

Untersuchungen zum Verformungsverhalten des Meereises im Eclipse Sound (Baffin Island) und Messungen des Reibungskoeffizienten Stahl - Eis

Von S. Finke*

Zusammenfassung: Es wird über Untersuchungen zur Plastizität von Meereis berichtet. Mit verschiedenen Verformungsmethoden (Stauchung, Biegung, Scherung und Dehnung) werden Fließkurven zahlreicher Proben in Abhängigkeit von Temperatur, Verformungsgeschwindigkeit, Entnahmetiefe und Orientierung relativ zur Eisoberfläche ermittelt. Zum Abschluß wird eine Messung des Reibungskoeffizienten Stahl — Eis beschrieben. Die Reibungsflächen werden dabei vertikal in einem Bohrloch unter einem Andruck von 7 bis 80 kp/cm² bewegt.

Summary: Observations are reported on the plastic behaviour of sea ice. The specimens were subjected to different deformation methods, such as compression, bending, shearing, and dilatation. The dependence of the stress strain curves on temperature, strain rate, drilling depth, and orientation parallel or perpendicular to the ice surface was investigated. Finally, a measurement taken of the friction parameter steel — ice is described. The friction surfaces were moved vertically in a drilling whole at constant pressures varying from 7 to 80 kp/cm².

1. Einleitung

Zum wissenschaftlichen Programm des Canadian Artic Channel-Projektes 1972 gehörte unter anderem eine Untersuchung zur Plastizität des Meereises. Der vorliegende Bericht stellt eine Zusammenfassung der hierbei gewonnenen Ergebnisse dar. Außerdem wird eine Messung des Reibungskoeffizienten Stahl — Eis beschrieben.

Aufschluß über das plastische Verhalten eines Materials gibt vor allem die sogenannte Fließkurve. Sie stellt die Abhängigkeit der Deformation einer Probe — gemessen etwa als relative Längenänderung — von der äußeren Belastung dar. Mit Hilfe einer speziell für den Einsatz im Gelände konstruierten Materialprüfungsmaschine wurden daher von einer größeren Zahl von Eisproben die Fließkurven bei Variation verschiedener Parameter ermittelt. Insbesondere kamen verschiedene Verformungsmethoden, nämlich Stauchung, Biegung, Scherung und Dehnung, zur Anwendung.

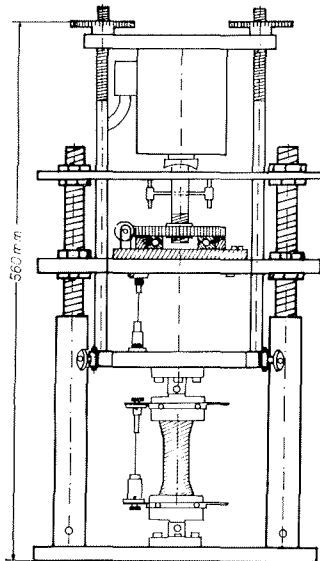
2. Eigenschaften des untersuchten Meereises

Die Proben stammten aus der Meereisdecke des Eclipse Sound. Der Entnahmeort lag in der Nähe der Siedlung Pond Inlet (72°43'N, 77°30'W) etwa 700 m von der Küste entfernt an einer Stelle, die nur sehr wenig Spalten und Schollenüberschiebungen aufwies. Die Eisdicke betrug dort zur Zeit der Untersuchungen, Mitte Mai bis Anfang Juni, etwa 180 cm. Die Schneebedeckung erreichte eine Höhe von rund 20 cm. Die Temperatur des Eises stieg von —6° C einige Zentimeter unter der Oberfläche bis auf —2,0° C an der Meerwassergrenze an. Die oberste Schicht des Eises bestand aus feinkörnigem Schnee-Eis mit einer Schichtdicke von 3 cm. Die Körner besaßen nur einen lockeren Zusammenhalt. Die Eisdecke zerbröckelte bereits bei geringer äußerer Belastung. Die unmittelbar darunterliegenden Meereiskristallite erreichten nach Untersuchungen von G. VOLL und R. WALTER bereits eine mittlere Länge von rund 1 cm. Mit zunehmender Tiefe wuchs die Korngröße schließlich auf 7 cm an. Wegen der unterschiedlichen Wachstumsgeschwindigkeit der c- und a-Achsen der hexagonalen Eiskristalle bestand die Eisdecke von einigen Zentimetern Tiefe ab nur noch aus Körnern, deren Basis senkrecht zur Oberfläche orientiert war. Das Meereis enthielt zahlreiche Luft- und Wassereinschlüsse. Im Laufe des Untersuchungszeitraumes nahm die Dichte und Größe der Wassereinschlüsse beträchtlich zu.

