

Verhalten und Eisvolumen der Pasterze (Glocknergruppe) in Beziehung zu den klimatischen Bedingungen*

Von G. Gangl, G. Skoda und F. J. Wallner **

Zusammenfassung: Für den Pasterzengletscher (Glocknergruppe) wird auf Grund der Daten des nahegelegenen meteorologischen Observatoriums am Hohen Sonnblick ein Witterungsparameter erstellt, welcher mit Angaben der maximalen Fließgeschwindigkeit an der Seelandlinie der Pasterze seit 1887 verglichen wird. Die Kreuzkorrelation zeigt einen negativen Zusammenhang von Sommertemperatur und Fließgeschwindigkeit, der erst mit einer zeitlichen Verzögerung von 3 bis 10 Jahren aufgezeigt wird. Der Eisverlust der Pasterze, welcher an Hand der Moränen des Hochstandes um 1850 abgeschätzt werden kann, ergibt seither einen größeren Massenverlust als das heutige Eisvolumen von $1,24 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Aus den Kartenangaben von 1924, 1964 und 1969 kann der durchschnittliche jährliche Massenverlust ermittelt und infolge der verzögerten Reaktion des Gletschers auf die Sommertemperaturen der Vorjahre auf einen weiteren Rückgang für die Folgejahre geschlossen werden.

Summary: An index for the annual ablation of ice of the greatest glacier in the Eastern Alpine region, the Pasterze Glacier (Glocknergruppe), is constructed with the help of temperature records from the meteorological observatory Hoher Sonnblick (3.106 m). The authors correlate the cited temperature-parameter with the maximum ice-velocity at the so-called „Seelandlinie“ for the time 1887 up to now. The cross-correlation shows significant negative coefficients for the elements summer-temperature and ice-velocity considering a time lag of 3–10 years.

The loss of ice of the Pasterze Glacier during the last one hundred years, estimated from the moraines of 1850, was greater than the total volume of ice of $1,24 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ today. The mean annual loss of ice is calculated by means of geodetic maps of the years 1924, 1964 and 1969. One is strongly inclined to expect a further retreat of the Pasterze-glacier as a consequence of the time lag of the glacier response to unfavourable weather conditions of preceding summers.

1. Einleitung

In den vergangenen einhundert Jahren ist das Verhalten der Gletscher in den Alpen durch einen starken Rückgang gekennzeichnet. Am auffallendsten wird dem Beschauer dieser Vorgang durch die Moränenwälle des heute eisfreien Raumes aus der Zeit des Hochstandes um 1850 bewußt. Anhand des größten Gletschers auf österreichischem Staatsgebiet — der Pasterze (Glocknergruppe, Kärnten) — soll das Ausmaß des Massenverlustes und die Ursachen hierfür anhand langjährig vorliegender Messungen untersucht werden.

Die Frage nach Beziehungen zwischen Gletscherverhalten und den klimatischen Bedingungen hat durch die Aufnahme direkter Massenhaushaltsmessungen in den letzten Jahren große Bedeutung erlangt (Hoinkes 1970, Skoda 1971). Es hat sich herausgestellt, daß im allgemeinen unmittelbar mit der Witterung eines Einzeljahres nur die Bestimmung des Eismassenhaushaltes, verstanden als Differenz zwischen Gesamtzuwachs und Gesamtatrag an Eis, in Relation zu setzen ist (Hoinkes 1967, Skoda 1971). Derartige Bilanzstudien gibt es in den Ostalpen aber erst seit rund 20 Jahren (Hintereisferner, Tirol). Kürzere Beobachtungsreihen der Massenbilanz existieren u. a. noch vom Langtalerferner, Vernagtferner, Kesselwandferner, Schneeferner, Stubacher Sonnblick-Kees und Schmiedinger Kees.

Für die Pasterze liegen Messungen der Massenbilanz nur für wenige Jahre vor. Dafür gibt es aber neben morphologischen Studien z. T. lange Beobachtungsreihen über die Lage des Zungenendes, der Höhenänderung der Oberfläche der Zunge, stichprobenartige Messungen der Höhenänderung im Firngebiet entlang von Profilen, Akkumulationsmessungen im Firngebiet, Aufnahmen der Gletscheroberfläche, seismische Messungen der Eisdicke sowie geodätische Auswertungen der Fließgeschwindigkeit des Eises an definierten Querprofilen der Gletscherzunge („Paschinger-, Seeland-, Burgstall-Linie“; Patzelt 1969, Paschinger 1969).

* Vortrag, gehalten während der IX. Intern. Polartagung, München 1973.

** Dr. Georg Gangl, Dr. Georg Skoda u. F. J. Wallner, Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien, A-1190 Wien, Hohe Warte 38.

Die Nähe des bekannten Bergobservatoriums „Hoher Sonnblick“ (3 106 m), an dem seit 1886 meteorologische Daten lückenlos aufgezeichnet werden, legt es nahe, Zusammenhänge zwischen einem Witterungsparameter und den direkt gemessenen Feldgrößen zu suchen, wobei wir nach obigem keine derartig signifikant hohen Zusammenhänge wie bei Verarbeitung von Werten des Massenhaushaltes erwarten dürfen (Steinhauser 1938, Jahrbücher d. Zentr. Anst., Wien, Wakonigg 1971).

