

Aufmessung der Strömungen unter dem Eis des Eclipse Sound (Baffin Island) und Bestimmung von Reibungskoeffizienten zwischen Stahl und Eis

Von Hermann Grothues-Spork *

Zusammenfassung: Mit hydrodynamischen Flügeln und einer speziellen Richtungsfahne wurden an mehreren Punkten einer 25 km langen Traverse über den Eclipse Sound zwischen Baffin Island und Bylot Island Stromrichtungen und -geschwindigkeiten unter dem Eis gemessen und registriert. Bei den Messungen von Mai bis Juni 1972 herrschte durchweg eine östliche Strömung einer mittleren Geschwindigkeit von 5–7 cm/s vor, die durch Gezeiten und örtlich bedingte Einflüsse überlagert war (max. 12 cm/s).

Im 2. Teil des vorliegenden Aufsatzes wird über die Ermittlung von Reibungsbeiwerten zwischen Stahl und Eis berichtet. Hierfür wurden Stahlkegel verschiedener Rauigkeit in entsprechend kegelförmige Eisbohrungen gebracht und über das für eine Bewegung notwendige Drehmoment auf die Mantelreibung am Kegel geschlossen. Die Ergebnisse zeigen den Einfluß von Eistemperatur und Oberflächenrauigkeit und in einigen Fällen auch den Einfluß der Zeit zwischen den Messungen.

Summary: Velocity and direction of the current under the sea ice of the Eclipse Sound between Baffin Island and Bylot Island were measured with specially developed devices and registered on a recorder. During the period of registration (May — June 1972) an easterly current of 5–7 cm/s superimposed by tidal and local influences (max. 12 cm/s) was found.

In addition, measurements of friction between steelcone surfaces and corresponding conical ice bores are reported on. The plotted results show the influence of ice-temperature, surface quality and in some cases the influence of time.

Einleitung

Auf die allgemeine Aufgabe, das Ziel und das Programm der im Rahmen des Canadian Arctic Channel-Projektes (EOS-Routing Study 1972) durchgeführten Arbeiten wurde bereits an anderer Stelle des vorliegenden und des letzten Heftes 42/2 ausführlich eingegangen.

Die Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau übernahm bei dieser Expedition die ozeanographischen Messungen der Geschwindigkeiten und Richtungen der Meeresströmung unter der Eisdecke, um neben einer Überprüfung der Eignung verschiedener Meß- und Registriergeräte unter arktischen Bedingungen eine Grundlage für spätere Berechnungen der Schubkraft zu erhalten, die von der Strömung auf die Eisdecke übertragen wird und zu Spannungen im Eis führt.

Neben den Strömungsmessungen wurden mit Hilfe von Stahlkegeln verschiedener Rauigkeit Reibungskoeffizienten zwischen Meereis und Stahl ermittelt, Werte, die bei der Berechnung des Eisreibungswiderstandes an einer Schiffsaußenhaut von Interesse sind.

1. MESSUNGEN VON STROMUNGSRICHTUNGEN UND -GESCHWINDIGKEITEN UNTER DEM EIS

1.1 Meßeinrichtungen

Die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten erfolgte mit Meßflügeln der Firma Ott, deren Kontaktsignale gezählt bzw. in analoge Meßgrößen umgewandelt, auf einem Linienschreiber aufgezeichnet wurden. Verwendet wurden ein Universalflügel von 80 mm Durchmesser und z. T. auch ein Minorflügel von 40 mm ϕ , wobei für das Einbringen ins Wasser wegen der begrenzten Eisbohrlochdurchmesser von 12" (30,5 cm) der große Flügel mit seiner Halterung abgeklappt werden mußte. Das Meßgestänge ließ sich bis auf 10 m Tiefe unter Oberkante Eisdecke absenken. Bei den Langzeitmessungen wurden die Umdrehungsimpulse in einem Ott-Digital-Analogwandler umgewandelt und

* Dipl.-Ing. Hermann Grothues-Spork, Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin 12, Müller-Breslau-Straße.

auf einem Linseis-Recorder (2-Komponenten-Linienschreiber) aufgezeichnet. Zur Eichung und für Kontrollmessungen konnten die Impulse auch über Zählwerke bestimmt werden. Die Energieversorgung des Digital-Analog-Wandlers und des Recorders erfolgte über 12-V-Akkus, deren Spannung zum Betrieb des Recorders über einen Spannungswandler (Zerhacker) auf 220 V transformiert wurde. In einigen Fällen stand auch ein 220-V-Generator zur Verfügung.

