

Zur Nettoeisablation in einem Höhenprofil am Grönländischen Inlandeis

Von Walter Ambach *

Zusammenfassung: In einem Höhenprofil in der Ablationszone des Grönländischen Inlandeises (EGIG-Profil) wird der Verlauf der Nettoeisablation im Zusammenhang mit dem Energiehaushalt diskutiert. Mit der Ablation sind gleichzeitig Temperaturänderungen in tieferen Schichten durch Wärmeleitung verbunden, wodurch ebenfalls Energie verbraucht wird. Aus den Ergebnissen wird abgeleitet, daß der Massenhaushalt des Grönländischen Inlandeises empfindlich auf eine Verschiebung der Gleichgewichtslinie infolge einer allgemeinen Temperaturerhöhung reagiert.

Summary: In the paper, the course of the net ablation of ice with increasing altitude is discussed for the area of ablation of the Greenland Ice Sheet. Changes in the temperatures of snow and ice occur simultaneously during ablation. The amount of heat consumption used for warming by conductivity is described. From the results obtained it is estimated that the mass balance of the Greenland Ice Sheet reacts sensitively to shifts of the equilibrium line which occurs as a result of climatic changes.

1. EINLEITUNG

Durch den verstärkten Glashauseffekt der Atmosphäre infolge eines allgemeinen Anstiegs der CO_2 -Konzentration wird nach Modellrechnungen von MANABE & WETHERALD (1975) eine globale Erwärmung erwartet, die sich in den Polargebieten besonders stark auswirkt. Eine Verdoppelung der CO_2 -Konzentration führt im Bereich von 60° bis 80° geographischer Breite zu einem Temperaturanstieg in der unteren Troposphäre von 4°C bis 10°C . Es stellt sich damit die Frage, in welcher Form der Massenhaushalt des Grönländischen Inlandeises bei dieser Klimaänderung beeinflußt wird. In diesem Zusammenhang hat schon MERCER (1978) Überlegungen zur Stabilität des Westantarktischen Eisschildes veröffentlicht. Zur Beurteilung der Änderung des Massenhaushaltes des Grönländischen Inlandeises bei einem Temperaturanstieg von wenigen Graden sollen einige bisher verfügbare Daten der Nettoeisablation am Grönländischen Inlandeis herangezogen werden, die aus der Sicht einer Klimaänderung diskutiert werden.

Ablationsmessungen in einem Höhenprofil am Grönländischen Inlandeis sind bisher über einen längeren Zeitraum nur vereinzelt durchgeführt worden (AMBACH 1963). Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, daß Ablationspegel in regelmäßigen Zeitabständen und über eine längere Periode betreut werden müssen, was wegen der großen Entfernungen sehr aufwendig ist. Die spezifischen Nettoakkumulationsraten werden hingegen im Akkumulationsgebiet konserviert und können zu einem späteren Zeitpunkt durch geeignete glaziologische Methoden rekonstruiert werden. Diese Rekonstruktion ist für die spezifischen Nettoablationsraten im Ablationsgebiet grundsätzlich nicht möglich, so daß die bisher verfügbaren Informationen über Ablationswerte am Grönländischen Inlandeis besonders wertvoll erscheinen.

Zunächst werden die Energiebeträge diskutiert, die in der Ablationszone des Grönländischen Inlandeises während einer Ablationsperiode zum Schmelzen und zur Eisenerwärmung verbraucht werden. Die Gleichung der Energiebilanz von Schnee- und Eisoberflächen wird vereinfacht in folgender Form angesetzt:

* Prof. Dr. Walter Ambach, Institut für Medizinische Physik der Universität, Müllerstr. 44, A—6020 Innsbruck.

$$\pm Q_R \pm Q_K \pm Q_T \pm Q_S = 0$$

Darin bedeuten: Q_R die Gesamtstrahlungsbilanz, Q_K die durch Konvektion ausgetauschte Wärme, Q_T die zur Temperaturänderung aufgewandte Wärme und Q_S die zum Schmelzen von Eis und Schnee oder Frieren von freiem Wasser umgesetzte Wärme. Das positive Vorzeichen gilt für Energiequellen (Energiezufuhr), das negative Vorzeichen gilt für Energiesenken (Energieverlust).

