

Der Einfluß des Gletscherwindes auf die Ablation

Von

H. Hoinkes, Innsbruck

Mit 1 Abbildung

Wenn der Bergsteiger nach mühsamen Anstieg über sonnendurchglühte Hänge eine Gletscherzunge betritt und sich dort dankbar der angenehmen Kühlung durch den Gletscherwind erfreut, dann mag ihm wohl der Gedanke kommen, daß die Gletscher ja noch viel schneller schmelzen müßten, wenn nicht der kühle Gletscherwind warme Luft von ihnen fernhalten würde. In diesem Sinne ist eine „eiserhaltende“ Wirkung des Gletscherwindes in der Literatur vielfach behauptet worden (1, 2, 3, 9, 10), ob zu Recht, das möge im folgenden einer kurzen quantitativen Prüfung unterzogen werden. Dazu steht ein Material von mikrometeorologischen Registrierungen und Beobachtungen aus der eisnahen Luftschicht zur Verfügung, das auf verschiedenen Gletschern der Ostalpen an 45 Tagen, verteilt auf die Sommermonate der Jahre 1950—1953, gewonnen wurde. Über einen Teil dieser Arbeiten wurde im Zusammenhang mit Ablationsmessungen bereits ausführlich berichtet (4, 5).

Die eisnahe Luftschicht ist im Sommer zumeist ausgesprochen stabil aufgebaut; in geringer Höhe über der Gletscheroberfläche erreicht die Temperatur bereits einige Grade über Null. Die in mehreren Niveaus gleichzeitig gemessenen Lufttemperaturen lassen meist einen angenähert linearen Zusammenhang mit dem Logarithmus der Höhe erkennen (6). Die daraus abgeleiteten vertikalen Temperaturgradienten streuen nicht um einen Mittelwert, sondern bevorzugen entweder große oder kleine Werte, was sich mit den Erfahrungen C. C. Wallén's (11) deckt. Mit Berücksichtigung der rezenten Vorgeschichte der Luft ist dieser Umstand auch erklärbar. Über dem eisfreien Gelände ist tagsüber bei Einstrahlung die bodennahe Luftschicht überadiabatisch aufgebaut, der vertikale Temperaturgradient ist negativ, die Temperatur nimmt mit der Höhe rasch ab. Wird durch Advektion vom eisfreien Gelände her Luft frisch über den Gletscher geführt, dann wird durch sofort beginnende Wärmeabgabe aus der alleruntersten Schicht zunächst das Vorzeichen des Temperaturgradienten gewechselt. Die „gletscherfremde“ Luft ist, ohne Rücksicht auf die Windrichtung, an ihrem kleinen vertikalen Temperaturgradienten zu erkennen; der abkühlende Einfluß des Eises reicht noch nicht hoch hinauf, die Temperatur nimmt zunächst nur wenig mit der Höhe zu. Erst wenn die Luft über dem Eis zur Ruhe kommt und ihre Temperatur durch fortdauernde Wärmeabgabe der Unterlage

zunehmend anpaßt, ist sie durch einen großen vertikalen Temperaturgradienten, entsprechend rascher Zunahme der Temperatur mit der Höhe, charakterisiert. Diese „gletschereigene“ Luft fließt als Gletscherwind über die geneigten Gletscherzungen ab, wenn der horizontale Dichtegradient groß genug geworden ist, um die Reibung zu überwinden (7).

Tabelle 1

Mittelwerte: der Lufttemperatur aus je zehn zusammengehörigen Messungen zwischen 9 und 19 Uhr, der Windgeschwindigkeit, der Bewölkung und des vertikalen Temperaturgradienten. Vernagtferner, 2973 m, August 1950.

	10	20	30	150	170	Windgeschwindigkeit m/sec. 98 cm	Richtung	Bewölkung 7—18	$\frac{\partial \vartheta}{\partial z}$
									150 cm
21.	3.69	4.11		5.53		3.06	NW-N	0.6	0.0045
22.	4.23	4.81		6.56		3.06	NW-N	2.5	0.0057
23.	4.15	4.78		6.39		2.58	NW-N	2.2	0.0055
24.	5.29	5.86		7.55		2.36	NW-N	4.5	0.0056
25.	6.79		7.30	7.92	7.97	3.19	SE-S	7.6	0.0028
26.	5.68		6.06	6.52	6.64	3.26	SE-S	6.9	0.0021
27.	5.66		5.95	6.46	6.60	3.27	SE-S	6.4	0.0020

