

UEBER MESSUNGEN DER ABLATION UND DES WAERMEUMSATZES AUF ALPENGLETSCHERN MIT BEMERKUNGEN UEBER DIE URSACHEN DES GLETSCHERSCHWUNDES IN DEN ALPEN

von

H. HOINKES

Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck

Abstract

On measurements of ablation and heat balance on alpine glaciers and some remarks on the causes of glacier recession in the alps.

This report deals with measurements of heat balance and ablation on Eastern Alpine glaciers which have been carried out during a total of 45 days since the summer of 1950. The main result of this investigations is that in flat glaciated areas at approx. 3000 m above sea level 81-84% of the energy causing ablation is supplied by shortwave radiation of the sun and sky. Only 16-19% are furnished from the air in the form of actual and latent heat. On glacier tongues at altitudes of approx. 2300 m the percentage of ablation caused by radiation is 58-65% only. This is primarily an effect of the shortened duration of sunshine in the deeper valleys. The supply of actual and latent heat from the air can, at a maximum, reach a value of 15-30% on glacier tongues. Evaporation from the ice as well as heat supply by liquid precipitation is negligible during the normal ablation period June till September.

It is to be expected therefore that the Alpine glaciers will primarily react to variations of radiation and albedo during the months of June to September. The effects of changing summer temperatures are considered insufficient to cause the vast changes of the ice cover. The variations of the duration of summer sunshine and the number of days with snowfall as a rough indication of albedo, respectively, are in perfect agreement with the behavior of Alpine glaciers during the last 60 years (Fig. 2).

Zusammenfassung

Es wird über Messungen des Wärmeumsatzes und der Ablation auf Gletschern der Ostalpen berichtet, die seit dem Sommer 1950 an bisher 45 Tagen durchgeführt worden sind. Das wichtigste Ergebnis dieser Messungen ist in der Feststellung zu erblicken, dass in den hochgelegenen Gletscherbecken der Alpen bei etwa 3000 m Höhe 81 % bis 84 % der zur Ablation benötigten Energie durch die Absorption von kurzwelliger Sonnen- und Himmelsstrahlung geliefert wird. Die Zufuhr fühlbarer und latenter Wärme aus der Luft trägt nur 19 % bis 16 % zum Wärmehaushalt bei. Auf den tief gelegenen Gletscherzungen bei etwa 2300 m Höhe ist der Anteil der Strahlung am Wärmeumsatz mit 58 % bis 65 % geringer. Das ist vorwiegend eine Folge des kürzeren Tagbogens der Sonne in den tief eingeschnittenen Tälern. Die Zufuhr fühlbarer bzw. latenter Wärme aus der Luft kann auf den Gletscherzungen bis zu 30 % bzw. 15 % des Wärmeumsatzes betragen. Die Verdunstung von Eis sowie die Wärmezufuhr durch flüssigen Niederschlag kann während der Hauptablationszeit Juni bis September in den Alpen vernachlässigt werden.

Die Gletscher in den Alpen müssen demnach besonders auf Veränderungen der Sonnenstrahlung und der Albedo in den Monaten Juni bis September reagieren. Die Schwankungen der Sommertemperatur dürften quantitativ nicht ausreichend sein, um die gewaltigen Veränderungen in der Eisbedeckung zu erklären. Ein Vergleich der sommerlichen Sonnenscheindauer bzw. der Zahl der Tage mit Schneefall als rohes Mass für die Veränderungen der Albedo mit dem Verhalten der Gletscher während der letzten 60 Jahre (vgl. Fig. 2) gibt eine bis in Einzelheiten reichende und auch quantitativ befriedigende Übereinstimmung.

