

Sitzung der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse vom 9. Dezember 1954

Sonderabdruck aus dem Anzeiger der math.-naturw. Klasse der
Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Jahrgang 1954, Nr. 15

(Seite 219 bis 225)

Das wirkll. Mitglied H. Ficker legt eine vorläufige Mitteilung vor, betitelt:

„Über glazial-meteorologische Arbeiten im Sommer 1952.“ (Vorläufige Mitteilung.) Von H. Hoinkes, Innsbruck.

Die in den Jahren 1950 und 1951 begonnenen Untersuchungen des Ablationsprozesses auf Alpengletschern [1, 2] konnten im Sommer 1952 fortgesetzt werden. Es ist dem Verfasser eine angenehme Pflicht, seinen Mitarbeitern W. Ambach (Innsbruck) und Priv.-Doz. Dr. G. Stökl (Wien) für treue Hilfe, sowie der Österreichischen Akademie der Wissenschaften für eine Subvention aus der Zach-Stiftung gebührend zu danken. Die Arbeiten wurden am Vernagtferner (Ötztaler Alpen) in einer Höhe von etwa 2969 m, zwischen 15. Juli und 9. August 1952 durchgeführt; vom 20. Juli bis 4. August konnte eine geschlossene 15tägige Meßreihe der Ablation und der meteorologischen Bedingungen gewonnen werden.

Die Ablationsmessungen (durchgeführt in 10 Bohrlöchern, Kontrolle der Tiefe jede zweite Stunde) wurden durch eine Neuschneedecke am 29. und 30. Juli vorübergehend unterbrochen und während dieser Zeit durch Messungen der Schneehöhe und -dichte ersetzt. In einem Zeitraum von 13 Tagen schmolzen 57.0 cm Eis oder 51.3 cm Wasser, an einem mittleren Tag 4.4 cm Eis oder rund 4.0 cm Wasser. Der überwiegende Teil der Ablation konzentrierte sich mit 49.2 cm Wasser auf die Tagesabschnitte mit Sonne über dem Horizont von 6 bis 18 Uhr, in den Nachtabschnitten ohne nennenswerte kurzweilige Einstrahlung

von 18 bis 6 Uhr schmolzen insgesamt nur 2·1 *cm* Wasser. Der größte Wert innerhalb 24 Stunden war 5·1 *cm* Wasser am 25. Juli, der kleinste 2·4 *cm* Wasser am 28. Juli; an den gleichen Tagen trat auch das Minimum, bzw. Maximum der Bewölkung mit 0·3, bzw. 9·2 ein. Zusammenfallend mit den Extremwerten der Ablation und der Bewölkung wurden auch die Extreme der Globalstrahlung beobachtet; sie erreichte am 25. Juli mit 720 $\text{cal cm}^{-2}\text{Tag}^{-1}$ das Maximum (Abb. 1 unten), am 28. Juli mit 336 $\text{cal cm}^{-2}\text{Tag}^{-1}$ das Minimum. Der Zusammenhang zwischen Ablation und Lufttemperatur war weniger deutlich. Die Registrierung eines Thermohygrographen mit Tagesumlauf in einer Hütte, 130 *cm* über dem Eis, ergab folgende Mittelwerte für den Tagesabschnitt 6 bis 18 Uhr: am 25. Juli 3·5° C, das Maximum trat dagegen mit 5·3° C am 27. Juli ein; am 28. Juli 2·9° C, dagegen das Minimum am 2. August mit 2·4° C. Die analogen Werte für eine Höhe von 10 *cm* über dem Eis waren: 1·5° C am 25. Juli, das Maximum trat mit 2·7° C am 24. Juli ein; 1·7° C am 28. Juli, das Minimum betrug 1·0° C am 2. August. Der Mittelwert der Lufttemperatur war in 10 *cm* Höhe 0·35° C, in 130 *cm* Höhe 2·32° C, die für den Wärmestrom aus der Luft zum Eis bedeutungsvolle Temperaturdifferenz zwischen 10 und 130 *cm* Höhe war somit rund 2° C und damit von der gleichen Größenordnung wie bei den bisherigen Meßreihen Vernagt I [1] und Hornkees [2].

