

$Q = -E$ . Im kältesten Gebiet des antarktischen Hochplateaus ist  $E$  bei den niedrigsten Temperaturen am kleinsten ( $-0,15$ ) und nimmt nach höheren Breiten hin zu, wobei sich die Isolinien gut an die Kontinentgrenzen anschmiegen. Selbst die antarktische Halbinsel ist im Kurvenverlauf angedeutet.  $Q$  ist entsprechend überall negativ und nimmt vom Pol bis etwa  $60-65^\circ$  Breite mehr und mehr ab bis zu Werten von  $-0,27$ . Dann macht sich nach niedrigeren Breiten hin die Sonneneinstrahlung bemerkbar und dementsprechend eine Zunahme von  $Q$  bis auf  $-0,18$  in etwa  $40^\circ$  S. Im ganzen ist das Bild für das Südpolaregebiet entsprechend der gleichmäßigen Land- und Meerverteilung viel mehr kreissymmetrisch

als auf der Nordhalbkugel. Bemerkenswert ist, daß die niedrigsten Werte von  $Q$  nicht am Pol, sondern in einem Ring unter  $60$  bis  $65^\circ$  Breite um den Südpol angetroffen werden. In etwa  $10^\circ$  Süd verläuft die Null-Linie der Strahlungsbilanz.

Bisher waren aus theoretisch-rechnerischen Bestimmungen und auch aus Messungen anderer Satelliten (TIROS-Serie), die keine so gleichmäßige Überdeckung der ganzen Erde mit Meßdaten lieferten, nur Jahreszeitmittel von  $Q$  bekannt. Die Messungen von NIMBUS II erlauben zum erstenmal, kürzere Zeitintervalle zusammenzufassen und die Veränderungen zwischen diesen zu verfolgen.

## Eine Anwendung der barographisch-topographischen Kurve zur Bestimmung der Bewegung von Inlandeisen

Von B. Brockamp und F. Thyssen \*

**Zusammenfassung:** Es wird ein Verfahren zur Bestimmung der Bewegungen der Inlandeise angegeben. Mit einer kontinuierlichen Registrierung des Luftdruckes während der Fahrt und der Wiederholung dieser Messungen nach hinreichend langer Zeit kann die Verschiebung von Markierungen gegenüber ortsfesten Tälern und Hochlagen der Eisoberfläche ermittelt werden. Diese Methode wird angewandt, um für die Zeit zwischen 1959 und 1967 die Bewegung der Balisen T 0 bis T 11a auf dem EGIG-Profil in Grönland zu bestimmen.

**Abstract:** A method for the determination of the movement of the inland ice caps is hereby described. The shifting of marked points relative to the fixed valleys and highlands of the ice surface could be determined from the records of the barometric pressures, registered in a moving vehicle. The paper transport was coupled to the way covered by the vehicle. This method is applied to find out the movements of balises from T 0 to T 11a during 1959 and 1967 on the EGIG-profiles in Greenland.

Die Oberfläche der Inlandeise (Grönland, Antarktis) und der großen Hochlandeise hat die Form ausgedehnter Schilde; die Steigung nimmt zu den im allgemeinen asymmetrisch gelegenen größten Höhen hin ab. H. Mohn und F. Nansen (1892) zeigten bereits für die erste Durchquerung Grönlands durch Nansen (1888), daß die Eisoberfläche auf der von Osten nach Westen

durchwanderten Route sich einer ellipsenähnlichen Kurve annähert. Der allgemeinen Schildform sind Wellungen unterschiedlicher Längen- und Höhererstreckung überlagert. Sie wurden erstmalig auf der Wegener-Expedition eingehend diskutiert. Für die Bearbeitung lag eine große Anzahl barometrischer Ablesungen vor, die zwischen 1930 und 1931 auf der Expeditionsroute an dicht beieinanderliegenden Punkten gewonnen wurden (Brockamp 1933).

