

GLETSCHERVERHALTEN UND WITTERUNG

Von H. WAKONIGG, Graz

Mit 8 Abbildungen

INHALTSÜBERSICHT

	Seite
1. Einleitung	104
2. Das glaziologische Beobachtungsmaterial	
a) Hintereisferner	104
b) Pasterze	105
3. Das meteorologische Beobachtungsmaterial.	107
4. Gletscherhaushalt und Klimaelemente	107
5. Gletscherhaushalt und Gesamwitterung	
a) „Nettowärmesummen“	108
b) „Nettoablationstage“ nach den Ostalpinen Wetterlagen	112
c) Luftdruckabweichungen während der Ablationsperiode	120
6. Literaturverzeichnis	122

ZUSAMMENFASSUNG

Das alte Problem Gletscher-Klima wird wieder aufgegriffen, da sich durch die Aufnahme von Massenhaushaltsstudien in den Ostalpen seit 1952 neue Möglichkeiten eröffnet haben. Als glaziologisches Beobachtungsmaterial wird die Massenbilanzreihe des Hintereisferners (Ötztaler Alpen) herangezogen und auf die vorhandene Literatur verwiesen.

Daneben wird das gesamte, seit 1952 für die Pasterze (Hohe Tauern) vorliegende Beobachtungsmaterial einer Kritik unterzogen, wobei sich als direkt mit Klimadaten vergleichbare Bilanzgröße nur die Firnakkumulation als brauchbar erwiesen hat.

Massenbilanz des Hintereisferners und Firnakkumulation an der Pasterze werden dann ähnlich wie in älteren Arbeiten in analytischer Weise mit einzelnen Klimaelementen in Beziehung gebracht, wobei sich nur mit den thermischen Verhältnissen und den Schneefallverhältnissen während der Ablationsperiode nennenswerte Zusammenhänge feststellen lassen, überraschenderweise auch mit der Niederschlagssumme der Haushaltsjahre.

Schließlich werden die Gletscherhaushaltsgrößen mit der Gesamwitterung der Haushaltsjahre in Beziehung gesetzt. Diese wird einerseits als „Nettowärmesumme“, d. h. positive Temperatursumme für die Gletschergebiete nach Abzug von Beträgen für die Schmelzung von Sommer- und Winterschnee, andererseits als „Nettoablationstage“, d. h. Summe der Tage mit Ablationswetterlagen minus Akkumulationswetterlagen ausgedrückt. Die für die Gletschergebiete maßgeblichen Witterungsbedingungen der Ostalpinen Wetterlagen werden anhand von drei Diagrammen genau untersucht. Schließlich wird die Gesamwitterung durch sommerliche Luftdruckschwankungen unter Beachtung der Winterniederschläge ausgedrückt.

Zwischen diesen Ausdrücken der Gesamwitterung und den Haushaltsgrößen der Gletscher sind durchwegs befriedigende und hochsignifikante Zusammenhänge feststellbar.

SUMMARY: GLACIER BEHAVIOUR AND WEATHER

The old problem of the relationship between glacier and climate is taken up again, because new possibilities have been opened up since 1952 on account of mass balance studies in the Eastern Alps.

The mass balance data of the Hintereisferner (Oetztal Alps) are used in the present paper and the reader is referred to the available literature concerning this field. Also, the entire

observation data for the Pasterze (Hohe Tauern) published since 1952 are studied critically. In the course of these investigations it became evident that the firn accumulation is the only budget quantity that allows a direct comparison with climatic data.

Similar to earlier investigations, the mass balance of the Hintereisferner and the firn accumulation of the Pasterze are correlated analytically with several climatic elements. Connections of some importance can be found only with temperature conditions and distribution of snowfall during the ablation period and, strangely enough, also with the sum of precipitation of the budget years.

Finally, the glacier budget data are correlated with the total weather character of the budget years. This relation is, on the one hand, expressed as "net sum of positive temperatures", i. e. sum of positive degree days for glacier regions after having deducted values for the melted summer and winter snow. On the other hand it is expressed as "net ablation days", i. e. the sum of days with ablation-weather situation minus accumulation-weather situations. With the help of three meteorological stations, the weather conditions significant for glacier regions are reduced to glacier level. The weather conditions in the Eastern Alps are thoroughly investigated with the help of three diagrams. Finally, the total weather character is expressed by variations of air pressure during the summer taking into account the winter precipitation. The connections observed between these expressions of the weather character and the mass budget data of the glaciers are satisfactory and highly significant.

I. EINLEITUNG

Die alte Frage nach den Beziehungen zwischen Gletscherverhalten und Klimaverhalten gewinnt durch die Aufnahme direkter Gletscherhaushaltsmessungen wieder an Aktualität. Die „klassischen“ Arbeiten über diesen Fragenkomplex, von denen hier nur als Beispiel und gewisser Höhepunkt die von H. Tollner (1954a) genannt werden soll, mußten sich mit indirekten Indizien des Gletscherverhaltens, wie etwa Vorstößen und Rückzügen, Flächenänderungen *etc.* begnügen, denen meist Mittelwerte einzelner meteorologischer Elemente gegenübergestellt wurden. Daneben wurden auch Quotienten aus verschiedenen meteorologischen Elementen als Ausdruck der „Gesamtwitterung“ verwendet. Die so gewonnenen Ergebnisse konnten, wenn überhaupt, nur in der Zusammenschau längerer Zeiträume, nie aber für die Einzeljahre wirklich befriedigen.

Einzig unmittelbar und im Einzeljahr mit der Witterung vergleichbar sind aber nur direkte Gletscherbeobachtungen, welche die Messung des Massenhaushaltes verstanden als Differenz zwischen Gesamtzuwachs und Gesamtabtrag des Gletschers zum Ziel haben (R. Finsterwalder 1953, O. Schimpp 1959, H. Hoinkes u. R. Rudolph 1962b, H. Hoinkes 1962, 1965, 1967, 1970a, 1970b).

2. DAS GLAZIOLOGISCHE BEOBACHTUNGSMATERIAL

a) HINTEREISFERNER

In den Ostalpen gibt es für den Hintereisferner seit Beginn der Messungen im Haushaltsjahr 1952/53 durch O. Schimpp (1959) und deren Fortsetzung durch H. Hoinkes und seine Mitarbeiter eine homogene Beobachtungsreihe über direkte Haushaltsmessungen, d. h. Akkumulations- und Ablationsmessungen (H. Hoinkes 1970b). Die Ergebnisse von kürzeren Beobachtungsreihen der Massenbilanz von Langtalerferner, Vernagtferner, Kesselwandferner, Schneeferner und Stubacher Sonnblick-Kees liegen erst zum Teil veröffentlicht vor.

b) PASTERZE

Direkte Messungen des Massenhaushaltes liegen für die Pasterze noch nicht vor, doch gibt es verschiedene Beobachtungsreihen anderer Art, wobei sich nun die Frage stellt, wie weit die an der Pasterze gewonnenen Daten als Bilanzgrößen verwendbar oder zu einer Rekonstruktion solcher Massenbilanzreihen geeignet sind.

Die im Auftrag des Alpenvereins durchgeführten Beobachtungen haben folgende Messungen zum Ziel: Änderung der Lage des Zungenendes, Höhenänderung der Oberfläche der Zunge (daraus Volumsänderung), Fließgeschwindigkeit der Gletscherzunge und stichprobenartige Messung der Höhenänderung im Firngebiet entlang eines Profils (H. Paschinger 1969). Unabhängig davon werden von H. Tollner seit etwa 1948 Akkumulationsmessungen im Firngebiet der Pasterze durchgeführt, die von Jahr zu Jahr intensiviert wurden, wobei aber über die Gewinnung der gesamten Nettoakkumulation aus den Einzelmessungen wenig ausgesagt wird (G. Patzelt u. H. Slupetzky 1970, S. 125f.).

Die Angaben Tollners können, wenn auch nur als rohe Werte, für die Nettoakkumulation eingesetzt werden, während die Angaben über die Volumsänderung der Zunge keine Ablationswerte sind. Die geodätisch ermittelte Volumsänderung der Zunge des Gletschers innerhalb eines Jahres muß um den Betrag des Eisnachschubs aus dem Nährgebiet in das Zehrgebiet kleiner sein als die Nettoablation. Der infolge Außerachtlassung der Vertikalkomponente der Gletscherbewegung notwendigerweise auftretende Fehlbetrag bei der Berechnung der „Massenbilanz“ der Pasterze aus der einfachen Differenz zwischen Firnakkumulation und Volumsänderung der Zunge (H. Tollner 1957a, 1961, 1962) wurde von H. Hoinkes auf 6 bis max. 10 Mill. m³ Eis geschätzt (H. Hoinkes 1965, S. 274) und später von H. Tollner mit jährlich konstant 15 Mill. m³ Eis in die Berechnung der Massenbilanz einbezogen (H. Tollner 1968, 1969).

Ein für den Eisnachschub vom Nährgebiet ins Zehrgebiet eingesetzter Betrag zur Berechnung der Massenbilanz ist in seiner Größenordnung für statistische Vergleiche belanglos, sofern er für den gesamten Zeitraum als konstant angenommen wird. Sicher ist er aber eine variable Größe, deren Schwankungen von Jahr zu Jahr mit dem vorhandenen Beobachtungsmaterial rückwirkend kaum mehr erschlossen werden können. Für die Pasterze ist die Rekonstruktion einer unverfälschten Massenbilanzreihe für den Zeitraum von 1952/53 bis 1967/68 daher mit dem vorhandenen Beobachtungsmaterial nicht mehr möglich.

Für die weitere Bearbeitung verbleiben nur die Angaben über die Nettoakkumulation auf der Pasterze, wobei es noch fraglich ist, wie weit durch sie allein das Gletscherverhalten ausgedrückt werden kann, was umso eher der Fall sein muß, je stärker der Zusammenhang zwischen Massenbilanz und Nettoakkumulation eines Gletschers ist. Am Hintereisferner ergibt sich dafür ein Koeffizient von $+ 0,96 \pm 0,02$, d. h. eine fast funktionale Abhängigkeit, die weitgehend in der Einbeziehung der Nettoakkumulation in die Berechnung der Massenbilanz begründet ist. Auch zwischen der Nettoakkumulation der Pasterze und der Massenbilanz des Hintereisfernens ist mit einem Koeffizienten von $+ 0,854 \pm 0,068$ ein befriedigender Zusammenhang feststellbar. (Alle errechneten Werte beziehen sich auf den Zeitraum von 1952/53 bis 1967/68.)