Die Globalstrahlung wurde mit einem Robitzsch-Aktinographen mit Tagesumlauf des Uhrwerkes registriert, die Strahlungsbilanz mit einem ventilierten und mit einem geheizten Strahlungsbilanzmesser, beide gebaut von F. Sauberer, durch 420 Einzelmessungen bestimmt. Die Strahlungsmeßgeräte wurden in situ mit dem Michelson-Aktinometer Nr. 346 mehrfach geeicht. Die Auswertung des Aktinographen ergab in 13 Tagen eine Globalstrahlung von 6726 *cal* auf einen horizontalen Quadratzentimeter. Im gleichen Zeitraum resultierte eine positive Strahlungsbilanz der aperen Gletscheroberfläche von 3460 cal cm^{-2} ; mit dieser Energie können 43·2 *cm* Wasser geschmolzen werden oder rund 84% der beobachteten Gesamtmenge, nur 16% tragen in diesem Fall die übrigen meteorologischen Faktoren zur Ablation bei. Dieses Ergebnis deckt sich in der Größenordnung des Strahlungsanteils an der Ablation gut mit dem am gleichen Arbeitsplatz im August 1950 erhaltenen [1]. Es scheint somit, daß in den hochgelegenen Gletscherbecken der Alpen bei 3000 *m* Höhe die Strahlung mit etwa 80% Anteil am Energieumsatz die wichtigste Energiequelle für die Ablation darstellt.

Es ist bemerkenswert, daß dieser hohe Strahlungsanteil nicht an heiteres Wetter gebunden ist; die mittlere Bewölkung des Meßzeitraumes war nach stündlichen Schätzungen 5·1, es wurden zwei heitere und zwei trübe Tage beobachtet, nur zwei Tage waren niederschlagsfrei.

