

Das Schweizer Gletscherinventar als ein Beitrag zum Problem der Gletscher-Klima-Beziehung

Fritz Müller, Toni Caflisch und Gerhard Müller

Zusammenfassung

Auf Empfehlung der UNESCO sollen während der Internationalen Hydrologischen Dekade (IHD) sämtliche Süßwasservorkommen der Welt erfaßt werden. Als Beitrag zu diesen Bemühungen wird gegenwärtig am Geographischen Institut der ETHZ ein Schweizerisches Gletscherinventar aufgestellt. Die Arbeiten am Inventar werfen einige Probleme auf, die im folgenden dargestellt werden. Das gesammelte Datenmaterial bildet Grundlage für ein Forschungsprojekt, welches weitere Erkenntnisse über die Beziehung zwischen Gletscher und Klima liefern soll.

Einleitung

Die gegenwärtige Entwicklung von Bevölkerung, Industrie und Landwirtschaft ist verbunden mit einem ständig steigenden Bedarf an Wasser. Wie eine Untersuchung der UNESCO zeigt, soll er sich in zwanzig Jahren verdoppelt haben (1). Deshalb wird im Rahmen der Internationalen Hydrologischen Dekade (IHD) eine Abschätzung sämtlicher Wasservorkommen und deren rationellere Nutzung in allen Ländern angestrebt.

Schnee und Eis stellen den Hauptanteil der Süßwasserreserven dar. In Zusammenarbeit mit der UNESCO verfaßte eine Arbeitsgruppe der International Commission of Snow and Ice eine Anleitung für die Erstellung eines Gletscherinventars (2). Unter Anwendung dieser Richtlinien wird gegenwärtig am Geographischen Institut der ETH Zürich ein Inventar sämtlicher Schweizer Gletscher aufgestellt. Das Datenmaterial bildet die Grundlage für ein vom Nationalfonds unterstütztes Forschungsprojekt, welches weitere Erkenntnisse über die Beziehung zwischen Klima und Gletscher liefern soll. Als Bestandteil der hochalpinen Landschaft ist der Gletscher zudem Gegenstand der Landschaftsplanung, speziell bei der Ausscheidung von Erholungs- und schutzwürdigen Gebieten. Das Gletscherinventar ist deshalb auch ein Beitrag zu einer aktuellen Umweltgestaltung. Mit dem Inventar wird eine einmalige Erfassung *aller* Schweizer Gletscher angestrebt. Das dabei gesammelte Informationsmaterial ergänzt die periodischen Beobachtungen der Zungenaktivitäten ausgewählter

Gletscher durch die Gletscherkommission der SNG (3). In vielen Ländern ist das Gletscherinventar schon weit gediehen, so vor allem in Italien, Kanada, Norwegen, Österreich und Rußland (4).

Schweizer Gletscherinventar

Frühere schweizerische Inventare, die allerdings nur die Fläche der Gletscher erfaßten, liegen schon weit zurück. Als Grundlage dienten amtliche Karten, die auf Aufnahmen recht unterschiedlichen Alters basierten. Die Ausdehnung der Gletscher in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts wurde aus dem Siegfried-Atlas entnommen. Später diente die erste Ausgabe der Neuen Landeskarte, entstanden in den Jahren 1917 bis 1945, als Grundlage für zwei unabhängig voneinander durchgeführte Planimetrierungen der Gletscheroberflächen (6, 7).

Im gegenwärtigen Inventar werden Luftaufnahmen und die neuesten Ausgaben der Neuen Landeskarte im Maßstab 1 : 25 000 als Grundlagen verwendet. Eine möglichst lückenlose Serie von Luftaufnahmen der Jahre 1972/1973 wird erreicht durch Koordination von Flügen der Eidg. Landestopographie, der Eidg. Vermessungsdirektion, der Abteilung für Flugwesen und Fliegerabwehr und der Kraftwerke Grande-Dixence. Für die Überfliegung der restlichen Gebiete konnten zudem zwei Privatpiloten gewonnen werden (F. Engesser, P. Ramu). Im Sommer 1972 war es nur möglich, einen Bruchteil der vorgesehenen Grundlagen zu beschaffen, da infolge der häufigen Schneefälle nur einzelne Gletscher vollständig ausaperten. Sollte auch 1973 eine lückenlose Befliegung nicht möglich sein, müssen Aufnahmen aus früheren Jahren beigezogen werden, die durch ein spezielles Interpolationsverfahren ausgewertet werden. Die Flugaufnahmen dienen dazu, die Gletscherumrisse auf den Karten – wo notwendig – nachzuführen und einzelne Elemente die nicht auf der Karte eingetragen sind (z.B. Schneegrenze, Schuttbedeckung) zu bestimmen. Um eine möglichst präzise Auswertung zu gewährleisten, wird für diese Arbeiten ein Autograph (Kern PG2) eingesetzt.

