

ÜBER DIE VERDUNSTUNG AUF DEM HINTEREISFERNER

Von GEORG KASER, Innsbruck

Mit 5 Abbildungen

ZUSAMMENFASSUNG

Im Sommer 1980 wurden im Firngebiet und auf der Zunge des Hintereisferners (3000 m und 2500 m Meereshöhe) in den Ötztaler Alpen direkte Verdunstungsmessungen mit Hilfe von Lysimetertöpfen durchgeführt. Im darauffolgenden Winter 1980/81 konnten ähnliche Untersuchungen über einer Schneedecke in Innsbruck Aufschlüsse über die Vorgänge bei sehr geringem Energieangebot geben. Gute Zusammenhänge mit der Dampfdruckdifferenz zwischen Schnee- bzw. Eisoberfläche und Luft sowie der Windgeschwindigkeit erlauben es, die direkten Messungen zu ergänzen.

Anhand der gewonnenen Ergebnisse werden die verschiedenen Tagesgänge von Verdunstung und Kondensation, Vorstellungen über Vorgänge im Gletscherwind und Größenordnungen der täglichen Verdunstung an verschiedenen Orten und bei unterschiedlichen Bedingungen diskutiert.

Bei dem Versuch einer räumlichen und zeitlichen Extrapolation der Verdunstung wird gezeigt, wie sehr dabei die notwendigen Annahmen über die Oberflächentemperatur und damit den Sättigungsdampfdruck an der Schnee- bzw. Eisoberfläche ins Gewicht fallen.

ON THE EVAPORATION ON HINTEREISFERNER

SUMMARY

Direct measurements of evaporation in the accumulation area and on the tongue of Hintereisferner (3000 and 2500 m a. s. l., respectively) have been carried out in the summer of 1980. Correlation of the results with the vapor pressure difference between air and snow or ice surface and with wind speed has been used to supplement direct measurements.

After a description of the measurements this paper discusses daily variations of evaporation and condensation, relates them to glacier winds and models them for different locations and weather situations. It is shown that such extrapolations depend critically on the assumptions made about surface temperature.

1. EINLEITUNG

Die glazialmeteorologischen und hydrologischen Untersuchungen im Gebiet von Kesselwand- und Hintereisferner haben mit der Internationalen Hydrologischen Dekade (1965—1975) und dem darauffolgenden Internationalen Hydrologischen Programm ihre größten Aktivitäten erreicht (Rudolph, 1963; Hoinkes, 1970; Kuhn et al., 1979). Dabei wurde das Interesse zwangsläufig auch auf die Verdunstung von Schnee und Eis gelenkt, eine Größe, die bisher entweder vernachlässigt oder als Restglied von

Wärme- oder Wasserbilanzen behandelt wurde. Durch direkte gravimetrische Messungen an verschiedenen Punkten des Hintereisferners sollte eine genauere Vorstellung über diese Vorgänge gewonnen werden. Schneelysimetermessungen sind nur bei niederschlags- und driftfreiem Wetter durchführbar. Dadurch und durch den erforderlichen Aufwand an Geräten und Personal war die zeitliche und räumliche Ausdehnung der Messungen begrenzt. Deshalb konzentrierte sich die Fragestellung nach Versuchsmessungen nahe der mittleren Gleichgewichtslinie im Sommer 1978 auf möglichst genaue Beobachtungen der Verdunstung an einigen Punkten, jeweils über eine bestimmte Periode. Dabei sollte versucht werden, direkte Lysimeterwägungen über meteorologische Parameter zu ergänzen und zu erweitern, um dadurch einen möglichst guten Einblick in die Verdunstungsvorgänge auf einem Gletscher zu bekommen.

2. MESSUNGEN

Im Sommer 1980 konnten auf dem Hintereisferner insgesamt drei Meßserien durchgeführt werden, die im darauffolgenden Winter durch Schneeverdunstungsmessungen im Versuchsgelände des Institutes für Meteorologie und Geophysik in Innsbruck erweitert wurden. Die Ergebnisse wurden im Rahmen einer Dissertation ausführlich behandelt (Kaser, 1983).

Die direkten Verdunstungsmessungen erfolgten mit Plexiglaslysimetern, deren quadratische Oberfläche 400 cm² und deren Tiefe 25 cm betrug. Die doppelten, ineinander gestellten Behälter wurden in dafür aus dem Schnee gestochene oder aus dem Eis gehackte Löcher gesetzt, mit Schnee bzw. grobkörnigem Gletschereis aus der unmittelbaren Umgebung gefüllt und stündlich gewogen. Während es beim Schnee einige Schwierigkeiten bereitet, die Proben so einzusetzen, daß ihre Oberfläche die Umgebung repräsentiert ohne sie stark zu stören, vertritt beim Eis fast jede Probe einen Teil der vielfältigen Gletscheroberfläche. Die Massenänderung der Lysimeter wurde auf 0,5 g genau bestimmt, was bei einer verdunstenden Fläche von 400 cm² 0,0125 mm Wasseräquivalent entspricht (im weiteren beziehen sich alle mm-Angaben auf Wasseräquivalent).

Bei starker Ablation mußten die Proben in den „herauswachsenden“ Töpfen oft mehrmals täglich erneuert werden. Zwei bis vier Lysimeter an einer Meßstelle erlaubten zwischen Proben in verschiedenen Zuständen zu mitteln und so die Verdunstung zu bestimmen.

2.1 MESS-SERIE BEI DER STATION HINTEREIS

Die Station Hintereis liegt 3026 m hoch auf einer Felsinsel ca. 50 Höhenmeter über dem Hintereisferner (Abb. 1) am nach SE exponierten Hang zur Langtaufererspitze (3527 m). Dieser Hang hat eine durchschnittliche Neigung von 21° (Wagner, 1979; Kuhn, 1980 und ÖAV-Karte, Blatt Weißkugel-Wildspitze). Neben der Unterkunfthütte wurde hier eine Klimastation mit der ganzjährigen Registrierung von Lufttemperatur, Wind und Globalstrahlung betrieben. Ende Juli 1980 lag dort noch eine geschlossene Schneedecke von 1–1,5 m Mächtigkeit. Damit waren die idealen Voraussetzungen für Verdunstungsmessungen im Bereich des Firngebietes gegeben.