Diese kleindimensionierten Elemente der Eisoberfläche wurden auf der EGIG I (1959) <sup>1)</sup> und EGIG II (1967) <sup>1)</sup> gesondert untersucht. Von der Expedition 1959 liegt eine Veröffentlichung der Lagemessung (Hofmann 1964) und des geometrischen Nivellements (Mälzer 1964) vor. Außerdem gibt es eine zusammenhängende barographische Aufnahme der Strecke zwischen Camp VI (1959) im Westen ( $\varphi 69^\circ 44' 16,8''$ ;  $\lambda 48^\circ 04' 20,5''$ ) und Cecilia Nunatak im Osten ( $\varphi 72^\circ 34' 29,6''$ ;  $\lambda 27^\circ 57' 53,6''$ ).

\*) Prof. Dr. B. Brockamp und Dr. F. Thyssen, Institut für Reine und Angewandte Geophysik 44 Münster (Westf.), Steinfurter Straße 107

<sup>1)</sup> Expédition Glaciologique Internationale au Groenland. An der Expedition waren die Länder Dänemark, Deutschland, Frankreich und die Schweiz beteiligt. Die Leitung lag bei einem internationalen Direktionskomitee, die technische Durchführung bei P. E. Victor.

Schon H. Mohn und F. Nansen schreiben, auf rein visuellen Beobachtungen fußend, die kleinräumigen Wellungen der Oberfläche dem Einfluß des Untergrundes zu. Neuere Arbeiten (Brockamp 1951, Hochstein 1965, Robin 1967) weisen nach, daß sie von der Morphologie des Untergrundes, der Fließgeschwindigkeit des Eises und seiner Mächtigkeit abhängen. Daher sind die kleinräumigen Wellungen besonders in Gebieten mit größerer Fließgeschwindigkeit des Eises und unruhiger Morphologie des Untergrundes und nicht zu großer Eisdicke gut ausgeprägt. Nach Mock (1968) sind diese Oberflächenformen auch durch die Zutragsverteilung mit beeinflußt. Dabei ist der Zutrag in den Dellen der Wellungen besonders groß, auf den Buckeln besonders klein. Durch diesen Effekt können die Oberflächenformen abhängig von Niederschlag und Schneedrift modifiziert werden. Sind die kleinräumigen Wellungen an die Formen des Untergrundes gebunden, kann aus der Verschiebung von Markierungen relativ zu diesen Oberflächenformen (z. B. tiefster Punkt eines Tales) direkt die Bewegung der Inlandeise entnommen werden.

Die Oberflächenformen des Inlandeises können durch eine barographische Messung während der Reise erfaßt werden. Die von Brockamp (1962/1965) veröffentlichten barographischen Kurven zeigen außer der guten Reproduzierbarkeit der zu verschiedenen Zeiten gewonnenen Barogramme, daß die barographisch-topographische Höhenkurve in allen Einzelheiten übereinstimmt mit dem Höhenprofil, das aus einem mit 100 m Zielweite durchgeführten geometrischen Nivellement großer Genauigkeit abgeleitet wurde. In die barographische Fahrtregistrierung gehen ein:

- 1) die durch die Höhenänderung bedingte Druckänderung
- 2) die zeitliche Druckänderung im Verlaufe der Fahrt
- 3) der horizontale Druckgradient und
- 4) die mittlere Temperatur zur Berechnung der Dichte der Luft.

Um 1) einwandfrei zu erfassen, müssen die unter 2), 3) und 4) angegebenen Größen als

Korrekturen angebracht werden. Die nebst Thermographen auf einigen längs der Route installierten Stationen ständig registrierenden Barographen liefern die zeitlichen Druckänderungen. Um diese wesentlich zu reduzieren, können auch jeweils zwei gleiche Geräte in zwei Fahrzeugen betrieben werden, die während der Reise einen nicht zu großen Abstand voneinander haben. Dieser betrug bei der EGIG I und EGIG II etwa bis zu 15 km. Da die gleiche Strecke nacheinander zu unterschiedlichen Zeiten durchfahren wird, können so zeitabhängige Änderungen des Luftdruckes zum überwiegenden Teil eliminiert werden.

Zur Bestimmung der wahren, durch Strahlung nicht verfälschten Temperatur lassen sich Radiosondenaufstiege grönländischer Küstenstationen heranziehen. Der horizontale Druckgradient kann aus den einzelnen Millibarflächen der Wetterkarten entnommen werden.

