

MEDDELELSER OM GRØNLAND

UDGIVNE AF

KOMMISSIONEN FOR VIDENSKABELIGE UNDERSØGELSER I GRØNLAND

Bd. 187 • Nr. 5

EXPÉDITIONS GLACIOLOGIQUE INTERNATIONALE AU GROENLAND

E.G.I.G. 1957-1960 Vol. 4 No. 5

UNTERSUCHUNGEN ZUM
ENERGIEUMSATZ IN DER ABLATIONSZONE
DES GRÖNLÄNDISCHEN INLANDEISES:
NACHTRAG

VON

WALTER AMBACH

MIT 26 ABBILDUNGEN UND 22 TABELLEN



Nyt Nordisk Forlag Arnold Busck

København 1977

ISBN 87-17-02374-2

BIANCO LUNOS BOGTRYKKERI A/S

Inhalt

Abstract	4
Résumé	5
Zusammenfassung	6
Vorwort	7
 1. Strahlungshaushalt im Ablationsgebiet	
1.1. Einleitung	7
1.2. Tagessummen der Strahlungsströme	7
1.3. Tageszeitlicher Gang der Strahlungsströme im »Halbmonatsmittel«	17
1.4. Tageszeitlicher Gang der Strahlungsströme in Abhängigkeit von Albedo und Bewölkung	20
1.5. Tagessummen der Strahlungsströme in Abhängigkeit von Albedo und Bewölkung	21
1.6. Langwellige Strahlungsbilanz und Bewölkung	25
1.7. Kurzwellige Einstrahlung und Bewölkung	25
1.8. Beziehungen zwischen den Strahlungsströmen	26
1.9. Häufigkeitsverteilung für Werte der Strahlungsströme	27
1.10. Ein »Paradoxon« für Oberflächen mit hoher Albedo	29
 2. Ablation und Mikroklima	
2.1. Zeitlicher Verlauf von Ablation und Klimaelementen	33
2.2. Ablation und Mittelwerte von Klimaelementen	36
 3. Ablation und Energiehaushalt	
3.1. Einleitung	42
3.2. Der Energiehaushalt für die Dauer der Schneeoberfläche	43
3.3. Der Energiehaushalt für die Dauer der Eisoberfläche	43
3.4. Der Energiehaushalt für die Dauer der Neuschneebedeckung	45
 4. Vergleich des Energieumsatzes und der Ablation in verschiedenen Höhenlagen	
4.1. Höhenverteilung des Energiehaushaltes und der Ablation	50
4.2. Zur Bestimmung der Dauer der Ablationsperiode	53
4.3. Darstellung der Werte der Lufttemperatur an der Küstenstation Jakobshavn	54
4.4. Bestimmung der Dauer der Schneeschmelze und der Eisschmelze	55
4.5. Prüfung der Methode	57
4.6. Diskussion der Energiewerte für Schnee- und Eisschmelzung	58
4.7. Auswertung für die Periode 1958–1971	63
 Literaturverzeichnis	64

Abstract

1. Radiation budget in the ablation area

On account of new calibration results for the Lupolen instrument in the long-wave spectral range, the radiation fluxes of the series of measurements made in the ablation area in 1959 were newly calculated.

The complexity of the net radiation balance in the ablation area is determined by the large range of albedo values (46 %–85 %). At high albedo ($> 70\%$), the net radiation balance increases with cloudiness, at low albedo it decreases with cloudiness. In the net radiation balance the influence of albedo prevails so that there exists a positive correlation between the net radiation balance and short-wave radiation balance. In the accumulation area, however, there occurs a positive correlation between the net radiation balance and the long-wave radiation balance because of the constantly high albedo.

2. Comparison of ablation and climatic elements

Ice ablation and climatic elements during the measurement period were compared and discussed. The mean values of the net radiation balance, air temperature, vapor pressure, wind velocity, and increase of ice temperature were determined for three ranges of ice ablation. It can be confirmed that high ablation values correspond to high values of net radiation balance, air temperature, and wind velocity, whereas vapor pressure and heating of the ice do not show the same trend. The energy budget is given for three ranges of ablation. The increase of the convective term with increasing ablation is striking.

3. Ablation and energy budget

The components of the energy budget are given for the entire times of measurements divided into various periods. Measured and calculated ablation values are compared, showing good agreement. The marked differences in the energy budget of an ice and snow surface are treated quantitatively, as well as the differences in the ablation periods of midsummer and late summer. The energy necessary for melting and heating the ice on average is contributed by the net radiation balance (83 %) and convective heat flux (17 %), 26 % of which are sensible heat flux, 3 % are positive heat flux and -12% are negative latent heat flux. The mass loss owing to evaporation amounts to no more than 2 % of the net ablation.

4. Comparison of energy balance and ablation at various altitudes

The few data of net ablation of ice at various altitudes were compared with values of the energy budget. Measurements of air temperature at the Jakobshavn shore station were used for developing a method of estimating the net ablation of ice by determining the number of days with ablation.

Résumé

1. Bilan de radiation dans la zone d'ablation

A la suite de nouveaux étalonnages de l'Instrument Lupolen pour les ondes longues, nous avons recalculé les flux de radiation de la zone d'ablation mesurés en 1959.

Le caractère complexe du bilan de radiation totale dans la zone d'ablation est déterminé par la grande étendue de la valeur de l'albedo (46 % à 85 %). Lorsque l'albedo est forte ($> 70\%$), le bilan de radiation totale augmente avec la nébulosité; lorsqu'elle est faible, le bilan diminue avec la nébulosité. L'albedo montre une influence dominante sur le bilan radiatif, de sorte qu'il s'en suit une corrélation positive entre le bilan de radiation totale et celui de radiation à courtes longueurs d'ondes. Dans la zone d'accumulation, par contre, par suite de fortes valeurs constantes de l'albedo, il existe une corrélation positive entre le bilan de radiation totale et celui de radiation à ondes longues.

2. Evolution dans le temps de l'ablation et des éléments climatiques

L'évolution dans le temps de l'ablation de la glace a été confrontée avec chacun des éléments climatiques et les résultats discutés. Pour trois ordres de grandeur de l'ablation de la glace, nous avons déterminé les valeurs moyennes du bilan de radiation totale, de la température de l'air, de la pression de vapeur d'eau, de la vitesse du vent et du réchauffement de la glace. Il a été confirmé que de fortes valeurs de l'ablation apparaissent lors de fortes valeurs du bilan de radiation totale, de la température de l'air et de la vitesse du vent, alors que la pression de vapeur et le réchauffement de la glace ne suivent pas cette tendance. La composition en pourcentage du bilan énergétique est donnée pour les trois ordres de grandeur de l'ablation; ce qui frappe, c'est l'augmentation de la part convective avec une ablation croissante.

3. Ablation et bilan énergétique

Pour la durée totale des mesures, divisée en plusieurs périodes, nous avons déterminé les composantes du bilan énergétique. Nous avons comparé à titre de contrôle l'ablation mesurée et calculée et l'accord est satisfaisant. Les différences caractéristiques du bilan énergétique d'une surface de glace et de neige ont été traitées quantitativement, de même que la différence entre la période d'ablation de plein été et de fin d'été. L'énergie pour la fonte et le réchauffement de la glace est fournie par 83 % du bilan de radiation totale et par 17 % du flux de chaleur convective, dont 26 % correspondent au flux de chaleur sensible, 3 % au flux positif de chaleur latente et -12 % à celui — négatif — de la chaleur latente. La perte de masse par évaporation ne représente que 2 % de l'ablation totale.

4. Comparaison entre l'échange énergétique et l'ablation à différentes altitudes

Le peu de données de l'ablation nette à différentes altitudes ont été confrontées avec les valeurs du bilan énergétique. Nous avons essayé, à partir des mesures de la température de l'air de la Station côtière de Jakobshavn, d'établir un procédé d'estimation de l'ablation nette à partir du nombre de jours d'ablation.

Zusammenfassung

1. Strahlungshaushalt im Ablationsgebiet

Auf Grund von neueren Eichergebnissen für das Lupolengerät im langwelligen Spektralbereich wurden die Strahlungsströme für die im Jahre 1959 im Ablationsgebiet durchgeführten Meßserie neu berechnet.

Der komplexe Charakter der Gesamtstrahlungsbilanz im Ablationsgebiet wird durch den großen Wertebereich der Albedo bestimmt (46 % bis 85 %). Bei hoher Albedo (> 70 %) nimmt die Gesamtstrahlungsbilanz mit der Bewölkung zu, bei niederen Albedowerten nimmt sie mit der Bewölkung ab. In der Strahlungsbilanz dominiert der Einfluß der Albedo, so daß sich eine positive Korrelation zwischen der Gesamtstrahlungsbilanz und der kurzwelligen Strahlungsbilanz ergibt. Im Akkumulationsgebiet hingegen zeigt sich wegen der konstant hohen Albedo eine positive Korrelation zwischen der Gesamtstrahlung und der langwelligen Strahlungsbilanz.

2. Zeitlicher Verlauf von Ablation und Klimaelementen

Der zeitliche Verlauf der Eisablation wurde mit jenem der Klimaelemente in Beziehung gesetzt und diskutiert. Für 3 Größenklassen der Eisablation wurden die Mittelwerte der Gesamtstrahlungsbilanz, der Lufttemperatur, des Dampfdruckes, der Windgeschwindigkeit und der Eisermwärmung ermittelt. Es kann bestätigt werden, daß hohe Ablationswerte bei hohen Werten der Gesamtstrahlungsbilanz, Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit auftreten, während Dampfdruck und Eisermwärmung nicht diesen Trend zeigen. Die prozentuelle Zusammensetzung des Energiehaushaltes wird für drei Größenklassen der Ablation angegeben, wobei vor allem die Zunahme des konvektiven Anteils bei zunehmender Ablation auffällt.

3. Ablation und Energiehaushalt

Für die gesamte Meßzeit, aufgegliedert in einzelne Perioden, werden die Komponenten des Energiehaushaltes angegeben. Gemessene und berechnete Ablation werden zur Kontrolle verglichen, wobei sich eine gute Übereinstimmung zeigt. Die markanten Unterschiede im Energiehaushalt einer Eis- und Schneeoberfläche werden quantitativ behandelt, ebenso der Unterschied einer hochsommerlichen und spätsommerlichen Ablationsperiode. Die Energie für die Eisschmelzung und Eisermwärmung wird im Durchschnitt zu 83 % von der Gesamtstrahlungsbilanz und zu 17 % vom konvektiven Wärmestrom geliefert, wobei 26 % auf den fühlbaren, 3 % auf den positiv latenten und -12 % auf den negativ latenten Wärmestrom entfallen. Der Massenverlust durch Verdunstung beträgt jedoch nur 2 % der Gesamtablation.

4. Vergleich des Energieumsatzes und der Ablation in verschiedenen Höhenlagen

Die spärlichen Angaben der Netto-Eisablation für verschiedene Seehöhen wurden mit Werten des Energiehaushaltes in Beziehung gesetzt. Aus Messungen der Lufttemperatur an der Küstenstation Jakobshavn wurde versucht, ein Verfahren zur Abschätzung der Netto-Eisablation durch Ermittlung der Zahl der Ablationstage zu entwickeln.

Vorwort

Mein Dank gilt dem Kuratorium des Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Wien, für die finanzielle Unterstützung der Auswertearbeiten, sowie allen Mitarbeitern, insbesondere Herrn Mag. rer. nat. PETER QUEHENBERGER.

1. STRAHLUNGSHAUSHALT IM ABLATIONSGBIET

1.1 Einleitung

In Übersichtsartikeln von F. LOEWE (1964) und B. FRISTRUP (1966) wird mitgeteilt, daß die verfügbaren Meßdaten über den Wärmehaushalt der Ablationszone des Grönländischen Inlandeises noch sehr spärlich sind. Es stehen zwar Ergebnisse aus systematisch durchgeführten Untersuchungen zur Verfügung (H. LISTER & P. F. TAYLOR, 1961; H. KUHLMAN, 1959; E. ETIENNE, 1940), es lassen sich jedoch daraus nur sehr schwer genauere Abschätzungen der Netto-Ablation des gesamten Grönländischen Eisschildes ableiten.

Es schien daher sinnvoll zu sein, eine weitere Bearbeitung jener Daten des Strahlungshaushaltes durchzuführen, die anlässlich der Expedition EGIG* I (1959) im Ablationsgebiet gemessen und nur als vorläufige Ergebnisse publiziert worden sind (W. AMBACH, 1963). Die neuen Werte der langwelligen Strahlungsströme ergaben sich dabei durch Anwendung des bereits publizierten Eichverfahrens im langwelligen Spektralbereich für das Lupolen-Gerät (W. AMBACH *et al.*, 1963).

Lage der Station: Camp IV-EGIG 1959, 1013 m Seehöhe
69°40'05" N, 49°37'58" W.

Meßperiode: 26. Mai bis 9. August 1959. Weiter Angaben siehe
W. AMBACH, 1963.

Einheiten: $1 \text{ cal/cm}^2 \text{ d} = 0,484 \text{ W/m}^2$.
 $1 \text{ cal/cm}^2 \text{ h} = 11,63 \text{ W/m}^2$.

1.2 Tagessummen der Strahlungsströme

Die neuen Ergebnisse des Strahlungshaushaltes werden hier in Diagrammen dargestellt und diskutiert. Die Stundensummen und Tagessummen der Strahlungsströme sind in *Tab. 1* und *Tab. 2* gegeben.

* Expédition Glaciologique Internationale au Groenland.

Tab.

Stundenwerte der langwelligen Einstrahlung (atmosphärische Gegenstrahlung,

Datum	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11	11-12
4. Juni	25,2	25,2	25,0	24,8	24,3	23,1	21,9	20,9	16,5	23,4	31,8	16,9
5. —	19,5	18,9	19,6	19,8	18,9	20,1	19,2	19,0	18,1	19,1	19,8	19,2
6. —	19,6	19,9	20,3	20,4	18,8	19,6	19,6	18,9	18,1	17,6	18,6	18,7
7. —	18,4	19,3	20,0	20,1	18,8	19,9	19,9	18,3	18,5	18,8	19,7	19,8
8. —	25,6	26,0	25,9	26,0	25,0	25,3	6,4	6,4	19,6	21,0	26,1	21,3
9. —	26,0	26,2	25,7	26,3	25,6	25,3	24,4	22,6	22,6	23,1	24,2	23,2
10. —	25,0	24,7	21,2	23,9	23,7	23,2	23,0	23,2	23,1	22,6	22,7	22,4
11. —	23,8	24,5	23,7	23,1	23,4	23,3	22,9	20,0	20,7	20,3	22,1	21,8
12. —	24,7	24,6	24,3	23,8	22,6	22,1	20,6	18,6	19,8	19,1	21,7	32,7
13. —	22,9	23,7	22,5	22,7	22,5	21,4	19,6	19,2	19,0	18,6	23,9	18,6
14. —	24,4	25,1	24,9	24,6	25,5	25,4	25,5	26,5	25,9	25,6	26,3	25,9
15. —	26,3	26,4	26,4	26,3	26,4	25,5	27,0	25,8	25,8	24,6	24,2	20,2
16. —	25,4	25,1	25,3	18,2	13,7	19,5	15,6	17,8	16,4	15,8	15,6	16,0
17. —	18,1	19,5	20,2	13,3	18,8	19,9	20,2	19,3	19,3	20,3	19,7	17,9
18. —	19,2	18,5	18,7	18,8	19,3	21,1	23,3	20,3	13,7	19,4	22,2	20,2
19. —	20,0	20,2	21,6	18,0	18,8	22,3	17,2	16,5	13,7	15,9	19,5	18,8
20. —	19,2	19,4	19,5	13,4	16,9	18,0	18,1	18,1	18,0	19,1	14,1	21,0
21. —	19,4	18,7	19,5	19,6	18,1	23,1	25,9	25,7	25,2	24,2	23,4	28,9
22. —	26,5	26,5	26,8	26,9	26,6	27,2	27,0	27,6	26,6	28,0	27,6	27,1
23. —	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	19,2	20,8	23,0	24,4
24. —	23,6	23,6	23,6	22,7	20,6	21,1	20,5	20,3	20,1	21,3	23,5	23,4
25. —	22,0	21,9	22,2	22,8	21,4	21,6	20,5	20,6	21,6	24,6	20,6	17,1
26. —	24,4	25,4	26,2	25,4	24,2	23,5	23,1	23,4	26,5	26,3	26,3	26,1
27. —	23,6	24,1	25,2	25,1	24,8	24,2	24,0	23,6	25,0	21,7	21,5	21,7
28. —	25,5	27,6	30,5	31,6	21,8	23,6	23,3	22,6	21,4	22,0	22,5	23,2
29. —	23,8	23,8	23,6	23,5	21,1	23,7	23,5	22,5	21,3	22,1	22,0	23,1
30. —	23,0	23,6	23,0	23,0	21,4	23,3	22,4	21,6	21,4	22,5	22,0	23,3
1. Juli	21,6	22,0	21,3	20,8	18,4	20,3	20,1	18,6	18,6	18,3	19,5	19,9
2. —	20,4	20,6	20,2	19,9	18,4	18,7	20,1	18,0	17,0	20,0	19,9	20,7
3. —	20,1	20,1	19,5	19,5	20,1	22,0	20,1	19,4	20,4	21,3	21,8	23,8
4. —	21,2	22,1	21,7	21,1	20,3	21,1	20,8	21,4	18,8	18,5	18,1	21,0
5. —	24,1	25,0	27,2	26,7	26,7	23,1	29,3	26,6	27,9	21,2	20,2	20,4
6. —	21,6	22,0	21,8	22,3	19,8	24,4	24,9	20,0	18,5	17,5	23,7	24,0
7. —	27,9	27,0	25,8	24,4	24,7	28,5	23,7	24,0	24,1	26,7	21,1	25,6
8. —	28,0	27,5	26,8	26,7	27,9	26,8	26,1	28,1	24,9	26,9	26,8	27,0
9. —	27,5	27,5	27,0	26,5	28,1	28,9	28,3	26,8	23,2	22,7	24,8	24,8
10. —	19,0+	19,0+	19,0+	19,0+	19,0+	19,0+	19,0+	19,0+	19,0+	19,0+	20,1	19,7
11. —	20,2	20,5	21,5	21,6	23,6	23,1	26,0	26,2	28,7	27,0	28,6	28,4
12. —	29,1	28,4	26,0	26,4	27,0	25,8	26,0	23,1	30,0	30,1	29,6	29,3
13. —	27,9	27,3	27,6	27,0	25,0	27,9	26,0	26,1	27,9	26,4	27,4	28,2
14. —	27,3	27,0	26,9	26,7	27,4	28,0	28,4	27,3	28,1	28,0	27,7	27,5+
15. —	24,8	23,6	24,0	23,8	25,0	24,6	25,6	25,6	23,9	23,6	24,5	21,4
16. —	23,7	23,7	22,5	22,4	23,5	22,8	21,9	20,2	21,0	22,0	21,6	21,4
17. —	23,1	22,8	22,7	24,2	20,5	22,0	22,0	22,0	20,9	21,6	22,3	22,5
18. —	26,8	26,5	23,9	22,3	21,4	27,8	27,9	27,2	27,4	27,6	26,4	28,4
19. —	23,9	23,6	23,5	22,9	21,2	20,8	20,8	19,7	19,7	20,3	20,5	20,8

1a:

cal/cm² h, wahre Sonnenzeit) + Werte mit Annahmen ermittelt.

12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	Tagessumme
24,9	22,0	23,2	22,5	19,0	18,3	13,0	18,7	19,6	19,1	18,8	18,3	516,4
12,7	18,9	17,6	18,3	16,4	18,9	18,7	19,7	18,0	17,7	20,6	20,2	448,9
17,2	17,2	17,2	19,3	19,4	19,1	19,5	19,6	19,6	19,9	19,8	18,8	456,3
18,5	18,2	19,0	19,7	20,7	19,8	20,6	20,7	24,2	25,7	25,9	25,7	490,2
21,4	19,1	13,2	22,8	25,0	25,2	25,7	24,7	23,7	26,1	26,2	25,9	533,6
23,9	23,7	22,3	21,9	23,2	24,8	24,2	25,4	25,1	24,8	25,9	24,6	585,0
22,9	11,1	16,6	20,1	18,9	15,4	21,0	22,5	23,1	24,0	24,4	24,6	523,3
22,6	22,2	25,6	22,2	19,7	23,9	24,9	25,5	24,2	22,6	22,9	22,7	548,6
29,8	22,4	17,0	16,9	19,0	18,5	18,7	18,1	20,0+	20,0+	20,0+	20,0+	515,0
15,8	15,7	17,7	21,7	21,4	21,1	20,2	23,2	22,3	23,5	24,3	24,1	505,6
25,0	26,5	28,0	25,3	26,0	25,5	25,4	26,2	25,8	25,6	25,9	26,2	617,0
27,6	23,5	19,6	24,6	26,9	25,0	26,2	26,4	26,1	26,3	25,6	25,5	608,2
15,0	15,2	16,4	17,7	17,2	17,7	18,5	18,5	23,1	18,6	18,9	19,0	433,2
15,8	18,5	18,4	20,2	19,8	19,3	19,5	19,3	19,6	19,8	19,9	19,9	456,5
20,0	21,1	22,0	24,4	24,3	23,4	23,7	23,3	22,6	21,6	20,6	20,3	502,0
18,3	24,9	22,9	25,1	22,4	21,9	22,6	25,5	22,8	21,6	20,3	19,8	490,6
21,5	18,5	20,4	27,7	22,0	17,7	15,2	20,5	21,3	22,4	17,5	19,0	458,5
33,1	25,2	20,7	31,4	24,1	16,6	21,0	24,8	25,1	25,8	26,5	26,6	572,7
27,2	28,1	29,3	28,9	27,5	27,6	28,0	28,0	27,6	27,5+	27,5+	27,5	659,1
22,4	26,1	28,2	28,3	27,3	33,3	27,7	25,4	44,9	24,7	24,0	23,4	623,1
23,6	26,6	28,1	28,0	26,2	25,6	25,7	26,1	25,2	24,2	23,1	22,7	569,4
26,0	27,4	28,6	24,4	24,4	24,9	21,0	21,3	24,0	24,2	24,9	24,0	552,0
26,3	28,2	29,8	28,4	28,1	26,9	26,8	26,6	25,0	25,1	24,0	23,8	619,8
20,5	20,7	22,5	21,0	21,2	20,2	21,7	21,7	22,0	22,8	22,8	22,8	544,4
21,1	21,2	22,9	21,6	22,1	21,8	22,8	25,8	24,6	23,8	22,9	22,9	569,1
21,1	21,5	23,5	22,7	22,8	21,9	23,6	23,4	23,3	23,4	23,3	23,0	547,5
21,1	21,1	22,5	21,6	21,4	20,9	21,7	22,1	22,6	22,4	22,3	22,0	532,2
17,8	20,9	22,8	18,1	18,9	18,1	19,9	20,2	20,3	20,1	20,8	20,6	477,9
19,1	19,3	19,6	19,3	18,9	18,9	19,8	20,1	19,5	19,4	20,3	19,7	467,8
19,7	25,3	22,0	20,3	19,5	19,0	20,9	20,9	23,0	21,8	22,1	22,5	505,1
19,1	19,5	22,0	21,2	23,8	21,0	23,5	27,2	25,8	24,9	26,2	25,0	535,3
18,4	20,1	19,1	20,8	20,5	23,0	22,0	22,7	27,4	24,2	22,0	22,0	560,6
24,9	23,6	24,7	21,5	21,2	25,1	20,5	21,0	20,7	21,9	22,8	22,6	531,0
25,8	26,7	26,3	27,5	27,0	27,7	26,9	27,1	27,6	27,4	27,0	27,7	628,2
27,0	27,5	27,4	27,4	27,5	26,2	28,0	27,4	26,2	26,5	28,3	30,8	653,7
15,8	8,5	14,1	12,3	14,8	15,7	17,1	18,8	19,0+	19,0+	19,0+	19,0+	509,2
19,3	19,7	23,4	23,3	19,5	18,8	18,4	20,2	19,3	20,8	20,5	21,2	474,2
28,4	29,9	29,8	28,6	20,0	28,4	29,9	29,0	29,0	28,1	28,5	28,9	633,9
29,1	28,5	28,0	28,4	28,3	29,6	28,7	28,9	27,9	27,3	27,9	28,0	671,4
27,5	28,9	26,2	20,2	22,8	21,7	23,5	23,2	25,2	24,9	25,6	25,8	620,5
27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,6+	27,2	27,5	26,6	25,5	26,6	25,7	654,5
22,1	22,7	23,7	22,9	23,0	23,0	21,3	23,0	22,7	22,9	22,9	22,5	563,1
18,6	20,3	19,9	21,4	21,6	21,6	21,9	20,9	22,0	21,9	22,5	22,8	522,1
19,1	20,3	21,9	21,8	21,8	21,2	22,4	22,3	23,8	22,4	23,9	25,2	532,7
27,8	25,2	28,6	28,2	27,8	25,5	21,6	22,2	24,1	21,1	23,7	23,0	612,4
19,2	20,3	20,8	21,0	19,4	18,6	20,6	21,3	21,5	21,5	21,0	21,2	504,1

Continued

Tab. 1a

Datum	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11	11-12
20. —	21,0	20,5	21,6	22,1	20,8	21,0	21,1	20,1	19,5	20,3	21,0	22,1
21. —	27,2	27,1	27,8	27,8	27,0	27,1	27,1	27,1	27,3	27,0	26,8	26,1
22. —	26,5	26,1	26,3	25,7	24,8	22,5	25,2	26,3	26,5	24,0	22,5	15,7
23. —	27,4	26,9	27,4	26,6	26,9	27,2	26,7	27,2	25,6	24,8	22,7	22,1
24. —	20,7	21,7	23,2	23,8	24,8	21,1	20,7	21,7	22,8	27,2	23,0	18,2
25. —	26,0	25,3	26,3	26,5	25,4	20,7	23,1	21,4	22,2	22,0	22,4	21,7
26. —	20,5	20,9	22,2	23,1	21,3	20,7	22,9	19,8	20,1	21,3	20,4	21,9
27. —	25,6	26,0	26,4	27,0	28,6	29,1	28,3	27,4	27,1	27,5	24,2	29,2
28. —	23,5	22,7	24,6	25,2	25,1	26,0	26,0	21,7	23,8	28,8	28,8	29,9
29. —	27,1	27,7	27,6	27,1	27,9	27,5	25,8	26,2	26,7	21,8	22,8	25,9
30. —	27,3	27,1	27,3	26,9	26,6	26,7	25,3	25,2	24,3	24,4	22,2	23,8
31. —	22,3	20,6	24,0	21,9	21,4	18,9	20,0	19,1	18,2	18,8	18,1	18,4
1. Aug.	18,8	18,6	19,7	20,3	20,3	18,1	19,0	18,6	18,2	17,4	21,3	19,9
2. —	21,8	24,0	24,6	24,2	26,5	26,5	27,2	26,6	27,5	23,1	25,6	25,6
3. —	26,5	26,4	25,1	25,7	25,3	27,8	23,1	22,3	19,9	18,9	22,8	24,6
4. —	21,2	20,6	22,0	22,5	23,0	20,2	22,2	19,9	20,2	21,1	22,6	22,3
5. —	27,2	27,2	27,5	27,2	26,3	27,4	26,7	26,9	27,5	25,1	25,2	23,0
6. —	19,4	20,0	21,5	21,6	20,4	18,3	19,7	19,3	19,9	19,4	20,7	20,5
7. —	18,8	18,4	19,7	20,1	19,7	21,0	20,5	22,6	24,4	25,1	26,1	25,3
8. —	27,1	27,0	26,6	26,1	26,4	26,9	26,5	27,2	28,3	30,8	33,0	28,1

Tab.