* Dr. Siegfried Finke, Institut für Physik der Universität, 46 Dortmund-Hombruch, Postfach 500

3. Experimentelle Einzelheiten

Mit einer Kettensäge wurde eine stufenförmige Vertiefung in die Eisdecke eingeschnitten. Daraus konnten mit Hilfe eines Kernbohrers Proben aus verschiedenen Eistiefen entnommen werden. Für die Oberflächenbearbeitung der Stauch- und Zugproben stand eine batteriebetriebene Drehbank zur Verfügung (Durchmesser der Stauchproben = 35 mm, Länge = 70 mm). Die abgedrehten Zugproben wurden mit Süßwasser in Halteköpfe eingefroren (siehe Abb. 1). Die Biegeproben besaßen einen rechteckigen Querschnitt von 30 cm². Sie wurden ohne nachfolgende Bearbeitung unmittelbar mit der Kettensäge aus der Eisdecke herausgeschnitten.



Die benutzte Verformungsapparatur, die nur geringes Gewicht und kleine Abmessungen besitzen durfte, ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Der Antrieb (nicht eingezeichnet) erfolgte über ein hoch untersetzendes Schneckengetriebe durch einen Gleichstrom-Nebenschlußmotor. Die Kraftmessung geschah mit einer Kraftmeßdose (Fabrikat: Hottinger, Meßbereich: 1 Mp) mit nachgeschalteter Trägerfrequenz-Meßbrücke. Die Messung der Längenänderung der Proben erfolgte mit einem induktiven Wegaufnehmer. Diese Vorrichtungen wandelten die Meßgrößen Last und Deformation in Gleichstromsignale um, so daß ein XY-Schreiber die Fließkurve unmittelbar aufzeichnen konnte.

Abb. 1: Schematische Darstellung der Verformungsapparatur. Eingezeichnet ist eine Zugprobe. Stauchproben werden zwischen die beiden darüberliegenden Stahlplatten gestellt. Für Biege- und Sicherungsversuche können geeignete Hilfsvorrichtungen eingebaut werden.

Fig. 1: The universal testing machine. Shown is a tensile specimen. Compression specimens are placed between the two upper loading plates. For bending and shearing experiments auxiliary equipment can be mounted.

4. Ergebnisse

a) Stauchversuche

Ergebnisse von Stauchproben liegen in größerer Zahl vor. Hier konnte die Abhängigkeit der Fließkurve von verschiedenen Parametern untersucht werden. Die allgemeine Gestalt der Stauchkurve ist folgende (Abb. 2 bis 4): In einem anfangs angenähert linearen Teil steigt sie sehr schnell bis zu einem Maximum (der oberen Streckgrenze) an, das nach etwa 0,5—1% Stauchgrad erreicht ist. Danach fällt sie mit immer geringer werdender Neigung ab. Schon bei 4% Stauchgrad verläuft sie praktisch parallel zur ϵ -Achse. In diesem Kurvenbereich kann jede Gestaltsänderung der Probe durch Anlegen einer konstanten Last erreicht werden, wenn man sie nur hinreichend lange einwirken läßt. Man beobachtet also im Gegensatz zur plastischen Verformung von Metallen *keine* Verfestigung der Probe; es ist $d\sigma/d\epsilon < 0$. Der steile, angenähert lineare Teil der Kurve repräsentiert *nicht* den elastischen Bereich der Verformung; denn entfernt man die Last, so dehnt sich die Probe nicht wieder aus, wie es bei rein elastischem Verhalten zu erwarten wäre. Außerdem ist der Anstieg dieses Kurvenabschnittes fast um eine Größenordnung geringer als der Elastizitätsmodul des Eises, wie er etwa durch Ultraschallmessungen ermittelt werden kann. Daraus ist zu schließen, daß der elastische Verformungsbereich des Eises bei den hier vorliegenden Versuchsbedingungen (kleine Verformungsgeschwindigkeit) kleiner als das Auflösungsvermögen der Meßapparatur sein muß, das etwa bei $\epsilon = 0,07\%$ liegt.

