

# Der Einfluss von Temperaturänderungen auf die Länge von Gletscherzungen

## 1. Einleitung

Seit mehreren Jahren werden am Geographischen Institut der Universität Zürich die nacheiszeitlichen Gletscherschwankungen der Schweizer Alpen untersucht. Angaben über die ehemaligen Gletscherausdehnungen stützen sich hauptsächlich auf Moränen; sie sind das Ergebnis ehemaliger Gletschervorstösse. Wenn es gelingt die Moränenbildungen zeitlich festzulegen, erhält man erste Hinweise auf Aenderungen der Gletscherzungenlängen.

Die Erforschung der nacheiszeitlichen Gletscherschwankungen soll einen Beitrag zur Klimageschichte liefern. Daher ist es nötig, die Gletschergeschichte (Aenderungen der Zungenlängen) mit einzelnen Klimaparametern zu vergleichen. Am besten eignen sich die letzten 80 bis 100 Jahre, wo dank den Vermessungen der Gletscherkommission die genauesten Werte über Zungenlängenänderungen vorliegen.

In diesem Zeitabschnitt konnte man ein allgemeines Schwinden der Gletscher beobachten (Abb. 1 und 2 zeigen als Beispiel den Rückzug des Tschiervagletschers von 1877 bis 1977). Der Rückzug der Gletscher seit dem Hochstand um 1850 wurde oft durch kurze Vorstösse unterbrochen (beim Tschiervagletscher in den Jahren 1887, 1898, 1920, und 1974). Während der letzten achtzig Jahre konnte man gleichzeitig eine Erhöhung der durchschnittlichen Lufttemperaturen feststellen. Obwohl der Zusammenhang Temperaturverlauf/ Gletscherzungenänderung über den gesamten Zeitraum betrachtet offenkundig ist, ist die Beziehung Gletscher/Klima sehr kompliziert. Wie sich das Klima auf die Gletscherzungenlänge auswirkt, zeigt das Flussdiagramm vom M.F. Meier (1965): Grossklima - Lokalklima des Gletschers - Massen- und Energieaustausch - netto Massenbilanz - Gletscherreaktion - Vorstoss oder Rückzug. H. HOINKES (1971) ist es bisher am besten gelungen, die einzelnen Schritte quantitativ zu erfassen. Er wies nach, dass Klima und Massenbilanzänderungen direkt zusammenhängen.

Studien über die Massenbilanz von Gletschern wurden im Alpenraum jedoch nur sehr selten durchgeführt. Daher soll im folgenden, gestützt auf die Arbeit von Hoinkes, der Zusammenhang Temperatur/Zungenlängenänderung untersucht werden.

Für diese Untersuchungen wählten wir die von der Gletscherkommission der Schweizerischen

Naturforschenden Gesellschaft (GK - SNG) vermessenen Gletscher in den Kantonen Graubünden, Glarus und St.Gallen, da am Geographischen Institut der Universität Zürich schon einige Arbeiten über diese Gletscher vorliegen. Zudem konnten so in einem relativ eng begrenzten Gebiet nach Form, Grösse, Höhenlage und Relief recht unterschiedliche Gletscher erfasst werden.

## 2. Datenmaterial

Für die Bearbeitung wurden sämtliche langjährige Temperaturreihen aus dem Kanton Graubünden, sowie einige weitere Reihen von Klimastationen in den Alpen verwendet (vgl. Tab.1, Daten aus SCHUEPP, 1961).

Zur Wahl der geeigneten Temperaturmittelwerte für den Vergleich mit Schwankungen der Gletscher meint HOINKES (1971): "Die für verschiedene Zeitabschnitte berechneten Mittelwerte der Temperatur ..... von Vent zeigen im Vergleich mit der Massenbilanz des Hintereisferners, dass der erwartete Zusammenhang (Abweichung der Massenbilanz positiv bei negativer Abweichung der Mitteltemperatur ...) am besten für die mögliche Ablationsperiode Mai bis September gegeben ist und nicht so gut für die zumeist verglichenen Sommermonate Juni bis August oder für den gelegentlich betrachteten Hochsommer Juli bis August ...

Temperaturmittel von vollen hydrologischen Jahren (1. Oktober bis 31. September des folgenden Jahres) oder von Kalenderjahren sind für den Vergleich mit glaziologischen Daten am wenigsten geeignet."

Daraus ergibt sich, dass für einen Vergleich der Längenänderungen eines Gletschers mit Temperaturreihen ebenfalls die Mitteltemperatur der Ablationsperiode Mai bis September am besten geeignet ist, da die Längenänderungen der Gletscherzungen mit individuell verschiedener Verzögerung einer Veränderung im Massenhaushalt der Gletscher entsprechen. Diese Verzögerung kann verschiedene Ursachen haben. Als Beispiel sei hier auf das Relief hingewiesen.

Für die Bearbeitung der Gletscher ergab sich das Problem, dass sämtliche Messreihen kürzere Lücken aufweisen, was die Resultate der nachfolgenden Berechnungen beeinträchtigt. Traten

Dipl. Geogr. Martin Gamper und dipl. Geogr. Jürg Suter, Geographisches Institut der Universität Zürich, Blümlisalpstr. 10, 8006 Zürich



Abb. 1: Blick von der Alp Ota gegen den Tschervagletscher, 1877  
(Kantonsbibliothek Graubünden, Chur; Vermerk auf der Photo: F. Charnaux, Genève)



Abb. 2: Der Tschervagletscher 1977

	Länge der Messreihe:	Mittelwert 1931-1960 in °C	Höhe m.ü.M.
Platta - Medels	1864 - 1960	11,54	1378
Davos - Platz	1901 - 1960	10,30	1561
Bever	1864 - 1960	8,94	1712
Engelberg	1864 - 1960	12,28	1018
St. Gotthard	1864 - 1960	6,10	2095
Grosser St. Bernhard	1818 - 1960	4,78	2479

Tab. 1

deshalb bei einigen Reihen noch grobe Messfehler auf (Lavaz, Lenta, Sulz, Biferten) so wurden diese Gletscher nicht mehr weiter bearbeitet. Ebenso wurden sehr kurze Messreihen (z.B. Cambrena) nicht berücksichtigt. Wir haben schliesslich die elf in Tabelle 2 aufgeführten Gletscher untersucht.

Bei den vorliegenden Messreihen handelt es sich um Zeitreihen. Jede Beobachtung wird sowohl in einer Quantität (Zungenlängenänderung in Meter, bzw. Temperatur in °C) und in einem Zeitwert (Jahr) angegeben. Dass für die Gletschervermessung nicht immer das gleiche Messdatum vorliegt (Schwankung ca. 20 Tage), dürfte bei den nachfolgenden Berechnungen nicht ins Gewicht fallen.

### 3. Auswertung und Ergebnisse<sup>2</sup>

Die aufgetragenen Messwerte ergeben vorerst noch eine unregelmässige, zerklüftete Kurve. Um deren Grundverlauf zu verdeutlichen und sie für die weiteren Untersuchungen aufzubereiten, wurden die Kurven geglättet. Zunächst galt es das ideale Glättungsmass zu finden. Wir haben die ge-

wogenen und ungewogenen Mittelwerte von 3 bis 11 Jahren gebildet; dabei zeigte sich, dass von fünfjährigen Mitteln an zu viele relative Maxima und Minima unterdrückt werden und sich die Extrema der Urkurven um mehrere Jahre verschieben können. Für die vorliegende Aufgabe ergab das dreijährige gewogene Mittel die optimale Glättung. Die geglätteten Kurven in der Abb. 4 zeigen den Temperaturverlauf in Platta - Medels und die Aenderungen der Gletscherzungenlängen.

Um eine geeignete Bezugsstation für den Vergleich des Temperaturverlaufs mit den Gletscherzungenänderungen zu bestimmen, wurden sämtliche geglätteten Temperaturreihen miteinander korreliert<sup>3</sup>.

Die Korrelationskoeffizienten sind allgemein sehr hoch, mit Ausnahme derjenigen von Bever mit den übrigen fünf Stationen. Dies lässt sich durch die ausgesprochene Tallage der Station erklären: Die Messungen am Morgen und am Abend werden durch einen lokalen Kaltluftsee beeinflusst.

Da auf Grund der Ergebnisse in Tab. 3 keine der Stationen eindeutig von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen werden konnte, wurden sämtliche

	Fläche <sup>1</sup> (km <sup>2</sup> )	Expo- sition <sup>1</sup>	Länge <sup>1</sup> max.	Höhe <sup>1</sup>		Länge der Messreihe
				max.	min.	
Pizol	0.31	N	0.6	2780	2480	1895 - 1973
Sardona	0.84	E	1.1	3020	2480	1895 - 1972
Vorab	2.51	E	2.0	2960	2580	1895 - 1974
Punteglias	0.93	S	2.0	3000	2340	1897 - 1973
Paradis	4.60	N	3.6	3400	2360	1899 - 1974
Porchabella	2.59	N	2.5	3320	2620	1894 - 1972
Calderas	1.12	NE	2.0	3300	2720	1895 - 1974
Forno	8.74	N	6.8	3360	2180	1893 - 1975
Morteratsch	17.15	N	7.5	4020	2100	1882 - 1975
Tschierva	6.83	NW	5.0	4000	2180	1894 - 1975
Palü	6.62	E	4.0	3860	2320	1895 - 1975

Tab. 2

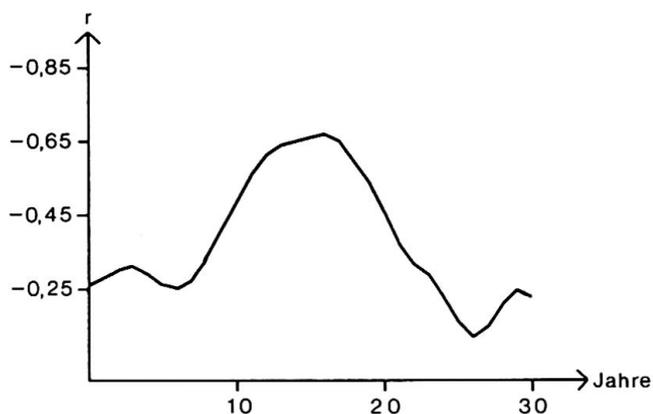


Abb. 3:  $r$ -Werte 0 bis 30 Jahre für den Morteratschgletscher. Der Maximalwert von  $-0.67$  liegt bei 16 Jahren; dies entspricht der Verzögerungszeit.

Gotthard	0.88				
Engelberg	0.89	0.94			
Davos	0.91	0.96	0.97		
St. Bernhard	0.91	0.96	0.94	0.95	
Platta Medels	0.90	0.95	0.95	0.97	0.94
	Bever	Gotth.	Engel-	Davos	St. Bernh.
			berg		

Tab. 3

Gletscherkurven mit allen Temperaturreihen korreliert. Verwendet wurden dabei die dreijährig gewogenen Mittelwerte. Da sich Massenbilanzänderungen der Gletscher, die von den Temperaturen während der Ablationsperiode abhängen, auf die Länge der Zungen unter Umständen erst nach mehreren Jahren auswirken, wurden die Temperaturreihen gegenüber den Gletscherkurven jeweils um 0 bis 30 Jahre verschoben korreliert (vgl. Abb. 3). Bei allen 11 Gletschern ergab sich durch die Untersuchung dieser 30 Korrelationskoeffizienten die jeweilige mittlere Verzögerungszeit jedes Gletschers gegenüber dem

Temperaturverlauf (vgl. Tab. 4).

Die höchsten Korrelationskoeffizienten ergaben sich meistens aus dem Vergleich der Klimastation Platta-Medels mit den Gletscherkurven. Dies erklärt sich aus der Hanglage der Station Platta-Medels, welche die Temperaturverhältnisse in Gletschnähe am besten widerspiegelt. Ausserdem handelt es sich bei Platta-Medels um ein kleines Dorf, in dem die Temperaturwerte kaum durch zivilisatorische Einflüsse verfälscht werden. Die mittlere Lage der Station im Alpenraum gleicht die Witterungseinflüsse von Norden und Süden offenbar aus.

Beim Tschieravagletscher erwies sich die Reihe der Station St. Bernhard mit  $r = -0.63$  als wesentlich besser korreliert (Platta  $r = -0.55$ ), beim Pizolgletscher die Station Gotthard mit  $r = -0.67$  (Platta  $r = -0.60$ ). Beide Stationen unterscheiden sich durch ihre Passage von Platta-Medels. Da von den 11 untersuchten Gletschern nur zwei mit einer anderen Station als Platta besser korrelierten, wurde diese als Referenzstation für alle Gletscher gewählt. Die Werte einer nahe bei den untersuchten Gletschern gelegenen Station eignen sich offenbar besser für einen Vergleich, als Werte einer auf der Höhe der Gletscherzungen gelegenen Station (St. Bernhard), die relativ weit entfernt liegt. Ebenfalls zeigte es sich, dass die Lage der Stationen von grosser Bedeutung ist, denn die Talstationen Bever, Davos und Engelberg ergaben schlechte Korrelationen beim Vergleich mit den Gletscherzungenänderungen. Die folgende Tabelle und die Abbildung 4 zeigen die geglätteten Gletscherkurven verglichen mit den Werten der Klimastation Platta-Medels unter Berücksichtigung der mittleren Verzögerungszeiten. Zur Verzögerungszeit des Vorab ist noch zu bemerken: Der Vorabgletscher hat mehrere Zungen, wovon jeweils nur die SE fliessende eingemessen wird. Der niedrige Korrelationskoeffizient und die zu hohe Verzögerungszeit von 4 Jahren können vielleicht dadurch erklärt werden. Die verschiedenen mittleren Verzögerungszeiten zeigen, dass jeder Gletscher für sich auf seine

Gletscher:	Fläche 1973 (nach F. Müller 1976)	Korr. Koeff. $r^4$ mit Platta:	mittlere Verzögerungszeit
Pizol	0.31 km <sup>2</sup>	-0.60 (Gott.-0.67)	0 Jahre
Sardona	0.84 km <sup>2</sup>	-0.66	0 Jahre
Punteglias	0.93 km <sup>2</sup>	-0.58	0 Jahre
Calderas	1.12 km <sup>2</sup>	-0.51	0 Jahre
Porchabella	2.59 km <sup>2</sup>	-0.72	0 Jahre
Vorab	2.51 km <sup>2</sup>	-0.38	4 Jahre
Paradis	4.60 km <sup>2</sup>	-0.55	5 Jahre
Tschierva	6.83 km <sup>2</sup>	-0.55 (St.B.-0.63)	5 Jahre
Palü	6.62 km <sup>2</sup>	-0.47	6 Jahre
Forno	8.74 km <sup>2</sup>	-0.65	11 Jahre
Morteratsch	17.15 km <sup>2</sup>	-0.67	16 Jahre

Tab. 4

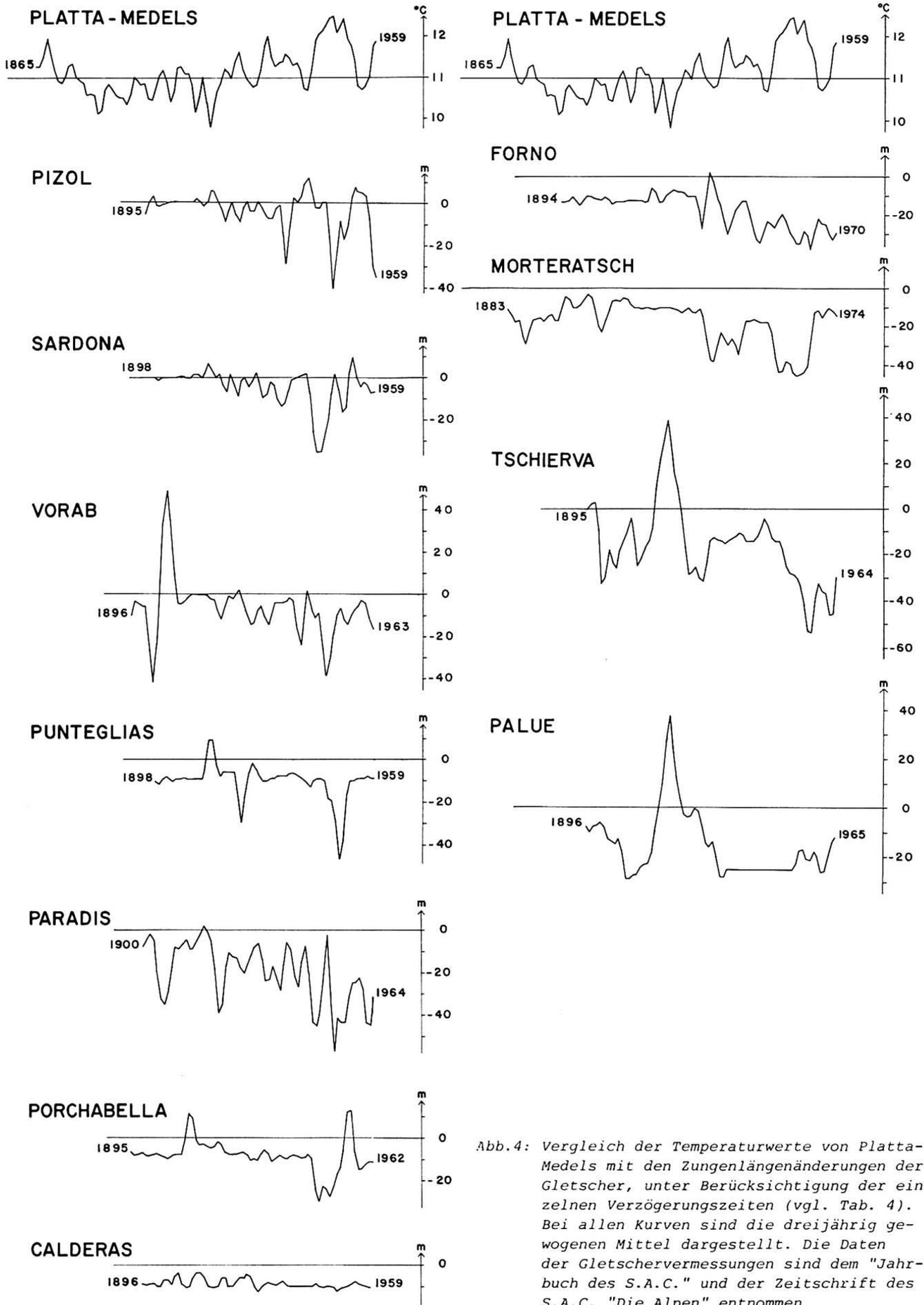


Abb.4: Vergleich der Temperaturwerte von Platta-Medels mit den Zungenlängenänderungen der Gletscher, unter Berücksichtigung der einzelnen Verzögerungszeiten (vgl. Tab. 4). Bei allen Kurven sind die dreijährig gewogenen Mittel dargestellt. Die Daten der Gletschervermessungen sind dem "Jahrbuch des S.A.C." und der Zeitschrift des S.A.C. "Die Alpen" entnommen.

Temperaturabhängigkeit untersucht werden muss. Grundsätzlich lässt sich aus den Daten schließen: Kleine Gletscher reagieren mit Verzögerungszeiten von 0-4 Jahren, grössere mit 5-16 Jahren. Um Bewegungen verschiedener Gletscher miteinander vergleichen zu können, müssen die Verzögerungszeiten bekannt sein.

Die Berechnung des Bestimmtheitsmasses ( $r^2$ ) ergibt, dass 25 bis 52% der Gletscherschwankungen direkt durch Temperaturänderungen erklärt werden können (deshalb entspricht auch nicht jedem negativen Wert der Temperaturkurve ein positiver Wert der Gletscherkurve und umgekehrt).

Um nun die "Verfälschungen" in den Messreihen (Messlücken, reliefbedingte Änderungen u.s.w.) etwas auszugleichen, wurden im Sinne eines Modells mittlere Zungenlängenänderungen berechnet.

Untersucht wurde nur die Zeitspanne, für die von allen Gletschern Daten vorliegen; dies ergab eine Datenreihe von 63 Jahren, die entsprechend der Verzögerungszeiten der Temperaturreihe von 1897 bis 1959 von Platta-Medels entspricht.

Gletscher	Start	Ende	Verzögerungszeit
Pizol	1897	1959	0 Jahre
Sardona	1897	1959	0 Jahre
Punteglias	1897	1959	0 Jahre
Calderas	1897	1959	0 Jahre
Porchabella	1897	1959	0 Jahre
Vorab	1901	1963	4 Jahre
Paradis	1902	1964	5 Jahre
Tschierva	1902	1964	5 Jahre
Palü	1903	1965	6 Jahre
Forno	1908	1970	11 Jahre
Morteratsch	1913	1975	16 Jahre

Tab. 5

Bei der Berechnung dieser Mittelwerte wurden zwei Fälle untersucht:

- 1) Unter Berücksichtigung der Verzögerungszeiten wurden die einander entsprechenden Daten der Gletscher für jedes Jahr addiert und anschliessend die arithmetischen Mittel gebildet. Die Datenreihe dieses "mittleren Gletschers" wurde dann mit der geglätteten Temperaturreihe von Platta-Medels korreliert.
- 2) Beim Vergleich der einzelnen Gletscherkurven fällt auf, dass bei grossen Gletschern die Ausschläge grösser sind, als bei kleinen (vgl. Abb. 4). Dies wurde dabei so berücksichtigt: Für jeden der elf Gletscher wurden die absoluten jährlichen Bewegungsbeträge aufsummiert und daraus eine mittlere totale Gletscherbewegung berechnet. Dieses Resultat wurde dann durch die Summe jedes einzelnen Gletschers dividiert, wodurch man 11

Werte erhielt. Als nächster Schritt wurden dann alle Gletscherdaten mit dem entsprechenden Wert multipliziert. Das weitere Vorgehen entsprach dem Fall 1: Die Datenreihe wurde mit der geglätteten Temperaturreihe von Platta-Medels korreliert.

Als Korrelationskoeffizienten ergeben sich für den Fall 1  $r = -0,85$  und für den Fall 2  $r = -0,88$ . In beiden Fällen resultiert beim Vergleich der Gletscher- mit der Temperaturkurve eine Gleichläufigkeit von 80.3%. (Abb. 5 zeigt die Kurven für den Fall 2).

Zusammenfassend folgt aus unserer Arbeit: Der Vergleich einzelner Gletscher mit einer geeigneten Temperaturreihe ergibt relativ kleine Korrelationskoeffizienten. Im besten Fall konnten 52% der Gletscherbewegungen direkt aus der Temperatur erklärt werden. Die Gletscher reagieren mit unterschiedlichen Verzögerungszeiten auf Temperaturschwankungen. Je grösser die Fläche eines Gletschers ist, desto länger ist seine Verzögerungszeit. Berechnet man für die elf untersuchten Gletscher die mittleren Zungenlängenände-

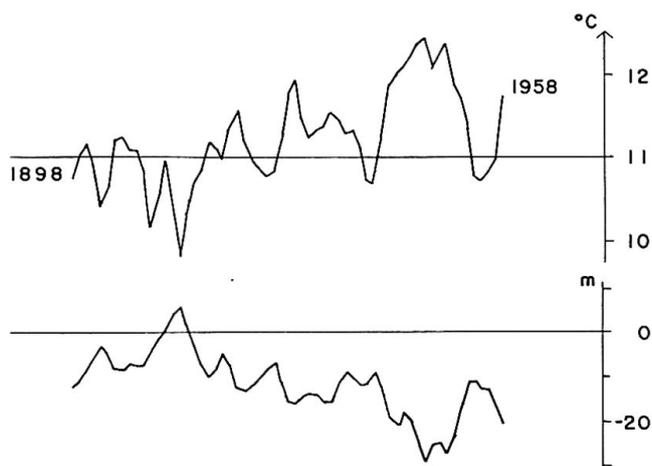


Abb. 5: Vergleich der Temperaturwerte von Platta-Medels mit der Mittleren Zungenlängenänderung (Fall 2).

rungen, unter Ausgleichung der absoluten Bewegungsbeträge, so können 77% der Zungenlängenänderungen direkt aus den Temperaturwerten erklärt werden. Da der Stichprobenumfang mit elf Gletschern sehr gering ist, gelten die erhaltenen Resultate nur für die untersuchten Gletscher und erheben damit keine Allgemeingültigkeit.

#### Fussnoten:

- (1) Daten aus F. Müller (1976)
- (2) Die beiden Verfasser danken Herrn Dr. G. Dorigo für die Mithilfe bei der quantitativen Auswertung.
- (3) Bei allen Korrelationsrechnungen in dieser Arbeit wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson berechnet.
- (4) Alle r-Werte sind mit 1. Irrtumswahrscheinlichkeit gesichert (nach t-Test).

## Literaturverzeichnis

- Die Alpen: Zeitschrift des Schweizer Alpen Club (vor 1924: Jahrbuch des S.A.C.)
- HOINKES H.: Ueber Beziehungen zwischen der Massenbilanz des Hintereisferners und Beobachtungen der Klimastation Vent, Annalen der Meteorologie Nr. 5, Zürich 1971
- KASSER P.: Der Einfluss von Gletscherrückgang und Gletschervorstoss auf den Wasserhaushalt, S.A. Wasser- und Energiewirtschaft Nr. 6, Zürich 1959
- MEIER M.F.: The quaternary of the united states, Princeton 1965
- MUELLER F.: Firn und Eis der Schweizer Alpen, Geographisches Institut ETH, Publ. Nr. 57, Zürich 1976
- PATERSON W.S.B.: The physics of glaciers, Oxford 1969
- SCHOLLENBERGER B.: Moränenwälle im hinteren Rosegtal, Diplomarbeit ausgeführt am Geographischen Institut der Universität Zürich, 1976
- SCHUEPP M.: Klimatologie der Schweiz, Teil C, Lufttemperaturen 2. Teil, Beihefte zu den Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt (Jahrgang 1960), Zürich 1961
- WALLIS W.A.: Methoden der Statistik, 5. Auflage, Leck 1975
- WILHELM F.: Schnee- und Gletscherkunde, Lehrbuch der Allgemeinen Geographie, Band III/3, Berlin 1975

---

## Literaturbesprechungen

JOHNSTON, R.J.: Multivariate Statistical Analysis in Geography. 280 Seiten, div. Graphica, Longman London and New York 1978  
ISBN 582 48677 7, £ 5.95

Dies ist ein speziell für Geographen geschriebenes Buch über multivariate statistische Verfahren. Es baut auf der einfachen Regression und Korrelation sowie Varianzanalyse auf und bespricht dann der Reihe nach multiple Regression und Korrelation, multiple Varianzanalyse, Hauptkomponenten- und Faktorenanalyse, kanonische Korrelationsanalyse, Gruppierungs- und Diskriminanzanalyse. In einem letzten Kapitel wird auf einige spezielle Probleme hingewiesen, die im Zusammenhang mit geographischen Daten auftreten, unter anderem auf die räumliche Autokorrelation.

Es ist das einzige dem Referenten bekannte Buch über multivariate Methoden, das ohne Matrixalgebra auskommt. Ueberhaupt ist die Mathematik auf einem minimalen, einfachen Niveau gehalten; auf die zugrundeliegenden mathematischen und statistischen Theorien wird nicht eingegangen. Der Autor hat bewusst diesen Weg gewählt. Sein Ziel ist, beim Studenten das Verständnis ("appreciation") für diese Methoden zu wecken. Insbesondere soll er damit in der Lage sein, in der Literatur publizierte Ergebnisse beurteilen zu können. Der Autor meint, dass dies auf diese Weise möglich sei; um ein gutes Mahl würdigen zu können, sei auch keine Kenntnis

des Rezeptes erforderlich. Zweifellos haben wir es hier mit einem etwas gefährlichen Unterfangen zu tun, wie auch der Autor im Vorwort zugibt. Man muss sich fragen, ob man den Geographie-Studenten nicht mehr zumuten kann oder muss. Es wird argumentiert, dass eine entsprechende mathematische Ausbildung fehle und dass deshalb ein Buch wie das vorliegende nötig sei. Als Ueberbrückungsmassnahme mag man dies gelten lassen; man hofft gleichzeitig, dass die Entschuldigung mit den fehlenden Mathematik - Kenntnissen nicht zum Dauerzustand werde. Die Schlussfolgerung ist offensichtlich: Wenn die Mathematisierung der Sozialwissenschaften als notwendige Entwicklung anerkannt wird, müssen entsprechende Lücken in geographischen Studienprogrammen möglichst rasch geschlossen werden. Im Sinne der genannten Ueberbrückung kann das Buch als nützlich und brauchbar empfohlen werden. Es muss einfach klar sein, dass derjenige, der diese Methoden selbst anwenden will, wesentlich mehr braucht und auf eine weitere Vertiefung mit Hilfe von fortgeschrittener Literatur zum Thema angewiesen ist. Nützlich sind vor allem die vielen Hinweise auf Anwendungsbeispiele (die allerdings erwartungsgemäss ausschliesslich aus dem englischen Sprachbereich stammen). Gelegentlich tauchen Ungenauigkeiten auf, die aber dem aufmerksamen Leser ohne weiteres auffallen sollten.  
GH 4/78 Dieter Steiner