Die Luftphotographien ermöglichen es, für jeden Gletscher ein Datenblatt auszufüllen (Fig. 1), das 38 Parameter umfaßt und durch eine Photo- und

SCHWEIZERISCHES GLETSCHERINVENTAR

KANTON
 GEBIRGSGRUPPE
 EINZUGSGEBIET
 1. Ordnung
 2. "
 3. "
 4. "

GRUNDLAGEN

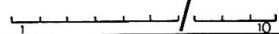
a. Photographien

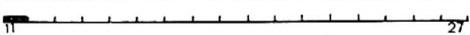
TYP	FLUGLINIE	PHOTONR	DATUM	VERWENDUNG

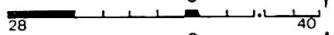
b. Karte: Massstab
 Blatt Nr.
 Name
 Gletscherstand

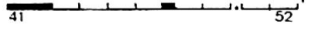
BEMERKUNGEN

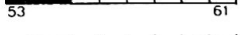
LITERATUR


GEWASSERKODE/GL.NR. 

GLETSCHERNAME 


GEOGR. BREITE 

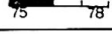
II LÄNGE 

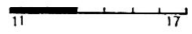
ZYLINDERKOORD. (Y) 

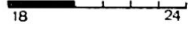
II (X) 

EXPOSITION

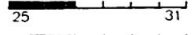
- Akk. gebiet 


- Abl. gebiet 

GRÖSSTE GL.HÖHE (m) 

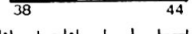
MITTLERE " 


TIEFSTE GL.HÖHE (m)


- Schuttfreies Gebiet 


- Total 

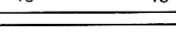
SCHNEEGRENZE (m)

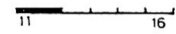
- aus Photo: Höhe 

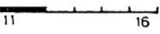
Datum 

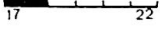
Genauigkeit 

- Methode Hess 

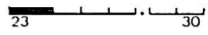
- " Lichtenecker 

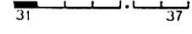
- " Höfer 


MITTLERE HÖHE AKK. GEBIET (m) 

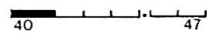
MITTLERE HÖHE ABL. GEBIET (m) 


OBERFLÄCHE (km²)


- Schuttfreies Gebiet 

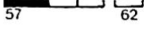
- Total 

- Genauigkeit 

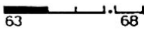
ABLATIONSFLÄCHE (km²) 

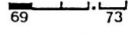
ACC. AREA RATIO (AAR) 

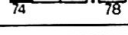
MITTLERE BREITE (km) 


MITTLERE LÄNGE (km) 


MAXIMALE LÄNGE (km)

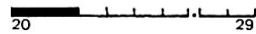
- Schuttfreies Gebiet 


- Ablationsgebiet 

- Total 

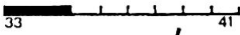
MITTLERE MÄCHTIGKEIT (m) 

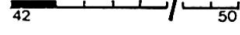
- Genauigkeit 

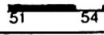
EISVOLUMEN (10⁶ m³) 