* * *

Die Gletscher der Alpen und, soviel wir wissen, der ganzen Erde schwinden seit etwa 100 Jahren; seit der letzten Periode schwachen und uneinheitlichen Vorrückens zwischen 1912 und 1925 kann geradezu von einem Verfall der Alpengletscher gesprochen werden. An der Deutung dieses grossartigen weltweiten geophysikalischen Phänomens haben zahlreiche hervorragende Forscher gearbeitet, mit besonderer Tatkraft H. WSOU, AHLMANN, H. U. SVERDRUP und C. C. WALLÉN. Diese in ihren Methoden und Resultaten überaus wertvollen Arbeiten haben uns gelehrt, dass die Lebensbedingungen der Gletscher Skandinaviens, sowie auf Island, Spitzbergen und Grönland bedeutende Unterschiede aufweisen, die eine Verallgemeinerung der Ergebnisse und ihre Anwendung in anderen Klimagebieten nicht zulassen. Die in den Alpen zahlreich unternommenen Versuche, mit langjährigen Beobachtungsreihen von Temperatur und Niederschlag das Verhalten der Gletscher zu erklären, haben zumindest quantitativ keinen überzeugenden Erfolg gehabt; offenbar repräsentieren die beiden genannten klimatischen Elemente die Lebensbedingungen der Gletscher nur unzureichend. Nach unseren heutigen Kenntnissen dürften die Schwankungen in der Ernährung durch feste Niederschläge für den Haushalt der Gletscher von geringerer Bedeutung sein, als es die wechselnden Ablationsbedingungen sind (^{2, 13}).

Die für die Ablation erforderlichen Energiemengen werden der Gletscheroberfläche zur Verfügung gestellt durch :

1. Absorption von kurz- und langwelliger Sonnen- und Himmelsstrahlung,
2. Zufuhr von fühlbarer Wärme aus der Luft durch turbulente Vermischung,
3. Zufuhr von latenter Wärme durch Kondensation von Wasserdampf am Eis,
4. Zufuhr von Wärme durch flüssigen Niederschlag.

Die relative Bedeutung dieser vier Energiequellen muss zumindest in der Grössenordnung bekannt sein, bevor gehofft werden kann, physikalisch vernünftige Beziehungen zwischen dem Verhalten der Gletscher und den Klimaschwankungen zu finden. Mit dieser Absicht wurde seit dem Sommer 1950 in vier mehrtägigen Messreihen versucht, den Wärmeumsatz der Gletscheroberfläche zu bestimmen. Gleichzeitig wurden Messungen der Ablation durchgeführt, um die bei schmelzender Gletscheroberfläche positive Summe der Energieströme direkt zu kontrollieren; bei gefrorener Gletscheroberfläche wurde die dann negative Summe durch Messung der Eistemperatur in verschiedenen Tiefen überwacht. Die Messungen erfolgten zunächst nur über horizontalen apenen Eisflächen, doch wurde Ort und Zeit der Messungen variiert, wie aus folgender Zusammenstellung hervorgeht :

	Ort	Höhe	Zeit	Dauer
1.	Vernagtferner, Oetztaler Alpen	2973 m	21. bis 31.VIII. 1950	11 Tage
2.	Hornkees, Zillertaler Alpen	2262 m	3. bis 9. IX. 1951	7 „
3.	Vernagtferner, Oetztaler Alpen	2969 m	21.VII. - 4.VIII. 1952	15 „
4.	Gepatschferner, Oetztaler Alpen	2300 m	8. bis 16. IX. 1953	9 „

Die Messreihen 1 und 3 repräsentieren die Verhältnisse in einem relativ hochgelegenen, weit ausgedehnten Gletscherbecken, die Messreihen 2 und 4 dagegen diejenigen auf noch relativ weit herabreichenden nordexponierten Gletscherzungen. Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 1 enthalten (*).

TABELLE 1
Ergebnisse von Ablations- und Wärmeumsatzmessungen auf Gletschern der Ostalpen

Messreihe	Tage	Ablation in 24 Std. cm Wasser			Geschmolzen durch		Bewölkung Mittel
		Mittel	Max.	Min.	Strahlung	übr. met. Faktoren	
Vernagt I	11	4.64	6.51	1.66	81 %	19 %	4.8
Vernagt II	13	3.95	5.14	2.35	84 %	16 %	5.1
Horn	7	4.32	7.42	1.25	58 %	42 %	4.4
Gepatsch	7	3.16	4.44	1.54	ca 65 %	35 %	3.4

(*) Bezüglich der verwendeten Arbeitsmethoden und Instrumente sei auf die ausführlichen Veröffentlichungen (^{1, 5}) verwiesen.