Erwartungsgemäß ergibt sich auch zwischen den Akkumulationsangaben für die Pasterze und der entsprechenden Nettoakkumulationsreihe des Hintereisfernens eine recht gute, durch einen Koeffizienten von $+ 0,840 \pm 0,074$ ausgedrückte Überein-

stimmung, womit man eine fast gleichartige Reaktion beider Gletscher in bezug auf die Ernährung erkennen kann, sofern die Akkumulationsangaben für die Pasterze als halbwegs gesichert gelten können. Nach allgemeinen meteorologischen Indizien, wie auch nach dem Vergleich zwischen Aletschgletscher und Hintereisferner (H. Hoinkes 1970a, S. 108, 1970b, S. 62) ist das auch nicht anders zu erwarten. Umgekehrt zeigt ein Vergleich zwischen der Nettoablation am Hintereisferner und der Volumsänderung an der Pasterzenzunge nur einen Koeffizienten von $+0,138 \pm 0,245$ d. h. keinen überzufälligen Zusammenhang.

Da zwischen beiden Gletschern keine derartigen Ablationsunterschiede möglich sind, sind die Angaben über die Volumsänderung an der Pasterzenzunge nicht als Ablationsangaben zu verwenden. Diese auffallende Diskrepanz zum Hintereisferner, die sich besonders in den Haushaltsjahren 1957/58, 1958/59, 1964/65 und 1965/66 äußert, ist sicher auf die an der Pasterzenzunge unbekanntem Beträge der Vertikalkomponente der Gletscherbewegung zurückzuführen, wobei kinematische Wellen (H. Hoinkes 1965, S. 274) ein vorübergehendes kräftiges Ansteigen der Zungenoberfläche in einzelnen Profilen bewirken können, welche die tatsächliche, starke Ablation z. T. überkompensieren können.

Der erste Versuch einer Bestimmung der Vertikalkomponente der Gletscherbewegung aus der Differenz zwischen geodätisch ermittelten Einsinkbeträgen einzelner Profile auf der Pasterzenzunge und eigenen Ablationsmessungen stammt von G. Patzelt und H. Slupetzky (1970). Es ergab sich für das Haushaltsjahr 1968/69 eine mittlere Vertikalkomponente von 1,27 m Eis oder umgerechnet auf die Oberfläche der Gletscherzunge von 5,3 km² eine Menge von $6,7 \times 10^6$ m³ Eis, um die der geodätisch ermittelte Wert der Volumsänderung vergrößert werden muß, um die Nettoablation zu erhalten (G. Patzelt u. H. Slupetzky 1970, S. 121f.) Die direkt gemessene Nettoablation übertraf den geodätisch ermittelten Volumsverlust um etwa 30%.

Eine weitere Fehlerquelle ist sicher auch in der zur Volumsbestimmung verwendeten geodätischen Meßmethodik und -genauigkeit gegeben, wobei hier nur der uneinheitliche Meßtermin (Ende August für die Pasterzenzunge, Ende September für den Hintereisferner bzw. für das Firngebiet der Pasterze), sowie der Einfluß stärkerer Neuschneebedeckung, der sich in einer Erhöhung der Oberfläche durch eine Masse mit gegenüber Gletschereis ungleich geringeren Dichte äußert, genannt seien.

Die für einen Vergleich mit Klimadaten nun allein verwendeten Werte für die Akkumulation an der Pasterze entstammen der Literatur (H. Tollner 1954b, 1957a, b, 1961, 1962, 1963, 1966, 1968, 1969). Sie werden zur besseren Übersicht in Tabelle 1 zusammengefaßt. Die Angaben über die Massenbilanz des Hintereisfernens wurden der Arbeit von H. Hoinkes (1970b, S. 59) entnommen.

Tabelle 1 Nettoakkumulation auf der Pasterze in Mill.m³ Wasser

1952/53	1953/54	1954/55	1955/56	1956/57	1957/58	1958/59	1959/60	1960/61
+12,7	+16,2	+14,5	+13,5	+9,8	+2,5	+7,3	+19,3	+21,5
1961/62	1962/63	1963/64	1964/65	1965/66	1966/67	1967/68	Mittel	
+16,9	+10,7	+6,6	+35,6	+21,1	+11,8	+23,5	+15,2	

3. DAS METEOROLOGISCHE BEOBACHTUNGSMATERIAL

Da über meteorologische Beobachtungen auf Gletschern selbst oder in deren unmittelbarer Nähe noch keine homogenen Reihen vorliegen, muß zur Verwendung meteorologischen Beobachtungsmaterials auf andere Stationen zurückgegriffen werden, wobei die Frage der Eignung dieser Werte für Gletschergebiete nur bedingt zu beantworten ist. H. Hoinkes fordert als Voraussetzung für die Verwendbarkeit von Stationen ihre unmittelbare Nachbarschaft zu Gletschergebieten, bzw. eine Seehöhe von mindestens 2000 m (H. Hoinkes *et al.* 1967). Nach diesen Kriterien fällt die Wahl von selbst auf Vent (1904 m), Mooserboden (2036 m) und Sonnblick (3106 m).

Wie weit die an diesen Stationen gewonnenen Daten für ein größeres Gebiet, bzw. für die beiden Gletscher repräsentativ sind, läßt sich am ehesten durch Vergleiche der Stationsdaten untereinander, bzw. mit direkt auf Gletschern gewonnenen Daten beantworten. Dabei wurden u. a. sämtliche erreichbare Totalisatorenbeobachtungen für die Gletschergebiete (H. Hoinkes 1954, F. Mittrecker u. H. Tollner 1963) miteinander und mit den Stationswerten korreliert. Es zeigte sich, daß sich durch Stationsdaten die thermischen Verhältnisse in Gletschergebieten am besten, die Strahlungsverhältnisse nur mäßig, und die Niederschlagsverhältnisse kaum befriedigend erfassen lassen. Der Niederschlag hat sich damit wieder, sowohl was die Messung als auch die Reduktion anlangt, als das problematischste meteorologische Element im Hochgebirge erwiesen.

4. GLETSCHERHAUSHALT UND KLIMAELEMENTE

Da nun erstmals längere Reihen von direktem glaziologischem Beobachtungsmaterial vorliegen, erscheint es reizvoll, die an den drei Stationen gewonnenen Mittelwerte meteorologischer Elemente in analytischer Weise mit dem Gletscherhaushalt zu vergleichen, wobei der Vergleich nach Einzeljahren (Haushaltsjahren) erfolgen kann, und nicht mehr nach Lustren oder Dezennien, wie in älteren, auf indirektem Beobachtungsmaterial basierenden Arbeiten.

Als Ausdruck der Übereinstimmung bietet sich wieder die unter Berücksichtigung der Quantitäten der Einzelwerte errechnete lineare Korrelation an, durch die aber keineswegs eine ursächliche Abhängigkeit, sondern lediglich ein formaler Zusammenhang (Gleichklang) ausgedrückt werden kann. Die Ergebnisse werden, da sie kaum neues bringen, hier nur mehr tabellarisch zusammengefaßt. (Eine genaue Interpretation sowie Korrelations- u. Zeitdiagramme finden sich bei H. Wakonigg, 1971.) Dabei wird die Massenbilanzreihe des Hintereisferners mit den Beobachtungen von Vent, die Nettoakkumulationsreihe der Pasterze mit den Beobachtungen vom Mooserboden bzw. Sonnblick in Beziehung gesetzt.

Eine genaue Diskussion der Ergebnisse erübrigt sich hier. Die geringe Übereinstimmung mit dem Winterniederschlag, der Jahrestemperatur und der Sonnenscheindauer im Sommer, sowie die bessere Übereinstimmung mit den thermischen und Neuschneebedingungen während der Ablationsperiode stimmen durchaus mit älteren Ergebnissen überein (etwa S. Morawetz 1941, H. Tollner 1954a), überraschend ist nur die hohe Übereinstimmung mit der Niederschlagssumme der Haushaltsjahre. Der analytische Vergleich mit einzelnen Klimaelementen zeigt also kaum optimale Ergebnisse. Diese können nur bei Beachtung der Gesamtwitterung der Haushaltsjahre erzielt werden.

Tabelle 2 Korrelationskoeffizienten zwischen den Gletscherhaushaltswerten (Massenbilanz des Hintereisferners, Nettoakkumulation der Pasterze) und Mittelwerten meteorologischer Elemente von Hochgebirgsstationen für den Zeitraum 1952/53 bis 1967/68. Akkumulationsperiode = 1. Oktober bis 31. Mai, Ablationsperiode = 1. Juni bis 30. September, Haushaltsjahr = 1. Oktober bis 30. September. Die Reihung erfolgt in Richtung zunehmender Übereinstimmung bei Vent — Hintereisferner (Sicherungsgrenzwerte in Klammer).

	Vent — HF.	Moos. — Past.	Sbk. — Past.
Niederschlagstage während der Ablationsperiode	+ 0,173 (—)	+ 0,281 (—)	+ 0,005 (—)
Niederschlagssumme der Akkumulationsperiode	+ 0,287 (—)	+ 0,657 (99 %)	+ 0,421 (80 %)
Sonnenscheindauer während der Ablationsperiode	+ 0,290 (—)	+ 0,032 (—)	— 0,164 (—)
mittlere Temperatur der Haushaltsjahre	— 0,345 (80 %)	— 0,448 (90 %)	— 0,447 (90 %)
Schneefalltage während der Ablationsperiode*	+ 0,530 (95 %)	+ 0,525 (95 %)	+ 0,464 (90 %)
Niederschlagssumme der Ablationsperiode	+ 0,568 (95 %)	+ 0,306 (—)	+ 0,437 (90 %)
mittlere Temperatur der Ablationsperiode	— 0,669 (93,5%)	— 0,564 (35 %)	— 0,549 (35 %)
Summe der Neuschneehöhen der Ablationsperiode*	+ 0,674 (99,5%)	+ 0,411 (80 %)	+ 0,642 (93 %)
positive Temperatursummen der Sommermonate*	— 0,701 (99,5%)	— 0,596 (98 %)	— 0,568 (95 %)
Niederschlagssumme der Haushaltsjahre	+ 0,733 (99,5%)	+ 0,712 (99,5%)	+ 0,548 (95 %)
* nach unten angegebenen Methoden auf Gletscherniveau reduziert.			

5. GLETSCHERHAUSHALT UND GESAMTWITTERUNG

a) „NETTOWÄRMESUMMEN“

Die Gesamtwitterung läßt sich einerseits durch Kombination der die Akkumulation, bzw. Ablation fördernden meteorologischen Elemente ausdrücken, andererseits durch die Häufigkeit charakteristischer Großwetterlagen, oder durch die Abweichung des Luftdrucks in einem Höhendruckfeld als Ausdruck der Zyklonalität oder Antizyklonalität einer Jahreszeit (H. Hoinkes und R. Rudolph 1962a, H. Hoinkes 1962, 1965, 1967, 1968, 1970a, H. Hoinkes *et al.* 1967, H. Tollner 1969).