- Genauigkeit 

KLASSIFIKATION

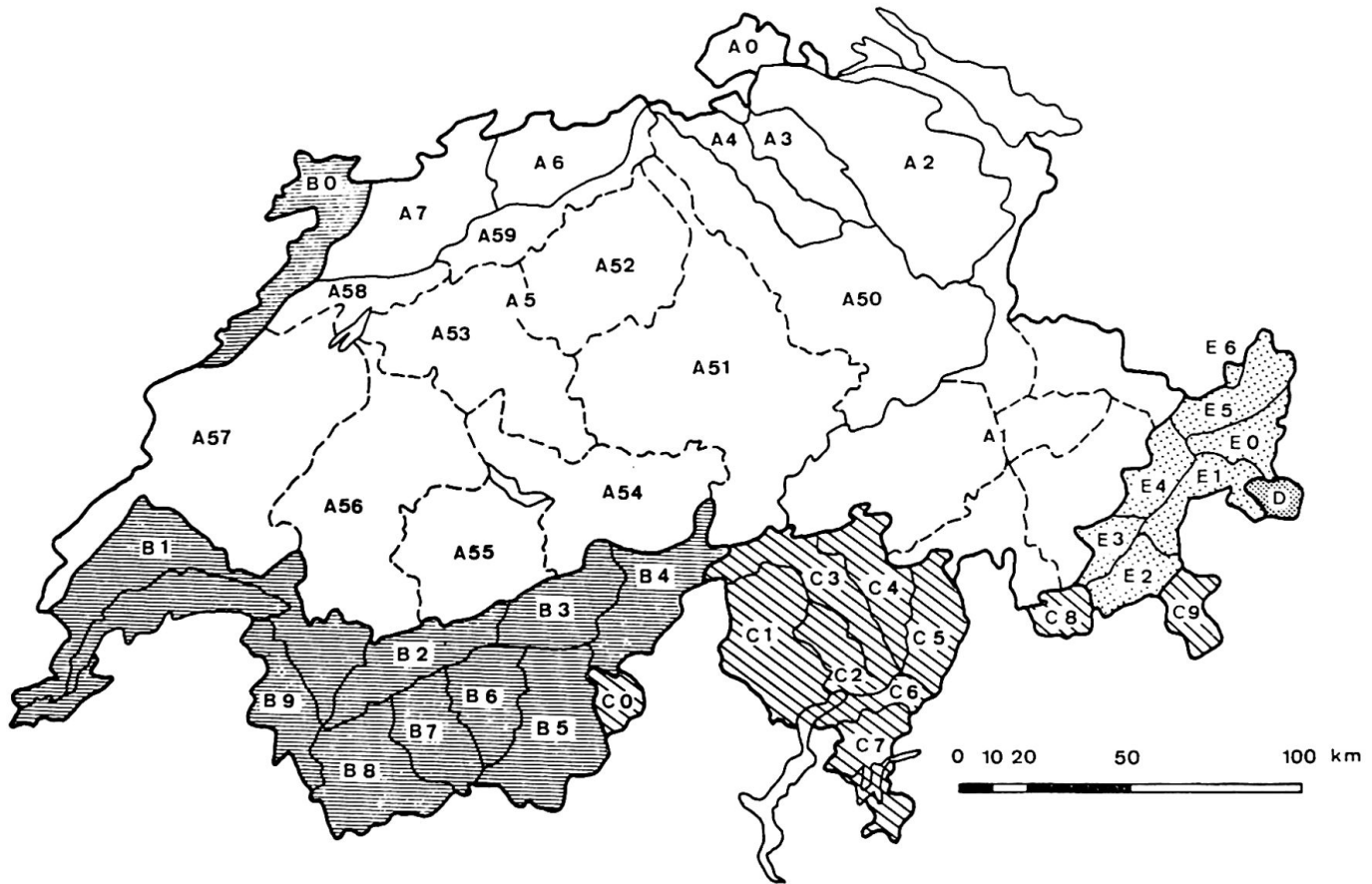
- Aktivität für Jahre 

MORÄNEN 



DATENZUSAMMENSTELLUNG :