Die Ablation, gemessen in je 10 Bohrlöchern, beträgt im Mittel 4.5 cm Eis bzw. 4.1 cm Wasser in 24 Stunden. Die täglichen Ablationswerte schwanken ungeachtet der verschiedenen Lage der Arbeitsplätze erstaunlich wenig; es scheint, dass die höheren jährlichen Ablationsbeträge auf den tieferen Teilen der Gletscherzungen vorwiegend eine Folge der dort länger dauernden Ablationszeit sind. Die Strahlung liefert bei den Messreihen Vernagt I und II 81 % bzw. 84 % der zur Ablation erforderlichen Energie. Der dominierende Einfluss der Strahlung ist nicht nur bei heiterem Wetter vorhanden; die 24 Arbeitstage am Vernagtferner hatten eine mittlere Bewölkung von 5.0, darunter waren 3 heitere und 3 trübe Tage, an 20 Tagen wurde Niederschlag beobachtet. Der hohe Strahlungsanteil am Wärmeumsatz wird verständlich, wenn man berücksichtigt, dass der Tagbogen der Sonne in den weiten oberen Gletscherbecken relativ gross ist (bei der Messreihe Vernagt I 11 Stunden, bei Vernagt II 12 Std.), dass ferner die Lufttemperatur bei rund 300 m Höhe auch im Hochsommer nicht viel über Null Grad ansteigt (Mitteltemperatur Vernagt I 4.9° C, Vernagt II 2.2° C) und daher während der Nacht die Gletscheroberfläche oft gefroren ist. Im Gegensatz dazu zeigen die beiden Messreihen auf den tiefer gelegenen Gletscherzungen nur einen Strahlungsanteil am Wärmeumsatz von 58 % am Hornkees und etwa 65 % am Gepatschferner. Hier ist nicht nur wegen der späteren Jahreszeit, sondern wegen des stark überhöhten Horizontes der Tagbogen der Sonne kürzer (am Hornkees 8 Stunden, am Gepatschferner 9 1/2 Stunden); zudem friert wegen der geringeren Höhe die Gletscheroberfläche seltener. Der auf den geneigten Gletscherzungen häufig anzutreffende turbulente Schwerewind bewirkt einen grossen Austauschkoeffizienten und daher eine vermehrte Zufuhr von fühlbarer und latenter Wärme aus der Luft (*).

Die aus der Luft zugeführte Menge fühlbarer Wärme trägt zum Wärmeumsatz nur etwa 15 bis maximal 30 % bei, die bei der Kondensation von Wasserdampf am Eis freiwerdende latente Wärme etwa 5 bis maximal 15 %. Während der Hauptablationszeit in den Alpen (Juni bis September) beobachtet man annähernd gleich oft Kondensation von Wasserdampf am Eis, wie Verdunstung. Die verdunstete Eismenge ist vernachlässigbar gering und beträgt selten 1 % der Gesamtablation; die dafür verbrauchte Energie muss jedoch im Wärmeumsatz berücksichtigt werden. Im Winter und Frühjahr ist der Einfluss der Verdunstung ohne Zweifel jedoch grösser⁽¹⁹⁾. Die durch flüssigen Niederschlag an das Eis abgegebene Wärmemenge ist ebenfalls stets sehr gering.

Sehr gut lässt der Tagesgang der Ablation (Fig. 1) die verschiedene relative Bedeutung der beiden wichtigsten Energiequellen erkennen. Bei den beiden Messreihen Vernagt I und II nimmt die Ablation fast linear zu bis zum ausgeprägten Maximum im Stundenintervall 12 bis 13 Uhr, um dann ebenso rasch wieder abzunehmen (vgl. Fig. 1, B); in den hochgelegenen Gletscherbecken dominiert als Energiequelle die Strahlung. Die auf den Zungen von Hornkees und Gepatschferner gewonnenen Messreihen zeigen wohl auch das wenig ausgeprägte Maximum zur Zeit des Sonnenhöchststandes, aber der Anstieg am Vormittag erfolgt rascher, der Abfall am Nachmittag zunächst stark verzögert, so dass zwischen 10 und 16 Uhr die Ablationswerte sehr einheitlich sind. Auf den Gletscherzungen wird die Strahlung bereits wesentlich durch die Zufuhr fühlbarer und latenter Wärme aus der Luft ergänzt. Die sehr ausgeprägten Tagesgänge der Ablation zeigen auch, dass auf den Gletschern der Alpen — eben wegen der überwiegenden Strahlungsenergie — der Unterschied in den Ablationsbedingungen zwischen Tag und Nacht meist bedeutender ist, als der durch die Witterungsbedingungen hervorgerufene. Entgegen dem physiologischen Eindruck beträgt die positive Strahlungsbilanz der Gletscheroberfläche im Minimum (bei trübem Wetter) noch etwa 1/3 bis 1/4 des Maximums. Andererseits muss der bei Strahlungswetter eintretende Energieverlust infolge langweiliger Ausstrahlung durch die Einstrahlung des Tages erst kompensiert werden. Nach den Messungen von W. AMBACH⁽¹⁾ ist der effektive Energieverlust des Gletschers bei einer Eindringtiefe des Nachtfrostes bis etwa 15 cm mit 10 bis 15 cal cm⁻² anzusetzen; die Differenz auf den Betrag der nächtlichen effektiven Ausstrahlung wird zu gleichen Teilen von je etwa 20 cal cm⁻² durch freiwerdende Schmelzwärme und durch konvektive Wärmezufuhr ausgeglichen.