Von den die Ablation fördernden Faktoren hat sich die Höhe der positiven Temperatursummen im Gegensatz etwa zur Sonnenscheindauer am wirksamsten erwiesen. Zur Berechnung der positiven Temperatursummen werden die Tagesmittelwerte der Temperaturen der drei Stationen zuerst auf Gletscherniveau reduziert. Als „Gletscherniveau“ wird die für den Haushalt, bzw. die Akkumulation wichtigste Zone, d. h. die Zone größter Flächenentwicklung der Gletscher herangezogen, die am Hintereisferner bei 3100 m (H. Hoinkes 1970a, Abb. 8, 1970b, Abb. 7), auf der Pasterze in 2900—3100 m auftritt.

Vermindert man die Temperaturen von Vent im Mai bis August um 7° und im September um 6° , dann erhält man nach den von F. Lauscher angegebenen, im Bereich von 1800–3000 m für die angegebenen Monate gültigen Temperaturgradienten von $0,73^{\circ}$, $0,75^{\circ}$, $0,72^{\circ}$ und $0,62^{\circ}$ (F. Lauscher 1960) die mittlere Temperatur des Höhenbereichs von rund 2970 m. Vermindert man die Temperaturen des Mooserbodens im Mai bis August um 6° , im September um 5° , dann erhält man nach den oben angegebenen Gradienten die Temperaturen eines Höhenbereichs von 2940 bis 2950 m, dasselbe erreicht man, wenn man die Temperaturen des Sonnblicks jeweils um $+1^{\circ}$ reduziert. Durch Aufsummieren der verbleibenden positiven Tagesmittel entstehen positive Temperatursummen, die sich im beobachteten Zeitraum für Vent-Hintereisferner zwischen 430° (1953, 1961) und 244° (1968), bei einem Mittel von 342° bewegen, für Mooserboden-Pasterze zwischen 437° (1953) und 261° (1965) bei einem Mittel von 342° und für Sonnblick-Pasterze zwischen 403° (1958) und 193° (1968) bei einem Mittel von 287° . Diese positiven Temperatursummen zeigen eine mäßig gute Übereinstimmung mit den Gletscherhaushaltsgrößen (Tab. 2).

Unterbrochen wird die Ablation durch die hier schon ausgeschalteten Tage mit negativen Temperaturen, sowie durch Tage mit Neuschneebedeckung, wobei die Höhe des gefallenen Neuschnees nicht unberücksichtigt bleiben darf. Die Rekonstruktion sommerlicher Neuschneefälle (VI bis IX) auf die Gletschergebiete wurde nach folgender Methode vorgenommen: Zunahme der Niederschläge auf Gletscherniveau in der Größenordnung: Vent-Hintereisferner um 100%, Mooserboden-Pasterze um 0%, und Sonnblick-Pasterze um 50%, was durch verschiedene Totalisatorenbeobachtungen berechtigt erscheint. Dazu wurde in grober Vereinfachung des Diagramms von F. Fliri (1964, Abb. 1) der Schneeanteil am Niederschlag bei (reduzierten) negativen Temperaturen zu 100%, bei 0° bis $+2^{\circ}$ zu 50% und bei $>+2^{\circ}$ zu 0% (nur Regen) angenommen und eine Dichte des Neuschnees bei (reduzierten) Niederschlagsmengen von unter 20 mm zu 0,1, bei größeren Mengen zu 0,2 zugrunde gelegt. Als Niederschlagstage wurden alle Tage mit an den Stationen gemessenen Mengen von $\geq 1,0$ mm gezählt.

Auf diese Weise erhält man die Zahl der Neuschneetage sowie die Summen der Neuschneehöhen, die sich für Vent-Hintereisferner zwischen 86 cm (1962) und 389 cm (1965) bei einem Mittel von 220 cm bewegen, für Mooserboden-Pasterze zwischen 291 cm (1964) und 466 cm (1957) bei einem Mittel von 377 cm und für Sonnblick-Pasterze zwischen 238 cm (1964) und 547 cm (1966) bei einem Mittel von 364 cm. Auch die Summen der Neuschneehöhen allein zeigen mit den Gletscherhaushaltswerten einen leidlich guten Zusammenhang (Tab. 2).

Schließlich muß noch die Akkumulation an Winterschnee als Variable in die Rechnung einbezogen werden. Die Höhe der Winterschneedecke erhält man, wenn man die an den Stationen gemessenen Niederschlagssummen der Akkumulationsperioden (X–V) auf die Gletscherniveaus reduziert, wobei der Niederschlag von Vent um 200%, vom Sonnblick um 20% und vom Mooserboden um 50% (gleichfalls auf Grund von Totalisatorenbeobachtungen) vermehrt, und eine Schneedichte von 0,4 zugrunde gelegt wird. Dabei wird sämtlicher Niederschlag als Schnee angenommen. Die so errechneten Winterschneehöhen bewegen sich für Vent-Hintereisferner zwischen 176 cm (1967/68) und 347 cm (1966/67) bei einem Mittel von 240 cm, für Mooserboden-Pasterze zwischen 208 cm (1957/58) und 484 cm (1964/65) bei einem Mittel von 312 cm und für Sonnblick-Pasterze zwischen 220 cm (1963/64) und 436 cm (1961/62) bei einem Mittel von 311 cm.

Zur Schmelzung dieser Winterschneehöhen müssen gewisse Beträge der positiven Temperatursummen in Abzug gebracht werden. Wünschenswert, aber kaum zu beantworten ist die Frage nach der Beziehung zwischen positiver Temperatursumme und Abschmelzleistung einer bestimmten Schneehöhe. In grober Vereinfachung kann man für eine Abschmelzleistung von 15 cm Schnee eine positive Temperatursumme von 10° annehmen, wobei dieser Betrag für alle Arten von Schnee (auch Winterschnee) vorausgesetzt wird, da sich Albedo und Strahlungsbilanz annähernd verkehrt proportional zur Dichte des Schnees verhalten. Mit abnehmender Albedo (zunehmender Schneedichte) werden zwar größere Abschmelzleistungen in mm Wasserwert erreicht, nicht aber in cm Schneehöhe.

Nach Abzug der für die Schmelzung des Winter- und Sommerschnees nötigen Temperatursummen von den positiven Temperatursummen der Ablationsperiode verbleiben „Nettowärmesummen“, die, wenn sie positiv sind für die Abschmelzung älterer Firn- und Eislagen wirksam werden, wenn sie negativ sind aber anzeigen, daß die Gleichgewichtslinie tiefer als das für die Reduktion verwendete Gletscherniveau liegt, bzw. in dieser Höhe noch Schnee des abgelaufenen Haushaltsjahres gespeichert bleibt. Am Hintereisferner bewegen sich die Nettowärmesummen zwi-

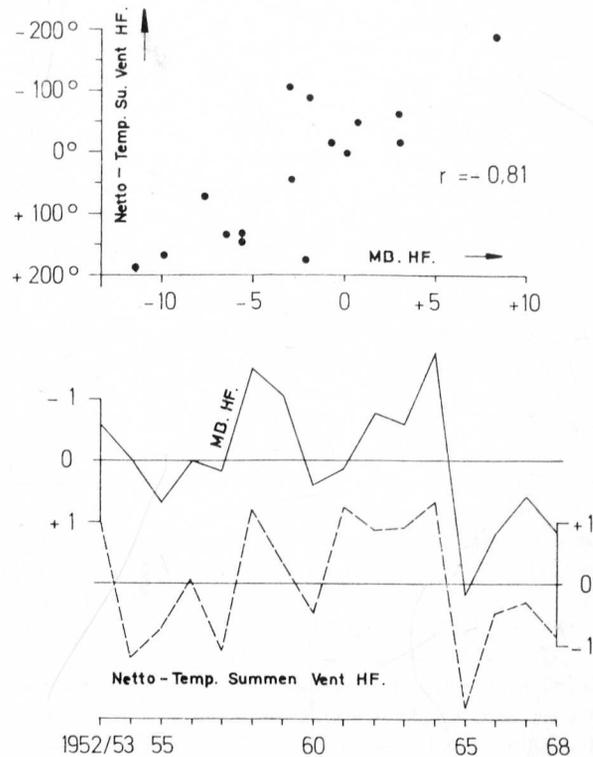


Abb. 1: Massenbilanz des Hintereisferners (MB. HF.) in Mill. m^3 (Wasser) und Nettowärmesummen für Vent/Hintereisferner in $^{\circ}C$.

Korrelationsdiagramm: Absolutwerte.
Zeitdiagramm: standardisierte Werte.

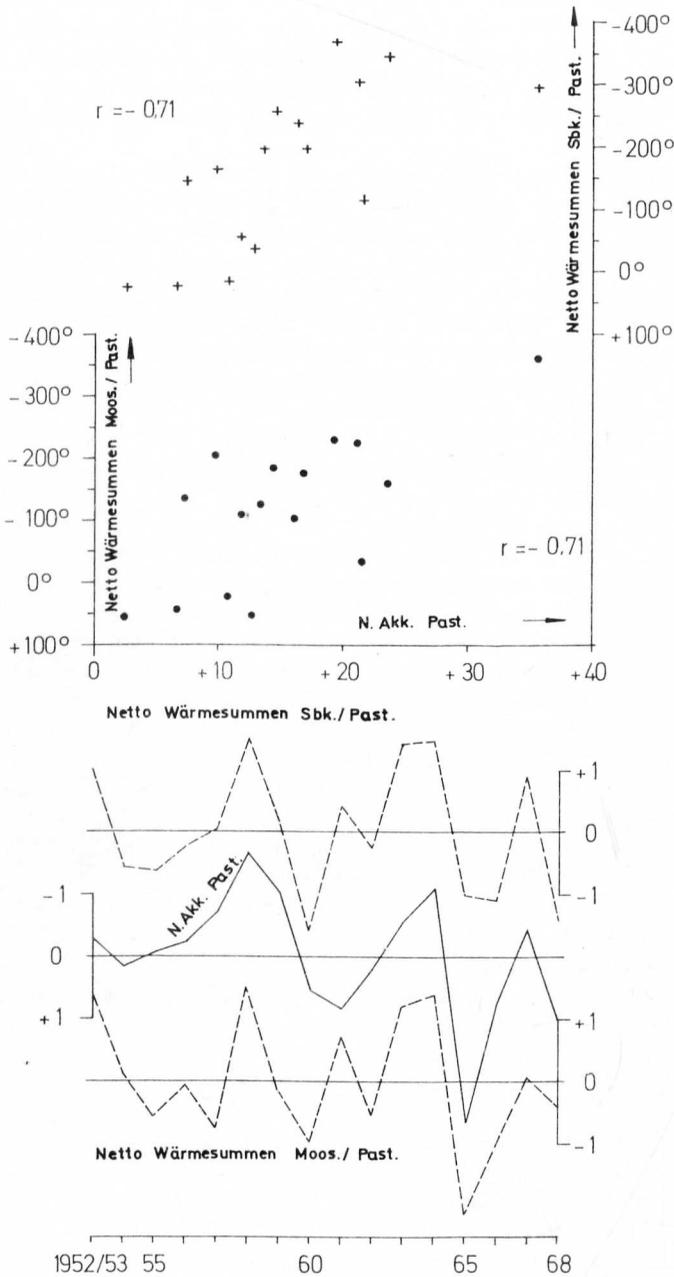


Abb. 2: Nettoakkumulation an der Pasterze in Mill. m³ (Wasser) und Nettowärmesummen Mooserboden/Pasterze in °C. Korrelationsdiagramm: Absolutwerte. Zeitdiagramm: standardisierte Werte.

schen -190° (1964/65) und $+186^{\circ}$ (1963/64) bei einem Mittel von $+34^{\circ}$ oder 50 cm zusätzlicher Abschmelzleistung in 2970 m, auf der Pasterze nach Mooserboden zwischen -363° (1964/65) und $+52^{\circ}$ (1952/53) bei einem Mittel von -118° oder 180 cm Schneerücklage, nach Sonnblick zwischen -371° (1959/60) und $+22^{\circ}$ (1963/64) bei einem Mittel von -167° oder 250 cm Schneerücklage in 2940–2950 m Höhe.