Entscheidend ist der Einfluß der Temperatur bei der Stauchung von Eisproben. Abb. 2

zeigt deutlich die Abnahme der oberen Streckgrenze bei Annäherung an den Schmelzpunkt des Meereises, der auf Grund des Salzgehaltes von rund 32‰ bei $-2,0^{\circ}\text{C}$ liegt. Weiterhin ist die Fließkurve des Eises im Stauchversuch stark abhängig von der Verformungsgeschwindigkeit, wie aus den Abb. 3, 4 und 6 hervorgeht. Die obere Streckgrenze wächst mit steigender Verformungsgeschwindigkeit. Das Eis verhält sich außerdem zunehmend spröder; denn die Deformation bis zum Bruch wird immer geringer. Bei $V \geq 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ wird die obere Streckgrenze schon nicht mehr erreicht; die Probe zersplittert vorher explosionsartig. Bruchlast und -deformation streuen stark von Probe zu Probe. Die Bruchdeformation liegt jedoch immer unter 1%.

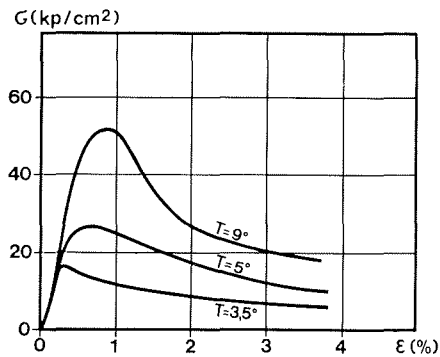


Abb. 2: Temperaturabhängigkeit der Stauchkurve, Entnahmetiefe 3 cm, Verformungsgeschwindigkeit $V = 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$.
 Fig. 2: Dependence of stress on strain and temperature, strain rate $V = 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$. The specimens were vertically drilled 3 cm below the ice surface.

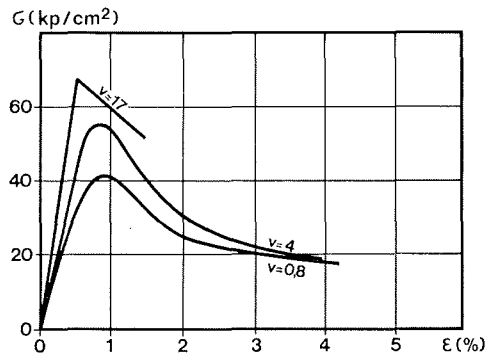


Abb. 3: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Stauchkurve (Angaben in 10^{-4} sec^{-1}), Entnahmetiefe 3 cm, vertikal gebohrt, Temperatur -9°C .
 Fig. 3: Strain rate dependence of the stress strain curve. The values of the strain rate must be multiplied by 10^{-4} sec^{-1} . The specimens were vertically drilled 3 cm below the ice surface. Temperature -9°C .

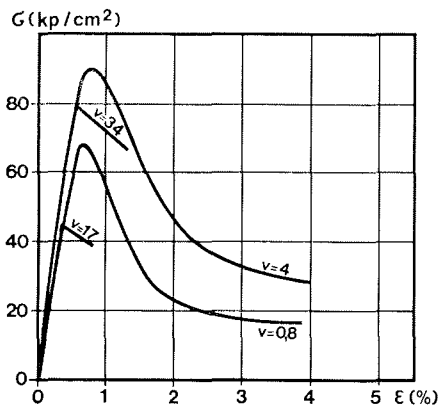


Abb. 4: wie Abb. 3, jedoch Entnahmetiefe 27 cm.
 Fig. 4: like Fig. 3, only drilling depth 27 cm.

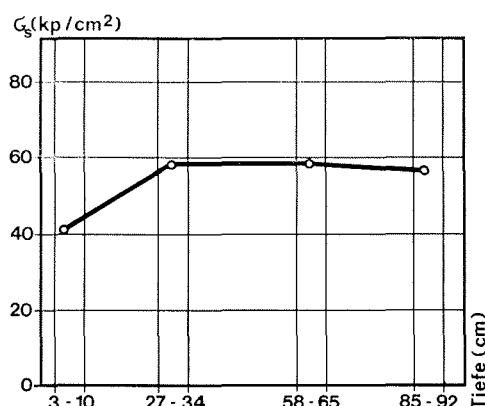


Abb. 5: Abhängigkeit der oberen Streckgrenze in der Stauchkurve von der Entnahmetiefe der Eisproben, Temperatur -10°C , $V = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$.
 Fig. 5: The upper yield stress as a function of the drilling depth (Temperature -10°C , $V = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$).