Die Absorption von Sonnen- und Himmelsstrahlung als wichtigste Energiequelle für die Ablation kann beeinflusst werden durch Veränderungen in der Qualität oder Quantität der Strahlung selbst, oder durch Änderungen in der Albedo der Eis- und Firnflächen. Aperees Gletschereis reflektiert je nach dem Grad seiner Verschmutzung 20 bis 40 % der auffallenden Strahlung, Firnschnee 40 bis 60 %, Neuschnee aber 70 bis 90 %. Eine Neuschneedecke im Sommer vermag somit die Ablationsbedin-

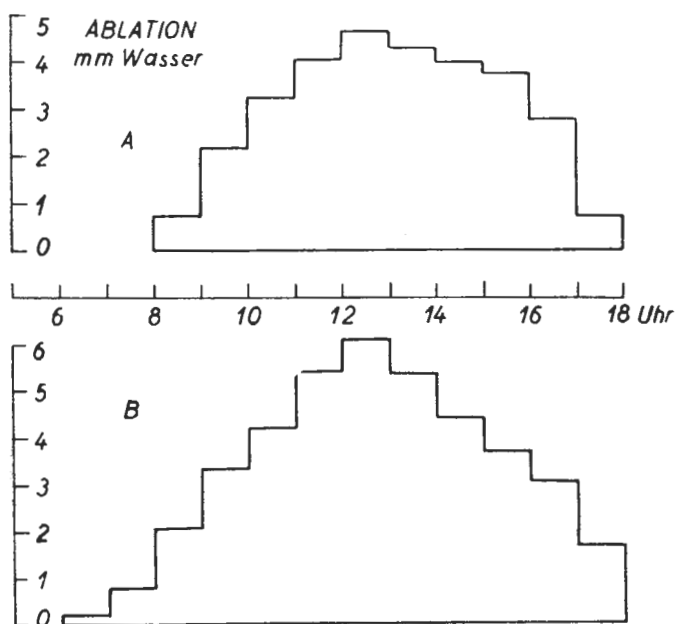


Fig. 1

Mittlerer Tagesgang der Ablation, mm Wasser

A Hornkees, 2262 m, 7 Tage September 1951,

Gepatschferner, 2300 m, 7 Tage September 1953.

B Vernagtferner, 2973 m, 11 Tage August 1950.

Vernagtferner, 2969 m, 13 Tage Juli 1952

gungen auf den Gletschern gründlich dadurch zu ändern, dass bedeutende Energiemengen ungenutzt reflektiert werden. Die Grössenordnung der reflektierten (ohne den Neuschnee aber zur Ablation verfügbaren) Energien beträgt einige Hundert Kalorien im Tag⁽¹¹⁾; die durch Temperaturschwankungen verursachten Aenderungen in der Energiezufuhr sind dagegen nur mit einigen Zehner-Kalorien zu bewerten. Auf Schwankungen der Dauer und Intensität der Sonnenstrahlung bzw. der Albedo werden die Gletscher in den Alpen also weit stärker reagieren müssen, als auf Schwankungen der Lufttemperatur oder des Niederschlages.