Diese Nettowärmesummen als Ausdruck der Gesamtwitterung der Haushaltsjahre zeigen für alle drei Stationen die bisher beste Übereinstimmung mit den Gletscherhaushaltswerten. Für den Hintereisferner ergibt sich zwischen den Nettowärmesummen und der Massenbilanz des Gletschers ein zu 99,9% Wahrscheinlichkeit gesicherter Korrelationskoeffizient von $-0,811 \pm 0,086$ (Abb. 1), d. h. eine äußerst hohe negative Übereinstimmung. Wie das Diagramm zeigt, sind nur die Jahre 1953/54, 1956/57 und besonders 1960/61 stärker abweichend, während sich für die restlichen 13 Jahre allein mit einem Koeffizienten von $-0,956 \pm 0,024$ eine fast funktionale Abhängigkeit errechnen läßt.

Zwischen der Nettoakkumulation auf der Pasterze und den nach den Stationen Mooserboden, bzw. Sonnblick errechneten Nettowärmesummen ist die Übereinstimmung mit Koeffizienten von $-0,705 \pm 0,126$, bzw. $-0,709 \pm 0,124$ (Abb. 2) wohl die höchste bisher ermittelte, aber nicht mehr so befriedigend wie mit dem Hintereisferner. Auch hier ist das Haushaltsjahr 1960/61 besonders stark abweichend. In der durch Nettowärmesummen ausgedrückten Gesamtwitterung der Haushaltsjahre ist der Einfluß der Sonnenscheindauer während der Ablationsperiode noch nicht enthalten. Da sich zwischen Sonnenscheindauer und Abschmelzleistung überhaupt keine temperaturunabhängigen quantitativen Beziehungen herstellen lassen, wird der Einfluß der Sonnenscheindauer am besten durch partielle Korrelation eliminiert.

Auf diesem analytischen Weg erhält man Korrelationskoeffizienten zwischen Nettowärmesummen und Gletscherhaushaltswerten unter Zugrundelegung konstanter Sonnenscheindauer während der Ablationsperioden. Die so ermittelten Koeffizienten belaufen sich für Vent-Hintereisferner auf $-0,824 \pm 0,080$, für Mooserboden-Pasterze auf $-0,738 \pm 0,114$ und für Sonnblick-Pasterze auf $-0,724 \pm 0,119$, was in allen Fällen eine weitere Verbesserung der Übereinstimmung darstellt.

Auch die Nettoakkumulation und die Nettoablation des Hintereisferners zeigen mit Koeffizienten von $-0,755 \pm 0,108$, bzw. $+0,769 \pm 0,102$ gute Übereinstimmungen mit den Nettowärmesummen nach Vent, während sich zwischen der Volumsänderung der Pasterzenze und den Nettowärmesummen mit Koeffizienten von $+0,220 \pm 0,238$ (nach Mooserboden), bzw. $+0,208 \pm 0,239$ (nach Sonnblick) überhaupt keine überfälligen Zusammenhänge feststellen lassen.

b) „NETTOABLATIONSTAGE“ NACH DEN OSTALPINEN WETTERLAGEN

Eine weitere Möglichkeit, die Gesamtwitterung eines Haushaltsjahres auszudrücken, ist die Angabe der Häufigkeit bestimmter „gletschergünstiger“ und „gletscherungünstiger“ Großwetterlagen, wie es von H. Hoinkes (Hoinkes *et al.* 1967, H. Hoinkes 1967, 1968) mit Erfolg anhand des Wetterlagensystems von Hess-Brezowsky gezeigt wurde, wobei aber dieses System gar nicht für den Alpenraum erstellt wurde, bzw. die Wetterlagen nicht auf ihren Witterungscharakter im alpinen Raum hin untersucht wurden.

Für den Ostalpenraum existieren aber mehrere Wetterlagensysteme, z. B. das von F. Lauscher (1958), wobei wir über den Witterungscharakter dieser Wetterlagen in

den Hochzonen der Alpen schon sehr gut unterrichtet sind (F. Fliri 1962, S. 34, 60, 166ff., F. Steinhauser 1962). Diese „Ostalpinen Wetterlagen“ wurden nun anhand von drei Diagrammen (Abb. 3–5) auf ihre „Gletschergunst“ oder „Gletscherungunst“ während der Ablationsperiode hin untersucht. Dabei wurden folgende nach den vorne angegebenen Reduktionsmethoden ermittelte Kriterien herangezogen:

1. Mittlere Tagestemperatur im Gletscherniveau.
2. Wahrscheinlichkeit des Auftretens von positiven bzw. negativen Tagestemperaturmitteln im Gletscherniveau.
3. Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Schneefalltagen im Gletscherniveau.
4. Mittlere, pro Wetterlagentag gefallene Neuschneehöhe im Gletscherniveau.
5. Mittlere Sonnenscheindauer pro Wetterlagentag in Stunden an den einzelnen Stationen.

Die als Regen gefallenen Niederschläge bleiben unberücksichtigt.

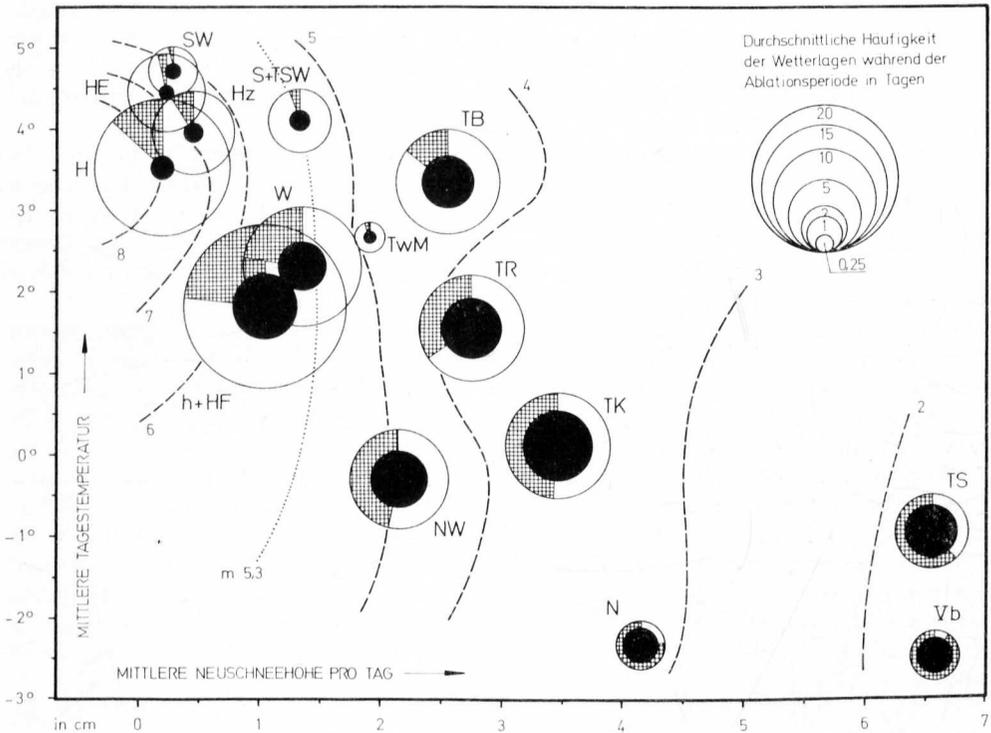


Abb. 3: Witterungscharakter der Ostalpinen Wetterlagen während der Ablationsperiode (VI–IX) in 2970 m am Hintereisferner, reduziert nach den Beobachtungen von Veit (1904 m). Erläuterungen im Text und in Abb. 5.

Die einzelnen Symbole bedeuten folgende Wetterlagen:

H	= Hochdruck
h	= Zwischenhoch, schwacher Hochdruck
H _z	= zonale Hochdruckbrücke
HF	= Hoch im Norden und über Finnland
HE	= Hoch im Osten und über der Balkanhalbinsel
N	= Nordströmung
NW	= Nordwestströmung
W	= Westströmung
SW	= Südwestströmung
S	= Südströmung
TB	= Tief über den Britischen Inseln
TSW	= Tief im Südwesten
TwM	= Tief über dem westlichen Mittelmeer
TS	= Tief im Süden (der Alpen)
Vb	= Tief auf der Zugstraße Adria—Polen
TK	= Tief über dem Kontinent (Mitteleuropa)
TR	= meridionale Tiefdruckrinne

(Weitere Erläuterung der Diagramme in Abb. 5).

Wie aus Abb. 3 ersichtlich, sind Tage mit den Wetterlagen H, H_z, HE, S+TSW und SW. ausgesprochene Ablationstage, ihre mittlere Temperatur im Gletscherniveau beträgt 3,5° bis 4,7°, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von negativen Tagesmitteln bzw. Schneefällen nur 3 bis 13%, die mittlere Neuschneemenge nur 0,2 bis 1,3 cm. Die Sonnenscheindauer in Vent liegt fast durchwegs über sechs Stunden pro Tag. Jeder von einer dieser Wetterlagen während der Ablationsperiode beherrschte Tag wird daher als voller Ablationstag gezählt.