2. Erstellung eines Witterungsindex (1887—1972)

In zahlreichen Studien werden die Terme der Wärmebilanzgleichung auf oder in nächster Nähe des betreffenden Gletschers gemessen (UNESCO/IASH 1970). Dabei spielt in der überwiegenden Zahl der Fälle in unseren Breiten der kurzwellige Anteil der Sonnenstrahlung während der Sommermonate die dominierende Rolle (Hoinkes 1967). Liegen keine Strahlungsmessungen vor, so bewähren sich auch Angaben über die Dauer der Ablationsperiode (Hoinkes, Howorka u. Schneider 1967). Als Ablationstage sollen jene Tage gelten, an denen die Tagesmitteltemperatur über 0°C liegt. Legt man eine Häufigkeitstabelle für die Tagesmitteltemperaturen mit einer Klassenbreite von 1°C an und summiert die Häufigkeiten von der höchsten Klasse beginnend, so erhält man eine Summenkurve, welche für einen bestimmten Temperaturwert angibt, an wieviel Tagen des behandelten Zeitraumes die Tagesmitteltemperatur über dem genannten Temperaturwert liegt. Für das Glocknerhaus (2 132 m, am Zungenende der Pasterze gelegen) liegen für einzelne Jahre (z. B. Sommer 1894, 1935 bis 1938) Temperaturangaben aus drei täglichen Terminen vor (Met. Beobachtungen, Zentr. Anst., Wien). Bildet man für jene Jahre, für welche Messungen am Glocknerhaus vorliegen, die Summenkurven, so können diese mit den analogen Kurven der Station Hoher Sonnblick durch Parallelverschiebung längs der Temperaturachse annähernd zur Deckung gebracht werden (Ambach 1972). Der Betrag, um welchen die eine Kurve verschoben werden muß, gibt an, um wieviel die Temperaturwerte des Hohen Sonnblick reduziert werden müssen, um Angaben über die Temperatur am Zungenende der Pasterze zu erhalten: Es zeigt sich auf diese Weise, daß bei einem Tagesmittel der Temperatur von minus 4 Grad am Sonnblick, in 2 200 m am Zungenende der Pasterze bereits Ablation zu erwarten ist (Schwellwert für Ablation auf der unteren Pasterze).

In der Folge werden alle Tagesmitteltemperaturen der Station Hoher Sonnblick, welche über dem Schwellwert von minus 4 Grad liegen, für die Sommermonate Juni bis September aufsummiert und daraus die Mittelwerte für die einzelnen Sommermonate der Jahre 1887 bis 1972 gebildet. Die Summe der einzelnen Monatsmittelwerte der Temperatur wird nun für jedes Jahr eine Maßzahl für die Intensität der Ablation während der betreffenden Jahre ergeben. Wir wissen aber, daß den Werten der Einzelmonate während eines ganzen Sommers nicht dasselbe Gewicht beizumessen ist. Dies wird bereits daraus verständlich, daß die Intensität des Abschmelzvorganges am Gletscher von der Albedo („Weißheit“) seiner Oberfläche abhängig ist. (Wegen des Abschmelzens der schützenden Neuschnee- und Firnschichten sinkt die Albedo gegen Ende des Sommers stark ab.)

Aus einer früheren Untersuchung entnehmen wir einen aus einer Periode von 18 Jahren gemittelten Verlauf der benötigten Gewichte, mit denen Strahlungs- bzw. Temperatureffekte in den jeweiligen Monaten zu berücksichtigen sind (Skoda 1971). Unter Berücksichtigung einer während des Sommers treppenförmig abnehmenden Albedo sowie den aktuellen Bewölkungs- und Niederschlagsverhältnissen (insbes. der Tage mit Neuschnee) ergibt sich dort, sobald für den Monat Juni der Faktor gleich 1 gesetzt wird, für Juli: $F = 1,11$, August: $F = 1,47$ und für September: $F = 1,87$. Wir betonen nochmals, daß die angegebenen Faktoren F sich aus aktuellen Wettersituationen der Jahre 1953 bis 1970 ableiten und somit implizit den Witterungsverlauf dieser Periode enthalten.

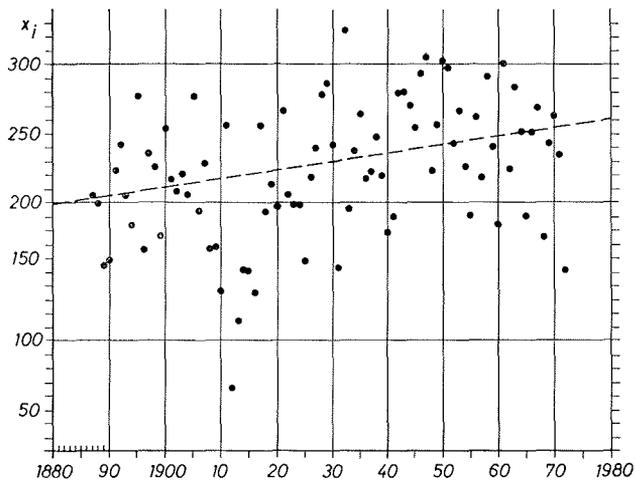


Abb. 1: Temperaturindex x_i für die Pasterze.
 Fig. 1: Temperature index x_i for the Pasterze Glacier.