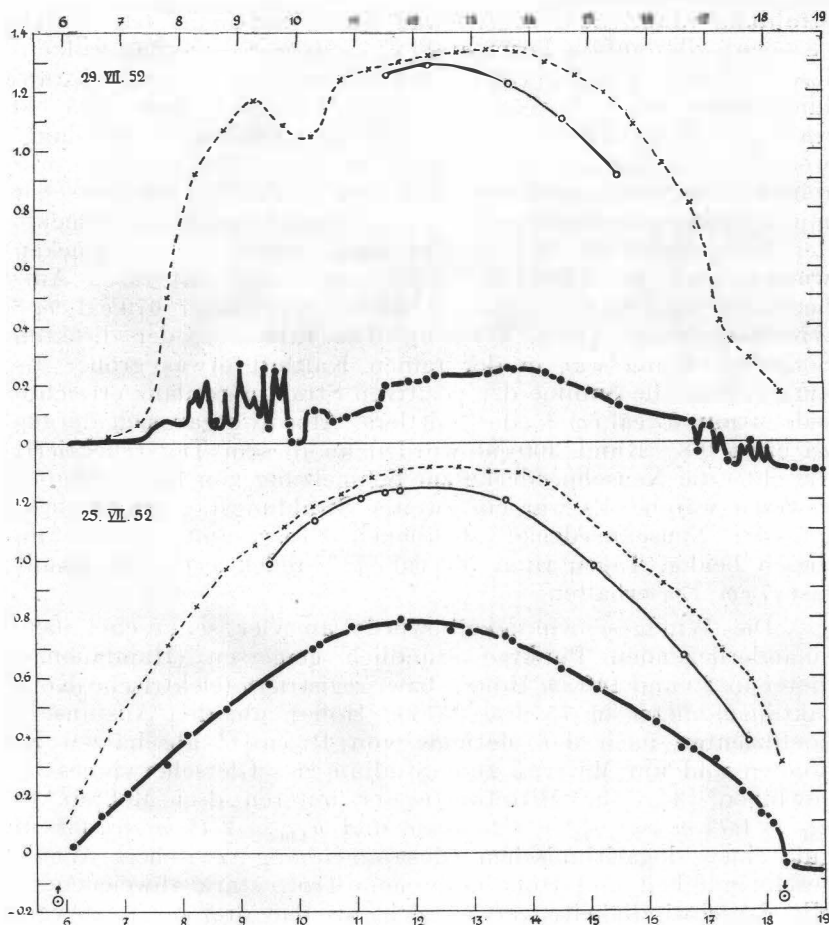


Abb. 1: Der Verlauf von: Globalstrahlung (gestrichelt, Aktinograph Robitzsch, Mittelwerte für 30-Minuten-Abschnitte), direkter Sonnenstrahlung (dünn ausgezogen, Michelson-Aktinometer) und Strahlungsbilanz (stark ausgezogen, ventilierter Strahlungsbilanzmesser von F. Sauberer). Vernagtferner, 2969 m; unten am 25. Juli 1952, Gletscher aper; oben am 29. Juli 1952, Gletscher mit Neuschnee bedeckt.

Von größtem Einfluß auf die Absorption kurzwelliger Strahlungsenergie ist jedoch das wechselnde Reflexionsvermögen der Gletscheroberfläche. Das wurde durch den Neuschneefall in der Nacht vom 28./29. Juli 1952 eindringlich demonstriert. Abb. 1 (s. Seite 221) zeigt den Verlauf von Globalstrahlung (gestrichelt, Mittelwerte für 30 Minuten-Intervalle), direkter Sonnenstrahlung (dünn ausgezogen) und Strahlungsbilanz (stark ausgezogen), alles auf die horizontale Einheitsfläche, am fast wolkenlosen 25. Juli. Die Kurven der Globalstrahlung, bzw. der Strahlungsbilanz ergeben planimetriert 720 cal cm^{-2} , bzw. 375 cal cm^{-2} und Tag; das entspricht bei Berücksichtigung des langwelligeren Strahlungsumsatzes einer mittleren Albedo des sehr reinen Gletschereises von etwa 0.38. Am 29. Juli war der Gletscher mit einer frischen Neuschneedecke von etwa 15 cm Höhe bedeckt; der Schneefall ließ nach 8 Uhr nach, einzelne Schneeflocken wurden noch bis 9.30 Uhr beobachtet, dann trat rasch Aufheiterung ein, so daß die Globalstrahlung noch 679 cal cm^{-2} erreichen konnte (Abb. 1 oben). Die Intensität der direkten Sonnenstrahlung war in der reinen Kaltluft etwas größer als am 25. Juli, die Summe der positiven Strahlungsbilanz erreichte jedoch nur 87 cal cm^{-2} , die mittlere Albedo ergab sich daraus zu etwa 0.8. Rund 300 cal wurden an diesem Tag reflektiert, die ohne die Neuschneedecke zur Schmelzung von Eis verfügbar gewesen wären. Es war ein zweiter Strahlungstag erforderlich, um die Neuschneedecke abzubauen. Insgesamt wurden an diesen beiden Tagen rund 500 cal cm^{-2} reflektiert und damit fast 7 cm Eis erhalten.

Die Windgeschwindigkeit wurde an vier senkrecht übereinanderliegenden Punkten stündlich gemessen (Handanemometer in 20 und 140 cm Höhe), bzw. registriert (elektrische Kontaktanemometer in 75 und 257 cm Höhe), um den Austauschkoefizienten nach der Methode von Prandtl abschätzen zu können und um Material zum Studium des Gletscherwindes zu gewinnen [3]. Die Mittelwerte der unteren drei Meßpunkte $u_{20} = 1.77 \text{ m/sec}$, $u_{75} = 2.25 \text{ m/sec}$ und $u_{140} = 2.47 \text{ m/sec}$, lassen gut einen logarithmischen Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Höhe erkennen. Trotz stark abweichender Mittelgeschwindigkeiten ergibt sich aus den drei bis jetzt vorliegenden Meßreihen (Abb. 2) der mittlere Rauigkeitsparameter bei Messungen über aperm Gletschereis immer von der gleichen Größenordnung $z_0 \cong 0.15 \text{ cm}$ und erweist sich damit als eine echte Oberflächenkonstante. Es ist sehr bemerkenswert, daß der oberste Meßpunkt mit $u_{257} = 2.24 \text{ m/sec}$ dem logarithmischen