Ganz eindeutige Akkumulationslagen sind dagegen die Wetterlagen N, TS und Vb mit mittleren Temperaturen von -1° bis -2,5°, 63 bis 91% Wahrscheinlichkeit negativer Tagesmittel und 56 bis 59% Schneefallbereitschaft bei einer mittleren Neuschneemenge von 4 bis 7 cm, wobei die Sonnenscheindauer in Vent meist unter zwei Stunden bleibt. Jeder von einer dieser Wetterlagen beherrschte Tag wird daher als Akkumulationstag von der Summe der Ablationstage subtrahiert.

Weniger eindeutig definiert sind die übrigen Wetterlagen. Nach dem Diagramm kann man den Tagen mit den Wetterlagen h, HF, W, TB und TwM das Gewicht eines halben Ablationstages, den Wetterlagen NW und TK das Gewicht eines halben Akkumulationstages zubilligen, die TR-Lage ist weitgehend neutral, d. h. sie erhält den Wert null. Die solcherart für die Einzeljahre errechneten Restsummen an Ablationstagen sind entsprechend der Häufigkeit der Wetterlagen (h, H, W) in allen Jahren positiv und schwanken zwischen 57 (1961) und 15 Tagen (1965), bei einem Mittel von 40 Tagen für die Jahre 1953—1968. Einen starken Überschuß an Ablationstagen hatten noch die Sommer 1953, 1962, 1963 und 1964 mit 52, 47, 48 und 46 Tagen, stark unternormal waren die Jahre 1968 und 1955 mit nur 22 bzw. 26 restlichen Ablationstagen. Eine Korrelation dieser Restablationstage mit der Massenbilanz des Hintereisferners ergibt einen Koeffizienten von -0,746 ± 0,111, somit eine recht gute Übereinstimmung.

Den Einfluß der Winterschneedecke kann man berücksichtigen, indem man für die Schmelzung von je 15 cm der nach den angegebenen Methoden ermittelten Schneehöhen zwei volle Ablationstage veranschlagt, d. h. von der Summe der Restablationstage in Abzug bringt. Die so ermittelten „Nettoablationstage“ schwanken zwischen +23 (1963/64) und -23 (1964/65) bei einem Mittel von +8. Nach diesen

Voraussetzungen liegt daher die Gleichgewichtslinie im Mittel etwas über 2970 m, stark unternormal waren die Jahre 1954/55, 1964/65, 1966/67 und 1967/68 (Abb. 4) mit einer Lage der Gleichgewichtslinie unterhalb dieses Niveaus, wobei 1965 dort ca. 170 cm Altschnee am Ende des Sommers verblieben sein dürften.

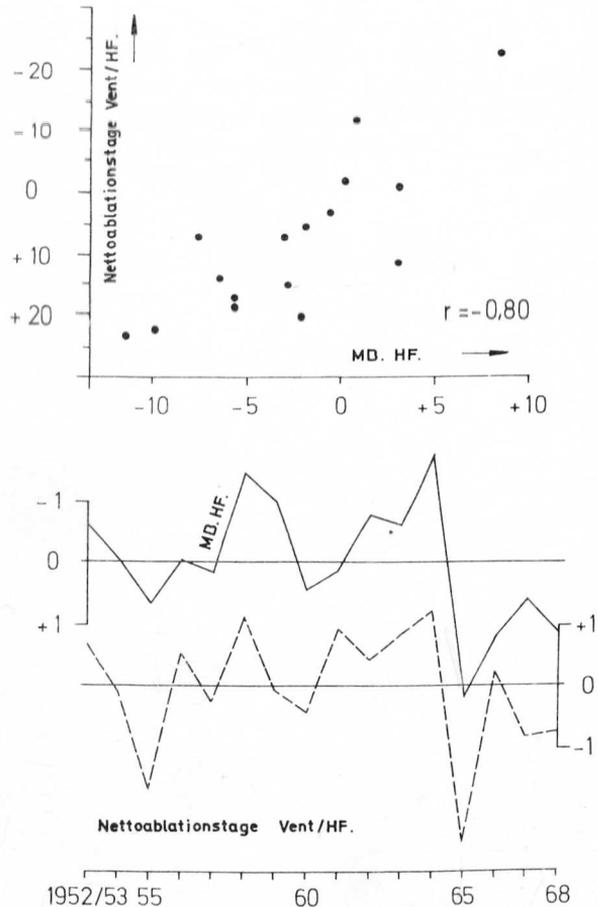


Abb. 4: Massenbilanz des Hintereisferners (MB. HF.) in Mill. m³ (Wasser) und Nettoablationstage der Hausaltjahre für Vent/Hintereisferner. Korrelationsdiagramm: Absolutwerte. Zeitdiagramm: standardisierte Werte.

Vergleicht man die Zahlen der Nettoablationstage mit der Massenbilanz des Hintereisferners (Abb. 4), dann erhält man einen zu 99,9% Wahrscheinlichkeit gesicherten Korrelationskoeffizienten von $-0,799 \pm 0,090$, d. h. es herrscht ein relativ hoher Zusammenhang zwischen beiden Größen. Stärker abweichend sind nur die Jahre 1958/59, 1960/61 und 1965/66. Etwas geringer ist der Zusammenhang mit der Nettoakkumulation bzw. Nettoablation des Hintereisferners allein (0,78; 0,69). Auffallend ist die gute Übereinstimmung zwischen Nettoablationstagen und Nettowärmesummen mit einem Koeffizienten von $-0,857 \pm 0,067$, wobei sich bei letzteren im Mittel ein Überschuß von 34° oder 50 cm Schnee zusätzlicher Abschmelzleistung ergeben hatte, was etwa 7–8 vollen Ablationstagen entspricht.

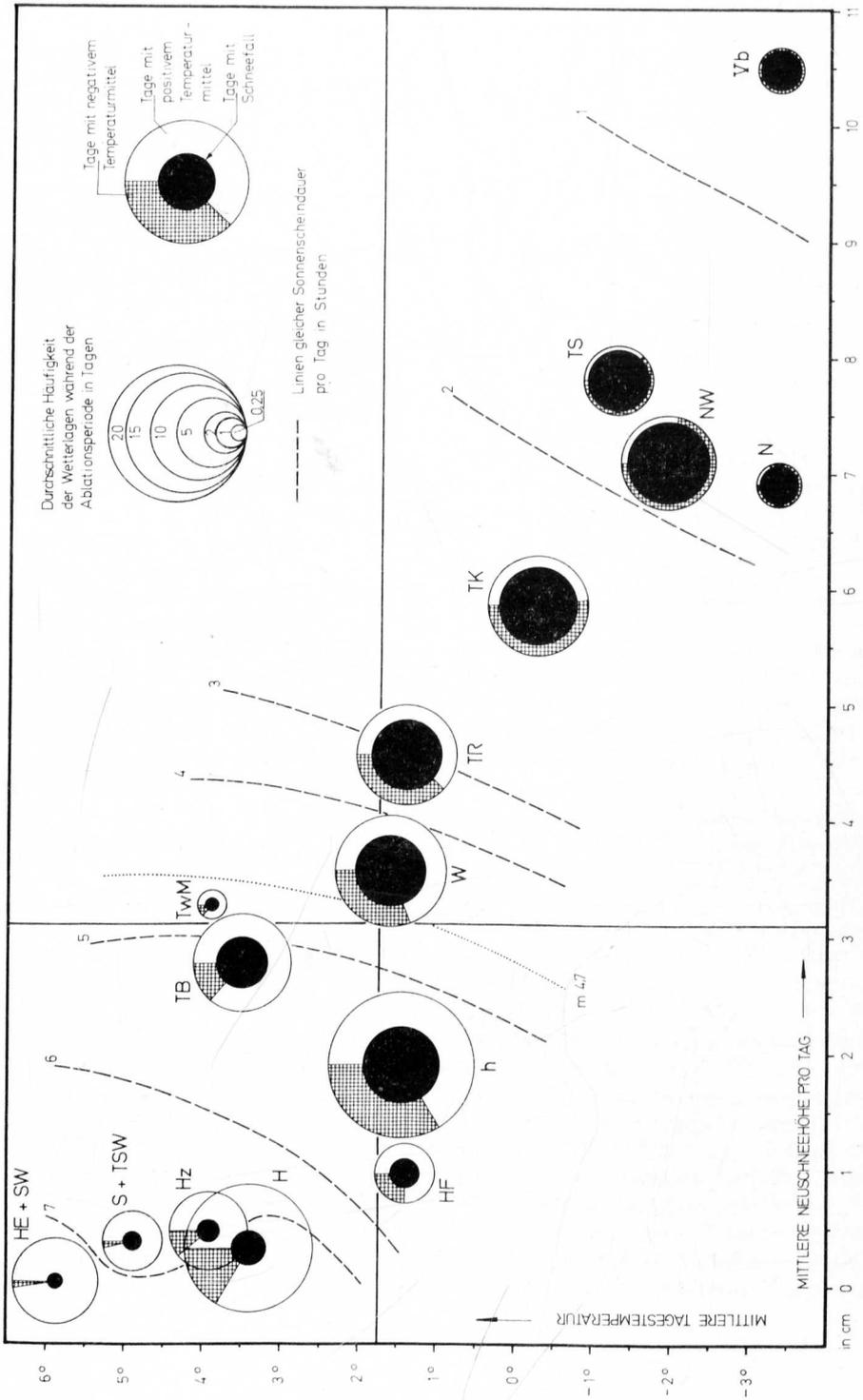


Abb. 5: Witterungscharakter der Ostalpinen Wetterlagen während der Ablationsperiode (VI—IX) in 2940—2950 m an der Pasterze, reduziert nach den Beobachtungen des Mooserbodens (2036 m). Weitere Erläuterungen im Text.