Stundenwerte der langwelligen Ausstrahlung der Oberfläche

Datum	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11	11-12
4. Juni	26,1+	26,3+	26,3+	25,7+	26,0+	26,1+	23,5	24,9	23,9	25,1	28,1	24,6
5. —	25,4+	25,5+	25,0+	25,1+	24,6+	25,2+	25,8	26,1	25,5	26,3	26,1	26,2
6. —	26,2+	26,4+	25,9+	25,5+	24,9+	24,7+	23,4	23,3	22,8	23,0	23,2	23,7
7. —	25,6+	25,3+	25,2+	25,0+	24,2+	24,6+	25,3	24,1	24,6	25,2	24,6	24,2
8. —	26,7+	26,7+	26,5+	26,4+	26,4+	27,5+	21,8+	28,9+	27,3+	25,7+	26,8+	23,4+
9. —	26,4+	26,2+	26,5+	25,9+	26,3+	26,7+	25,6	24,9	24,9	25,3	24,6	24,4
10. —	25,7+	25,5+	24,9+	24,8+	25,5+	25,1+	24,9	24,0	24,2	24,4	24,3	24,8
11. —	25,5+	25,6+	25,6+	25,2+	25,7+	25,9+	25,2+	25,1	23,9	23,2	23,4	23,3
12. —	25,5+	25,4+	25,5+	25,2+	25,4+	25,0+	24,4+	25,4+	25,0	24,9	24,1	26,6
13. —	25,5+	25,2+	24,5+	24,4+	25,4+	24,1+	25,0+	25,1	22,1	24,4	31,1	24,2
14. —	26,1+	25,9+	25,3+	25,6+	25,9+	26,1+	25,8+	25,5+	26,4+	25,9+	26,8+	27,2+
15. —	26,5+	26,6+	26,3+	26,4+	27,1+	25,6+	26,3+	26,3	25,5	22,9	22,7	19,1
16. —	26,2+	25,6+	26,3+	21,2+	19,5+	18,5+	20,1	21,2	19,4	21,2	21,2	22,4
17. —	24,7+	25,0+	24,6+	24,5+	23,6+	23,8+	24,2	23,0	23,8	23,3	23,5	24,1
18. —	25,3+	22,5+	23,0+	23,5+	25,0+	25,8+	26,1+	25,5	29,2	28,0	23,2	24,1
19. —	25,7+	25,8+	26,2+	24,2+	25,0+	26,3+	26,9	25,6	24,1	23,8	26,0	25,6
20. —	25,3+	25,5+	25,8+	23,3+	24,6+	24,3+	26,5	26,3	26,3	25,0	26,4	24,6
21. —	25,3+	24,8+	24,1+	24,5+	26,4+	25,2+	27,8	25,8	25,7	26,5	26,9	27,0
22. —	27,2+	27,1+	26,6+	26,6+	26,5+	27,4+	27,4+	28,4	26,8	26,7	27,4	26,1
23. —	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	33,2	26,3	28,3	26,4
24. —	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	28,1	27,0	27,3	26,7	26,1	26,7

Continued

12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	Tagessumme
20,9	22,3	23,0	23,3	22,8	21,3	21,7	20,4	23,4	21,8	23,6	25,4	521,0
25,6	26,7	27,2	27,6	27,1	27,9	27,9	27,3	26,7	26,5	26,5	26,0	648,4
11,6	11,9	20,5	28,2	29,6	25,4	21,1	20,1	23,7	23,7	24,6	27,1	559,4
21,1	20,3	23,9	22,0	20,8	20,1	21,2	20,5	22,0	20,9	20,8	21,1	566,2
24,9	20,7	20,6	24,4	24,0	25,9	26,7	27,0	26,2	26,4	26,0	26,0	567,8
20,8	20,6	21,4	21,9	21,1	20,5	21,3	22,5	22,3	23,0	21,9	21,2	541,5
26,2	23,3	22,5	24,0	21,2	22,9	24,3	27,1	25,9	27,1	27,3	25,6	552,5
33,7	25,1	23,7	26,0	24,8	25,4	27,0	27,7	28,3	27,9	26,8	26,4	649,2
28,9	25,9	26,7	22,4	19,8	19,7	22,0	24,8	23,4	24,5	26,0	25,7	595,9
19,2	23,0	21,9	28,5	25,5	26,3	26,7	27,1	26,7	26,8	27,4	27,3	620,5
22,3	21,7	23,5	22,5	21,0	24,9	23,5	21,3	21,0	20,8	20,1	20,6	570,3
17,0	16,8	17,8	18,2	18,0	19,5	19,8	20,4	19,9	20,8	20,9	20,5	471,3
19,5	18,8	19,7	18,5	28,4	27,8	26,2	23,2	20,4	20,2	20,6	21,2	494,7
27,1	26,8	26,6	25,4	26,6	25,5	27,7	26,8	26,8	27,3	27,6	26,7	624,1
21,3	20,3	20,1	20,7	20,0	20,5	18,2	17,3	20,0	20,7	20,8	20,9	529,2
22,5	25,1	27,8	28,5	27,7	27,7	27,6	28,0	27,9	27,7	27,8	27,3	583,4
20,4	16,7	19,7	20,1	20,6	20,3	20,5	20,8	20,8	20,3	19,7	19,4	556,5
19,5	19,9	20,3	21,1	20,3	20,1	20,4	20,4	20,0	19,4	18,8	19,0	479,9
23,5	26,6	26,1	26,7	27,9	27,7	27,0	27,2	27,7	27,5	27,1	27,1	583,8
29,7	30,0	29,5	29,0	28,0	28,4	26,8	25,6	24,4	24,9	25,8	26,4	662,5

1b:
(cal/cm² h, wahre Sonnenzeit) + Werte mit Annahmen ermittelt.

12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	Tagessumme
26,6	25,8	25,1	23,6	24,7	25,3	25,5	25,4	25,8	25,8	25,8	25,8+	611,8
26,0	25,2	25,7	26,0	25,7	26,7	26,1	25,6	26,2+	27,9+	26,8+		620,8
24,1	24,0	23,4	23,9	25,5	24,6	24,9	25,0	24,2	26,6	24,5+	24,3+	588,0
24,3	25,3	25,2	25,3	24,9	25,6	25,6	27,9+	26,6+	27,0+	26,8+	26,4+	608,8
26,0+	23,1	27,0	27,7	26,8	26,3	26,3	25,4	25,4	24,7	26,6+	26,5+	625,9
24,7	24,6	24,4	24,2	24,5	24,5	24,5	24,7	24,4	24,0	26,1+	25,3+	603,6
24,0	24,1	23,9	24,0	24,7	24,9	23,8	24,8	24,1	25,1	25,9+	25,4+	592,8
24,9	23,9	25,9	25,5	25,3	24,9	34,4	25,1	23,9	24,3	24,7+	25,3+	605,7
22,5	19,2	25,0	24,5	24,2	24,6	23,8	23,3	26,3	24,2+	26,5+	25,5+	592,0
22,9	21,3	23,7	24,7	28,8	25,0	25,1	25,5	24,9	26,0+	26,1+	26,2+	601,2
26,4+	25,8	28,0	26,8	26,3	25,0	25,9	26,9	25,0	26,3+	26,6+	26,4+	627,9
20,8	21,4	22,3	26,7	24,8	24,7	25,1	25,3	24,1	25,4	26,1+	26,0+	593,7
23,3	23,8	23,8	25,1	24,1	23,9	24,9	23,8	23,6	26,3+	26,5+	25,1	557,0
24,8	25,1	26,5	26,2	25,9	24,9	25,2	25,0	25,1	25,1	26,2+	26,0+	594,1
24,8	26,7	26,2	27,0	27,1	26,5	26,2	25,8	24,3	22,6	26,6+	26,5+	611,5
25,5	28,4	26,1	26,2	27,6	26,4	26,5	25,5	25,2	26,4	26,7+	26,0+	621,7
25,2	25,5	25,8	25,7	28,0	26,1	25,5	26,8	27,3	25,2	24,5+	25,3+	614,8
38,3	31,4	34,2	22,6	26,7	27,2	25,8	27,4	25,6	26,2	27,2+	27,5+	650,1
26,6	27,6	26,6	28,2	27,4	27,0	26,9	26,8	27,2	27,5+	27,5+	27,5+	651,0
26,3	26,0	25,8	26,1	26,7	26,3	26,1	27,6	27,7	27,5+	27,5+	27,5+	655,3
25,6	25,5	26,2	25,8	25,8	25,4	25,6	27,0	26,9	27,2	28,0	29,0+	644,9

Tab. 1b

Datum		00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11	11-12
25.	—	29,2	28,7	28,1	26,5	27,2	26,2	26,5	26,4	26,1	24,6	26,0	23,2
26.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	26,3	26,3	26,1	26,4	25,8	25,6
27.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,8+	27,5+	27,5+	28,0+	26,3	26,3
28.	—	27,5+	27,5+	27,5+	32,6	27,8	27,9	28,0	28,0	27,5	27,3	26,9	27,2
29.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	26,2
30.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	25,0	28,1	27,8	27,4	26,7	27,4
1. Juli	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,7	27,5	27,1	27,3	27,3	26,5
2.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,0	27,8	28,8	26,7	26,7	26,6
3.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,7	27,7	26,4	25,6	27,8	27,1
4.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	28,2	27,8	26,5	26,5	27,3	26,5
5.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	25,7+	26,1	26,7	28,6	25,8	26,4
6.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	25,4	27,8	26,4	25,9	26,2
7.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+
8.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,6	27,9	28,2	27,6	26,7	27,0
9.	—	27,1+	27,1+	27,1+	27,1+	27,1+	27,1+	27,1+	27,1+	27,1+	27,1+	27,5+	27,5+
10.	—	24,4+	24,4+	24,4+	24,4+	25,5+	25,5+	25,5+	25,5+	27,8	28,7	29,1	27,5+
11.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,6	27,8	28,2	28,1	26,7
12.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	29,8	29,7	28,6	27,9	27,7	27,2
13.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,8	27,2	39,1	28,0	27,8	28,2
14.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,3	27,9	27,3	27,7	27,5
15.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	28,2	29,1	28,9	28,8	28,1
16.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	28,1	29,1	28,8	28,8	31,1	28,5
17.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+
18.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+
19.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+
20.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+
21.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	26,5	26,8	26,2	26,5	27,2
22.	—	27,5	27,1	27,3	27,5	26,9	27,8	27,0	26,4	25,5	25,1	28,8	27,7
23.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	28,7	28,5	28,2	27,3	28,3	27,5	27,1
24.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	30,7	30,5	28,9	31,4	26,2	26,8
25.	—	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	30,0	29,6	31,1	28,3	28,4	29,0	26,9
26.	—	27,3	28,0	27,8	27,6	27,5	27,6	27,8	27,6	26,4	27,2	28,2	26,5
27.	—	26,9	27,7	27,6	28,0	28,0	27,4	27,2	29,9	26,7	26,3	27,3	27,1
28.	—	26,9	27,7	27,7	27,5	27,4	27,5	26,8	27,4	29,2	27,1	26,6	26,6
29.	—	27,4	27,3	27,9	27,7	27,3	25,9	26,9	28,5	26,5	26,5	25,0	27,2
30.	—	27,3	27,1	27,2	27,6	27,4	27,1	27,7	27,4	26,3	26,6	27,9	26,7
31.	—	26,8	26,2	26,9	26,0	26,7	25,7	26,8	27,2	27,5	26,8	26,7	26,7
1. Aug.	25,9	25,8	25,8	25,8	25,8	25,4	26,1	26,6	26,6	26,2	24,2	27,2
2.	—	26,7	26,8	27,5	27,5	27,5	28,2	27,1	27,1	27,9	27,7	26,6	27,4
3.	—	27,1	27,0	26,8	26,9	26,7	26,4	27,7	27,0	27,5	26,0	26,4	26,0
4.	—	27,8	27,9	28,1	28,1	28,0	28,0	28,4	29,5	28,3	27,0	28,6	27,0
5.	—	27,8	27,8	27,6	27,6	27,6	27,1	26,7	26,6	24,6	27,8	27,3	26,3
6.	—	26,8	26,8	26,9	26,7	27,4	27,2	28,1	28,0	28,2	27,8	27,1	26,8
7.	—	25,7	26,0	26,3	25,2	26,9	27,4	27,1	26,8	27,5	27,1	27,1	27,2
8.	—	27,1	27,3	27,0	27,5	27,4	27,2	27,1	27,3	27,6	26,6	26,2	27,0

Continued

12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	Tagessumme
24,6	24,7	26,1	26,8	26,8	27,4	26,3	27,6	27,3	27,5+	27,5+	27,5+	638,8
26,0	26,3	27,0	26,2	25,5	26,2	26,4	27,9	27,2	27,5+	27,5+	27,5+	642,7
26,2	26,7	26,7	26,9	26,8	14,2	26,2	28,1	28,3	27,9	27,5+	27,5+	641,4
26,6	26,6	26,8	26,7	27,0	26,5	26,0	28,2	27,5	27,5+	27,5+	27,5+	660,1
26,3	27,3	28,1	27,7	27,9	27,2	26,6	28,1	28,1	27,5+	27,5+	27,5+	658,5
27,2	27,3	27,8	27,5	27,3	26,8	26,1	27,7	26,9	26,8	27,5+	27,5+	653,8
26,7	26,5	28,4	26,1	27,2	27,0	26,8	26,0	26,9	27,5+	27,5+	27,5+	652,5
26,6	26,1	26,4	26,8	25,9	25,9	26,1	26,3	27,0	27,5+	27,5+	27,5+	648,2
27,1	27,7	26,4	25,6	26,2	26,5	26,8	26,4	26,2	27,5+	27,5+	27,5+	648,7
25,6	26,2	18,0	31,0	26,2	24,7	25,5	28,0	26,7	27,5+	27,5+	27,5+	642,2
26,5	26,8	27,6	28,1	26,3	25,7	26,7	26,0	26,2	27,5+	27,5+	27,5+	646,7
22,9	26,3	25,0	25,6	24,9	26,6	24,7	25,4	25,6	27,5+	27,5+	27,5+	633,7
27,5+	27,0	26,8	27,3	27,4	26,8	26,9	25,8	27,3	26,8	27,5+	27,5+	654,6
27,5	28,0	27,3	27,2	27,1	26,5	27,2	27,1	26,6	27,8+	28,0+	28,0+	658,3
28,3	19,1	30,2	31,2	26,3	25,9	23,6	23,1	24,1	25,2+	24,4+	24,4+	631,8
27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	642,7
27,8	27,5	26,5	26,2	27,4	27,3	27,0	26,8	28,1	27,5+	27,5+	27,5+	658,0
27,4	26,4	26,8	27,8	26,9	27,7	27,9	27,9	27,9	27,3	27,5+	27,5+	664,9
27,2	27,8	26,5	28,7	25,8	26,3	27,4	27,0	26,9	25,8	27,5+	27,5+	667,5
27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	28,0	27,6	27,6	27,1	27,3	27,5+	660,3
28,4	27,7	27,4	27,1	27,4	26,5	26,4	27,0	25,9	27,5+	27,5+	27,5+	661,9
26,2	26,0	26,8	27,3	25,3	23,5	25,8	26,2	26,2	27,1	27,5	27,4	654,7
27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	660,0
27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	660,0
27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	27,5+	660,0
27,2	27,6	27,6	27,3	27,6	27,0	26,8	27,3	27,8	27,6	27,5+	27,5+	658,8
27,7	27,5	26,8	26,8	27,0	26,5	26,3	27,1	27,4	27,1	27,1	27,1	650,1
25,4	26,3	27,1	26,3	27,6	28,5	25,7	26,4	27,6	28,3	28,2	27,6	649,6
26,1	25,2	26,7	27,6	26,3	25,4	23,3	26,1	26,7	27,5+	26,4+	27,5+	649,0
26,8	25,6	24,3	26,2	27,2	26,4	26,4	26,7	26,3	27,5+	27,5+	27,5+	657,9
26,2	26,5	26,4	26,3	27,9	26,8	25,6	26,4	27,0	26,8	27,3	26,2	660,2
28,5	26,9	26,9	25,1	28,0	26,4	27,4	27,9	27,7	28,1	28,1	27,6	658,1
27,3	28,5	27,2	27,4	27,1	27,4	27,3	27,7	28,1	27,9	27,5	27,7	661,2
26,5	26,9	27,1	26,8	27,9	26,7	26,8	28,2	27,1	27,7	27,8	27,7	655,6
22,6	27,0	26,5	29,1	27,4	27,3	27,6	27,7	28,1	27,0	27,4	27,3	649,1
26,9	29,1	28,4	27,4	26,6	27,7	27,6	27,0	26,6	26,6	26,5	26,8	653,5
26,9	24,7	25,2	25,1	25,0	26,5	25,7	26,2	26,5	26,9	28,2	28,0	634,9
26,9	26,6	25,7	27,0	28,1	27,9	27,5	26,9	27,5	27,6	26,8	27,2	637,1
26,4	27,1	27,1	27,2	27,0	27,0	27,9	27,5	27,4	27,4	27,4	26,9	654,3
26,5	26,6	26,6	27,2	27,0	28,2	26,3	26,6	26,6	27,6	27,6	27,7	646,0
27,0	32,2	27,0	27,8	27,3	27,1	27,0	27,7	27,7	27,8	27,8	27,4	670,5
28,7	26,2	27,0	26,6	26,9	26,3	26,7	27,6	27,0	27,2	26,8	26,8	648,6
26,7	26,2	26,1	26,0	26,3	27,0	26,0	26,8	26,7	26,2	26,2	26,1	644,5
26,9	29,1	27,6	27,7	28,4	28,3	27,9	27,9	27,8	27,2	27,2	27,1	653,7
28,4	29,0	28,7	28,2	28,1	28,3	27,2	26,9	26,5	26,3	26,8	26,8	656,5

Tab. 2

Tagessummen der Strahlungsströme (cal/cm² d). Es bedeuten G die kurzwellige Einstrahlung (Globalstrahlung), R den reflektierten kurzwelligen Strahlungsstrom (an der Registrierstelle, R/G die Albedo, A die langwellige Einstrahlung (atmosphärische Gegenstrahlung), E die langwellige Ausstrahlung, G-R die kurzwellige Strahlungsbilanz, A-E die langwellige Strahlungsbilanz und B die Gesamtstrahlungsbilanz.

Datum	G	R	R/G	A	E	G+A	R+E	G-R	A-E	B
26. Mai	460,2	280,1	0,608	—	—	—	—	180,1	+ 26,5	206,6
27. —	532,3	424,1	0,797	—	—	—	—	108,2	— 68,0	40,2
28. —	590,7	435,8	0,737	—	—	—	—	154,9	— 37,6	117,3
29. —	410,2	270,0	0,658	—	—	—	—	140,2	+ 16,0	156,2
30. —	612,7	318,2	0,519	—	—	—	—	294,5	— 57,3	237,2
31. —	638,0	326,7	0,512	—	—	—	—	311,3	—152,8	158,5
1. Juni. . . .	636,0	359,3	0,565	—	—	—	—	276,7	—165,0	111,7
2. —	710,0	422,5	0,595	—	—	—	—	287,5	—181,0	106,5
3. —	628,0	425,2	0,677	—	—	—	—	202,8	—132,5	70,3
4. —	612,0	399,8	0,653	516,4	611,8	1128,4	1011,6	212,2	— 95,4	116,8
5. —	759,7	454,5	0,597	448,9	620,8	1208,6	1075,3	305,2	—171,9	133,3
6. —	750,0	456,3	0,608	456,3	588,0	1206,3	1044,3	293,5	—131,7	162,0
7. —	737,2	436,6	0,592	490,2	608,8	1227,4	1045,4	300,6	—118,6	182,0
8. —	595,3	360,4	0,605	533,6	625,9	1128,9	986,3	234,9	— 92,3	142,6
9. —	429,2	354,7	0,808	585,0	603,6	1014,2	958,3	74,5	— 18,6	55,9
10. —	572,8	431,4	0,753	523,3	592,8	1096,1	1024,2	141,4	— 69,5	71,9
11. —	611,8	457,4	0,750	548,6	605,7	1160,4	1063,1	154,4	— 57,1	97,3
12. —	692,3	569,4	0,822	515,0	592,0	1207,3	1161,4	122,9	— 77,0	45,9
13. —	709,9	503,0	0,710	505,6	601,2	1215,5	1104,2	206,9	— 95,6	111,3
14. —	452,1	388,5	0,860	617,0	627,9	1069,1	1016,4	63,6	— 10,9	52,7
15. —	555,4	477,1	0,860	608,2	593,7	1163,6	1070,8	78,3	+ 14,5	92,8
16. —	796,8	411,6	0,806	433,2	557,0	1230,0	1198,6	155,2	—123,8	31,4
17. —	781,1	544,3	0,760	456,5	594,1	1237,6	1188,4	186,8	—137,6	49,2
18. —	746,0	542,3	0,726	502,0	611,5	1248,0	1153,8	203,7	—109,5	94,2
19. —	746,2	539,1	0,723	490,6	621,7	1236,8	1160,8	207,1	—131,1	76,0
20. —	778,4	547,7	0,704	458,5	614,3	1236,9	1162,5	230,7	—156,3	74,4
21. —	568,3	408,2	0,720	572,7	650,1	1141,0	1058,3	160,1	— 77,4	82,7
22. —	399,2	324,6	0,815	659,1	651,0	1058,3	975,6	74,6	+ 8,1	82,7
23. —	663,2	388,0	0,586	623,1	655,3	1286,3	1043,3	275,2	— 32,2	243,0
24. —	760,9	400,6	0,526	569,4	644,9	1330,3	1045,5	360,3	— 75,5	284,8
25. —	690,6	348,9	0,501	552,0	638,8	1242,6	987,7	341,7	— 86,8	254,9
26. —	737,4	364,3	0,494	619,8	642,7	1357,2	1007,0	373,1	— 22,9	350,2
27. —	745,2	357,7	0,479	544,4	641,4	1289,6	999,1	387,5	— 97,0	290,5
28. —	733,8	340,4	0,464	569,1	660,1	1302,9	1000,5	393,4	— 91,0	302,4
29. —	727,0	346,6	0,475	547,5	658,5	1274,5	1005,1	380,4	—111,0	369,4
30. —	745,7	369,6	0,495	532,2	653,8	1277,9	1023,4	376,1	—121,6	254,5
1. Juli	756,6	394,6	0,520	477,9	652,5	1234,5	1047,1	362,0	—174,6	187,4
2. —	749,7	412,2	0,550	467,8	648,2	1217,5	1060,4	337,5	—180,4	157,1
3. —	728,5	412,5	0,566	505,1	648,7	1233,6	1061,2	316,0	—143,6	172,4
4. —	720,9	398,0	0,553	535,3	642,2	1256,2	1040,2	322,9	—106,9	216,0