Nach Multiplikation der Monatsmittelwerte der Temperatur mit den jeweilig angeführten Gewichtungsfaktoren und Summierung derselben zu Jahreswerten, erhalten wir für den Pasterzengletscher einen Klimaindex für den Zeitraum 1887 bis 1972 (Abb. 1). Die eingetragene Ausgleichsgerade macht den leicht ansteigenden Trend der sommerlichen Temperaturverhältnisse deutlich. Dieser ist bereits aus den einfachen Dekadenmitteln der Monatsmitteltemperaturen des Hohen Sonnblick ersichtlich: Besonders die niedrigen Temperaturen während des Zeitraumes 1907 bis 1916 bzw. die hohen Werte während des Abschnittes 1947 bis 1956 sind beachtenswert. Diese Lage der Extrema findet sich auch in obigem Temperaturindex wieder (Tab. 1).

	Monatsmittel d. Temp. in °C				Temperaturindex in °C
	Juni	Juli	August	Sept.	
1887—1896	—1,3	0,4	0,7	—1,3	20,12
1897—1906	—1,1	1,3	1,2	—1,0	22,06
1907—1916	—1,1	—0,2	0,2	—2,8	15,65
1917—1926	—2,0	1,0	1,0	—0,8	20,91
1927—1936	—0,3	1,8	1,6	—0,8	24,32
1937—1946	—0,5	1,5	1,5	—0,5	24,27
1947—1956	—0,6	1,8	1,7	0,0	25,71
1957—1966	—0,2	1,2	1,3	—0,3	24,32
1967—1972	—0,6	1,1	0,9	—0,9	22,27

Tab. 1: Zehnjährige Mittel der Monatstemperatur am Hohen Sonnblick (3.106 m) für die Monate Juni bis September und zehnjährige Mittel des Temperaturindex für den Zungenbereich der Pasterze.

Tab. 1: Monthly mean temperatures at the observatory Hoher Sonnblick (3.106 m) for June to September and the mean temperature index for a ten year period.

Nach Ausfilterung eines linearen Trends lauten die Koeffizienten der Autokorrelation des Temperaturindex für „lag“ L (in Jahren):

L =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1,00	0,10	0,17	0,25	0,13	0,03	0,14	—0,03	0,04	—0,11	0,03

Daraus ist zu entnehmen, daß eine etwa dreijährige Periode des Temperaturindex angedeutet wird (siehe auch Abb. 3).

3. Die maximale Fließgeschwindigkeit der Pasterze an der Seelandlinie (1887—1972)

Seit dem Jahre 1882/83 liegen Fließgeschwindigkeitsmessungen an der sog. Seelandlinie (2 294 m), einem durch Steinblöcke markierten Querprofil der Pasterze in der Höhe der Hoffmannshütte, ziemlich lückenlos vor (Mitt. d. Deutsch. u. Österr. Alpenver., Carinthia, Z. f. Gletscherkunde, Mitt. d. österr. Alpenvereins).

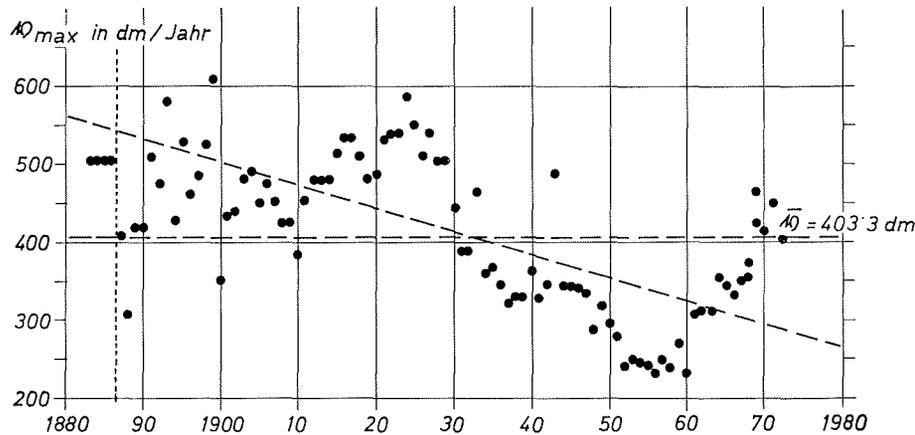


Abb. 2: Jährliche Fließgeschwindigkeit an der Seelandlinie (Maximalwert).
Fig. 2: Annual surface velocity at the „Seelandlinie“.