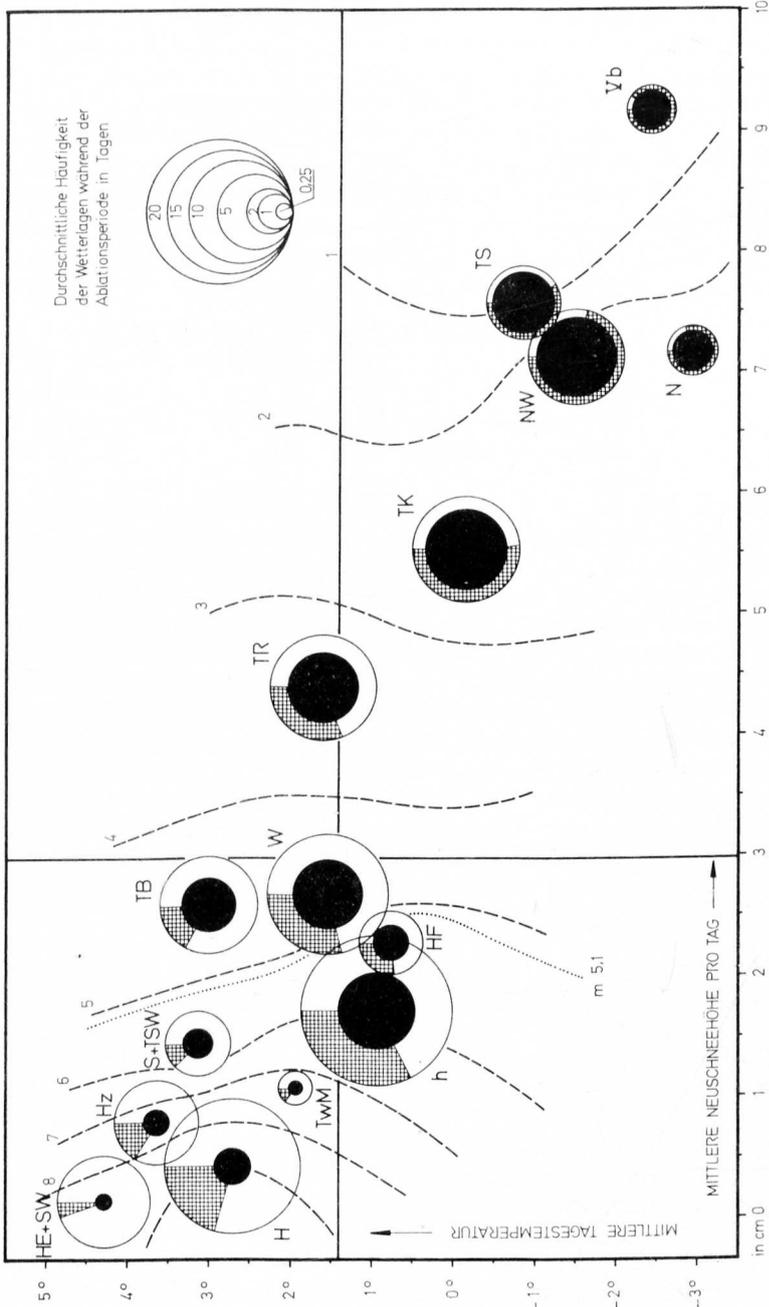


Abb. 6: Witterungscharakter der Ostalpinen Wetterlagen während der Ablationsperiode (VI-IX) in 2940-2950 m an der Pasterze, reduziert nach den Beobachtungen des Somblicks (3106 m). Erläuterungen im Text und in Abb. 5.

Die Untersuchung der Wetterlagen auf ihre Bedeutung für den Gletscherhaushalt der Pasterze während der Ablationsperiode mit Hilfe der Station Mooserboden zeigt die Abbildung 5. Die Reduktion der einzelnen Klimatelemente auf Gletscherniveau (2940—2950 m) erfolgte nach den in Kap. 5a angegebenen Methoden. Das Diagramm zeigt sofort, daß sich nach diesen Voraussetzungen die ablationshemmende Wirkung einiger Wetterlagen gegenüber dem Westen wesentlich verstärkt hat, was besonders für NW, TK und Vb gilt, deren Niederschlagsintensivierung gegen die östlichen Zentralalpen schon länger bekannt ist (F. Fliri 1962, S. 81 Abb. 33, 34, S. 121 Abb. 89, 90, S. 125 Abb. 96), während die Wirkung der eindeutigen Ablationswetterlagen durchwegs gleich bleibt.

Nach dem Diagramm können den einzelnen Tagen je nach Wetterlage folgende Wirkungen auf den Gletscherhaushalt zugeschrieben werden:

1 Ablationstag: H, Hz, HE, SW, S, TSW

½ Ablationstag: h, HF, W, TB, TwM

neutral: TR

1 Akkumulationstag: N, NW, TS, TK

2 Akkumulationstage: Vb

Damit verringert sich natürlich die verbleibende Zahl von „Restablationstagen“, sie schwankt zwischen +46 (1953) und -5 (1965) bei einem Mittel von +28.

Dasselbe Ergebnis erzielt man bei der Reduktion der einzelnen Klimatelemente auf Gletscherniveau nach den in Kap. 5a angegebenen Methoden bei Verwendung der Beobachtungen des Sonnblicks (Abb. 6). Der Witterungscharakter der einzelnen Wetterlagen ist zwar weniger eindeutig definiert als bei der Verwendung der Station Mooserboden (Abb. 5), grundsätzlich aber kaum davon abweichend. Ein Vergleich der so errechneten „Restablationstage“ mit der Nettoakkumulation auf der Pasterze ergibt einen Korrelationskoeffizienten von $-0,645 \pm 0,146$, was nur einer mäßigen Übereinstimmung gleichkommt.

Zieht man für die Schmelzung von je 15 cm Winterschnee zwei Ablationstage ab, dann erhält man analog zum Hintereisferner die Zahl der „Nettoablationstage“, die je nach Verwendung des Mooserbodens, bzw. Sonnblicks verschiedene Werte ergeben. Die Rekonstruktion der Winterschneedecke erfolgt nach den in Kap. 5a angegebenen Methoden. In beiden Fällen werden die Summen der Nettoablationstage meist negativ und ergeben im Mittel etwa -14, d. h. die Gleichgewichtslinie liegt wesentlich unter 2950 m, wo im Durchschnitt ca. 1 m Schnee als jährliche Rücklage verbleibt. Haushaltsjahre mit positiven Summen der Ablationstage oder Ablationsüberschuß in 2950 m waren i. a. nur die Jahre 1952/53, 1957/58, 1962/63 und 1963/64. Im Haushaltsjahr 1964/65 gab es ein Defizit von 52 (nach Sonnblick) bzw. 70 (nach Mooserboden) Ablationstage (Abb. 7) oder 390 bzw. 525 cm Schneerücklage.

Ein Vergleich der Nettoablationstage mit der Nettoakkumulation auf der Pasterze ergibt bei Verwendung der Station Mooserboden einen Koeffizienten von $-0,765 \pm 0,104$, bei Verwendung des Sonnblicks $-0,752 \pm 0,109$ (Abb. 7). Beide Koeffizienten sind zu 99,9% signifikant. Nach Einbeziehung des Winterniederschlags ergibt sich somit eine beträchtliche Verbesserung der Übereinstimmung, wie überhaupt diese beiden Ergebnisse das bisher erreichte Optimum darstellen, während sich mit der Volumsänderung der Pasterzenzunge und den Nettoablationstagen bei Koef-

fizienten von $-0,087$ (nach Mooserboden) bzw. $+0,028$ (nach Sonnblick) überhaupt keine Zusammenhänge feststellen lassen.

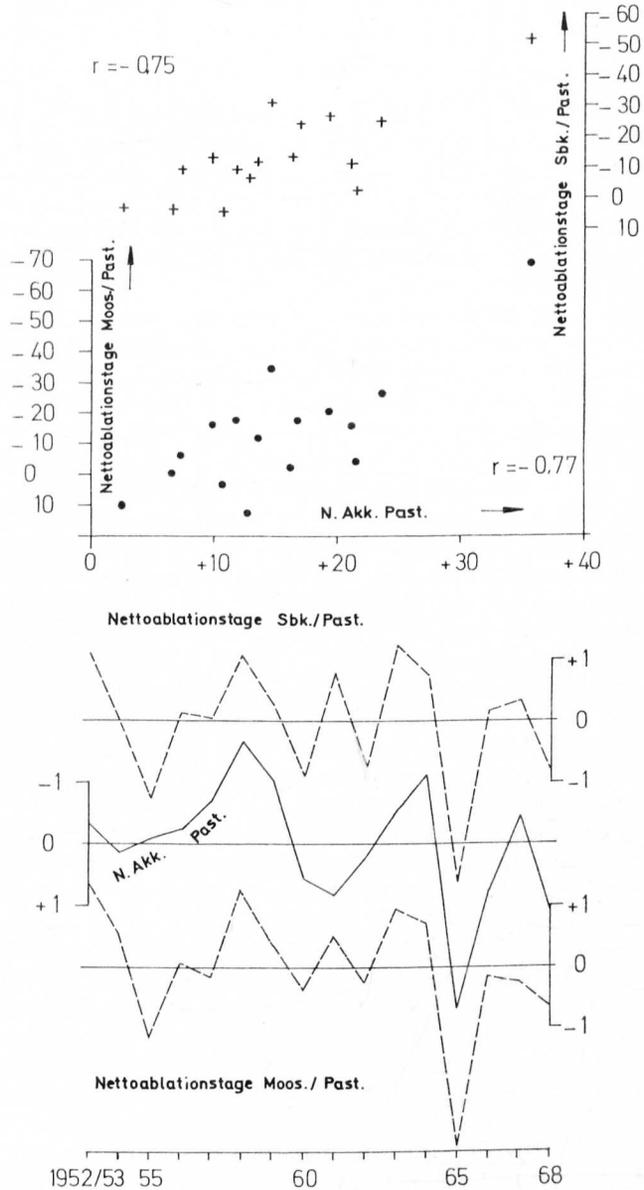


Abb. 7: Nettoakkumulation an der Pasterze in Mill. m³ (Wasser) und Nettoablations-tage Mooserboden/Pasterze bzw. Sonnblick/Pasterze. Korrelationsdiagramm: Absolutwerte. Zeitdiagramm: standardisierte Werte.

Die durch die Häufigkeit bestimmter Wetterlagen unter Beachtung der Winterakkumulation ausgedrückte Gesamtwitterung der Haushaltsjahre stimmt auch mit der durch die Nettowärmesumme ausgedrückten Gesamtwitterung gut überein,

Die Untersuchung der Wetterlagen auf ihre Bedeutung für den Gletscherhaushalt der Pasterze während der Ablationsperiode mit Hilfe der Station Mooserboden zeigt die Abbildung 5. Die Reduktion der einzelnen Klimatelemente auf Gletscherniveau (2940—2950 m) erfolgte nach den in Kap. 5a angegebenen Methoden. Das Diagramm zeigt sofort, daß sich nach diesen Voraussetzungen die ablationshemmende Wirkung einiger Wetterlagen gegenüber dem Westen wesentlich verstärkt hat, was besonders für NW, TK und Vb gilt, deren Niederschlagsintensivierung gegen die östlichen Zentralalpen schon länger bekannt ist (F. Fliri 1962, S. 81 Abb. 33, 34, S. 121 Abb. 89, 90, S. 125 Abb. 96), während die Wirkung der eindeutigen Ablationswetterlagen durchwegs gleich bleibt.

Nach dem Diagramm können den einzelnen Tagen je nach Wetterlage folgende Wirkungen auf den Gletscherhaushalt zugeschrieben werden:

1 Ablationstag: H, Hz, HE, SW, S, TSW

½ Ablationstag: h, HF, W, TB, TwM

neutral: TR

1 Akkumulationstag: N, NW, TS, TK

2 Akkumulationstage: Vb

Damit verringert sich natürlich die verbleibende Zahl von „Restablationstagen“, sie schwankt zwischen +46 (1953) und -5 (1965) bei einem Mittel von +28.