Die Registrierung des Luftdruckes mit genügend großer Auflösung ist während der Reise mit normalen Barographen nicht durchzuführen. Für die EGIG I wurde daher von B. Brockamp (1962) eine zusätzliche Öldämpfung angebracht. Dieses so modifizierte Gerät lieferte eine mit Zeit- und Wegmarken versehene Kurve für die ganze West-Ost-Überquerung von Mittelgrönland. Sie stimmt, wie bereits angegeben, weitgehend mit dem geometrischen Nivellement überein. In diesen Barographen erfolgte der Papiervorschub durch ein Uhrwerk, und nur an den Wegmarken der Registrierung war eine exakte Ortszuordnung möglich. Zwischenpunkte mußten unter der Annahme einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit interpoliert werden. Der kleine Papiervorschub dieser Registrierwerke, die Schwankungen in der Geschwindigkeit der Fahrzeuge und die noch verhältnismäßig geringe Auflösung des Druckmeßsystems begrenzten den Einsatz dieser einfachen Anordnung. Zur Erhöhung der Auflösung wurde von F. Thyssen für die EGIG II ein elektrischer Barograph gebaut und eingesetzt.<sup>1)</sup> Das Gerät besteht aus einem Vidie-Dosensatz, einem photoelektrischen Wandler und einem Kompensationsschreiber

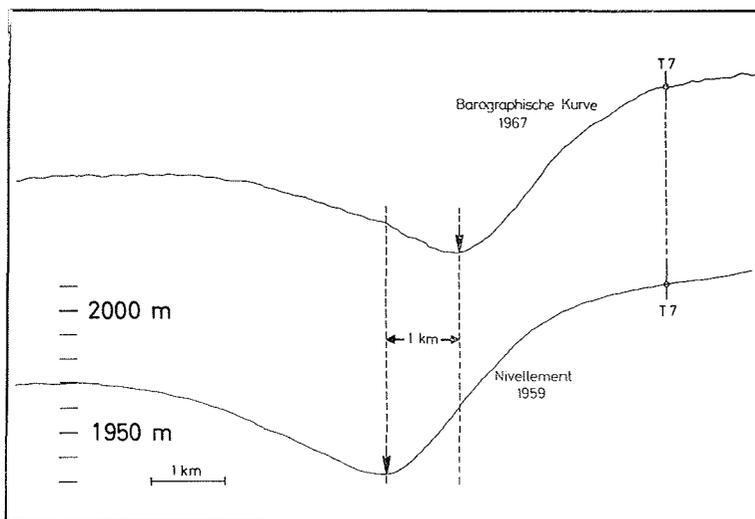
<sup>1)</sup> Dieses Gerät lieferte auch gute Aufzeichnungen bei der Druckregistrierung für andere Zwecke, z. B. Registrierung der Druckwellen der Atombombenversuche von Nowaja Semlja

mit genügender Einstellkraft. Ein Tiefpaßfilter vermindert den Einfluß der Fahrzeugvibrationen. Während der Reise war der Papiervorschub über eine biegsame Welle mit dem Kettenantrieb des Fahrzeuges gekoppelt und ergab so eine Registrierung, die der durchfahrenen Strecke unabhängig von wechselnder Fahrzeuggeschwindigkeit Punkt für Punkt zugeordnet werden kann. Zusätzliche Zeit- und Wegmarken auf der Registrierung erlauben eine Zuordnung für die Reduktionen, die an Feststationen gewonnen werden. Mit diesem Instrumentarium konnten selbst Höhenunterschiede bis zu 2 m während der Fahrt erfaßt werden. Die Möglichkeit, die Oberflächenformen der Inlandeis mit hoher Auflösung während der Reise zu registrieren, kann ausgenutzt werden, um bei Wiederholungsmessungen die Eisbewegung zu ermitteln. Markierungen auf dem Inlandeis wie z. B. Balisen können in ihrer Relativbewegung zu besonderen Oberflächenformen wie Tälern oder Erhebungen vermessen werden. Sofern die kleinräumigen Wellungen der Oberfläche ortsfest an die Formen des Untergrundes gebunden sind, kann aus der Verschiebung von Markierungen relativ zu diesen Oberflächenformen direkt die Bewegung des Inlandeises entnommen werden. Falls die Ver-

schiebung von zwei benachbarten Balisen im Rahmen der Genauigkeit dieses Verfahrens als parallel angesehen werden darf und die Längserstreckung der kleinräumigen Wellungen nahezu senkrecht zu der Verbindungslinie der Balisen verläuft, wird die Komponente der Eisbewegung erfaßt, die senkrecht zur Längserstreckung der Wellungen auftritt; dieses trifft für die nachstehend behandelten Beispiele weitgehend zu.