Von Bedeutung ist weiterhin die Zunahme der Festigkeit des Eises mit zunehmender Tiefe. Die Abb. 3 und 4 zeigen, daß die obere Streckgrenze bei konstanter Verformungsgeschwindigkeit um etwa 50% anwächst, wenn man die Proben nicht mehr aus 3, sondern

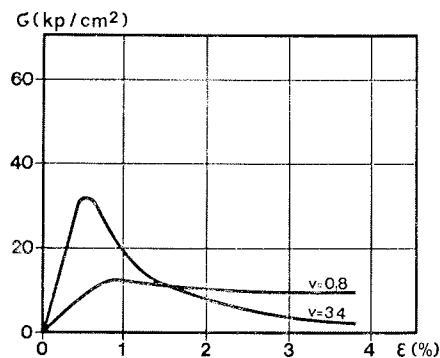


Abb. 6: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Stauchkurve bei horizontal gebohrten Proben, Entnahmetiefe 23 cm, Temperatur -11°C .

Fig. 6: Strain rate dependence of the stress strain curve of horizontally drilled specimens, 23 cm below the ice surface, temperature -11°C .

aus 27 cm Tiefe entnimmt. In Abb. 5 ist die obere Streckgrenze in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe dargestellt. Leider konnte wegen der geringen zur Verfügung stehenden Meßzeit nicht die gesamte Eisdecke von 180 cm Mächtigkeit untersucht werden. Man beobachtete am Entnahmeort bei etwa 12 cm Tiefe eine deutliche Schichtung des Eises. Oberhalb dieser Grenze erschien das Eis merklich trüber — es enthielt wesentlich mehr mikroskopische Einschlüsse — als in der darunterliegenden Schicht.

Bemerkenswert ist das unterschiedliche Verhalten von horizontal und vertikal (d. h. Stauchachse parallel zur Oberflächennormalen der Eisdecke) gebohrten Proben. Ein Vergleich der Abb. 4 und 6 ergibt, daß der Kurvenanstieg im Anfangsteil der Fließkurve für horizontal gebohrte Proben deutlich geringer ist. Die obere Streckgrenze beträgt außerdem nur etwa 20—30% des Wertes für vertikal gebohrte Proben. Dieses Versuchsergebnis steht in Zusammenhang mit der Verteilung der Kornorientierungen im Probeninnern. Wie bereits im Abschn. 2 erwähnt, stehen die Basisflächen der Eiskristallite senk-



Abb. 7: Beispiel einer gestauchten, horizontal gebohrten Probe.

Fig. 7: A horizontally drilled specimen loaded by compression.

recht zur Eisoberfläche. Das hat zur Konsequenz, daß die an der Probe angreifende Kraft einmal in den Basisflächen wirkt und zum andern senkrecht dazu. Horizontal gebohrte Proben zerbrechen unter dem Einfluß einer Druckspannung zumeist in drei Keile, wie ein Beispiel in Abb. 7 zeigt.

b) Biegeversuche

Bei den Biegeversuchen wurde die Bruchspannung in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe und der Stempelgeschwindigkeit gemessen. Unter der Bruchspannung σ_B versteht man bei einer dreischneidigen Versuchsanordnung den Ausdruck

$$\sigma_B = \frac{3 L K}{2 b h^2}$$

(L = Balkenlänge, b = Balkenbreite, h = Balkenhöhe, K = einwirkende Kraft). Innerhalb des untersuchten Tiefenbereiches von 5 bis 70 cm ist keine Tiefenabhängigkeit zu beobachten. σ_B beträgt im Mittel 4,7 kp/cm² bei einer Temperatur von — 5° C und einer Stempelgeschwindigkeit von 0,036 mm/sec*). Dagegen hängt σ_B von der Stempelgeschwindigkeit ab: Bei einer Steigerung von v auf 0,26 mm/sec fällt σ_B auf den Wert 2,5 kp/cm² ab.