POS. 80 : LOCHKARTENNUMMER



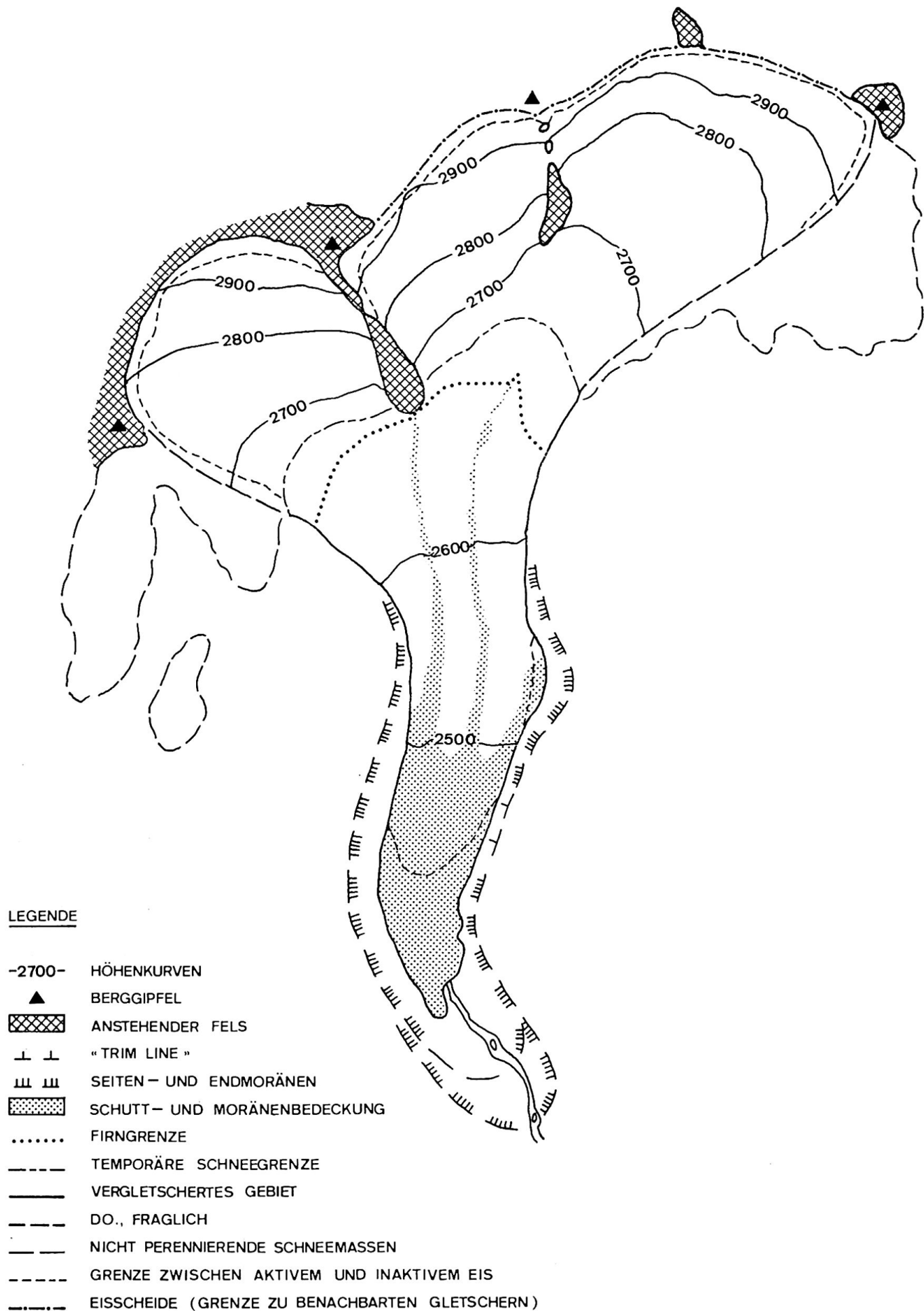
Figur 2. Gewässerkode (Erklärung im Text). (Entwurf)

Literaturliste ergänzt wird. Es ist vorgesehen, das gesamte Informationsmaterial (mehr als 50 000 Daten) auf Rechenanlagen zu speichern, um sie für die Auswertung rasch griffbereit zu haben. Im vorliegenden Überblick können nur einige z. T. anderswo (8, 9) schon diskutierte Probleme über die Beschaffung von Gletscherdaten gestreift werden:

a) Jeder Gletscher muß eine *Adresse* haben. Zu diesem Zweck werden sowohl Name als auch Koordinaten angegeben. Zusätzlich wurde ein Gewässerkode nach den Richtlinien der UNESCO/IASH (2) ausgearbeitet (Fig. 2), da es zurzeit für die Schweiz noch keinen anerkannten Gewässerkode gibt. Die Numerierung beginnt bei den größten Flüssen, die ins Meer fließen. Diese tragen Indizes niedrigster Ordnung (Großbuchstaben), die Quellflüsse dagegen Indizes höchster Ordnung (Kleinbuchstaben). Beispielsweise gilt für das Einzugsgebiet der Reuß: A = Rhein, 5 = Aare, 1 = Reuß. Um die Übersicht zu wahren, wurde auf der Abbildung das System nicht in allen Gebieten detailliert eingezeichnet. Auf eine Darstellung der Einzugsgebiete vierter Ordnung wurde verzichtet. Es fehlt deshalb auch die Numerierung der Gletscher, die für jedes Einzugs-

gebiet höchster Ordnung einzeln vorgenommen wird. Das System berücksichtigt keine hydrologischen Flußcharakteristiken. Es verkörpert vielmehr eine bloße systematische Gliederung eines geographischen Raumes anhand des Flußnetzes.