Nach langanhaltend kühlem und unbeständigem Wetter kam Mitteleuropa ab dem 22. Juli 1980 in den Einflußbereich eines kräftigen Hochkeils und am darauffolgenden Tag wurde mit den Messungen begonnen. Nachdem einige Schauer zu kurzen Unterbrechungen zwangen, griffen dann am 3. und 4. August von SW herangeführte Stö-

HINTEREISFERNER 1980

Klimastat. HEF - Zunge 2442m

Station HEZ 2500m

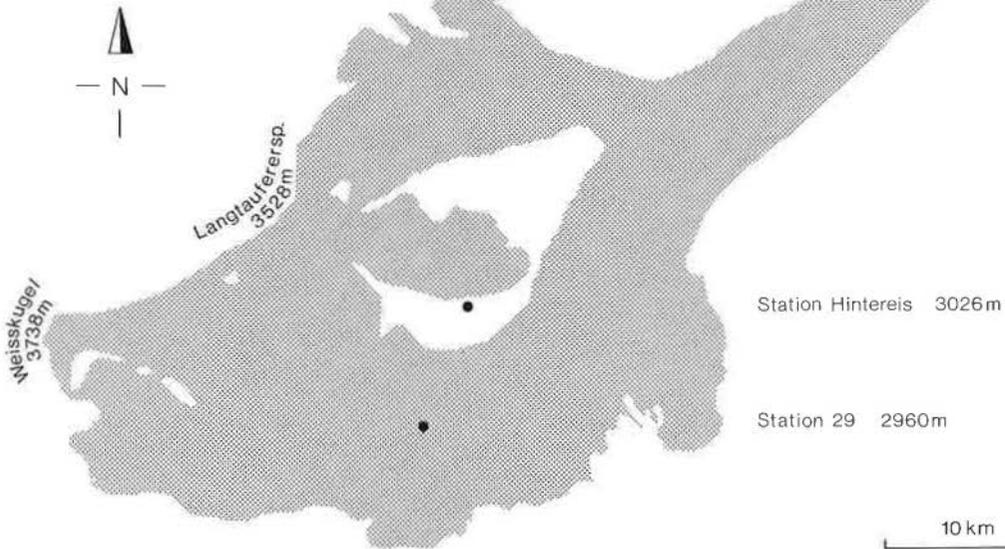


Abb. 1: Skizze des Hintereisferners in den Ötztaler Alpen mit den Verdunstungsmeßstellen und Klimastationen.

rungsfronten auf den Alpenraum über, sodaß die Messungen abgebrochen werden mußten.

Im Laufe der 12 Tage wurden 203 von den 288 möglichen stündlichen Verdunstungswägungen gemacht. In Anlehnung an Kuzmin (1961) und WMO (1966) wurden über den empirischen Zusammenhang der Verdunstung mit der Dampfdruckdifferenz zwischen Oberfläche und Luft sowie der Windgeschwindigkeit die fehlenden Verdunstungsbeträge ergänzt. Der Sättigungsdampfdruck an der Schnee- und Eisoberfläche wurde über die Oberflächentemperatur ermittelt. Diese wurde mit einem Infrarot-Handthermometer und ausgelegten Stationsthermometern gemessen. Der Dampfdruck in der Luft wurde über Psychrometermessungen und Thermohygrographenaufzeichnungen in der Wetterhütte ermittelt. Windgeschwindigkeit und -richtung wurden in ca. 5 m Höhe auf dem Dach der Station registriert. Da die Oberflächentemperatur nicht registriert wurde, mußte für die Ergänzungen schmelzende Schneeoberfläche angenommen werden. Diese Zusammenhänge, einige interessante Details sowie die Diskussion der Ergebnisse der Meßserie an der Station Hintereis sind an anderer Stelle veröffentlicht (Kaser, 1982).

In Tab. 1 sind als Ergebnisse die täglichen Beträge von Verdunstung, Kondensation und Nettosummen eingetragen. Es ist zu beachten, daß die Werte für Verdunstung und Kondensation hier wie im folgenden bereits aus den gewogenen Nettobeträgen über einstündige oder längere Perioden berechnet und somit keine reinen Verdunstungs- oder Kondensationsbeträge sind. Das gilt auch für den Tagesumsatz, der

Summe der Absolutwerte von Nettoverdunstung und Nettokondensation, die im Laufe des Tages gemessen wurden (siehe Tab. 2).

Tab. 1: Tagessummen von Verdunstung und Kondensation in mm d^{-1} , Station Hintereis.

	Verd.	Kond.	Summe
23. 7. 80	-2,02	0,00	-2,0
24. 7. 80	-1,29	0,03	-1,3
25. 7. 80	-0,89	0,13	-0,8
26. 7. 80	-0,47	0,41	-0,1
27. 7. 80	-0,02	0,25	0,2
28. 7. 80	-0,10	0,24	0,1
29. 7. 80	-0,26	0,14	-0,1
30. 7. 80	-0,28	0,10	-0,2
31. 7. 80	-0,15	0,17	0,0
1. 8. 80	-0,18	0,16	0,0
2. 8. 80	-0,06	0,70	0,6
3. 8. 80	-0,09	0,49	0,4

Mittel: $-0,26 \text{ mm we d}^{-1}$

Tab. 2: Verdunstung und Kondensation an der Station 29 (ST 29) und an der Station Hintereis (ST HE) in 10^{-3} mm .