Die im folgenden angegebenen Ergebnisse sind, um die Meßgenauigkeit zu steigern, durch den Vergleich der Daten des Nivellements 1959 nach Mälzer, mit den barographischen Registrierungen der Gruppe Geophysik der EGIG II 1967 gewonnen worden. Abb. 1 zeigt als Beispiel das Fahrtbarogramm von der Balise T 7 (1967) aus in Richtung T 6 auf dem E-W-Profil der EGIG in Grönland. Es ist deutlich eine Relativbewegung von ca. 1 km zwischen der Balise T 7 und dem Tal in der Eisoberfläche zu erkennen. Das Fahrtbarogramm wurde ebenso wie bei den im folgenden angegebenen Ergebnissen ohne Reduktion der zeitlichen Luftdruckänderung zu diesem Vergleich herangezogen.

Tabelle I gibt die Koordinaten (von 1959) nach Hofmann für weitere Balisen an, de-



**Abbildung 1**

Die Relativbewegung zwischen der Balise T 7 und einem Tal unterhalb T 7. Vergleich zwischen der barographischen wegabhängigen Registrierung 1967 und dem Nivellement 1959 nach Mälzer. The displacement of balise point T 7 relative to the valley lying under T 7 and a comparison of the way-dependent barometric records of 1967 and of the leveling of 1959.

ren Verschiebung  $\Delta S$  bis 1967 in gleicher Weise wie für T 7 ermittelt wurde.

Tabelle I

	$\varphi$ 1959	$\lambda$ 1959	$\Delta S$ (m)
T 2	69° 45' 34,8"	47° 51' 32,0"	1120
T 3	69° 47' 16,9"	47° 38' 59,3"	865
T 4	69° 49' 25,3"	47° 25' 56,7"	750
T 7	69° 56' 36,3"	46° 48' 24,5"	1025
T 9	70° 01' 17,6"	46° 18' 41,9"	542
T 11	70° 06' 33,6"	45° 45' 29,1"	573
T 11a	70° 08' 26,2"	45° 34' 02,9"	508

Nahezu auf dem gesamten Profil konnten die Fahrtbarogramme auf der Hin- und Rückfahrt registriert werden. Die angegebenen Beträge  $\Delta S$  sind die Mittelwerte der bei der Hin- und Rückfahrt gewonnenen Daten.

Aus den Meßergebnissen folgt für den mittleren Fehler der Bewegungsbeträge:  $\pm 67$  m.

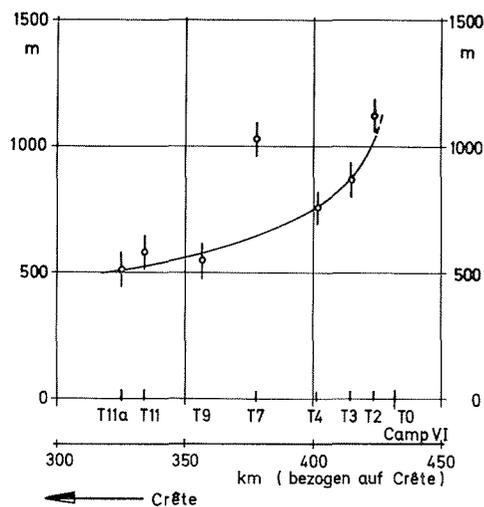


Abbildung 2: Die Verschiebungen der Balisen T 0 bis T 11a auf dem EGIG-Profil in Grönland abhängig von ihren Abständen (in Profilkilometern) von der Station Crête.

The displacements of balises from T 0 to T 11a on the EGIG-profile in Greenland in dependence on their distances (in profile km) from the Station Crête.