Die Strömungsrichtung wurde mit einer leichten Richtungsfahne gemessen, die 20 cm über dem Ottflügel am Meßgestänge zwischen zwei Schutztellern in Zapfen gelagert war und einen Magneten trug. Je nach Richtung der Fahne wurden vom Magneten Reedkontakte betätigt, die alle 15° im oberen Teller eingelassen waren und über einen Spannungsteiler entsprechende Recorderanzeigen verursachten. Nach Einbringen in die gewünschte Wassertiefe wurde das Gestänge und somit der Geschwindigkeitsmeßflügel durch Drehung in die durch den 0° -Reedkontakt gekennzeichnete Meßposition gebracht und die Stromrichtung mit einer Winkelpfeilvorrichtung anhand geodätischer Fixpunkte bestimmt.

1.2 Durchführung der Messungen

Alle Messungen fanden auf der markierten Traverse zwischen Pond Inlet und Bylot Island statt. Nach Zusammenbau der Anlage und ersten Funktionsproben im behelfsmäßigen Labor an Land wurde die Meßeinrichtung zunächst bei der Station „Eisphysik“ in Landnähe auf dem Eis aufgebaut und Funktionsprüfungen in situ, Eichungen und einige kleinere Umbauten vorgenommen. Mit der Energieversorgung über einen 220-V-Generator konnten hier über mehrere Tage hin die Verläufe der Stromgeschwindigkeiten sowie Richtungsänderungen gemessen und registriert werden. Für die weiteren Messungen auf der Traverse wurden das Gestänge, die Meßgeräte sowie Eisbohrer etc. auf Schlitten verladen und zu den entsprechenden Meßstellen transportiert. Die tägliche Wartung des Flügels, das Auswechseln der Batterie und ein Freilegen des mehr oder weniger eingefrorenen oder eingeschneiten Gestänges sowie eine Kontrolle der Schreibnadeln, des Registrierpapiers und der Null-Lage des Schreibers waren erforderlich.

1.3 Ergebnisse

Die Stromgeschwindigkeiten, gemessen in einer Tiefe von 9 m unter der Eisoberfläche, wurden in Diagrammen über der Tageszeit aufgezeichnet. In Abb. 2 ist eine Reihe von charakteristischen Geschwindigkeitsverläufen wiedergegeben. Abb. 1 und Tab. 1 zeigen die Ergebnisse der Richtungsmessungen sowie die Maxima und Minima der gemessenen Stromgeschwindigkeiten. Da die untere Meßwertgrenze des verwendeten Ottflügels bei 4–5 cm/s liegt, konnten keine kleineren Geschwindigkeiten registriert werden. Auch ein vorzeitiges Absinken der für den Betrieb der Anlage notwendigen Akku-Leistung oder Störungen bei der Meßwertregistrierung führten zu einigen Unterbrechungen der kontinuierlichen Aufzeichnungen. Die größten Stromgeschwindigkeiten lagen bei 12 cm/s. Aus den Meßwertschrieben ließen sich weiterhin kurzzeitige Geschwindigkeitsschwankungen von 20–30% vom Mittelwert erkennen.

Aus den Verläufen der Stromgeschwindigkeiten geht der Einfluß der Gezeiten z. T. recht klar hervor. Diesem Einfluß überlagert sich jedoch eine weitgehend gleichförmige, nach Osten gerichtete Meeresströmung im Sund von 5–7 cm/s neben örtlich bedingten Sonderbewegungen und Sekundärströmungen aufgrund der speziellen Geographie und Topographie des Meeresgrundes sowie infolge von Dichteströmungen. Entsprechend verhalten sich, wie aus den Meßwertverläufen hervorgeht, die Strömungsrichtungen. Auch hier waren für Minuten anhaltende Abweichungen von $\pm 15^\circ$ vom Mittelwert, für kurze Zeit sogar Änderungen von 30° erkennbar.