Das vorhandene Beobachtungsmaterial reicht aus, um die letzten 60 Jahre daraufhin zu überblicken. Bekanntlich hat der seit 1856 in den Alpen andauernde Gletscherschwund um 1890 eine angedeutete und von 1912 bis 1925 eine stärker ausgeprägte Unterbrechung erfahren. Betrachtet man die für die Ablation wichtigsten Monate Juni bis September des genannten Zeitraumes und ergänzt man die Sonnenscheindauer durch die Zahl der Tage mit Schneefall, um die Aenderungen der Albedo wenigstens angenähert zu erfassen, dann erhält man für einige Hochstationen in den Alpen das in Fig. 2 wiedergegebene Bild. Die sommerliche Sonnenscheindauer und die Zahl der Schneefälle, beide ausgeglichen nach der Formel $(a + 2b + c)/4$ schwanken stark, an den einzelnen Stationen aber im wesentlichen übereinstimmend. Nach sonnenscheinreichen Sommern um 1900 herum, verbunden mit einer sehr geringen Zahl von Schneefällen, durch die der Gletschervorstoss von 1890 sein Ende fand, beginnt um 1908 eine Depression der Sonnenscheindauer, die mit Unterbrechung durch den strahlungsreichen Sommer 1911 bis 1916 dauert und von einer sehr starken Zunahme der sommerlichen Schneefälle begleitet ist. 1912 beginnen die Gletscher darauf zu reagieren und 1919 sind 70 % der Gletscher in der Schweiz im Vorstossen. 1925 erfährt die Sonnenscheindauer an den Gipfelstationen Sonnblitz und Säntis erneut eine erhebliche Verminderung (sie ist im Tal weniger ausgeprägt) zugleich mit einer schwächeren Zunahme der Schneefälle; 52 % der Gletscher in der Schweiz reagieren darauf mit einem Vorstoss⁽⁸⁾. Die Sonnenscheindepressionen nach 1930