Dasselbe Ergebnis erzielt man bei der Reduktion der einzelnen Klimatelemente auf Gletscherniveau nach den in Kap. 5a angegebenen Methoden bei Verwendung der Beobachtungen des Sonnblicks (Abb. 6). Der Witterungscharakter der einzelnen Wetterlagen ist zwar weniger eindeutig definiert als bei der Verwendung der Station Mooserboden (Abb. 5), grundsätzlich aber kaum davon abweichend. Ein Vergleich der so errechneten „Restablationstage“ mit der Nettoakkumulation auf der Pasterze ergibt einen Korrelationskoeffizienten von $-0,645 \pm 0,146$, was nur einer mäßigen Übereinstimmung gleichkommt.

Zieht man für die Schmelzung von je 15 cm Winterschnee zwei Ablationstage ab, dann erhält man analog zum Hintereisferner die Zahl der „Nettoablationstage“, die je nach Verwendung des Mooserbodens, bzw. Sonnblicks verschiedene Werte ergeben. Die Rekonstruktion der Winterschneedecke erfolgt nach den in Kap. 5a angegebenen Methoden. In beiden Fällen werden die Summen der Nettoablationstage meist negativ und ergeben im Mittel etwa -14, d. h. die Gleichgewichtslinie liegt wesentlich unter 2950 m, wo im Durchschnitt ca. 1 m Schnee als jährliche Rücklage verbleibt. Haushaltsjahre mit positiven Summen der Ablationstage oder Ablationsüberschuß in 2950 m waren i. a. nur die Jahre 1952/53, 1957/58, 1962/63 und 1963/64. Im Haushaltsjahr 1964/65 gab es ein Defizit von 52 (nach Sonnblick) bzw. 70 (nach Mooserboden) Ablationstage (Abb. 7) oder 390 bzw. 525 cm Schneerücklage.

Ein Vergleich der Nettoablationstage mit der Nettoakkumulation auf der Pasterze ergibt bei Verwendung der Station Mooserboden einen Koeffizienten von $-0,765 \pm 0,104$, bei Verwendung des Sonnblicks $-0,752 \pm 0,109$ (Abb. 7). Beide Koeffizienten sind zu 99,9% signifikant. Nach Einbeziehung des Winterniederschlags ergibt sich somit eine beträchtliche Verbesserung der Übereinstimmung, wie überhaupt diese beiden Ergebnisse das bisher erreichte Optimum darstellen, während sich mit der Volumsänderung der Pasterzenzunge und den Nettoablationstagen bei Koef-

fizienten von $-0,087$ (nach Mooserboden) bzw. $+0,028$ (nach Sonnblick) überhaupt keine Zusammenhänge feststellen lassen.

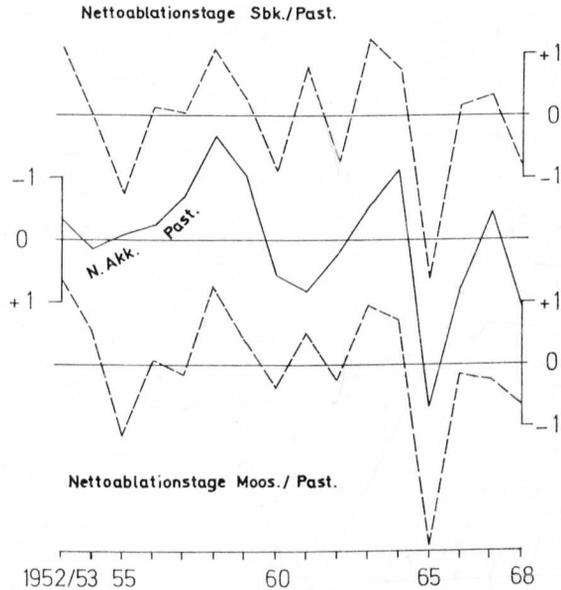
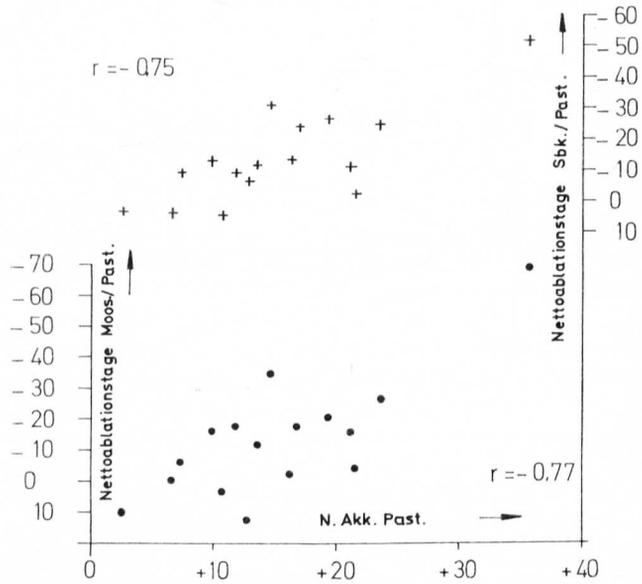


Abb. 7: Nettoakkumulation an der Pasterze in Mill. m^3 (Wasser) und Nettoablationstage Mooserboden/Pasterze bzw. Sonnblick/Pasterze. Korrelationsdiagramm: Absolutwerte. Zeitdiagramm: standardisierte Werte.

Die durch die Häufigkeit bestimmter Wetterlagen unter Beachtung der Winterakkumulation ausgedrückte Gesamtwitterung der Haushaltsjahre stimmt auch mit der durch die Nettowärmesumme ausgedrückten Gesamtwitterung gut überein,

wobei sich nach Mooserboden ein Koeffizient von $-0,878 \pm 0,057$, nach Sonnblick einer von $-0,791 \pm 0,094$ errechnen läßt. Der Versuch, die Witterung durch Häufigkeitsangaben bestimmter Wetterlagen auszudrücken, kann daher durchaus als gelungen bezeichnet werden.

e) LUFTDRUCKABWEICHUNGEN WÄHREND DER ABLATIONSPERIODE

Ähnlich wie man durch die „restlichen“ positiven Temperatursummen die Gesamtwitterung der Ablationsperiode für alpine Hochlagen ausdrücken kann, läßt sich das auch durch Angabe der Abweichungen der 500 mb-Fläche tun (H. Hoinkes *et al.* 1967, H. Hoinkes 1965, 1967, 1968), die weitgehend mit den Temperaturabweichungen parallel laufen, oder auch mit den Abweichungen der 700 mb-Fläche (H. Tollner 1969), die vielleicht noch besser die Abweichungen der atmosphärischen Zirkulation auszudrücken vermögen.

Für diese Fälle sind die Abweichungen des mittleren Luftdrucks der Ablationsperiode auf dem Sonnblick genügend aussagekräftig. Sie sind in ihren Schwankungen ähnlich den positiven Temperatursummen in Gletscherniveau, doch kommt es z. T. zu bedeutenden Unterschieden, da mit dem Luftdruck in 3100 m Höhe nicht allein die Sommerwärme, sondern auch die Zyklonalität der Witterung (z. B. warme zyklonale und kalte antizyklonale Wetterlagen) ausgedrückt wird. Im beobachteten Zeitraum schwankte der Luftdruck auf dem Sonnblick zwischen 701,9 mb (1959) und 697,9 mb (1965) bei einem Mittel von 700,1 mb. Ein Vergleich des mittleren Luftdrucks auf dem Sonnblick mit der Massenbilanz des Hintereisferners ergibt einen Koeffizienten von $-0,735 \pm 0,115$, mit der Nettoakkumulation an der Pasterze einen von $-0,744 \pm 0,111$ (Abb. 8), was eine recht gute Übereinstimmung darstellt, da ja der Einfluß der Winterschneedecke noch nicht berücksichtigt wurde.

Da es kaum möglich ist, die sommerlichen Luftdruckwerte durch Kombination mit der winterlichen Akkumulation in „Nettoluftdruckwerte“ umzuwandeln, verfährt man wieder am besten nach der Methode der partiellen Korrelation, wobei zwischen dem sommerlichen Luftdruck und den Gletscherhaushaltswerten Korrelationskoeffizienten unter Zugrundelegung konstanter Winterniederschläge (X—V) errechnet werden können.

Dabei ergibt sich zwischen der Massenbilanz des Hintereisferners und dem Luftdruck auf dem Sonnblick unter Annahme konstanter Winterniederschläge in Vent ein Koeffizient von $-0,824 \pm 0,080$, zwischen der Nettoakkumulation auf der Pasterze und dem Luftdruck am Sonnblick unter Annahme konstanter Winterniederschläge am Mooserboden ein Koeffizient von $-0,804 \pm 0,088$ und unter Annahme konstanter Winterniederschläge auf dem Sonnblick selbst ein Koeffizient von $-0,820 \pm 0,082$. Alle Koeffizienten sind zu 99,9% Wahrscheinlichkeit gesichert. Auch die Nettoakkumulation am Hintereisferner stimmt mit dem sommerlichen Luftdruck am Sonnblick unter Annahme konstanter Winterniederschläge in Vent mit einem Koeffizienten von $-0,799 \pm 0,090$ gut überein, wie auch die Nettoablation ($+0,749 \pm 0,110$), während mit der Volumsänderung der Pasterzenzunge bei Annahme konstanter Winterniederschläge am Mooserboden oder am Sonnblick bei Koeffizienten von $-0,016$ bzw. $0,018$ überhaupt kein Zusammenhang feststellbar ist.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Übereinstimmung zwischen dem Gletscherhaushalt, der ausgedrückt durch die Massenbilanz oder Nettoakkumulation die einzig direkt mit Klimadaten vergleichbare Größe darstellt, mit einzelnen Klimaelementen meist recht unbefriedigend, z. T. sogar überhaupt nicht nachweisbar