- b) Oft fällt es schwer, die *Grenzen* eines Gletschers – und damit seine Fläche – zu bestimmen, wenn dieser mit Schutt oder Schnee bedeckt ist (Fig. 3). Schneefelder oberhalb des Bergschrundes erschweren beispielsweise die Abgrenzung der Eismassen im Akkumulationsgebiet. Im Ablationsgebiet verbirgt sich der Gletscherrand häufig unter Moränen oder Schutt. Verschiedene Arbeiten befassen sich mit diesem Problem (10, 11, 12).
- c) Das Bestimmen der *Firnlinie*, die wir als Schlüssel zum Klima der Gletscher betrachten, ist in manchen Fällen äußerst schwierig (Abb. 1). Je nach Witterungsverlauf können in einem Sommer mehrere Horizonte entstehen, wobei nicht einfach der deutlichste Abschmelzrand mit der Firnlinie gleichgesetzt werden darf. Wurde die Photographie nicht am Ende des Massenhaushaltjahres aufgenommen, so kann nur eine temporäre Schneegrenze erfaßt wer-



Figur 3. Schematische Darstellung der Abgrenzung eines Gletschers (nach Lit. 2). (Entwurf)



Abbildung 1. Verlauf der Schneegrenze auf dem Silvrettagletscher vom 5. September 1972

den. Es ist daher wichtig abzuklären, wie lange vor dem Einschneien ein Gletscher fotografiert wurde, und um wieviel sich die temporäre Schneegrenze in dieser Zeit noch verschoben hat. Durch Feldarbeit ist es möglich, diese Unsicherheit zu reduzieren, indem ausgewählte Gletscher wiederholt begangen werden. Zusätzlich gestatten es die Feldbeobachtungen, zusammen mit der Information einiger SAC-Hüttenwarte über die Verschiebung der Schneegrenze, den günstigsten Flugtermin zu ermitteln.

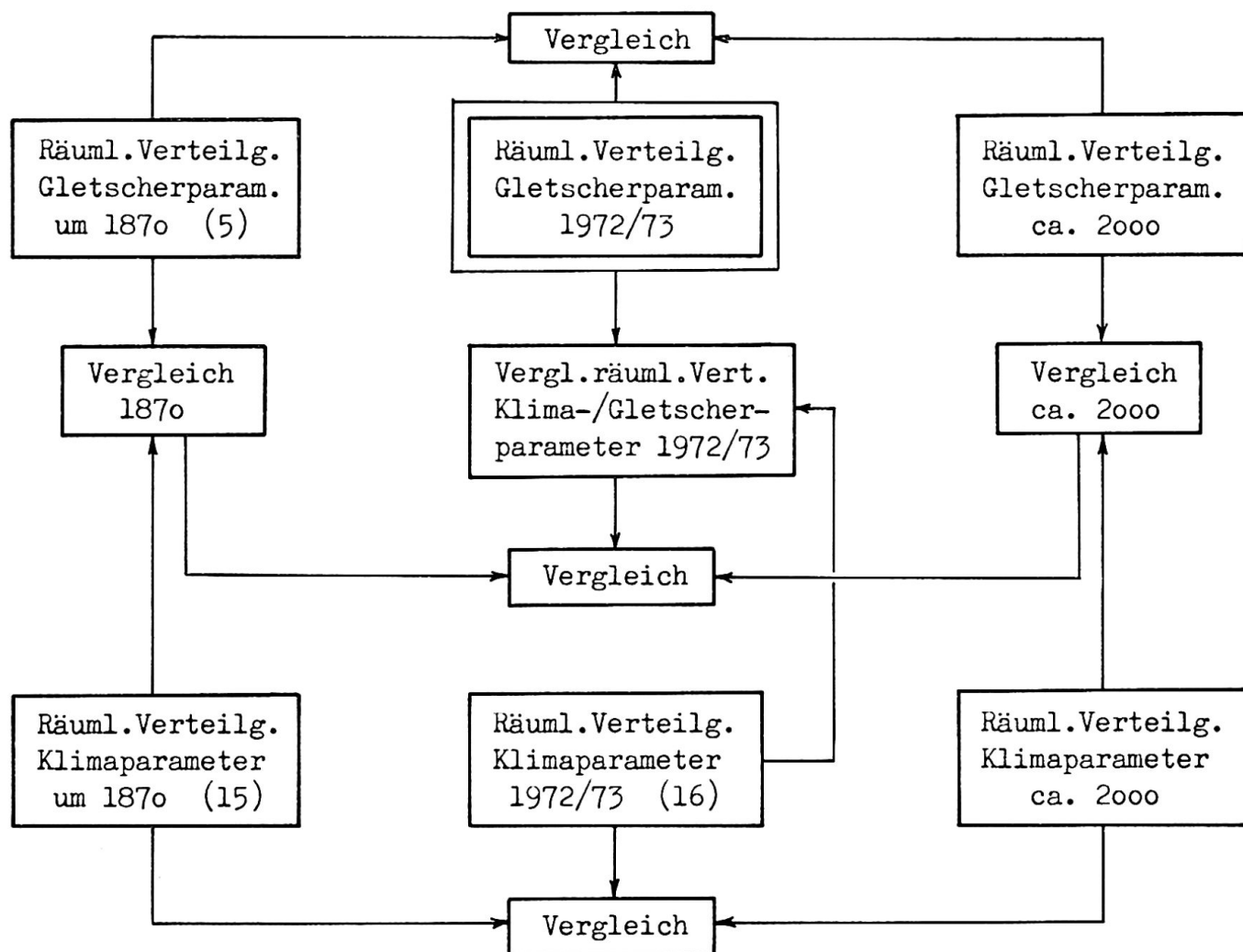
- d) Das *Volumen* und die mittlere Mächtigkeit sind im Bereich der Alpen nur für wenige Gletscher bekannt. Im gegenwärtigen Zeitpunkt ist es daher nur möglich, grobe Schätzungen für die übrigen Gletscher anzustellen.