Fortsetzung

Tab. 2. Fortsetzung

Datum	G	R	R/G	A	E	G+A	R+E	G-R	A-E	B
5. —	651,5	344,6	0,528	560,6	646,7	1212,1	991,3	306,9	- 86,1	220,8
6. —	672,6	377,4	0,562	531,0	633,7	1203,6	1011,1	295,2	-102,7	192,5
7. —	421,7	239,1	0,568	628,2	654,6	1049,9	893,7	182,6	- 26,4	156,2
8. —	384,2	278,7	0,727	653,7	658,3	1037,9	937,0	105,5	- 4,6	100,9
9. —	666,1	518,5	0,778	509,2	631,8	1175,3	1150,3	147,6	-122,6	25,0
10. —	720,4	546,5	0,758	474,2	642,7	1194,6	1189,2	173,9	-168,5	5,4
11. —	428,3	289,3	0,698	633,9	658,0	1062,2	947,3	139,0	- 24,1	114,9
12. —	306,2	162,6	0,532	671,4	664,9	977,6	827,5	143,6	+ 6,5	150,1
13. —	496,1	257,7	0,518	620,5	667,5	1116,6	925,2	238,7	- 47,0	191,7
14. —	276,2	156,4	0,566	654,5	660,3	930,7	816,7	119,8	- 5,8	114,0
15. —	630,1	319,8	0,507	563,1	661,9	1193,2	981,7	310,6	- 98,8	211,8
16. —	704,2	408,6	0,580	522,1	654,7	1226,3	1063,3	295,3	-132,6	162,7
17. —	703,2	383,0	0,545	532,7	660,0	1235,9	1043,0	320,2	-127,3	192,9
18. —	396,0	207,5	0,523	612,4	660,0	1008,4	867,5	188,5	- 47,6	140,9
19. —	675,9	362,3	0,536	504,1	660,0	1180,0	1022,3	313,6	-155,9	157,7
20. —	656,6	341,4	0,520	521,0	658,8	1177,6	1000,2	315,2	-137,8	177,4
21. —	334,0	170,4	0,510	648,4	650,1	982,4	820,5	163,6	- 1,7	161,9
22. —	537,5	277,2	0,520	559,4	649,6	1096,9	926,8	260,3	- 90,2	170,1
23. —	525,4	283,7	0,540	566,2	649,0	1091,6	932,7	241,7	- 82,8	158,9
24. —	606,5	335,0	0,540	567,8	657,9	1174,3	992,9	271,5	- 90,1	181,4
25. —	652,6	353,1	0,540	541,5	660,2	1194,1	1013,3	299,5	-118,7	180,8
26. —	588,9	297,9	0,510	552,5	658,1	1141,4	956,0	291,0	-105,6	185,4
27. —	496,3	232,2	0,470	649,2	661,2	1145,5	893,4	264,1	- 12,0	252,1
28. —	450,9	213,0	0,470	595,9	655,6	1046,8	868,6	237,9	- 59,7	178,2
29. —	467,2	231,7	0,490	620,5	649,1	1087,7	880,8	235,5	- 28,6	206,9
30. —	466,1	314,8	0,680	570,3	653,5	1036,4	968,3	151,3	- 82,2	69,1
31. —	605,9	390,3	0,640	471,3	634,9	1077,2	1025,2	215,6	-163,6	52,0
1. Aug. ...	558,0	337,9	0,604	494,7	637,1	1052,7	975,0	220,1	-142,4	77,7
2. — ...	324,3	191,5	0,590	624,1	654,3	948,4	845,8	132,8	- 30,2	102,6
3. — ...	602,8	380,5	0,630	529,2	646,0	1132,0	1026,5	222,3	-116,8	105,5
4. — ...	426,1	236,2	0,550	583,4	670,5	1009,5	906,7	189,9	- 87,1	102,8
5. — ...	492,9	282,1	0,570	556,5	648,6	1049,4	930,7	210,8	- 92,1	118,7
6. — ...	553,2	331,4	0,600	479,9	644,5	1033,1	975,9	221,8	-164,6	57,2
7. — ...	312,4	186,5	0,600	583,8	653,7	896,2	840,2	125,9	- 69,9	56,0
8. — ...	327,9	276,9	0,850	662,5	656,5	990,4	933,4	51,0	+ 6,0	57,0

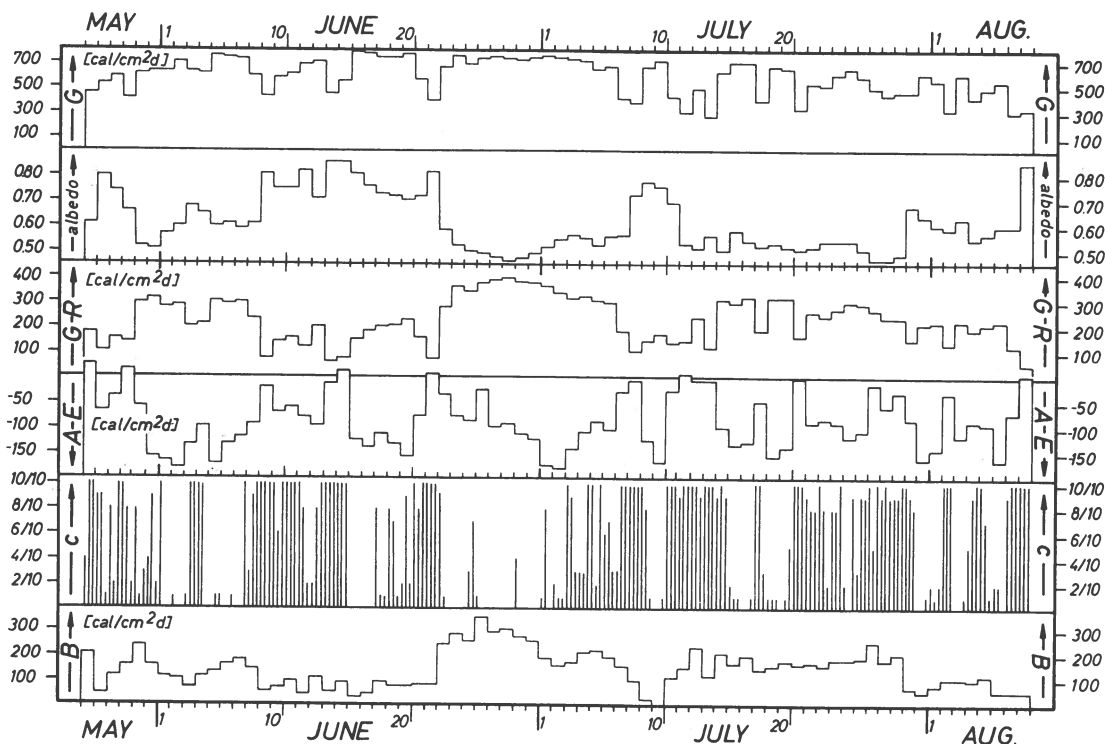
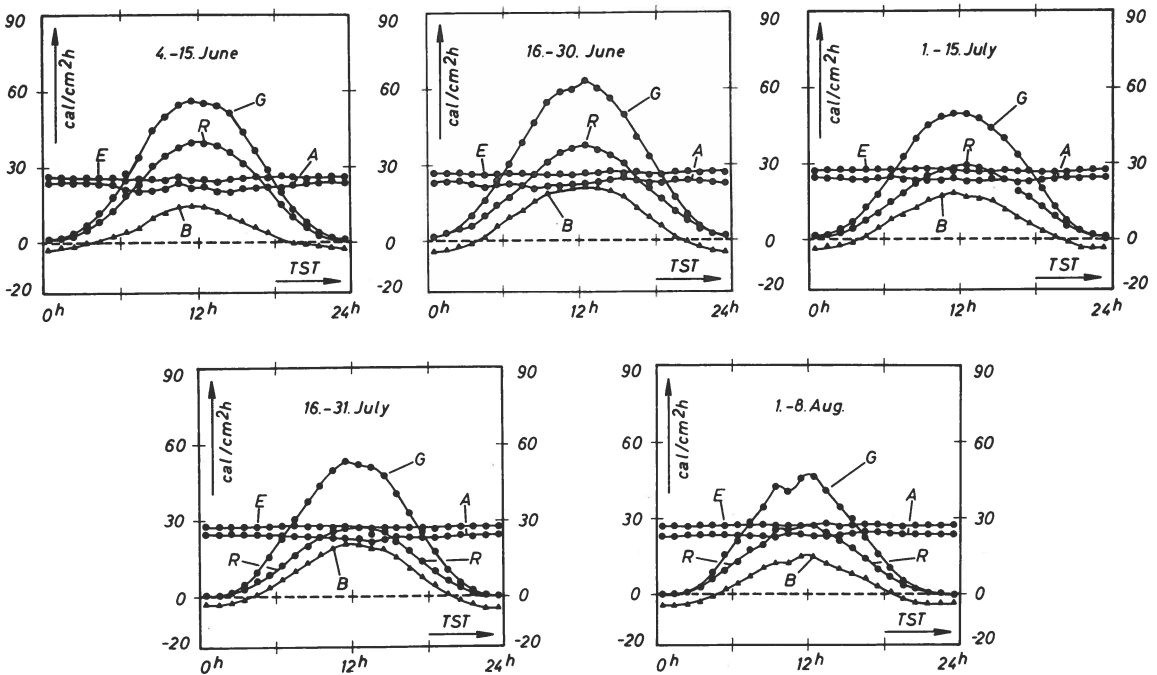


Abb. 1. Tagessummen der kurzwelligen Einstrahlung G (Globalstrahlung), der kurzwelligen und langwelligen Strahlungsbilanz (G-R, A-E), der Gesamtstrahlungsbilanz B, sowie Werte der Albedo und der Bewölkung.

Abb. 1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Tagessummen der Strahlungsströme. Es treten folgende charakteristische Züge auf:

- Die Albedowerte, gebildet aus Tagessummen, zeigen wegen der stark wechselnden Oberflächenbeschaffenheit einen großen Variationsbereich von 47 % bis 86 %.
- Die langwellige Strahlungsbilanz zeigt einen deutlichen Gang mit der Bewölkung.
- Die Tagessummen der Gesamtstrahlungsbilanz sind in der gesamten Periode positiv und erreichen den Höchstwert von $350 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$. Niedere Werte der Gesamtstrahlungsbilanz treten zur Zeit hoher Albedo (Schneebedeckung) auf. Im allgemeinen überwiegt der Einfluß der Albedo gegenüber jenem der Bewölkung.
- In Perioden mit überwiegender Schneebedeckung (4. Juni bis 23. Juni 1959) zeigen kurzwellige und langwellige Strahlungsbilanz einen deutlichen gegenphasigen Verlauf, wobei hier der Wert der kurzwelligen Strahlungsbilanz hauptsächlich durch die Bewölkung bestimmt



Ann. 2. Tageszeitlicher Gang der kurzwelligen Einstrahlung G (Globalstrahlung), der reflektierten kurzwelligen Strahlung R , der langwelligen Einstrahlung A (atmosphärische Gegenstrahlung), der langwelligen Ausstrahlung E und der Gesamtstrahlungsbilanz B mit der wahren Sonnenzeit (TST). Mittelbildung über halbmonatliche Abschnitte.

wird. Dieses Ergebnis deckt sich mit dem im Akkumulationsgebiet erhaltenen Verlauf (W. AMBACH, 1968).

Die langwellige Strahlungsbilanz ist mit der kurzwelligen Strahlungsbilanz negativ korreliert. Der Grund dafür ist, daß durch die Bewölkung die kurz- und die langwellige Strahlungsbilanz gegensinnig beeinflusst wird (W. AMBACH, 1974).

1.3 Tageszeitlicher Gang der Strahlungsströme im "Halbmonatsmittel"

Abb. 2 gibt den gemittelten Tagesgang der Strahlungsströme für die Perioden:

1. Periode: 4.-15. Juni 1959
2. Periode: 16.-30. Juni 1959
3. Periode: 1.-15. Juli 1959
4. Periode: 16.-31. Juli 1959
5. Periode: 1.- 8. August 1959

Tab. 3.

Mittlere Tagessummen der Strahlungsströme ($\text{cal/cm}^2 \text{ d}$) für halbmonatliche Intervalle. Die Tagessummen gelten für die in *Abb. 2* gewählte Einteilung.

Periode	1 4.–15. Juni	2 16.–30. Juni	3 1.–15. Juli	4 16.–31. Juli	5 1.–8. August
Zahl d. Tage	12	15	15	16	8
G	623,7	708,2	573,9	553,5	449,9
R	440,7	432,9	340,3	298,3	276,5
G–R	182,4	275,3	233,6	255,2	173,4
A	529,9	542,0	570,6	564,5	564,3
E	605,7	633,0	651,6	654,7	651,6
A–E	–75,8	–91,0	–81,0	–90,2	–87,3
B	106,6	184,3	152,6	165,0	86,1
Albedo: R/G	0,707	0,611	0,593	0,539	0,615
Mittlere Bewölkung . .	$\frac{7}{10}$	$\frac{3}{10}$	$\frac{7}{10}$	$\frac{6}{10}$	$\frac{6}{10}$

In *Tab. 3* sind die entsprechenden mittleren Tagessummen der Strahlungsströme enthalten. Die Tagessumme der Globalstrahlung erreicht im Intervall vom 16.–30. Juni 1959 mit $708,2 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ erwartungsgemäß den Höchstwert, da diese Periode zudem durch geringe Bewölkung ausgezeichnet ist. Auch die kurzwellige Strahlungsbilanz, sowie die Gesamtstrahlungsbilanz erreichen in dieser Periode mit $275,3 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ bzw. $184,3 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ die Höchstwerte. Dieses Ergebnis ist nicht selbstverständlich, da die Albedo erst im Intervall vom 16.–31. Juli den niedrigsten Wert ($53,9 \%$) aufweist und dem Höchstwert der kurzwelligen Strahlungsbilanz der negativste Wert der langwelligen Strahlungsbilanz ($-91,0 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$) in derselben Periode gegenübersteht, was auf die geringe Bewölkung zurückzuführen ist. In keiner Periode erreicht die langwellige Ausstrahlung der Oberfläche (E) den für 0° C gültigen Wert von $660 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$. Mit $654,7 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ zeigt sie im Intervall vom 16. bis 31. Juli den höchsten Wert. Dieses Ergebnis kann im folgenden Sinn als Kontrolle für die Auswertung verstanden werden: Da die Oberfläche sich nicht durchwegs im schmelzenden Zustand befand, muß sich eine mittlere Oberflächentemperatur aus der langwelligen Ausstrahlung knapp unter 0° C ergeben. Tatsächlich entspricht der Wert $654,7 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ einer mittleren Oberflächentemperatur von $-0,7^\circ \text{ C}$. Im ersten Intervall vom 4.–15. Juni ist die langwellige Ausstrahlung (E) mit $605,7 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ entsprechend der tiefsten mittleren Oberflächentemperatur am niedrigsten. Der Wert $605,7 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ ergibt eine mittlere Oberflächentemperatur von etwa -5° C , während die mittlere Lufttemperatur in ca. 200 cm Höhe zum Vergleich $-2,7^\circ \text{ C}$ beträgt.

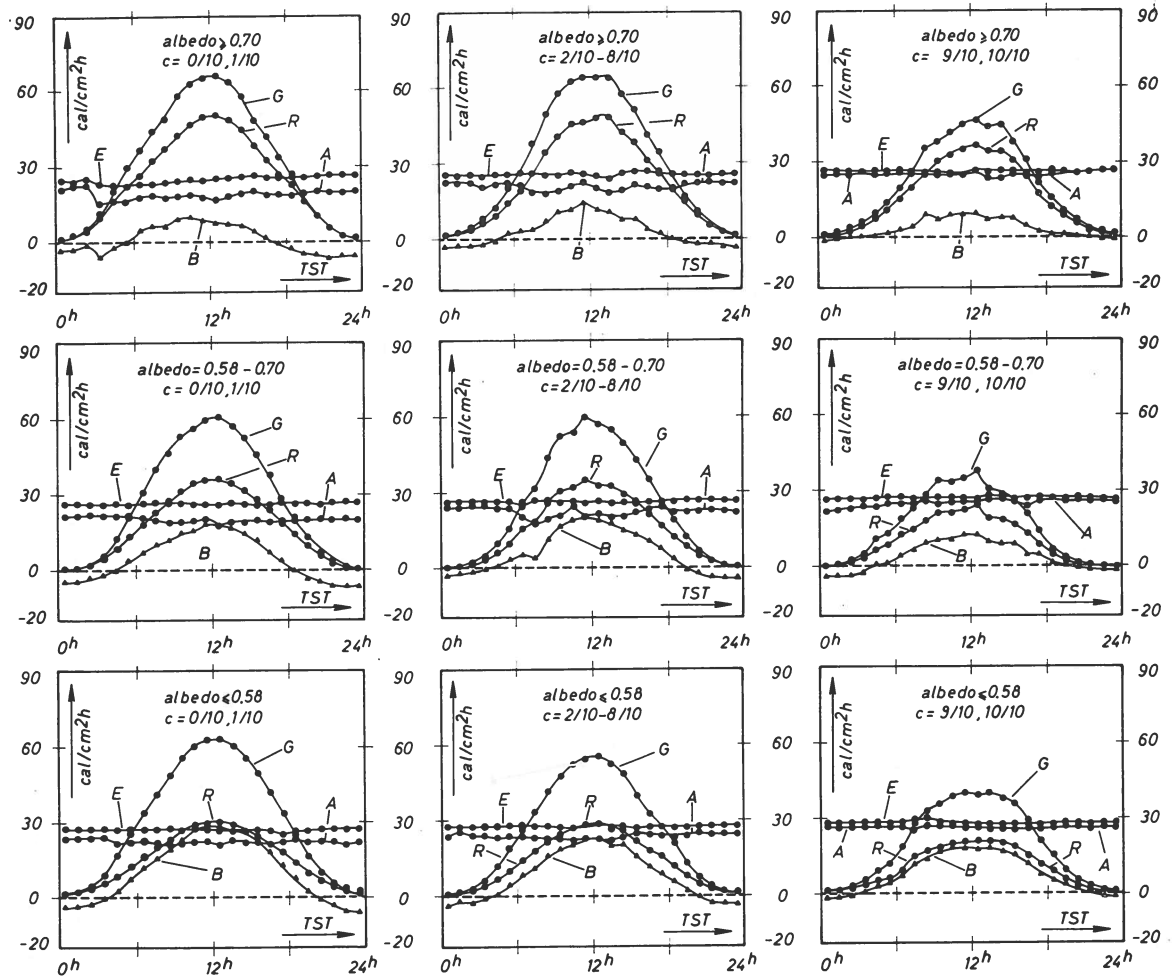


Abb. 3. Tageszeitlicher Gang der kurzwelligen Einstrahlung G (Globalstrahlung), der reflektierten kurzwelligen Strahlung R , der langwelligen Einstrahlung A (atmosphärische Gegenstrahlung), der langwelligen Ausstrahlung E und der Gesamtstrahlungsbilanz B mit der wahren Sonnenzeit (TST). Mittelbildung für drei Klassen der Albedo und der Bewölkung. c bedeutet die Bewölkung in Zehntel.

Es kann als Kontrolle der Auswertung ebenfalls festgestellt werden, daß die langwellige Strahlungsbilanz keinen deutlichen Tagesgang aufweist. Bereits bei geringen systematischen Fehlern in den Eichfaktoren für die kurzwellige Strahlung könnte nämlich ein Tagesgang der langwelligen Strahlungsbilanz vorgetäuscht werden. Es ist ferner bemerkenswert, daß etwa ein Drittel der Stunden eines Tagesablaufes negative Werte der Gesamtstrahlungsbilanz aufweisen. Dies gilt auch für Situationen mit vorwiegend Eisoberfläche.

Tab. 4.

Mittlere Tagessummen der Strahlungsströme (cal/cm² d), berechnet für drei Bewölkungs- und Albedoklassen für die Periode 4. Juni–8. August 1959. Die Tagessummen gelten für die in Abb. 3 gewählte Einteilung.

	Bew: $\frac{0}{10} \frac{1}{10}$	Bew: $\frac{2}{10} \frac{3}{10} \frac{4}{10} \frac{5}{10} \frac{6}{10} \frac{7}{10} \frac{8}{10}$	Bew: $\frac{9}{10} \frac{10}{10}$
Albedo $\geq 0,70$	G 766,1	G 723,7	G 500,6
	R 594,0	R 537,3	R 390,5
	G–R 172,1	G–R 186,4	G–R 110,1
	R/G 0,775	R/G 0,742	R/G 0,780
	A 454,1	A 501,1	A 596,2
	E 598,0	E 613,0	E 623,3
	A–E –143,9	A–E –111,9	A–E – 27,1
	B 28,2	B 74,5	B 83,0
	Anzahl der Tage: 3	Anzahl der Tage: 6	Anzahl der Tage: 8
$0,58 < \text{Albedo} < 0,70$	G 654,3	G 610,0	G 383,0
	R 402,9	R 368,1	R 245,8
	G–R 251,4	G–R 241,9	G–R 137,2
	R/G 0,616	R/G 0,603	R/G 0,642
	A 477,1	A 534,1	A 603,2
	E 626,7	E 632,0	E 655,2
	A–E –149,6	A–E – 97,9	A–E – 52,0
	B 101,8	B 144,0	B 85,2
	Anzahl der Tage: 5	Anzahl der Tage: 6	Anzahl der Tage: 4
Albedo $\leq 0,58$	G 727,4	G 594,8	G 446,2
	R 374,5	R 316,4	R 231,0
	G–R 352,9	G–R 278,4	G–R 215,2
	R/G 0,515	R/G 0,532	R/G 0,518
	A 540,2	A 559,4	A 618,0
	E 652,6	E 652,2	E 658,7
	A–E –112,4	A–E 92,8	A–E – 40,7
	B 240,5	B 185,6	B 174,8
	Anzahl der Tage: 10	Anzahl der Tage: 15	Anzahl der Tage: 8

1.4 Tageszeitlicher Gang der Strahlungsströme in Abhängigkeit von Albedo und Bewölkung

In der kurzen hochsommerlichen Ablationsperiode wird der Strahlungshaushalt weniger von der Veränderung der Sonnendeklination, sondern vielmehr von den jeweiligen Witterungsbedingungen beeinflusst. Aus diesem Grunde wurden Darstellungen für den Tagesgang der Strahlungskomponenten gewählt, die auf einer Einteilung nach Albedo und Bewölkung in folgender Weise beruht:

Albedoklassen: $\alpha \leq 58 \text{ ‰}$; $58 \text{ ‰} < \alpha < 70 \text{ ‰}$; $\alpha \geq 70 \text{ ‰}$
Bewölkungsklassen: $c \leq 1/10$; $1/10 < c < 9/10$; $c \geq 9/10$

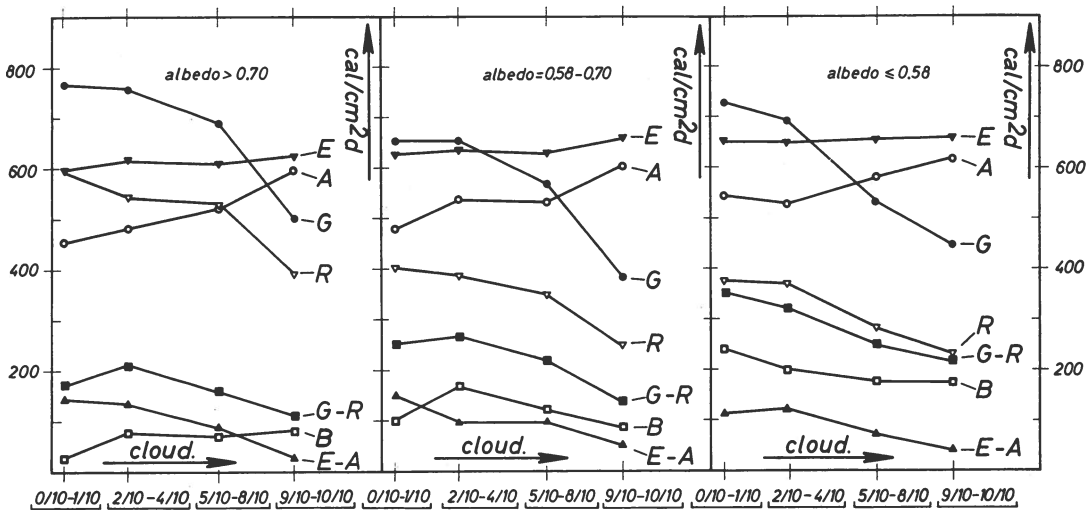


Abb. 4. Abhängigkeit der Strahlungsströme von der Bewölkung für drei Bereiche der Albedo. Es bedeuten E die langwellige Ausstrahlung, A die langwellige Einstrahlung (atmosphärische Gegenstrahlung), G die kurzwellige Einstrahlung (Globalstrahlung), R die reflektierte kurzwellige Strahlung, G-R die kurzwellige Strahlungsbilanz, A-E die langwellige Strahlungsbilanz* und B die Gesamtstrahlungsbilanz.

Abb. 3 zeigt den tageszeitlichen Verlauf der Strahlungsströme in Abhängigkeit von Albedo und Bewölkung. Die Albedo wurde dabei aus den Tagessummen der kurzwelligen Strahlungsströme und die Bewölkung als Mittel aus den drei Terminbeobachtungen berechnet. Tab. 4 enthält mittlere Tagessummen der Strahlungsströme für die in Abb. 3 gewählte Einteilung.