		ST 29	ST HE
25. 7. 80	19 ^h	- 50,0	- 237,5
26. 7. 80	5 ^h	- 62,5	- 112,5
	9 ^h	37,5	25,0
	19 ^h	150,0	312,5
27. 7. 80	5 ^h	62,5	112,5
	12 ^h		
28. 7. 80	5 ^h	12,5	25,0
	12 ^h	50,0	112,5
	19 ^h	100,0	25,0
29. 7. 80	5 ^h	12,5	- 112,5
	12 ^h		
31. 7. 80	5 ^h	0,0	12,5
	12 ^h	0,0	- 37,5
	19 ^h	112,5	125,0
1. 8. 80	5 ^h	- 37,5	- 125,0
	12 ^h		
	19 ^h	37,5	- 12,5
2. 8. 80	5 ^h	25,0	- 25,0
	12 ^h	125,0	300,0
	19 ^h	200,0	400,0
3. 8. 80	5 ^h		
Verd.		- 150,0	- 662,5
Kond.		925,0	1450,0
Summe		775,0	787,5
Umsatz		1075,0	2112,5

2.2 PARALLELE MESS-SERIE IN DER NÄHE DER MITTLEREN GLEICHGEWICHTSLINIE DES HINTEREISFERNERS (2960 m)

Am Abend des 25. Juli wurden zwei der vier Meßtöpfe von der Station Hintereis bei der Station 29 eingegraben und in der Folge dreimal am Tag gewogen. Die Station 29 liegt ca. 2960 m hoch in der Mitte des Hintereisferners (Abb. 1), der hier ca. 700 m breit und auf einer Länge von mehr als einem Kilometer ca. 3° nach ENE geneigt ist. Der Meßplatz ist mit der „Hauptstation“ in früheren Arbeiten identisch (Wagner, 1979; Kuhn, 1980; ÖAV-Karte, Blatt Weißkugel-Wildspitze).

In Tab. 2 sind die gewogenen Nettobeträge der Verdunstung für die Meßperiode an der Station 29 und jene für die Station Hintereis über dieselben Zeitintervalle in 10^{-3} mm (g m^{-2}) zusammengestellt.

Sowohl die Verdunstung als auch die Kondensation sind bei der Station Hintereis (3026 m) größer als bei Station 29. Der daraus berechnete Umsatz während der gesamten Meßperiode ist an der Station Hintereis doppelt so groß. Die Nettosummen über diese Periode sind an beiden Stationen nahezu gleich groß. Diese Übereinstimmung wird sicher nicht immer so genau sein, jedoch zeigen die Ergebnisse die grundsätzliche Tendenz zu deutlich erhöhtem Austausch in beiden Richtungen an der Station Hintereis. Vergleiche mit unveröffentlichten Messungen während Strahlungsbilanzmessungen im Sommer 1971 (Wagner, 1971) zeigen kaum unterschiedliche Dampfdruckwerte in der Luftschicht über Station 29 und Station Hintereis. Jedoch ermöglicht die über die steileren Hänge an der Station Hintereis kräftiger abfließende Kaltluft einen viel stärkeren turbulenten Austausch als bei der Station 29. Die unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten vom Sommer 1971 können über die für die Station Hintereis empirisch ermittelten Beziehungen den verschiedenen Umsatz größtenteils erklären.

2.3 MESS-SERIE AUF DER ZUNGE DES HINTEREISFERNERS (HEZ, 2500 m)

Im August 1969 wurde auf einem im Herbst 1968 ausgeaperten Felskopf eine Wetterhütte und ein Windmast aufgestellt (2442 m ü. M., Wagner, 1979; Kuhn, 1980 und ÖAV-Karte, Blatt Weißkugel-Wildspitze). Seitdem wurden hier während der Ablationsperiode und zwischen 1977 und 1980 ganzjährig Temperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung registriert. Im August 1969 reichte der Gletscher bis unmittelbar vor diese Klimastation. Inzwischen ist die Gletscherzunge, verursacht durch hohe Abschmelzbeträge, ca. 300 m von der Wetterhütte entfernt. In den letzten Jahren hat sich die Zunge als Reaktion auf den Massenzuwachs zwischen 1973/74 und 1977/78 aufgesteilt, sodaß eine etwas flachere Stelle (ca. 10° geneigt) für die Verdunstungsmessungen erst ca. 500 m von der Wetterhütte entfernt und ca. 60 m höher als diese gefunden wurde (Abb. 1).

Zwischen 21. und 29. August 1980 konnten hier während 140 von 216 möglichen Stunden Lysimeterwägungen durchgeführt werden. Um die durch Schauer ausgefallenen Werte zu ergänzen, mußte eine Beziehung zu Dampfdruck- und Winddaten, die bei der Klimastation im Gletschervorfeld registriert wurden, gefunden werden. Dies war möglich, da die Klimastation fast immer im Einflußbereich des Gletscherwindes ist. Verdunstung und Sättigungsdampfdruck an der Eisoberfläche wurden auf dem Gletscher bestimmt, Dampfdruck in 2 m und Windgeschwindigkeit in 4–5 m Höhe im Zungenvorfeld. Die gefundenen Zusammenhänge sind ähnlich gut wie bei der Station Hintereis, sodaß auch hier die ausgefallenen Messungen ergänzt werden konnten.

Eine ausführliche Diskussion dieser Meßserie wurde von Kaser (1983) gegeben. Die Tagessummen von Verdunstung, Kondensation und Nettobeträgen sind in Tab. 3 enthalten.

Tab. 3: Tagessummen von Verdunstung und Kondensation in mm, Hintereisferner Zunge.