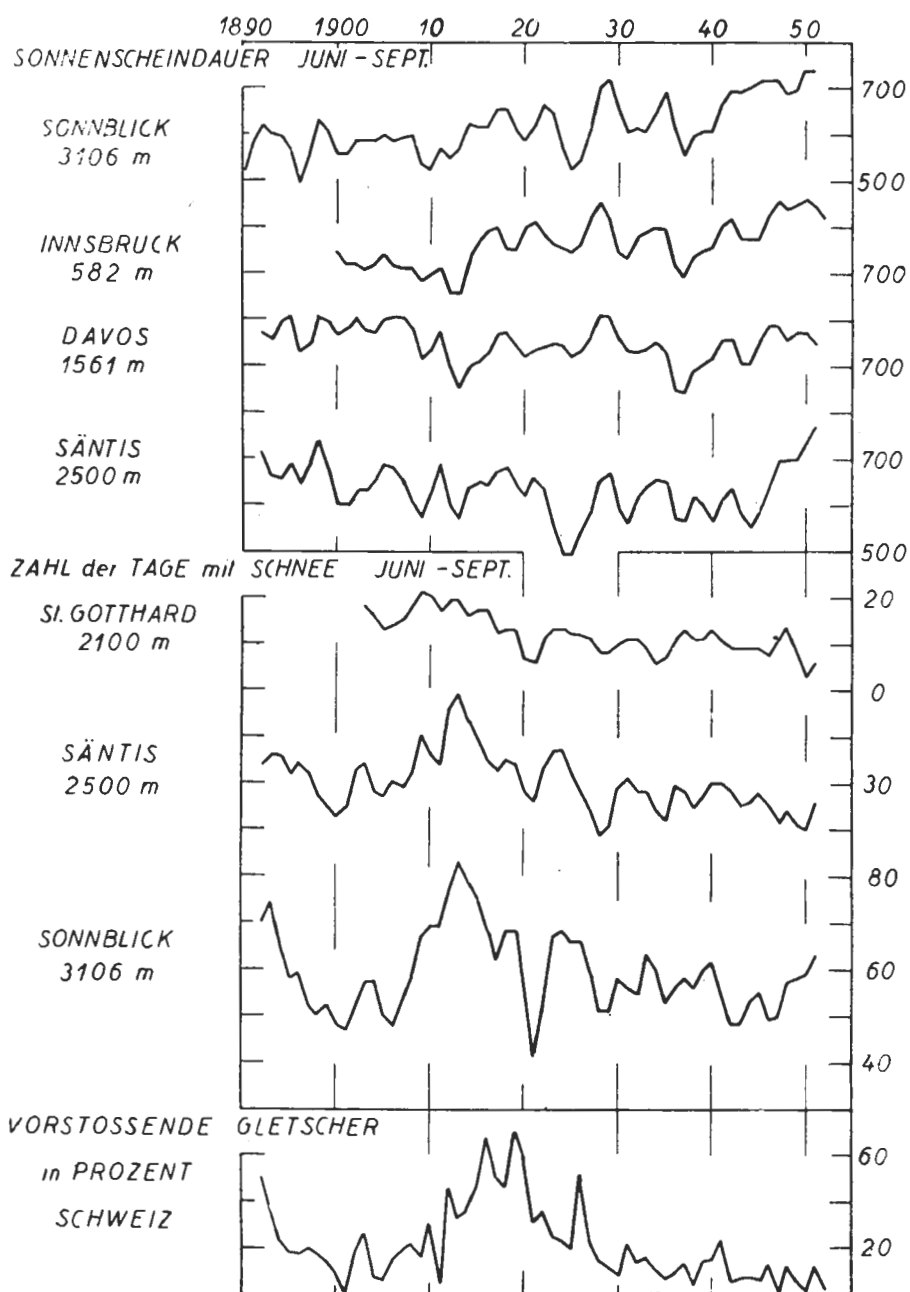


Fig. 2

Sonnenscheindauer (Stunden) und Zahl der Tage mit Schnee in den Monaten Juni bis September an Hochstationen der Alpen, ausgeglichen nach $(a + 2b + c)/4$. Vorstossende Gletscher in der Schweiz in Prozent der kontrollierten, unausgeglichen.

und nach 1936 äussern sich noch einmal in einer schwächeren Tendenz zu Gletschervorstoss (1931 22 % und 1941 24 % der Gletscher in der Schweiz). Seither nimmt die Sonnenscheindauer an sämtlichen Stationen kräftig zu und die Zahl der Tage mit Schnee ab. Der Zusammenhang der Kurve, die die Zahl der vorstossenden in Prozent der Gesamtzahl der kontrollierten Gletscher in der Schweiz angibt, mit den Kurven der Sonnenscheindauer und besonders der Neuschneefälle ist eindeutig und quantitativ ausreichend.

In den letzten Jahren haben verschiedene Autoren auf Grund sorgfältiger Studien das Ergebnis erhalten, dass die Sommertemperatur als wichtigster Einflussfaktor für das Verhalten der Alpengletscher zu werten sei (^{2, 9, 12, 15}). Dieses Ergebnis steht nicht in Widerspruch mit den hier vorgetragenen Messergebnissen, nach denen die Strahlung die Hauptenergiequelle für die Ablation der Alpengletscher ist, solange sich damit nicht die Vorstellung verbindet, dass der bei höherer Sommertemperatur grössere Wärmeübergang aus der Luft zum Eis quantitativ für die stärkere Ablation ausreichend sei. Im alpinen Klima bedeutet in den meisten Fällen hohe Sommertemperatur strahlungsreiche Witterung mit seltenen Kaltluftvorstössen und Schneefällen auf den Gletschern. Höhere Lufttemperatur wirkt natürlich in geringem Masse an der grösseren Ablation mit, jedoch scheint es, dass sie vorwiegend als Indikator für höhere Strahlung und verringertes Reflexionsvermögen der Gletscherflächen anzusehen sei. Th. ZINGG (¹⁵) betont ausdrücklich den rein formalen Charakter der von ihm gefundenen Beziehung zwischen positiver Temperatursumme und Schmelzwassermenge. Auch H. TOLLNER (¹²) berücksichtigt die Veränderungen von Strahlung und Albedo zumindest als Zusatzeffekte zu den Schwankungen der Lufttemperatur. Eine Zunahme der Sommertemperaturen im Alpenraum ist ohne Zweifel vorhanden (^{12, 11}), aber sie beträgt seit dem letzten Minimum im Jahre 1912 von zahlreichen Schwankungen unterbrochen erst etwa 1° C. Als einziger hat J. MAURER (⁷) 1914 darauf hingewiesen, dass der gewaltige Schwund der Alpengletscher seit 1856 quantitativ nur völlig unzureichend durch die Erhöhung der Lufttemperatur zu erklären sei dass vielmehr auch damals eine « äusserst wirksame » Strahlungsperiode (1856-1877) den Ausschlag gegeben habe, verbunden mit einer gleichzeitig eintretenden Niederschlagsabnahme in der Firnregion. Nach P. GOETZ (³) haben ab 1915 die Winterniederschläge in Arosa abgenommen, ein Umstand, der sich auch für den derzeitigen Gletscherschwund verstärkend auswirken muss, da ihm mehr als nur lokale Bedeutung zukommen scheint (¹²). J. MAURER hat den Anteil der Strahlungsenergie an der Gesamtablation in den Alpen auf 65 bis 70 % geschätzt und damit eine vermutlich sehr nahe zutreffende Zahl angegeben, wenn man alle Gletscher berücksichtigt.