Der Sonderfall $Q_S = 0$ ist der Fall eines Wärmehaushaltes ohne Schmelzung; ein Energieüberschuß (Energiedefizit) wird ausschließlich zur Erwärmung (Abkühlung) von Schnee und Eis verwendet. Dieser Fall entspricht dem Wärmehaushalt eines kalten Gletschers ohne Schmelzung, wie dies in polaren Gebieten auftritt.

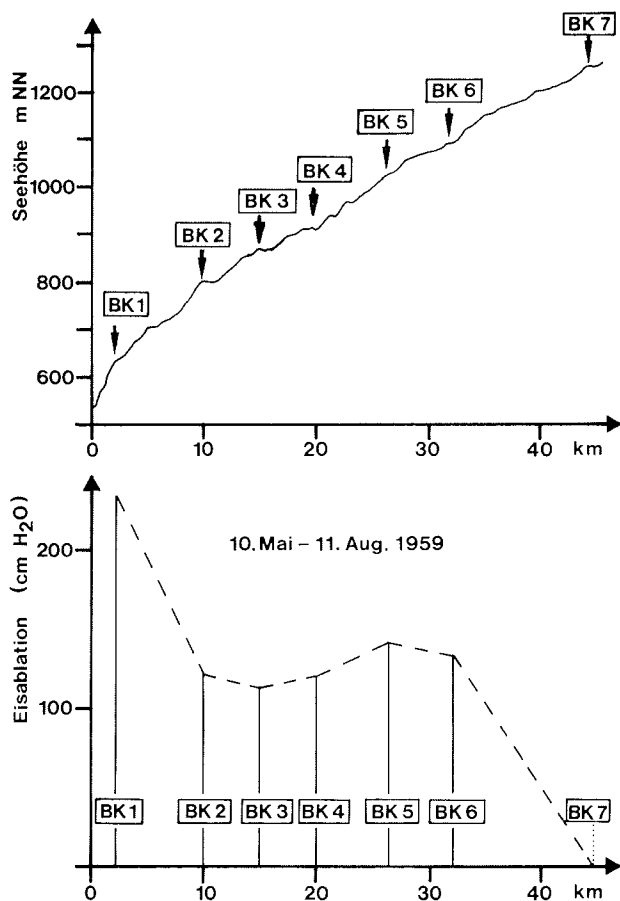


Abb. 1: Höhenprofil der Nettoeisablation für die Zeit vom 10. 5.—11. 8. 1959.

Fig. 1: The course of the net ablation of ice with increasing altitude from 10. 5. to 11. 8. 1959.

Der Sonderfall $Q_T = 0$ ist der Fall eines Wärmehaushaltes ohne Temperaturänderung von Eis und Schnee; es handelt sich um einen Gletscher unter der Bedingung der Druckschmelze. Energiebeträge werden hier zum Schmelzen von Schnee bzw. Eis oder zum Frieren von freiem Wasser umgesetzt. Dieser Fall entspricht im allgemeinen dem Prototyp eines alpinen Gletschers während der Ablationsperiode.

In der Ablationszone des Grönländischen Inlandeises werden während der Ablationsperiode Energiebeträge sowohl zum Erwärmen als auch zum Schmelzen umgesetzt.

Die Komponenten des Wärmehaushaltes können sinngemäß in zwei Gruppen eingeteilt werden: Energiebeträge, die durch die Wechselwirkung der Oberfläche mit der Atmosphäre ausgetauscht werden und Energiebeträge, die auf Grund der thermischen Zustandsänderung des Eiskörpers, wie Schmelzen und Erwärmen (Q_S , Q_T), umgesetzt werden. Die so angeführten zwei Gruppen von Energiebeträgen können als Ursache und Wirkung interpretiert werden, wobei die erstgenannte Gruppe (Q_R , Q_K) der Ursache für eine thermische Zustandsänderung (Q_T , Q_S) entspricht.