Besondere Beachtung findet die Bestimmung der Gletschervolumen zurzeit in Österreich. Im IHD-Projekt «Gletscherseismik» werden mit geophysikalischen Methoden die Mächtigkeiten zahlreicher Gletscher ermittelt (13). In der Schweiz wurden bisher auf etwa zwanzig Gletschern Eisdeckenmessungen durchgeführt. Die Untersuchungen geben lediglich Aufschluß über

das Eisvolumen von einzelnen Teilbereichen der verschiedenen Gletscher. Die totalen Eisvolumen sind in keinem Fall bekannt. Deshalb soll mit Hilfe eines statistischen Modells der Zusammenhang zwischen Gletschertiefe und verschiedenen leicht erfaßbaren Parametern aufzuzeigen versucht werden (2, 14). Bei der Untersuchung einiger Gletscher der Ostalpen ergab sich ein multipler Korrelationskoeffizient zwischen Tiefe, Fläche und Höhe von 0,89 bei einer Standardabweichung von ± 12 Metern (9).

Beziehung zwischen Gletscher und Klima

Eine Voraussetzung für die Kenntnis der Beziehung zwischen Gletscher und Klima bildet das separate Studium der räumlichen Verteilung von Gletscherparametern einerseits und Klimaparametern andererseits. Auf diese Art ist es möglich, die Verteilungen dieser Größen für verschiedene Zeiten zu ermitteln und miteinander zu vergleichen (Fig. 4). Mit Hilfe des obengenannten Inventars wird in erster Linie die räumliche Verteilung verschiedener



Figur 4. Lösungsschema zum Problem der Beziehung zwischen Gletscher und Klima

Gletscherparameter in den Jahren 1972/1973 untersucht.