Anisotropes Verhalten der Proben tritt auch bei der Biegung auf. Vertikal aus der Eisdecke herausgeschnittene Quader weisen eine mittlere Bruchspannung von 11,9 kp/cm² auf im Gegensatz zu 4,7 kp/cm² bei horizontalem Schnitt. Bei vertikal gesägten Proben wirkt eine Zug- oder Druckspannung in der Basisfläche der Kristallite, während sie sonst in Richtung der c-Achse angreift.

c) Scherungsversuche

Scherungsproben zeigen ebenso wie die Stauchproben eine zunehmende Sprödigkeit mit wachsender Stempelgeschwindigkeit. Bei v = 0,13 mm/sec zerbrechen sie zumeist. Die Bruchspannung schwankt zwischen 13 und 15 kp/cm². Bei Verringerung der Geschwindigkeit auf 0,036 mm/sec beobachtet man eine Fließkurve ähnlich wie in Abb. 3 und 4 jedoch mit einer oberen Streckgrenze von nur 11 kp/cm² und wesentlich geringerer Anfangssteigung (Entnahmetiefe 3—8 cm, Temperatur — 10° C). Nach Überschreiten der in Abschn. 3a erwähnten Schichtgrenze in der Tiefe von 12 cm steigt die obere Streckgrenze unter sonst gleichen Bedingungen auf 25 kp/cm² an.

d) Zugversuche

Wegen der aufwendigen Präparationsmethode war es in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit nicht möglich, systematische Zugversuche an Eisproben durchzuführen. Es kann daher nur ein Einzelergebnis angegeben werden: Bei einer Entnahmetiefe von 30 cm, einer Temperatur von — 7° C und einer Verformungsgeschwindigkeit von 10⁻³ sec⁻¹ traten eine Bruchfestigkeit von 13 kp/cm² und eine Bruchdehnung von 0,6% auf.

In der nachfolgenden Tabelle sind noch einmal die gemittelten Meßwerte für die obere Streckgrenze, Bruchfestigkeit und Bruchverformung des untersuchten Meereises zusammengestellt.

e) Messung des Reibungskoeffizienten Stahl — Eis

Bei der gleitenden Reibung besteht zwischen der Normalkraft N und der Antriebskraft R, die erforderlich ist, eine konstante Geschwindigkeit aufrechtzuerhalten, eine lineare Beziehung

$$R = \eta N.$$

Der Proportionalitätsfaktor η heißt Gleitreibungskoeffizient. Er hängt von verschiedenen

* Zum Vergleich wurden einige Proben, die aus einem in der Nähe liegenden Eisberg stammten, unter gleichen Bedingungen vermessen. Sie besaßen im Mittel ein σ_B von 7,1 kp/cm².

Verformungs- methode	Entnahme- tiefe [cm]	T [°C]	Verf.-Geschw. [10 ⁻⁴ sec ⁻¹]	σ_S [kp/cm ²]	σ_B [kp/cm ²]	ϵ_B	Proben- Anzahl
Stauchung	3 vert.	— 9	0,8	40	—	—	6
	3 vert.	— 9	4	57	—	—	13
	3 vert.	— 9	17	—	67	0,7 ⁰ / ₀	3
	27 vert.	— 9	0,8	65	—	—	7
	27 vert.	— 9	4	90	—	—	10
	27 vert.	— 9	17	—	44	0,4 ⁰ / ₀	3
	27 vert.	— 9	34	—	80	0,6 ⁰ / ₀	3
	23 hor.	— 11	0,8	10,6	—	—	5
	23 hor.	— 11	34	27	—	—	2
Dehnung	30 vert.	— 7	10	—	13	0,6 ⁰ / ₀	3
Biegung	5 hor.	— 4,5	0,036*	—	4,7	—	32
	5 hor.	— 4,5	0,26	—	2,5	—	3
	23 vert.	— 5	0,036	—	11,9	—	9
Scherung	8 hor.	— 10	0,13	—	14,5	—	7
	8 hor.	— 10	0,036	11	—	—	8

Tab. 1

Tab. 1: Obere Streckgrenze σ_S , Bruchfestigkeit σ_B und Bruchverformung ϵ_B des untersuchten Meereises bei verschiedenen Verformungsbedingungen.

Tab. 1: Upper yield stress σ_S , failure stress σ_B and failure strain ϵ_B measures by different methods of deformation.

Parametern, insbesondere von der Beschaffenheit der gegeneinander abgleitenden Flächen ab.