2. HOHENPROFIL DER NETTOEISABLATION

Abb. 1 zeigt ein Höhenprofil der Nettoeisablation für eine Zeit, die den wesentlichen Teil einer Ablationsperiode erfaßt. Der Verlauf ist wie folgt charakterisiert:

- In der Nähe des Eisrandes tritt der größte Ablationswert auf.
- Im mittleren Bereich ist die Ablation annähernd konstant.
- In der Nähe der Gleichgewichtslinie nimmt die Ablation mit der Höhe rasch ab.

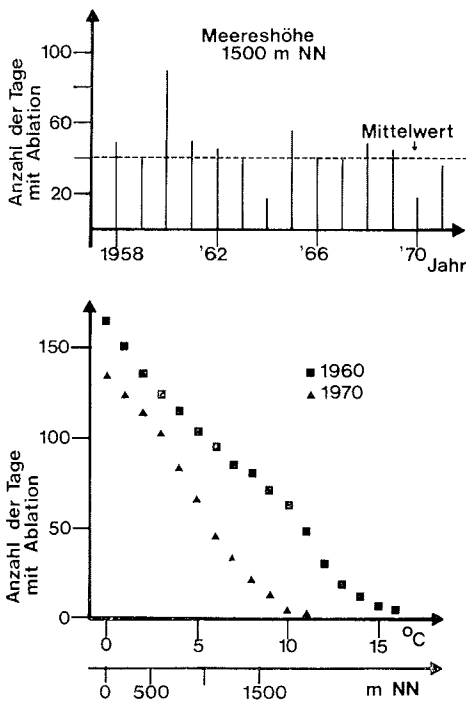


Abb. 2: Schätzwerte der Anzahl der Ablationstage, ermittelt aus der Lufttemperatur der Küstenstation Jakobshavn.
Oben: Anzahl der Ablationstage in der Zeit von 1958 bis 1977 für 1500 m NN.
Unten: Anzahl der Ablationstage in einem Höhenprofil für die 2 extremen Jahre 1960 und 1970.

Fig. 2: Number of days with ablation estimated from air temperatures at a meteorological station on the coast (Jakobshavn).
Upper graph: Number of days with ablation from 1958 to 1971 at 1500 m a. s. l.
Lower graph: Number of days with ablation versus altitude for 2 years under extreme conditions (1960 and 1970).

Dieses Höhenprofil kann wie folgt erklärt werden:

Die große Ablation in Randnähe ist durch die geringen Schneerücklagen aus dem Winter sowie durch eine verringerte Albedo durch vermehrte Staubablagerungen bedingt. Die geringe Schneerücklage ergibt eine lange Ablationsperiode, die für den Betrag der

Nettoeisablation von entscheidender Bedeutung ist. Die annähernd konstante Nettoeisablation im mittleren Höhenbereich ist auf etwa gleiche Bedingungen sowohl des Strahlungshaushaltes als auch des Austausches von konvektiver und latenter Wärme bei etwa gleicher Dauer der Ablationsperiode zurückzuführen. Diese Feststellung stimmt mit Beobachtungen am Hintereisferner (Otztaler Alpen) überein. Bei regelmäßiger Begehung des Hintereisferners wurden an Strahlungstagen im Höhenprofil etwa konstante Ablationsraten gemessen (HOINKES, pers. Mitt. 1955).

Der starke Gradient der Nettoeisablation in der Nähe der Gleichgewichtslinie ist auf die Bildung von superimposed ice in unmittelbarer Nähe der Gleichgewichtslinie zurückzuführen. Das Schmelzwasser wird dabei an der Oberfläche als superimposed ice weitgehend wieder gebunden, so daß sich vorerst kein Massenverlust ergibt und der Gradient der Nettoeisablation dadurch verstärkt wird.

Die Möglichkeit einer Abschätzung von Nettoeisablationwerten in einem Höhenprofil der Ablationszone, ohne direkte Ablationsmessungen, wurde bereits früher diskutiert (AMBACH 1972). Dazu ist die Zahl der Ablationstage, die aus Klimadaten der Küstenstation (Jakobshavn) verfügbar sind, in Verbindung mit Ergebnissen von Energiehaushaltsmessungen, die im Rahmen der EGIG durchgeführt worden sind, erforderlich.