Um die von Jahr zu Jahr auftretenden Schwankungen deutlich erkennen zu können, betrachten wir den aus jeweils mehreren Steinen ermittelten Maximalwert der Fließgeschwindigkeit, der sich etwa in der Mitte des Gletschers befindet. Uns nicht zugängliche fehlende Einzelwerte wurden aufgrund der veröffentlichten Daten von H. Paschinger (1969) der mittleren Fließgeschwindigkeit mittels einer quasilinearen Beziehung zur Maximalen Fließgeschwindigkeit für die Jahre 1939 bis 1946 ergänzt. Die Zeitreihe der Maximalen Fließgeschwindigkeit ist in Abb. 2 dargestellt. Für den Zeitraum von 1887 bis 1972 läßt sich mit einer linearen Ausgleichsrechnung ein Trend berechnen, der eine durchschnittliche Geschwindigkeitsabnahme von ca. 30 cm/Jahr deutlich werden läßt.

Für diese Zeitreihe der Fließgeschwindigkeit lauten nach Ausfilterung eines linearen Trends die Koeffizienten der Autokorrelation für „lag“ L (in Jahren):

L =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1,00	0,66	0,60	0,48	0,44	0,32	0,36	0,24	0,22	0,10	0,10

Periodizitäten sind daraus nicht erkennbar (siehe auch Abb. 3).

4. Relation zwischen Fließgeschwindigkeit und Gletscherabfluß mit der Sommertemperatur an der Zunge der Pasterze

Wie bereits Paschinger (1969) andeutet, sind Zusammenhänge zwischen der Fließgeschwindigkeit und den Sommertemperaturen zu erwarten. Zeitlich übergreifende Mittelwerte verfälschen die gesuchten Zusammenhänge, so daß nach Elimination der Trends in beiden Reihen, einem „Korrelogramm“ („lag-correlation coefficients“) der Vorzug gegeben wurde (siehe Abb. 3).

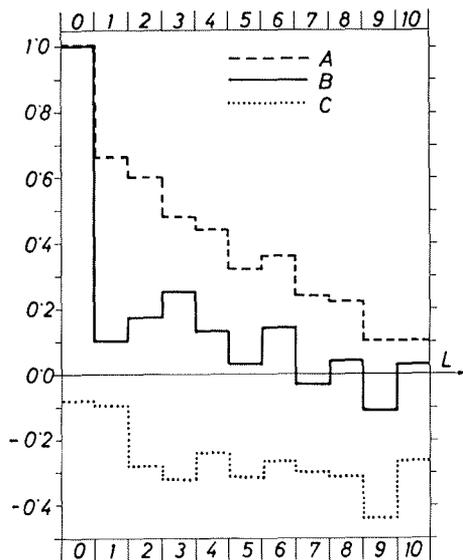


Abb. 3: Autokorrelationsfunktion der Fließgeschwindigkeit (A) und des Temperaturindex (B) sowie Kreuzkorrelation (C) von Fließgeschwindigkeit und Temperaturindex für eine Zeitverschiebung von L Jahren.

Fig. 3: Autocorrelation of the surface velocity (A) and the temperature index (B); Crosscorrelation (C) of the surface-velocity and temperature-index with the time lag L in years.

Die Koeffizienten für die Querkorrelation der beiden Reihen (Temperaturindex, Fließgeschwindigkeit) lauten für L (in Jahren):

L =	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	
	0,03	-0,02	0,10	0,03	0,05	0,03	0,04	-0,05	0,09	-0,08	
L =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	-0,08	-0,09	-0,28	-0,32	-0,24	-0,31	-0,27	-0,30	-0,31	-0,44	-0,36

Die Koeffizienten der negativen Zeitschritte sind physikalisch irrelevant. (Sie besagen, daß die Temperaturverteilung keinem Einfluß durch die Fließgeschwindigkeit unterliegt.) Für die positive Zeitverschiebung ist eine negative Korrelation vorhanden, d. h. je höher die Sommertemperatur, um so langsamer wird die Fließgeschwindigkeit im Zungenbereich. Dieser Zusammenhang tritt mit einer zeitlichen Verzögerung von etwa 3 bis 10 Jahren ein, wobei das Maximum bei 9 Jahren zu finden ist. Werte für höhere zeitliche Verschiebungen wurden nicht errechnet, da diese wegen der Definition (zirkuläre Wiederholung) nicht sinnvoll erscheinen.

Der untersuchte Gletscher reagiert auf Temperaturänderungen nur sehr träge: Es dauert fast eine Dekade, bis wir aufgrund von Witterungseinflüssen Veränderungen des Fließverhaltens der Zunge feststellen können. Dies ist auch der Grund, daß bei großen Gletschern in den letzten Jahren keine kleinen Vorstöße beobachtet werden können.