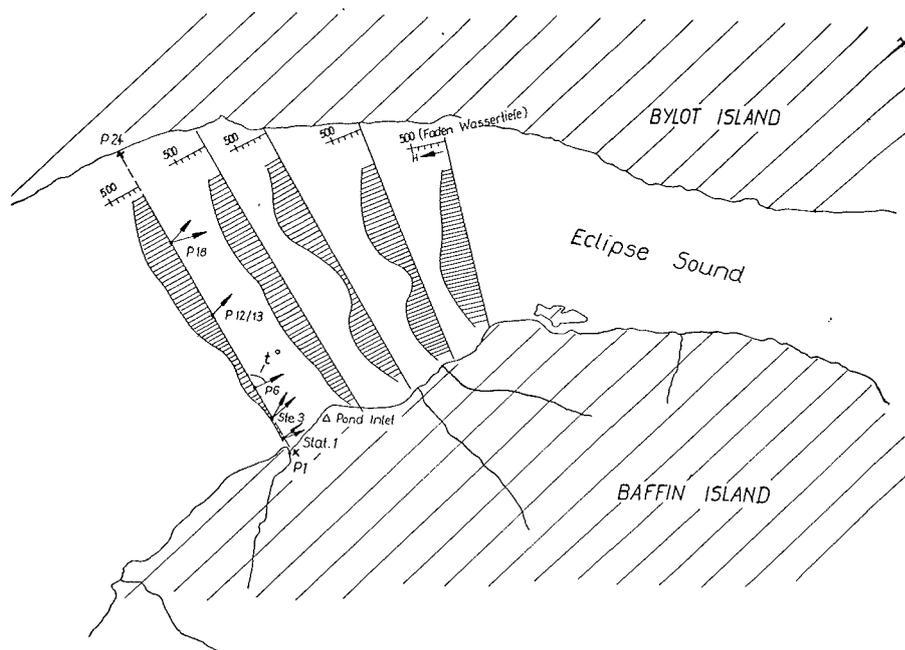


Abb. 1: Lageskizze mit Profilen der Wassertiefe und gemessenen Stromrichtungen.
 Fig. 1: Site of the traverse with distribution of water-depths and measured current-directions.

| Meßstelle | Datum | Maxima | | Minima | | Mittlere Strömungs- richtung t° |
|-----------|-------------|---------|-----------|---------|-----------|--|
| | | Uhrzeit | c cm/s | Uhrzeit | c cm/s | |
| 13. 5. | Station 3 | 17.00 | 8 | | | 56 (71) |
| 17. 5. | Station 1 | 21.00 | 10 | 15.00 | 4 | 86 |
| 18. 5. | Station 1 | 12.30 | 12 | 2.00 | 4 | 98 |
| 18. 5. | Station 1 | 19.00 | 11,5 | 16.00 | 7 | |
| 19. 5. | Station 1 | 11.00 | 5,5 | 4.00 | 5 | |
| 19. 5. | Station 1 | | | 16.00 | 4 | |
| 20. 5. | Station 1 | 12.00 | 9,5 | 17.00 | 4,5 | |
| 20. 5. | Station 1 | 24.00 | 9 | | | |
| 21. 5. | Station 1 | 0.00 | 9 | 5.00 | 4 | 83 |
| 21. 5. | Station 1 | 15.00 | 10 | 18.00 | 5,5 | |
| 21. 5. | Station 1 | 23.00 | 8 | | | |
| 22. 5. | Station 1 | 16.00 | 8 | 5.00 | 4,5 | 85 |
| 23. 5. | Station 1 | 2.00 | 7,5 | 6.00 | 4,5 | |
| 24. 5. | P 12 — P 13 | 17.00 | 6 | 23.00 | 4 | 70 |
| 25. 5. | P 12 — P 13 | 18.00 | 7 | 24.00 | 4,5 | 72 |
| 27. 5. | M. H. P 18 | 16.00 | 9 | 21.00 | 5 | 104 |
| 28. 5. | M. H. P 18 | 3.00 | 6,5 | 8.00 | 4,5 | |
| 28. 5. | M. H. P 18 | 16.00 | 8 | 22.00 | 4 | |
| 29. 5. | M. H. P 18 | 4.00 | 6 | 9.00 | 4 | |
| 1. 6. | P 6 | 16.00 | 6 | 22.00 | 4 | 94 |
| 2. 6. | P 6 | 4.00 | 5,5 | | | |
| 3. 6. | P 6 | 9.00 | 8 | 15.00 | 5 | 94 |