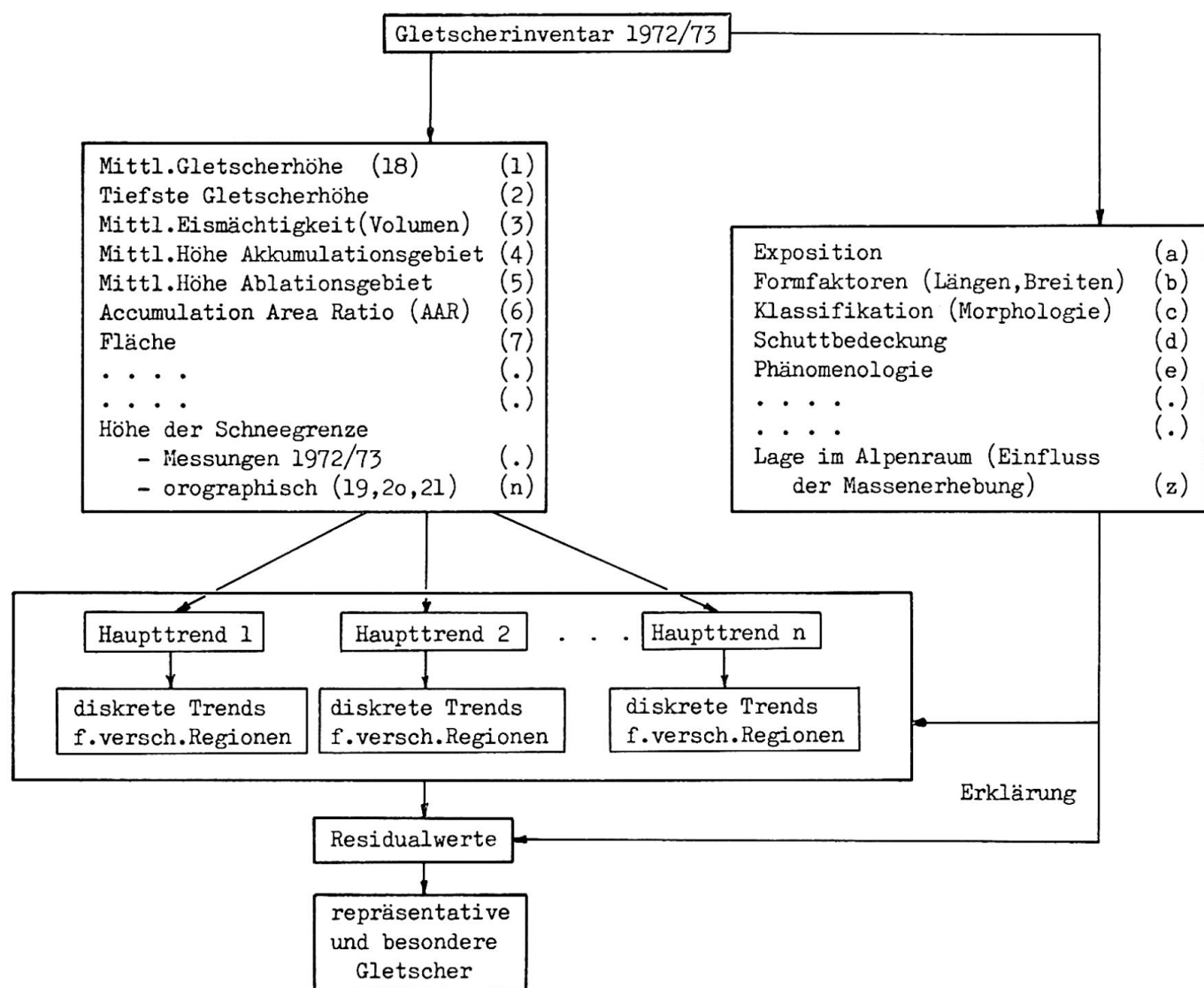
Die Handhabe zur quantitativen Erfassung einer räumlichen Verteilung liefert die «trend surface analysis». Sie wurde bisher im Bereich der physischen Geographie selten angewandt, ist hingegen schon lange Teil geologischer (17), geophysikalischer und kulturgeographischer Untersuchungsmethoden. Die «trend surface analysis» dient dazu, mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate eine Fläche durch einen dreidimensional verteilten Punkteschwarm zu legen, und so den großräumigen, von lokalen Schwankungen unabhängigen Trend einer Verteilung aufzuzeigen. Der Lösungsweg für das besprochene Problem ist übersichtsmäßig in Fig. 5 dargestellt. Die räumliche Verteilung jedes Parameters (1 bis n) im gesamten schweizerischen Alpenraum kann durch einen Haupttrend beschrieben und mit Hilfe der übrigen Parameter (a bis z) erklärt werden. Im Gegensatz dazu können für einzelne Regionen diskrete Trends berechnet werden, welche die räumliche Verteilung des untersuchten Parameters (z. B. mittlere Gletscherhöhe) in dieser Region besser beschreiben als

der für die ganze Schweiz berechnete Haupttrend. Die Aufteilung in Regionen erfolgt aufgrund einer kritischen Analyse des Haupttrends der ganzen Schweiz. Aus den Abweichungen der beobachteten Werte von den berechneten Werten der «trend surface» (Residualwerte) können wichtige lokale Effekte aufgespürt werden. Der Vergleich der einzelnen Trends und Residualwerte untereinander (Haupttrends und diskrete Trends) ist Gegenstand der Korrespondenzanalyse (22).

Durch die genannten Methoden werden sowohl repräsentative als auch durch ihre Eigenart auffallende Gletscher objektiv ausgewählt.

Literatur

- (1) Batisse M. (1964): Das Internationale Hydrologische Jahrzehnt. UNESCO-Kurier, Jg. 5, Nr. 7/8, p. 2–7.
- (2) UNESCO/LASH (1970): Perennial Ice and Snow Masses. A guide for compilation and assemblage of data for a world inventory. Technical Pa-



Figur 5. «Trend surface analysis» als Handhabe zur quantitativen Erfassung der räumlichen Verteilung von Gletscherparametern

pers in Hydrology, No. 1, UNESCO No. A 2486, Paris, 59 p.