Um Relationen zur Wasserführung des Gletscherabflusses der Pasterze herzuleiten, werden Meßwerte der erfaßten Zuflußmenge zur Möll (ohne Leiter- und Käferbäche sowie ohne Spülungen des Speichers Margaritze) mit dem Temperaturindex verglichen. (Die Meßwerte aus den Jahren 1955 bis 1971 wurden freundlicherweise von der Vermessungsabteilung der Österr. Tauernkraftwerke AG zur Verfügung gestellt.)

Die Wasserspense W (in Mio. m^3) des Gletschers weist während der Sommermonate Juni bis September mit dem Temperaturindex T (in $^{\circ}C$) einen Korrelationskoeffizienten von 0,64 mit der lin. Regressionsfunktion $W = 44,21 + 1,62 T$ ($\sigma_R = 7,6$) auf.

Führt man dieselbe Rechnung für die Abflußmenge des vollen Glazialhaushaltsjahres durch, so lautet der Korrelationskoeffizient mit dem Temperaturindex $T = 0,72$, wobei die lineare Regressionsfunktion durch $W = 55,1 + 1,82 T$ ($\sigma_R = 6,9$) anzugeben ist.

Der Abfluß W der Möll weist weder mit dem Einsinken der Gletscheroberfläche der

Pasterze noch mit den Sommerniederschlägen (Juni bis September) am Hohen Sonnblick einen Zusammenhang auf! (Letzteres mag überraschen, wird aber durch den Rückhalt an Neuschnee bzw. Firnschnee in der Bilanzsumme eines folgenden Haushaltsjahres in niederschlagsreichen Jahren verständlich.)

Die Ergebnisse dieses Kapitels können wir zusammenfassend in folgender Weise deuten: Ein Sommer mit hohen/niedrigen Werten des Temperaturindex bedeutet noch im gleichen Jahr einen starken/geringen Massenverlust durch Abschmelzen (hohe/niedrige Abflußwerte). Wegen der „Erschöpfung“/Anreicherung des Eisvorrates im Nährgebiet der Pasterze, nimmt nach einigen Jahren die Fließgeschwindigkeit im Zungenbereich ab/zu. Der verminderte/erhöhte Massentransport vermindert/steigert aus Kontinuitätsgründen das Gesamtvolumen an Eis der Zunge der Pasterze.

5. Die Komponenten der Fließgeschwindigkeit

Die Fließgeschwindigkeit läßt sich in eine Gleit- und Scherkomponente zerlegen. Die ersten Messungen der Fließgeschwindigkeit im Bereich des Querschnittes, welcher heute als Seelandlinie bezeichnet wird, liegen 125 Jahre zurück und wurden von den Brüdern Schlagintweit im Jahre 1848 durchgeführt, wo für diesen Zeitpunkt eine jährliche Fließgeschwindigkeit des Eises von 90 m angegeben wird (Schlagintweit H. u. A., 1850). Erst seit 1887 ist eine weitgehend vollständige Reihe der jährlichen Fließgeschwindigkeiten vorhanden. Es soll kurz versucht werden, das Fließverhalten der Zunge der Pasterze im Querschnitt der Seelandlinie aufgrund der verfügbaren Daten zu betrachten:

Zahlengrößen der beiden Komponenten sind schwierig anzugeben, da an der Pasterze die Gleitbewegung am Gletscherbett nie gemessen wurde und daher nur aufgrund der theoretischen Geschwindigkeitsverteilung der nach Nye (1952) berechneten Scherkomponente angegeben werden kann. Als Exponent des Fließgesetzes des Eises wurde $n = 3$ und einen für den Beobachtungszeitraum konstanten Koeffizienten f , welcher den Temperatureinfluß und die Dichte des Eises enthält, in Einklang mit den Messungen am Unteraargletscher (Häfeli, 1970) verwendet. Der Scheranteil v_s der Fließgeschwindigkeit ergibt sich somit aus

$$v_s = f \cdot F \cdot \sin^3 \alpha h^4 \quad (1)$$

mit α Oberflächenneigung des Gletschers

h Eisdicke des Gletscherquerschnittes

Der Formfaktor des Gletscherquerschnittes $F \doteq 0,8$ und die Neigung der Gletscheroberfläche sind in den einzelnen Jahren verschieden, vor allem aber schwankt die Eisdicke, so daß wir in den einzelnen Jahren das in Tabelle 2 wiedergegebene Bild der Gletscherbewegung erhalten. Direkte Messungen an Bohrungen haben starke Unterschiede von Scher- und Gleitanteil der Fließbewegung des Eises an einem Querschnitt des Gletschers

	I	II	III	IV
1848	(83,6)	6,0—30,6	77,6—53,0	330
1925	52,7	8,8—23,7	43,9—29,0	275
1964	27,6	1,0— 8,3	26,6—19,3	205
1969	33,9	1,2—10,1	32,7—23,8	195

I Maximale Fließgeschwindigkeit pro Jahr (Mittel aus den 10 vorangehenden Jahren in m/Jahr

II Scheranteil nach (1)

III Gleitanteil

IV Gletschermächtigkeit in m

Tab. 2: Maximale Fließgeschwindigkeit, Scheranteil, Gleitkomponente und Gletscherdicke an der Seelandlinie, Pasterze in m/Jahr bzw. m.