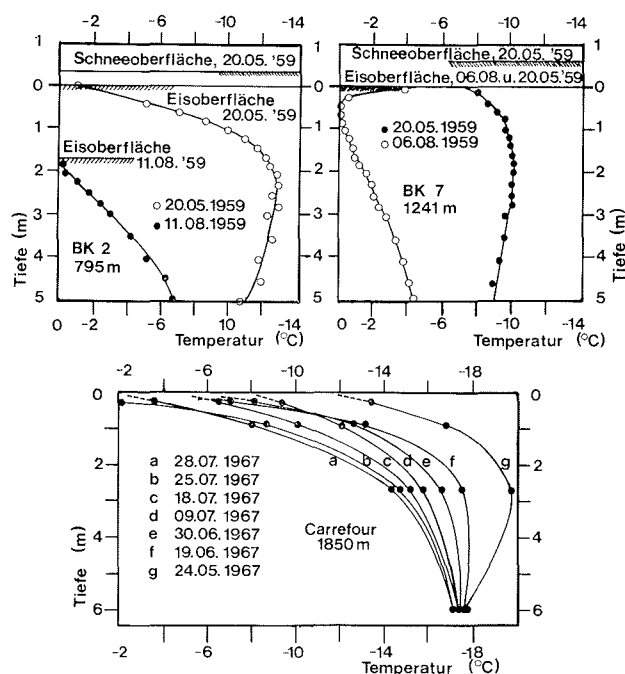


Abb. 3: Temperaturtiefenprofile für die Meßstellen BK 2 (795 m NN), BK 7 (1241 m NN) und Carrefour (1850 m NN).

Fig. 3: Temperature profiles versus depth for the sites BK 2 (795 m a. s. l.), BK 7 (1241 m a. s. l.) and Carrefour (1850 m a. s. l.).

Abb. 2 gibt als Beispiel das Ergebnis einer Abschätzung der Zahl der Ablationstage von 1958—1971 für eine Seehöhe von 1500 m NN und die Abhängigkeit der Zahl der Ablationstage von der Seehöhe für die ausgewählten extremen Jahre 1960 und 1970.

3. EIS- UND SCHNEE-ERWÄRMUNG

In Abb. 3 sind die Temperaturänderungen in Tiefenprofilen an folgenden charakteristi-

schen Meßstellen dargestellt:

- In der Nähe des Eisrandes (BK 2, 795 m NN)
- An der Gleichgewichtslinie (BK 7, 1241 m NN)
- Im Akkumulationsgebiet (Station Carrefour, 1850 m NN)

Die im Tiefenprofil dargestellte Fläche zwischen zwei Temperaturprofilen ist ein Maß für die zur Erwärmung verbrauchte Energie. Die Änderung des Temperaturprofils kann im wesentlichen als Wärmeleitungsproblem behandelt werden.

Abb. 4 ist eine Gegenüberstellung der Eis- bzw. Schneetemperaturen für eine Meßstelle im Ablationsgebiet (Camp IV, 1013 m NN) und im Akkumulationsgebiet (Carrefour, 1850 m NN) in Form von Isothermen. Im Ablationsgebiet wurden wesentlich höhere Eis-temperaturen im Vergleich zum Akkumulationsgebiet gemessen. Außerdem bildet sich im Ablationsgebiet im oberflächennahen Bereich eine isotherme Schicht von null Grad, die durch Absorption von kurzwelliger Strahlung entsteht und während der Ablationszeit aufrechterhalten werden kann.

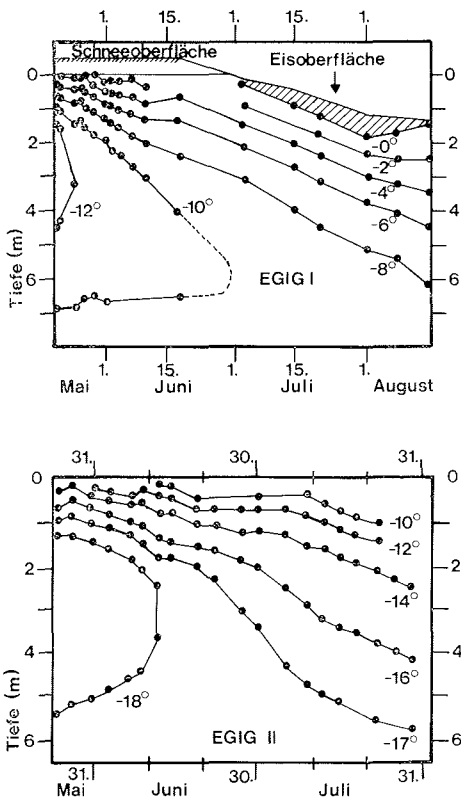


Abb. 4: Isothermendarstellung der Eis- bzw. Schneetemperatur an den Meßstellen Camp IV, EGIG I, 1013 m NN, und Carrefour, EGIG II, 1850 m NN.