Eine Meßreihe des vertikalen Temperaturgradienten über dem Eis des Vernagtferners (Ötztaler Alpen) zeigt diese Verhältnisse mit aller Deutlichkeit¹ (Tabelle 1). Vom 21. bis 24. August 1950 herrschte bei heiterem Hochdruckwetter ohne nennenswerte Druckgradienten Gletscherwind aus NW-N; vom 25. bis 27. August vor einer Frontalzone Gradientwind aus SE-S. Abb. 1 läßt den charakteristischen Unterschied zwischen gletschereigener und gletscherfremder Luft im thermischen Aufbau der eisnahen Luftschicht am Beispiel der Tage 22., 23. und 26., 27. August gut erkennen, die in 150 cm Höhe zufällig die gleiche Mitteltemperatur aufweisen, während in 10 cm Höhe die Tage mit Gletscherwind um 1,5° C kälter sind, als die Tage mit Gradientwind.

Die Wärmemenge Q , die infolge der turbulenten Vermischung in der Zeiteinheit durch die eisnahe Luftschicht zur Gletscheroberfläche transportiert wird, läßt sich beschreiben durch die Gleichung

$$Q = c_p A_w \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \quad |1|$$

Q ist somit proportional der spezifischen Wärme bei konstantem Druck c_p , dem Austauschkoefizienten für Wärme A_w und dem vertikalen Gradienten der potentiellen Temperatur. Die Größenordnung von A_w

¹ Das Tagebuch mit diesen Messungen ging am 27. Aug. 1950 durch Sturz in eine schmale, frisch aufgerissene Gletscherspalte verloren (4); ein freundlicher Zufall ließ es zwei Jahre später, am 25. Juli 1952, während der Arbeiten am gleichen Platz, aus dem Eis ausschmelzen, es war noch wohl erhalten und konnte gut ausgewertet werden.

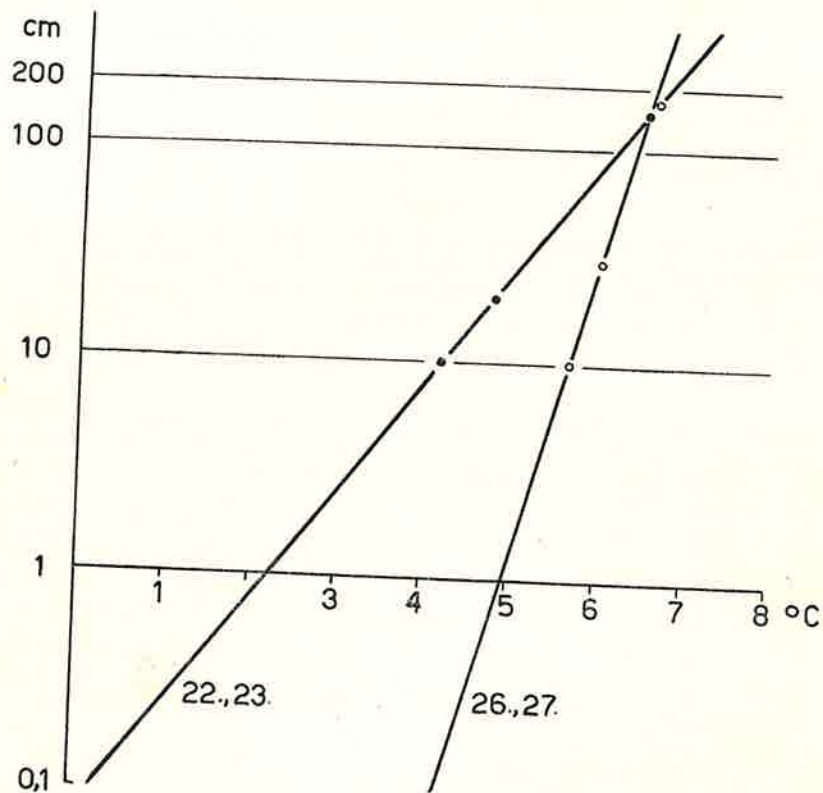


Abb. 1. Der thermische Aufbau der eisnahen Luftschicht bis 200 cm Höhe. Vernagtferner 2973 m, August 1950.
22. u. 23. Gletscherwind; 26. u. 27. Gradientwind vom eisfreien Gelände her.