Gesetz im Mittel nicht mehr zu unterliegen scheint, zeigt er doch eine Geschwindigkeitsabnahme oberhalb etwa 150 bis 200 *cm* Höhe an. Der Verdacht, eine fehlerhafte Eichkonstante oder ein Schaden am Instrument könne die die zu niedrige Geschwindigkeit in 257 *cm* Höhe vorgetäuscht haben, wurde durch einen sorgfältigen Vergleich der vier verwendeten Anemometer nach Beendigung der Feldarbeiten eindeutig entkräftet. Der Effekt ist reell und darauf zurückzuführen, daß die als Gletscherwind

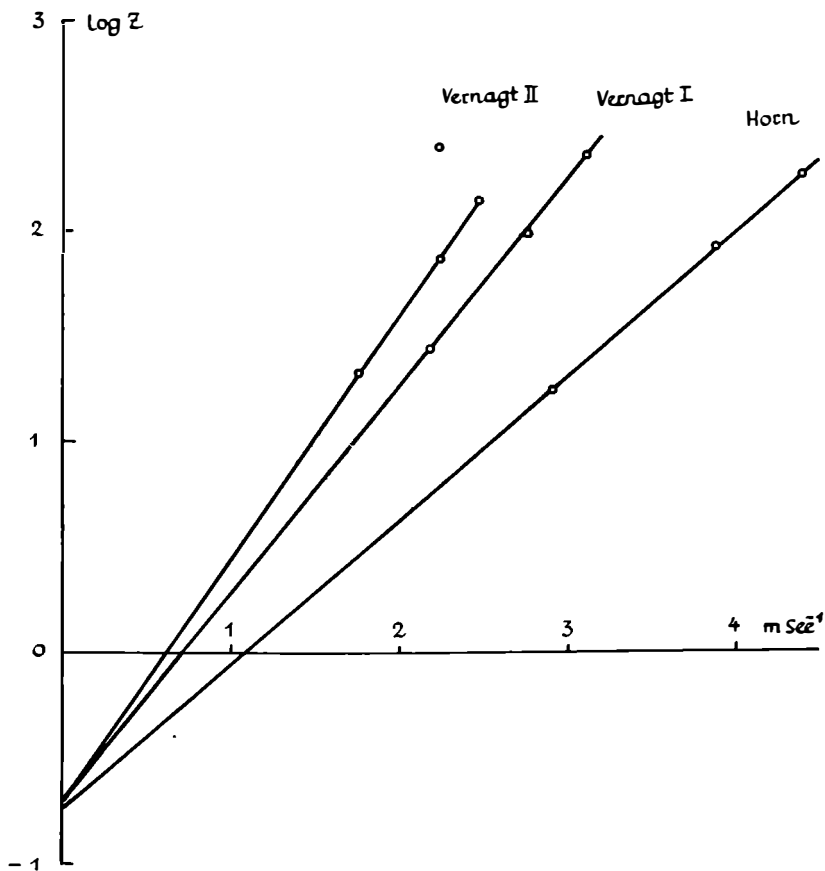


Abb. 2: Die mittlere Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Logarithmus der Höhe. Meßreihen Vernagtferner I, 2973 *m*, 7 bis 18 Uhr, 21. bis 31. August 1950: Hornkees, 2262 *m*, 8 bis 18 Uhr, 3. bis 9. September 1951. Vernagtferner II, 2969 *m*, 6 bis 18 Uhr, 21. Juli bis 3. August 1952.

abfließende Kaltluft in vielen Fällen eine Mächtigkeit von nur etwa 2 m (oder weniger) aufweist [3]. Der einzige Tag mit stärkerem Gradientwind aus NNW bis N (26. Juli 1952, $u_{20} = 2.90$, $u_{75} = 3.55$, $u_{140} = 3.80$ und $u_{257} = 4.10$ m/sec) erwies das logarithmische Gesetz an allen vier Meßpunkten erfüllt.