Tab. 1: Zeitpunkte für die Maxima und Minima der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten.
 Tab. 1: Time of maximum and minimum current-velocity measured.

Die kurzfristigen Meßwertschwankungen beeinträchtigten auch die Ergebnisse der mehrfach unternommenen Geschwindigkeitsmessungen in verschiedenen Tiefen unter der Eisdicke, da für jede digitale Geschwindigkeitsmessung am Zählwerk eine Zeit von mindestens 50 s erforderlich war. Aus den Messungen scheint jedoch hervorzugehen, daß oberhalb 3 m Abstand von der Eisunterseite kein fühlbarer Einfluß auf die Strömungsgeschwindigkeit vorhanden ist. Die Dicke der Grenzschicht mit stärkeren Geschwindigkeitsgradienten ließ sich jedoch wegen der genannten Schwankungen nicht erfassen. Es wären dazu wesentlich mehr Meßreihen erforderlich, als bei den beschriebenen Messungen durchgeführt werden konnten.

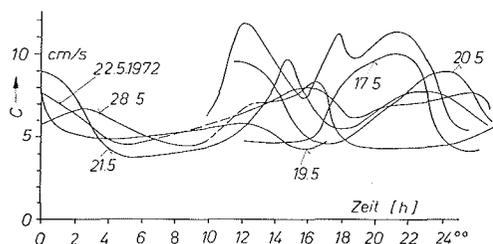


Abb. 2: Charakteristische Verläufe der Strömungsgeschwindigkeiten unter dem Eis (vergl. Tabelle I).

Fig. 2: Characteristic trends of current velocity under the ice (see table I).

1.4 Bemerkungen zur Eignung der verwendeten Verfahren und Geräte

Mit dem verwendeten Ott-Universal-Meßflügel von 80 mm Durchmesser und einer Steigung von 0,125 m ließen sich bei der herrschenden Wassertemperatur von ca. -2°C die Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb 5 cm/s gut erfassen. Die untere Grenze lag bei 4–5 cm/s. Durch Ablagerung von Meeressalz an Dichtungen, Spalte etc. wurde offenbar in einigen Fällen am stehenden Flügel eine erhöhte Haftreibung verursacht, wodurch nach einem Stehenbleiben des Flügels höhere Strömungsgeschwindigkeiten für ein Wiederanlaufen erforderlich waren. Das Zählen der durch Drehung des Flügels ausgelösten elektrischen Impulse ließ sich mit Hilfe von Zählwerken digital ohne Schwierigkeiten durchführen, so daß anhand von Eichtabellen die Stromgeschwindigkeiten direkt ausgewertet werden konnten. Jedoch die Umsetzung der pro Zeiteinheit sehr geringen Drehzahlimpulse (für den 80-mm-Ott-Flügel Frequenzen zwischen 0,15 und 0,7/s) in analoge Zeigerausschläge zur Langzeitaufzeichnung erwies sich wegen der notwendigerweise einzustellenden hohen Empfindlichkeit des Recorders bei gering pulsierenden Ausschlägen als recht störanfällig. Die Umsetzung einer derart geringen Impulshäufigkeit in analoge Anzeigen erscheint daher unzweckmäßig, besonders dann, wenn man auch kleine Stromgeschwindigkeiten unter 5 cm/s erfassen will.

