lg \frac{273}{T},$$

in welcher C die spezifische Wärme des Eises bei dem veränderlichen Druck bedeutet, der für die absolute Temperatur T aus der Gleichung der Schmelzkurve folgt; q ist die zugehörige Schmelzwärme des Eises.¹⁾ Verwendet man die p. 454 angegebenen Werte, so erhält man die Interpolationsformel

$$\mu = -0,007 t + 0,0004 t^2,$$

in welcher die Temperatur t der hundertteiligen Skala entspricht.

1) Vgl. u. A. Chwolson, Lehrbuch 3. p. 601 u. 674.

Das vom Eis eingeschlossene Wasser müßte man sich wohl in den Haarspalten verteilt denken, welche die einzelnen Kristalle bzw. Eiskörner voneinander trennen, oder die unter Druckwirkung zwischen den Plättchen entstehen, aus denen ein Eiskristall aufgebaut ist (Translation; Forelsche Streifen). Eine Wassermenge von mehreren dm^3 , oder auch m^3 dagegen, welche als Ganzes einen Hohlraum in einer entsprechend großen Eismasse ausfüllt, wird diese nicht wesentlich plastischer machen, als sie es ohne Wassermenge wäre.

Die Frage, welche die direkte Veranlassung zu der vorliegenden Arbeit war, nämlich: „warum wächst die Ausflußgeschwindigkeit des Eises bei konstantem Druck und konstanter Temperatur?“ darf nach den Resultaten, zu denen ich komme, dahin beantwortet werden: weil durch den Druck eine gewisse Eismenge verflüssigt wird, das Schmelzwasser ganz oder teilweise in die zwischen den einzelnen Eiskörnern bestehenden Haarspalten eindringt und damit die Plastizität des Eises erzeugt. Je größer der Anteil des Wassers pro Gewichtseinheit des Eis-Wassergemisches wird, um so mehr nimmt die Plastizität zu, um so mehr muß also die Ausflußgeschwindigkeit anwachsen, wenn auch der auf dem Eise lastende Druck ungeändert bleibt.

Von den Beobachtungsergebnissen soll noch das besondere Erwähnung finden, welches sich auf die Dauer der Druckeinwirkung bezieht. Es hat sich gezeigt, daß die Werte, welche man für die Schmelzdrucke bei Temperaturen nahe an 0° erhält, sich um so mehr den theoretischen nähern, je kürzer der Zeitraum ist, auf den sich eine Messung erstreckt, da dann die durch den Druck bewirkte Temperaturniedrigung und die aus dieser wieder folgende Drucksteigerung in immer engeren Grenzen gehalten werden. Dies steht in engem Zusammenhang mit den Beobachtungsergebnissen über Elastizität und innere Reibung des Eises, welche ich 1902 veröffentlicht habe.¹⁾ Ich habe damals als ein Resultat (auf p. 422) angeführt:

Bei mäßiger Belastung wächst der Koeffizient der inneren Reibung mit der Dauer des Zwanges und zwar nach 5 Minuten

1) Vgl. H. Hess, *Ann. d. Phys.* 8. p. 405 u. f. 1902.

langer Dauer ungefähr proportional der Zeit, während für kürzere Dauer der Beanspruchung die Zunahme dieses Koeffizienten durch ein verwickeltes Gesetz geregelt erscheint.

Für diese kurz dauernden Belastungen ergab sich nämlich ein rascheres Anwachsen des Koeffizienten der inneren Reibung. Der Grund dafür liegt wohl in den Temperaturänderungen, denen das der Deformation unterworfenen Eis an den Belastungsstellen unterworfen ist; sie sind bei Beginn der Belastung wesentlich größer, als nach einiger Dauer derselben. Es wäre nicht ohne Interesse, sie experimentell zu verfolgen.

Was nun die Verwendbarkeit des Hauptresultates dieser Arbeit für die Theorie der Gletscherbewegung anlangt, so ist diese nach zwei Richtungen möglich; 1. auf Vorgänge im Inneren der Gletschermasse und 2. auf Vorgänge an der Gletschersohle.

1. Im Gletscher herrscht (wenigstens im Abschmelzgebiet) die dem (Vertikal-)Druck entsprechende Schmelztemperatur. Hier hat man es auch mit adiabatischen Zustandsänderungen zu tun; es wird also das Eis in den verschiedenen Tiefen pro Gewichtseinheit verschieden große Wassermengen enthalten, die sich aus der Formel p. 488

für	11,0 m	zu	0,047 g/dm ³
„	22	„	0,094 „
„	110	„	0,471 „
„	220	„	0,942 „
„	440	„	1,884 „

ergeben. Sie sind fast doppelt so groß, als ich sie 1904 in „Die Gletscher“ p. 320 angegeben habe. Da zur Berechnung dieser Wassermengen die Änderungen der Schmelzwärme und der spezifischen Wärme des Eises, welche mit Temperaturänderungen auftreten, bereits berücksichtigt sind, so ist es völlig berechtigt, die Plastizität der Gletschermasse auf die Wassermengen zurückzuführen, welche das gedrückte Eis zwischen den einzelnen Gletscherkörnern eingeschlossen enthält. Die Zerklüftung des Gletschers, welche nach Ansicht hervorragender früherer und jetzt lebender Physiker die Ursache der Plastizität des Gletschereises sein soll, ist vielmehr ein Zeichen des Mangels und der großen Unterschiede der

Plastizität, welche innerhalb der Gletschermasse, an den Rand- und Oberflächengebieten auftreten. Das Eis dieser letztgenannten Gletscherteile steht unter geringen Drucken, enthält also weniger Wasser und ist daher auch spröder, als das Eis der axial und tief liegenden Teile.