Am auffallendsten ist der Einfluß der Albedo auf die Gesamtstrahlungsbilanz bei geringer Bewölkung. Das Maximum zur Mittagszeit wird hier von $10 \text{ cal/cm}^2 \text{ h}$ auf $30 \text{ cal/cm}^2 \text{ h}$ verschoben, wobei die Tagessumme der Gesamtstrahlungsbilanz von $28,2 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ auf $240,5 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ ansteigt (Tab. 4). Bei starker Bewölkung hingegen steigt die Tagessumme der Gesamtstrahlungsbilanz nur von $83,0 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ auf $174,8 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ an. Der Einfluß der Bewölkung ist auf die kurzwellige Einstrahlung und die langwellige Strahlungsbilanz am stärksten ausgeprägt.

1.5 Tagessummen der Strahlungsströme in Abhängigkeit von Albedo und Bewölkung

Die Tagessummen der Strahlungsströme in Abhängigkeit von Albedo und Bewölkung wurden in Abb. 4 dargestellt, wobei folgende Klassen gewählt wurden:

* Aus zeichentechnischen Gründen wurde E-A anstatt A-E dargestellt.

Tab. 5.

Mittlere Tagessummen der Strahlungsströme (cal/cm² d), berechnet für vier Bewölkungs- und drei Albedoklassen für die Periode 4. Juni–8. August 1959.

Bewölkung	0 1 10 10	2 3 4 10 10 10	5 6 7 8 10 10 10 10	9 10 10 10
Albedo				
$\alpha \geq 0,70$				
G.....	766,1	756,9	689,4	500,6
R.....	594,0	543,0	530,3	390,5
G–R.....	172,1	213,9	159,1	110,1
A.....	454,1	480,3	520,7	596,2
E.....	598,0	616,0	608,6	623,3
A–E.....	–143,9	–135,7	– 87,9	– 27,1
B.....	28,2	78,2	70,5	83,0
Albedo				
$0,58 < \alpha < 0,70$				
G.....	654,3	652,9	566,6	383,0
R.....	402,9	387,6	347,2	245,8
G–R.....	251,4	265,3	219,4	137,2
A.....	477,1	535,9	531,2	603,2
E.....	626,7	633,7	629,0	655,2
A–E.....	–149,6	– 97,8	– 97,8	– 52,0
B.....	101,8	167,5	121,6	85,2
Albedo				
$\alpha \leq 0,58$				
G.....	727,4	691,4	530,3	446,2
R.....	374,5	369,2	281,2	231,0
G–R.....	352,9	322,2	249,1	215,2
A.....	540,2	526,2	581,4	618,0
E.....	652,6	647,7	655,3	658,7
A–E.....	–112,4	–121,5	– 73,9	– 40,7
B.....	240,5	200,7	176,2	174,8

$c = 0/10, 1/10; \quad c = 2/10, 3/10, 4/10; \quad c = 5/10, 6/10, 7/10, 8/10;$
 $c = 9/10, 10/10$
 $\alpha \leq 58 \text{ ‰}; \quad 58 \text{ ‰} < \alpha < 70 \text{ ‰}; \quad \alpha \geq 70 \text{ ‰}$

Auf eine feinere Einteilung der Bewölkung mußte verzichtet werden, um für die verschiedenen Albedoklassen genügend Fälle zu erhalten. Es zeigen sich folgende typische Ergebnisse:

Die Gesamtstrahlungsbilanz zeigt in verschiedenen Albedoklassen einen grundsätzlich verschiedenen Verlauf mit der Bewölkung. Bei geringer Albedo ($\alpha \leq 58 \text{ ‰}$) nimmt die Gesamtstrahlungsbilanz mit der Bewölkung ab, während bei hoher Albedo ($\alpha \geq 70 \text{ ‰}$) eine geringe Zunahme in Erscheinung tritt. Da die langwellige Strahlungsbilanz in beiden Albedo-Klassen etwa denselben Verlauf mit der Bewölkung aufweist,

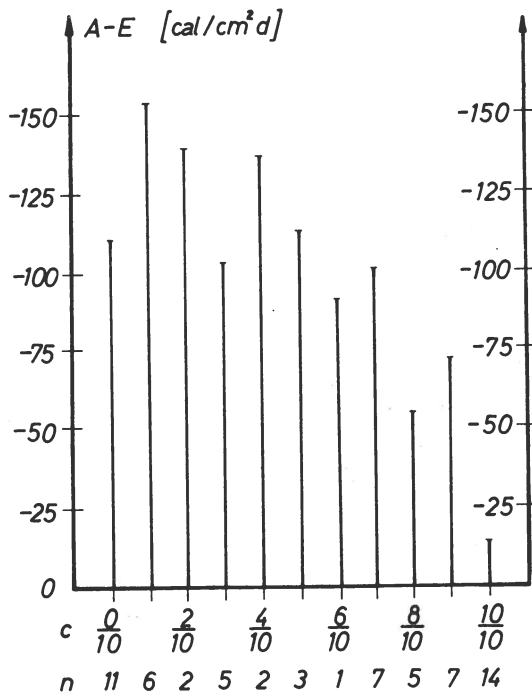


Abb. 5. Langwellige Strahlungsbilanz (A-E) gegen Bewölkung (c). n gibt die Anzahl der Tage.

ist die Ursache des verschiedenartigen Verlaufes im Gang der kurzwelligen Strahlungsbilanz mit der Bewölkung zu suchen. Tatsächlich verlaufen die Kurven der kurzwelligen Strahlungsbilanz in verschiedenen Albedo-Klassen etwa parallel verschoben. Das bei geringer Bewölkung auftretende Maximum von G-R in den Fällen $\alpha > 58\%$ (Schneebedeckung) kann in dieser Darstellung nicht als gesichert gelten. Derselbe Trend der Zunahme der Gesamtstrahlungsbilanz mit der Bewölkung bei Schneebedeckung zeigt sich bei Meßserien im Akkumulationsgebiet (W. AMBACH, 1974).

Aus Tab. 5 geht hervor, daß bei einer Zunahme der Bewölkung vom Bereich 0/10 – 1/10 auf den Bereich 9/10 – 10/10 die langwellige Strahlungsbilanz im Mittel über die drei Albedoklassen um $99 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ zunimmt, wobei diese Änderung auf die Erhöhung der atmosphärischen Gegenstrahlung zurückzuführen ist. Dieser Zunahme der langwelligen Strahlungsbilanz von $99 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ steht bei schneebedeckter Oberfläche (Albedo $\geq 70\%$) eine Abnahme der kurzwelligen Strahlungsbilanz von $62 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ gegenüber, so daß bei Schneebedeckung eine Zunahme der Gesamtstrahlungsbilanz mit zunehmender Bewölkung resultiert. Bei einer Eisoberfläche (Albedo $\leq 58\%$) ist die Situation umgekehrt. Der Zu-

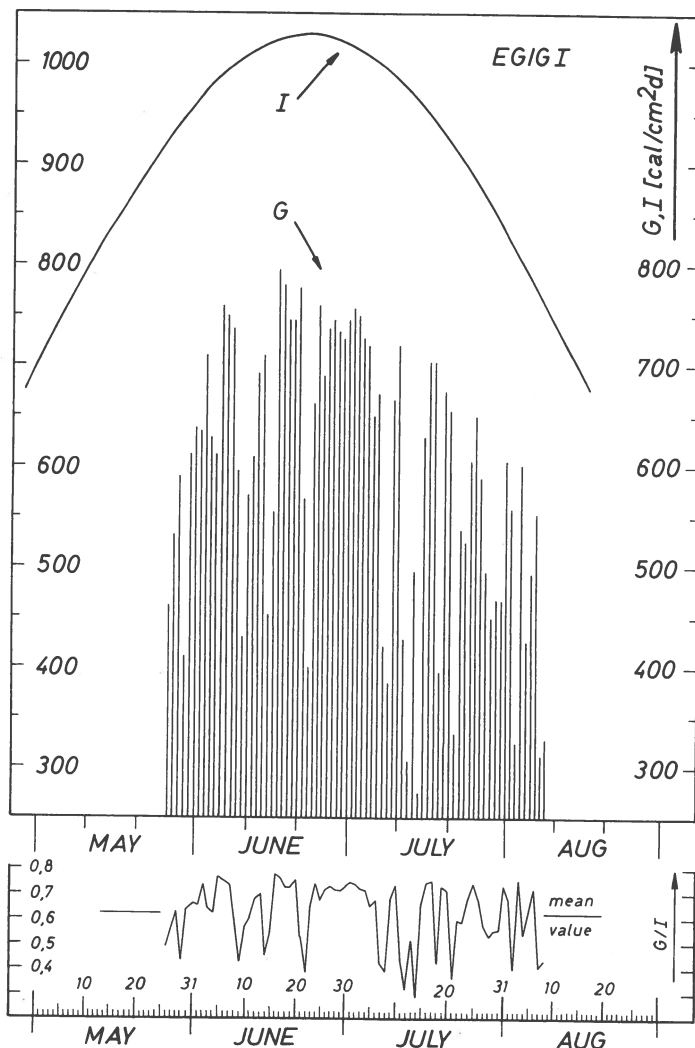


Abb. 6. Die extraterrestrische kurzwellige Einstrahlung (I) und die Globalstrahlung (G), sowie das Verhältnis G/I als Zeitfunktion.

nahme der langwelligen Strahlungsbilanz von $99 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ steht eine Abnahme der kurzwelligen Strahlungsbilanz von $138 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ gegenüber, so daß hier der umgekehrte Effekt auftritt. Die Zunahme der langwelligen Strahlungsbilanz mit der Bewölkung wird hier durch die Abnahme der kurzwelligen Strahlungsbilanz überkompensiert. Im ersten Fall (Albedo $\geq 70\%$) resultiert eine Zunahme der Gesamtstrahlungsbilanz von $37 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$, im zweiten Fall (Albedo $\leq 58\%$) eine Abnahme der Gesamtstrahlungsbilanz von $39 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$, wenn sich die Bewölkung von 0/10 bis 10/10 ändert. Auch aus diesen Zahlen ist der unterschied-

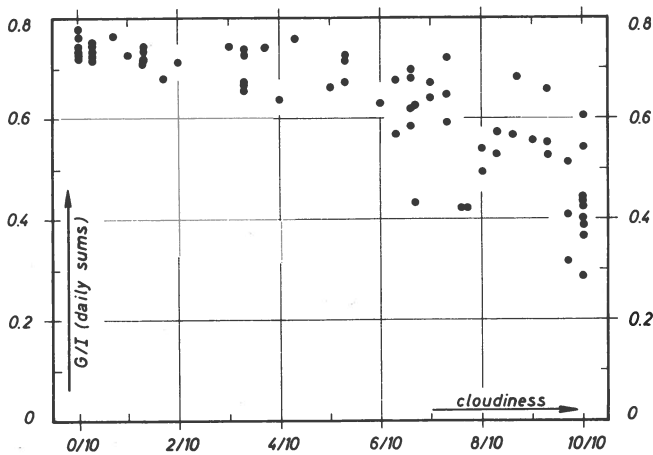


Abb. 7. Das Verhältnis Globalstrahlung (G) zur extraterrestrischen kurzwelligen Einstrahlung (I) in Abhängigkeit von der Bewölkung.

liche Einfluß der Bewölkung auf die Gesamtstrahlungsbilanz in Abhängigkeit von der Albedo ersichtlich.

1.6 Langwellige Strahlungsbilanz und Bewölkung

Die Abhängigkeit der langwelligen Strahlungsbilanz von der Bewölkung ist in Abb. 5 gegeben. Grundlage dieses Diagramms sind die dreimal täglich durchgeführten Bewölkungsbeobachtungen (7^h, 14^h, 21^h MOZ) und die Tagessummen der langwelligen Strahlungsbilanz. Die Einteilung der Bewölkung erfolgte in Zehntel. Da die Angabe der mittleren Bewölkung für einen Tag aus drei Beobachtungen unzureichend ist, kann dieser Zusammenhang nur als Ergänzung zu der im Akkumulationsgebiet gemessenen Serie dienen, wobei sich zwischen beiden Serien gute Übereinstimmung zeigt. Der Verlauf deutet darauf hin, daß eine parabelartige Funktion den Zusammenhang besser wiedergibt als eine lineare Funktion. Für die langwellige Strahlungsbilanz ergibt sich bei Bewölkung 0/10 der Wert $-130 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ ($-5,5 \text{ cal/cm}^2 \text{ h}$) bei 10/10 der Wert $-24 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ ($-1,0 \text{ cal/cm}^2 \text{ h}$).

1.7 Kurzwellige Einstrahlung und Bewölkung

Die extraterrestrische kurzwellige Einstrahlung (I), die Globalstrahlung (G), sowie die Verhältniszahl G/I sind in Abb. 6 als Zeitfunktion dargestellt. Zufolge des Bewölkungseinflusses variiert G/I zwischen den Werten 0,28 und 0,78 (Mittelwert 0,62). Die Abhängigkeit der Verhältniszahl G/I von der Bewölkung zeigt Abb. 7. Bei einer Bewölkung von 0/10 ist die Verhältniszahl etwa 0,75, bei 10/10 etwa 0,42. Wegen der

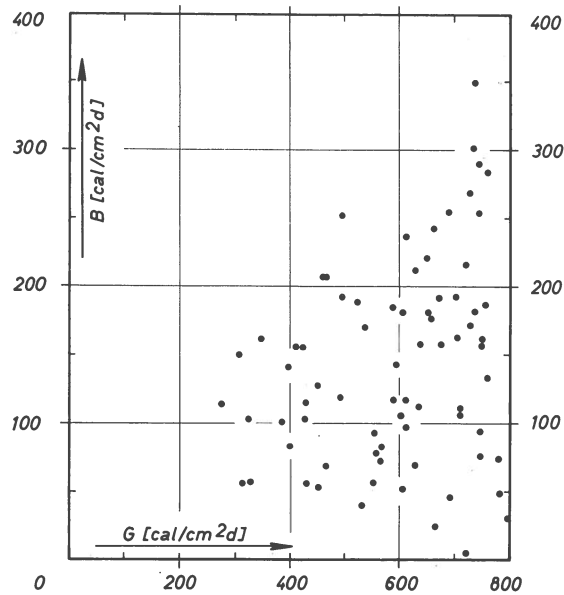


Abb. 8. Tagessummen der Gesamtstrahlungsbilanz (B) gegen kurzwellige Einstrahlung (G).

stark unterschiedlichen Durchlässigkeit der Wolken für die kurzwellige Strahlung ergibt sich besonders bei Bewölkung größer als 5/10 eine starke Streuung der Meßpunkte. Die Strahlungsströme wurden als Tagessummen, die Bewölkung als Mittelwert aus täglich 3 Beobachtungen in Beziehung gesetzt.

1.8 Beziehungen zwischen den Strahlungsströmen

Die komplexe Struktur der Gesamtstrahlungsbilanz im Ablationsgebiet ist in der Hauptsache vom Wertebereich in der Albedo bestimmt. Im Falle des Ablationsgebietes ist dieser Wertebereich sehr groß (28 % bis 90 %). Die Tatsache, daß Höchstwerte der Gesamtstrahlungsbilanz bei Höchstwerten der Globalstrahlung auftreten, ist auf den dominierenden Anteil der kurzwelligen Strahlungsbilanz bei niedriger Albedo begründet. Umgekehrt ergeben Höchstwerte der Globalstrahlung nicht unbedingt Höchstwerte der Gesamtstrahlungsbilanz, da bei hoher Albedo der Anteil der kurzwelligen Strahlungsbilanz gering ist. Wegen des großen Variationsbereiches der Albedo ist zwischen der Gesamtstrahlungsbilanz und der Globalstrahlung keine Korrelation feststellbar (Abb. 8); aus demselben Grund zeigt sich auch keine Korrelation zwischen der Gesamtstrahlungsbilanz und der langwelligen Einstrahlung (Abb. 9).

Da sowohl die Gesamtstrahlungsbilanz als auch die kurzwellige Bilanz durch die Albedo beeinflusst wird, zeigt sich eine positive Kor-

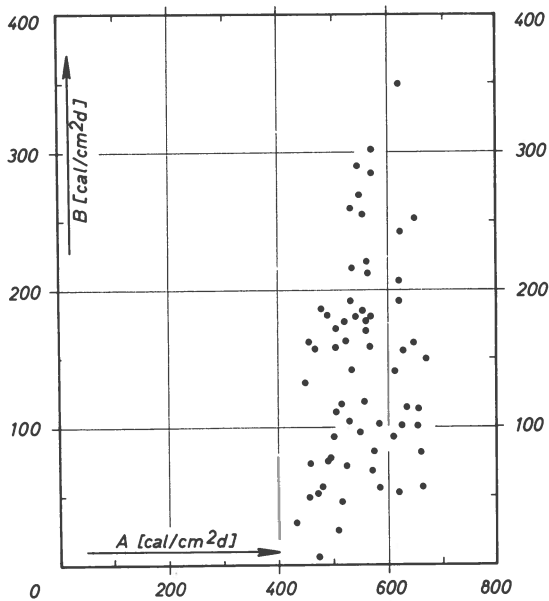


Abb. 9. Tagessummen der Gesamtstrahlungsbilanz (B) gegen langwellige Einstrahlung A.

relation zwischen beiden Größen (Abb. 10). Höchstwerte der Gesamtstrahlungsbilanz decken sich mit den Höchstwerten der kurzwelligen Strahlungsbilanz, die bei niedriger Albedo und hohen Werten der Globalstrahlung auftreten. Die langwellige Einstrahlung zeigt dagegen keinen klaren Zusammenhang mit der Gesamtstrahlungsbilanz (Abb. 10). Die Beziehung zwischen langwelliger und kurzwelliger Strahlungsbilanz kann wegen des Einflusses der stark wechselnden Albedo, die sich nur auf die kurzwellige Strahlungsbilanz auswirkt, nicht einfach sein (Abb. 11). Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zu der im Akkumulationsgebiet gewonnenen Meßreihe (W. AMBACH, 1974), wo eine gute Korrelation zwischen kurz- und langwelliger Strahlungsbilanz gefunden wurde. Einer Abnahme der kurzwelligen Strahlungsbilanz um $100 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ durch Bewölkungszunahme steht eine Zunahme der langwelligen Strahlungsbilanz um $150 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ gegenüber. Dieses Ergebnis ist nur aufgrund der hohen Albedo (Mittelwert 84%) und ihrer geringen zeitlichen Variation verständlich.

1.9 Häufigkeitsverteilung für Werte der Strahlungsströme

Häufigkeitsverteilungen der Gesamtstrahlungsbilanz, der Globalstrahlung und der langwelligen Strahlungsbilanz wurden für Tagessummen, 5-tägige und 15-tägige Mittelwerte dargestellt (Abb. 12, 13, 14).

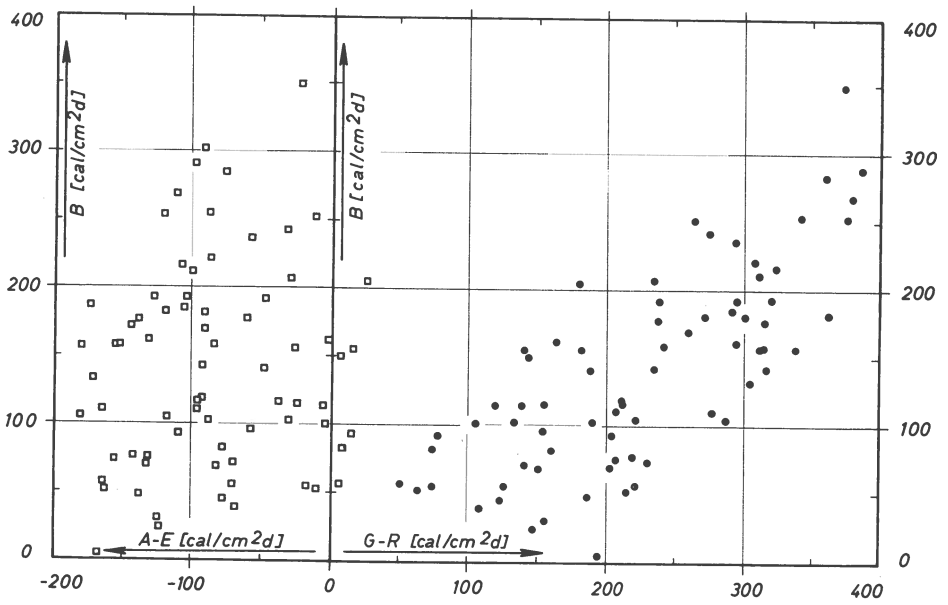


Abb. 10. Tagessummen der Gesamtstrahlungsbilanz (B) gegen kurz- und langwellige Strahlungsbilanz (G-R, A-E).

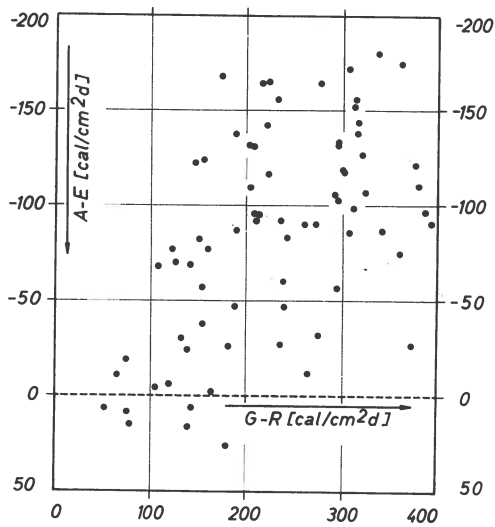


Abb. 11. Tagessummen der langwelligen Strahlungsbilanz (A-E) gegen kurzwellige Strahlungsbilanz (G-R).

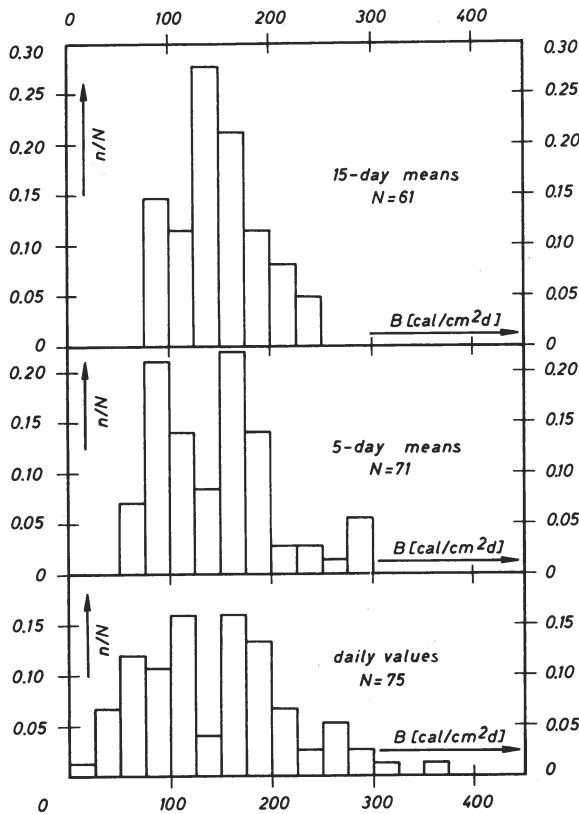


Abb. 12. Häufigkeitsverteilung von Mittelwerten der Gesamtstrahlungsbilanz B.

Die 5-tägigen und 15-tägigen Mittel wurden dabei in kontinuierlich überlappenden Folgen gewonnen*.

Aus den Histogrammen können Streubreite und häufigste Werte abgelesen werden.

1.10 Ein "Strahlungsparadoxon" für Oberflächen mit hoher Albedo

Die Tatsache, daß bei hoher Albedo auch im Hochsommer die Tagessummen der Gesamtstrahlungsbilanz mit der Bewölkung zunehmen, ist auf den dominierenden Einfluß der langwelligen Strahlungsbilanz zurückzuführen. Die Gültigkeit dieses Ergebnisses für den Hochsommer bei Höchstwerten der kurzwelligen Einstrahlung ist bereits früher als »Paradoxon« formuliert worden (W. AMBACH, 1974). Eine numerische Fassung

* Bei einer Folge der Tagessummen $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \dots$ wurde für die 5-tägigen Mittel der erste Wert aus x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 und der zweite Wert aus x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 , berechnet. Analog wurde beim 15-tägigen Mittel vorgegangen.