Weitere Schwierigkeiten traten am Linienschreiber bei der kontinuierlichen Aufzeichnung der Zeigerausschläge durch „Einbrennen“ auf die metallbeschichtete Papierfolie auf. Kleinste, durch geänderte Papierspannung, Wind oder Berührung mit der zweiten Schreibnadel hervorgerufene Abstandsänderungen zwischen Schreibelektrode und Registrierpapier wirkten sich auf die Qualität der Aufzeichnung stark aus und führten teilweise zum völligen Ausfall der Anzeige.

Die Empfindlichkeit der Richtungsfahne erwies sich als außerordentlich hoch, nicht zuletzt durch die mit Hilfe von auftriebserzeugendem Styropor erreichte weitgehende Entlastung ihres unteren Traglagers. Auch die Anzeigegenauigkeit und Übertragung der Richtungen war einwandfrei. Die durch kleine Strömungsrichtungsänderungen bedingten, sehr häufigen Schaltvorgänge der magnetischen Reedkontakte bewirkten dagegen wiederholt einen Ausfall eines solchen Kontaktes, wodurch Unterbrechungen der Messungen durch Ausbau und Reparatur hervorgerufen wurden. Das verwendete Gestänge war angesichts der sehr kleinen Stromgeschwindigkeiten überdimensioniert und zu schwer. Außerdem

wurden durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der Aluminiumrohre vor allem nachts niedrige Lufttemperaturen in das Bohrloch geleitet und ein Festfrieren des Gestänges begünstigt.

2. MESSUNG DER REIBUNGSKOEFFIZIENTEN ZWISCHEN EIS UND STAHL

2.1 Meßvorrichtung

Für die Ermittlung der Reibungskoeffizienten wurden verschiedene Stahlkegel in passend vorgefräste Bohrungen im Eis eingebracht und bei variierten Anpreßdrücken das zum Lösen des Konus notwendige Drehmoment bestimmt. Zur Verwendung kamen abgestumpfte gerade Kreiskegel aus Stahl St 50 mit einem Öffnungswinkel von 60° und einem max. Durchmesser von 80 mm sowie ein Morsekegel mit einem Öffnungswinkel von 3° bei einem max. Durchmesser von 45 mm. Es wurden die Verhältnisse sowohl an glatten als auch an aufgerauten Kegeloberflächen untersucht. Für die Vorbereitung der Bohrungen zum Einbringen der Kreiskegel standen Fräser mit den entsprechenden Öffnungswinkeln von 60° bzw. 3° zur Verfügung. Die Kegel wurden an einer vertikalen, drehbar gelagerten Achse befestigt, an der das Drehmoment gemessen und auch die zur Vorbereitung der konischen Löcher benötigten Fräser aufgesteckt werden konnten. Das zum Lösen der eingebrachten Kreiskegel erforderliche Drehmoment an der Achse wurde über einen Hebel mit Waageschalen und Gewichten bestimmt. Zur Erhöhung der spezifischen Flächenpressung am Kegelmantel wurde die Drehachse vertikal mit Eisblöcken bis zu 200 kp belastet, so daß wegen der Keilwirkung am 3° -Morsekegel spezifische Flächenpressungen von 32 kp/cm^2 und am 60° -Kegel Werte von $4,5 \text{ kp/cm}^2$ erreicht wurden.