	Verd.	Kond.	Summe
21. 8. 80	-0,19	0,30	0,1
22. 8. 80	-1,60	0,00	-1,6
23. 8. 80	-1,75	0,00	-1,7
24. 8. 80	-1,64	0,00	-1,6
25. 8. 80	-2,86	0,00	-2,9
26. 8. 80	-0,91	0,00	-0,9
27. 8. 80	-0,16	0,39	0,2
28. 8. 80	0,00	0,98	1,0
29. 8. 80	0,00	0,88	0,9
21.—29. 8. 80	-9,105	2,556	-6,6
Mittel: $-0,7 \text{ mm d}^{-1}$			

2.4 MESS-SERIE ÜBER EINER WINTERLICHEN SCHNEEDECKE IN INNSBRUCK

Im Jänner und Feber 1981 bot eine länger andauernde, ca. 40—60 cm mächtige Schneedecke in Innsbruck die Gelegenheit, Verdunstung und Kondensation über einer winterlichen Schneedecke zu messen. Vier Lysimetertöpfe, die zwar nahe beieinander, aber von Bäumen und Sträuchern unterschiedlich beschattet und geschützt waren, wurden in 4- bis 12stündigen Abständen gewogen. Die Ergebnisse wurden von Kaser (1984) diskutiert. Hier sollen sie dazu behilflich sein, die winterlichen Verhältnisse auf dem Hintereisferner abzuschätzen. Zwischen den Lysimetern sind die Unterschiede groß. In der Sonne ist während fünf vollständigen Meßtagen fast viermal soviel verdunstet als im Schatten. Die Absolutbeträge sind jedoch, verglichen mit jenen im Sommer auf dem Gletscher, sehr klein. In Tab. 4 sind die aus 4 bzw. 2 Proben gemittelten Tagessummen von Verdunstung und Kondensation für fünf verschiedene Tage zusammengestellt.

Tab. 4: Tagessummen von Verdunstung und Kondensation in mm d^{-1} , Innsbruck.

	Verd.	Kond.	Summe
23. 1. 80	0,00	0,10	0,1
24. 1. 80	-0,02	0,12	0,1
3. 2. 80	-0,12	0,05	-0,1
20. 2. 80	-0,20	0,00	-0,2
26. 2. 80	-0,25	0,01	-0,2

3. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

3.1 TAGESGANG VON VERDUNSTUNG UND KONDENSATION

In Abb. 2 sind die mittleren Tagesgänge aus den Meßperioden in Innsbruck, auf der Zunge des Hintereisferners und an der Station Hintereis dargestellt. Diese Abb.

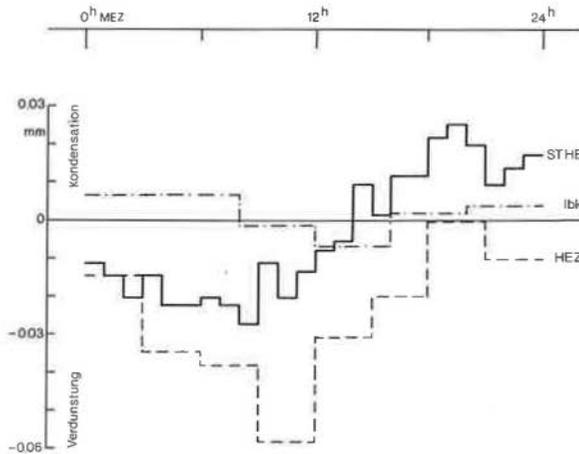


Abb. 2: Mittlerer Tagesgang von Verdunstung und Kondensation in mm für die Meßperioden an der Station Hintereis (STHE), auf der Zunge des Hintereisferners (HEZ) und in Innsbruck (lbk).

zeigt deutlich, daß die latenten Umsätze über einer kalten winterlichen Schneedecke viel geringer sind als auf einem Gletscher im Sommer mit einem viel höheren Energieangebot.

Aber nicht nur die Amplitude, sondern auch der Gang ist unterschiedlich. Während der Meßperiode in Innsbruck wird die Luft über dem Versuchsgelände kaum horizontal bewegt und steht dadurch in direkter und andauernder Wechselwirkung mit der Schneeoberfläche. Der Tagesgang von Verdunstung und Kondensation wird unmittelbar von der Sonne angeregt, das Maximum der Verdunstung tritt kurz nach Mittag auf, in der Nacht wird der Vorgang umgekehrt und es kondensiert.

Ein ganz anderes Bild zeigen die mittleren Tagesgänge während der Meßperioden auf dem Hintereisferner. Die maximale Verdunstung findet am Vormittag statt, die geringste Verdunstung bzw. stärkste Kondensation knapp nach Sonnenuntergang. Die beiden Kurven für die Station Hintereis und für die Zunge des Hintereisferners laufen parallel. Dies deutet darauf hin, daß für die Verschiebung gegenüber dem Innsbrucker Tagesgang dieselben Vorgänge verantwortlich sind.

Gegenüber Innsbruck sorgen auf dem Hintereisferner konvektive Vorgänge verschiedener Größenordnung für einen regen horizontalen Austausch der Luft. Die sich am Gletscher abkühlende Luft fließt über die mehr oder weniger geneigten Schnee- und Gletscherflächen katabatisch ab. Diesem auf unmittelbare Gletschnähe konzentrierten Vorgang (Hoinkes, 1954, 1955; Kuhn, 1978) ist an schönen Sommertagen ein großräumiges Talwindssystem in den weitgehend schneefreien Alpen überlagert. Ein Ineinandergreifen dieser beiden Prozesse könnte den beobachteten Tagesgang erklären:

Nach Sonnenaufgang steigt das Energieangebot an die durch nächtliche Ausstrahlung meist gefrorene Gletscheroberfläche und diese erreicht mit dem Schmelzen ihren größtmöglichen Wasserdampfdruck. Der Gletscherwind sorgt für den turbulenten Austausch und die Verdunstungsbeträge steigen. Zur gleichen Zeit erwärmen sich die schneefreien Täler und die aperen Hänge in der Umgebung, ein großräumiger Talaufwind bildet sich aus und bringt relativ feuchte und warme Luft in die Höhe. Im Bereich des Gletschers ist der Talaufwind der unmittelbar über Schnee und Eis abfließenden Kaltluft überlagert. Im Scherbereich der entgegengesetzten Strömungen werden die verschiedenen Luftmassen durchmischt. Für den Tagesgang bedeutet dies eine Abnahme der Verdunstung gegen Mittag hin. Zusammen mit dem Abkühlen der Gletscheroberfläche am Abend ergeben sich die niedrigsten Verdunstungs- bzw. höchsten Kondensationswerte kurz nach Sonnenuntergang. Nun bewirkt die nächtliche Abkühlung auch in der schneefreien Umgebung einen großräumigen Talabwind. Der Gletscherwind wird in das allgemeine Abfließen integriert, das nun kühle und trockene Luft aus größerer Höhe herabführt. Wenn sich nun die Gletscheroberfläche nicht allzu stark abkühlt und damit ihr Angebot an Wasserdampf reduziert, so wird die Verdunstung bereits in der Nacht wieder zunehmen, um dann, wieder im Zusammenhang mit dem Auftauen der Oberfläche, bald nach Sonnenaufgang die höchsten Beträge zu erreichen.

3.2 ÜBER STABILITÄTSSCHWANKUNGEN IM GLETSCHERWIND

Eine weitere Beobachtung, zu deren Erklärung ein genaueres Studium des Gletscherwindes notwendig wäre, ist durch die Abb. 3 wiedergegeben. Aus den Beziehun-

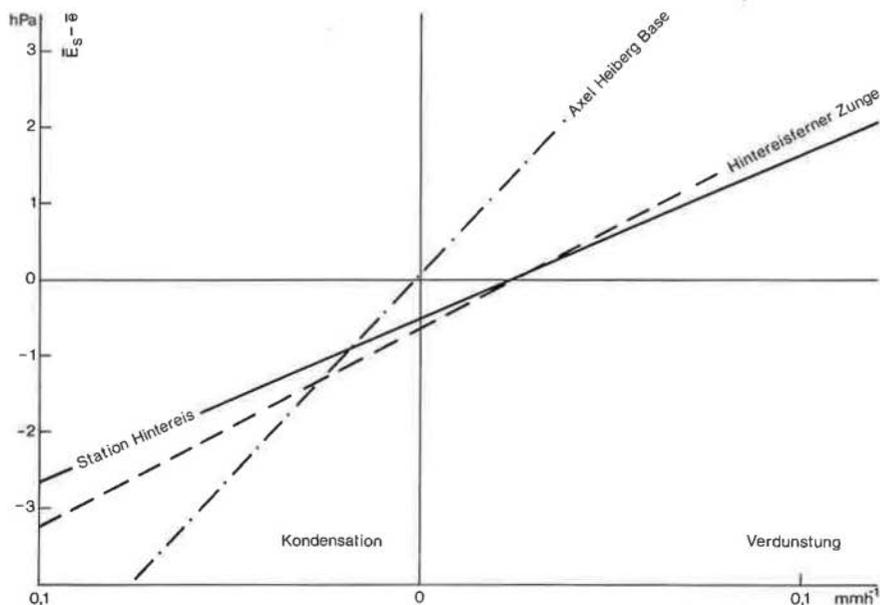


Abb. 3: Ausgleichsgeraden für den Zusammenhang zwischen Dampfdruckdifferenz (Oberfläche – 2 m Höhe) und Verdunstung bzw. Kondensation für 3 verschiedene Orte.

gen zwischen Dampfdruckgradienten und Verdunstung bzw. Kondensation wurden die dargestellten Ausgleichsgeraden berechnet. Die Daten von der Station „Base“ auf der Insel Axel Heiberg aus den Jahren 1969 und 1970 wurden in dankenswerter Weise von Prof. A. Ohmura (Zürich) zur Verfügung gestellt.

Es fällt auf, daß dann, wenn keine Dampfdruckdifferenz vorhanden ist ($\bar{E}_s - \bar{e} = 0$ hPa), nur bei der Station Axel Heiberg Base weder Verdunstung noch Kondensation auftritt (\bar{E}_s ist der mittlere Sättigungsdampfdruck an der Oberfläche zwischen zwei Lysimeterwägungen, \bar{e} der mittlere Dampfdruck in 2 m Höhe). Auf dem Hintereisferner hingegen ist eine mittlere Differenz von $\bar{E}_s - \bar{e} = 0$ hPa mit Verdunstung verbunden. Dasselbe Bild würde sich auch bei der Berücksichtigung verschiedener Windgeschwindigkeiten ergeben (Kaser, 1982, 1983). De Quervain (1951) hat bei der Auswertung seiner Meßergebnisse vom Weißfluhjoch dasselbe Problem und kann es nicht erklären.

Ohmura (1981) aufgrund seiner Beobachtungen am Rhonegletscher und unabhängig davon H. Müller (1981) erwägen folgende Möglichkeit. Temperatur und Dampfdruck einer katabatisch abfließenden Luft sind nicht konstant, sondern kurzfristigen Schwankungen unterworfen. So schwankt z. B. am Rhonegletscher die Taupunkttemperatur im Sekundärbereich bis zu einem Grad Celsius und damit auch der Dampfdruck bis zur Größenordnung von einem Hektopascal. Parallel dazu schwankt auch die Lufttemperatur um 1–2 Zehntel Grad C. In einer wärmeren und feuchteren Luft bewirkt ein höherer Dampfdruck verminderte Verdunstung bzw. erhöhte Kondensation. Gleichzeitig ist aber die Luftschichtung stabiler, der Austausch dadurch geringer.

In kälterer Luft mit niedrigerem Dampfdruck sind die Bedingungen für die Verdunstung günstiger und auch der Austausch ist durch weniger stabile Luftschichtung erhöht.