In Abb. 2 ist das Wandern der angegebenen Balisen gegen ihren Abstand (1959) in Profilrichtung von der Station Crête aus ( $\varphi 71^{\circ} 07' 11,2''$ ;  $\lambda 37^{\circ} 19' 10,5''$ ) aufgezeichnet; dabei sind diese Werte als Komponenten der Verschiebung in etwa senkrecht zur

Längserstreckung der Wellungen kleiner oder gleich der wirklichen Wegstrecke. Aus der Abb. 2 geht deutlich die starke Zunahme der Verschiebung mit größerem Abstand von Crête hervor. Lediglich die Verschiebung der Balise T 7 weicht weit mehr als der Fehler erwarten läßt von den anderen Werten ab. Die Relativbewegung von T 7 wurde gegen die stärkste Talbildung, die auf dem Ost-West-Profil gefunden wurde, bestimmt. Für die Hin- und Rückfahrt sind die Werte der von den Balisen durchwanderten Wegstrecken in guter Übereinstimmung. Ein Meßfehler ist nicht wahrscheinlich. Im Rahmen dieser Untersuchung muß offenbleiben, ob die Balise T 7 sich stärker als die anderen Balisen bewegt hat, ob die genaue Talform unterhalb T 7 nicht als ortsfest anzusehen ist, oder ob die meteorologischen Bedingungen wie z. B. Kaltluft in diesem Tal die Diskrepanz zwischen Luftdruck- und Höhenwerten hervorriefen. Diese Fragen lassen sich klären, wenn alle Meßergebnisse der EGIG vorliegen.

Mit diesen Beispielen sollte aufgezeigt werden, wie mit einem verhältnismäßig schnellen und von den Sichtverhältnissen weitgehend unabhängigen Verfahren neben der Morphologie der Inlandeise an bevorzugten Stellen auch seine Bewegung ermittelt werden kann.

Da es einfach ist, mit Hilfe der Barographen auch auf längeren Strecken ungefähr parallel zu den Höhenlinien zu fahren, können Markierungen (Balisen) direkt in Richtung der Falllinie aufgestellt und die Relativbewegung in dieser Richtung ermittelt werden.

Das benutzte Verfahren läßt, ausgehend von den Ergebnissen eines Nivellements und seiner Wiederholung, eine noch höhere Meßgenauigkeit für die Bestimmung der Fließgeschwindigkeit des Eises erwarten. Der technische Aufwand hierfür ist allerdings bedeutend größer.

Es seien an dieser Stelle die Herren R. Arndt, M. Hochstein, R. Hoisl, M. Marret, M. Renard, O. Reinwarth als Teilnehmer der EGIG I und H. Kohnen, H. G. Allnoch, K. Wilke, C. Marinier und M. Daull als Teilnehmer der EGIG II dankend erwähnt, die bei der Durchführung der Feldbeobachtungen mitwirkten.

## Literatur

Brockamp, B.: Wissenschaftliche Ergebnisse der deutschen Grönland-Expedition Alfred Wegener 1929 und 1930/1931, Bd. II, Seismik. F. A. Brockhaus, Leipzig 1933.

Brockamp, B.: Nachtrag zur deutschen Grönlandexpedition A. Wegener. — Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Bd. 93, Heft 2, Seite 178—232, 1951.

Brockamp, B.: Barographisch-topographische Höhenkurve Z. f. Geoph., Jahrg. 28, Heft 5, Seite 217—222, 1962.

Brockamp, B.: Über einige geophysikalische Ergebnisse der internationalen Grönland-Expedition EGIG 1959: Polarforschung, Bd. VI, Jahrg. 35, Heft 1/2, Seite 42—66, 1965.

Hochstein, M.: Morphologie der Westantarktischen Eiskappe zwischen Mary-Byrd- und Edith-Ronne-Land. — Polarforschung, Bd. VI, Jahrg. 35, Heft 1/2, Seite 27—38, 1965.

Hofmann, W.: Die Geodätische Lagemessung über das Grönländische Inlandeis der Internationalen Glaziologischen Grönland-Expedition EGIG 1959. — Meddelelser om Grønland, Bd. 173, Nr. 6, 1964.