kann als Funktion von Windschichtung und Mischungsweg gefunden werden. Bei Arbeiten über schmelzendem Gletschereis bietet sich durch direkte Bestimmung von Q über gleichzeitige Messungen der Ablation und der Strahlungsbilanz zudem eine erwünschte Kontrollmöglichkeit (6). Mag die experimentelle Ermittlung des Austauschoeffizienten auch durchaus noch keine problemlose Aufgabe sein, so läßt sich der durch Gleichung 1/ beschriebene Zusammenhang hier so formulieren: gleichen Austauschoeffizienten vorausgesetzt, ist der durch die Luft zum Eis fließende Wärmestrom dem vertikalen Gradienten der potentiellen Temperatur direkt proportional. Da die vertikalen Temperaturgradienten an Tagen mit Gletscherwind etwa doppelt so groß sind (Tab. 1) als an Tagen mit Luftzufuhr vom eisfreien Gelände her, fließt unabhängig von der absoluten Höhe der Temperatur, wenn diese nur Null Grad überschreitet, bei Gletscherwind auch etwa die doppelte Wärmemenge aus der Luft der Gletscheroberfläche zu.

Tabelle 2

Wärmebilanz für einen Tag mit Gletscherwind (22., 23.) und einen Tag mit Gradientwind (26., 27.). Vernagtferner (Ötztaler Alpen), 2973 m, August 1950.

		Mittel aus je zwei Tagen mit	
		Gletscherwind	Gradientwind
Strahlungsbilanz	7–18 Uhr	366 cal/cm ²	280 cal/cm ²
Strahlungsbilanz	18–7 Uhr	– 31 cal/cm ²	– 15 cal/cm ²
Konvektionswärme	7–18 Uhr	71 cal/cm ²	33 cal/cm ²
Konvektionswärme	18–7 Uhr	81 cal/cm ²	39 cal/cm ²
Kondensationswärme	7–18 Uhr	—	6 ca./cm ²
Kondensationswärme	18–7 Uhr	11 cal/cm ²	11 cal/cm ²
Verbr. f. Verdunstung	7–18 Uhr	– 21 cal/cm ²	—
Verbr. f. Verdunstung	18–7 Uhr	—	—
Wärmebilanz	7–7 Uhr	477 cal/cm ²	354 cal/cm ²
Ablation beobachtet, cm Wasser		5.9	4.4

In Tabelle 2 ist der Wärmehaushalt der Gletscheroberfläche für einen Tag mit Gletscherwind und für einen Tag mit Gradientwind angegeben. Die Unterlagen für diese Berechnung sind in (4) veröffentlicht, als Austauschoeffizient für Wärme wurde der Austauschoeffizient für Impuls mit dem Faktor 1.9 verwendet (7). Man erkennt daraus, und diese Feststellung ist in Übereinstimmung mit den bisherigen Erfahrungen (4, 5, 8), daß die Zufuhr fühlbarer Wärme aus der Luft mit etwa 15 bis 20% am Wärmeumsatz an der Gletscheroberfläche beteiligt ist. Die Zahlen der Tabelle 2 können keine Allgemeingültigkeit beanspruchen, doch dürften sie die Größenordnungen richtig wiedergeben, vor allem aber die Tatsache, daß der Wärmeübergang aus der Luft auf das Eis bei Gletscherwind relativ am größten ist. Auch die Strahlung, die auf Alpengletschern 70 bis 80% der von einer horizontalen Fläche absorbierten Energie liefert, erreicht an Tagen mit ungestörtem Gletscherwind meist größere Beträge, als an Tagen mit gestörtem Wetter. Man gelangt somit zur Feststellung, daß in Zeitabschnitten mit Gletscherwind geradezu optimale Ablationsbedingungen herrschen; die bereits veröffentlichten Tageswerte der Ablation bestätigen das (4, 5).

Die physiologische Empfindung der „Kühle“ setzt eine hohe Abkühlungsgröße voraus, die durch den gleichen Vorgang hervorgerufen wird, der für das Eis eine erhöhte Wärmezufuhr bedeutet, durch die turbulente Vermischung in einer lebhaften Luftströmung. Nur bei besonders nachhaltiger Wärmeabgabe aus der Luft an das Eis kann sich eine „Kaltfluthaut“ bilden und so rasch erneuern, daß der Abfluß der Kaltluft anhält. Die Existenz des Gletscherwindes zeigt nur an, daß von der Luft viel Wärme an das Eis abgegeben wurde; eine „eiserhaltende“ Wirkung des Gletscherwindes läßt sich sachlich also nicht begründen.