Die Ergebnisse der bisherigen quantitativen Messungen des Wärmeumsatzes auf Alpengletschern zusammenfassend, kann folgendes gesagt werden: Die Absorption von Sonnen- und Himmelsstrahlung ist die wichtigste Energiequelle für die Ablation. Daraus kann gefolgert werden, dass der Gletscherschwund des letzten Jahrhunderts in den Alpen nur zu geringem Teil eine Folge der ansteigenden Sommertemperatur ist, sondern vorwiegend auf den geänderten Charakter der Sommerwitterung zurückgeführt werden muss. Dieser äussert sich durch hohe, zum Teil noch zunehmende Sonnenscheindauer bei verringerter Albedo als Folge gleichzeitiger Abnahme der Häufigkeit von Kaltlufteinbrüchen mit Schneefall auf den Gletschern. Die Arbeiten sollen fortgeführt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- (¹) AMBACH, W. *Ueber den nächtlichen Wärmeumsatz der gefrorenen Gletscheroberfläche*. Dissertation Innsbruck 1953.
- (²) BILLWILLER, R. Temperatur und Niederschlag im schweizerischen Alpengebiete während des letzten Gletschervorstosses. *Ann. Schweiz. Meteorol. Zentralanstalt* 67, Anh. 6, 1930.
- (³) GÖTZ, F. W. P. *Klima und Wetter in Arosa*. Frauenfeld 1954.
- (⁴) HOINKES, H. und N. UNTERSTEINER, Wärmeumsatz und Ablation auf Alpengletschern I. Vernagtferner (Oetztaler Alpen), August 1950. *Geograf. Ann.* XXXIV, 99, 1952.
- (⁵) HOINKES, H. Wärmeumsatz und Ablation auf Alpengletschern II. Hornkees (Zillertaler Alpen), September 1951. *Geograf. Ann.* XXXV, 116, 1953.
- (⁶) HOINKES, H. Der Einfluss des Gletscherwindes auf die Ablation. *Zeitschr. f. Gletscherkunde u. Glazialgeol.* Bd. III, Heft 1, 18, 1954.

- (⁷) MAURER, J. Ueber Gletscherschwund und Sonnenstrahlung. *Meteorol. Zeitschr.* **31**, 23, 1914.
- (⁸) MAURER, J. Neuer Rückzug der Schweizer Gletscher. *Meteorol. Zeitschr.* **52**, 22, 1935.
- (⁹) MORAWETZ, S. Zur Frage der letzten Gletscherschwankungen in den Ostalpen. *Zeitschr. f. Gletscherkunde*, XXVII, 36, 1941.
- (¹⁰) QUÉRVAIN, M. de und Th. ZINGG, Ueber die Verdunstung der alpinen Schneedecke. *U.G.G.I., Assoc. Int. d'Hydrologie, Publ. No. 32, Ass. Gen. Bruxelles* 1951, Tome I, 154, Louvain 1952.
- (¹¹) SAUBERER, F. und I. DIRMHIRN, Der Strahlungshaushalt horizontaler Gletscherflächen auf dem Hohen Sonnblick. *Geograf. Ann.* XXXIV, 261, 1952.
- (¹²) TOLLNER, H., Die meteorologisch-klimatischen Ursachen der Gletscherschwankungen in den Ostalpen während der letzten zwei Jahrhunderte. *Mitt. Geogr. Ges. Wien*, **96**, 31, 1954.
- (¹³) WALLÉN, C. C., Influences affecting glacier extension in Northern Sweden. *U.G.G.I., Assoc. Int. d'Hydrologie, Publ. No. 32, Ass. Gen. Bruxelles* 1951, Tome I, 145, Louvain 1952.
- (¹⁴) WINTER, H., Änderungen im Sommerklima seit 150 Jahren. *Archiv f. Meteorol., Geophys. u. Bioklimatol.* Ser. B, **3**, 82, 1951.
- (¹⁵) ZINGG, Th. Beziehungen zwischen Temperatur und Schmelzwasser und ihre Bedeutung für Niederschlags- und Abflussfragen. *U.G.G.I., Assoc. Int. d'Hydrologie, Publ. No. 32, Ass. Gen. Bruxelles* 1951, Tome I, 266, Louvain 1952.