Fig. 4: Isotherms for snow and ice temperatures at the sites Camp IV, EGIG I, 1013 m a. s. l., and Carrefour, EGIG II, m 1850 m a. s. l.

Abb. 5 gibt eine Zusammenstellung der Energiebeträge für Schmelzung und Erwärmung von Eis bzw. Schnee in einem Höhenprofil im Ablationsgebiet unter Einschluß der Meßstelle Carrefour im Akkumulationsgebiet. Mit steigender Seehöhe nimmt die zur Erwärmung und Schmelzung verfügbare Energie, die in der Ablationszeit umgesetzt wird, von insgesamt 21 200 cal/cm² (8,8·10⁸ J/m²) am Eisrand in 612 m Seehöhe bis 800 cal/cm²

EGIG I	Q_T		Q_S	
	cal/cm ² d	(W/m ²)	cal/cm ² d	(W/m ²)
Neuschnee	21	(10)	43	(21)
Altschnee	30	(15)	72	(35)
Eis	24	(12)	258	(125)

Tab. 1: Mittlere Tagessummenwerte des Energieverbrauchs zur Eis erwärmung (Q_T) und zur Eisschmelzung (Q_S) bei verschiedener Oberflächenbedeckung (Neuschnee, Altschnee, Eis), Camp IV, EGIG, 1013 m NN.

Tab. 1: Average daily sums of energy consumed for ice heating (Q_T) and ice melt (Q_S) for various surface conditions (new snow, old snow, ice), Camp IV, EGIG I, 1013 m a. s. l.

($3,35 \cdot 10^7 \text{ J/m}^2$) im Akkumulationsgebiet in 1850 m Seehöhe ab. Die in Abb. 5 enthaltenen Angaben sind wie folgt zu verstehen:

- „Eisschmelzung“: Betrifft die Wärme, die zur gemessenen Nettoeisablation durch Schmelzung verbraucht wurde.
- „Schneesmelzung“: Betrifft die Wärme, die zur gemessenen Ablation des Winterschnees durch Schmelzung verbraucht wurde.
- „Eis- bzw. Firnerwärmung“: Betrifft die Wärme, die zur Temperaturerhöhung der unter der Oberfläche liegenden Schichten durch Wärmeleitung verbraucht wurde.