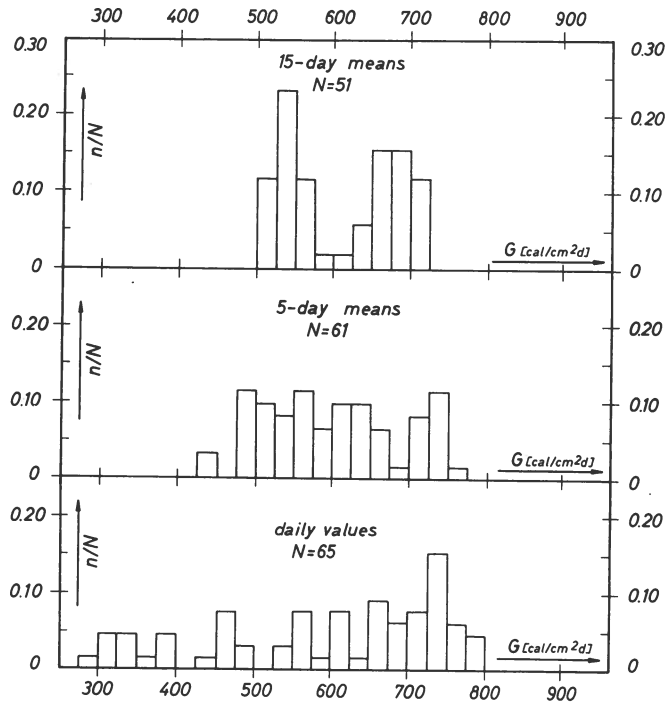


Abb. 13. Häufigkeitsverteilung von Mittelwerten der kurzwelligen Einstrahlung G (Globalstrahlung).

kann näherungsweise in folgender Form gegeben werden: Für die Gesamtstrahlungsbilanz gilt mit $G = I k$

$$B = I k(1 - \alpha) + (A - E)$$

darin bedeuten I die extraterrestrische kurzwellige Einstrahlung, k die Verhältniszahl G/I (G =Globalstrahlung), α die Albedo und $A-E$ die langwellige Strahlungsbilanz. $A-E$ und k können aus Abb. 5 und Abb. 7 in linearer Näherung als Funktion der Bewölkung entnommen werden:

$$k = (0,78 - 0,50 c) \quad \text{und} \quad (A-E) = -144 (1 - 0,75 c) \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$$

darin ist c die Bewölkung in Zehntel.

Man erhält somit:

$$B = I(1 - \alpha) \cdot (0,78 - 0,50 c) - 144 (1 - 0,75 c) \text{ cal/cm}^2 \text{ d} \quad \text{und}$$

$$\frac{dB}{dc} = -I(1 - \alpha) \cdot 0,50 + 144 \cdot 0,75 \text{ cal/cm}^2 \text{ d pro Zehntel Bewölkung.}$$

Für $\frac{dB}{dc} > 0$ ist das »Paradoxon« erfüllt. Die Gesamtstrahlungsbilanz nimmt in diesem Fall mit der Bewölkung zu.

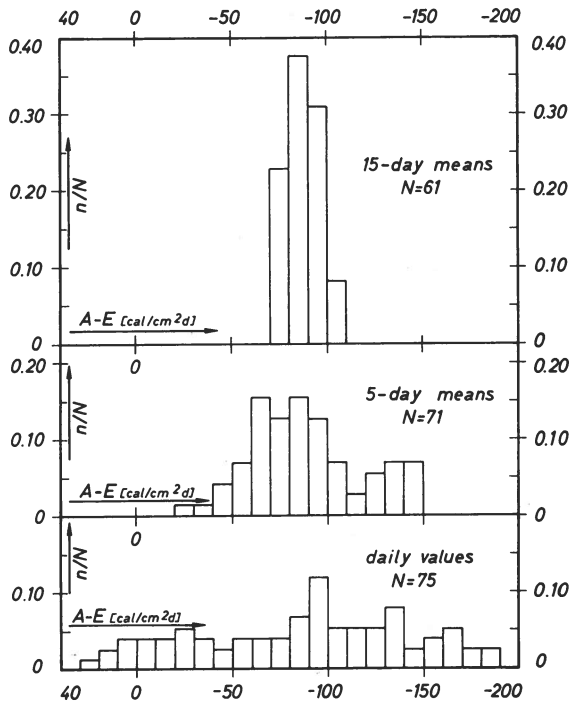


Abb. 14. Häufigkeitsverteilung von Mittelwerten der langwelligen Strahlungsbilanz ($A-E$).

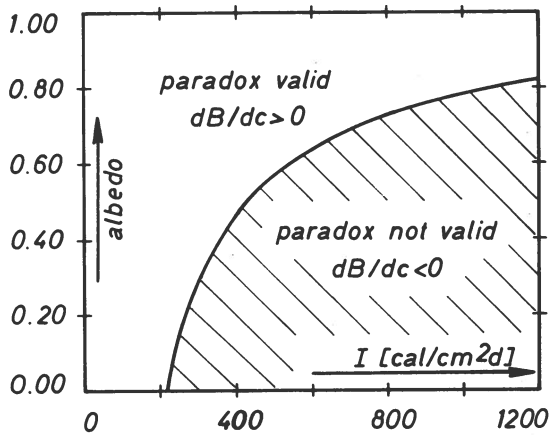


Abb. 15. Darstellung des Gültigkeitsbereiches des »Strahlungsparadoxons« in Abhängigkeit der extraterrestrischen kurzwelligen Einstrahlung (I) und der Albedo.

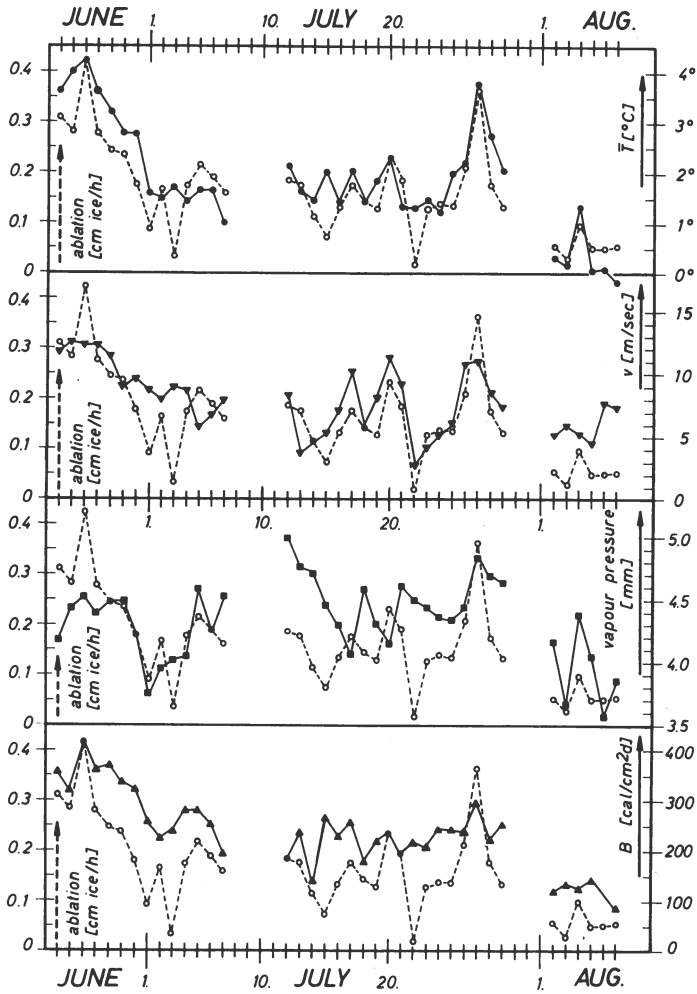


Abb. 16. Gegenüberstellung von Tagesmittelwerten der Eisablation und der Klimaelemente.

Als Grenzbedingung für das »Paradoxon« erhält man aus $\frac{dB}{dc} = 0$:

$$I \cdot (1 - \alpha) = 216 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$$

Mit $I = 1000 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ erhält man daraus $\alpha = 78\%$; für $\alpha > 78\%$ ist somit in diesem Fall das »Paradoxon« erfüllt. Die Bedingung $I(1 - \alpha) = 216$ ist in Abb. 15 graphisch dargestellt.

2. ABLATION UND MIKROKLIMA

2.1 Zeitlicher Verlauf von Ablation und Klimaelementen

Die Tageswerte der Eisablation (W. AMBACH, 1963, Tab. 58, S. 301) wurden in vier Diagrammen als Zeitfunktion im Vergleich mit folgenden Klimaelementen dargestellt (*Abb. 16*):

- a) Mit dem Verlauf des 24-stündigen Mittelwertes der Lufttemperatur in 187 cm Höhe (Mittel von 0^h–24^h).
- b) Mit der mittleren Windgeschwindigkeit in 315 cm Höhe (Mittel von 21^h–21^h).
- c) Mit dem 24-stündigen Mittelwert des Dampfdruckes in 187 cm Höhe (Mittel von 0^h–24^h).
- d) Mit der Tagessumme der Gesamtstrahlungsbilanz (0^h–24^h).

Diskussion:

Die relativen Ablationsmaxima und -minima hängen eng mit dem Verlauf der Elemente des Mikroklimas zusammen:

Die erste Ablationsspitze (26. Juni 1959) fällt mit dem absoluten Maximum der Tagesmitteltemperatur, dem größten Tagesmittel der Windgeschwindigkeit, sowie mit der absolut höchsten Tagessumme der Gesamtstrahlungsbilanz zusammen. Außerdem ist der Dampfdruck nahe dem Sättigungsdruck für schmelzende Oberfläche (4,58 mm), so daß praktisch keine Energie zur Verdunstung verbraucht werden kann.

Das doppelte Ablationsminimum vom 1. und 3. Juli 1959 ist durch die niedrigsten Dampfdruckwerte der Periode bei überdurchschnittlich hohen Windgeschwindigkeiten verbunden, so daß ein stark negativer latenter Wärmestrom ablationshemmend wirksam sein kann.

In der Periode vom 12.–29. Juli 1959 geht die Ablation konphas mit der Windgeschwindigkeit, wobei das Ablationsmaximum vom 27. Juli 1959 außerdem mit einem Temperaturmaximum und einem Dampfdruckmaximum koinzidiert. Durch große Windgeschwindigkeiten und hohen Dampfdruck wirkt ein stark positiver latenter Wärmestrom ablationsfördernd.

Die niedrigen Ablationswerte in der letzten Periode (2.–7. August 1959) entsprechen den niedrigen Werten von Temperatur, Windgeschwindigkeit, Dampfdruck und Gesamtstrahlungsbilanz. Außerdem wird das eingelagerte relative Ablationsmaximum durch Temperatur- und Dampfdruckverlauf gestützt.

Die Darstellungen der Ablation gegen Lufttemperatur, sowie gegen Windgeschwindigkeit (*Abb. 17*) zeigen wegen des überaus komplexen

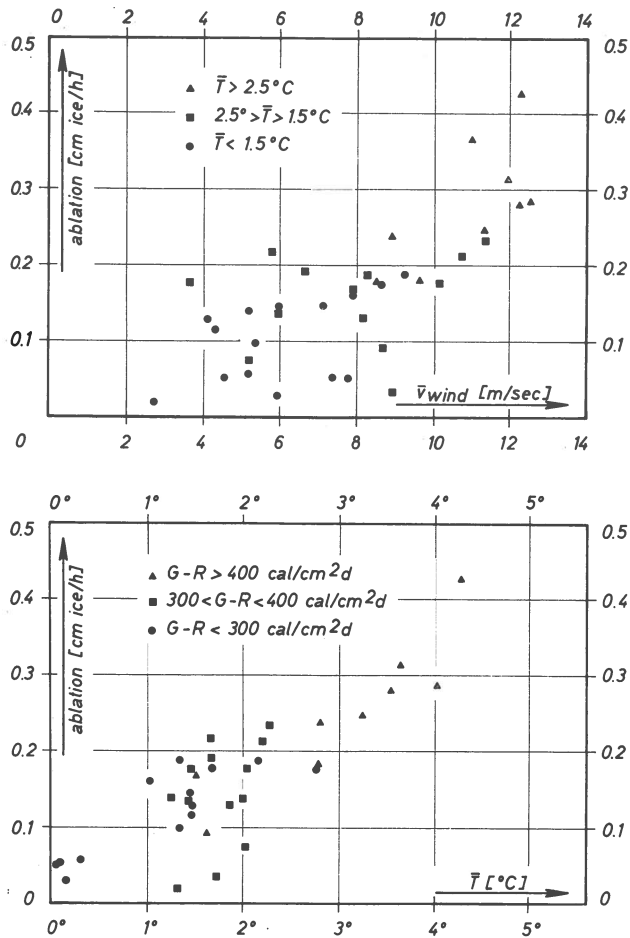


Abb. 17. Tagesmittelwerte der Eisablation gegen Windgeschwindigkeit für verschiedene Wertebereiche der Lufttemperatur sowie Tagesmittelwerte der Eisablation gegen Lufttemperatur für verschiedene Wertebereiche der kurzwelligen Strahlungsbilanz.

Zusammenhangs große Streuung der Meßpunkte. Trotzdem ist ein Trend zu hohen Ablationswerten bei hohen Temperaturen und Windgeschwindigkeiten zu sehen. Dies bedeutet, daß während der Ablationsperiode auch eine Korrelation zwischen Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit in dem Sinne besteht, daß hohe Temperaturen bei hohen Windgeschwindigkeiten auftreten (Abb. 18). Diese Feststellung kann jedoch nicht verallgemeinert werden. Im Wärmehaushalt wird zwar die Schmelzenenergie mit 91 % vom Strahlungshaushalt bestritten, jedoch wird der zeitliche Verlauf der Ablationswerte vorwiegend von den Werten der Windgeschwindigkeit, der Lufttemperatur und des Dampfdruckes moduliert.

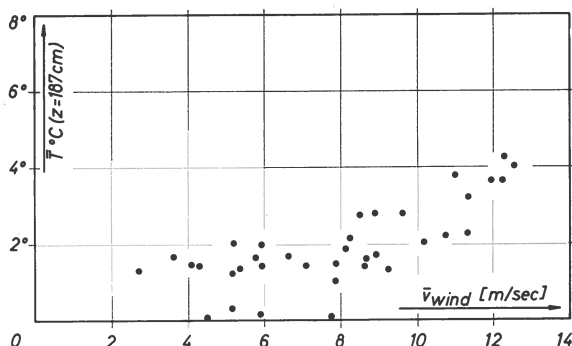


Abb. 18. Tagesmittelwerte der Lufttemperatur gegen Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit für Tage mit Ablation.

Zur Beurteilung der Länge der Ablationsperiode wurde in Abb. 19 der zeitliche Verlauf der Lufttemperatur in Jakobshavn für das Jahr 1959 mit jenem während der Feldarbeit in Camp IV-EGIG verglichen. Die erste geringe Schneeschmelze in Camp IV-EGIG wurde Ende Mai festgestellt. Allerdings ergab sich wegen der praktisch geschlossenen Schneedecke und der damit verbundenen hohen Albedo kein wesentlicher Abbau der Schneedecke. Die Mitteltemperatur in Jakobshavn steigt in dieser Zeit über $+10^{\circ}\text{C}$. Die folgende Periode bis 23. Juni 1959 bleibt noch in Camp IV-EGIG ohne wesentlichen Schmelzwasserabfluß. Erst am 23. Juni 1959 kommt der Abfluß von Schmelzwasser voll in Gang, wobei in Jakobshavn ein erheblicher Temperaturanstieg bis 18°C zu verzeichnen ist. Der nun einsetzende Abbau der Schneedecke im Ablationsgebiet bewirkt eine Verminderung der Albedo, so daß zufolge der besser wirksamen kurzwelligen Strahlung nun bereits Eisablation bei Temperaturen in Jakobshavn von über 6°C eintreten kann.

Eine Diskussion des Höhentemperaturgradienten soll hier nicht ausführlich erfolgen, da die Temperaturangaben in Jakobshavn zu wenig homogen sind und außerdem erhebliche Erwärmungseffekte durch Advektion in Jakobshavn erwartet werden müssen. So beträgt der Temperaturunterschied am 26. Juni zwischen beiden Stationen (Höhendifferenz 960 m) $13,8^{\circ}\text{C}$. Die an der Westflanke des Inlandeises abfließende Luft strömt über das aufgeheizte, apere Küstengelände, wobei eine zusätzliche Erwärmung erfolgen kann. Für die gesamte Vergleichsperiode (26. Mai bis 8. August 1959) ergibt sich aus beiden Stationen eine mittlere Temperaturdifferenz von $7,0^{\circ}\text{C}$, woraus ein Höhentemperaturgradient von $0,73^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ resultiert. Dieser Höhengradient dürfte allerdings im Gebiet mit schmelzender Eisoberfläche nicht allgemeine Gültigkeit haben.

Aus dem Temperaturverlauf in Jakobshavn ist ferner zu entnehmen, daß während des Sommers 1959 mit der Feldarbeit die wesentliche Ablationsperiode erfaßt worden ist. Kurzdauernde Temperaturspitzen in

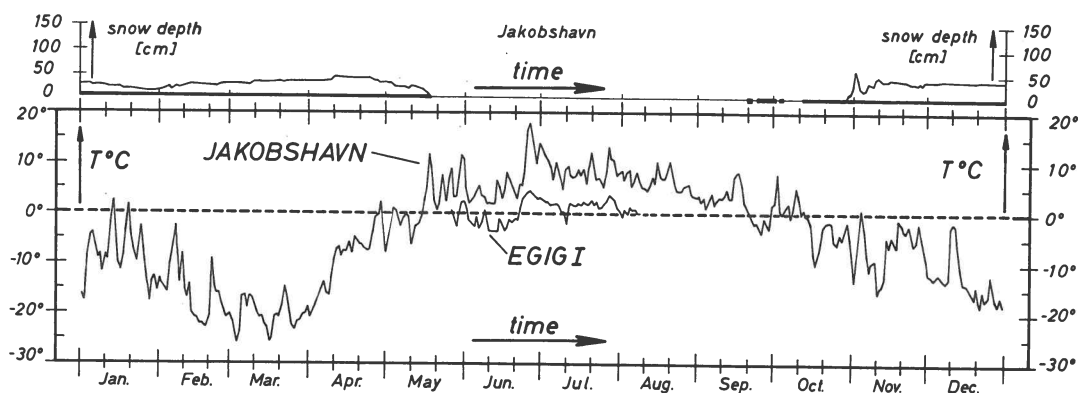


Abb. 19. Tagesmitteltemperatur an der Küstenstation Jakobshavn und an der Station Camp IV-EGIG, sowie Tiefe der Schneedecke in Jakobshavn für 1959.

der ersten Hälfte des Monats Mai können nur im tiefstgelegenen Bereich des Ablationsgebietes nennenswerte Schmelzung bewirken. Nach Mitte August bleiben kurzdauernde Temperaturspitzen ebenfalls unwirksam, vor allem wegen der bereits reduzierten Einstrahlung und der nächtlichen Abkühlung durch Ausstrahlung. Die nächtlich abgekühlte Oberfläche kann durch verminderte Einstrahlung bei Tag nur langsam wieder erwärmt werden.

2.2 Ablation und Mittelwerte von Klimaelementen

Im vorliegenden Abschnitt werden für Tage mit Eisablation die Mittelwerte von Windgeschwindigkeit, Dampfdruck und Lufttemperatur angegeben, wobei die Einteilung der Ablationstage in Klassen nach dem Ablationsbetrag erfolgt. Die täglichen Werte der Eisablation sind bei W. AMBACH, 1963 (Tab. 58, S. 301) angegeben und der zeitliche Verlauf in Abb. 16 im Zusammenhang mit den erwähnten Mittelwerten von Klimaelementen dargestellt und diskutiert.

Die Einteilung wurde nach folgenden drei Klassen der Eisablation erstellt:

Klasse 1: $0 \leq \text{Ablation} \leq 2,4 \text{ cm Eis/d}$

Klasse 2: $2,4 < \text{Ablation} \leq 4,8 \text{ cm Eis/d}$

Klasse 3: $\text{Ablation} > 4,8 \text{ cm Eis/d}$

Tab. 6 enthält für die drei Klassen den jeweiligen Mittelwert der Eisablation, der Gesamtstrahlungsbilanz, der Lufttemperatur und des Dampfdruckes in 187 cm Höhe, der Geschwindigkeit in 191 cm Höhe, sowie den Betrag der Eisermärmung. Ferner ist die Anzahl der Ablationstage in den einzelnen Klassen angegeben.

Tab. 6.

Mittelwerte der Ablation (\bar{h}), Gesamtstrahlungsbilanz (\bar{B}), Lufttemperatur in 187 cm Höhe (\bar{T}), Windgeschwindigkeit in 191 cm Höhe (\bar{u}), des Dampfdruckes in 187 cm Höhe (\bar{e}) und der Eiserwärmung (\bar{Q}_w) für drei Ablationsklassen.

	\bar{h} cm Eis/d	\bar{B} cal/cm ² d	\bar{T} °C	\bar{u} m/sec	\bar{e} mm	\bar{Q}_w cal/cm ² d	Anzahl Tage
Ablationsklasse 1 $0 \leq h \leq 2,4$ cm Eis/d	1,3	166,6	+0,85	6,4	4,04	20,1	10
Ablationsklasse 2 $2,4 < h \leq 4,8$ cm Eis/d	3,8	226,6	+1,74	6,42	4,43	25,1	18
Ablationsklasse 3 $4,8 < h$ cm Eis/d	6,7	320,1	+3,15	10,0	4,45	25,0	10

Tab. 7.

Relativer Energiehaushalt für drei Ablationsklassen. Es bedeuten Q_A die Schmelzenergie, Q_W die Energie der Eiserwärmung, Q_B die Gesamtstrahlungsbilanz und Q_{F+L} den fühlbaren und latenten Wärmestrom.

Ablationsklasse 1				
$0 \leq h \leq 2,4 \text{ cm Eis/d}$				
Energieüberschuß:	$Q_B = 98 \%$	$\left. \vphantom{\begin{matrix} Q_B \\ Q_{F+L} \end{matrix}} \right\}$	100%	$\left\{ \begin{array}{l} Q_A = 88 \% \\ Q_W = 12 \% \end{array} \right.$
$Q_A + Q_W = 169,5 \text{ cal/cm}^2\text{d}$ $= 100 \%$	$Q_{F+L} = 2 \%$			
Ablationsklasse 2				
$2,4 < h \leq 4,8 \text{ cm Eis/d}$				
Energieüberschuß:	$Q_B = 84 \%$	$\left. \vphantom{\begin{matrix} Q_B \\ Q_{F+L} \end{matrix}} \right\}$	100%	$\left\{ \begin{array}{l} Q_A = 91 \% \\ Q_W = 9 \% \end{array} \right.$
$Q_A + Q_W = 269,9 \text{ cal/cm}^2\text{d}$ $= 100 \%$	$Q_{F+L} = 16 \%$			
Ablationsklasse 3				
$4,8 < h \text{ cm Eis/d}$				
Energieüberschuß:	$Q_B = 77 \%$	$\left. \vphantom{\begin{matrix} Q_B \\ Q_{F+L} \end{matrix}} \right\}$	100%	$\left\{ \begin{array}{l} Q_A = 94 \% \\ Q_W = 6 \% \end{array} \right.$
$Q_A + Q_W = 416,3 \text{ cal/cm}^2\text{d}$ $= 100 \%$	$Q_{F+L} = 23 \%$			

Mit zunehmender Ablation steigt die Gesamtstrahlungsbilanz erheblich an (Klasse 1: 166,6; Klasse 2: 226,0; Klasse 3: 320,1 cal/cm² d). Der gleiche Trend ist bei der Lufttemperatur festzustellen, dessen Mittelwert in den einzelnen Ablationsklassen der Reihe nach: 0,85° C, 1,74° C, 3,15° C beträgt. Bei der Windgeschwindigkeit tritt der größte Wert in der Ablationsklasse 3 auf. Der Dampfdruck und der Betrag der Eiserwärmung Q_w zeigen keinen systematischen Trend in den drei Ablationsklassen.

In der Übersicht (Tab. 6) sind alle Tage mit Eisablation zusammengefaßt, wobei jedoch ein Ablationstag mehrere Stunden gefrorene Oberfläche aufweisen kann.

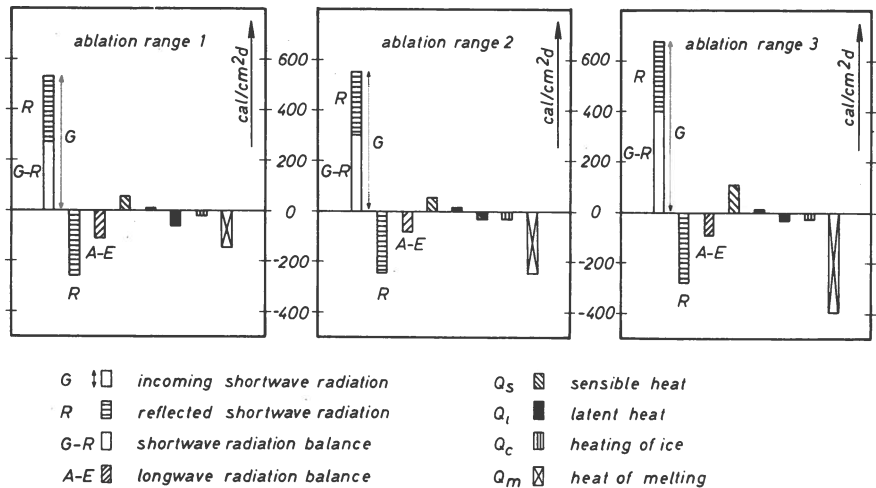


Abb. 20. Die Komponenten des Energiehaushaltes für drei Wertebereiche der Eisablation. Es bedeuten G die kurzwellige Einstrahlung (Globalstrahlung), R die reflektierte kurzwellige Strahlung, G-R die kurzwellige Strahlungsbilanz, A-E die langwellige Strahlungsbilanz, Q_s den Strom fühlbarer Wärme, Q_l den Strom latenter Wärme, Q_c die Eis erwärmung und Q_m die Schmelzenergie. Die Ablationsbereiche sind: $0 \leq h \leq 2,4$ cm Eis/d (1); $2,4 < h \leq 4,8$ cm Eis/d (2); $4,8 > h$ cm Eis/d (3).

