

Die Gletscher um «1850» und «HEUTE» im Bündnerland und in den angrenzenden Gebieten: Untersuchungen zur Höhenlage, Veränderung und räumlichen Struktur von Schneegrenzen

Abstract

An inventory of data for the extent of ice in 1850 is presented and compared to the extent of alpine glaciers in 1973 as recorded by the Swiss glacier inventory. Special attention is given to the position and spatial variation of snowline altitudes based on data for the general ice retreat between 1850 and 1973.

The range of snowline altitudes (as given by the 2:1-equilibrium line calculation) reflects the topography and the related change from wet perialpine to dry continental inneralpine areas. In addition, the effects of local condition are superimposed on this trend. The overall climatically induced rise in snowline altitudes between 1850 and 1973 is 77 \pm 51 m. The considerable range of 340 m as compared to the actual situation in 1973 demonstrates the influence of local topography, geometry and dip of the glacier surface on the snowline altitude.

The mean altitude of the firnline in 1973 quantifies the melting during the last year of observation 1972/73. The glaciers in the regions of Bernina, Bergell and Kesch are more strongly affected than in other areas during this budget period. On the average, the firnline altitude rose 120 m above the 2:1-equilibrium line corresponding to the surface geometry of that year.

The data presented and the climatological information will be analysed and deciphered in more details.

Key words:

equilibrium line altitude, glacier variations

1. Einleitung

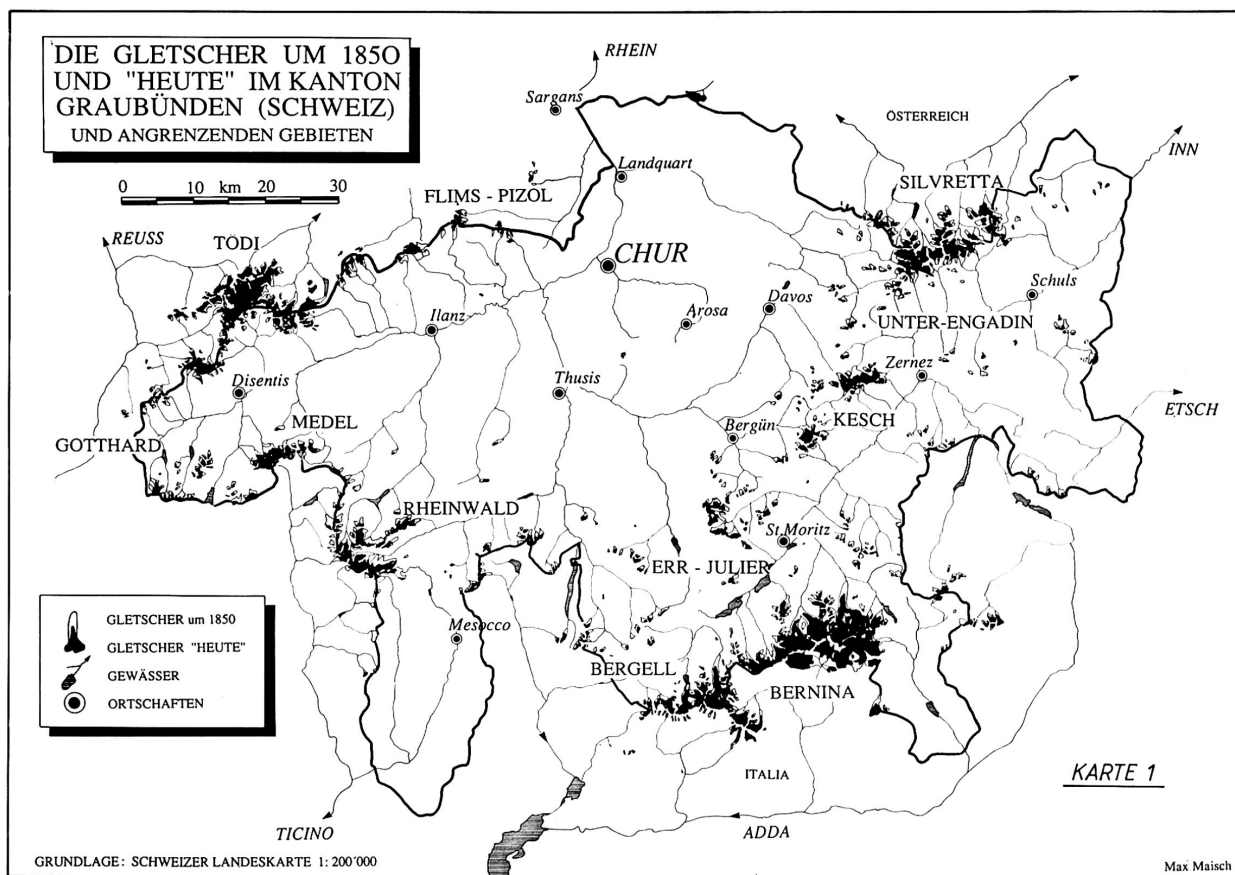
Das generelle, von einem klimabedingten Schneegrenzanstieg ausgelöste Zurückschmelzen der Alpengletscher seit dem Hochstand von 1850 ist heute für jeden aufmerksamen Beobachter eine augenfällige, leicht erfaßbare Naturerscheinung. Die meist scharfgratigen, frischen und noch kaum bewachsenen Moränenkämme am Rande der nunmehr eisfrei gewordenen Vorfelder grenzen klar das Ausmaß dieses «Jahrhundert-Ereignisses» ab. Die ursächlichen klimatologischen Rahmenbedingungen für die Gletscherschwankungen der Neuzeit können heute dank der immer dichter und vollständiger werdenden Datensammlungen und Meßreihen witterungsmäßig bereits recht detailliert aufgeschlüsselt werden (vgl. z. B. C. PFISTER, 1984, H. HOLZHAUSER,

1985, M. SCHÜEPP & G. GENSLER, 1986). Für gletscherkundlich orientierte Fragestellungen ist hingegen über die Flächenbedeckung und die Dimensionen der wichtigsten glaziologischen Kenngrößen dieses letzten markanten Hochstandes eigentlich noch wenig systematisch erfaßtes Zahlenmaterial verfügbar. Jährlich regelmäßig vorgenommene Vermessungen an den Zungenenden ausgewählter Gletscher setzen in den Schweizer Alpen erst ab 1880 ein, grobe Abschätzungen des Flächenschwundes reichen, abgesehen von punktuellen und lokal begrenzten Einzelstudien, maximal bis ins Jahr 1876 (Basis SIEGFRIED-Atlas) zurück (P. KASSER, 1981/78).

Für die Gletscherausdehnung von «HEUTE» liegt seit der Durchführung und Veröffentlichung des Schweizerischen Gletscher-Inventars «FIRN UND EIS DER SCHWEIZER ALPEN» durch F. MÜLLER, T. CAFLISCH & G. MÜLLER (1976, ETH-Zürich) ein umfangreiches, vorwiegend auf Bildflügen aus dem Spätsommer 1973 beruhendes Dokumentationsmaterial vor. Diese zum Zweck der Erforschung der GLETSCHER-KLIMA-Beziehung konzipierten und geleisteten Vorarbeiten (vgl. F. MÜLLER et al., 1973) und die in dieser Erhebung aufbereiteten nützlichen Grundlagen verlockten und veranlaßten gleichermaßen dazu, daran anknüpfend auch eine Inventarisierung des 1850er-Hochstandes an die Hand zu nehmen.

Durch ein solch aufwendiges Vorhaben konnten zwei schon längere Zeit gehegte Forschungsanliegen von größerem gletschergeschichtlichem Interesse angegangen und verwirklicht werden. So galt es einerseits, einmal eine für verschiedene Fragestellungen nützliche Dokumentation über diesen so wichtigen «Gleichgewichts-Zustand» aus der Mitte des letzten Jahrhunderts aufzubauen. Andererseits eröffnete sich dadurch gleichzeitig die Möglichkeit, auch sämtliche Veränderungen im Zeitraum zwischen den Bezugsjahren 1850 und 1973 quantitativ zu erfassen, erklärend zu beschreiben und einer späteren klimatologisch/klimageographischen Interpretation zuzuführen.

Max MAISCH, Dr., Geograph. Institut der Universität Irchel, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich



Karte 1 Übersichtskarte: Die Gletscher um 1850 und «HEUTE» im Kanton Graubünden und angrenzenden Gebieten

Map 1 Map of glacier distribution in the region of canton of Grison (Swiss Alps), 1850 and 1973

Durch die beabsichtigte Neuaufnahme des 1850er-Hochstandes in den Schweizer Alpen zeichnete sich ein Forschungsziel als besonders sinnvoll und lohnenswert ab: Die Ergebnisse einer solchen Untersuchung könnten als MODELL und MASSSTAB auch für frühere, ähnlich große Gletscherschwankungen des Spät- und Postglazials herangezogen werden. Die am «rezenten Beispiel» gewonnenen Vorstellungen ermöglichten so eine Abschätzung aller mit einem vergleichbaren Gletscherschwund (oder umgekehrt mit einem annähernd so großen Vorstoß?) einhergehenden Veränderungen der direkt oder indirekt damit verknüpften glaziologischen und klimatologischen Parameter.

Über die glazialmorphologische, klimageschichtliche und auch kulturhistorische Bedeutung des 1850er-Hochstandes im Rahmen der nacheiszeitlichen Gletscherschwankungen sowie über seine Funktion als Vergleichs- und «Leit-Horizont» (Begriff von H. HEUBERGER, 1980) für die Berechnung von «Schneegrenz-Depressionen» spätglazialer Stadien-Abfolgen soll an dieser Stelle nicht mehr näher eingegangen werden. Verschiedene, gleichzeitig in diesem Heft erscheinende Beiträge befassen sich ausführlicher mit dieser für die gesamte Gletscher- und Klimageschichte repräsentativen Bezugsgröße. Als grundlegende Einsicht für das Verständnis der «Größenordnung» sei jedoch in Erinnerung gerufen, daß mit den Umrissen des Hochstandes von 1850 ein Areal nachgezeichnet wird, das in den letzten rund 9500 Jahren von den wiederholt vorgestoßenen Gletschern mehrmals oft annähernd kongruent erreicht, aber nur in wenigen Fällen leicht überschritten worden ist (vgl. G. PATZELT & S. BORTEN-SCHLAGER, 1973).

Mit der vorliegenden Arbeit über die Schneegrenze in den Gletschergebieten des Bündnerlandes und der daran unmittelbar angrenzenden Gebirgsregionen werden nun erste Ergebnisse dieser 1850er-Inventarisierung vorgestellt, auszugsweise veranschaulicht und knapp kommentiert. Die Datenerhebung erfolgte in den Jahren 1982–1986, die Analyse und die Interpretation des bisher zur Verfügung stehenden Zahlenmaterials ist aber noch nicht abgeschlossen. Eine Ausdehnung der Erhebung auf den gesamten Schweizer Alpenraum wird angestrebt und soll künftig die Verbindung zwischen Ost- und Westalpen herstellen und vervollständigen. Der hier vorgestellte, räumlich und inhaltlich beschränkte Gesamtüberblick bedarf selbstverständlich in einem nächsten Schritt noch einer detaillierteren, oft jedem Einzelgletscher und seiner morphologischen und glaziologischen Individualität gewidmeten Interpretation. Darüber hinaus verlangen die vorläufig getroffenen Schlußfolgerungen in verschiedener Hinsicht nach einer weiterführenden, z. B. auf die lokalklimatischen Bedingungen abgestimmten Fein-Analyse.

Zwei Hauptfaktoren werden in den folgenden Ausführungen als die wesentlichsten Einflußgrößen für die Höhenlage, Verteilung und Veränderung der erhobenen «Gletscher-Schneegrenzen» näher berücksichtigt: die «geographische Lage» im Alpenraum (Gebirgsgruppen-Zugehörigkeit) und die Auswirkungen der Exposition.

Eine erste interessante Vergleichsmöglichkeit mit dem zur Zeit noch unveröffentlichten, auf dem Bezugsjahr 1969 basierenden österreichischen Gletscher-Inventar bietet die 1983 erschienene Arbeit von G. GROSS über die Schneegrenze und die Altschneelinie in den österreichischen Alpen. Die inhaltlichen Schwerpunkte dieser Zusammenstellung haben die hier vorgestellte Themenauswahl ganz maßgebend und vorbildlich mitbestimmt.

2. Datenerhebung

2.1 Methoden

Bei einem zahlenmäßigen Vergleich zwischen zwei unabhängig voneinander erstellten Inventaren ist es unbedingt notwendig, über methodisch homogen erfaßtes Datenmaterial zu verfügen. Diese Bedingung war jedoch nicht immer zum vornherein gegeben. So stellte sich heraus, daß z. B. Flächenwerte im Inventar '73 oft als Summen-Total verschiedener, unabhängig voneinander existierender Eis- und Gletscherflächen aufgelistet sind und damit für statistische Zwecke nicht unmittelbar weiterverwendet werden dürfen. Es schien deshalb unumgänglich, die Parametrisierung der Gletscherflächen 1973 vollständig zu wiederholen, durch den Einbezug zusätzlicher Parameter (v. a. Schneegrenzen) jedoch auch ergänzend zu erweitern.

Dazu wurden mir freundlicherweise sämtliche Original-Unterlagen des Gletscher-Inventars 1973 (Kartenblätter und Luftbildaufnahmen) vom Geographischen Institut der ETH-Zürich (Prof. Dr. A. OHMURA) und der Abteilung Glaziologie (VAW ETH-Zürich, PD Dr. W. HÄBERLI) zur Verfügung gestellt, wofür ich mich an dieser Stelle ganz herzlich bedanken möchte.

Waren die exakten Umrisse und die zu ermittelnden Kenngrößen der «heutigen» Gletscher direkt den Inventar-Karten (Basis: LK 1 : 25 000) zu entnehmen, so mußten die Eisoberflächen von 1850 zuerst zeichnerisch auf transparenten Deckfolien rekonstruiert werden («Geodätisch-topographische Methode», vgl. R. FINSTERWALDER, 1953, H. HOINKES, 1970). Folgende Grundlagen und Hilfsmittel dienten dabei zur Moränenkartierung und damit zur genauen Abgrenzung des 1850er-Vorfeldes:

- Flugaufnahmen Gletscher-Inventar 1973 (ETH-Zürich, Format 13 × 13 cm, mittlerer Maßstab 1 : 50 000)

- Luftbildserien Bundesamt für Landestopographie – Bern (Format 23 × 23 cm, mittlerer Maßstab 1 : 25 000)
- Original-Meßtischblätter aus dem Zeitraum 1850 (Bundesamt für Landestopographie – Bern, 1 : 50 000)
- Landeskarten-Blätter 1 : 25 000 (Originale Inventar '73 und jeweils neueste Ausgaben)
- Auswertung eigener, in rund 10jähriger Feldarbeit erstellter Moränenkartierungen sowie Bezug vorhandener Literatur

2.2 Parameter – Begriffe – Abkürzungen

Pro Gletscher wurden rund 35 verschiedene Parameter «glaziometrisch» bestimmt (Maßstab, Planimeter) und davon ausgehend zusätzlich berechnet. Neben der Festlegung der «Identität» (Name, Koordinaten, Gewässer-Code) wurden, wo immer möglich für beide Bezugsjahre, Werte für die Fläche (Gesamt- und Teilflächen für Akkumulations- und Ablationsgebiet), max./mittl. Länge und Breite, Gefälle, höchster/tiefster Punkt, mittl. Gletscherhöhe, Moränenansatz (usw.) sowie die zwischen 1850 und 1973 eruierten Veränderungen notiert. Das Schwergewicht dieser Erhebung konzentrierte sich aber zusehends auf die Bestimmung von Schneegrenzen, genauer von «Gletscher-Schneegrenzen» (Begriff vgl. H. HEUBERGER, 1980). Diese für die Ernährung und damit für den Massenhaushalt außerordentlich wichtige Größe bestimmt ganz entscheidend das Verhalten der Gletscher. Auf die klimatisch gesteuerten Höhenänderungen der Schneegrenze reagiert ein Gletscher ja nach Größe und Reaktionszeit durch das Anpassen seiner Oberflächen-Dimensionen an die neuen Gleichgewichtsbedingungen und durch die Änderung seines Fließverhaltens.

Nach den grundsätzlichen methodischen Überlegungen und den klaren Neudefinitionen zum Begriff der «Schneegrenze» (G. GROSS, H. KERSCHNER & G. PATZELT, 1978) versteht man darunter die über einen Zeitraum von mehreren Jahren gemittelte Höhenlage der Gleichgewichtslinie. Aus Massenhaushalts-Untersuchungen hat sich ergeben, daß sich mit der 2 : 1-Flächenteilungsmethode (2 : 1-Verhältnis zwischen Akkumulations- und Ablationsgebiet, AAR-Wert 0,67) bei stationären Gletschern hinreichend genaue Näherungswerte für die Schneegrenze bestimmen lassen. Die Rekonstruktion ehemaliger, meist spätglazialer Eis-Oberflächen ermöglicht unter diesen Voraussetzungen auch die Bestimmung früherer Schneegrenzhöhen. In den folgenden Ausführungen werden die Begriffe Schneegrenze (SG) und 2 : 1-Gleichgewichtslinie (GWL) synonym verwendet.

Die Schneegrenzen wurden sowohl für 1850 wie auch für 1973 ausnahmslos und ohne Rücksicht auf

theoretisch mögliche Variationen dieses Flächenteilungs-Verhältnisses und allfällige topographisch bedingte Unregelmäßigkeiten im Gletscherlängsprofil mit dem 2 : 1-Verfahren errechnet.

Die mit einem solchen Vorgehen verbundene vereinfachte Annahme eines «mittleren Gleichgewichtszustandes» auch während der «Ausdehnung» von 1973 kann wie folgt erklärt und gerechtfertigt werden: Das Erhebungsjahr 1973 fällt vom allgemeinen Bewegungsverhalten der Gletscherzungen her in einen ab etwa Mitte der 1960er Jahre einsetzenden Trend zunehmender Vorstoßtenz. Zu Beginn der 80er Jahre war mit rund 75% vorstoßender Gletscher ein (zumindest vorläufiges) Maximum erreicht, seither scheint die Tendenz wieder etwas abzuklingen. Die Anzahl der vorrückenden Gletscherfronten ging gesamtschweizerisch gerade im Bezugsjahr 1972/73 von rund 40% (1971/72) auf 27% zurück, erhöhte sich aber gleich anschließend wieder auf 41% (1973/74) bei komplementärem Verhalten der zurückschmelzenden (inkl. stationären) Gletscherzungen (Gletscherbericht P. KASSER & M. AELLEN, 1975, sowie Gesamtgraphik M. AELLEN in: M. SCHÜEPP & G. GENSLER, 1986).

Sinnvollerweise berücksichtigt man bei einer solchen Argumentation nur gerade diejenigen Gletscher, die auch im vorliegenden Untersuchungsgebiet enthalten sind. Von den 29 regelmäßig beobachteten Gletschern verzeichneten im willkürlich gewählten Zeitraum 1969/70–1974/75, also kurz vor und nach dem Stichdatum, genau 20 mindestens eine oder gar mehrere Veränderungen ihres Bewegungsverhaltens (Vorstoß – Stillstand – Rückzug). Nur der Bifertengletscher und der Sulzfirn (Gebiet Tödi) stießen in diesem Zeitraum ununterbrochen vor, währenddem Länta- (Rheinwald), Porchabella- (Kesch), Roseg-, Morteratsch- (Bernina), Calderas- (Err-Julier), Lischanna- (Unter-Engadin) und Forno-Gletscher (Bergell) mit Ausnahme nicht beobachteter Jahre kontinuierlich an Länge verloren und damit wohl auch über längere Zeit stetig negative Massenbilanzen aufzuweisen hatten.

Der doch mehrheitlich «unentschiedene» Charakter im Bewegungsmuster der hier beteiligten Gletscher kann nun mit gutem Grund dahingehend verstanden werden, daß sich die Gletscher im Bündnerland 1973 nicht in einem generell einseitigen Ernährungszustand befanden. Damit dürfen die damals inventarisierten Areale ohne weitere größere Fehlerquelle als Basisflächen für Schneegrenz-Bestimmungen verwendet werden.

Massenbilanzmäßig war das Gletscherhaushaltsjahr 1972/73 hingegen für die meisten der hier untersuchten Gletscher deutlich negativ. Sichtbarer Ausdruck der damaligen Witterungsbedingungen ist die Höhenlage der «Firnlinie», wie sie im vorliegenden Gebiet (Karte 1) anhand der zwischen dem 5. bis 14. September durchgeführten Bildflüge an 166 Glet-

schern bestimmt und kartographisch festgehalten werden konnte. Diese Linie stellt auf dem Gletscher am Ende eines jeden Haushaltsjahres die höchste Lage der «temporären Schneegrenze» dar und widerspiegelt durch ihren Höhenverlauf den Grad des Ausaperungs-Zustandes. Nach den Empfehlungen von G. GROSS et al. (1978), wonach der Begriff der «Firnlinie» nur in Zusammenhang mit Schnee verwendet werden sollte, der schon eine Ablationsperiode überdauert hat, wird in den folgenden Ausführungen dieser im Gletscher-Inventar '73 aufgeführte Begriff durch denjenigen der «Altschneelinie» (ASL) ersetzt.

3. Die Gletscher-Stichprobe

Es wurden rund 600 Einzelgletscher mit einer Fläche von mindestens 0,03 km² untersucht und ausgewertet. Geographisch verteilen sie sich östlich der Linie *Reuss/Ticino* auf die in Karte 1 ausgewiesenen Hauptgebirgsstränge in den Zentral- und Grenzgebieten des Kantons Graubünden. Durch die Gliederung in elf verschiedene Teilregionen sollte die Möglichkeit geschaffen werden, gebirgsgruppeninterne, hauptsächlich aber raumübergreifende Variationen aufzuspüren und damit klimageographisch bedingte Verteilungsmuster aufzudecken.

In den Gebirgsregionen *Bernina*, *Bergell* und *Rheinwald* wurden zusätzlich die unmittelbar südseitig angrenzenden, auf italienischem Staatsgebiet liegenden Gletscher miteinbezogen. In der *Silvretta* konnte die Stichprobe durch die Berücksichtigung sämtlicher auf der Nordabdachung vorkommenden österreichischen Gletscher erweitert werden (vgl. G. VONDRAN, 1968, G. GROSS, 1974). Die Belegungsdichte in den 11 Gletscher-Provinzen ist unterschiedlich stark. Rund 15% aller Gletscherindividuen entfallen auf das *Silvretta*-Gebiet, dann folgen *Bernina* (14%, enthält aber durchschnittlich die größten Gletscher), *Rheinwald* (13%), *Tödi* und *Kesch* (je 11%), *Err-Julier* (9%), *Gotthard*, *Unter-Engadin* und *Flims-Pizol* inkl. *Glärnisch* (je 6%), *Medel* (5%) und schließlich die Region *Bergell* (4%). Nach der Exposition entfallen 1850 (bzw. 1973) rund 72% (68%) der beobachteten Gletscher auf den Nord-Sektor (NW–N–NE) und nur gerade 16% (18,5%) auf den Süd-Sektor (SE–S–SW). Diese unausgeglichene Verteilung (vgl. Tab. 1) ist derjenigen aller österreichischen Gletscher sehr ähnlich (G. GROSS, 1983) und widerspiegelt wohl grob einmal das für das Ansammeln und Überdauern von Eismassen so entscheidende Zusammenwirken zwischen Relief-Angebot und Strahlungseinfluß.

Die Häufigkeitsverteilung der Gletscherflächen sowie auch aller damit direkt verbundener Größen-Parameter ist extrem asymmetrisch (vgl. Fig. 1). Rund 90% der inventarisierten Gletscher sind um

1850 kleiner als 2,0 km² (Max.: Morteratschgletscher 19,25 km²). Im Jahre 1973 ist das Bild noch einseitiger (90% unter 1,6 km², Morteratschgletscher 16,40 km²). Bei den untersuchten Gletschern handelt es sich vorwiegend um «Gebirgsgletscher», währenddem der Typ des «Tal-gletschers» nur vereinzelt auftritt (Gletscher-Klassifikation vgl. F. MÜLLER et al., 1976).

4. Der Flächenschwund der Gletscher im Zeitraum 1850–1973

Ohne vorläufig näher auf gebietsmäßige und expositionsbedingte Unterschiede einzugehen, kann die Erscheinung des allgemeinen Gletscherrückganges für den «durchschnittlichen» Bündner Gletscher mit folgenden Flächen-Kennwerten beziffert werden:

1850 (n = 592): $\bar{x} = 0,791 \text{ km}^2 \pm 1,565$
(Median: 0,343)

1973 (n = 606): $\bar{x} = 0,447 \text{ km}^2 \pm 1,216$
(Median: 0,138)

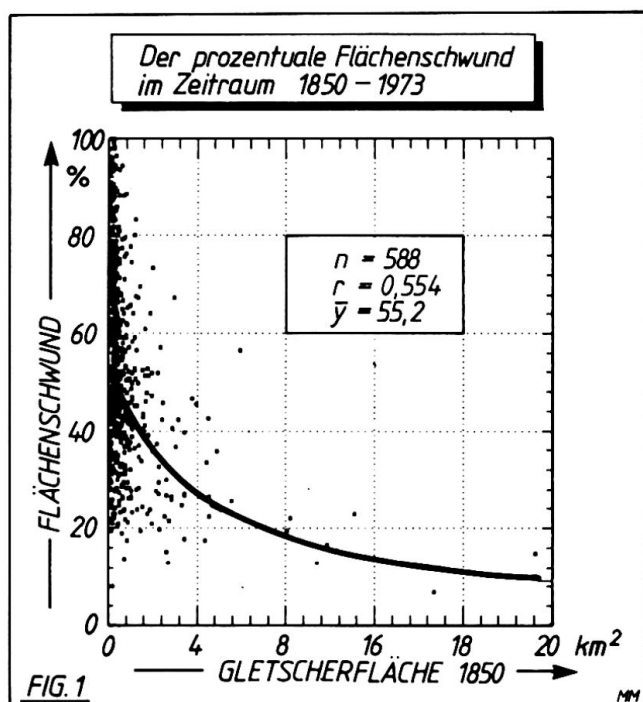


Fig. 1 Der prozentuale Flächenschwund im Zeitraum 1850–1973 in Abhängigkeit von der Gletschergröße

Fig. 1 Percent glacial retreat between the years 1973 and 1850

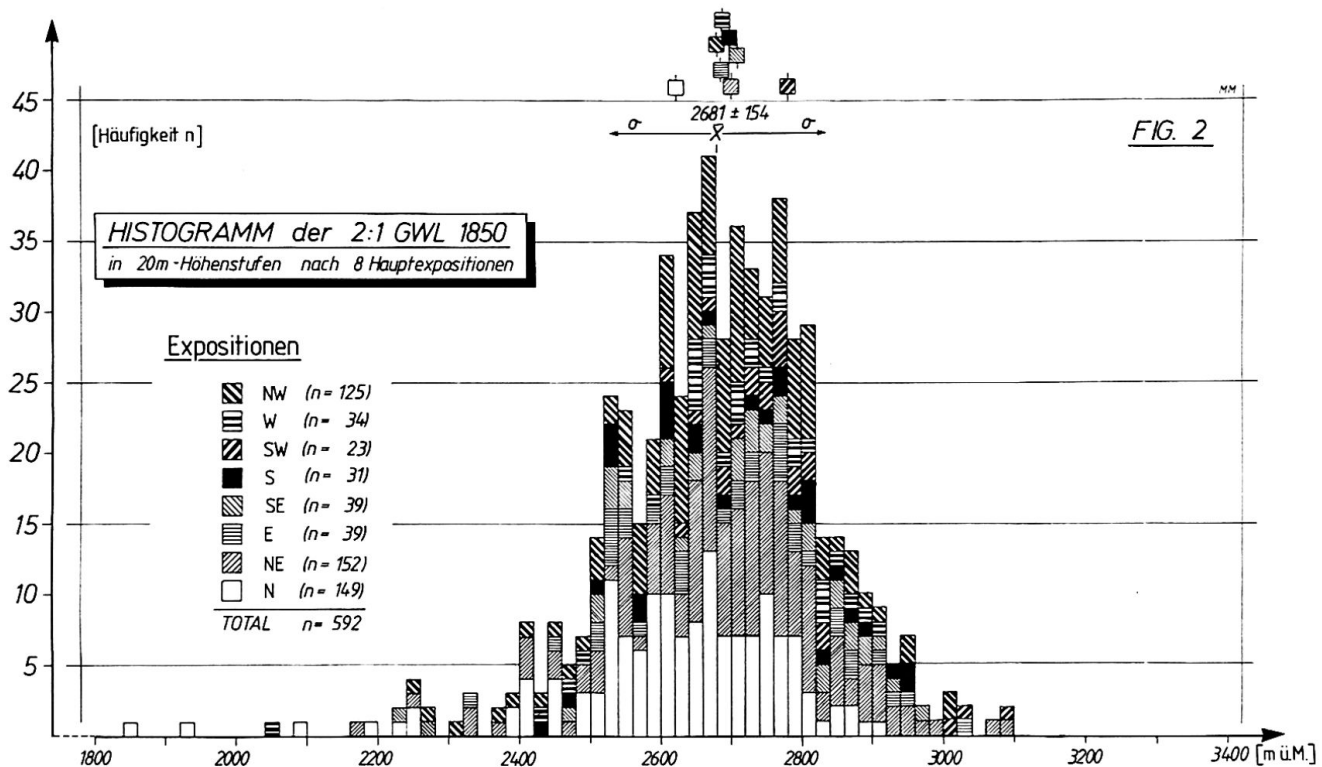


Fig. 2 Häufigkeitsverteilung der Schneegrenzhöhen 1850, in 20-m-Höhenstufen nach 8 Hauptexpositionen geordnet

Fig. 2 Summary diagram of 2 : 1-snowline altitudes of 1850 shown at 20 m intervals and the 8 main local areas

Diejenigen Gletscher, für die der Wert in beiden Bezugsjahren bestimmt werden konnte ($n = 588$), haben seit 1850 im Mittel $55,2\% \pm 21,5$ ihrer Fläche verloren (Min.: 7% , Max.: 100% , Median: $52,7\%$), was einer durchschnittlichen Einbuße von $0,314 \text{ km}^2 \pm 0,371$ (Min.: $0,014 \text{ km}^2$, Max.: $3,353 \text{ km}^2$, Median: $0,191 \text{ km}^2$) entspricht. Damit hat sich im vorliegenden Gebiet die vergletscherte Fläche total um rund 185 km^2 vermindert. Gleichzeitig sind die Gletscher ($n = 576$) in der zentralen Fließlinie im Mittel $575 \text{ m} \pm 356$ (Min.: 50 m , Max.: $2,3 \text{ km}$, Median: 500 m) kürzer geworden und haben ihre Zungenfronten ($n = 561$) um rund $165 \text{ m} \pm 100$ (Min.: 10 m , Max.: 540 m , Median: 140 m) nach oben verlagert.

Eine Gegenüberstellung des prozentualen Flächenschwundes und der Flächengröße 1850 in einem Regressionsdiagramm (Fig. 1) zeigt den in den Grundzügen bereits bekannten (z. B. J. SUTER, 1981), nach vorliegendem Muster etwa reziprok zur Gletschergröße verlaufenden Zusammenhang: größere Gletscher haben absolut zwar mehr, prozentual zu ihren Dimensionen aber weniger an Fläche verloren als kleinere. Die dichte Scharung der Punkte am linken Bildrand macht aber deutlich, daß diese Faustregel

vor allem bei den stark streuenden Klein-Gletschern kaum als hinreichende Erklärung für das offensichtlich sehr individuelle Schwundverhalten herangezogen werden kann. Es machen sich hier nicht nur die bei kleinen Eisflächen ohnehin stärker ins Gewicht fallenden zeichnerischen Abgrenzfehler bemerkbar. In viel stärkerem Maße scheint sich die allgemeine Beobachtung zu bestätigen, daß die Gletscher je nach ihrer ursprünglichen, den lokalen morphologischen und topographischen Gegebenheiten angepaßten Form und vor allem nach ihrer vertikalen Höherer Streckung bei einer Klima-Besserung (Erwärmung?) generell ganz unterschiedlich reagieren können. Entweder geraten sie im Extremfall so deutlich unter die neue Lage der Gleichgewichtslinie, daß sie praktisch wegschmelzen, oder sie stellen sich bei nur geringer Flächenabnahme lediglich durch das Einsinken und Zurückweichen ihrer Oberflächen unter die schützende Karwand auf die neuen Klimabedingungen ein. Dieser Effekt kann vor allem bei «Kleinst-Gletschern» in NW- bis NE-exponierten Schattenlagen beobachtet werden, wo dieses «geometrische» Verhalten auch bei der Berechnung der 2 : 1-Schneegrenze indirekt auch zu eher unterdurchschnittlichen SG-Anstiegswerten führt.

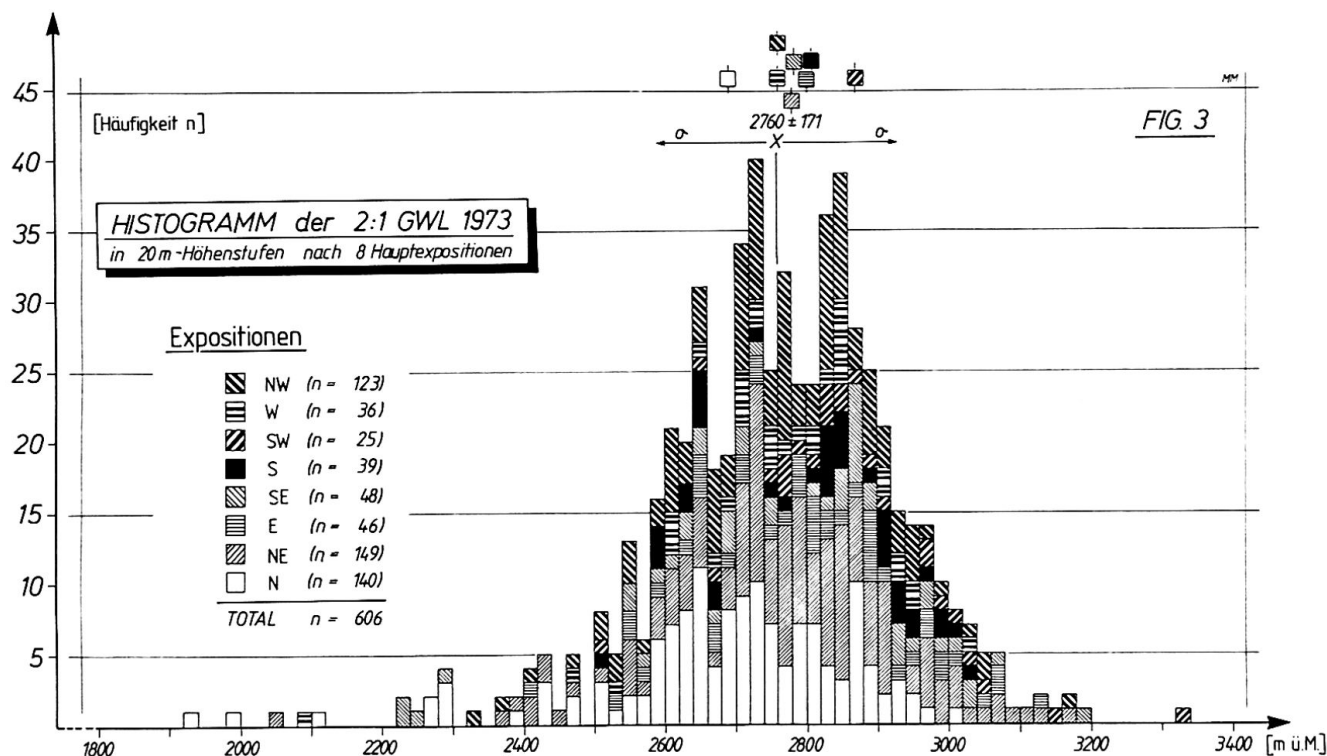


Fig. 3 Häufigkeitsverteilung der Schneegrenzhöhen 1973, in 20-m-Höhenstufen nach 8 Hauptexpositionen geordnet

Fig. 3 Summary diagram of 2 : 1-snowline altitudes of 1973 shown at 20 m intervals and the 8 main local areas

Tab. 1 Die Höhenlage der 2 : 1-Gleichgewichtslinien 1850/1973 nach Expositionen gegliedert

Tab. 1 Equilibrium line altitudes of glaciers in 1850 and 1973 in different local areas

2 : 1-GWL		1850			1973		
		n	\bar{x}	+/- s	n	\bar{x}	+/- s
Nord	N	149	2624	+/- 161	140	2689	+/- 178
Nordost	NE	152	2702	+/- 148	149	2780	+/- 162
Ost	E	39	2693	+/- 156	46	2800	+/- 162
Südost	SE	39	2708	+/- 168	48	2781	+/- 203
Süd	S	31	2705	+/- 148	39	2814	+/- 139
Südwest	SW	23	2780	+/- 132	25	2876	+/- 170
West	W	34	2693	+/- 162	36	2758	+/- 169
Nordwest	NW	125	2680	+/- 135	123	2756	+/- 146
Total		592	2681	+/- 154	606	2760	+/- 171

n = Anzahl Beobachtungen

\bar{x} = Mittelwert s = Standardabweichung

Tab. 2 Die Höhenlage der 2 : 1-Gleichgewichtslinien 1850/1973 in den verschiedenen Gebirgsgruppen

Tab. 2 Equilibrium line altitudes in 1850 and 1973 in different regions (see map 1)

2 : 1-GWL		1850			1973		
		n	\bar{x}	+/- s	n	\bar{x}	+/- s
Silvretta		92	2675	+/- 91	93	2749	+/- 102
Kesch		63	2739	+/- 76	53	2805	+/- 82
Err-Julier		52	2753	+/- 109	53	2848	+/- 133
Rheinwald		77	2669	+/- 131	81	2764	+/- 135
Medel		29	2658	+/- 121	29	2751	+/- 133
Gotthard		35	2585	+/- 93	32	2653	+/- 99
Tödi		66	2553	+/- 180	74	2631	+/- 179
Flims-Pizol		33	2503	+/- 175	31	2559	+/- 207
Unter-Engadin		34	2753	+/- 75	25	2802	+/- 74
Bernina		86	2820	+/- 119	82	2922	+/- 130
Bergell		25	2593	+/- 202	53	2748	+/- 224
Total		592	2681	+/- 154	606	2760	+/- 171

n = Anzahl Beobachtungen

\bar{x} = Mittelwert s = Standardabweichung

Tab. 3 Expositionen: Differenzen der 2 : 1-GWL 1850/1973 zwischen Nord-Süd, West-Ost und Nord-West/Ost in den verschiedenen Gebirgsgruppen

Tab. 3 Values of expositional differences (North-South, West-East and North-West/East) in different regions

EXPOS-DIFF	DIFFERENZ NORD-SÜD				DIFFERENZ WEST-OST				DIFFERENZ NORD- WEST+OST 2			
	1850		1973		1850		1973		1850		1973	
	n:n	\bar{x}	n:n	\bar{x}	n:n	\bar{x}	n:n	\bar{x}	n:n	\bar{x}	n:n	\bar{x}
Silvretta	25: 5	-172	21: 5	-179	8: 3	- 55	8: 4	- 90	25: 11	-105	21: 12	-113
Kesch	12: 2	- 92	11: 2	-105	5: 2	- 60	5: 2	- 48	12: 7	- 31	11: 7	- 8
Err-Julier	17: 2	-281	15: 2	-236	1: 6	-124	(0:9)	-	17: 7	-137	15: 9	-176
Rheinwald	16: 2	-327	16: 2	-277	6: 2	+ 87	7: 2	+ 4	16: 8	-129	16: 9	-165
Medel	8: 2	-247	8: 2	-252	1: 2	+165	1: 2	+125	8: 3	-195	8: 3	-188
Gotthard	8: 1	-156	8: 1	-147	1: 3	- 18	1: 3	- 35	8: 4	- 74	8: 4	- 63
Tödi	10:12	-137	11:11	-128	4:10	-167	4:11	-166	10:14	- 70	11:15	- 81
Flims-Pizol	4: 5	-309	3: 4	-301	1: 5	- 98	1: 4	-120	4: 6	-227	3: 5	-259
Unter-Engadin	(15:0)	-	(11:0)	-	1: 2	-122	(0:2)	-	15: 3	- 93	11: 2	-116
Bernina	(26:0)	-	(24:0)	-	5: 3	-116	4: 4	-158	26: 8	-128	24: 8	-127
Bergell	(8:0)	-	12:10	-369	1: 1	+260	5: 3	- 32	8: 2	-245	12: 8	-261
Total	100:31	-215	105:39	-222	34:39	- 23	36:35	- 58	149:73	-130	140:82	-142

n:n = Verhältnis der Stichprobengröße

\bar{x} = Mittelwert des Expositionsunterschiedes

5. Die Schneegrenze um 1850 und 1973

5.1 Zur Höhenlage

Die Häufigkeitsverteilung der Schneegrenzhöhen des Hochstandes 1850 (Fig. 2) zeigt eine annähernd normalverteilte Datenstruktur ($n = 592$) mit dem Gesamtmittelwert 2681 ± 154 m ü. M. (Min.: 1860, Max.: 3090, Median: 2690 m ü. M.). Figur 3 zeigt für das Bezugsjahr 1973 eine ähnliche, aber leicht nach rechts, d. h. nach oben verschobene Verteilung mit dem Mittelwert ($n = 606$) bei 2760 ± 171 m ü. M. (Min.: 1930, Max.: 3335, Median: 2270 m ü. M.).

Die große Variationsbreite der Schneegrenzhöhen (1850: 1170 m, 1973: 1405 m) ist auf verschiedene Einflußfaktoren zurückzuführen, kann aber hauptsächlich mit der in Kap. 7 eingehender besprochenen räumlichen Verteilungsstruktur erklärt werden (vgl. Tab. 2). So liegen bekanntermaßen Gletscher (bzw. ihre GWL) in niederschlagsreicheren Gebieten eher in tieferen Lagen, während sie in trockeneren inneralpinen Regionen erst in höheren, d. h. kälteren Positionen überleben können (w. HÄBERLI, 1982, 1983). Andererseits sind diesem generellen Trend zusätzlich noch die expositionsbedingten Unterschiede überlagert (Tab. 1).

Die Auswirkungen der Exposition auf die Höhenlage von Gletschern (und ihrer Schneegrenzen) ist enorm wichtig. In der Ausrichtung der Gletscher-Längsachse vereinigen und summieren sich im differenzierten Zusammenspiel mit der Lage und dem

Relief des Einzugsgebietes (Karumrandung, Abschirmung, Lee-/Luv-Effekt) die verschiedensten Einflüsse von Strahlung, Windrichtung und Niederschlagszufuhr. Die Exposition reguliert damit ganz mitentscheidend direkt oder indirekt das für den Gletscherhaushalt so wichtige Verhältnis zwischen Akkumulation und Ablation.

Die nach den 8 Hauptexpositionen aufgegliederten Datensätze (Fig. 1 und 2, Tab. 1) zeigen nun aber in den Mittelwerten nicht die zu erwartende Höhenabstufung (Ansteigen vom *Nord-* zum *Süd-Sektor*). Abgesehen von den nach unten bzw. leicht nach oben abgesetzten *Nord-* bzw. *SW-*Werten gruppieren sich die übrigen Expositionen nahe um den jeweiligen Gesamt-Mittelwert.

Die *Nord-Süd*-Differenz beträgt nach Tab. 1 im Mittel aller untersuchten Gletscher um 1850 – 81 m, 1973 leicht erhöht – 125 m. *West-* und *Ost-*Exposition liegen 1850 auf identischer Höhe, während 1973 die westexponierten Gletscher 42 Meter tiefer liegen. *Nord-*exponierte Gletscher lagen zudem 1850 um 69 m, 1973 um 90 m tiefer als der Durchschnittswert aus *West-* und *Ost-*Exposition.

Eine solche Gesamtbetrachtung der Expositionsunterschiede scheint nun aber wenig sinnvoll zu sein, werden doch die reellen Unterschiede durch den bereits erwähnten räumlich strukturierten Trend-Verlauf nivelliert. In Tab. 3 liegen die Differenzwerte nach Gebirgsgruppen aufgegliedert vor. Es zeigt sich, bei allerdings oft zu kleinen und unausgeglichene, zum Teil sogar fehlenden Stichproben, daß der *Nord-Süd*-Unterschied in beiden Jahren deut-

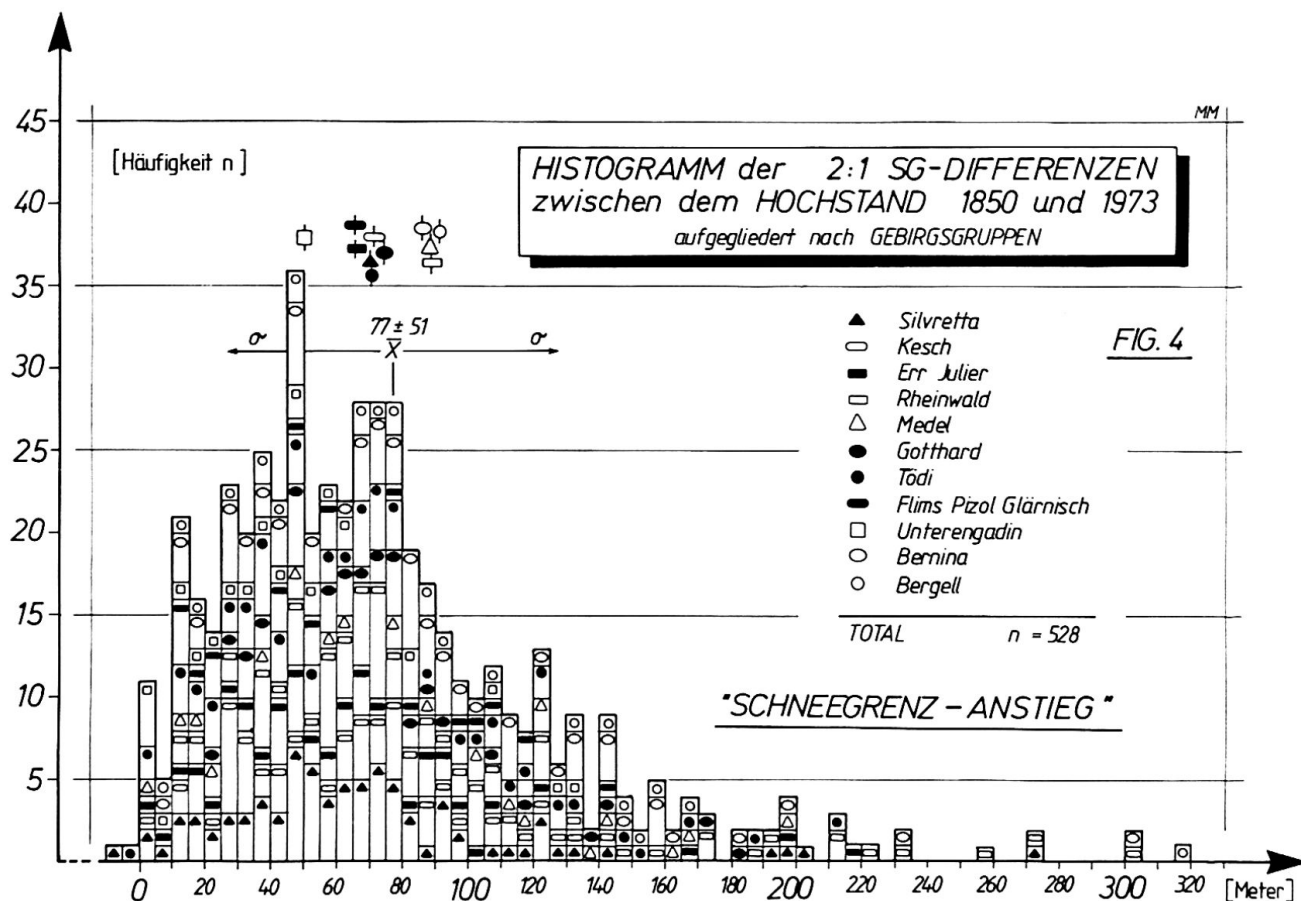


Fig. 4 Häufigkeitsverteilung der Schneegrenz-Differenzen 1850–1973 (Schneegrenz-Anstieg), nach Gebirgsgruppen gegliedert

Fig. 4 Summary diagram of snowline-differences (snowline rise) for different regions, 1850–1973

lich über 200 Meter liegt. Westexponierte Gletscher liegen nach dieser Gegenüberstellung um 1850 23 Meter, im Jahre 1973 um 58 Meter tiefer als ostexponierte. Damit ist sehr wahrscheinlich der Einfluß der niederschlagsbringenden Windrichtung angedeutet.

Große «positive» Abweichungen von diesen *West-Ost*-Differenzen (*Medel*, *Bergell*) sind wohl vorerst auf die geringe Stichprobengröße zurückzuführen oder können im Falle des *Rheinwald*-Gebietes eventuell mit dem im Lee wirksamen Sammeleffekt in den kesselartigen Gebirgsarenen des Länta-, Canal- und Hinterrheintales erklärt werden.

Die Differenzen zwischen der *Nord*- und dem Mittelwert aus *West*- und *Ost*-Exposition betragen 1850 130 Meter, 1973 142 Meter. Größere Abweichungen «nach unten» zeigen die Gletscher in den Gebieten *Medel*, *Flims-Pizol* und *Bergell*, wo auch die Niveau-Unterschiede *Nord-Süd* deutlich akzentuiert erscheinen und damit die extreme, durch übersteile Karwände begünstigte *Nord*-Lage unterstreichen.

Als Vergleich erhielt G. GROSS (1983) – 171 Meter *Nord-Süd*- und – 10 Meter *West-Ost*-Differenz als

Mittelwerte der österreichischen Gletscher-Teilregionen. Nordexponierte Gletscher liegen im Durchschnitt 111 Meter tiefer als der Mittelwert zwischen *West*- und *Ost*-Gruppe.

5.2 Der Schneegrenz-Anstieg 1850–1973

Die Differenz zwischen der 2 : 1-GWL 1850 und der 2 : 1-GWL 1973 ergibt einen Wert, den man in Analogie zum Begriff der «Schneegrenz-Depression» (Sg-Absenkung) umgekehrt als «Schneegrenz-Elevation» (bzw. Schneegrenz-Anstieg, SG-Erhöhung) bezeichnen könnte. Diese Größe repräsentiert damit ein Maß für die seit 1850 bis «heute» eingetretene, an Gletscheroberflächen indirekt gemessene klimatische «Besserung». Umgekehrt vermittelt sie einen Eindruck, welche SG-Depression im Vergleich zu «heute» nötig wäre, um die Gletscher generell wieder bis zu einer Größenordnung wie um 1850 vorstoßen zu lassen.

Das Histogramm (Fig. 4) veranschaulicht bei $n = 528$ Beobachtungen die um den Gesamtmittel-

Tab. 4 Differenz-Mittelwerte zwischen der GWL 1850 und der GWL 1973 (Schneegrenz-Anstieg) in den verschiedenen Gebirgsgruppen

Tab. 4 Values of snowline rise between 1850 and 1973 in different regions

GWL-DIFF	n	\bar{x}	+/- s	Min.-Max.
Silvretta	86	70	+/- 47	- 10 275
Kesch	51	72	+/- 56	5 305
Err-Julier	45	66	+/- 38	5 200
Rheinwald	74	90	+/- 54	15 260
Medel	24	88	+/- 54	5 200
Gotthard	35	75	+/- 39	25 185
Tödi	63	71	+/- 47	0 215
Flims-Pizol	27	66	+/- 48	15 220
Unter-Engadin	25	51	+/- 38	5 135
Bernina	73	87	+/- 55	10 305
Bergell	25	92	-/- 68	10 320
Total	528	77	+/- 51	- 10 320

n = Anzahl Beobachtungen
 \bar{x} = Mittelwert s = Standardabweichung
 Min.-Max. = Variationsbreite

Tab. 5 Differenz-Mittelwerte zwischen der GWL 1850 und der GWL 1973 (Schneegrenz-Anstieg) nach Expositionen gegliedert

Tab. 5 Values of snowline rise between 1850 and 1973 in different local areas

GWL-DIFF		n	\bar{x}	+/- s	Min.-Max.
Nord	N	133	74	+/- 51	5 275
Nordost	NE	131	86	+/- 55	5 320
Ost	E	37	81	+/- 59	0 275
Südost	SE	36	74	+/- 52	15 220
Süd	S	28	66	+/- 34	5 150
Südwest	SW	20	74	+/- 52	5 200
West	W	30	64	+/- 46	- 10 95
Nordwest	NW	113	73	+/- 48	5 305
Total		528	77	+/- 51	- 10 320

n = Anzahl Beobachtungen
 \bar{x} = Mittelwert s = Standardabweichung
 Min.-Max. = Variationsbreite

wert 77 +/- 51 Meter angeordnete, leicht rechtschiefe Verteilung des Schneegrenz-Anstieges (Min.: - 20 m, Max.: + 320 m, Median: 70 m). Tabelle 4 (Gebirgsgruppen) und Tabelle 5 (Expositionsgruppen) zeigen, daß die Gebiete *Rheinwald*, *Medel*, *Bernina* und *Bergell* sowie die Expositionen NE und E durch leicht erhöhte, die Regionen *Flims-Pizol* und *Unter-Engadin* sowie *West*- und *Süd*-Exposition durch leicht niedrigere Werte charakterisiert werden können. Die Tabellen verdeutlichen aber auch die große Heterogenität der Schneegrenz-Erhöhung und die bei der Betrachtung und Beurteilung von Einzelgletschern zu erwartende Variation. Eine Gegenüberstellung der GWL-Höhe 1850 und dem SG-Anstieg sollte Aufschluß darüber geben, ob der Betrag der SG-Erhöhung von der Höhenlage der Gletscher und damit indirekt von den lokal/regional-klimatischen Bedingungen abhängig ist (Regressionsdiagramm Fig. 5). Die dichte undifferenzierte Punktwolke bringt die große allgemeine und gebietsinterne Streuung der Einzelwerte zum Ausdruck und läßt den leicht absinkenden, reziprok zur Gletscherhöhe (bzw. GWL) verlaufenden Trend selbst bei dieser umfangreichen Stichprobe als nicht signifikant erscheinen.

Variationen des GWL-Anstieges sind damit wohl in entscheidenderem Maße auf Faktoren wie «Gletschertyp» und Topographie der Gletscheroberfläche zurückzuführen. Es zeigt sich, daß kleinere Gletscher allgemein zu etwas geringeren SG-Anstiegswerten neigen, ebenso aber auch größere Gletscher mit nur geringem Gefälle im Bereich der Schnee-

grenze. Hier wirken sich selbst größere Flächenverluste im Zungenbereich als nur geringfügige GWL-Erhönungen aus. Dieser Schneegrenz-Anstieg wird hingegen um so deutlicher, je flacher und damit scheinbar größer (Senkrecht-Projektion der Kartendarstellung!) das Ablationsgebiet und je steiler und damit anfälliger der kritische Höhenbereich in der Umgebung der 2 : 1-Schneegrenze ist.

Übertragen wir nun diese vorläufig nicht weiter aufgeschlüsselten Erkenntnisse über diesen rezenten Schneegrenz-Anstieg auf die Beurteilung spätglazialer SG-Depressionsberechnungen, so scheinen folgende Bemerkungen durchaus angebracht. Auch wenn man die extremen Gletscher ausklammert, verbleiben gut rund 200 Meter Spielraum, innerhalb dessen Grenzen sich die Schneegrenz-Schwankungen nur gerade der letzten knapp 125 Jahre alpiner Gletschergeschichte widerspiegeln. In der Spätglazialforschung werden für die Gliederung und Klassifizierung von Stadien, die zum Teil über 1000 Jahre auseinanderliegen (z. B. *Daun*- und *Egesen*-Stadium, Differenz rund 2000 Jahre), meist sogar noch viel enger gefaßte Wertebereiche als Kriterium für die Differenzierung bzw. Parallelisierung definiert und angewendet (vgl. Beitrag M. MAISCH in diesem Heft). Damit mag ein weiterer kritischer, aber nutzbringender Hinweis gewonnen sein, Überlegungen zur Streubreite spätglazialer SG-Depressionsbeträge in nicht mehr so streng gefaßte Vorstellungen zu zwingen und allfällige Abweichungen nicht voreilig als klima-geographisch bedingte Variationen zu interpretieren.

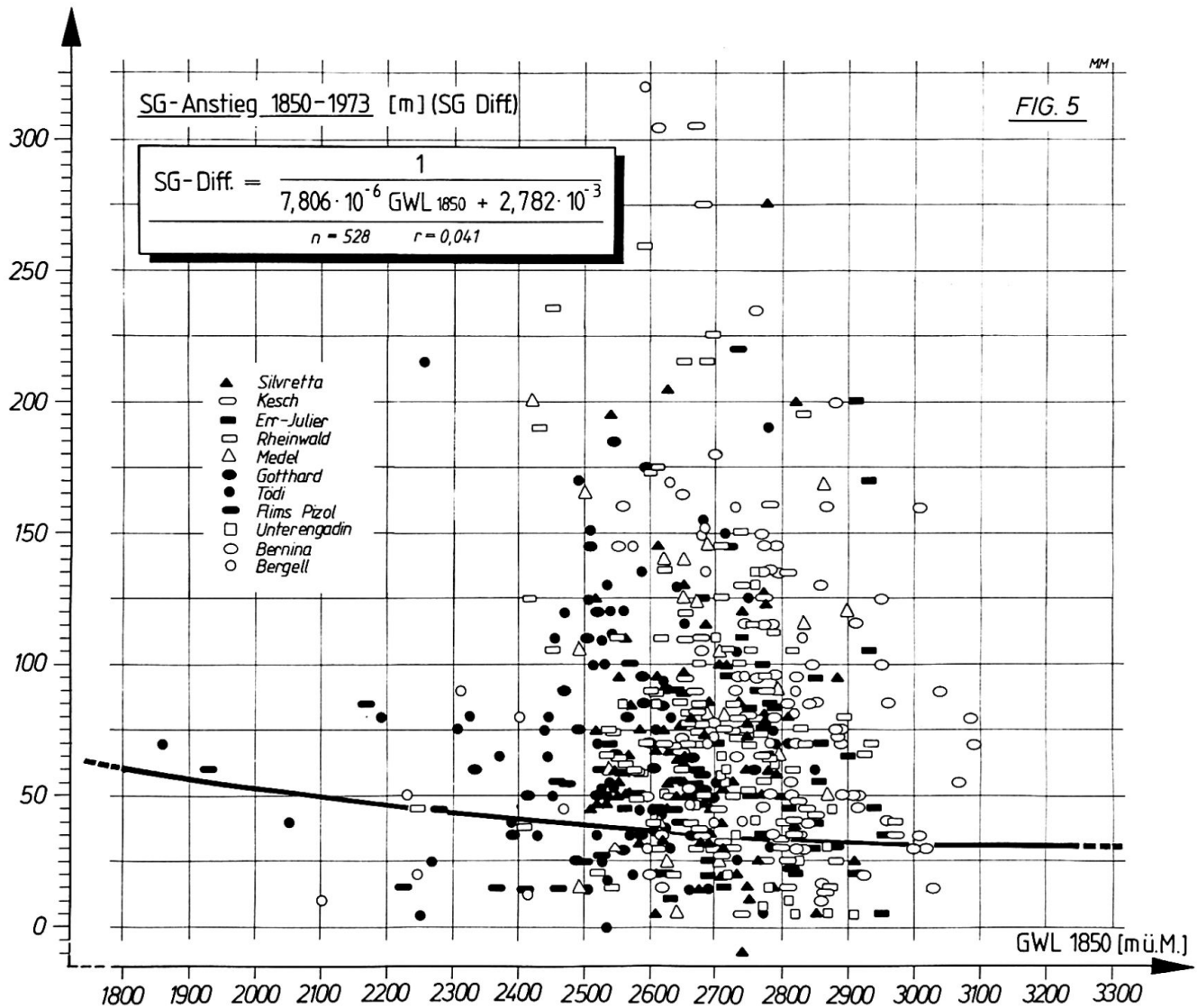


Fig. 5 Der Schneegrenz-Anstieg 1850-1973 in Abhängigkeit der Schneegrenzhöhen 1850 (GWL 1850)

Fig. 5 Regression diagram: snowline rise (SG-Diff.) during 1850-1973, and the snowline altitude (GWL) in 1850

6. Die Altschneelinie 1973

6.1 Zur Höhenlage

Die Altschneelinie wurde im Inventar '73 anhand von Luftbildern bestimmt. Ihr meist komplizierter, zum Teil in Inseln aufgelöster Verlauf wurde auf 20 Meter «genau» ermittelt und kartiert. Das Vorhandensein, die Bestimmbarkeit und damit die Datenauswahl ist hier stärker als bei allen anderen Parametern und «Zufälligkeiten» geprägt (Wolken und Schatten im Luftbild, Erkennbarkeit usw.). Daraus ergibt sich die vergleichsweise niedrige Stichprobengröße (n = 166).

Die Häufigkeitsverteilung (Fig. 6) zeigt eine gegenüber Fig. 2 (GWL 1850), vor allem aber gegenüber Fig. 3 (GWL 1973) um rund 160 Höhenmeter nach rechts verschobene Gruppierung mit dem Mittelwert 2921 +/- 161 m ü. M. (Min.: 2520, Max.: 3360, Median: 2940 m ü. M.). Diese Lage veranschaulicht den durchschnittlich starken Ausape-rungszustand der Bündner Gletscher am Ende des Haushaltjahres 1972/73. Die Expositionsmittelwerte (Tab. 6) zeigen auch hier nicht das gewünschte Bild (*Süd*-Exposition in tiefster Lage!), nach den einzelnen Gebirgsgruppen aufgegliedert kommt jedoch eine deutliche räumliche Struktur zum Vorschein (vgl. Tab. 7, auch Karte 5).

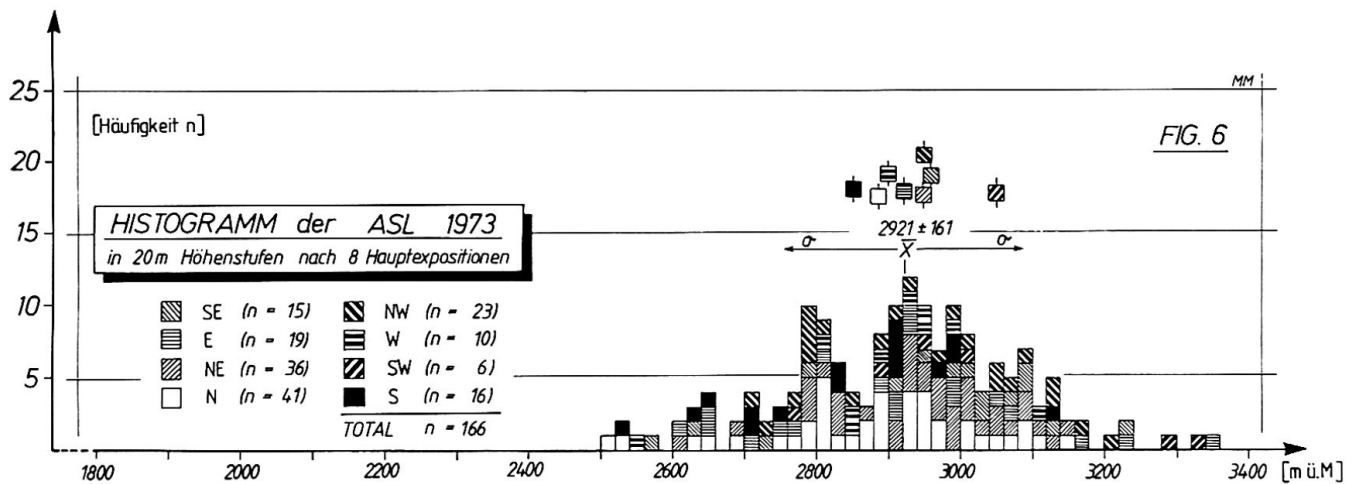


Fig. 6 Häufigkeitsverteilung der Altschneelinien-Höhen 1973, in 20-m-Höhenstufen nach 8 Hauptexpositionen geordnet

Fig. 6 Summary diagram of firnline altitude in 1973 shown at 20 m intervals and the 8 main local areas

Tab. 6 Die mittlere Höhenlage der Altschneelinie (ASL 1973) nach Expositionen gegliedert

Tab. 6 Firnline altitude in 1973 in different local areas

ASL 1973		n	\bar{x}	+/- s
Nord	N	41	2892	+/- 147
Nordost	NE	36	2953	+/- 123
Ost	E	19	2924	+/- 203
Südost	SE	15	2959	+/- 190
Süd	S	16	2845	+/- 160
Südwest	SW	6	3048	+/- 226
West	W	10	2898	+/- 146
Nordwest	NW	23	2950	+/- 153
Total		166	2921	+/- 161

n = Anzahl Beobachtungen

\bar{x} = Mittelwert s = Standardabweichung

Tab. 7 Die mittlere Höhenlage der Altschneelinie (ASL 1973) in den verschiedenen Gebirgsgruppen

Tab. 7 Firnline altitude in 1973 in different regions

ASL 1973		n	\bar{x}	+/- s
Silvretta		16	2909	+/- 77
Kesch		15	2969	+/- 78
Err-Julier		11	3053	+/- 160
Rheinwald		31	2909	+/- 122
Medel		15	2919	+/- 119
Gotthard		1	2520	—
Tödi		32	2766	+/- 124
Flims-Pizol		4	2685	+/- 96
Unter-Engadin		1	2960	—
Bernina		29	3101	+/- 126
Bergell		11	2925	+/- 89
Total		166	2921	+/- 161

n = Anzahl Beobachtungen

\bar{x} = Mittelwert s = Standardabweichung

6.2 Die Differenz zwischen Altschneelinie und 2 : 1-Schneegrenze

Die massenbilanzmäßige Stellung des Haushaltsjahres 1972/73 kann anhand der Differenzwerte ASL–GWL 1973 nachträglich beurteilt werden. Das Histogramm (Fig. 7) zeigt die nach Gebirgsgruppen aufgegliederte Datenmenge (Legende wie in Fig. 8), in Tab. 8 und Tab. 9 sind die gebietsinternen und expositionsbedingten Mittelwerte und Streuungsmaße aufgelistet.

Verglichen mit dem Gesamtmittelwert von 120 +/- 84 Meter (Min.: - 20 m, Max.: 445 m, Median: 98 m) verzeichneten die Gebirgsgruppen *Kesch*, *Bernina* und *Bergell* sowie die Sektoren *Nord* und *Nordwest* einen überdurchschnittlichen ASL-Anstieg,

währenddem im *Unter-Engadin* und im Gebiet *Flims-Pizol* sowie im Sektor *Südost* bis *West* die Ausaperung weniger stark ausgeprägt in Erscheinung tritt.

Im gesamten Durchschnitt war jedoch der höhenmäßige Anstieg der Altschneelinie gegenüber der «Gleichgewichtshöhe» 1973 um rund 50 Meter größer als der gesamte im Zeitraum 1850–1973 tatsächlich eingetretene «Schneegrenz-Anstieg». Damit herrschten im Haushaltsjahr 1972/73 zumindest kurzfristig Ernährungsbedingungen vor, die, falls sie theoretisch länger andauert hätten, zu einer noch viel erheblicheren Flächeneinbuße geführt hätten, als zwischen 1850 und 1973 effektiv festgestellt werden konnte. Damit ist die von Jahr zu Jahr mögliche, mit den Witterungsverhältnissen einher-

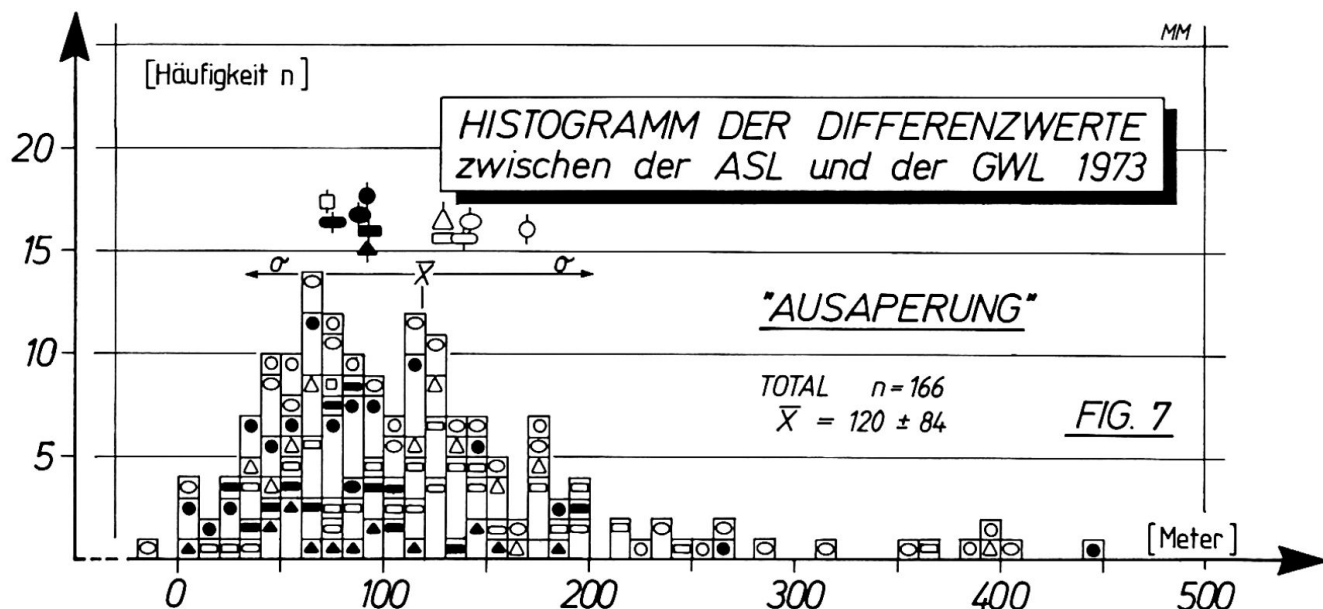


Fig. 7 Häufigkeitsverteilung der Differenz-Werte zwischen der Altschneelinie und der Schneegrenze (GWL) 1973 (Ausaperung), nach Gebirgsgruppen gegliedert

Fig. 7 Summary diagram of differences between firnline and equilibrium line for different regions in 1973

Tab. 8 Differenz-Mittelwerte zwischen der Altschneelinie (ASL 1973) und der 2 : 1-GWL 1973 («Ausaperung3») in den verschiedenen Gebirgsgruppen

Tab. 8 Differences between firnline and equilibrium line altitude in 1973 in different regions

ASL-DIFF	n	\bar{x}	+/-	s	Min. - Max.
Silvretta	16	92	+/-	48	10 185
Kesch	15	139	+/-	43	40 200
Err-Julier	11	92	+/-	45	40 195
Rheinwald	31	127	+/-	73	15 365
Medel	15	128	+/-	88	40 395
Gotthard	1	90	-	-	90 90
Tödi	32	92	+/-	83	5 445
Flims-Pizol	4	74	+/-	34	30 110
Unter-Engadin	1	70	-	-	70 70
Bernina	29	144	+/-	105	- 20 405
Bergell	11	171	-/-	130	50 395
Total	166	120	+/-	84	- 20 445

n = Anzahl Beobachtungen

\bar{x} = Mittelwert s = Standardabweichung

Tab. 9 Differenz-Mittelwerte zwischen der Altschneelinie (ASL 1973) und der 2 : 1-GWL 1973 nach Expositionen gegliedert

Tab. 9 Differences between firnline and equilibrium line altitude in 1973 in different local areas

ASL-DIFF		n	\bar{x}	+/-	s
Nord	N	41	165	+/-	99
Nordost	NE	36	123	+/-	83
Ost	E	19	100	+/-	64
Südost	SE	15	88	+/-	43
Süd	S	16	62	+/-	39
Südwest	SW	6	68	+/-	48
West	W	10	86	+/-	52
Nordwest	NW	23	140	+/-	86
Total		166	120	+/-	84

n = Anzahl Beobachtungen

\bar{x} = Mittelwert s = Standardabweichung

gehende Variabilität der Altschneelinie zumindest «nach oben» angedeutet.

Eine Regressionsanalyse zwischen der ASL und der GWL 1973 (Fig. 8) bringt eine mit ansteigender Gletscherhöhe leicht erkennbare Tendenz zu geringeren ASL-Anstiegsbeträgen zum Vorschein. Die deutlich unter 1 liegende Steigung der Regressionsgeraden unterstreicht diese Schlußfolgerung. Der Zusammenhang zwischen Gletscherhöhe

(GWL 1973) und Ausaperungsgrad (ASL-Diff.) verläuft bei genauerer Analyse in Wirklichkeit wohl nicht linear (vgl. Fig. 9), deutet aber auch in dieser Darstellung an, daß tiefer gelegene Gletscher im September 1973 in stärkerem Maße ausgeapert waren als höher gelegene (99%-Signifikanzniveau).

Diese Aussagen müssen selbstverständlich witterungsmäßig für die einzelnen Teilregionen noch ge-

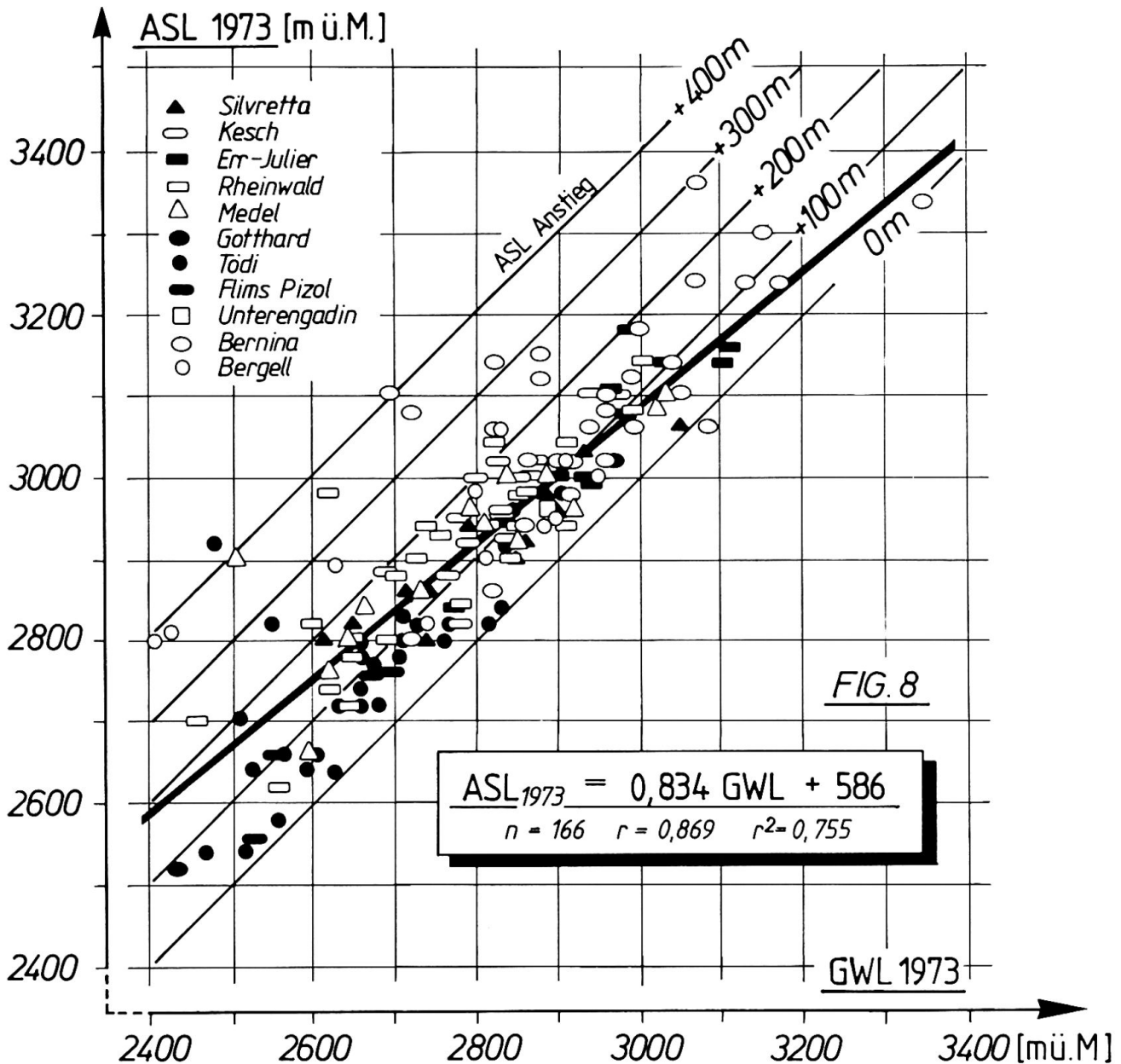


Fig. 8 Die Höhenlage der Altschneelinie 1973 in Abhängigkeit von der Schneegrenz-Höhe (GWL) 1973, nach Gebirgsgruppen gegliedert

Fig. 8 Regression diagram: firnline altitude (ASL) and equilibrium line altitude (GWL) in 1973

nauer abgestützt werden. Für das *Bernina*-Gebiet konnte J. SUTER (1981) bereits belegen, daß das «Ausnahme-Jahr» 1972/73 durch einen überdurchschnittlich trockenen Winter (Okt. bis April) und allerdings durch leicht erhöhte Sommerniederschläge (Mai bis September) geprägt war. Die Temperatur-Monatsmittel in der für die Ablation wichtigen Periode Mai bis September lagen jedoch um rund 11% über dem Durchschnitt der vorangegangenen 10 Jahre und können wahrscheinlich als Hauptursache für die starke Ausaperung der Gletscher verantwortlich gemacht werden.

7. Räumliche Verteilungs-Strukturen

Untersuchungen zur großräumigen Verteilung von Schneegrenzen gehen in den Schweizer Alpen und damit auch im untersuchten Ausschnitt auf J. JEGER-LEHNER (1902) zurück (vgl. F. MÜLLER et al., 1976). Er entwarf eine Karte der «mittleren Gletscher-Höhen». In jüngerer Zeit haben G. VORNDRAH (1968, 1969) für die *Silvretta* und J. SUTER (1981) für das *Ober-Engadin* versucht, die räumlichen Variationen von Schneegrenzhöhen nachzuzeichnen und zu interpretieren. Ansatzweise sind solche Verteilungsmuster

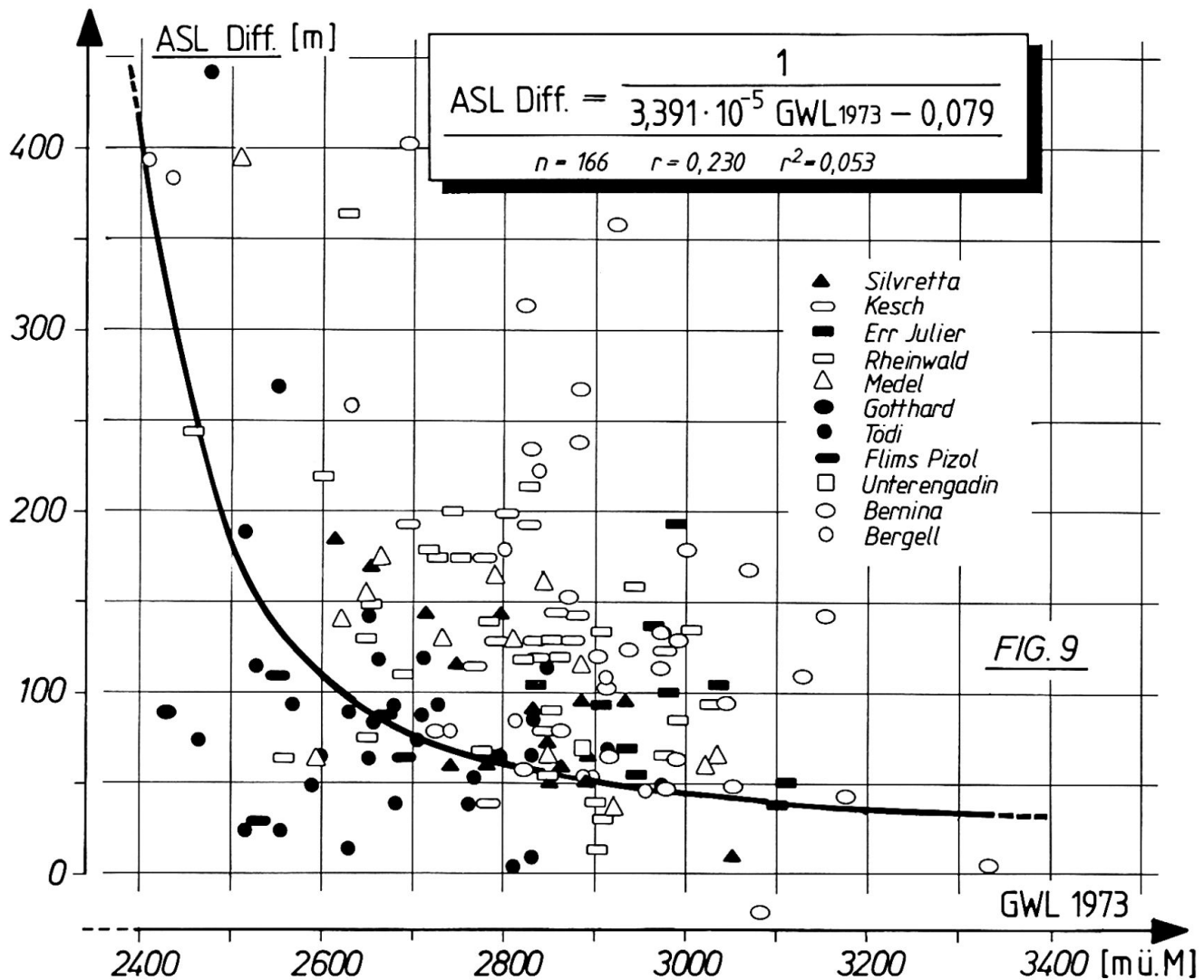


Fig. 9 Die Differenz-Werte zwischen der Altschneelinie und der Schneegrenze 1973 in Abhängigkeit von der Höhenlage der Schneegrenze (GWL) 1973

Fig. 9 Regression diagram: firnline rise (ASL-Diff.) and equilibrium line altitude (GWL) for different regions in 1973

auch im Gebiet Mittelbünden erkennbar (M. MAISCH, 1981). Für das Gebiet zwischen *Medel-Tödi-Flims-Pizol* hat gerade kürzlich U. JORDI (1987) eine Schneegrenz-Isolinien-Karte vorgelegt. Die bisher vorgestellten, nach Gebirgs- und Expositionen-Gruppen aufgegliederten Schneegrenz-Werte-Verteilungen können zwar nach streng statistischen Methoden nicht immer eindeutig voneinander unterschieden werden – das liegt wohl in der «Natur» von Schneegrenzen! Trotzdem soll der Versuch gewagt werden, die sich abzeichnenden räumlichen Verlaufs-Strukturen anhand einfach gestalteter Kartogramm-Darstellungen synoptisch zu veranschaulichen. Für alle Entwürfe (Karten 2 bis 6) wurden als Grundlage jeweils nur die Gebiets-Mittelwerte herangezogen, die in den entsprechenden Tabellen

im einzelnen nachgeprüft werden können. Die unterschiedlichen Expositionseinflüsse wurden vorläufig nicht berücksichtigt, ebenso erfolgte auch keine Gewichtung nach der Stichprobengröße. Die Karten wurden dabei «von Hand» gezeichnet und vermögen die im einzelnen recht kompliziert verlaufenden Konfigurationen nicht im Detail und nur «geglättet» wiederzugeben. Zudem muß der Isochionen-Verlauf an den Anschluß-Stellen in Richtung Österreich bzw. Wallis (Westalpen) noch offen bleiben.

7.1 Die Schneegrenzflächen 1850 und 1973

In Analogie zu den von G. GROSS (1983) erstellten Alpenquerschnitts-Diagrammen soll vorerst der

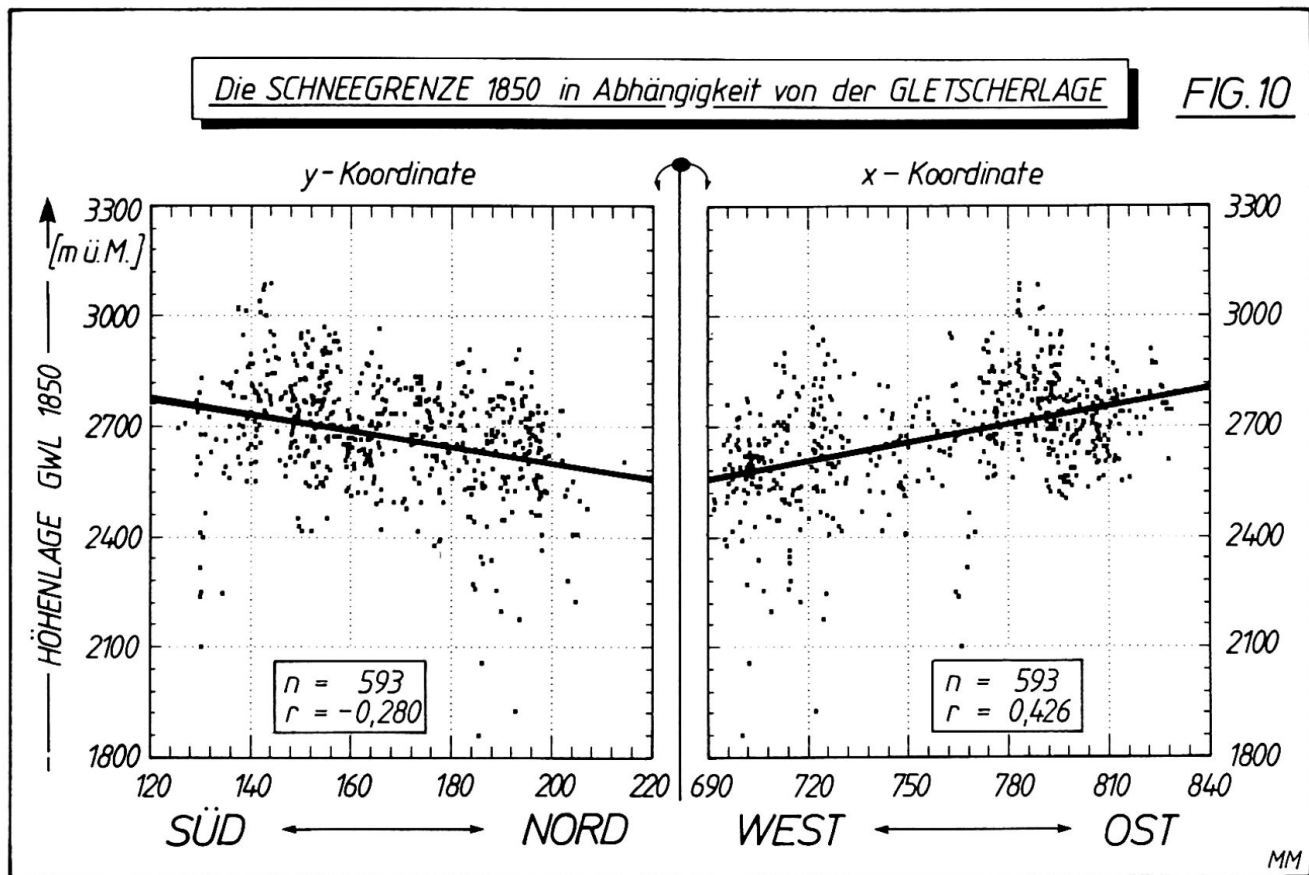


Fig. 10 Die Schneegrenze von 1850 in Abhängigkeit von der Gletscherlage (x/y-Koordinaten)

Fig. 10 Regression diagram: equilibrium line altitude in 1850 and geographical position (x/y coordinates) of the glaciers (North-South- and West-East direction)

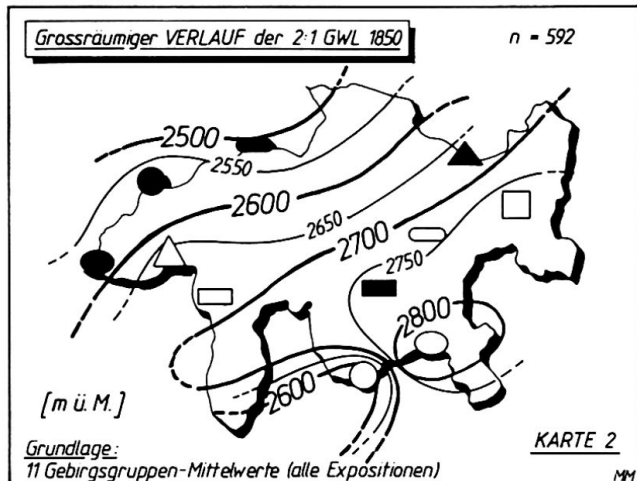
Schneegrenz-Verlauf 1850 in *Nord-Süd* und *West-Ost*-Richtung dargestellt werden.

Die in Fig. 10 nach der x- und y-Koordinate aufgetragenen Gletscher zeigen sehr schön das generell *Nord-Süd* und *West-Ost* gerichtete Ansteigen der Schneegrenzflächen. Damit resultiert räumlich (bildlich nach vorne geklappt!) ein *Nordwest-Südost* verlaufendes Anheben der virtuellen 1850er-Schneegrenz-Oberfläche.

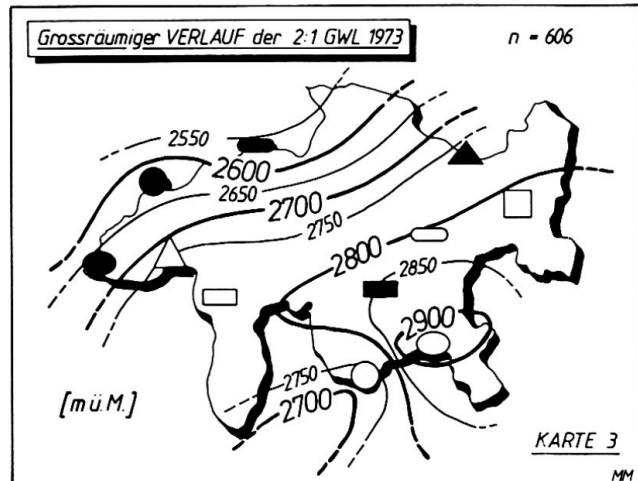
Karte 2 und Karte 3 vermögen den räumlichen Trend geographisch etwas differenzierter nachzuzeichnen. Die beiden Schneegrenz-Oberflächen steigen in *NW-SE*-Richtung etwa parallel zur Hauptstreichrichtung der Alpenlängsachse von den feuchteren randalpinen zu den trocken-kontinentalen inneralpinen Gebieten an und kulminieren im «Vergletscherungs-Zentrum» der *Bernina-Gruppe*. Diese Oberflächen widerspiegeln damit in ihren Grundzügen nicht ganz unerwartet das auch von anderen klimabedingten Höhengrenzen (Waldgrenze, Solifluktionsgrenze) beobachtbare Verhalten und folgen damit gut angenähert dem Effekt der «Maßenerhebung».

In Richtung *Bergell–Oberitalien* ist 1850 ein markant steiles Abfallen der Schneegrenzen erwähnenswert. Die deutlich tieferen Positionen der Bergeller Gletscher ist wohl auf die gegenüber Südostlagen bereits exponiertere Luv-Lage zurückzuführen (vgl. G. GENSLER, 1978, J. SUTER, 1981). Andererseits verschärfen hier die fast senkrecht stehenden Schattenwände des Bergeller Massivs den Effekt der *Nord*-Exposition zusätzlich. 1973 scheint dieser steile SG-Abfall etwas abgeschwächt. Hier macht sich aber nur die Mitberücksichtigung einiger auf der italienischen Seite gelegener südexponierter Gletscher (Val Mäsino) rechnerisch bemerkbar.

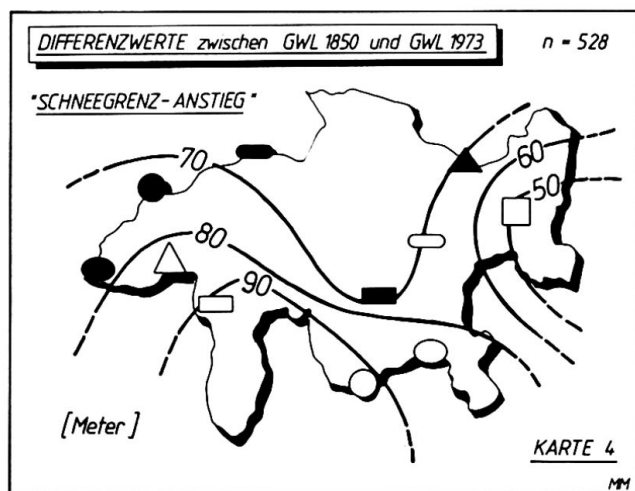
Die Darstellung für den Schneegrenz-Anstieg 1850–1973 zeigt (Karte 4), bei allerdings sehr geringen Mittelwerts-Differenzen (vgl. Tab. 4), ein *NE–SW* gerichtetes Ansteigen der «Schneegrenz-Hebung» an, was auf eine später noch nachzuprüfende klimatische Begünstigung des südwestlichen Teils des Bündnerlandes schließen lassen könnte. Die Ausbuchtung der Isochionen um die *Err-Julier-Gruppe* läßt vermuten, daß die in diesem Teilgebiet vorkommenden Gletscher seit 1850 ganz ähnlichen



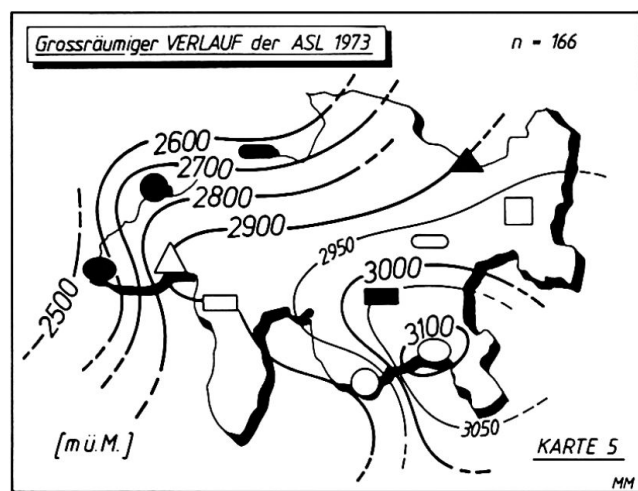
Karte 2 Großräumiger Verlauf der 2 : 1-GWL 1850
Map 2 Trend surface of equilibrium line in 1850



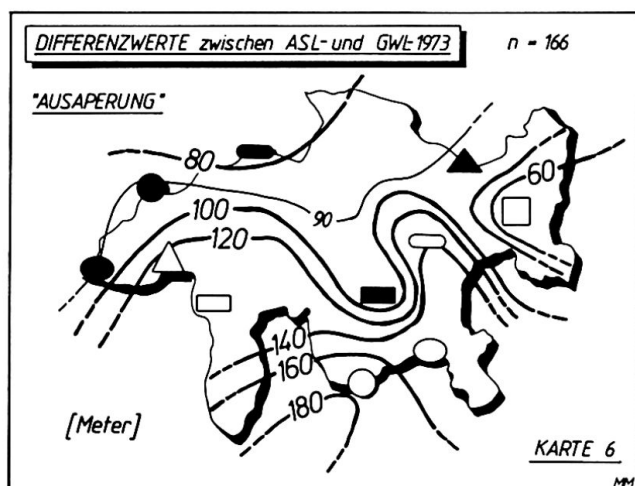
Karte 3 Großräumiger Verlauf der 2 : 1-GWL 1973
Map 3 Trend surface of equilibrium line in 1973



Karte 4 Differenzwerte zwischen GWL 1850 und GWL 1973
Map 4 Snowline rise between 1850 and 1973



Karte 5 Großräumiger Verlauf der Altschneelinie 1973
Map 5 Trend surface of firnline in 1973



Karte 6 Differenzwerte zwischen Altschneelinie und GWL 1973
Map 6 Differences between firnline and equilibrium line altitude in 1973

Legende Karte 2-6 Großräumiger Verlauf von Schneegrenze und Altschneelinie (Isochionen-Darstellung)
Als Grundlage dienten jeweils die 11 Gebirgsgruppen-Mittelwerte, ohne Berücksichtigung der Expositions-Unterschiede

Map legend 2-6 Trend surfaces of the equilibrium line altitudes 1850/1973 and the firnline 1973 given by the average values of each region (without consideration of local conditions)

- | | |
|-------------------------|----------------|
| ▲ Silvretta | ● Gotthard |
| ○ Kesch | □ Unterengadin |
| ■ Err Julier | ○ Bernina |
| □ Rheinwald | ○ Bergell |
| △ Medel | ● Tödi |
| ■ Flims Pizol Glärnisch | |

nordbeeinflussten Wetterlagen ausgesetzt waren wie offenbar die dem Nordstau direkter exponierten Gebiete *Flims-Pizol*, *Tödi*, zum Teil *Kesch* und *Silvretta* (v. a. im West-Teil). Die tiefe Muldenlage des niederschlagsarmen *Unter-Engadins* (nur rund 50 Meter SG-Anstieg) steht noch etwas isoliert da und kann wahrscheinlich erst in Verbindung mit den entsprechenden Werten der Ötztaler Gletscher sinnvoll interpretiert werden.

Vor einer «Über-Interpretation» dieser SG-Anstiegs-Daten muß aber, wie in Kap. 5.2 bereits kritisch angedeutet worden ist, abgeraten werden, sind doch die gebietsinternen Abweichungen bereits wesentlich größer als die zwischen den einzelnen Gebietsmittelwerten errechneten Differenzen (vgl. Tab. 4).

7.2 Verlauf der Altschneelinie

Der großräumige Verlauf der ASL-Höhen (Karte 5) belegt einen im Vergleich zu Karte 2 und Karte 3 zwar durchaus ähnlichen und mit der Massenerhebung gleichläufigen, aber doch erheblich steileren Anstieg. Er dokumentiert damit das mögliche Ausmaß der Jahr für Jahr zu erwartenden räumlichen «Gefällsunterschiede» in den gletscherbestimmenden Witterungsbedingungen.

Die Darstellung der Differenzwerte zwischen ASL und GWL 1973 (Ausaperung) weist die Maximalbeträge im *Bergell* und in der *Bernina*-Gruppe aus, mit einem Übergreifen auf die *Kesch*-Region. Die bereits von J. SUTER (1981) gemachte Feststellung, daß sich die Altschneelinie 1973 in der *Err-Julier*-Gruppe schwächer angehoben hat als im Nachbargebiet der *Bernina*, kommt hier auch graphisch sehr schön zum Ausdruck. Der Wert vom möglichst jährlich durchgeführten großräumigen Untersuchungen zur Höhenlage der Altschneelinie als Beitrag zur Gletscher-Klima-Beziehung kann hier nur unterstrichen werden.

Die in diesem Beitrag auszugsweise vorgestellten Ergebnisse lassen also bereits einige recht interessante und für gletscherkundliche Fragestellungen relevante Zusammenhänge und Raumstrukturen erkennen. Mögliche weiterführende Studien sind damit in der Richtung angedeutet und sollen auch künftig Gegenstand «geographisch/glaziologisch» orientierter Untersuchungen sein.

Dank

Meinem Kollegen Dr. Hanspeter HOLZHAUSER möchte ich ganz herzlich für die Benützung seines Olivetti-PC-Gerätes und seine wertvollen Hinweise bei der Datenauswertung danken. Zu größtem Dank bin ich aber Stephan BADER (cand. phil. II,

Assistent am Geogr. Institut) für das zeitaufwendige Eintippen der rund 20 000 Einzeldaten verpflichtet. Ohne seinen zuvorkommenden und zuverlässigen Einsatz wäre diese Arbeit wohl nicht fristgerecht fertig geworden.

Zusammenfassung

Es werden erste Ergebnisse einer Inventarisierung der Gletscher zur Zeit des Hochstandes um 1850 vorgestellt und mit der im Schweizerischen Gletscherinventar erfaßten «Gletscherausdehnung 1973» verglichen. Ausgehend vom allgemein beobachtbaren Gletscherschwund im Zeitraum 1850 bis 1973 werden vor allem Höhenlage, Veränderung und räumliche Verteilungsmuster von Schneegrenzen untersucht. Die Höhenverteilung der Schneegrenzen (2 : 1-Gleichgewichtslinien) widerspiegelt den räumlichen Haupttrend der «Massenerhebung» (Anstieg von den feuchten randalpinen zu den trockenen-kontinentalen Regionen), der seinerseits von den Expositionsunterschieden überlagert wird. Der allgemeine klimabedingte Schneegrenzanstieg betrug zwischen 1850 und 1973 77 \pm 51 Meter. Die große Variationsbreite (– 20 bis + 320 m) macht deutlich, wie stark im einzelnen die lokalen topographischen Bedingungen und die Gefällsverhältnisse der Gletscheroberfläche die Höhenlage und damit auch die Veränderungen der Schneegrenze beeinflussen können.

Die Höhenlage der Altschneelinie widerspiegelt die Ausaperung des extremen Haushaltsjahres 1972/73, die im Gebiet *Bernina*, *Bergell* und *Kesch* die Gletscher stärker erfaßt hat als in den übrigen Teilregionen. Im Mittel lag die Altschneelinie 1973 rund 120 Meter höher als die der damaligen Flächenausdehnung entsprechende 2 : 1-Gleichgewichtslinie.

Mit dem erhobenen Zahlenmaterial liegt nun eine recht umfangreiche Dokumentation vor, die es noch detaillierter auszuwerten und vor allem klimatologisch zu analysieren gilt.

Literatur

FINSTERWALDER, R. (1953): Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückgangs an Ostalpengletschern. In: Zeitschr. für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band II, Heft 2, S. 189–239.

GENSLER, G. (1978): Das Klima von Graubünden. Habil.-Schrift Schweiz. Meteorologische Anstalt, Zürich.

GROSS, G. (1974): Schneegrenzberechnungen an den Gletschern der Silvretta-Gruppe. Systematischer Vergleich der Bestimmungsmethoden. Hausarbeit aus Geographie, unveröff. Manuskript Universität Innsbruck.

- GROSS, G., KERSCHNER, H. & PATZELT, G. (1978): Methodische Untersuchungen über die Schneegrenze in alpinen Gletschergebieten. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Bd. XII, Heft 2, S. 223–251.
- GROSS, G. (1983): Die Schneegrenze und die Altschneelinie in den österreichischen Gletschergebieten. In: Festschrift FLIRI, S. 59–77.
- HÄBERLI, W. (1982): Klimarekonstruktionen mit Gletscher-Permafrost-Beziehungen. Mat. zur Physiogeographie, Vol. 4, S. 9–17.
- HÄBERLI, W. (1983): Permafrost-glacier relationships in the Swiss Alps – today and in the past. In: Proceedings Forth International Conference on Permafrost, p. 415–420.
- HEUBERGER, H. (1980): Die Schneegrenze als Leithorizont in der Geomorphologie. In: C. JENTSCH & H. LIEDTKE (Hrsg.): Höhengrenzen in Hochgebirgen. Arbeiten aus dem Geogr. Institut der Univ. des Saarlandes, Band 29, S. 35–48, Saarbrücken.
- HOINKES, H. (1970): Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. Zeitschr. für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Bd. VI, Heft 1–2, S. 37–90.
- HOLZHAUSER, H. (1985): Neue Ergebnisse zur Gletscher- und Klimageschichte des Spätmittelalters und der Neuzeit. In: Geographica Helvetica, Heft 4, S. 168–185.
- JEGERLEHNER, J. (1902): Die Schneegrenze in den Gletschergebieten der Schweiz. Gerlands Beiträge zur Geophysik, Bd. V, S. 486–566.
- JORDI, U. (1987): Glazialmorphologische und gletschergegeschichtliche Untersuchungen im Taminatal und im Rheintalabschnitt zwischen Flims und Feldkirch (Ostschweiz, Vorarlberg). Dissertation Univ. Bern, 168 S.
- KASSER, P. & AELLEN, M. (1975): Die Gletscher der Schweizer Alpen im Jahr 1973/74. Auszug aus dem 95. Bericht der Gl. Kommission der SNG. In: Die Alpen, Zeitschr. des Schweizer Alpen-Club, S. 209–225.
- KASSER, P. (1981): Rezente Gletscherveränderungen in den Schweizer Alpen. In: Gletscher und Klima, Jahrbuch der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft, wissenschaft. Teil, S. 106–138.
- KLEBELSBERG, R. von (1946): Die heutige Schneegrenze in den Ostalpen. In: Berichte des Naturwissensch.-medizinischen Vereins in Innsbruck, 47, Band 1939/46, S. 9–32.
- MAISCH, M. (1981): Glazialmorphologische und gletschergegeschichtliche Untersuchungen im Gebiet zwischen Landwasser- und Albulatal (Graubünden, Schweiz). Diss. der Univ. Zürich, 217 S.
- MAISCH, M. (1987): Zur Gletschergeschichte des alpinen Spätglazials: Analyse und Interpretation von Schneegrenzdaten. Teilbeitrag in G. FURRER et al.: Zur Gletscher-, Vegetations- und Klimageschichte der Schweiz seit der Späteiszeit. In: Geographica Helvetica, Nr. 2/87, S. 63–71.
- MÜLLER, F., CAFLISCH, T. & MÜLLER, G. (1973): Das Schweizer Gletscher-Inventar als ein Beitrag zum Problem der Gletscher-Klima-Beziehung. In: Geographica Helvetica, Heft 2, S. 103–110.
- MÜLLER, F., CAFLISCH, T. & MÜLLER, G. (1976): Firn und Eis der Schweizer Alpen, Gletscherinventar. ETH-Zürich, Publ. Nr. 57 und 57a (Ergänzungsband Photoliste).
- PATZELT, G. & BORTENSCHLAGER, S. (1973): Die postglazialen Gletscher- und Klimaschwankungen in der Venedigergruppe (Hohe Tauern, Ostalpen). In: Zeitschr. Geomorphologie NF Suppl. Bd. 16, S. 25–72.
- PFISTER, C. (1984): Klimageschichte der Schweiz 1525–1860. Das Klima der Schweiz 1525 bis 1860 und seine Bedeutung in der Geschichte von Bevölkerung und Landwirtschaft. Band 1, Bern.
- SCHÜEPP, M. & GENSLER, G. (1986): Witterungsänderungen in der Schweiz im 19. und 20. Jahrhundert. In: Geographica Helvetica, Nr. 1/86, S. 35–48.
- SUTER, J. (1981): Gletschergeschichte des Oberengadins: Untersuchung von Gletscherschwankungen in der Err-Julier-Gruppe. Diss. Univ. Zürich, 147 S.
- VORNDRAN, G. (1968): Untersuchungen zur Aktivität der Gletscher dargestellt an Beispielen aus der Silvretta-Gruppe. Schriften des Geogr. Institutes der Universität Kiel, Band XXIX, 1, 129 S.
- VORNDRAN, G. (1969): Die Höhe der Schneegrenze in der Silvretta-Gruppe. Mitt. der Geogr. Ges. München, Bd. 55, S. 155–167.