2.2 Durchführung der Messungen

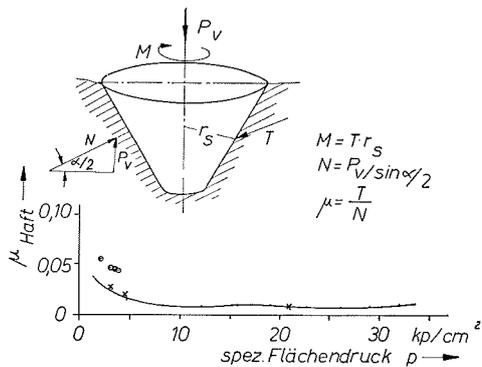
Alle Reibungsmessungen wurden bei Station 1 (Eisphysik) durchgeführt. Nach Bohren eines Führungsloches zur Aufnahme des Fräserabtriebs wurden mit den jeweiligen Fräsern Kreiskegellöcher in die vorbereitete Eisoberfläche eingeformt und schließlich der an der Drehachse aufgesteckte Konus eingebracht. Für von 20 bis 200 kp zunehmende Vertikallasten konnte dann durch stufenweise Vergrößerung des Drehmomentes der Wert bestimmt werden, bei dem die Haftreibungsschwelle am Kegelmantel überwunden war und eine erste leichte Drehbewegung einsetzte. Durch Umrechnungen ließen sich die im Mantelschwerpunkt des Konus wirksame Tangentialkraft errechnen und unter Verwendung der für die jeweilige Konusform errechneten Flächennormalkraft der jeweilige Haftreibungskoeffizient ermitteln.

Bei den Messungen betragen die Eistemperaturen -8° bis 0° C. Angesichts der durch die fortgeschrittene Jahreszeit steigenden Temperaturen und zur Ausschaltung von Strahlungseinflüssen mußten die Messungen z. T. nachts bei tiefstem Sonnenstand durchgeführt werden. Folgende Kegel wurden verwendet.

| Nr. | Konuswinkel | Manteloberfläche |
|-----|-------------|----------------------|
| 1 | 60° | glatt (geschlichtet) |
| 2 | 60° | rauh (Drehriefen) |
| 3 | 60° | rauh (Querriefen) |
| 4 | 3° | glatt (geschlichtet) |

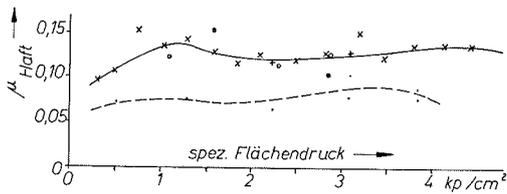
2.3 Ergebnisse

Die aus den Drehmomentmessungen errechneten Reibungskoeffizienten sind für verschiedene Rauigkeiten und Eistemperaturen in den Abbildungen 3—5 über der spez. Flächenpressung der Kegelmantelfläche an das Eis aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen



| Punkt Plot | Kegel-winkel cone-angle | Manteloberfläche surface | t _{Eis} °C t _{Ice} °C |
|------------|-------------------------|-----------------------------------|--|
| ⊙ ⊙ | 60° | glatt (smooth) | -3° |
| .. | 3° | | 0° |
| x x | 3° | rau, Drehriefen (with tool marks) | -3° |

Abb. 3: Haftreibungskoeffizienten zwischen Eis und Stahl.
Fig. 3: Static friction coefficients between ice and steel.



| Pkt. Plot | t _{Eis} °C t _{Ice} °C |
|-----------|--|
| .. | -3° |
| ++ | -3° |
| x x | -6° |
| ⊙ ⊙ | -8° |

Messung nach 5 min Ruhelage des Kegels.
Measured after 5 min time of rest.

Abb. 4: Haftreibungskoeffizienten zwischen Eis und Stahl, gemessen am 60°-Kegel mit 0,5 mm tiefen Drehriefen.
Fig. 4: Static friction coefficients between ice and steel, measured at the 60°-cone with horizontal 0.5 mm deep tool marks.

die Abhängigkeit der Reibungskoeffizienten von der Eistemperatur sowie den Einfluß der Oberflächenrauigkeit. Messungen mit dem schlanken 3°-Morsekegel ergaben besonders bei hohen Flächenpressungen außerordentlich kleine Werte. Es muß daher angenommen werden, daß die Oberflächenstruktur des Eises in der Berührungsfläche durch den hohen Druck physikalisch verändert wurde und ein Wasserfilm als Schmier-schicht die Mantelreibung des Kegels erheblich verringert hat.

Es werden im folgenden daher nur die am 60°-Kegel gemessenen Werte berücksichtigt, die bei kleineren Flächenpressungen und meist auch tieferen Temperaturen ermittelt wurden.