Zufolge der stark unterschiedlichen Werte der Gesamtstrahlungsbilanz, der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit in den drei Ablationsklassen resultiert auch eine unterschiedliche Zusammensetzung des Energiehaushaltes wie in Abb. 20 und Tab. 7 gezeigt wird.

In Tab. 7 zeigt sich deutlich ein stark zunehmender relativer Einfluß des konvektiven Anteils (von 2 % bis 23 %) in den Ablationsklassen 1 bis 3, gleichzeitig eine Abnahme des relativen Anteils der Eis erwärmung (von 12 % bis 6 %). Der absolute Wert der zur Schmelzung verfügbaren Energie steigt von 169,5 cal/cm² d (Ablationsklasse 1) auf 416,3 cal/cm² d (Ablationsklasse 3).

Der absolute Anteil der einzelnen Energieströme in den drei Ablationsklassen ist in Abb. 20 als Säulendiagramm gezeichnet. Während mit zunehmender Ablation der zunehmende Anteil des absorbierten kurzwelligen Strahlungsstromes feststellbar ist, bleibt der Betrag der langwelligen Strahlungsbilanz annähernd konstant. Von den konvektiven Energieströmen ist die Zunahme des fühlbaren Wärmestromes mit steigender Ablation am deutlichsten.

Tab. 8.

Tagessummen der Komponenten des Energiehaushaltes. Es bedeuten G die kurzwellige Einstrahlung (Globalstrahlung), R die reflektierte kurzwellige Strahlung (gemittelt über die Ablationsmeßstellen), G/R die Albedo, G-R die kurzwellige Strahlungsbilanz, A die langwellige Einstrahlung (atmosphärische Gegenstrahlung), E die langwellige Ausstrahlung, A-E die langwellige Strahlungsbilanz, Q_F den Strom fühlbarer Wärme, Q_K den Strom positiver latenter Wärme (Kondensation), Q_V den Strom negativer latenter Wärme (Verdunstung) und Q_W die Eiserwärmung) Angaben in $\text{cal/cm}^2 \text{ d.}$

Datum	G	R	R/G	G-R	A-E	A	E	G-R +A-E	Q_F	Q_K	Q_V	Q_W
22. Mai	569,5	405,0	0,712	164,5	-	-	-	-	-	-	-	-
23. —	610,6	397,8	0,652	212,8	-	-	-	-	-	-	-	-
24. —	577,2	364,8	0,633	212,4	-	-	-	-	-	-	-	-
25. —	600,8	345,5	0,576	255,3	-	-	-	-	-	-	-	-
26. —	460,2	280,1	0,608	180,1	+ 26,5	-	-	206,6	57,3	24,6	-118,0	40,0
27. —	532,3	424,1	0,797	108,2	- 68,0	-	-	40,2	16,5	3,6	- 15,4	30,0
28. —	590,7	435,8	0,737	154,9	- 37,6	-	-	117,3	55,4	0,0	- 37,2	65,0
29. —	410,2	270,0	0,658	140,2	+ 16,0	-	-	156,2	93,0	0,0	- 42,2	65,0
30. —	612,7	318,2	0,519	294,5	- 57,3	-	-	237,2	99,2	0,0	-114,0	40,0
31. —	638,0	296,5	0,512	341,5	-152,8	-	-	188,7	65,3	0,0	- 88,5	40,0
1. Juni	636,0	359,7	0,565	276,3	-165,0	-	-	111,3	53,5	0,0	- 65,3	40,0
2. —	710,0	452,1	0,595	287,9	-181,0	-	-	106,9	37,8	22,0	- 67,6	70,0
3. —	628,0	402,6	0,677	225,4	-132,5	-	-	92,9	19,8	8,0	- 15,8	31,0
4. —	612,0	399,8	0,653	212,2	- 95,4	516,4	611,8	116,8	19,0	1,4	- 18,7	31,0
5. —	759,7	454,5	0,597	305,2	-171,9	448,9	620,8	133,3	45,3	2,5	- 60,0	34,0
6. —	750,0	456,2	0,608	293,7	-131,7	456,3	588,0	162,0	30,1	5,7	-109,3	34,0
7. —	737,2	436,6	0,592	300,6	-118,6	490,2	608,8	182,0	35,6	0,5	- 72,6	34,0
8. —	595,3	360,4	0,605	234,9	- 92,3	533,6	625,9	142,6	13,7	0,0	- 24,8	28,0
9. —	429,2	364,7	0,808	64,5	- 18,6	585,0	603,6	45,9	9,4	0,0	- 62,5	28,0
10. —	572,8	431,4	0,753	141,4	- 69,5	523,3	592,8	71,9	28,2	0,5	- 23,9	28,0
11. —	611,8	457,4	0,750	154,4	- 57,1	548,6	605,7	97,3	13,8	0,6	- 13,6	16,0
12. —	692,3	569,4	0,822	122,9	- 77,0	515,0	592,0	45,9	28,0	8,6	- 75,0	16,0
13. —	709,9	503,0	0,710	206,9	- 95,6	505,6	601,0	111,3	75,5	7,2	- 20,1	16,0
14. —	452,1	388,5	0,860	63,6	- 10,9	617,0	627,9	52,7	3,3	57,7	- 46,5	16,0
15. —	555,4	477,1	0,860	78,3	+ 14,5	608,2	593,7	92,8	69,2	0,0	- 49,0	16,0
16. —	796,8	741,6	0,806	55,2	-123,8	433,2	557,0	68,6	23,7	8,7	- 37,1	16,0
17. —	781,1	594,3	0,760	186,8	-137,6	456,5	594,1	49,2	14,6	18,3	- 64,1	15,0
18. —	746,0	542,3	0,726	203,7	-109,5	502,0	611,5	94,2	88,0	0,0	- 83,9	15,0
19. —	746,2	539,1	0,723	207,1	-131,1	490,6	621,7	76,0	59,6	0,0	- 96,0	21,0
20. —	778,4	547,7	0,704	230,7	-156,3	458,5	614,8	74,4	65,6	0,0	- 22,0	21,0
21. —	568,3	408,2	0,720	160,1	- 77,4	572,7	650,1	82,7	63,4	1,0	- 51,1	21,0
22. —	399,2	324,6	0,815	74,6	+ 8,1	659,1	651,0	82,7	53,9	4,3	- 21,6	21,0
23. —	663,2	388,0	0,586	275,2	- 32,2	623,1	655,3	243,0	115,0	0,0	- 29,0	21,0
24. —	760,9	331,0	0,435	429,9	- 75,5	569,4	644,9	354,4	192,0	0,0	- 10,3	25,0
25. —	690,6	283,1	0,410	407,5	- 86,8	552,0	638,8	320,7	156,1	5,1	- 41,2	25,0
26. —	737,4	297,2	0,403	440,2	- 22,9	619,8	642,7	417,3	144,0	6,4	- 21,2	25,0
27. —	745,2	289,1	0,388	456,1	- 97,0	544,4	641,4	359,1	103,5	0,0	- 39,0	25,0

Fortsetzung

Tab. 8. Fortsetzung

Datum	G	R	R/G	G-R	A-E	A	E	G-R +A-E	Q _F	Q _K	Q _V	Q _W
28. —	733,8	273,7	0,373	460,1	- 91,0	569,1	660,1	369,1	84,1	1,2	- 20,6	25,0
29. —	727,0	279,2	0,384	447,8	-111,0	547,5	658,5	336,8	68,9	1,3	- 29,7	25,0
30. —	745,7	301,3	0,404	444,4	-121,6	532,2	653,8	322,8	77,0	0,0	- 48,3	32,0
1. Juli	756,6	324,6	0,429	432,0	-174,6	477,9	652,5	257,4	59,6	0,0	-117,0	32,0
2. —	749,7	344,1	0,459	405,6	-180,4	467,8	648,2	225,2	75,9	0,0	-125,0	32,0
3. —	728,5	346,0	0,475	382,5	-143,6	505,1	648,7	238,9	86,4	0,0	- 88,6	32,0
4. —	720,9	333,1	0,462	387,8	-106,9	535,3	642,2	280,9	67,4	26,3	- 74,5	32,0
5. —	651,5	284,7	0,437	366,8	- 86,1	560,6	646,7	280,7	57,2	5,9	- 5,9	32,0
6. —	672,6	316,9	0,471	355,7	-102,7	531,0	633,7	253,0	53,0	0,0	- 36,4	25,0
7. —	421,7	201,2	0,477	220,5	- 26,4	628,2	654,6	194,1	34,0	7,0	- 13,2	25,0
8. —	384,2	278,7	0,727	105,5	- 4,6	653,7	658,3	100,9	11,6	0,0	- 22,2	25,0
9. —	666,1	518,5	0,778	147,6	-122,6	509,2	631,8	25,0	38,6	6,3	- 18,5	25,0
10. —	720,4	546,5	0,758	173,9	-168,5	474,2	642,7	5,4	60,1	1,8	- 55,4	26,0
11. —	428,3	289,3	0,698	139,0	- 24,1	633,9	658,0	114,9	81,5	53,0	0,0	26,0
12. —	306,2	135,0	0,441	171,2	+ 6,5	671,4	664,9	177,7	88,4	80,0	0,0	26,0
13. —	496,4	212,0	0,427	284,4	- 47,0	620,5	667,5	237,4	38,2	19,4	0,0	26,0
14. —	276,2	131,2	0,475	145,0	- 5,8	654,5	660,3	139,2	38,1	15,9	- 0,4	26,0
15. —	630,1	262,1	0,416	368,0	- 98,8	563,1	661,9	269,2	51,2	2,7	- 13,1	26,0
16. —	704,2	344,4	0,489	359,8	-132,6	522,1	654,7	227,2	63,4	3,1	- 39,6	26,0
17. —	703,2	319,2	0,454	384,0	-127,3	532,7	660,0	256,7	106,2	0,7	- 73,4	26,0
18. —	396,0	171,0	0,432	225,0	- 47,6	612,4	660,0	177,4	46,6	4,8	- 4,1	26,0
19. —	675,9	300,8	0,445	375,1	-155,9	504,1	660,0	219,2	81,4	0,0	- 28,9	26,0
20. —	656,6	281,7	0,429	374,9	-137,8	521,0	658,8	237,1	78,9	0,0	- 85,0	26,0
21. —	334,0	139,9	0,419	194,1	- 1,7	648,4	650,1	192,4	- 4,1	6,2	- 4,2	26,0
22. —	537,5	230,6	0,429	306,9	- 90,2	559,4	649,6	216,7	24,4	2,1	- 2,4	21,0
23. —	525,4	235,9	0,449	289,5	- 82,8	566,2	649,0	206,7	30,4	0,0	- 10,3	21,0
24. —	606,5	272,3	0,449	334,2	- 90,1	567,8	657,9	244,1	39,0	0,4	- 22,9	21,0
25. —	652,6	293,0	0,449	359,6	-118,7	541,5	660,2	240,9	57,6	4,5	- 21,1	21,0
26. —	588,9	246,7	0,419	342,2	-105,6	552,5	658,1	236,6	106,4	16,9	- 27,1	21,0
27. —	496,3	188,1	0,379	308,2	- 12,0	649,2	661,2	296,2	148,0	58,8	0,0	21,0
28. —	450,9	170,9	0,379	280,0	- 59,7	595,9	655,6	220,3	132,0	23,5	- 0,8	21,0
29. —	467,2	186,4	0,399	280,8	- 28,6	620,5	649,1	252,2	70,6	23,0	- 15,5	15,0
30. —	466,1	314,8	0,680	151,3	- 82,2	570,3	653,5	69,1	19,6	0,0	- 75,7	15,0
31. —	605,9	390,3	0,640	215,6	-163,6	471,3	634,9	52,0	36,9	0,0	- 21,0	15,0
1. Aug.	558,0	337,9	0,604	220,1	-142,4	494,7	637,1	77,7	74,1	0,0	- 95,0	15,0
2. —	324,3	174,8	0,539	149,5	- 30,2	624,1	654,3	119,3	25,9	0,0	- 9,8	15,0
3. —	602,8	349,0	0,579	253,8	-116,8	529,2	646,0	137,0	39,9	0,6	- 84,6	15,0
4. —	426,1	212,6	0,499	213,5	- 87,1	583,4	670,5	126,4	65,6	4,4	- 15,1	15,0
5. —	492,9	255,8	0,519	237,1	- 92,1	556,5	648,6	145,0	44,1	0,5	- 37,1	15,0
6. —	553,2	303,7	0,549	249,5	-164,6	479,9	644,5	84,9	124,2	0,0	-105,8	15,0
7. —	312,4	171,5	0,549	140,9	- 69,9	583,8	653,7	71,0	66,9	2,1	- 98,0	15,0

Tab. 9.

Komponenten des Energiehaushaltes für folgende Abschnitte: a) Periode mit Schneeoberfläche, b) Periode mit Eisoberfläche, c) Periode mit Neuschneebedeckung. Es bedeuten G die kurzwellige Einstrahlung (Globalstrahlung), R die reflektierte kurzwellige Strahlung, $G-R$ die kurzwellige Strahlungsbilanz, $A-E$ die langwellige Strahlungsbilanz, Q_F den Strom fühlbarer Wärme, Q_L den Strom latenter Wärme, Q_W die Eiserwärmung; T , u , e bedeuten der Reihe nach die Mittelwerte der Lufttemperatur, der Windgeschwindigkeit und des Dampfdruckes. Die in Klammer gesetzten Werte sind mittlere Tagessummen ($\text{cal/cm}^2 \text{ d}$).

Tab. 9a

Periode: 26. Mai – 23. Juni (29 Tage, Schnee)

$G = 18175,0 \text{ cal/cm}^2$ (626,7 $\text{cal/cm}^2 \text{ d}$)

Albedo: 69,4 %

$\bar{T} = +1,9^\circ \text{ C}$

$\bar{u}_{191 \text{ cm}} = 7,1 \text{ m/sec}$

$\bar{e}_{187 \text{ cm}} = 3,23 \text{ mm}$

	Energiegewinn cal/cm^2 ($\text{cal/cm}^2 \text{ d}$)		Energieverlust cal/cm^2 ($\text{cal/cm}^2 \text{ d}$)	
G-R.....	5551,0	(191)		
A-E.....			-2435,6	(-84)
Q_F	1207,7	(42)		
Q_L	175,2	(6)	-1544,8	(-53)
Q_W			- 869,0	(-30)
Summe	6933,9	(239)	-4849,4	(-167)
Schmelzenergie	2084,5	(72)		
Ablation berechnet.....	26,0 cm Wasser			
Ablation geschätzt	23,2 cm Wasser			

Tab. 9b

Periode: 24. Juni – 7. Juli, 12.–29. Juli, 2.–7. August (38 Tage, Eis)

$G = 22062,0 \text{ cal/cm}^2$ (580,5 $\text{cal/cm}^2 \text{ d}$)

Albedo: 44,4 %

$\bar{T} = +1,8^\circ \text{ C}$

$\bar{u}_{191 \text{ cm}} = 7,4 \text{ m/sec}$

$\bar{e}_{187 \text{ cm}} = 4,33 \text{ mm}$

	Energiegewinn cal/cm^2 ($\text{cal/cm}^2 \text{ d}$)		Energieverlust cal/cm^2 ($\text{cal/cm}^2 \text{ d}$)	
G-R.....	12264,1	(323)		
A-E.....			-3322,9	(-87)
Q_F	2822,4	(74)		
Q_L	322,8	(8)	-1370,1	(-36)
Q_W			- 904,0	(-24)
Summe	15409,3	(405)	-5597,0	(-147)
Schmelzenergie	9812,3	(258)		
Eis geschmolzen	136,3 cm Eis			
Eis verdunstet.....	2,2 cm Eis			
Ablation berechnet.....	138,5 cm Eis (3,65)			
Ablation gemessen	149,0 cm Eis (3,92)			

Tab. 9c

Periode: 8.–11. Juli, 30. Juli – 1. August (7 Tage, Neuschnee)

G = 3829 cal/cm² (547 cal/cm² d)

Albedo: 69,9 ‰

T̄ = −0,3° C

ū_{191 cm} = 6,6 m/sec

ē_{187 cm} = 3,83 mm

	Energiegewinn cal/cm ² (cal/cm ² d)		Energieverlust cal/cm ² (cal/cm ² d)	
G-R.....	1153,0	(165)		
A-E.....			− 708,0	(−101)
Q _F	322,4	(46)		
Q _L	61,1	(9)	− 387,8	(−55)
Q _W			− 147,0	(−21)
Summe	1536,5	(220)	−1242,8	(−177)
Schmelzenergie	293,7	(43)		
Ablation berechnet.....	3,7 cm Wasser			
Ablation geschätzt	2,5 cm Wasser			

3. ABLATION UND ENERGIEHAUSHALT

3.1 Einleitung

Tab. 8 enthält die Tagessummen aller berechneten Komponenten des Energiehaushaltes. Die Werte der kurzwelligen Strahlungsbilanz, des fühlbaren und des latenten Wärmestromes wurden dabei aus W. AMBACH, 1963 (Tab. 59, S. 304) unverändert übernommen. Abweichungen sind auf korrigierte Rechenfehler zurückzuführen. Es sei erwähnt, daß die Werte der kurzwelligen Strahlungsbilanz für die Albedo an den Ablationsmeßstellen, die Werte in Tab. 2 für die Albedo an der Registrierstelle gelten. Die langwelligen Strahlungsströme wurden unter Berücksichtigung des neuen Eichfaktors für langwellige Strahlung neu berechnet. Als Ergebnis erhält man stärker negative Werte der langwelligen Strahlungsbilanz.

Im folgenden Teil wurden die Komponenten des Energiehaushaltes für Perioden mit gleicher Oberflächenbeschaffenheit (Altschnee, Eis, Neuschnee) zusammengestellt (Tab. 9). Ein Vergleich von berechneter und gemessener Ablation ist vor allem in der 38-tägigen Periode mit Eisoberfläche möglich (Tab. 9b), da hier der Massenverlust praktisch nur durch Schmelzung verursacht wird und außerdem der geringe Verlust durch Verdunstung berücksichtigt werden kann. Die Hauptschwierigkeit dieses Vergleiches besteht jedoch in der Tatsache, daß die Albedo, gemessen an 10 Ablationspegeln, im zeitlichen Verlauf stark variiert und deshalb deren Mittelwert unsicher ist.

Tab. 10.

Zusammensetzung des Energiehaushaltes bei schneebedeckter Oberfläche (29 Tage) in Abhängigkeit von der Albedo. Angaben nach *Tab. 9a*.

1. Albedo: $\frac{R}{G} \cdot 100$.
2. G-R: kurzwellige Strahlungsbilanz (cal/cm^2).
3. $Q_W + (A-E) + Q_F + Q_L$: Q_W die Eiserwärmung, A-E die langwellige Strahlungsbilanz, Q_F die fühlbare Wärme und Q_L die latente Wärme (cal/cm^2).
4. Schmelzenergie: Summe 2+3 (cal/cm^2), die Werte in Klammer: $\text{cal/cm}^2 \text{ d}$.
5. Berechneter Wasserwert der geschmolzenen Schneeschicht (cm Wasser).
6. Geschätzter Wasserwert der geschmolzenen Schneeschicht (cm Wasser).

1	2	3	4	5	6
69 ‰	5630	-3470	2160 (74)	27,0	
70 ‰	5450	-3470	1980 (68)	24,7	
71 ‰	5260	-3470	1790 (62)	22,4	
72 ‰	5080	-3470	1610 (55)	20,1	23,2
73 ‰	4900	-3470	1430 (49)	17,9	
74 ‰	4720	-3470	1250 (43)	15,6	
75 ‰	4540	-3470	1070 (37)	13,4	

3.2 Der Energiehaushalt für die Dauer der Schneeoberfläche (zeitweise Altschnee, zeitweise Neuschnee)

Tab. 9a zeigt die Zusammenstellung des Energiehaushaltes für die Zeit vom 26. Mai–23. Juni 1959 (29 Tage mit Schneebedeckung). Die für Schmelzwärme zum Abbau der Altschneedecke aufgewendete Energie beträgt $72 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$. Dabei wurde die absorbierte Globalstrahlung an der Meßstelle der Strahlungsströme in Rechnung gesetzt. Die Oberfläche der Umgebung zeigt jedoch eine davon geringfügig abweichende Albedo, was auf die Ausbildung von Eishügeln zurückzuführen ist. Daher wurde in *Tab. 10* die verfügbare Schmelzenergie auch für geänderte Albedowerte (69 ‰–75 ‰) ermittelt, wodurch der Einfluß der Albedo auf den Energiehaushalt deutlich wird. Mit einer Albedo von etwa 70,6 ‰ an Stelle von 69,4 ‰ stimmen berechnete und gemessene Ablation gut überein. Die Größenordnung der Energie, die bei einer Schneeoberfläche (zeitweise Altschnee, zeitweise Neuschnee) täglich im Mittel als Überschuß für Schmelzung verfügbar ist, liegt zwischen 60 und $80 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$. Dies entspricht einem Wasseräquivalent von 0,75 bis $1,0 \text{ g/cm}^2 \text{ d}$.

3.3 Der Energiehaushalt für die Dauer der Eisoberfläche

Tab. 9b enthält die endgültigen Werte des Energiehaushaltes für die Zeit ohne Schneebedeckung (Eisoberfläche). Zwischen gemessener und berechneter Ablation erscheint eine relativ große Differenz von 7 ‰. *Tab. 11* zeigt das Ergebnis für die berechnete Ablation in Abhängigkeit

Tab. 11.

Zusammensetzung des Energiehaushaltes bei schneefreier Oberfläche (38 Tage) in Abhängigkeit von der Albedo. Angaben nach *Tab. 9b*. Es bedeuten:

1. Albedo: $\frac{R}{G} \cdot 100$.
2. G-R: kurzwellige Strahlungsbilanz (cal/cm^2).
3. $Q_W + (A-E) + Q_F + Q_L$: Q_W die Eiserwärmung, A-E die langwellige Strahlungsbilanz, Q_F die fühlbare Wärme, Q_L die latente Wärme (cal/cm^2).
4. Schmelzenergie: Summe 2+3 = verfügbare Schmelzenergie (cal/cm^2), Werte in Klammer: $\text{cal/cm}^2 \text{ d}$.
5. Berechneter Wert der geschmolzenen Eisschicht (cm Eis).
6. Gemessener Wert der geschmolzenen Eisschicht (cm Eis): Gesamtablation minus verdunstete Eisschicht.

1	2	3	4	5	6
44 ‰	12300	-2450	9850 (260)	137	
42 ‰	12800	-2450	10350 (275)	144	146,8
40 ‰	13200	-2450	10750 (285)	150	
38 ‰	13700	-2450	11250 (300)	157	

Tab. 12.

Zusammensetzung des Energiehaushaltes bei Bedeckung mit Neuschnee (7 Tage) in Abhängigkeit von der Albedo. Angaben nach *Tab. 9c*. Es bedeuten:

1. Albedo: $\frac{R}{G} \cdot 100$.
2. G-R kurzwellige Strahlungsbilanz (cal/cm^2).
3. $Q_W + (A-E) + Q_F + Q_L$: Q_W ist die Eiserwärmung, A-E die langwellige Strahlungsbilanz, Q_F die fühlbare Wärme, Q_L die latente Wärme (cal/cm^2).
4. Schmelzenergie: Summe 2+3 ist verfügbare Schmelzenergie (cal/cm^2), Werte in Klammer: $\text{cal/cm}^2 \text{ d}$.
5. Berechneter Wasserwert der geschmolzenen Schneeschicht (cm Wasser).
6. Geschätzter Wasserwert der geschmolzenen Schneeschicht (cm Wasser).

1	2	3	4	5	6
70 ‰	1150	-860	290 (41)	3,6	
75 ‰	960	-860	100 (14)	1,3	2,5
80 ‰	760	-860	-100 (-14)	-	

von geänderten Albedowerten, wobei ersichtlich wird, daß eine Albedo von 41 ‰ (an Stelle von 44 ‰) bereits Übereinstimmung zwischen gemessener und berechneter Ablation bringt. Diese Albedodifferenz liegt jedoch innerhalb der Genauigkeit, mit der ein Mittelwert bei großen lokalen Unterschieden aus Einzelmessungen angegeben werden kann.

3.4 Der Energiehaushalt für die Dauer der Neuschneebedeckung

Für zwei Abschnitte (insgesamt 7 Tage) sind die Komponenten des Energiehaushaltes in *Tab. 9c* angegeben. In Ergänzung dazu zeigt *Tab. 12*, daß berechnete und gemessene Ablation bei einer Albedo zwischen 70 % und 75 % übereinstimmen. Die im Durchschnitt für Schmelzung verbrauchte Energie wurde zu $43 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ berechnet. Sie ist somit kleiner als für die Periode mit Altschneebedeckung ($72 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ (*Tab. 9a*)). Dies ist verständlich, da es sich bei der Periode mit Neuschneebedeckung um einen Abschnitt mit geringerer Globalstrahlung und höherer Albedo handelt.

Aufgrund des Witterungsablaufes kann die gesamte Meßzeit im Ablationsgebiet in sechs charakteristische Perioden eingeteilt werden:

Periode 1: 26. Mai bis 23. Juni 1959: Vorwiegend schneebedeckte Oberfläche, Schneeverlagerung durch Drift, schwache Ablation.