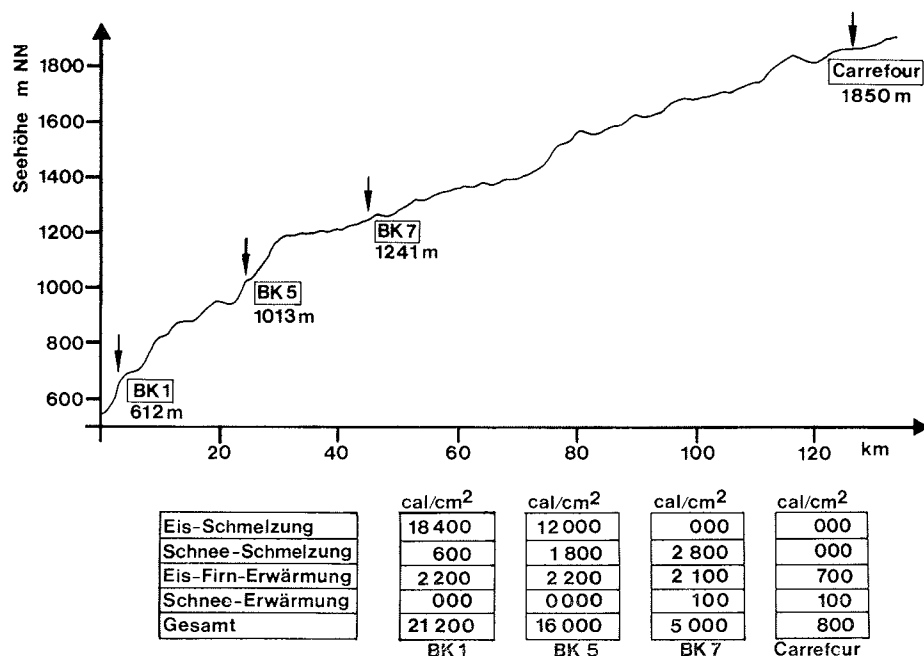


Abb. 5: Energiebeträge für Schmelzung und Erwärmung in einem Höhenprofil. Es bedeuten: Eis-Schmelzung: Wärme, die zur gemessenen Nettoeisablation durch Schmelzung verbraucht wurde; Schnee-Schmelzung: Wärme, die zur gemessenen Ablation der Winterschneedecke verbraucht wurde; Eis- und Firnerwärmung: Wärme, die zur Temperaturerhöhung verbraucht wurde, jedoch ohne Berücksichtigung des Altschnees; Schnee-Erwärmung: Wärme, die zur Temperaturerhöhung des Altschnees verbraucht wurde.

Fig. 5: Amounts of energy used for melting and warming versus altitude. This means: ice melt: heat consumed for ice melt; snow melt: heat consumed to melt the snow pack accumulated during winter season; ice and firn warming: heat consumed for temperature increase excluding warming of old snow; snow warming: heat consumed in the heating of old snow.

— „Schnee-Erwärmung“: Betrifft die Wärme, die zur Temperaturerhöhung von Altschnee verbraucht wurde.

Tab. 1 gibt für die Meßstelle Camp IV, 1013 m NN (Ablationsgebiet), den täglichen Energieverbrauch für Eiswärmerung Q_T und für Schmelzung Q_S bei verschiedener Oberflächenbedeckung, wie Neuschnee, Altschnee und Eis. Die zur Eiswärmerung erforderliche Energie ist zeitlich annähernd konstant und unabhängig von der Oberflächenbedeckung. Die zur Schmelzung verbrauchte Energie zeigt, hauptsächlich wegen der verschiedenen Albedo, bei verschiedenen Oberflächen stark unterschiedliche Werte.

In der in Abb. 5 enthaltenen Tabelle wird der wesentliche Unterschied im Energiehaushalt in einem Höhenprofil wiedergegeben. Dieser Unterschied ist im einzelnen durch die verschiedenen Komponenten des Energiehaushaltes begründet, die in einer weiteren Arbeit vergleichend diskutiert werden (AMBACH 1979).

4. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Aus Abb. 1 kann der Mittelwert der Nettoeisablation über das Höhenprofil zu 110 cm Wasseräquivalent abgeschätzt werden. Dieser Wert wurde bereits bei früher publizierten Abschätzungen des Massenhaushaltes des Grönländischen Inlandeises verwendet (FRISTRUP 1936). Eine Verschiebung der Gleichgewichtslinie, bedingt durch eine allgemeine Temperaturerhöhung, ist auf den Massenhaushalt in zweifacher Hinsicht wirksam: Die Fläche des Ablationsgebietes wird in dem Maß vergrößert, wie die Fläche des Akkumulationsgebietes gleichzeitig verkleinert wird. Im derzeitigen Zustand kann als gute Näherung angenommen werden, daß der Massenhaushalt des Grönländischen Inlandeises ausgeglichen ist. Die Komponenten des Massenhaushaltes haben nach WEIDICK (1978) folgende Werte:

Gesamtnettoakkumulation	+ 500 m ³ Wasseräquivalent
Gesamtnettoablation	— 300 m ³ Wasseräquivalent
Eisbergausstoß	— 200 m ³ Wasseräquivalent

Bei einer Verschiebung der Gleichgewichtslinie resultiert eine Flächenänderung $\pm \Delta S$ des Ablations- und Akkumulationsgebietes um denselben Betrag. Die Komponenten des geänderten Massenhaushaltes sind in diesem Fall:

Gesamtnettoakkumulation	+ 500 — $\Delta S \bar{c}$ km ³ Wasseräquivalent
Gesamtnettoablation	— 300 + $\Delta S \bar{a}$ km ³ Wasseräquivalent
Eisbergausstoß	— 200 + $\Delta S (\bar{a} - \bar{c})$ km ³ Wasseräquivalent

Es wird nun die Frage aufgeworfen, bei welcher Höhenverschiebung der Gleichgewichtslinie der Eisbergausstoß null wird. Für $\Delta S = 141 \cdot 10^3$ km² und für geänderte Werte der jährlichen mittleren spezifischen Nettoakkumulation ($\bar{c} = 31$ cm Wasseräquivalent) und der jährlichen mittleren spezifischen Nettoablation ($\bar{a} = 110$ cm Wasseräquivalent) ist die Gesamtnettoablation gleich groß wie die Gesamtnettoakkumulation, so daß für die Eisbergproduktion der Wert Null resultiert. Vom derzeitigen Verlauf der Gleichgewichtslinie ausgehend, bedeutet eine Flächenänderung um $\Delta S = 141 \cdot 10^3$ km² eine Verschiebung der Gleichgewichtslinie um ca. 200 Höhenmeter. Diese Verschiebung würde bei einem Temperaturhöhengradient von 0,6°C/100 m einem Temperaturanstieg von 1,2°C entsprechen. Damit ist gezeigt, daß der Massenhaushalt des Grönländischen Inlandeises unter bestimmten Voraussetzungen sehr empfindlich auf eine allgemeine Temperaturänderung reagieren könnte.

Diese Abschätzung berücksichtigt keine Rückkopplungsmechanismen. Dem Argument, daß sich durch verstärkte Niederschläge die Akkumulationsverhältnisse wesentlich ändern könnten, wird entgegengehalten, daß bei einer relativ starken Erwärmung der Polargebiete im Vergleich zu den südlichen Breiten die allgemeine atmosphärische Westwindzirkulation geschwächt wird und somit eine erhöhte Akkumulation nicht zu erwarten ist. Außerdem kann angeführt werden, daß die Datierung der Kernbohrung in Camp Century über eine Periode von ca. 100.000 Jahren mit der Annahme einer zeitlich konstanten Akkumulationsrate nicht im Widerspruch steht (DANSGAARD et. al. 1969). Die hier angeführte Abschätzung soll jedoch nicht quantitativen Charakter haben. Es soll nur gezeigt werden, daß mit gravierenden Änderungen des Massenhaushaltes des Grönländischen Inlandeises gerechnet werden muß, wenn sich Klimaänderungen einstellen, wie sie aus Modellrechnungen im Zusammenhang mit dem Anstieg der CO₂-Konzentration folgen.

L i t e r a t u r

- A m b a c h, W. (1963): Untersuchungen zum Energieumsatz in der Ablationszone des Grönländischen Inlandeises (Camp IV — ECIG, 69° 40' 05" N, 49° 37' 58" W). — Medd. Grønland 174 (4): 1—311.
- A m b a c h, W. (1972): Zur Schätzung der Eis-Nettoablation im Randgebiet des Grönländischen Inlandeises. — Polarforschung 42 (1): 18—23.
- A m b a c h, W. (1979): Zum Wärmehaushalt des Grönländischen Inlandeises: Vergleichende Studie im Akkumulations- und Ablationsgebiet. — Polarforschung 49 (1).
- D a n s g a a r d, W., J o h n s o n, S. J., M ø l l e r, J. & C. C. L a n g w a y J r. (1969): One thousand centuries of climatic record from Camp Century, Greenland. — Science 166: 377—381.
- F r i s t r u p, B. (1966): The Greenland Ice Cap. — Kopenhagen.
- M a n a b e, S. & R. W e t h e r a l d (1975): The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. — J. Atm. Sc. 32 (1): 3—15.
- M e r c e r, J. H. (1978): West Antarctic ice sheet and CO₂ greenhouse effect: a threat of disaster. — Nature 271 (5643): 321—325.
- W e i d i c k, A. (1978): Glacial history of Greenland — a review. — Unveröff. Übersichts-vortrag, 11. Intern. Polartagung, Berlin.