In dieser Weise ist die Verdunstung gegenüber der Kondensation bevorzugt und wenn nun über eine bestimmte Zeit der Dampfdruck in der Luft um $\bar{e} = 6,1$ hPa schwankt, so ergibt sich über schmelzendem Schnee im Mittel zwar eine Dampfdruckdifferenz von $\bar{E}_s - \bar{e} = 0$ hPa, der latente Austausch fällt aber zugunsten der Verdunstung aus.

Für die Richtigkeit dieser Annahme spricht, daß diese Erscheinung bei der Station „Base“ auf Axel Heiberg, die in flachem Gelände liegt, nicht auftritt.

3.3 GRÖßENORDNUNGEN DER VERDUNSTUNG

Da die direkten Wägungen drift- und niederschlagsfreies Wetter voraussetzen, sind die Meßperioden relativ schön und trocken. So treten in der Abb. 4 die beiden Trockenperioden am Anfang der Meßserie auf der Station Hintereis und am Anfang der Messungen auf der Zunge deutlich mit hohen Verdunstungsbeträgen hervor. Im zweiten Teil beider Meßperioden kommen aber auch hohe Kondensationsbeträge vor, sodaß von diesen Ergebnissen die Größenordnung von Verdunstung und Kondensation abgeschätzt werden kann.

Die Hänge um die Station Hintereis sind relativ steil und nach SE exponiert. Dadurch sind Austausch und Energieangebot optimal gegeben und lassen Extremwerte der Verdunstung im Firngebiet erwarten. Verbunden mit günstigen atmosphärischen Bedingungen scheint mit $-2,0$ mm d^{-1} am 23. 7. 1980 ein extrem hoher Betrag verdunstet zu sein. An den restlichen Tagen bewegt sich der latente Massentransport ungefähr zwischen -1 mm d^{-1} Verdunstung und 1 mm d^{-1} Kondensation. Extreme Kondensationswerte dürften ebenfalls höher liegen, können aber mit dieser Methode

nicht gemessen werden, denn sie sind bei schlechtem Wetter mit hoher Schneefallgrenze, d. h. hohem Dampfdruck in der Luft zu erwarten. In anderen Teilen des Firngebietes ist der Umsatz durch geringeren Austausch und z. T. auch niedrigeres Energieangebot kleiner (Station 29).

Auf der Zunge des Hintereisferners ist der Betrag von $-2,9 \text{ mm d}^{-1}$ am 25. 8. 1980 durch direkte Messungen belegt. Auch dies dürfte ein extrem hoher Wert sein, der die Grenze der täglichen Verdunstung auf der Zunge andeutet. Dieselben Überlegungen wie an der Station Hintereis führen dazu, daß die Kondensationsbeträge bei Niederschlag sicher größer sind als die gemessenen, sodaß die höchsten Werte auch in dieser Richtung bei größer als 2 mm d^{-1} zu erwarten sind.

4. VERDUNSTUNG WÄHREND EINER LÄNGEREN PERIODE

Über die Zusammenhänge meteorologischer Parameter (Kaser, 1982, 1983) soll nun versucht werden, den Gang der Verdunstung über eine längere Periode zu berechnen. Während die Umgebung der Station Hintereis kurz nach der Verdunstungsmeßperiode großflächig ausaperte, fehlen für die Station 29 die notwendigen Datenregistrierungen.

Auf der Zunge des Hintereisferners herrschen jedoch, in einer groben Annahme während der ganzen Ablationsperiode, gleichbleibende Bedingungen. Da der Wind an der Klimastation HEF-Zunge in 70 % der Fälle (Terminwerte 7^h, 14^h, 19^h MEZ) aus dem Bereich der Gletscherzunge weht, kann angenommen werden, daß diese Station die Verhältnisse auf dem Gletscher gut wiedergibt. Aus den 7^h-, 14^h- und 19^h- Terminwerten wurden Tagesmittel für den Dampfdruck und die Windgeschwindigkeit berechnet. Aus den für die Verdunstungsmeßperiode gefundenen Zusammenhängen und unter Annahme schmelzender Oberfläche erhält man mittlere Stundenwerte von Verdunstung und Kondensation. Mit 24 multipliziert ergibt das die jeweiligen Tagesbeträge. Die so ermittelten Werte passen sehr gut mit jenen aus den ergänzten Wägungen zusammen ($r=0,99$). In Abb. 4 sind die Tagessummen der Verdunstung für die Monate Juni, Juli und August 1980 dargestellt. In Tabelle 5 sind die so ermittelten Monatssummen von Juni, Juli und August der Jahre 1977–1980 enthalten. Als Summe über die drei Sommermonate, gemittelt über die vier Jahre, ergibt sich ein Verdunstungsbetrag von $-21,3 \text{ mm}$.

Tab. 5: Aus Klimadaten im Zungenvorfeld und unter Annahme schmelzender Oberfläche berechnete Verdunstungs- und Kondensationssummen in mm/Monat. Hintereisferner Zunge.