Zusammenfassung

Quantitative Untersuchungen der meteorologischen Verhältnisse in der eisnahen Luftschicht haben gezeigt, daß in Zeitabschnitten mit ungestörtem Gletscherwind der vertikale Temperaturgradient besonders groß ist. Dagegen ist Luft, die durch Advektion von eisfreiem Gelände her über den Gletscher transportiert wird, durch einen wesentlich geringeren vertikalen Temperaturgradienten charakterisiert. Für den Wärmestrom, der infolge der turbulenten Vermischung durch die Luft zur Gletscheroberfläche fließt, ist neben dem Austauschkoeffizienten der vertikale Gradient der Temperatur in der eisnahen Luftschicht maßgebend und nicht die Höhe der Temperatur. Die in der Literatur gelegentlich geäußerte Meinung, der Gletscherwind wirke wegen seiner Kühle „gletschererhaltend“, ist somit nicht zutreffend. An Tagen mit Gletscherwind herrschen vielmehr geradezu optimale Ablationsbedingungen, wobei jedoch der Anteil der aus der Luft dem Eis zugeführten Wärme im Gesamtwärmehaushalt des Gletschers immer noch relativ gering bleibt.

Summary

The influence on ablation of glacier-winds

Quantitative investigations of the micrometeorological conditions near the ice-surface have shown that during periods of undisturbed glacier-wind (katabatic wind) there exists an especially great vertical gradient of temperature. Whereas air originating in unglaciated areas and moving over the glacier is characterized by small temperature gradients. The heat flow by turbulence from the air towards the ice is determined by the coefficient of „Austausch“ and the vertical temperature gradient, and not by the temperature itself. Among the literature concerned we sometimes find the opinion that the glacier-wind being „cool“ acts as to slow down the melting process. However, this is not the case. During days with glacier-wind the conditions are almost ideal for ablation, although the heat furnished from the air remains a relatively small factor in the general heat balance of the ice.

Literatur:

1. Ekhardt, E.: Die Tageszeitenwinde der Alpen. Die Naturwissenschaften, 26, 21, 1938.
2. —: Über Gebirgswinde. Alpenvereinszeitschrift 78, 101, 1953.
3. Evers, W.: Gletscherwinde am Nigardsbre (Südnorwegen), in Landschaft und Land (Festschrift E. Obst), 123, Amt für Landeskunde, Remagen/Rh., 1951.
4. Hoinkes, H. und Untersteiner, N.: Wärmeumsatz und Ablation auf Alpengletschern. I. Vernagtferner (Ötztaler Alpen), August 1950, Geograf. Ann. XXXIV, 99, 1952.
5. Hoinkes, H.: Wärmeumsatz und Ablation auf Alpengletschern. II. Hornkees (Zillertaler Alpen), Sept. 1951, Geograf. Ann. XXXV, 116, 1953.

6. —: Zur Mikrometeorologie der eisnahen Luftschicht. Archiv für Meteorol., Geophys. u. Bioklim. Ser. B, IV, 451, 1953.
7. —: Beiträge zur Kenntnis des Gletscherwindes. Archiv f. Meteorol., Geophys. u. Bioklimatol., Ser. B, VI, 36, 1954.
8. —: Über den Wärmehaushalt horizontaler Gletscherflächen in den Alpen. Veröff. Meteorol. Inst. Univ. Berlin, im Druck.
9. Tollner, H.: Gletscherwinde auf der Pasterze. XLIV. Jahresber. d. Sonnblickvereins f. d. Jahr 1935, 38, Wien 1936.
10. —: Wetter und Klima im Gebiet des Großglockners. Carinthia II, 14. Sonderheft, Klagenfurt 1952.
11. Wallén, C. C.: Glacial-meteorological investigations on the Karsa-Glacier in Swedish Lapland, 1942—1948. Geograf. Ann. XXX, 451, 1949.

Anschrift des Verfassers: Priv.-Doz. Dr. H. Hoinkes, Meteorologisches Institut der Universität, Innsbruck, Schöpfstraße 41.