

Kurzberichte

Verdunstungsmessungen über einer winterlichen Schneedecke

G. KASER, Innsbruck

Zusammenfassung. Als Ergänzung zu direkten Verdunstungsmessungen während der Ablationsperiode auf dem Hintereisferner in den Ötztaler Alpen wurden im Januar und Februar 1981 auf einer winterlichen Schneedecke in Innsbruck ähnliche Untersuchungen gemacht. In mehrstündigen Zeitabständen wurden mit Schnee gefüllte Plexiglaslysimeter gewogen, um Verdunstung und Kondensation festzustellen. An verschiedenen geschützten und besonnten Stellen wurden unterschiedliche Ergebnisse erhalten. Im Verlauf der beiden Monate änderten sich die Bedingungen derart, daß über der kalten Pulverschneedecke im Januar fast ausschließlich Kondensation, Ende Februar über dem schmelzenden Schnee fast nur Verdunstung beobachtet wurde. Im Mittel über 5 nicht aufeinanderfolgende Tage verdunsteten $-0,06 \text{ mm we d}^{-1}$.

Evaporation from a seasonal snow cover

Summary. In the winter of 1981 evaporation from the snow pack was measured in the garden of the Meteorological Institute in Innsbruck. Evaporation or condensation was determined by weighing snowfilled plexiglass lysimeters at intervals of several hours. Results differed depending on the exposure of the site to sunshine. In the course of the experiment conditions ranged from predominantly condensation on the cold powder snow in January to predominantly evaporation from melting snow at the end of February. A representative average over 5 mostly clear days was an evaporation rate of $-0.06 \text{ mm water equivalent per day}$.

1. Versuchsanordnung

Im Januar und im Februar 1981 bot eine länger andauernde, ca. 40–60 cm mächtige Schneedecke in Innsbruck (570 m ü.M.) die Gelegenheit, Verdunstung und Kondensation zu messen, nachdem im vorangegangenen Sommer derartige Messungen im Firngebiet und auf der Gletscherzunge des Hintereisferners in den Ötztaler Alpen gemacht worden waren [1, 2]. Im Versuchsgelände des Institutes für Meteorologie und Geophysik erreichte die Schneedecke am 21. 2. 1981 mit 68 cm die größte Höhe dieses Winters. In der Nähe der dort betriebenen Klimastation wurden 4 und später 2 Lysimetertöpfe in ca. 2 m Abstand voneinander eingegraben und mit Schnee gefüllt. Die Töpfe bestanden aus je zwei ineinander gestellten Plexiglasbehältern, von denen jeweils der innere in gewissen Zeitabständen herausgehoben und auf einer Balkenwaage gewogen wurde. Bei einer Gewichtsbestimmung auf 0,5 g Genauigkeit und einer Lysimeteroberfläche von 400 cm^2 ergab dies eine Auflösung von $12,5 \text{ gm}^{-2}$ bzw. $0,0125 \text{ mm we}$ Verdunstung oder Kondensation. Die Wägungen wurden um 8^h, 12^h, 16^h und 20^h durchgeführt, wodurch sich für diese Meßanordnung ein mittlerer relativer Fehler von ± 2 bis $\pm 4\%$ ergab.

Direkte Schnee-Verdunstungsmessungen sind nur bei niederschlags- und driftfreiem Wetter möglich. Aus diesem Grund mußten die Untersuchungen zwischen 22. 1. und 27. 2. 81 öfters unterbrochen werden. Insgesamt konnte über 292 Stunden gemessen werden.

2. Ergebnisse und Diskussion

Das Versuchsgelände ist mit Sträuchern bewachsen und die mit L1, L2, L3 und L4 bezeichneten Meßproben waren dadurch unter-

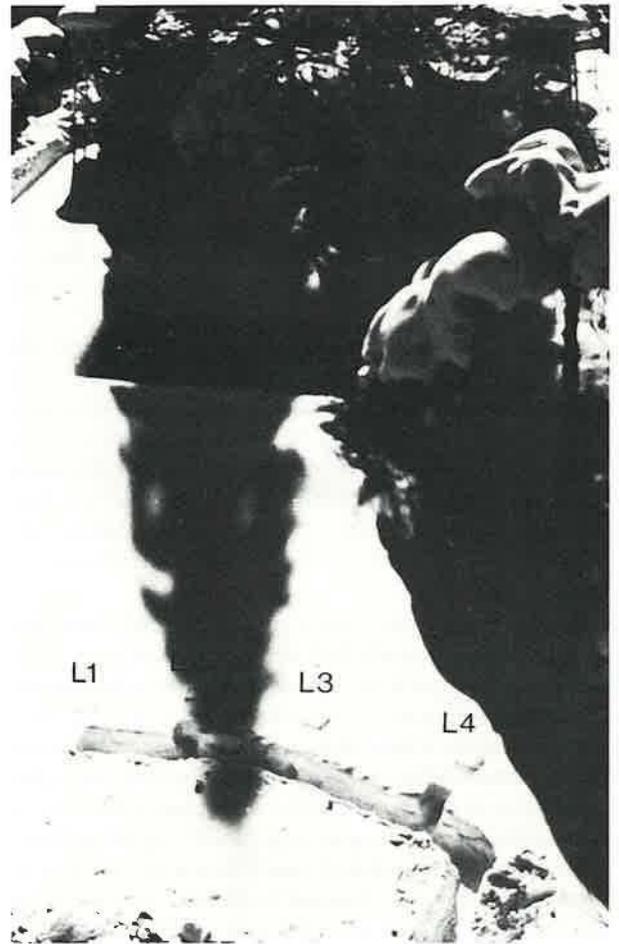


Abb. 1. Das Versuchsgelände des Meteorologischen Institutes in Innsbruck während der Meßperiode im Winter 1981. Im Vordergrund von links nach rechts die Meßproben L1 — L4.

schiedlichen Strahlungsverhältnissen ausgesetzt. L1 lag am freiesten, L4 am nächsten bei den Büschen (Abb. 1). Die Summenkurven in Abb. 2, in der alle Wägungen für die Proben L1 und L4 aufsummiert sind, zeigen die Unterschiede deutlich. L2 und L3, mit denen nur über je 120 Stunden gemessen wurde, liegen dazwischen.

An drei Tagen sind für alle 4 Proben vollständige Messungen vorhanden, so daß aus den Ergebnissen vom 23. 1., 24. 1. und 3. 2. mittlere Tagesgänge von Verdunstung und Kondensation für die einzelnen Meßtöpfe berechnet werden konnten. Diese mittleren Tagesgänge sind in Abb. 3 dargestellt, die deutlich macht, daß die Verdunstung von L1 über L2 und L3 zu L4 abnimmt. In Abb. 3 sind zusätzlich die Sonnen- und Schattenverhältnisse bei den einzelnen Proben, beobachtet am wolkenlosen 27. 1. 81, dargestellt. Während L1 und L2 am längsten in der Sonne sind, liegt L4 weitaus am schattigsten.

Auch die Temperaturen der Schneeoberfläche, die an einigen Tagen mit einem Infrarot-Handthermometer und mit ausgelegten Stationsthermometern gemessen wurden und in die Tabelle 1 eingetragen sind, deuten auf die unterschiedlichen energetischen Bedingungen im Versuchsgelände hin. Bedingt durch die schattige und geschützte Lage ist die Oberflächentemperatur beim Lysime-

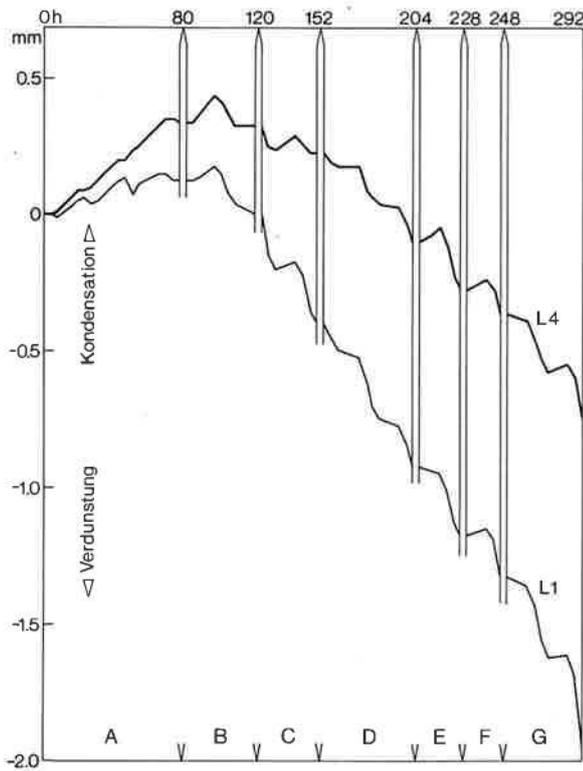


Abb. 2. Summenkurven von Verdunstung und Kondensation für die Proben L1 und L4. Die einzelnen Meßperioden sind: A: 22. 1., 12^h—25. 1., 20^h; B: 2. 2., 16^h—4. 2., 8^h; C: 16. 2., 12^h—17. 2., 20^h; D: 19. 2., 12^h—21. 2., 16^h; E: 22. 2., 20^h—23. 2., 20^h; F: 24. 2., 20^h—25. 2., 16^h; G: 25. 2., 20^h—27. 2., 16^h; Innsbruck 1981.

ter L4 durchwegs tiefer, aber auch der Tagesgang ist dort geringer. Diese Umstände wirken sich auch auf Verdunstung und Kondensation aus, so daß der latente Umsatz bei L4 geringer ist als bei den anderen Proben.

Der in Abb. 3 mit \bar{L} bezeichnete Tagesgang der Verdunstung ist aus den vier Lysimetern über die drei Tage arithmetisch gemittelt. Im Mittel kondensieren $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ mm we h}^{-1}$. Der Tagesgang ist durch die 4-Stundenintervalle bei Tag und die 12-Stundenintervalle bei Nacht nur grob aufgelöst, läßt aber die Grundstruktur deutlich erkennen: in der Nacht überwiegt Kondensation und nur während des kurzen Tages (Sonnenaufgang: 9:10, Sonnenuntergang: 16:05) wird von der Schneeoberfläche verdunstet, wobei das Maximum der Verdunstung nach dem Sonnenhöchststand auftritt. An schönen Wintertagen wird die Luft im Versuchsgelände kaum ausgetauscht. Auch wenn auf dem Institutsdach Wind regi-

Tabelle 1. Oberflächentemperaturen der Schneedecke in °C bei den Meßproben L1 und L4. Innsbruck 1981.

		L1	L4
19. 2.	12 ^h	— 2,5	— 5,0
	16 ^h	— 5,5	— 7,5
	20 ^h	— 6,0	— 7,0
20. 2.	8 ^h	— 5,0	— 6,0
	12 ^h	— 0,5	— 7,0
	16 ^h	— 4,0	— 7,0
21. 2.	20 ^h	— 8,0	— 10,0
	8 ^h	— 5,0	— 6,0
	12 ^h	— 1,0	— 2,0
	16 ^h	— 1,0	— 2,0

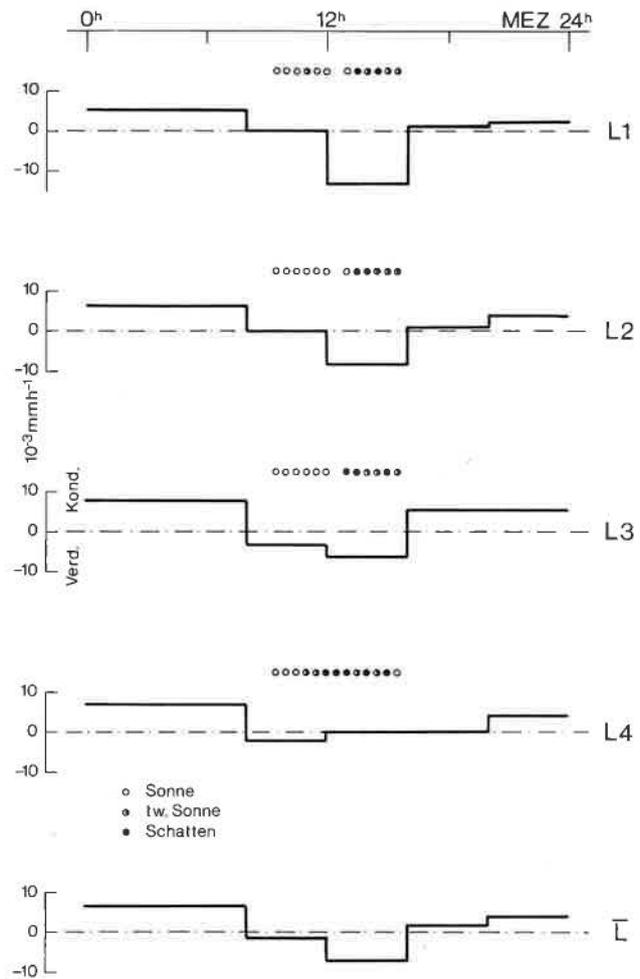


Abb. 3. Mittlerer Tagesgang aus den Meßwerten von 23. 1., 24. 1. und 3. 2. 81 von Verdunstung und Kondensation in $10^{-3} \text{ mm we h}^{-1}$ für die Proben L1, L2, L3 und L4 und das arithmetrische Mittel \bar{L} daraus. Innsbruck 1981.

striert wird, ist es im Versuchsgelände meist windstill. Dadurch fehlt jeder advective Einfluß auf den Wärmehaushalt der Schneeoberfläche und die Änderungen gehen synchron mit dem Gang der Sonne vor sich.

Außer an den drei besprochenen Tagen wurden am 20. 2. und am 26. 2. 81 mit den Lysimetertöpfen L1 und L4 über 24 Stunden Messungen durchgeführt. In der Tabelle 2 sind folgende Daten für den 23. 1., 24. 1., 3. 2., 20. 2. und 26. 2. 81 zusammengestellt: Verdunstung, Kondensation, Nettosumme und Umsatz in MJ m^{-2} als Mittel über 4 bzw. 2 Lysimetertöpfe, wobei aufgrund der niedrigen Temperaturen angenommen wird, daß bei der Kondensation aller Wasserdampf vom gasförmigen in den festen Zustand umgewandelt wurde und nicht als Tau auf eine schmelzende Oberfläche fiel (die als Verdunstung bzw. Kondensation angegebenen Teilbeträge sind natürlich ihrerseits bereits Nettosummen über die 4- bzw. 12-stündigen Meßintervalle). Die Globalstrahlung wurde auf dem Dach des Institutsgebäudes registriert und ist hier in MJ m^{-2} für die einzelnen Tage angegeben. Die folgenden Werte sind dem Innsbrucker Monatsbogen 1981 entnommen: τ_s ist das nächtliche Minimum der Oberflächentemperatur, gemessen in ca. 20 m Entfernung von der Verdunstungsmeßstelle. $\bar{\tau}$ und \bar{e} sind arithmetische Mittel aus den Terminwerten 7^h, 14^h, 19^h der Temperatur und des Dampfdruckes in der Wetterhütte. Die Bewölkung ist ebenfalls ein Mittel aus den Schätzungen in 1/10 zu den Terminen 7^h, 14^h, 19^h.

Tabelle 2. Verschiedene Meß- und Beobachtungsgrößen an fünf verschiedenen Tagen.

		23. 1.	24. 1.	3. 2.	20. 2.	26. 2.
Verdunstung (\bar{L})	MJ m ⁻²	—	— 0,04	— 0,35	— 0,56	— 0,70
Kondensation (\bar{L})	MJ m ⁻²	0,27	0,33	0,15	—	0,03
Nettosumme (\bar{L})	MJ m ⁻²	0,27	0,29	— 0,20	— 0,56	0,67
Umsatz (\bar{L})	MJ m ⁻²	0,27	0,37	0,50	0,56	0,73
Globalstrahlung	MJ m ⁻²	7,26	7,65	5,95	9,87	11,75
t_s	°C	— 22,3	— 22,3	— 15,4	— 7,0	— 9,0
\bar{t}	°C	— 9,2	— 6,8	— 0,5	— 1,7	— 0,6
\bar{e}	hPa	1,9	2,4	3,1	2,4	2,6
Bewölkung	1/10	0,3	0,0	6,3	3,3	3,3

Aus dieser Zusammenstellung, den Abb. 2 und 3 und den Aufzeichnungen über die Beschaffenheit der Schneeoberfläche ergibt sich ein interessanter Überblick über die Verdunstungs- und Kondensationsvorgänge:

23. 1. 1981: An diesem Tag überwiegt im Mittel über alle Töpfe die Kondensation. Die Energie, die dadurch der Schneeoberfläche zugeführt wird, ist um vieles geringer als jene der Globalstrahlung. Oberflächen- und Lufttemperatur, Dampfdruck und Bewölkung zeigen, daß der 23. 1. ein schöner, kalter Wintertag ist, der auf eine klare Strahlungsnacht folgt. Den ganzen Tag über ändert sich die lockere, glatte Pulverschneeoberfläche nicht. Auf eine weitere klare Strahlungsnacht folgt mit dem

24. 1. 1981 ein wolkenloser Tag. Sowohl die Verdunstung als auch die Kondensation sind etwas höher als am Vortag. Globalstrahlung, Temperatur und Dampfdruck sind ebenfalls höher und scheinen für den erhöhten Umsatz verantwortlich zu sein. Am Nachmittag und am Abend bilden sich große Reifkristalle auf der pulvrigen Schneeoberfläche.

Am 3. 2. 1981 ist die oberste Schicht der Schneedecke weitgehend verfirnt, nur an schattigen Stellen (L4) liegen noch große Reifkristalle auf lockerem Pulver. Die Oberfläche ist rußig-schmutzig. Der Himmel ist stark bewölkt, Dampfdruck und Temperatur sind hoch. Dadurch ergeben sich ganz andere Bedingungen für die Energiebilanz der Schneeoberfläche als an den beiden Januartagen: das Angebot aus der Globalstrahlung ist zwar geringer, das Absorptionsvermögen wegen der niedrigen Albedo aber größer. Zudem scheint der fühlbare Wärmestrom höher zu sein (\bar{t}), eine starke Ausstrahlung wird durch die starke Bewölkung verhindert. Diese Überlegungen lassen für diesen Tag erhöhte latente Umsätze erwarten. Tatsächlich wird stärkere Verdunstung gemessen und in der Sonne und auf den Bäumen oberflächliches Schmelzen beobachtet.

20. 2. 81: Auf einer verkrusteten Unterlage liegen 2—3 cm lockerer Pulverschnee. Aus einer nächtlichen Hochnebeldecke fallen in der Frühe noch einzelne Schneeflocken, beeinflussen die Messungen aber nicht. Der Rest des Tages ist wolkenlos, die Sonne scheint länger als Ende Januar, Globalstrahlung und Lufttemperatur sind höher. Dementsprechend höher sind die gemessenen Verdunstungsbeträge, wobei in der Sonne (L1) um ca. 40% mehr verdunstet als bei L4.

Der 26. 2. ist dem 20. 2. sehr ähnlich. Hochnebel verhindert in der Nacht und am frühen Morgen ein starkes Abkühlen der Schnee-

oberfläche. Der restliche Tag ist wolkenlos und bietet gute Voraussetzungen für die Verdunstung von Schnee. Die verfirnte Oberfläche schmilzt und setzt sich untertags.

Im Mittel über alle 4 bzw. 2 Meßproben und über die 5 nicht zusammenhängenden Tage überwiegt die Verdunstung mit nur $-0,06$ mm we d⁻¹. Dieser Betrag liegt in der Größenordnung vergleichbarer Meßergebnisse: In Südfinnland haben Lemmelä und Kuosisto [3] ebenfalls mit direkten Messungen für den Januar ± 0 mm we d⁻¹ und für den März und April $-0,3$ mm we d⁻¹ Verdunstung festgestellt. Seo und Yamaguchi [4] haben über schneebedecktem Grasland im April $-0,1$ mm we d⁻¹ Verdunstung aus einer Energiebilanz erhalten. Mörlikhofer [5] hat aus direkten Wägungen im allerdings etwas höher gelegenen Davos (1550 m ü.M.) für April und Mai $-0,06$ mm we d⁻¹ Schneeverdunstung bestimmt, DeQuervain [6] ebenfalls in Davos für den März ca. $-0,16$ mm we d⁻¹ Gold und Williams [7] geben mit $-2,4$ mm we d⁻¹ Verdunstung einen deutlich höheren Wert an, den sie aus einer Wärmebilanz über schneebedecktem Grasland im April bestimmten. Diese Daten wurden einer Zusammenstellung der Studiengruppe „Verdunstung“ der Hydrologischen Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft entnommen [8].

Summiert man die gemittelten Beträge (\bar{L}) der 5 Tage, so sind insgesamt $-0,31$ mm we verdunstet, was einem Energieentzug für die Schneeoberfläche von $-0,87$ MJ m⁻² gleichkommt. Daß jedoch auf kleinstem Raum verschieden große latente Wärmeströme herrschen, zeigt der Vergleich der einzelnen Meßproben L1 und L4. L1 ist sonniger gelegen und es wurden dort während der 5 Tage 1,5 MJ m⁻² für die Nettoverdunstung verbraucht. Bei L4 standen dazu lediglich 0,4 MJ m⁻² zur Verfügung.

Literatur

- [1] Kaser, G.: Measurements of evaporation from snow. — Arch. Met. Geophys. Biokl., Ser. B, 30, 333—340 (1982).
- [2] Kaser, G.: Verdunstung von Schnee und Eis. — Diss., Univ. Innsbruck, 153 S. (1983).
- [3] Lemmelä, R., Kuosisto E.: Evaporation from snow cover. — Hydrol. Sci. Bull. XIX, (12), 531—548 (1974).
- [4] Seo, J., Yamaguchi N.: An observation of heat balance on a snow field at the time of ablation in 1963. — Ber. d. Ohara-Inst., Japan, 13, (1), 13—21 (1965).
- [5] Mörlikhofer, W.: Orientierende Versuche über das Schmelzen und Verdunsten von Schnee. — Ber. d. Phys. Met. Observatoriums Davos, 15. Mai 1935 (1935).
- [6] DeQuervain, M.: Zur Verdunstung der Schneedecke. — Arch. Met. Geophys. Biokl., Ser. B, 3, 47—64 (1951).
- [7] Gold, L.W., Williams, G.P.: Energy balance during snowmelt period at an Ottawa site. — IASH-General Assembly of Helsinki, Publ. No. 54, 228—294 (1960).
- [8] Föhn, P.: Schneeverdunstung im alpinen Gelände. Die Verdunstung in der Schweiz. — Beitr. z. Geol. d. Schweiz — Hydrologie Nr. 25, 35—42 (1978).

G. Kaser
Inst. f. Meteorologie und
Geophysik
Universität Innsbruck
Schöpfstraße 41
A-6020 Innsbruck

Eingereicht: 18. 11. 1983, angenommen: 20. 6. 1984