Besonders interessant ist hier ein Vergleich der durch unterschiedliche Kegelrauigkeit hervorgerufenen Reibungsbeiwerte. Am Kegel mit Drehriefen ergaben sich bei -3° C mit Werten von etwa 0,08 etwas höhere Koeffizienten als am glatten Kegel (0,05). Nach einer Wartezeit von 5 Minuten waren die Beiwerte bereits auf 0,12 gestiegen. Dieser Anstieg ist wahrscheinlich durch Festfrieren eines Feuchtigkeitsfilmes oder andere physikalisch-mechanische Vorgänge in der unter Druck stehenden Berührungsfläche zu erklären.

Während am glatten und mit Drehriefen versehenen Kegel meist kein erheblicher Unterschied in den Reibungswerten bei gerade begonnener, kriechender oder fortschreitender langsamer Drehbewegung zu beobachten war, ergaben sich am Kegel mit senkrecht zur Bewegungsrichtung verlaufenden Riefen erhebliche Unterschiede zwischen Haft- und Gleitreibungskoeffizienten (Abb. 5). Da die Zeit nach einer Drehbewegung im Bohrloch dieses Kegels von großem Einfluß war, wurden die Messungen einheitlich nach 3 Sekun-

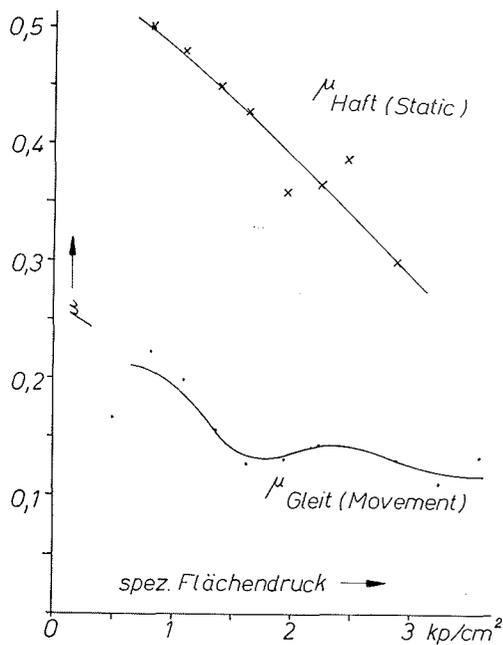


Abb. 5: Reibungskoeffizienten zwischen Eis und Stahl, gemessen am 60°-Kegel mit 20 vertikal laufenden Riefen einer Tiefe von 0,5 mm. μ_{Haft} : Messung nach 5 s Ruhelage des Kegels $t_{\text{Eis}} = -7^{\circ}\text{C}$
Fig. 5: Friction coefficients between ice and steel measured at the 60°-cone with 0.5 mm deep vertical tool marks. μ_{Haft} : Static coefficient, measured after 5 s rest of the cone $t_{\text{ice}} = -7^{\circ}\text{C}$.

den Wartezeit durchgeführt und Haftreibungskoeffizienten ausgewertet. Hatte bei diesen Messungen das Drehmoment durch stufenweise Vergrößerung den zum Überwinden der Haftung notwendigen Wert erreicht, so „riß“ der Kegel schlagartig los und geriet in beschleunigte Drehbewegung.

Die Gleitreibungskoeffizienten wurden dagegen während einer von Hand eingeleiteten Drehbewegung gemessen, die aufbrachten Drehmomente reichten dann gerade aus, den Kegel in langsamer Drehbewegung zu halten. Wie in Abb. 5 zu erkennen, liegen die so erhaltenen Werte wesentlich unter den nach 3 Sekunden gemessenen Haftreibungskoeffizienten.

Bemerkenswert ist, daß derartige Unterschiede nur am Kegel mit senkrecht zur Bewegungsrichtung verlaufenden Rauigkeiten bzw. Riefen auftragen. Dies deutet darauf hin, daß Verzahnungen zwischen Eis und rauher Oberfläche bestehen, die durch Scherkräfte abgeschoren werden müssen und die sich im Ruhezustand durch Gefrieren wieder aufbauen. In Bewegung werden die Rauigkeiten dagegen durch eingepreßtes Eis geglättet.