Tab. 13.

Komponenten des Energiehaushaltes für einzelne Perioden. Es bedeuten G die kurzwellige Einstrahlung (Globalstrahlung), R die reflektierte kurzwellige Strahlung, $G-R$ die kurzwellige Strahlungsbilanz, $A-E$ die langwellige Strahlungsbilanz, Q_F den Strom fühlbarer Wärme, Q_L den Strom latenter Wärme und Q_W die Eiserwärmung; \bar{T} , \bar{u} , \bar{e} bedeuten der Reihe nach Mittelwerte der Lufttemperatur, der Windgeschwindigkeit und des Dampfdruckes. Die in Klammer gesetzten Werte sind mittlere Tagessummen ($\text{cal/cm}^2 \text{ d}$).

Tab. 13a

Periode: 24. Juni – 7. Juli

(14 Tage, Eis)

$G = 9842,1 \text{ cal/cm}^2$ (703 $\text{cal/cm}^2 \text{ d}$)

Albedo: 42,7 %

$\bar{T} = +2,5^\circ \text{ C}$

$\bar{u}_{191 \text{ cm}} = 8,9 \text{ m/sec}$

$\bar{e}_{187 \text{ cm}} = 4,27 \text{ mm}$

	Energiegewinn cal/cm^2 ($\text{cal/cm}^2 \text{ d}$)		Energieverlust cal/cm^2 ($\text{cal/cm}^2 \text{ d}$)	
G-R.....	5636,9	(402)		
A-E.....			-1426,5	(-102)
Q_F	1259,1	(90)		
Q_L	53,2	(4)	- 670,9	(-48)
Q_W			- 392,0	(-28)
Summe	6949,2	(496)	-2489,4	(-178)
Schmelzenergie	4459,8	(318)		
Eis geschmolzen	62,0 cm Eis	(4,43)		
Eis verdunstet	1,1 cm Eis	(0,08)		
Ablation berechnet	63,1 cm Eis	(4,51)		
Ablation gemessen	71,9 cm Eis	(5,14)		

Tab. 13b

Periode: 8.–11. Juli

(4 Tage, Schnee)

 $G = 2199,0 \text{ cal/cm}^2$ (550 cal/cm² d)

Albedo: 74,3 %

 $\bar{T} = -0,3^\circ \text{C}$ $\bar{u}_{191 \text{ cm}} = 6,4 \text{ m/sec}$ $\bar{e}_{187 \text{ cm}} = 4,03 \text{ mm}$

	Energiegewinn cal/cm ² (cal/cm ² d)		Energieverlust cal/cm ² (cal/cm ² d)	
G-R.....	566,0	(141)		
A-E.....			- 319,8	(-80)
Q _F	191,8	(48)		
Q _L	61,1	(15)	- 96,1	(-24)
Q _W			- 102,0	(-25)
Summe	818,9	(204)	- 517,9	(-129)
Schmelzenergie	301,0	(75)		

Tab. 13c

Periode: 12.–29. Juli

(18 Tage, Eis)

 $G = 9508,2 \text{ cal/cm}^2$ (528 cal/cm² d)

Albedo: 43,4 %

 $\bar{T} = +1,9^\circ \text{C}$ $\bar{u}_{191 \text{ cm}} = 6,4 \text{ m/sec}$ $\bar{e}_{187 \text{ cm}} = 4,51 \text{ mm}$

	Energiegewinn cal/cm ² (cal/cm ² d)		Energieverlust cal/cm ² (cal/cm ² d)	
G-R.....	5382,9	(299)		
A-E.....			-1335,7	(-74)
Q _F	1196,7	(66)		
Q _L	262,0	(15)	- 348,8	(-19)
Q _W			- 422,0	(-24)
Summe	6841,6	(380)	-2106,5	(-117)
Schmelzenergie	4735,1	(263)		
Eis geschmolzen	65,8 cm Eis	(3,65 cm)		
Eis verdunstet	0,6 cm Eis	(0,03 cm)		
Ablation berechnet	66,4 cm Eis	(3,7 cm)		
Ablation gemessen	68,9 cm Eis	(3,8 cm)		

Tab. 13d

Periode: 30. Juli – 1. August

(3 Tage, Schnee)

 $G = 1630,0 \text{ cal/cm}^2$ (544 cal/cm² d)

Albedo: 64,0 %

 $\bar{T} = -0,3^\circ \text{C}$ $\bar{u}_{191 \text{ cm}} = 6,8 \text{ m/sec}$ $\bar{e}_{187 \text{ cm}} = 3,55 \text{ mm}$

	Energiegewinn cal/cm ² (cal/cm ² d)		Energieverlust cal/cm ² (cal/cm ² d)	
G-R.....	587,0	(196)		
A-E.....			- 388,2	(-129)
Q _F	130,6	(43)		
Q _L	0,0		- 291,7	(-97)
Q _W			- 45,0	(-15)
Summe	717,6	(239)	- 724,9	(-241)
Schmelzenergie		-7,3	(-2)	

Tab. 13e

Periode: 2.-7. August

(6 Tage, Eis)

 $G = 2711,7 \text{ cal/cm}^2$ (451 cal/cm² d)

Albedo: 54,1 %

 $\bar{T} = +0,2^\circ \text{C}$ $\bar{u}_{191 \text{ cm}} = 6,9 \text{ m/sec}$ $\bar{e}_{187 \text{ cm}} = 3,94 \text{ mm}$

	Energiegewinn cal/cm ² (cal/cm ² d)		Energieverlust cal/cm ² (cal/cm ² d)	
G-R.....	1244,3	(207)		
A-E.....			- 560,7	(-93)
Q _F	366,6	(61)		
Q _L	7,6	(1)	- 350,4	(-58)
Q _W			- 90,0	(-15)
Summe	1618,5	(269)	-1001,1	(-166)
Schmelzenergie		617,4	(103)	
Eis geschmolzen		8,6 cm Eis	(1,43 cm)	
Eis verdunstet		0,6 cm Eis	(0,10 cm)	
Ablation berechnet		9,2 cm Eis	(1,53 cm)	
Ablation gemessen		8,2 cm Eis	(1,37 cm)	

Tab. 14.

Gemittelte Werte des Energieverbrauchs für Schmelzung bei Eis- und Schneeoberfläche unter verschiedenen Ablationsbedingungen.

Eisoberfläche	a	b	c	Bemerkung
Periode 2	318	365	342	Hochsommerliche Ablationsperiode
Periode 4	263	273	268	Ende der hochsommerlichen Ablationsperiode
Periode 6	103	91	97	Spätsommerliche Ablationsperiode
Schneeoberfläche				
Periode 1	72	64	68	Altschnee
Periode 3+5	42	29	35	Neuschnee

a) Energieverbrauch für Schmelzung ($\text{cal/cm}^2 \text{ d}$) berechnet aus den Energiehaushaltskomponenten

b) Energieverbrauch für Schmelzung ($\text{cal/cm}^2 \text{ d}$) berechnet aus der gemessenen Eisablation

c) Mittel von a) und b)

Periode 2: 24. Juni bis 7. Juli 1959: Schneefreie Oberfläche mit starker Eisablation.

Periode 3: 8. Juli bis 11. Juli 1959: Kurze Periode mit schneebedeckter Oberfläche (Neuschnee), schwache Ablation.

Periode 4: 12. Juli bis 29. Juli 1959: Schneefreie Oberfläche mit starker Eisablation, ähnlich wie Periode 2.

Periode 5: 30. Juli bis 1. August 1959: Kurze Periode mit schneebedeckter Oberfläche (Neuschnee), schwache Ablation, ähnlich wie Periode 3.

Periode 6: 2. August bis 7. August 1959: Schneefreie Oberfläche mit geringer Ablation und sehr hoher Albedo.

Für Periode 1 ist der Energiehaushalt in *Tab. 9a* aufgegliedert, für die Perioden 2 bis 6 in *Tab. 13*.

Die Aufgliederung der Ablationsperiode ohne Schneebedeckung in Periode 2, 4 und 6 ist von besonderem Interesse, da Periode 6 als spätsommerliche Ablationsperiode aufzufassen ist, hingegen Perioden 2 und 4 als Beispiele für hochsommerliche Ablationsperioden gelten.

Tab. 14 ist eine Zusammenstellung der für Schmelzung verbrauchten Energie in $\text{cal/cm}^2 \text{ d}$ für die Perioden 1 bis 6. Man sieht, daß die verfügbare Energie für eine Eisoberfläche gegen Ende der Ablationsperiode von $342 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ auf $97 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ abnimmt.

Tab. 15.

Prozentueller Anteil der Komponenten des Energiehaushaltes am Energieüberschuß:

a) für eine Schneeoberfläche (Mittelwert aus 29 Tagen, Energiewerte aus *Tab. 9a*).

b) für eine Eisoberfläche (Mittelwert aus 38 Tagen, Energiewerte aus *Tab. 9b*).

Es bedeuten A-E die langwellige Strahlungsbilanz, G-R die kurzwellige Strahlungsbilanz, B die Gesamtstrahlungsbilanz, Q_F den Strom fühlbarer Wärme, Q_L den Strom latenter Wärme (Q_K Kondensation, Q_V Verdunstung), Q_A die Schmelzenergie und Q_W die Eis erwärmung.

Tab. 15a

$\left. \begin{array}{l} -82\% \text{ A-E} \\ +187\% \text{ G-R} \end{array} \right\} 105\% \text{ B}$	$\left. \begin{array}{l} 41\% \text{ } Q_F \\ -46\% \text{ } Q_L \end{array} \right\} \text{Energieüberschuß } 100\% \left\{ \begin{array}{l} 71\% \text{ } Q_A \\ 29\% \text{ } Q_W \end{array} \right.$
$\left. \begin{array}{l} +6\% \text{ } Q_K \\ -52\% \text{ } Q_V \end{array} \right\}$	

Tab. 15b

$\left. \begin{array}{l} -31\% \text{ A-E} \\ +114\% \text{ G-R} \end{array} \right\} 83\% \text{ B}$	$\left. \begin{array}{l} 26\% \text{ } Q_F \\ -9\% \text{ } Q_L \end{array} \right\} \text{Energieüberschuß } 100\% \left\{ \begin{array}{l} 92\% \text{ } Q_A \\ 8\% \text{ } Q_W \end{array} \right.$
$\left. \begin{array}{l} +3\% \text{ } Q_K \\ -12\% \text{ } Q_V \end{array} \right\}$	

Die Komponenten des Energiehaushaltes von *Tab. 9a und 9b* (Schneeoberfläche und Eisoberfläche) wurden in prozentuellen Angaben in *Tab. 15* dargestellt, wobei hier 100 % den Energieüberschuß für Schmelzung und Erwärmung darstellen. Es gilt daher:

$$G - R + A - E + Q_F + Q_K - Q_V = 100\% = Q_A + Q_W$$

Die Größen bedeuten der Reihe nach Globalstrahlung (G), reflektierte Globalstrahlung (R), atmosphärische Gegenstrahlung (A), langwellige Ausstrahlung der Oberfläche (E), fühlbarer Wärmestrom (Q_F), Kondensationswärme (Q_K), Verdunstungskälte (Q_V), Schmelzwärme (Q_A), Eis- bzw. Schnee-Erwärmung (Q_W).

Da in *Tab. 15* nur geringfügige Änderungen gegenüber der vorläufigen Auswertung vorliegen, wird auf die dortige Diskussion verwiesen (W. AMBACH, 1963 S. 187).

In *Tab. 16* wurde die Gesamtablation (100 %) der Periode mit Eisoberfläche in geschmolzene und verdunstete Masse aufgegliedert, wobei wiederum die Anteile der einzelnen Komponenten im Energiehaushalt prozentuell angegeben werden. Auch wird hier wegen der geringfügigen Änderungen gegenüber der vorläufigen Auswertung auf die dortige Diskussion verwiesen (W. AMBACH, 1963).

Tab. 16.

Prozentueller Anteil einzelner Vorgänge an der Ablation. Es bedeuten B die Gesamtstrahlungsbilanz, G-R die kurzwellige und A-E die langwellige Strahlungsbilanz.

Ablation (cm Eis berechnet) 100 ‰	$\left\{ \begin{array}{l} 90 \text{ ‰ } B \left\{ \begin{array}{l} 123 \text{ ‰ } G-R \\ -33 \text{ ‰ } A-E \end{array} \right. \\ 2 \text{ ‰ } \text{Verdunstung} \\ 8 \text{ ‰ } \left\{ \begin{array}{l} \text{fühlbare Wärme} \quad 28 \text{ ‰} \\ \text{latente Wärme} \quad -10 \text{ ‰} \\ \text{Eiserwärmung} \quad -10 \text{ ‰} \end{array} \right. \end{array} \right.$
-----------------------------------	--

4. VERGLEICH DES ENERGIEUMSATZES UND DER ABLATION IN VERSCHIEDENEN HÖHENLAGEN

4.1 Höhenverteilung des Energiehaushaltes und der Ablation

In diesem Vergleich werden folgende Meßstellen herangezogen (W. AMBACH, 1963 Abb. 76, S. 195):

1. Meßstelle nahe dem Eisrand: BK 1, 612 m Seehöhe.
2. Meßstelle im mittleren Bereich des Ablationsgebietes: BK 5, 1013 m Seehöhe, identisch mit Camp IV-EGIG 1959.
3. Meßstelle nahe der Gleichgewichtslinie: BK 7, 1241 m Seehöhe.

Alle drei Meßstellen liegen im EPF Profil. Als Vergleichsperiode wurde der Zeitraum vom 10.5. bis 11.8.1959 gewählt, da für diese Zeit der Wasserwert der Schnee- und Eisablation sowie die Temperaturänderung des Eises bekannt sind. Der Wasserwert des in dieser Periode hinzugekommenen und wieder geschmolzenen Neuschnees muß in dieser Betrachtung vernachlässigt werden. Zu den drei Stationen wurden die Ergebnisse von EGIG II, Carrefour 1967 (1850 m Seehöhe, Akkumulationsgebiet) dazugenommen. Die in *Tab. 17* zusammengestellte Übersicht der zur Schmelzung und Erwärmung von Eis und Schnee verbrauchten Energie (cal/cm²) in Abhängigkeit von der Seehöhe enthält gerundete Zahlenwerte. Der Energieumsatz ist nach folgenden Gesichtspunkten aufgespalten:

- Energieverbrauch zur Erwärmung der winterlichen Schneedecke auf Null Grad Celsius (Ausgangszustand: 10.5.1959).
- Energieverbrauch zur Schmelzung der winterlichen Schneedecke.
- Energieverbrauch zur Erwärmung des Eises.
- Energieverbrauch zur Eisschmelzung.

Tab. 17.

Energiebeträge für Schmelzung und Erwärmung von Eis und Schnee für die Periode 10.5. bis 11.8.1959 in Abhängigkeit von der Seehöhe.

Meßstelle	Seehöhe	Erwärmung Altschnee cal/cm ²	Schnee- ablation cal/cm ²	Erwärmung v. Eis bzw. Firn cal/cm ²	Eis- ablation cal/cm ²	Total cal/cm ²
BK 1	612 m	0	600	2.200	18.400	21.200
BK 5	1013 m	0	1800*	2.200	12.000	16.000
BK 7	1241 m	100	2800*	2.100	0	5.000
Carrefour . . .	1850 m	100	0	700	0	800

* Messung am 20.5.1959.

Tab. 18.

Prozentuelle Energieanteile für Erwärmung und Schmelzung (Schnee, Eis) in verschiedenen Höhen für die Periode 10.5. bis 11.8.1958.

Meßstelle	Seehöhe	Erwärmung Altschnee cal/cm ²	Schnee- ablation cal/cm ²	Erwärmung v. Eis bzw. Firn cal/cm ²	Eis- ablation cal/cm ²	Total cal/cm ²
BK 1	612 m	0 %	3 %	10 %	87 %	100 %
BK 5	1013 m	0 %	11 %	14 %	75 %	100 %
BK 7	1241 m	2 %	56 %	42 %	0 %	100 %
Carrefour . . .	1850 m	12 %	0 %	88 %	0 %	100 %

Aus *Tab. 17* ist der typische Unterschied des Energieumsatzes in den einzelnen Gebieten zu sehen. Der Gesamtenergieverbrauch über die Vergleichsperiode ändert sich von 21.200 cal/cm² in Randnähe bis 800 cal/cm² im Akkumulationsgebiet. Der Energiebetrag für die Eis Erwärmung ist jedoch für das gesamte Ablationsgebiet annähernd konstant. Dieses Ergebnis ist verständlich, da diese Energie vorwiegend durch die Wärmeleitfähigkeit des Eises bestimmt wird. Es ist aus *Tab. 17* auch ersichtlich, wie gering der gesamte Energieverbrauch im Akkumulationsgebiet im Vergleich mit jenem im Ablationsgebiet ist. Er bleibt z.B. weit unter dem im Ablationsgebiet für die Eis Erwärmung verbrauchten Energie. Noch deutlicher als in *Tab. 17* ergibt sich der charakteristische Unterschied des Energiehaushaltes in einzelnen Höhenlagen, wenn die Energiesenken in Prozentsätzen der Gesamtenergie angegeben werden (*Tab. 18*). So ist in Randnähe (BK 3) die Eisablation mit 97 % die bedeutendste Energiesenke, während nahe der Gleichgewichtslinie (BK 7) Schmelzung von Altschnee und Erwärmung von Eis und Schnee etwa gleich bedeutend sind. Im Akkumulationsgebiet hingegen ist die Erwärmung von Firn die bei weitem wirksamste Energiesenke.

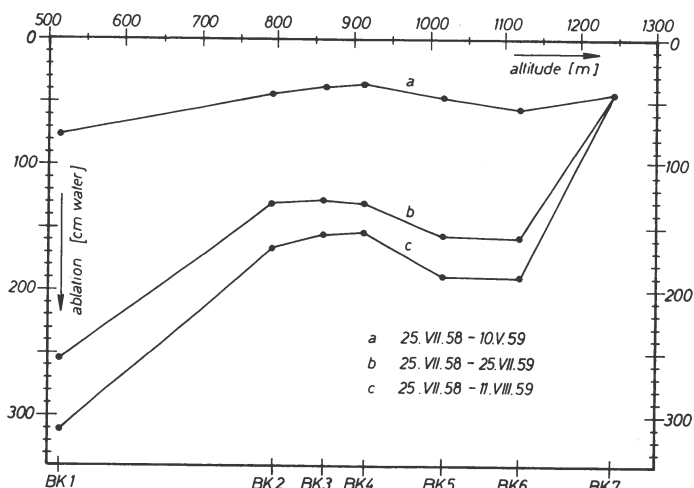


Abb. 21. Eisablation in Abhängigkeit von der Seehöhe (Pegel BK 1 bis BK 7).
Messungen von A. Bauer (vgl. W. AMBACH, 1963).

Der Umstand, daß die hier angeführten Messungen aus dem Akkumulationsgebiet im Jahre 1967 durchgeführt wurden, ist für diese Gegenüberstellung nicht wesentlich.

Allgemein gültige Aussagen über den Höhengradienten der Nettoablation wären in diesem Zusammenhang wohl wichtig, können jedoch auf Grund des vorliegenden Materials nicht gemacht werden. Zu viele Faktoren beeinflussen das Ergebnis. Folgende Punkte sollten dazu besser bekannt sein:

- Höhengradient der Lufttemperatur im Ablationsgebiet bei schmelzender Oberfläche. Daraus ergibt sich ein Einfluß auf den Betrag des fühlbaren und latenten Wärmestromes, wobei auch Windgeschwindigkeit und relative Feuchtigkeit das Ergebnis bestimmen.
- Höhenabhängigkeit der Albedo. Es wäre zu klären, inwieweit in den Randgebieten durch Ablagerung von Gesteinsstaub die Albedo niedriger ist als im inneren Teil des Ablationsgebietes.
- Höhenabhängigkeit des Wasserwertes der winterlichen Schneedecke. Dadurch, daß in höheren Regionen der Wasserwert der winterlichen Schneedecke größer ist als im Randgebiet, ergibt sich im Randgebiet eine länger wirksame Eisablation. Es wurde bereits auf Alpengletschern gefunden, daß der Höhengradient der Nettoablation einer ganzen Ablationsperiode hauptsächlich von der verschiedenen Dauer der Ablationsperiode in jeweiligen Höhenbereichen abhängig ist. Dieses Ergebnis ist sicherlich auf das Ablationsgebiet des Grönländischen Inlandeises übertragbar.

In *Abb. 21* sind die Ablationswerte für verschiedene Höhenlagen und Meßperioden eingezeichnet.* Es zeigt sich am Ende der Ablationsperiode von 1958 und 1959 (Kurve a und Differenz c-b) eine annähernd gleichförmige Verteilung der Werte der Eisablation im Gebiet. Das bedeutet, daß die Ablationsperiode in beiden Jahren in allen Höhenlagen gleichzeitig beendet wurde. Der Unterschied in der Länge der Ablationsperiode in verschiedenen Höhenbereichen ist daher auf den unterschiedlichen Beginn zurückzuführen, der in größeren Höhen sowohl durch große Schneeakkumulation, als auch durch tiefere Lufttemperatur verzögert wird.

4.2 Zur Bestimmung der Dauer der Ablationsperiode

Da für die Nettoablation die Dauer der Ablationsperiode ein entscheidender Faktor ist, wird im folgenden eine Methode zur Schätzung der Ablationsdauer in Abhängigkeit von der Seehöhe besprochen. Als Angaben für diese Methode ist der zeitliche Verlauf der Lufttemperatur und jener der Schneehöhe einer Küstenstation erforderlich. Im vorliegenden Fall wurde Jakobshavn als Küstenstation gewählt.

Der Grundgedanke der Methode ist die Annahme, daß bei einer Lufttemperatur über Null Grad Celsius Schmelzung zu erwarten ist. Da Schneeoberflächen eine wesentlich andere Zusammensetzung des Energiehaushaltes zeigen als Eisoberflächen, muß zwischen der Dauer der Schneeschmelze und der Dauer der Eisschmelze unterschieden werden. Als Ablationsperiode ist die Zeit zu verstehen, für die die Bedingung $(c-a) < 0$ erfüllt ist, wobei c und a die Akkumulation bzw. die Ablation bedeuten. Schmelzung von superimposed Eis muß hierbei aus prinzipiellen Gründen zur Dauer der Schneeschmelze gezählt werden, da es eine spezielle Form der Akkumulation darstellt. Die Oberfläche von schmelzendem superimposed Eis zeigt jedoch im Energiehaushalt die Eigenschaften einer schmelzenden Eisoberfläche. Wegen der im allgemeinen kurzen Dauer der Schmelzung von superimposed Eis kann jedoch diese Komplikation für diese Betrachtung außer Acht gelassen werden.

* Der Verlauf der Netto-Eisablation für die Periode 1 (25. Juli 1958 bis 10. Mai 1959) zeigt in der Originaldarstellung (W. AMBACH, 1963 *Abb. 76*, S. 195) die Besonderheit, daß die Netto-Eisablation im untersten Höhenbereich wesentlich kleiner ist als im höchstgelegenen. Dieser Verlauf ist aus energetischen Gründen unlogisch und muß wohl auf eine außergewöhnliche Situation zurückgeführt werden (z.B. außergewöhnliche Verteilung von Neuschnee während einer Wetterlage im Herbst). Daher wurde für die randnahe Meßstelle BK 1 ein geänderter Ablationswert (75 cm Wasser) angenommen (vgl. *Abb. 21* und *Tab. 20*).

Tab. 19.

Einteilung der Tagesmittel der Lufttemperatur an der Küstenstation Jakobshavn in Temperaturklassen. Die absolute Summenhäufigkeit ist die Summierung der Zahl der Tage in den Klassen, beginnend mit der höchsten Temperaturklasse.

	Anzahl der Tage (1. Mai bis 31. Oktober)			Absolute Summenhäufigkeit		
	1958	1959	1967	1958	1959	1967
$0^{\circ} \leq T < 3^{\circ}$	40	27	24	116	112	139
$3^{\circ} \leq T < 4^{\circ}$	16	19	18	76	85	115
$4^{\circ} \leq T < 5^{\circ}$	9	10	18	60	66	97
$5^{\circ} \leq T < 6^{\circ}$	11	17	15	51	56	79
$6^{\circ} \leq T < 7^{\circ}$	8	6	10	40	39	64
$7^{\circ} \leq T < 8^{\circ}$	8	10	19	32	33	54
$8^{\circ} \leq T < 9^{\circ}$	10	9	9	24	23	35
$9^{\circ} \leq T < 10^{\circ}$	4	3	10	14	14	26
$10^{\circ} \leq T$	10	11	16	10	11	16

4.3 Darstellung der Werte der Lufttemperatur an der Küstenstation Jakobshavn (40 m Seehöhe)*

In Jakobshavn stehen Werte der Lufttemperatur von 00, 12, 18 Uhr GMT zur Verfügung. Daraus wurde das »Dreiermittel« gebildet. Die positiven Werte der Lufttemperatur wurden in Klassen von 1°C eingeteilt und die absolute Summenhäufigkeit, beginnend mit der höchsten Klasse, berechnet. *Tab. 19* gibt als Beispiel die Ergebnisse für die Expeditionsjahre 1958, 1959, 1967. Aus der Tabelle der absoluten Summenhäufigkeit ist die Anzahl der Tage mit einer Lufttemperatur über einem gegebenem Wert (z.B. 5°C) ersichtlich. Die absolute Summenhäufigkeit wurde ferner in einem Diagramm (*Abb. 22*) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Jahre 1958 und 1959 etwa denselben Verlauf der Summenhäufigkeit aufweisen, das Jahr 1967 jedoch eine Verschiebung zu höheren Temperaturen zeigt. Die Kurven lassen sich in einem Teilbereich gut durch eine Gerade nähern. Die Temperaturachse von *Abb. 22* kann nun als Höhenachse geschrieben werden, wobei der Temperatur von $+5,5^{\circ}\text{C}$ die Seehöhe 1000 m zugeordnet wird. Weiters wird der empirisch ermittelte Temperatur-Höhengradient von $0,6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ angewendet. In dieser Form gibt das Diagramm (Seehöhe gegen Summenhäufigkeit) die Anzahl der Tage mit positiver Lufttemperatur in einer bestimmten Seehöhe.