Tab. 2: Maximum total surface velocity, shear component, slip component, and thickness of the Pasterze glacier at the Seelandline in m/year and m.

ergeben, nämlich im Zentralteil des Gletschers einen hohen Gleitanteil, während der Scherkomponente nur an den Flanken größere Bedeutung zukommt (RAYMOND C. F., 1972). Wird der Scheranteil in Übereinstimmung mit den Messungen am Athabasca-Gletscher nur für den Zentralteil bestimmt, so ergeben sich wesentlich geringere Werte, welche in Tabelle 2 Spalte II jeweils als erstes angegeben wurden. Aufgrund der genannten Messungen der Gleitkomponente wird die Gletscherbewegung alpiner Gletscher mit relativ geringer Eismächtigkeit vorwiegend durch den Gleitanteil an der Basis getragen. Die maximale Fließgeschwindigkeit an der Seelandlinie hat sich seit 1848 auf weniger als den halben Wert verringert. Es ist zu erwarten, daß die durch die geänderten klimatischen Bedingungen hervorgerufene Verschiebung der Gleichgewichtslinie in größere Höhen zusätzlich zu einer Verminderung der Fließgeschwindigkeit an der tiefer gelegenen Seelandlinie geführt hat.

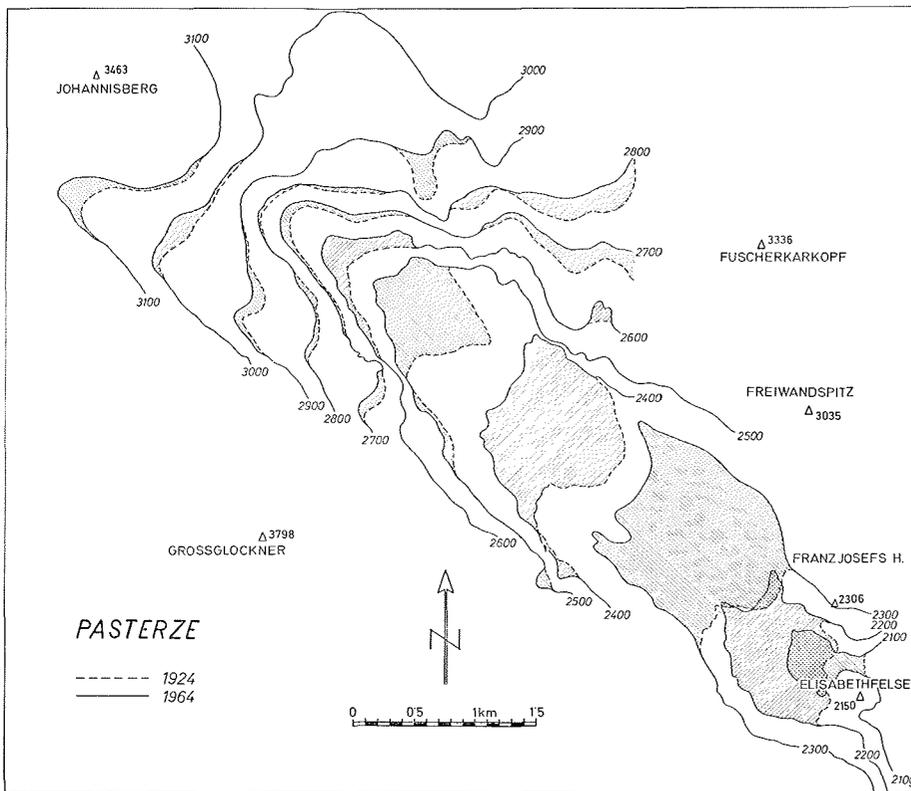


Abb. 4: Isohypsen der Zunge des Pasterzengletschers in 100 m Abstand für den Gletscherstand 1924 und 1964.
 Fig. 4: Isohypses of the tongue of the Pasterze Glacier for 1924 and 1964.

6. Der Eisverlust der Pasterze seit 1850

Die Abschätzung des Volumsverlustes an Eis seit dem Hochstand im Jahre 1850 liefert beachtliche Werte, welche die Bedeutung des Gletscherrückganges in Erscheinung treten lassen und aufgrund der Moränenwälle durchgeführt wurde. Anlässlich der seismischen Eisdickenmessungen auf dem Obersten Pasterzenboden (Bittmann O. u. a., 1973) wurde unter Verwendung der Mächtigkeitsangaben von Brockamp und Mothes für die Zunge der Pasterze eine Gesamt-Volumensabschätzung durchgeführt und zu $1,216 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ Eis für die Pasterze errechnet.

Für die Volumsabnahme seit 1850, bezogen auf den Gletscherstand von 1969, welcher durch die Gletscherbefliegung im Rahmen des Österr. Programms der Int. Hydrologischen Dekade festgehalten wurde, schätzte man diese mit $1,24 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ Eis ab. In den vergangenen 120 Jahren ist also mehr als der heute vorhandene Eisstand abgeschmolzen!