	Juni	Juli	August
1977	-11,0	4,6	3,6
1978	-21,4	- 5,8	- 10,7
1979	- 9,5	-11,3	- 11,2
1980	-23,2	- 4,4	14,9
Mittel	-16,3	- 4,2	- 0,8

Zudem, daß die Klimadaten vom Zungenvorfeld nicht immer die Verhältnisse auf dem Gletscher wiedergeben können, scheint die Annahme schmelzender Oberfläche

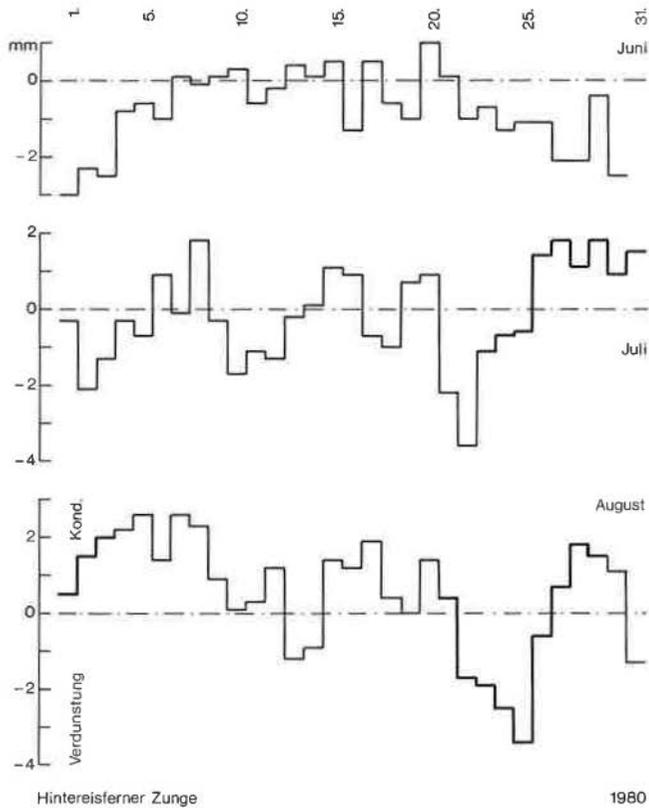


Abb. 4: Unter der Annahme schmelzender Oberfläche berechneter Gang von Verdunstung und Kondensation in mm für die Zunge des Hintereisferners. Die Meßperioden an der Station Hintereis (23. 7.—3. 8. 1980) und auf der Zunge des Hintereisferners (21. 8.—29. 8. 1980) sind dicker gezeichnet.

zu einer Fehleinschätzung zu führen. Bereits während der Verdunstungsmeßperiode betrug die Eisoberflächentemperatur im Mittel $-0,5^{\circ}\text{C}$.

Für 1978 wurde mit einer vollständigen Klimadatenreihe versucht, die Verdunstung für die Zeit von April bis September zu berechnen, wobei die Oberflächentemperatur stets niedriger als die Lufttemperatur gehalten wurde, und zwar in folgender Weise:

- Bei negativen Tagesmitteln der Lufttemperatur wurde die Oberflächentemperatur auf den nächsten ganzzahligen Wert abgerundet (z. B.: Lufttemperatur in 2 m Höhe = $-3,4^{\circ}\text{C}$: Oberflächentemperatur = $-4,0^{\circ}\text{C}$).
- Bei Lufttemperaturen über 0°C wurde Tagesmittel der Oberflächentemperatur von -2°C im Mai, -1°C im Juni und September und $-0,5^{\circ}\text{C}$ im Juli und im August angenommen.

Bei dieser Berechnung wurden die Verdunstungsbeträge stark gesenkt, für den Juli wurde als Monatssumme Kondensation berechnet. Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse in Monatssummen.

Tab. 6: Für 1978 berechnete Verdunstung in mm/Monat unter der Annahme negativer Oberflächentemperaturen. Hintereisferner Zunge.

	April	Mai	Juni	Juli	August	September
1978	-46,2	-33,8	-10,2	0,4	-4,7	-19,7

Unter der Annahme negativer Oberflächentemperaturen erhält man mit $-14,5$ mm Verdunstung zwischen Juni und August 1978 einen deutlich niedrigeren Betrag als mit $-37,9$ mm für dieselbe Zeit unter Annahme schmelzender Oberfläche.

5. ÜBER DIE ABSCHÄTZUNG EINER JAHRESGEBIETSVERDUNSTUNG AUF DEM HINTEREISFERNER

Geht man von den Ergebnissen in Tabelle 6 aus, so sind auf der Zunge des Hintereisferners im Halbjahr zwischen April und September 1978 $-114,2$ mm verdunstet. Mit $-1,5$ mm d^{-1} im April und $-0,6$ mm d^{-1} im Mittel über alle 6 Monate liegen diese Werte bedeutend höher als die meisten vergleichbaren Ergebnisse anderer Autoren. Nur Gold und Williams (1960) erhalten aus Wärmebilanzmessungen in der Umgebung von Ottawa mit $-2,4$ mm d^{-1} im April einen noch höheren Betrag.

In Abb. 5 ist der Gang der gemessenen und ergänzten Verdunstung an der Station Hintereis und jener mit der Annahme einer mittleren Eisoberflächentemperatur von $t_s = -0,5^\circ$ C berechneten während derselben Periode auf der Zunge des Hintereisferners eingetragen. Daraus erkennt man, daß im Firngebiet wenigstens im Sommer deutlich höhere Verdunstungsbeträge zu erwarten sind. Als Folge daraus müßte man annehmen, daß im Jahr 1978 zwischen April und September zwischen -100 mm und -200 mm auf dem ganzen Gletscher verdunstet sind. Auch wenn man in Anlehnung an die Ergebnisse von Innsbruck annimmt, daß während der restlichen Monate von Oktober bis März keine Verdunstung stattfindet und berücksichtigt, daß der Hintereisferner durch den großen Abstand vom Alpenrand in einem trockenen Teil der Alpen liegt, scheint der Betrag von -150 ± 50 mm a^{-1} , im Mittel über das ganze Jahr $-0,41 \pm 0,14$ mm d^{-1} sehr hoch zu sein. Er liegt jedenfalls weit über den Werten, die z. B. Lang (1981) oder Föhn (1978) zusammengestellt haben.