Mälzer, H.: Das Nivellement über das Grönländische Inlandeis der Internationalen Glaziologischen Grönland-Expedition 1959. — Meddelelser om Grønland, Bd. 173, Nr. 7, 1964.

Mock, S. J.: Snow Accumulation Studies on the Thule Peninsula, Greenland. — J. of Glaciology, Vol. 7, Nr. 49, Seite 59—76, 1968.

Mohn, H. und Nansen, F.: Wissenschaftliche Ergebnisse von Dr. F. Nansens Durchquerung von Grönland 1888. — Petermanns Mitteilungen, Ergänzungsheft Nr. 105, Gotha, Justus Perthes 1892.

Robin, G. de Q.: Surface Topography of Ice Sheets. — Nature, Vol. 215, Nr. 5105, Seite 1029 bis 1032, 1967.

# Alterungsvorgänge in einkristallinem Eis

Von Gerhard Dantl, Gerlingen <sup>1)</sup> <sup>2)</sup>

## Einleitung

Die Tradition der Eisforschung in Stuttgart begann 1882/83, als sich der spätere Direktor des Physikalischen Instituts, K. R. Koch, mehrere Monate an der Küste von Labrador aufhielt. Schon dort interessierten ihn die elastischen Eigenschaften von Eis. Diese Untersuchungen führte er später in Stuttgart weiter (1). Auch sein Nachfolger Regener blieb dem Eis verbunden, doch sind diese Arbeiten zum großen Teil unveröffentlicht.

Unter der Leitung von Prof. Dr. H. O. Kneser beschäftigt sich hier seit 1952 eine Arbeitsgruppe systematisch mit den Eigenschaften von Eis. Ihre Entstehung und viele Anregungen verdankt diese Gruppe Prof. S. Magun. Es wurden bisher Arbeiten über die mechanischen und dielektrischen Eigenschaften von einkristallinem hexagonalem Eis (erstere von H<sub>2</sub>O und D<sub>2</sub>O-Eis) veröffentlicht, ferner über die Züchtung, die Schmelzkeimbildung (Tyndallsterne), den Piezoeffekt, die Ausdehnungskoeffizienten von hexagonalem Eis und den Existenzbereich von kubischem Eis.

Kürzlich wurde eine Arbeit abgeschlossen, die den bis jetzt bekannten Bereich der mechanischen Dämpfung auf nahezu 6 Zehnerpotenzen erweiterte. Im kHz-Bereich ist die mechanische Dämpfung gut bekannt und

wird durch die Annahme einer Diffusion von Fehlstellen in der Paulingschen Protonenkonfiguration überzeugend gedeutet (2), (3). Die Erweiterung auf den Bereich von 5 bis 200 MHz erfolgte mit einer Ultraschall-Impulsapparatur (4). In Abbildung 1 sind

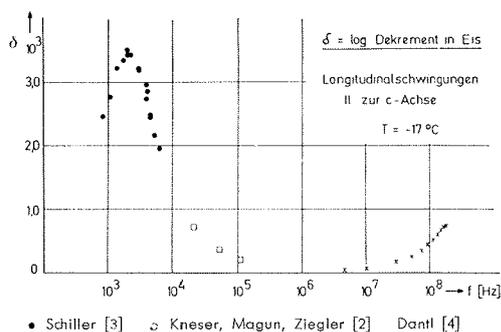


Abbildung 1

die bisher bekannten Dämpfungswerte eingetragen. Es konnte nachgewiesen werden, daß es sich bei der im MHz-Bereich gemessenen Absorption nicht um Energieverluste, sondern um ein Streuphänomen handelt. An verschiedenartig gezüchteten einkristallinem Eis hat man schon früher elektronenmikroskopisch beobachtet (5), daß sich Mikrobereiche mit einem mittleren Durchmesser  $L \approx 5 \mu\text{m}$  ausbilden. Diese Mikrobereiche stellen Streuzentren für die Schallwellen dar.

<sup>1)</sup> Dr. Gerhard Dantl, 7016 Gerlingen 1, Hasenbergstraße 33

<sup>2)</sup> Aus dem I. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart