

	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
Obir:													
1891—1900	107	134	138	139	127	163	205	199	182	125	118	121	1758
1901—1910	130	99	129	127	152	162	198	199	150	132	115	87	1680
1911—1920	106	144	127	126	161	159	188	199	156	120	98	88	1672
1921—1930	113	122	143	117	164	173	213	227	152	143	98	97	1762
1931—1940	103	125	136	133	142	173	205	185	165	125	103	98	1693
1941—1950	120	124	164	159	159	179	197	207	178	146	105	95	1833
Sonnblick:													
1891—1900	107	129	131	129	106	132	170	157	154	128	132	121	1596
1901—1910	113	84	111	110	131	138	158	164	137	131	106	75	1458
1911—1920	107	139	125	114	149	153	158	168	156	140	104	83	1596
1921—1930	109	133	154	105	141	149	189	187	140	155	106	103	1671
1931—1940	107	131	141	116	132	158	166	154	148	131	116	108	1608
1941—1950	111	111	157	152	160	170	187	179	171	157	104	105	1764

Literatur

- [1] Inge Dirmhirn, Untersuchungen der Himmelsstrahlung in den Ostalpen mit besonderer Berücksichtigung ihrer Höhenabhängigkeit. Arch. Met. Geoph. Biokl. Serie B, II. 301 (1951).
- [2] F. Steinhauser, Über die Abhängigkeit der Sonnen- und Himmelsstrahlung von der Höhe in den Ostalpen. Annalen d. Meteorologie 1951, S. 109.
- [3] F. Sauberer und Inge Dirmhirn, Die Bedeutung des Strahlungsfaktors für den Gletscherhaushalt. Wetter und Leben, 2, 248 (1950).
- [4] F. Steinhauser, Über die Beziehungen zwischen Sonnenscheinregistrierungen und Bewölkungsschätzungen und ihre Verwertungsmöglichkeit für die Berechnung der Sonnenscheindauer aus Bewölkungsbeobachtungen. Wetter und Leben 6, 139 (1954).
- [5] F. Steinhauser, Die Verteilung der Besonnung in Österreich im Frühling, Sommer, Herbst und Winter (mit 4 mehrfarbigen Karten im Maßstab 1:1,500,000). Statistische Nachrichten, Jg. X., Nr. 10, Wien 1955.

Über die Schneeumlagerung durch den Wind

Ein Beitrag zur Frage der Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Niederschlags-totalisatoren im Hochgebirge

Von H. HOINKES, Innsbruck

Mit 1 Bildtafel und 1 Textabbildung

Die wichtige Frage, welches Gewicht den Meßergebnissen von Niederschlagstotalisatoren im Hochgebirge, oberhalb der Baumgrenze, beizulegen ist, ist noch nicht restlos geklärt. Die Meinungen gehen von „viel zu wenig“ bis „viel zu viel“ diametral auseinander [3]; beide Urteile können richtig sein und sagen dennoch über die Brauchbarkeit der Totalisatoren allgemein nicht viel aus. Es versteht sich von selbst, daß nur die Ergebnisse gut betreuter und den weitgehend bekannten Störungen des Kleinreliefs nicht zu stark ausgesetzter Sammler diskutiert werden können.

Die Grundlage für die folgenden Betrachtungen liefern die Ergebnisse einiger Totalisatoren, die vom Österreichischen Alpenverein dankenswerterweise im Einzugsgebiet der Rofenache im zentralen Ötztal, vorwiegend im Gebiet des Hintereisferners, aufgestellt worden sind. Eine Bearbeitung der Meßergebnisse bis zum Jahre 1953 liegt vor [4]; ihr kann entnommen werden, daß das innere Ötztal ein extremes Trockengebiet ist. Reduziert auf die 30jährige Reihe 1926/27 bis 1955/56 des ältesten Totalisators Hintereisferner (2970 m), ergeben sich folgende mittlere Jahreswerte des Niederschlages für das hydrologische Jahr 1. Oktober bis 30. September:

Vent	Hochjochospiz	Proviantdepot	Saikogelgrat	Hintereisferner
1900 m	2360 m	2780 m	2880 m	2970 m
690 mm	880 mm	1020 mm	1130 mm	1360 mm

Die Ergebnisse decken sich in der Größenordnung mit den früher von E. Ekhardt [2] mitgeteilten, die gelegentlich als Musterbeispiel für die Unzulänglichkeit der Niederschlagsmessung im Hochgebirge angeführt worden sind [6]. Gestützt auf überaus wertvolle Beobachtungen der Schneehöhen auf Gletschern des Sonnblickgebietes, fordert H. Tollner [7] einen Jahresniederschlag in den zentralalpinen Gletschergebieten bei etwa 3000 m Höhe von rund 3000 mm als Voraussetzung für eine alpine Vergletscherung. Das ist gut doppelt soviel, als die Messungen im Ötztal ergeben, deren Fehlbetrag nach einer vorsichtigen Schätzung [4] etwa 10 bis 20% der Jahressumme kaum übersteigen dürfte.

Es besteht hier und auch sonst vielfach eine scharfe Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der den Niederschlag messenden Meteorologen und der den Abfluß oder den Eishaushalt der Gletscher kontrollierenden Glaziologen und Hydrologen. Sie ist auf den Umstand zurückzuführen, daß gut aufgestellte und geschützte Totalisatoren im wesentlichen nur den fallenden Niederschlag aufspeichern und über die gleichzeitige oder nachträgliche Verfrachtung des Schnees durch den Wind keine oder nur undefinierte Angaben machen können. Für die Glaziologie und für die Hydrologie ist es aber vor allem wichtig zu wissen, was an festem Niederschlag abgelagert wird. Der abgelagerte feste Niederschlag in einem bestimmten Einzugsgebiet muß wegen der Schneeuumlagerung durch den Wind mit dem dort gefallenen festen Niederschlag durchaus nicht identisch sein. Wir wissen über den wichtigen Vorgang der Schneeuumlagerung durch Wind und seine quantitativen Auswirkungen überhaupt noch sehr wenig, aber wir müssen ihn als Realität anerkennen und gründlich studieren; Anfänge dazu verdanken wir der Pionierarbeit von O. Lutschg [5].

Bei der Verfrachtung des Schnees durch den Wind muß man zwei grundverschiedene Prozesse unterscheiden, die einzeln oder gemeinsam, gleichzeitig mit dem Schneefall oder nachher stattfinden können. Fällt der Schnee bei starkem Höhenwind, in einem Gebirgstal also bei starker, fast sprunghafter Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe, dann wird von den windexponierten Bergkämmen und Luvhängen in Böen dauernd bereits abgelagerter Schnee wieder aufgewirbelt und von der starken Höhenströmung weithin über das Tal verfrachtet. In der ruhigeren Talatmosphäre fällt dieser Schnee zu Boden, ohne daß man festzustellen vermöchte, welcher Teil des relativ ruhig fallenden Schnees direkt aus den Wolken stammt und welcher bereits einmal oder mehrere Male abgelagert war. Diese Art der Schneeverfrachtung durch Wind findet wohl zumeist während des Schneefalles statt und nur gelegentlich kann man sie nach Aufhören des Schneefalles direkt sehen. Ein gutes Beispiel dafür gibt die Bildtafel, die den Gipfel der Jungfrau (4158 m, Berner Oberland) am 7. April 1956, unmittelbar nach einem mehrtägigen Schneesturm aus Nordwest, zeigt. Von den Graten und Felsflanken wird immer noch Schnee in großer Menge aufgewirbelt und weithin über das Firnbecken des Aletschgletschers verfrachtet; es ist nicht zweifelhaft, daß zur Zeit des stärksten Schneesturmes der gleiche Prozeß noch intensiver erfolgt ist, ohne daß man ihn hätte sehen können. Im Bereich der Firnbecken oder der Hochtäler aufgestellte Niederschlagssammler werden somit stets zu einem gewissen Teil derartig umgelagerten Schnee auffangen.

Die zweite Art der Verfrachtung des Schnees durch Wind ist das sogenannte Schneefegen, das am wirksamsten in den bodennahen Schichten unterhalb einer Höhe von etwa 2 m erfolgt. Das Schneefegen findet bereits während des Schneefalles, aber vorwiegend erst danach, bei klarem, kaltem Wetter statt, solange der gefallene Schnee noch locker ist. Auch die auf allen geneigten Schneeflächen bei ruhiger, klarer Großwetterlage auftretenden Schwerewinde verfrachten den Schnee in einer allerdings meist nur dünnen

Schicht von wenigen Dezimeter Höhe von allen Hängen in die flachen Mulden. Auf Abb. 1 ist im Mittelgrund ein solcher Schneetransport vor den dunklen Hängen des Trugberges am oberen Jungfraufirn am 8. April 1956 zu erkennen. Die so verfrachteten Schneemengen können von einem Totalisator normalerweise nicht aufgefangen werden. Wahrscheinlich ist die Schneeverfrachtung durch Schneefegen quantitativ wirksamer. Wenn nicht bei verschiedenen Windrichtungen Zu- und Abtransport von Schnee an



Abb. 1. Blick vom oberen Jungfraufirn gegen den Trugberg (3933 m) am 8. April 1956 (Photo H. Hoinkes).

einem bestimmten Punkt im Gelände sich ausgleichen, kann eine Übereinstimmung zwischen dem Wassergehalt der Schneedecke und dem Inhalt des Totalisators nicht erwartet werden, selbst wenn der Totalisator ideal fehlerfrei wäre. Auch eine Aufstellung der Totalisatoren auf den Firnflächen selbst, die gelegentlich versucht worden ist, kann hier keine Abhilfe schaffen.

Es hat also wenig Sinn, im Hochgebirge an einem direkt aus den Wolken gefallenem Niederschlag festhalten zu wollen, den man während des Winterhalbjahres wegen der ersten Art der Schneeverfrachtung durch Wind nicht messen kann und der mit dem Eishaushalt und mit dem Abfluß nicht übereinstimmt. Der komplexe Vorgang Schneefall plus gleichzeitige und nachträgliche Umlagerung des Schnees durch den Wind muß als Einheit aufgefaßt werden. Der repräsentative Niederschlagswert eines genügend großen Einzugsgebietes im Hochgebirge für einen Zeitabschnitt ohne flüssigen Niederschlag muß gleich sein der dort abgelagerten mittleren Schneedecke. Auch auf den großen Inlandeismassen der Polargebiete ist eine Trennung von unmittelbarem Schneefall und Schneeverfrachtung durch den Wind nicht durchführbar. Es gibt dort keine andere Möglichkeit der Niederschlagsmessung als das Studium der Schneeablagerungen. Auch

dort muß die Schneeverfrachtung durch den Wind quantitativ studiert werden, da dieser Prozeß oft eine wirksame Form der Ablation darstellt und für den Massenhaushalt weiter Gebiete von Bedeutung ist. In dieser Beziehung bestehen viele Ähnlichkeiten zwischen den Verhältnissen in den Polargebieten und denen im winterlichen Hochgebirge. Da viele Stellen im Hochgebirgsgelände auch im Winter fast stets schneefrei sind, muß notwendigerweise an anderen mehr Schnee liegen, als gefallen ist. Die Aufgabe besteht darin, repräsentative Werte von Höhe und Dichte für die Schneedecke im Hochgebirge zu bestimmen, bevor ein Abfluß aus der Schneedecke eingesetzt hat. Davon kann man sich durch Temperaturmessungen in der Schneedecke leicht überzeugen. Solange noch irgendwelche Schichten innerhalb der Schneedecke einen gewissen Kältegehalt haben, muß das von der Oberfläche versickernde Schmelzwasser im Innern der Schneedecke wieder frieren; die dabei frei werdende Schmelzwärme kompensiert einen Teil des Frostbetrages. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis die ganze Schneedecke von den charakteristischen Eislagen durchzogen und isotherm auf Null Grad angelangt ist; erst dann beginnt der Abfluß aus der Schneedecke. Ein Abbau der Schneedecke bereits während des Winters durch Schmelzung von unten her [8] wird im Hochgebirge kaum mehr vorkommen; Fehler dieser Art sind daher nicht zu befürchten.

Ab Winter 1953/54 haben wir im Gebiet des Hintereisferners in den Öztaler Alpen systematische Studien der Winterschneedecke in der Nachbarschaft der Totalisatoren durchgeführt, deren Ergebnisse interessant genug erscheinen, um hier kurz diskutiert zu werden. Anfang April und bei den höher gelegenen Sammlern noch einmal Anfang Juni wurde die Schneedecke aufgegraben, nachdem zunächst mit einer Lawinsonde eine repräsentative Stelle gefunden worden war. Mit dieser Sonde werden auch größere Schneetiefenprofile im Gelände aufgenommen. Das mühsame Aufgraben der Schneedecke ist unerlässlich, wenn man gute Werte für Dichte, Struktur und Temperaturverteilung erhalten will; die Schneedecke wird dann mit einem kurzen Zylinder ihrem natürlichen Aufbau nach abgestochen und durch Wägung der Wasserwert des Schnees bestimmt.

Die nachfolgende Tabelle zeigt zum Vergleich die Wassermenge im Totalisator und in der Schneedecke für gleiche Zeitabschnitte sowie die mittlere Dichte der Schneedecke. Während der Inhalt der einzelnen Totalisatoren im Winterhalbjahr, wenn man so sagen darf, vernünftig mit der Höhe zunimmt, zeigt der Wassergehalt der Schneedecke in jedem Jahr einen bemerkenswerten Sprung auf mehr als den doppelten Betrag. Dieser Sprung tritt ein zwischen den Sammlern Proviantdepot (2780 m) bzw. Saikogelgrat (2880 m) und dem nur unerheblich höher gelegenen Sammler Hintereisferner (2970 m). Die beiden erstgenannten Sammler stehen im aeren geneigten Gelände (vgl. die Lagebeschreibung in [4]), beim letzteren wurde die Schneedecke etwa 200 m horizontal vom Totalisator entfernt und etwa 20 m tiefer am flachen Gletscher untersucht. Auch auf den tieferen Teilen der Zunge des Hintereisferners wurde bei den regelmäßig durchgeführten Aufgrabungen stets mehr Schnee angetroffen als im geneigten Gelände zu beiden Seiten des Gletschers.

Drückt man den Inhalt des Totalisators in Prozenten des Wassergehaltes der Schneedecke aus, dann erhält man bei den Sammlern im unvergletscherten, geneigten Gelände in zwei Wintern Werte zwischen 89 und 96%, also in den Totalisatoren nur unerheblich weniger als in der Schneedecke. Tatsächlich wird in diesem Falle der Fehlbetrag der Totalisatoren etwas größer sein, da durch den Überschuß der Verdunstung über die Kondensation während des Winters ein gewisser Teil der Schneedecke aufgezehrt worden ist. Andererseits gewährt besonders bei reichlichen festen Niederschlägen das Paraffinöl keinen vollkommenen Verdunstungsschutz für den Inhalt des Totalisators. Der Einfluß

der Verdunstung sollte aber nicht überschätzt werden, wie das in den meisten Fällen geschieht. Im Winter 1955/56 war durch starke Winderosion der Schneedecke der Inhalt der Totalisatoren um 31 bis 47% größer, an einer Stelle hat der Wassergehalt der Schneedecke nur ein Viertel des Totalisatorinhalts betragen. Nur beim Sammler Hinter-eisferner, der seit dem Jahre 1926 unmittelbar am Rand des dort etwa 1 km breiten, fast ebenen Gletschers steht, herrschen ganz andere Verhältnisse: hier enthält der Totalisator am Ende des Winterhalbjahres nur 49 bis 66% des Wassers, das in der Schneedecke gebunden ist; auch zu Anfang Juni ist in der Schneedecke dort noch doppelt soviel Wasser vorhanden. Gleichzeitig stimmt aber der Inhalt etwa gleich hoch gelegener Sammler im unvergletscherten Gelände mit dem Wasserwert der dort liegenden Schneedecke recht gut überein.

Daraus muß geschlossen werden, daß auf den Gletschern mehr Schnee liegt, als gefallen ist. Die Gletscher bilden sich in den Großmulden des Geländes, die vorwiegend Ablagerungsgebiete für den Treibschnee sind [9]. Jeder Winterbergsteiger weiß, daß man nur selten schneefrei geblasene Gletscher sieht, es sei denn an scharfen Geländekanten mit Eisbrüchen oder in Windgassen zwischen Moräne und Gletscherzunge. Es ist auch bekannt, daß die temporäre Schneegrenze auf Gletschern stets tiefer liegt als im unvergletscherten Gelände. Das ist wohl nur zum kleinsten Teil einer abkühlenden Wirkung der Gletscher auf die Lufttemperatur zuzuschreiben [1]; auch durch die Schneedecke hindurchdringende Strahlung, die am dunklen Boden absorbiert wird, kann den Abbau der Schneedecke durch Schmelzung von unten her erst beschleunigen, wenn diese dünner geworden ist als etwa 30 cm. Weit mehr dürfte der Umstand dazu beitragen, daß auf den Gletschern meist mehr Schnee liegt als im umgebenden Felsgelände. Dieses geneigte Gelände als Herkunftsort des Treibschnees ist auch in seiner Horizontalprojektion durchaus nicht gegen die „weiten Gletscherflächen“ zu vernachlässigen. Geländeformen, bei denen das der Fall ist, gehören in den Alpen zu den Ausnahmen, wie etwa das Firngelände des Gepatschferners in den Ötztaler Alpen.

Es zeigt sich aus diesen Beobachtungen, daß man aus der auf den Gletschern abgelagerten Schneemenge nicht ohne weiteres auf die Niederschlagsmenge schließen darf. Die Schneeumlagerung durch den Wind begünstigt im großen gesehen die Firnbecken und Gletscherzungen (ausgenommen deren steilere Teile) und benachteiligt die geneigte Felsumrahmung der Gletscherbecken. Dadurch können auf engem Raum sehr bedeutende Unterschiede in der abgelagerten Schneemenge entstehen, die für die Glaziologie von großer Bedeutung sind, die aber auf keinen Fall als reelle Unterschiede in der Niederschlagsmenge interpretiert werden dürfen. In einem genügend großen Gebiet, etwa dem Einzugsgebiet der Rofenache bei Vent oder einer ganzen Gebirgsgruppe, müssen sich diese Unterschiede jedoch weitgehend ausgleichen. Die mittlere Schneedecke eines solchen Gebietes ist ohne Zweifel ein Maß für den festen atmosphärischen Niederschlag, solange kein Abfluß aus der Schneedecke eingesetzt hat. Es bedarf dringend weiterer gründlicher Studien der Winterschneedecke im Hochgebirge, um die bisherigen Ergebnisse zu festigen und neue zu gewinnen. Sicher ist heute nur, daß eine Diskrepanz zwischen dem Inhalt des Totalisators und dem Wasserwert der Schneedecke nicht als Unbrauchbarkeit des Totalisators interpretiert werden muß.

Für selbstlos geleistete Hilfe bei diesen oft unbequemen Untersuchungen dankt der Verfasser besonders seiner Frau und seinem Freunde Fridolin Purtscheller, dem Österreichischen Hydrographischen Dienst und der Studiengesellschaft Westtirol für die Förderung durch finanzielle Beihilfen.

Tabelle 1. Wassermenge (mm) im Totalisator und in der Schneedecke

	Hochjochhospitz 2360 m	Proviantdepot 2780 m	Saikogelgrat 2880 m	Hintereisferner 2970 m	
Winter 1953/54 ..	16. X. 53 bis 1. VI. 54	16. X. 53 bis 7. VI. 54	29. X. 53 bis 7. VI. 54	31. X. 53 bis 8. VI. 54	
Im Totalisator ...	404 mm	455 mm	470 mm	620 mm	
In d. Schneedecke	1)	1)	500 mm	1100 mm	
Tot. = % der Schneedecke ..	—	—	94%	56%	
Mittl. Dichte der Schneedecke ..	—	—	0,45	0,50	
Winter 1954/55 ..	8. X. 54 bis 8. IV. 55	9. X. 54 bis 10. IV. 55	1. X. 54 bis 9. IV. 55	17. X. 54 bis 7. IV. 55	29. V. 55
Im Totalisator ...	396 mm	424 mm	433 mm	500 mm	670 mm
In d. Schneedecke	444 mm	450 mm	450 mm	1014 mm	1325 mm
Tot. = % der Schneedecke ..	89%	94%	96%	49%	51%
Mittl. Dichte der Schneedecke ..	0,483	0,423	0,346	0,437	0,473
Winter 1955/56 ..	27. IX. 55 bis 20. III. 56	26. IX. 55 bis 19. III. 56	27. IX. 55 bis 29. III. 56	14. X. 55 bis 28. III. 56	2. VI. 56
Im Totalisator ...	280 mm	336 mm	318 mm	490 mm	690 mm
In d. Schneedecke	213 mm	83 mm	216 mm	470 mm	1281 mm
Tot. = % der Schneedecke ..	131%	400%	147%	66%	54%
Mittl. Dichte der Schneedecke ..	0,275	0,252	0,300	0,374	0,495

1) Schneedecke nicht mehr geschlossen.

Literaturverzeichnis

- [1] E. v. Drygalski und F. Machatschek, *Gletscherkunde*, Wien 1942.
- [2] E. Ekhart, Beitrag zur Kenntnis der Niederschlagsverhältnisse der Hochalpen. *Zeitschr. f. angew. Meteorol.* 56, 311, 1939.
- [3] J. Grunow, *Probleme der Niederschlagsforschung und ihre Bedeutung für die Wirtschaft*. Festschr. z. 65. Geb. Dr. R. Benkendorff, 1955.
- [4] H. Hoinkes, Neue Niederschlagszahlen aus den zentralen Ötztaler Alpen. 49.—50. Jahresber. d. Sonnblick-Vereines f. d. Jahre 1951—1952, 19, 1954.
- [5] O. Lutschg, Zum Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges I, 1. Teil, 3. Abt. 7. Kap. Die Bedeutung des Schneetransportes durch den Wind (Windverfrachtung) im Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges. Zürich 1949.
- [6] H. Tollner, Zum Problem Eishaushalt und Niederschlag im Hochgebirge. *Mitt. d. Geogr. Gesellschaft Wien*, 90, 3, 1948.
- [7] H. Tollner, *Schneebeziehungen im Gebiet des Rauriser Sonnblicks*. 49.—50. Jahresber. d. Sonnblick-Vereines f. d. Jahre 1951—1952, 28, 1954.
- [8] Th. Zingg, *Wasserwert und Abbau der Schneedecke*. *Verh. d. Schweizer. Naturforsch. Ges. Davos*, 144, 1950.
- [9] Th. Zingg, *Klimatische Schneegrenze und Winterniederschläge*. *Verh. d. Schweizer Naturforsch. Ges. Lausanne*, 115, 1949.