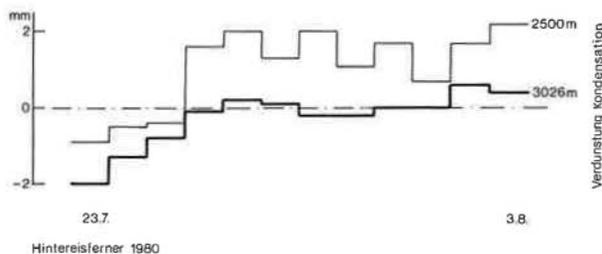


Abb. 5: Gemessene und ergänzte Tagesbeträge von Verdunstung und Kondensation in mm für die Station Hintereis (3026 m, dicke Linie) und unter Annahme einer Oberflächentemperatur von $-0,5^\circ$ C berechnete Werte für die Zunge des Hintereisferners (2500 m, dünne Linie). 23. Juli bis 3. August 1980.

6. SCHLUSS

Die einzelnen Meßperioden haben aufschlußreiche Ergebnisse über Größenordnungen der täglichen Verdunstungsbeträge, z. T. über die unterschiedlichen Vorgänge in verschiedenen Gebieten, über die Zusammenhänge mit anderen Parametern und interessante Hinweise über die Vorgänge im katabatisch abfließenden Gletscherwind gebracht. Kurzfristig lassen sich die erkannten Zusammenhänge auch für die Ergänzung ausgefallener Verdunstungsmessungen gut einsetzen. Annehmbar gute längerfristige und gebietsweise Berechnungen scheitern aber vor allem daran, daß man die Oberflächentemperatur und damit den Sättigungsdampfdruck an der Schnee- und Eisoberfläche nicht kennt.

Auf die Bedeutung der Verdunstung von Schnee und Eis für einen Gletscher soll folgendes Beispiel hinweisen: würde man annehmen, daß auf dem Hintereisferner mit der für -50 mm a^{-1} Verdunstung notwendigen Energie Eis geschmolzen würde, so wäre der Verlust für den Gletscher um 375 mm a^{-1} größer. Zwischen 1952 und 1982 wäre da der Massenverlust für den Hintereisferner mit -18982 mm fast dreimal so groß gewesen als der tatsächlich gemessene von -7732 mm .

DANK

Die Österreichische Akademie der Wissenschaften hat die Untersuchungen durch die Bereitstellung der finanziellen Mittel ermöglicht. Bei Friedl Obleitner bedanke ich mich für die Hilfe bei den Feldarbeiten, bei Prof. M. Kuhn für die Anregungen und Diskussionen, bei Prof. A. Ohmura für die Daten von Axel Heiberg und vom Rhonegletscher.

LITERATUR

- Föhn, P., 1978: Schneeverdunstung im alpinen Gelände: Die Verdunstung in der Schweiz: Beiträge zur Geologie der Schweiz-Hydrologie, 25, 35—42.
- Gold, L. W. und G. P. Williams, 1960: Energy Balance during Snow Melt Period at an Ottawa site: IASH-General Assembly of Helsinki, 54, 228—294.
- Hoinkes, H., 1954: Der Einfluß des Gletscherwindes auf die Ablation. Z. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie, 3/1, 18—23.
- Hoinkes, H., 1955: Beiträge zur Kenntnis des Gletscherwindes: Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B, 6, 36—53.
- Hoinkes, H., 1970: Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern: Z. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie, 6/I—II, 37—90.
- Kaser, G., 1982: Measurement of Evaporation from Snow: Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 30, 333—340.
- Kaser, G., 1983: Verdunstung von Schnee und Eis: Dissertation Universität Innsbruck, 153 S.
- Kaser, G., 1984: Verdunstungsmessungen über einer winterlichen Schneedecke: in Met. Rundschau.
- Kuhn, M., 1978: Die Höhe des Geschwindigkeitsmaximums im Gletscherwind als Parameter des Wärmehaushaltes: Bericht über die 14. Intern. Tagung f. Alp. Meteorologie, Rauris 1976: Arbeiten aus der Zentralanstalt f. Meteorol. u. Geodyn., 31, 69/1—69/8.
- Kuhn, M. (Hrsg.), 1980: Karte des Hintereisferners 1979, 1:10000: Beilage zur Z. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie, 16 (1).
- Kuhn, M., G. Kaser, M. Markl, H. P. Wagner und H. Schneider, 1979: 25 Jahre Massenhaushaltsuntersuchungen am Hintereisferner: Institut für Meteorologie und Geophysik, Univ. Innsbruck, 80 S.

- Kuzmin, P. P., 1961: Melting of Snow Cover: Israel Program of Scientific Transtations Ltd., Jerusalem, 1972; Evaporation: 47—59.
- Lang, H., 1981: Is Evaporation an Important Component in High Alpine Hydrology?: Nordic Hydrology, 12, 217—224.
- Müller, H., 1981: Persönliche Mitteilung, ETH Zürich.
- Ohmura, A., 1981: Persönliche Mitteilung, ETH Zürich.
- Österreichischer Alpenverein, 1971: Blatt Weißkugel-Wildspitze 1:25000, 1951, 1964 ergänzt und berichtigt, 1971 einzelne Nachträge: Kartenwerk der Stubai- und Ötztaler Alpen.
- De Quervain, M., 1951: Zur Verdunstung der Schneedecke: Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B., 3, 47—64.
- Rudolph, R., 1963: Glacial Bibliography of the Central Ötztal Alps: IASH-Bulletin VIII, Annex, 2, 132—139.
- Wagner, H. P., 1971: unveröffentlichte Daten: Strahlungsbilanzmessungen Hintereisferner. Inst. f. Meteorologie u. Geoph., Univ. Innsbruck.
- Wagner, H. P., 1979: Strahlungshaushaltsuntersuchungen an einem Ostalpengletscher während der Hauptablationsperiode. Teil I: Kurzwellige Strahlung: Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 27, 297—324.

Manuskript am 16. 4. 1984 erhalten.

Anschrift des Verfassers: Dr. Georg Kaser
Institut für Meteorologie und Geophysik
Schöpfstraße 41
6020 Innsbruck