(3) Forel F. A., Mercanton P.-L., Renaud A., Kasser P.: Les variations périodiques des glaciers des Alpes suisses (Die Gletscher der Schweizer Alpen), Hauptautoren: Forel 1880–1911, Mercanton 1912–1949, Mercanton und Renaud 1950–1954, Renaud 1955–1962, Kasser seit 1963; 1880 und 1881 in «L'Echo des Alpes», Genève, 1882–1926 im Jahrbuch des SAC, seit 1927 in «Die Alpen».

(4) Müller F., Ommanney, C. S. L. (1970): The contribution of glacier ice to the world water balance. A status on the world glacier inventory. International Association of Scientific Hydrology, Proceedings of the Reading Symposium on World Water Balance, Juli 1970, Vol. III, LASH Publication No. 94, p. 6–20.

(5) Jegerlehner J. (1903): Die Schneegrenze in den

Gletschergebieten der Schweiz. Gerlands Beiträge zur Geophysik, Bd. V, p. 486–566.

(6) Bula W. (ca. 1950): Interner Bericht der Eidg. Landestopographie, Bern, unveröffentlicht.

(7) Rindlisbacher J. (1955): Die Gletscherflächen der Schweiz. Interner Bericht des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft, Bern, 106 p., unveröffentlicht.

(8) Ommanney C. S. L. (1969): A study in glacier inventory. The ice masses of Axel Heiberg Island. Axel Heiberg Island Research Reports, Glaciology No. 3, McGill University, Montreal, 165 p.

(9) Müller, G. (1971): Pilot-study für ein Schweizerisches Gletscherinventar. Ausgeführt am Beispiel des Uri-Rotstock-/Spannort-/Titlis-Gebietes. Diplomarbeit Geogr. Institut ETH Zürich, 112 p. und Anhang; unveröffentlicht.

(10) Kasser P., Röthlisberger H. (1966): Some problems of glacier mapping experienced with the

1 : 10 000 map of the Aletsch Glacier. Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 3, No. 6, p. 799–809 (Symposium on glacier mapping, Ottawa, September 1965).

(11) Ostrem G., Arnold K. C. (1970): Ice-cored moraines in Southern British Columbia and Alberta, Canada, Geografiska Annaler, Vol. 52, Ser. : A, p. 120–128.

(12) Blachut T. J., Müller F. (1966): Some fundamental considerations on glacier mapping. Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 3, No. 6, p. 747–759 (Symposium on glacier mapping, Ottawa, September 1965).

(13) Hoinkes H. (1971): Österreichisches IHD-Projekt «Gletscherseismik». Z. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie, Bd. VII, p. 236–238.

(14) Steinhauser P. (1970): Zur Bestimmung der Mächtigkeit der Ostalpengletscher. Österreichische Wasserwirtschaft, Jg. 22, Heft 11/12, p. 305–309 (Beitrag Nr. 4 zum IHD-Projekt «Gletscherseismik» der Österreichischen Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik).

(15) Maurer J., Billwiler R., Hess C. (1909): Das Klima der Schweiz. Frauenfeld, 2 Bde., 302 p. und 217 p.

(16) Klimatologie der Schweiz (verschiedene Autoren). Beihefte zu den Annalen der MZA, 1959 ff.

(17) Krumbein W. C., Graybill F. A. (1965): An introduction to statistical models in geology. Mc

Graw-Hill, New York, 475 p. (speziell Kapitel 12 und 13).

(18) Kurowski L. (1891): Die Höhe der Schneegrenze mit besonderer Berücksichtigung der Finsteraarhorngruppe. Penck's Geographische Abhandlungen, Bd. V, Heft 1.

(19) Heß H. (1904): Die Gletscher. Vieweg, Braunschweig, 426 p.

(20) Höfer H. (1879): Gletscher- und Eiszeitstudien. Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften Wien, Math.-Nat. Klasse, No. 79, p. 331–367.

(21) Lichtenegger, N. (1938): Die gegenwärtige und die eiszeitliche Schneegrenze in den Ostalpen. Verhandlungen der III. Internationalen Quartärkonferenz, Wien 1936, p. 141–147, Wien.

(22) Berry B. J. L., Marble D. F., ed. (1968): Spatial Analysis. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., USA, 512 p. (speziell Robinson, A. H.: Mapping the correspondance of isarithmic maps, p. 301–312).

Adresse der Verfasser:

Geographisches Institut der ETHZ
Sonneggstraße 5, 8006 Zürich