Durch die Zuordnung der Seehöhe von 1000 m zur Temperatur $5,5^{\circ}\text{C}$ (an Stelle von $5,8^{\circ}\text{C}$ bei $\Delta h = 970\text{ m}$) wird empirisch berücksichtigt, daß einerseits bei einer Tagesmitteltemperatur unter 0°C bereits

* Für die Überlassung der Werte wird dem Danske Meteorologiske Institut, Charlottenlund, bestens gedankt.

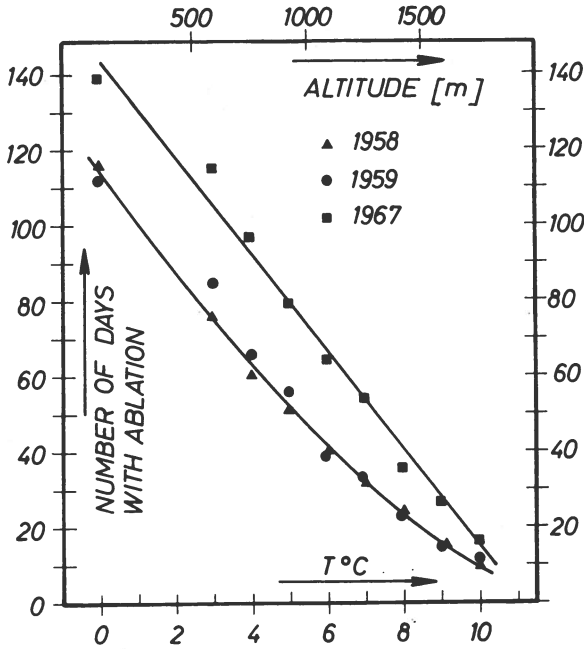


Abb. 22. Anzahl der Ablationstage in verschiedenen Seehöhen, ermittelt aus dem Temperaturverlauf der Küstenstation Jakobshavn.

Schmelzung eintritt ($T_{\text{Max}} > 0^\circ \text{C}$) und andererseits auch der Neuschneezuwachs während der Ablationsperiode ebenfalls geschmolzen wird.

Für die Zeit der Schneeschmelze wird ein mittlerer täglicher Energieverbrauch für Schmelzung von $70 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$, für die Zeit der Eisschmelze als Mittelwert für die gesamte Ablationsperiode $230 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$ eingesetzt. Eine nähere Begründung dieser Werte ist im Abschnitt 4,6 ersichtlich.

4.4 Bestimmung der Dauer der Schneeschmelze und der Eisschmelze

Die Bestimmung der Dauer der Schneeschmelze t_s erfolgt nach

$$t_s(h) = \frac{w_s(h) \cdot s}{E_s} \text{ (Tage)} \quad (1)$$

Darin bedeuten:

$w_s(h)$ = Wasserwert der winterlichen Schneedecke am Beginn der Ablationsperiode (g/cm^2).

s = 80 cal/g : Schmelzwärme des Eises.

E_s = $70 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$: Energieverbrauch für Schmelzung.

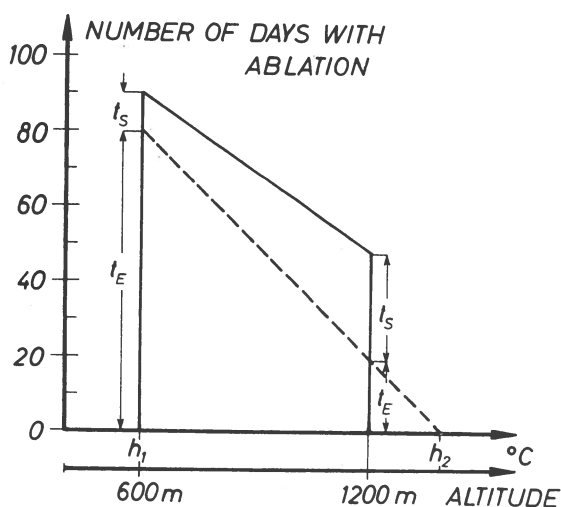


Abb. 23. Skizze zur Abschätzung der Seehöhe der Gleichgewichtslinie.

Für 1959 ergaben Messungen folgende Werte für w_s :

$$w_s(612 \text{ m}) = 8 \text{ cm Wasseräquivalent}$$

$$w_s(1013 \text{ m}) = 23 \text{ cm Wasseräquivalent}$$

$$w_s(1241 \text{ m}) = 35 \text{ cm Wasseräquivalent}$$

Einen guten Näherungswert für die Verteilung $w_s(h)$ im Ablationsgebiet erhält man durch lineare Interpolation. In jedem Höhenbereich, in dem w_s bekannt ist, kann die entsprechende Dauer der Schneeschmelze mit Gleichung 1 berechnet werden.

Die Dauer der Eisschmelze t_E ergibt sich in Abhängigkeit von der Seehöhe nach

$$t_E(h) = t(h) - t_s(h) \quad (2)$$

wobei $t(h)$ die Anzahl der Ablationstage bedeutet, die aus Temperatur-Summenhäufigkeit (z.B. Abb. 22) entnommen wird. $t(h)$ hat in Gleichung 2 die Bedeutung der Dauer der gesamten Schmelzperiode. Der Verlauf von $t_E(h)$ ist in Abb. 23 als lineare Näherung strichliert eingetragen.

Die Extrapolation des Höhenverlaufes von $t_E(h)$ in Abb. 23 nach

$$t_E(h) = 0 \quad (3)$$

ergibt einen Näherungswert für die Seehöhe der Gleichgewichtslinie.* h_1 ist die Seehöhe des Eisrandes.

Die Bestimmung des Wasserwertes der Eisablation erfolgt nach

$$w_E(h) = \frac{\overline{E_E}}{s} \cdot t_E(h) \quad (4)$$

* Das Problem des superimposed ice wird außer Acht gelassen.

Tab. 20.

Schnee- und Eisablation für drei Perioden in verschiedenen Höhenlagen. Der in Klammer gesetzte Wert wurde durch Extrapolation ermittelt.

	Periode 1		Periode 2		Periode 3	
	25. Juli 1958 bis		11. Mai 1959 bis		26. Juli 1959 bis	
	10. Mai 1959		25. Juli 1959		11. August 1959	
	Ablation		Ablation		Ablation	
	cm Wasser		cm Wasser		cm Wasser	
	Altschnee	Eis	Altschnee	Eis	Altschnee	Eis
BK 1, 612 m	0	(75)	8	175	0	55
BK 5, 1013 m	0	50	23	110	0	25
BK 7, 1241 m	0	45	~35	0	~0	0
	Periode 1+2		Periode 2+3		Periode 1+2+3	
	Altschnee	Eis	Altschnee	Eis	Altschnee	Eis
BK 1, 612 m	8	250	8	230	8	305
BK 5, 1013 m	23	160	23	135	23	185
BK 7, 1241 m	35	45	35	0	35	45

Darin bedeuten:

$\overline{E_E} = 230 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$: Mittlerer Energieverbrauch für Eisschmelzung.

$s = 80 \text{ cal/g}$: Schmelzwärme für Eis.

$t_E(h)$ = Dauer der Eisablation in Abhängigkeit von der Seehöhe.

4.5 Prüfung der Methode

Eine Anwendung der Methode wurde bereits in einer kurzen Mitteilung gegeben (W. AMBACH, 1972). In Tab. 20 sind gemessene Ablationswerte für folgende drei Stationen zusammengestellt:

BK 1 – 612 m Seehöhe: Unmittelbare Nähe des Eisrandes

BK 5 – 1013 m Seehöhe: Mittlerer Teil des Ablationsgebietes (Meßplatz der Energiehaushaltsstudie 1959)

BK 7 – 1241 m Seehöhe: Nähe der Gleichgewichtslinie

Die Lage der einzelnen Meßstellen sind bei W. AMBACH, 1963 (Abb. 55, S. 148) eingezeichnet. Die Ablationswerte für Altschnee und Eis sind an diesen Stellen für folgende Perioden bekannt (Tab. 20):

Periode 1: 25. Juli 1958 – 10. Mai 1959

Periode 2: 11. Mai 1959 – 25. Juli 1959

Periode 3: 26. Mai 1959 – 11. August 1959

Die Anzahl der Ablationstage ist für diese Perioden aus der Temperatur-Summenhäufigkeit der Station Jakobshavn bekannt (Abb. 24). Für jede der drei Perioden wurde nun zusätzlich die Dauer der Schnee-

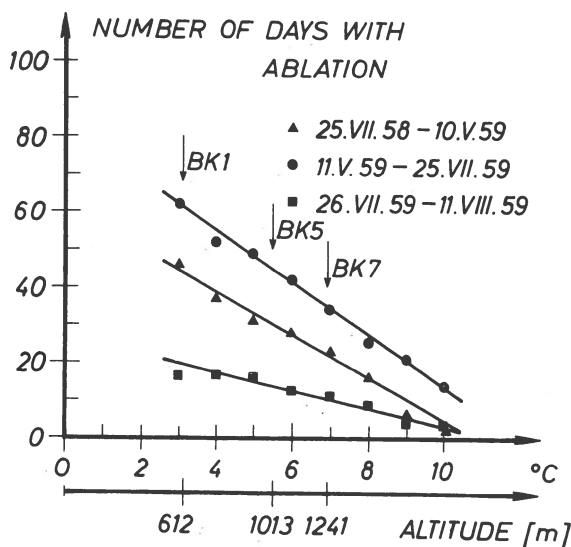


Abb. 24. Anzahl der Ablationstage, ermittelt aus dem Temperaturverlauf an der Küstenstation Jakobshavn für die angegebenen Perioden.

und Eisschmelze nach Gleichung 1, 2, 4 bestimmt, indem die bekannten Wasserwerte der Schnee- und Eisablation nach *Tab. 20* in Gleichung 1 und 4 verwendet wurden. Die zweifache Bestimmung der Zahl der Ablationstage läßt nun eine Kontrolle der Zuverlässigkeit der Abschätzung zu. *Tab. 21* (Spalte I und II) enthält beide Ergebnisse. Die Übereinstimmung ist befriedigend, wenn man die Vielschichtigkeit des Problems berücksichtigt.

4.6 Diskussion der Energiewerte für die Schnee- und Eisschmelzung

Für verschiedene Oberflächenbeschaffenheit (Schnee, Eis) und verschiedene Ablationszeiten werden in *Tab. 22* gerundete Richtwerte für die Komponenten des Energiehaushaltes angegeben, die unmittelbar aus den *Tab. 9 bis 14* folgen.

Bei Eisschmelze muß zwischen dem Energiehaushalt der hochsommerlichen Ablationsperiode (Polarsommer, Sonne ständig über dem Horizont) und jenem der spätsommerlichen Ablationsperiode unterschieden werden (Sonne zeitweise unter dem Horizont), da im zweiten Fall mit einem kleinerem Wert der mittleren Globalstrahlung gerechnet werden muß.

Tab. 21.

Anzahl der Ablationstage an drei Meßstellen (BK 1: 612 m, BK 5: 1013 m, BK 7: 1241 m Seehöhe) für drei Perioden. Spalte I: Ergebnisse aus Gleichung 1 und 4 (Annahmen im Energiehaushalt); Spalte II: Ergebnisse nach Abb. 20 (Temperaturverlauf in Jakobshavn).

Meßstellen:	Ablationstage mit		I Anzahl der Ablationstage Summe a)+b)	II Anzahl der Ablationstage aus der Temperaturkurve
BK 1 = 612 m	a)	b)		
BK 5 = 1013 m	Altschnee	Eis		
BK 7 = 1241 m				
Periode 1:				
25. Juli 1958 – 10. Mai 1959				
BK 1	0	40	40	43
BK 5	0	27	27	30
BK 7	0	24	24	22
Periode 2:				
11. Mai – 25. Juli 1959				
BK 1	9	42	51	61
BK 5	26	26	52	45
BK 7	40	0	40	35
Periode 3:				
26. Juli – 11. August 1959				
BK 1	0	29	29	20
BK 5	0	13	13	14
BK 7	0	0	0	10
Periode 1+2:				
BK 1	9	82	91	104
BK 5	26	53	79	74
BK 7	40	24	64	57
Periode 2+3:				
BK 1	9	71	80	81
BK 5	26	39	65	59
BK 7	40	0	40	45
Periode 1+2+3:				
BK 1	9	111	120	124
BK 5	26	66	92	88
BK 7	40	24	64	67

Tab. 22.

Gerundete Richtwerte für die Zusammensetzung des Energiehaushaltes im Ablationsgebiet für verschiedene Oberflächenbeschaffenheit (Schnee, Eis) und verschiedene Ablationszeiten.

a) Schneeschmelzung:		
Globalstrahlung (cal/cm ² d)	600	
Albedo	70 %	
Absorbierte Globalstrahlung (cal/cm ² d)		+ 180
Langwellige Strahlungsbilanz (cal/cm ² d)		- 80
Fühlbarer Wärmestrom (cal/cm ² d)		+ 30
Latenter Wärmestrom (cal/cm ² d)		- 30
Eiserwärmung (cal/cm ² d)		- 30
Summe		+ 70 cal/cm ² d
b) Hochsommerliche Ablationsperiode, Eisoberfläche:		
Globalstrahlung (cal/cm ² d)	650	
Albedo	40 %	
Absorbierte Globalstrahlung (cal/cm ² d)		+ 380
Langwellige Strahlungsbilanz (cal/cm ² d)		- 80
Fühlbarer Wärmestrom (cal/cm ² d)		+ 95
Latenter Wärmestrom (cal/cm ² d)		- 30
Eiserwärmung (cal/cm ² d)		- 25
Summe		+ 330 cal/cm ² d
c) Spätsommerliche Ablationsperiode, Eisoberfläche:		
Globalstrahlung (cal/cm ² d)	400	
Albedo	40 %	
Absorbierte Globalstrahlung (cal/cm ² d)		+ 240
Langwellige Strahlungsbilanz (cal/cm ² d)		- 80
Fühlbarer Wärmestrom (cal/cm ² d)		+ 40
Latenter Wärmestrom (cal/cm ² d)		- 25
Eiserwärmung (cal/cm ² d)		- 25
Summe		+ 150 cal/cm ² d

Mittlerer Energieverbrauch der Eisschmelzung für eine gesamte Ablationsperiode:

Da im Verlauf einer gesamten Ablationsperiode die zur Eisschmelzung verbrauchte Energie variiert (hochsommerliche Ablationszeit 330 cal/cm² d, die spätsommerliche Ablationszeit 150 cal/cm² d), wird das Mittel über eine gesamte Ablationszeit davon abhängen, wie sich die Ablationstage gewichtsmäßig auf beide Perioden aufteilen.

Auf Grund von *Tab. 20* kann ein typisches Mittel in folgender Weise berechnet werden: Periode 1+2 (25. Juli 1958–25. Juli 1959) ist eine Ablationsperiode, die sowohl hochsommerliche als auch spätsommerliche Ablationsbedingungen einschließt. Die Eisablation (Summe der drei

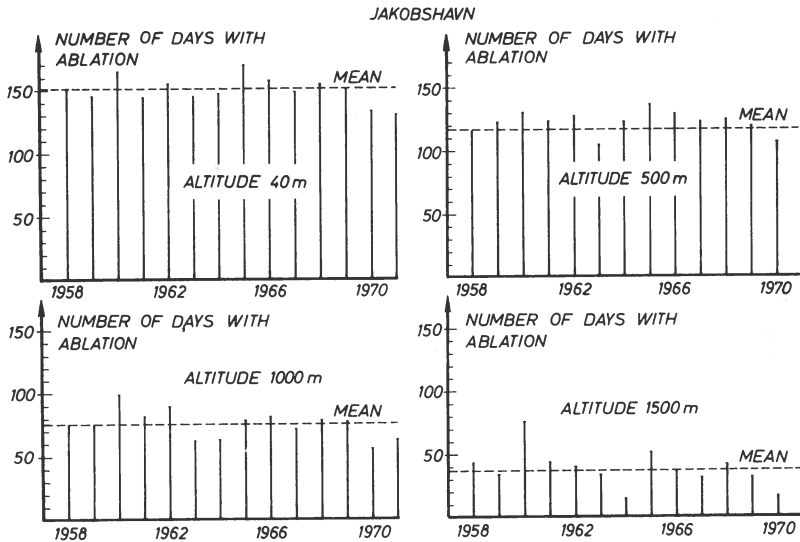


Abb. 25. Anzahl der Ablationslage, ermittelt aus dem Tagestemperaturverlauf an der Küstenstation Jakobshavn für die Jahre 1958–1971 in 4 verschiedenen Seehöhen.

Meßstellen) beträgt 455 cm Wasser; dieser Betrag wird in 159 Tagen (Summe der Ablationstage für Eisablation an den drei Meßstellen nach Tab. 21 Spalte b) geschmolzen. Daraus ergibt sich ein mittlerer Energieverbrauch von $230 \text{ cal/cm}^2 \text{ d}$.

Diskussion der Voraussetzungen:

Das hier gezeigte Verfahren zur Bestimmung der Eisablation aus der Dauer der Ablationsperiode kann natürlich Messungen nicht ersetzen. Zweifellos besteht jedoch wegen der geringen Anzahl von Meßserien und wegen des großen Aufwandes der Bestimmung der Eisablation in einem Höhenprofil das Bedürfnis, die wenigen, vorhandenen Meßdaten für weitere Extrapolationen zu verwenden. In diesem Sinne ist dieses Verfahren zu verstehen.

Die Möglichkeit, aus den Lufttemperaturen in Jakobshavn auf die Dauer der Ablationszeit zu schließen ist eine Grundannahme, die in diesem Rahmen nur durch das befriedigende Ergebnis gestützt wird. Ähnliche, jedoch ausführlichere Überlegungen wurden von H. HOINKES, 1970 im alpinen Bereich angewendet.

Die zweite Grundannahme ist, daß die zur Schmelzung verwendete Energie ($\text{cal/cm}^2 \text{ d}$) sowohl von der Jahreszeit (Sommer, Herbst), als auch der Oberflächenbeschaffenheit (Schnee, Eis), nicht jedoch von der Seehöhe abhängt. In der spätsommerlichen Ablationsperiode oder bei Schneeoberfläche ist der Wasserwert der täglich geschmolzenen Schichte kleiner als jener, der während der hochsommerlichen Ablationsperiode

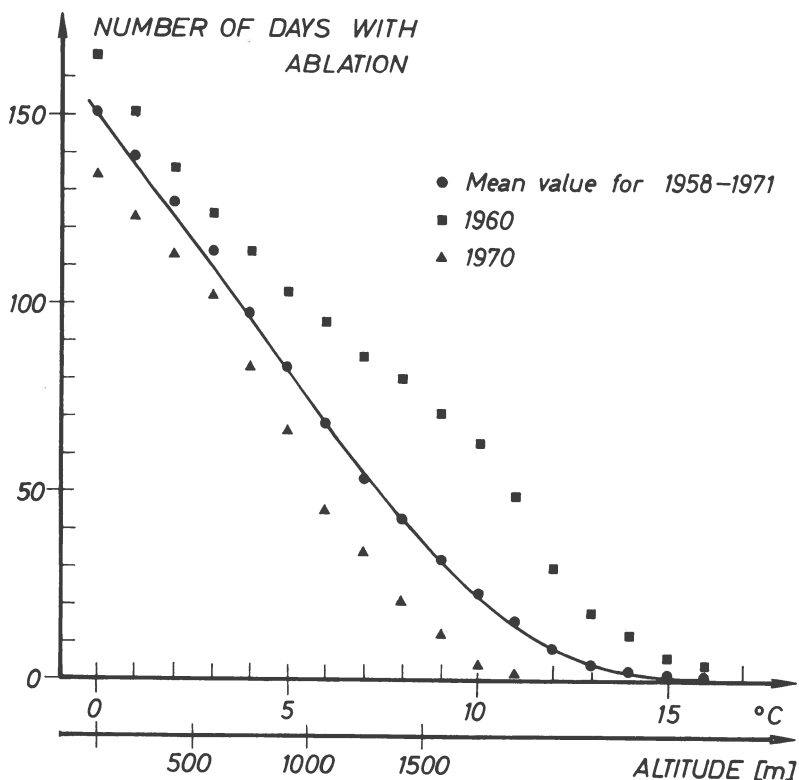


Abb. 26. Anzahl der Ablationstage in Abhängigkeit von der Seehöhe, gemittelt über die Jahre 1958 bis 1971, sowie Verlauf für die beiden extremen Jahre 1960 und 1970. Ermittlung aus dem Tagestemperaturverlauf an der Küstenstation Jakobshavn.

oder bei Eisoberfläche auftritt. Die Annahme, daß die täglichen Ablationswerte unabhängig von der Seehöhe sind, erscheint im ersten Augenblick nicht sinnvoll zu sein. Man müßte erwarten, daß in tieferen Regionen wegen der höheren Lufttemperatur auch mehr fühlbare Wärme verfügbar ist und daher mehr Eis geschmolzen wird als in höher liegenden Regionen. Die Erfahrung zeigt jedoch, daß mit einem etwa konstantem Wert der täglichen Eisschmelzung gerechnet werden kann. Der für eine gesamte Ablationsperiode gefundene Wert des Nettoablationsgradienten (Abhängigkeit der Eisablation von der Seehöhe) resultiert daher vorwiegend aus der unterschiedlichen Dauer der Ablationsperiode in verschiedenen Höhen. Topographische Unterschiede im Ablationsgebiet (Neigungsänderungen, Expositionsänderungen) spielen im Falle eines Inlandeisprofils vermutlich keine besondere Rolle.

4.7 Auswertung für die Periode 1958–1971

Für insgesamt 14 Jahre (1958–1971) wurde die Anzahl der Ablationstage in Abhängigkeit von der Seehöhe nach der besprochenen Methode berechnet und in *Abb. 25* für vier Höhenbereiche dargestellt. Die Temperatur-Summenhäufigkeiten wurden als Mittelwerte zusammen mit den extremen Fällen (1960, 1970) in *Abb. 26* zum Vergleich gegenübergestellt. Nach dieser Darstellung kann die Zahl der Ablationstage im weiten Bereich variieren, wobei auffällt, daß die Streubreite im Höhenbereich 1000–1500 m Seehöhe am größten ist. In Ermangelung von Ablationsmessungen können daraus keine weiteren Schlußfolgerungen gezogen werden.

Literaturverzeichnis

- AMBACH, W., 1963: Untersuchungen zum Energieumsatz in der Ablationszone des Grönländischen Inlandeises (Camp IV-EGIG), 69°40'05" N, 49°37'58" W). Expedition Glaciologique Internationale au Groenland Vol. 4 No. 4, auch: *Meddr Grønland* Bd. 174, Nr. 4.
- 1968: Ein Beitrag zur Kenntnis des Wärmehaushaltes des Grönländischen Inlandeises, Vorläufige Ergebnisse, EGIG 1967. *Polarforschung* Bd. VI, Jg. 38, Nr. 1/2, 207–211.
- 1972: Zur Schätzung der Eis-Nettoablation im Randgebiet des Grönländischen Inlandeises. *Polarforschung*, 42. Jg. Nr. 1, 18–23.
- 1974: The influence of cloudiness on the net radiation balance of a snow surface with high albedo. *J. Glaciology* Vol. 13, No. 67, 73–84.
- AMBACH, W., E. BESCHORNER & H. HOINKES, 1963: Über die Eichung des Strahlungsbilanzmessers nach R. Schulze (Lupolengerät). *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, Serie B, 13, 76–95.
- ETIENNE, E., 1940: Expeditionsbericht der Grönland-Expedition der Universität Oxford 1938. *Veröff. Geoph. Inst. d. Univ. Leipzig* 13.
- FRISTRUP, B., 1966: The Greenland Ice Cap. Rhodos, Kopenhagen.
- HOINKES, H., 1970: Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. *Z. Gletscherkunde und Glazialgeologie* VI, Heft 1/2, 37–90.
- KUHLMAN, H., 1959: Weather and ablation observation at Sennekavsak in Umanak District. *Meddr Grønland* Bd. 158, Nr. 5, 19–50.
- LISTER, H. & P. F. TAYLOR, 1961: Heat Balance and Ablation on an Arctic Glacier. *Meddr Grønland* Bd. 158, Nr. 7, 1–54.
- LOEWE, F., 1964: Das Grönländische Inlandeis nach neuen Feststellungen. *Erdkunde*, Archiv für wissenschaftliche Geographie. Bd. XVIII, Jg. 3, 189–202.