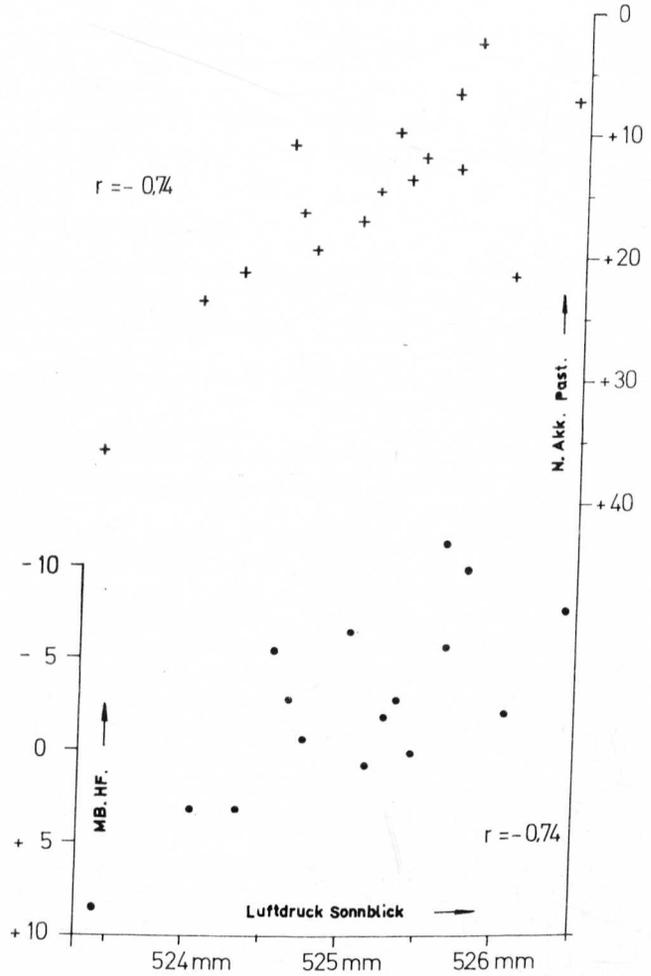
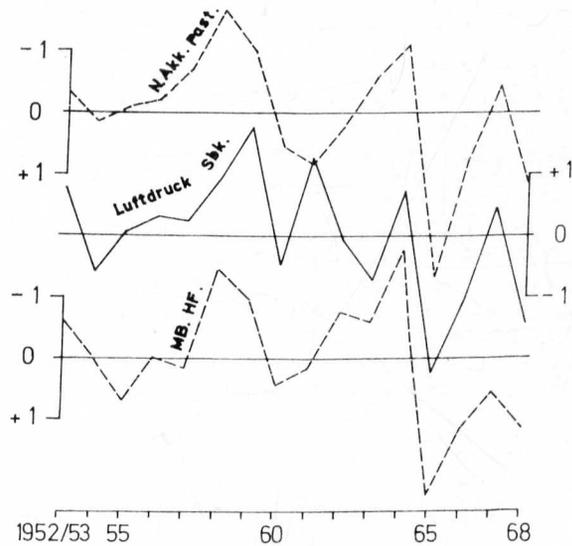


Abb. 8: Mittlerer Luftdruck am Sonnblick während der Ablationsperiode in mm Hg und Massenbilanz des Hintereisferners (MB. HF.) in Mill. m³ (Wasser) bzw. Nettoakkumulation an der Pasterze in Mill. m³ (Wasser).

Korrelationsdiagramm: Absolutwerte.

Zeitdiagramm: standardisierte Werte.



ist. Demgegenüber lassen sich mit Ausdrücken für die Gesamwitterung, wie etwa „Nettowärmesummen“, „Nettoablationstagen“ und Abweichungen des sommerlichen Luftdrucks unter Beachtung der winterlichen Akkumulation durchwegs gute und hoch signifikante Zusammenhänge feststellen. Sie sind sicher noch durch verfeinerte Beobachtungs- und Reduktionsmethoden zu verbessern.

LITERATUR

- Finsterwalder, R. 1953. Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückganges an Ostalpengletschern. Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie, Bd. II, H. 2, S. 189—239.
- Fliri, F. 1962. Wetterlagenkunde von Tirol. Tiroler Wirtschaftsstudien, 13. Folge, Wagner, Innsbruck.
- Fliri, F. 1964. Zur Witterungsklimatologie sommerlicher Schneefälle in den Alpen. Wetter und Leben, Jahrg. 16, S. 1—11.
- Hoinkes, H. 1954. Neue Niederschlagszahlen aus den zentralen Ötztaler Alpen. 49.—50. Jahresbericht des Sonnblick-Vereines für die Jahre 1951—52, S. 19—27.
- Hoinkes, H. 1962. Schwankungen der Alpengletscher — ihre Messung und ihre Ursachen. Umschau, 62. Jahrg., H. 18, S. 558—562.
- Hoinkes, H. und R. Rudolph 1962a. Variations of the mass-balance of Hintereisferner (Oetztal Alps), 1952—1961 and their relation to variations of climatic elements. Publ. No. 58 of the I. A. S. H. Commission of Snow and Ice, S. 16—28.
- Hoinkes, H. und R. Rudolph 1962b. Mass balance studies on the Hintereisferner, Oetztal Alps, 1952—61. Journal of Glaciology, Vol. 4, No. 33, S. 266—268.
- Hoinkes, H. 1965. Zirkulationsbedingte Gletscherschwankungen. Bericht über die 8. int. Tagung f. Alpine Meteorologie, Villach 1964. Carinthia II, 24. Sonderheft, S. 272—278.
- Hoinkes, H. 1967. Gletscherschwankungen und Wetter in den Alpen. 9. int. Tagung f. Alp. Met. 1966. Veröff. d. Schweizer. Meteorolog. Zentralanstalt, Nr. 4, S. 9—24.
- Hoinkes, H., E. Dreiseitl, F. Howorka, I. Lauffer, H. Queck, W. Schneider, H. Slupetzky 1964. Combined water, ice and heat budget investigations in the Austrian Alps. UNESCO Contract N. S./2803/65, 89 S.
- Hoinkes, H. 1968. Glacier variation and weather. Journal of Glaciology, Vol. 7, Nr. 49, S. 3—19.
- Hoinkes, H. 1970a. Ergebnisse des glazial-meteorologisch-hydrologischen IHD-Programmes im Rofental bei Vent 1964—1968. Bericht über die 12. Hydrographentagung in Wien, 17. bis 21. Nov. 1969, Mitteilungsblatt des Hydr. Dienstes in Österr., Nr. 45, S. 101—113.
- Hoinkes, H. 1970b. Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie, Bd. VI, H. 1—2, S. 37—90.
- Lauscher, F. 1958. Studien zur Wetterlagen-Klimatologie der Ostalpenländer. Wetter und Leben, Jahrg. 10, S. 79—83.
- Lauscher, F. 1960. Lufttemperatur. Klimatographie von Österreich, Hrsg. F. Steinhauser, O. Eckel, F. Lauscher. Österr. Akad. d. Wiss., Denkschr. d. Gesamtakademie, Bd. 3, 2. Lieferung, S. 137—206.
- Mittrecker, F. u. H. Tollner 1963. Ergebnisse von Niederschlagsmessungen mittels Totalisatoren im Großglocknergebiet. 58.—59. Jahresbericht des Sonnblick-Vereines für die Jahre 1960—1961, S. 50—63.
- Morawetz, S. 1941. Zur Frage der letzten Gletscherschwankungen in den Ostalpen. Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie, Bd. XXVII, S. 36—49.
- Paschinger, H., G. Gruber, H. Aigelsreiter 1947—1968. Originalberichte über die Nachmessung an der Pasterze. (Meist veröffentlicht in der Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeol. oder Mitteilungen des OeAV.)
- Paschinger, H. 1969. Die Pasterze in den Jahren 1924—1968. Neue Forschungen im Umkreis der Glocknergruppe. Wissenschaftl. Alpenvereinshefte, H. 21, S. 201—215.

- Patzelt, G. u. H. Slupetzky 1970. Die Vertikalkomponente der Gletscherbewegung auf der Pasterze 1968—69 und ihr Einfluß auf die Berechnung der Massenbilanz. Zeitschrift f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie, Bd. VI, H. 1—2, S. 119—127.
- Schimpp, O. 1959. Der Haushalt des Hintereisferners (Ötztal). Veröff. Museum Ferdinandeum, Innsbruck, Bd. 39, S. 66—138.
- Steinhauser, F. 1962. Die Auswirkung der verschiedenen Wetterlagen in Österreich. VI. int. Tagung f. alpine Meteorologie, Bled/Jugosl., S. 99—108.
- Tollner, H. 1954a. Die meteorologisch-klimatischen Ursachen der Gletscherschwankungen in den Ostalpen während der letzten zwei Jahrhunderte. Mitt. d. Geogr. Ges. Wien, Bd. 96, S. 31—74.
- Tollner, H. 1954b. Die Eisstände einiger Sonnblick- und Glocknergletscher im Spätsommer 1952 und 1953. 49.—50. Jahresbericht des Sonnblick-Vereines für die Jahre 1951—1952, S. 48—49.
- Tollner, H. 1957a. Bericht über die Eisstände der Gletscher der Großglockner- und Sonnblickgruppe im Frühherbst 1954, 1955 und 1956. 51.—53. Jahresbericht des Sonnblick-Vereines für die Jahre 1953—1955, S. 33—38.
- Tollner, H. 1957b. Die Folgen des Rückganges der österreichischen Gletscher auf die Wasserspeicherung hochalpiner Kraftwerksanlagen. 51.—53. Jahresbericht des Sonnblick-Vereines für die Jahre 1953—1955, S. 38—42.
- Tollner, H. 1961. Das Verhalten der Gletscher des Sonnblick- und Glocknergebietes von 1957—59. 54.—57. Jahresbericht des Sonnblick-Vereines für die Jahre 1956—1959, S. 19—27.
- Tollner, H. 1962. Der Zustand von Gletschern des Großglockner- und Sonnblickgebietes am Ende des Sommers 1962. Wetter und Leben, Jahrg. 14, S. 246—250.
- Tollner, H. 1963. Über den Zustand der Gletscher der Großglocknergruppe und des Sonnblickgebietes im Spätsommer 1960 und 1961. 58.—59. Jahresbericht des Sonnblick-Vereines für die Jahre 1960—1961, S. 74—82.
- Tollner, H. 1966. Über die Veränderung der Gletscher im Großglockner- und Sonnblickgebiet in den Jahren 1963 und 1964. 60.—62. Jahresbericht des Sonnblick-Vereines für die Jahre 1962—1964, S. 56—64.
- Tollner, H. 1968. Der Zustand von Gletschern des Großglockner- und Sonnblickgebietes am Ende der Sommer 1965, 1966 und 1967. 63.—65. Jahresbericht des Sonnblick-Vereines für die Jahre 1965—1967, S. 73—83.
- Tollner, H. 1969. Das Verhalten von Gletschern der Großglocknergruppe in den letzten Jahrzehnten. Neue Forschungen im Umkreis der Glocknergruppe. Wissenschaftl. Alpenvereinshefte, H. 21, S. 181—197.
- Wakonigg, H. 1971. Gletscherverhalten und Klimaelemente. Festschrift f. H. Paschinger (in Druck).

Manuskript eingegangen am 27. April 1971, Revisionen am 2. Juli 1971.

Anschrift des Verfassers: HAss. Dr. Herwig Wakonigg, Universität Graz, Geographisches Institut, Universitätsplatz 2/II, A-8010 Graz.