Besondere Aufmerksamkeit wurde von meinem Mitarbeiter W. Ambach dem nächtlichen Wärmehaushalt der gefrorenen Gletscheroberfläche zugewendet [4]. Der Betrag des effektiven Energieverlustes der Gletscheroberfläche in einer Frostnacht sollte durch Messungen ermittelt werden, da direkte Beobachtungen einen Wiederbeginn der Schmelzung nach Absorption von etwa 15 cal cm^{-2} in knapp einer Stunde nach Sonnenaufgang ergaben, während die effektive Ausstrahlung in einer klaren Sommernacht von der Größenordnung -50 cal cm^{-2} ist. Das Eindringen des Nachtfrostes in den Gletscher wurde mit Thermoelementen verfolgt; ab etwa 15 cm Tiefe blieb die Eistemperatur konstant bei Null Grad, auch wenn die Oberflächentemperatur unter -4° C sank. Die beobachteten Temperaturgradienten zeigten, daß während einer Nacht mehr Wärme aus dem Gletscher zur Oberfläche geflossen sein mußte, als in Form von Abkühlung im Eis nachweisbar war. Es mußte also eine zusätzliche Wärmequelle im Eis vorhanden sein; als solche wurde die Schmelzwärme erkannt, die beim Frieren des in den Hohlräumen und Rissen vorhandenen Wassers in der Tiefe frei wird, in der die Temperatur gerade Null Grad erreicht. Aus den Messungen konnte abgeschätzt werden, daß ein Wassergehalt von etwa 0.02 bis 0.03 g im Kubikzentimeter Eis (Mittelwert über eine Schichtdicke von 10 bis 15 cm) genüge, um Schmelzwärme im Betrag von 15 bis 25 cal cm^{-2} und Nacht freizumachen und durch Wärmeleitung der Gletscheroberfläche zur Verfügung zu stellen. Die für sechs Nächte durchgerechneten Wärmebilanzen zeigten als wichtigstes Ergebnis, daß der Anteil der freiwerdenden Schmelzwärme am nächtlichen Wärmeumsatz der gefrorenen Gletscheroberfläche von der gleichen Größenordnung ist, wie die konvektiv aus der Luft zugeführte fühlbare Wärme. Der effektive Energieverlust der Gletscheroberfläche in Frostnächten ist somit nur von der Größenordnung 10 bis 15 cal cm^{-2} und Nacht, was sich mit der Erfahrung deckt.

Der Versuch, die Temperaturänderung und damit den verzögerten Schmelzbeginn des Eises bei beginnender kurzweiliger Einstrahlung nach einer Frostnacht theoretisch zu berechnen, wurde unternommen [4]; die numerische Auswertung stieß auf die Schwierigkeit, daß Absorptionskoeffizienten für Gletscher-

eis nicht bekannt sind. Deutet man die Beobachtung, daß meist eine etwa 15 cm mächtige Oberflächenschicht des Gletschereises in ihrem Gefüge gelockert und porös erscheint, als Wirkung durch die Oberfläche in das Eis eindringender und bis 15 cm Tiefe zum größten Teil absorbiertes kurzwelliger Strahlung, dann kann man daraus auf einen Absorptionskoeffizienten $a \cong 0.15 \text{ cm}^{-1}$ schließen. Mit diesem Wert wäre eine Verzögerung des Schmelzungsbeginns von etwa 45 Minuten zu berechnen, was mit der Beobachtung in der Größenordnung übereinstimmt. Exakte Messungen der Absorptionseigenschaften des natürlichen Gletschereises erscheinen notwendig und sind geplant.

Literatur:

[1] H. Hoinkes und N. Untersteiner, Wärmeumsatz und Ablation auf Alpengletschern I. Vernagtferner (Ötztaler Alpen), August 1950. Geograf. Ann. XXXIV, 99, 1952.

[2] H. Hoinkes, Wärmeumsatz und Ablation auf Alpengletschern II. Hornkees (Zillertaler Alpen), September 1951. Geograf. Ann. XXXV, 116, 1953.

[3] H. Hoinkes, Beiträge zur Kenntnis des Gletscherwindes. Archiv f. Meteorol., Geophys. u. Bioklim. Ser. B, 6, 36, 1954.

[4] W. Ambach, Über den nächtlichen Wärmeumsatz der gefrorenen Gletscheroberfläche. Dissertation Innsbruck 1953.