Die Verschiebbarkeit der Gletscherkörner gegeneinander (auch die Plastizität der einzelnen Körner) muß gegen die Gletschersohle zunehmen. Ob hier eine der Zunahme der Wassermenge direkt proportionale Zunahme dieser Verschiebbarkeit auftritt, oder ob die letztere rascher anwächst, wird sich erst feststellen lassen, wenn auf Grund der neuen Geschwindigkeits- und Ablationsmessungen, sowie der Ergebnisse der Tiefbohrungen auf dem Hintereisgletscher beim sorgfältigen Studium der Strömung dieser Eismasse die Grundgeschwindigkeiten und die Änderung der Geschwindigkeit mit der Tiefe hinreichend sicher gefunden werden können. Darf man sich auf den einfachsten Fall, den direkter Proportionalität, beschränken, so ergibt sich, daß die Geschwindigkeitsabnahme gegen die Tiefe dem Quadrate der Eistiefe proportional erfolgt.

Die im Inneren des Gletschers, zwischen den Körnern vorhandene Wassermenge ist auch die Ursache der raschen Ausbreitung von Druckschwankungen, welche im Firngebiet durch zeitliche Änderung der Niederschlagsmengen auftreten. Diese rasche Ausbreitung ist am Rhonegletscher und besonders durch Blümckes und Finsterwalders Messungen der jahreszeitlichen Geschwindigkeitsschwankungen am Hintereisferner nachgewiesen.

Die im Haarspaltennetz des Gletschers eingeschlossene, mit den Druckschwankungen veränderliche Wassermenge ist auch die Ursache davon, daß beim vorschreitenden Gletscher die Schwellung der Zunge dem aus dem Firngebiet kommenden Massenzuwachs stark voraneilt.

2. Auf der Gletschersohle befindet sich die Eismasse unter ähnlichen Bedingungen, wie das Eis in den Preßformen bei den Versuchen, über welche hier berichtet wurde, d. h. es findet Wärmezufuhr vom Gletscherbett aus statt, gegen welches das Eis beständig hinabsinkt. Das Gletscherbett vertritt also die Rolle des Stempels bei den Versuchen. Die Schmelzfläche des Eises muß daher für diesen praktischen Fall bei der

Temperaturenachse ähnliche Abweichungen gegenüber der theoretischen Fläche zeigen, wie bei meinen Versuchen, wenn sie auch wegen der veränderten Wärmeleitungsverhältnisse quantitativ andere, meistens wohl kleinere sind. Es muß also schon bei Drucken, die unterhalb des theoretischen Schmelzdruckes liegen, eine gewisse Schmelzgeschwindigkeit auftreten. Rechnet man mit plausiblen Annahmen (da es an genügend sicheren Daten fehlt) so findet man, daß z. B. für eine Schmelzgeschwindigkeit kleiner als 0,0001 mm/sec die Drucke annähernd um $\frac{1}{6}$ kleiner werden, als die theoretischen Schmelzdrucke bei einer Tiefe des Gletschers von mehr als 600 m (bei geringeren Tiefen reduziert sich die Druckminderung auf etwa $\frac{1}{10}$ des Schmelzdruckes). Die Überdrucke sind (über die Eisdicke hinaus, welche durch Wärmezufuhr aus der Erde geschmolzen wird) zum Schmelzen des Eises verfügbar. Die Eismenge, welche geschmolzen wird, hängt nur davon ab, mit welcher Geschwindigkeit das Eis an den einzelnen Stellen nachsinken kann, um an die Stelle der weggeschmolzenen Massen zu kommen. Je tiefer aber eine Eisschicht ist, um so größer wird diese Geschwindigkeit. Daraus folgt, daß sehr dicke Eisdecken wegen der Abschmelzung, die sie durch ihr eigenes Gewicht an ihrer Sohle verursachen, rasch einsinken. —

Wo das Bett eines Gletschers eine beträchtliche Querschnittsminderung für die strömende Masse bedingt, wird ein Austauen an den Rändern eintreten; der Druck nimmt zu, die Plastizität der axialen Teile und damit deren Strömungsgeschwindigkeit wächst an; im Randgebiet muß jedoch ein reichliches Abschmelzen des Eises eintreten. Das unterkühlte Schmelzwasser wird zur subglazialen Verwitterung des widerstehenden Gesteines wesentlich beitragen, so daß das Bewegungshindernis relativ rascher Zerstörung unterworfen ist.

Nürnberg, Realgynasium, Juli 1911.

(Eingegangen 28. Juli 1911.)