Zur Illustration siehe die Abb. 4 und 5. Wir sehen, daß die schraffierten Flächen zwischen den Isohypsen gleicher Höhe mit zunehmender Höhe nicht mehr systematische Volumsabnahme anzeigen.

Insgesamt ergibt sich für die Periode

I 1850—1924 bis in die Höhenzone von 2 700 m $6\,645 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Schätzung)

II 1924—1964 bis in die Höhenzone von 3 100 m $5\,519 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

III 1964—1969 bis in die Höhenzone von 2 400 m $578 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

Volumsverlust. Die maximale Volumsabnahme lag für die Periode I in der Höhenzone von 2 600 m, in den Perioden II und III in der Höhenzone von 2 300 m und zeigte somit eine Verschiebung in Richtung Zungenende.

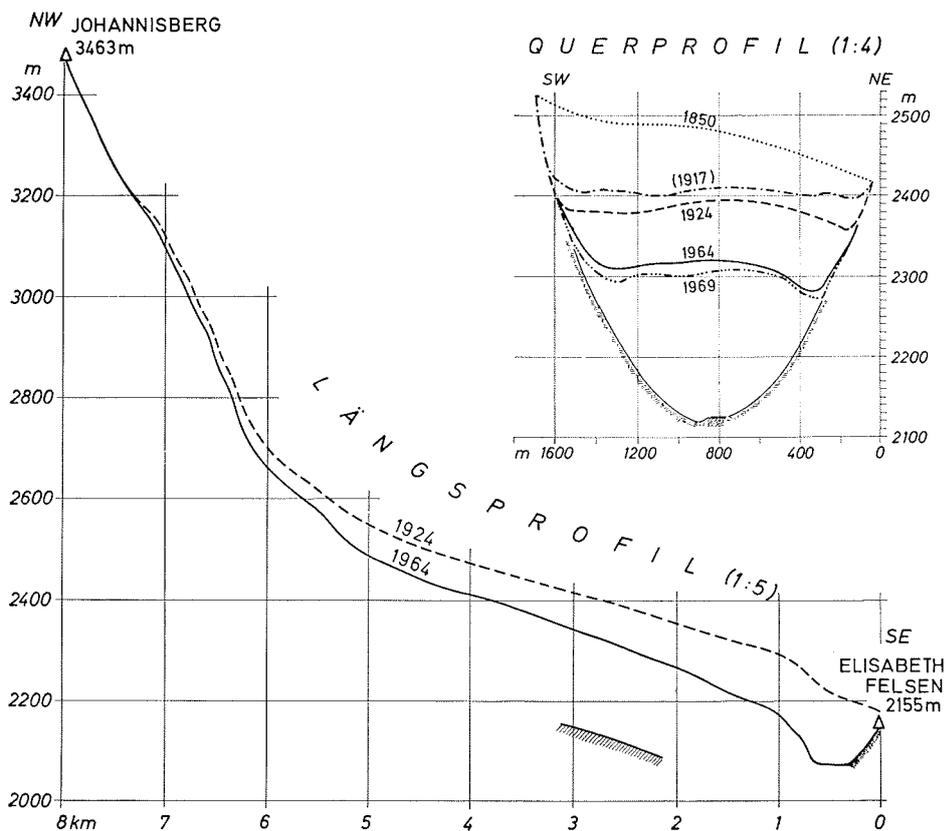


Abb. 5: Längsprofil der Pasterze: Gletscheroberfläche 1924 und 1964.
 Querprofil im Bereich der Seelandlinie: Gletscheroberfläche um 1850, (1917), 1924, 1964 und 1969.
 Fig. 5: Length profile of the Pasterze Glacier: Surface 1924 and 1964.
 Cross section at the „Seelandlinie“ at 1850, (1917), 1924, 1964, 1969.

7. Jährlicher Eisverlust der Pasterze und der Temperaturindex

Die Angaben über den Eisverlust beziehen sich auf unterschiedlich lange Zeiträume. Wir ermitteln leicht den durchschnittlichen jährlichen Volumsverlust und versuchen, diesen

Wert für die jeweiligen Perioden mit dem mittleren jährlichen Temperaturindex der Sommermonate zu vergleichen. Unter der Annahme einer wirksamen Verzögerung L zwischen dem Temperaturindex und der mittleren jährlichen Volumsänderung läßt sich die Volumsabnahme der Zunge der Pasterze (bis zur Höhenmarke 2 500 m) abschätzen:

Periode	Temperaturindex für		Volumsabnahme der Pasterze bis 2 500 m Höhe
	$L = 5$	$L = 9$	
I 1850—1924	19,5	19,5	55 Mio. m ³
II 1924—1964	24,0	25,5	108 Mio. m ³
III 1964—1969	24,8	23,9	120 Mio. m ³
Prognose:			
IV 1969—1977	22,2	→	80—100 Mio. m ³
V 1969—1981		23,6 →	100—120 Mio. m ³

Tab. 3: Zusammenstellung von mittl. jährlichem Eisverlust, mittl. jährl. Temperaturindex und Schätzwerte des Eisverlustes bis in 2.500 m Höhe für die Jahre 1850 bis 1977 (bzw. 1981).

Tab. 3: Mean annual loss of ice, mean annual temperature, and estimated loss of ice as far as 2.500 m for the years 1850 until 1977 (1981 resp.).

Die Punkte der Wertepaare der Perioden I bis III aus Tab. 3 (bis 1969) deuten eine lineare Beziehung an. Da die Auswirkung der Temperaturindexwerte erst nach einigen Jahren zum Tragen kommt, erhalten wir grobe Schätzwerte des Eisverlustes des untersten Pasterzengletschers (vom Zungenende bis in 2 500 m Höhe) für die Jahre 1969 bis 1977 (bzw. 1981). Wir entnehmen Tab. 3, daß der Eisverlust zuletzt nur geringfügig abnimmt und im Jahresmittel bei rund 100 Mio. m³ Eis liegen sollte!

Literatur

- Ambach, W. (1972): Zu Schätzung der Eis-Nettoablation im Randgebiet des grönländischen Inlandeises, *Polarforschung* 42, 1, 18—23.
- Bittmann, O., Brückl, E., Gangl, G., Wallner, F. (1973): Die Ergebnisse der seismischen Gletschermessungen am Obersten Pasterzenboden (Glocknergruppe, Kärnten) im Jahre 1970, Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Wien, Heft 11.
- Brockhamp, B., Mothes, H. (1930): Seismische Untersuchungen auf dem Pasterzengletscher I, *Zeitschrift für Geophysik* VI, 482—500.
- Finsterwalder, R. (1953): Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückganges an Ostalpengletschern, *Z. F. Gletscherkunde und Glazialgeologie* II, 189—239.
- Glocknergruppe, Karte der Glocknergruppe 1 : 25.000, Deutscher und Österreichischer Alpenverein, 1. Ausgabe 1928 (Aufnahme 1924), 4. Ausgabe 1969 (Neuaufnahme 1964).
- Haeffeli, R. (1970): Changes in the Behaviour of the Unteraargletscher in the last 125 years, *Journal of Glaciology* 9, 56, 195—212.
- Hoinkes, H. (1967): Gletscherschwankungen und Wetter in den Alpen, Veröff. d. Schweizer Meteor. Zentralanstalt 4, 9—24.
- Hoinkes, H., Howorka, F., Schneider, W. (1967): Glacier mass budget and mesoscale weather the Austrian Alps 1964 to 1965, *IASH Publ.* 79, 241—254, Bern.
- Hoinkes, H. (1970): Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern, *Z. F. Gletscherkunde und Glazialgeologie* VI, 37—90.
- Jahrbücher der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Wien, Publ. Nr. 194 (alle Jahrgänge).
- Meteorologische Beobachtungen Glocknerhaus (2130 m), Archiv der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Wien (Sommer 1894, 1935—1938).
- Nye, J. F. (1952): The mechanics of glacier flow, *Journal of Glaciology* 2, 12, 82—93.
- Österr. Tauernkraftwerke AG, Vermessungsabt., Monatliche Zuflußmengen der Möllüberleitung 1955—1971. Photogrammetrische Auswertung des Gletscherfluges 1969 der Hydrologischen Dekade 1 : 10.000, Österr. Gletscher, Pasterze; Österr. Elektrizitätswirtschafts AG, Vermessungsabteilung, Dipl.-Ing. List.
- Patzelt, G. (1969): Zur Geschichte der Pasterzenschwankungen, *Wissensch. Alpenvereinshefte* 21, 171—180.
- Paschinger, H. (1969): Die Pasterze in den Jahren 1924—1968, ebendort, 201—217.
- Raymond, C. F. (1972): Flow in a transverse Section of the Athabasca Glacier Alberta, Canada, *Journal of Glaciology* 55—84.
- Skoda, G. (1971 a): Die Bestimmung der Massenbilanz temperierter Gletscher, *Wetter und Leben* 23, 1—2, 15—22.
- Skoda, G. (1971 b): Die Bestimmung des Massenhaushaltes temperierter Gletscher aus Radiosondenmessungen, *Polarforschung* VII, 1—2, 158—164.
- Steinhauser, F. (1938): Die Meteorologie des Sonnblicks, Springer Verlag, Wien.
- Wakonigg, H. (1971): Gletscherverhalten und Witterung, *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* VII, 1—2, 103—123.
- Die Angaben über die Fließgeschwindigkeiten längs der Seelandlinie wurden verschiedenen Berichten in den Mitteilungen des deutschen und österreichischen Alpenvereins, den Mitteilungen des österr. Alpenvereins, der *Zeitschrift Carinthia II* und der *Zeitschrift für Gletscherkunde* entnommen. Die neuesten Werte (1962—1972) wurden uns freundlicherweise von Herrn Dr. H. Wakonigg, Graz, zur Verfügung gestellt.