Im Folgenden werden einige Messungen des Reibungskoeffizienten Stahl—Eis in Abhängigkeit vom Andruck $p = N/F$ beschrieben. Die Ergebnisse wurden mit einer Apparatur, wie sie in Abb. 8 skizziert ist, gewonnen. Ein Hydraulikstempel preßt zwei gekrümmte und an den Rändern abgerundete Reibungsflächen an die Innenwand eines Bohrloches in der Eisdecke. Der gewünschte Andruck läßt sich mit einer Hydraulikpumpe erzeugen und mit Hilfe einer stickstoffgefüllten Speicherblase konstant halten. Der Antrieb der Reibungsvorrichtung in vertikaler Richtung geschieht ebenfalls hydraulisch, und zwar mit einer Geschwindigkeit von 1,5 cm/sec. Einige Meßergebnisse im Druckbereich von 7 bis 80 kp/cm² sind in Abb. 9 wiedergegeben. Es zeigt sich eine geringe Zunahme von η mit wachsendem Druck. Sämtliche η -Werte liegen weit über dem Wert 0,015, der bei sorgfältig polierter Süßwassereisoberfläche und bei Drucken in der Größenordnung kp/cm² gewonnen wird. Die Ergebnisse finden ihre Erklärung darin, daß sich das Eis unter dem Einfluß der angelegten Druckspannung bei einer Temperatur von —4,5° C bereits plastisch verformt, wie in Abschn. 4a berichtet wurde. Der Stahlkörper dringt also in die Eiswand ein und leistet bei seiner Vorwärtsbewegung Verformungsarbeit. Das Eindringen wird begünstigt durch die in großer Zahl vorhandenen Wassereinschlüsse im Eis. Sind diese nämlich durch einen vorangegangenen Reibungsversuch eingeebnet, so ergibt sich bei Wiederholung des Experimentes eine Abnahme des Reibungskoeffizienten auf etwa 50⁰/₀ des Anfangswertes.

Die obigen Untersuchungen wurden von Professor Thyssen angeregt. Herrn Dornseif danke ich für die sorgfältige Erstellung der Meßapparaturen in der Werkstatt des Geo-

* Die für die Biegung und Scherung angegebenen Werte stellen die Stempelgeschwindigkeit in mm/sec. dar.

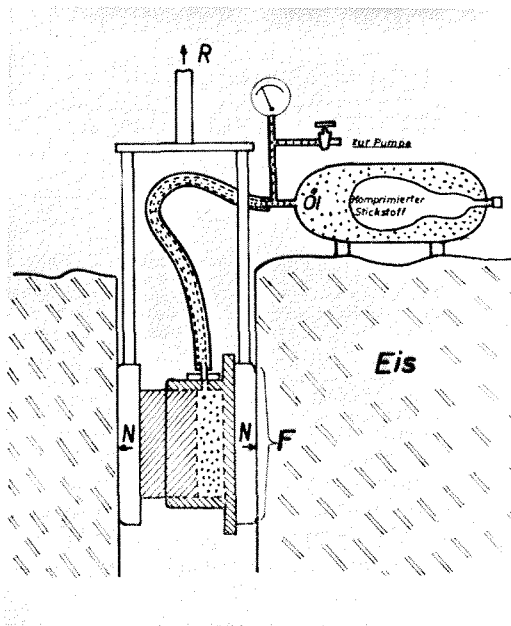


Abb. 8: Schematische Darstellung der Apparatur zur Reibungsmessung.
 Fig. 8: The apparatus for measuring ice friction parameters.

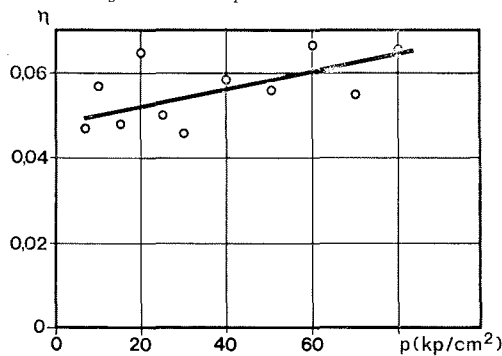


Abb. 9: Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten Stahl — Eis vom Andruck, Temperatur $-4,5^{\circ}$ C, Vorschubgeschwindigkeit 1,5 cm/sec. Die Meßpunkte stellen die Mittelwerte aus 60 Einzelmessungen dar.
 Fig. 9: Dependence of the friction parameter steel — ice on the pressure, temperature $-4,5^{\circ}$ C, vertical velocity 1,5 cm/sec.

physikalischen Institutes, Münster. Ferner bin ich Professor Walter für die Unterstützung bei den Feldarbeiten zu Dank verpflichtet.

Die Anregung für die Expedition ging von der Bremer Werft A.G. "Weser" aus. Die erforderlichen finanziellen Mittel wurden vom Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft bereitgestellt.