**Zeitschrift:** Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Annuaire de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative

**Herausgeber:** Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

**Band:** 158 (1978)

**Artikel:** Rezente Gletscherveränderungen in den Schweizer Alpen

**Autor:** Kasser, Peter

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-90744

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 16.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

# Rezente Gletscherveränderungen in den Schweizer Alpen

Peter Kasser

**Zusammenfassung**

Die von François Alphonse Forel im Jahre 1880 begonnenen systematischen jährlichen Beobachtungen an Schweizer Gletschern wurden nach der Gründung der Gletscherkommission der SNG im Jahre 1893 zu deren zentraler Aufgabe, die sie heute zusammen mit der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich weiterführt. Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die Entwicklung unserer Gletscher seit etwa der Mitte des 19. Jahrhunderts. Einer Einleitung mit der Vorgeschichte folgen die Hauptresultate über die Veränderungen der Längen, Flächen, Dikken und Massen. Je ein Kapitel führt in die Beziehungen zwischen den Gletscherveränderungen und dem Abfluss sowie zwischen den Gletscherveränderungen und dem Klima ein. Praktische Beispiele begründen in den Schlussbemerkungen die Motivation zu langfristigen Erhebungen an Gletschern in einem Beobachtungsnetz.

**Résumé**

Les observations systématiques des variations annuelles des glaciers suisses initiées en 1880 par François Alphonse Forel sont devenues la tâche principale de la commission des Glaciers fondée en 1893 par la SHSN. Aujourd'hui cette commission continue les mensurations dans le réseau d'observations en collaboration avec les Laboratoires hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques de l'Ecole Polytechnique Fédérale à Zurich. Ce rapport donne un aperçu des variations de nos glaciers depuis le milieu du 19e siècle environ. Une introduction historique est suivie de données principales sur les variations de longueur, de surface, d'épaisseur et de volume. Les relations entre les variations glaciaires et l'écoulement, respectivement le climat sont discutées dans les chapitres suivants. En conclusion on justifie à l'aide de quelques exemples la nécessité de continuer à long terme les mensurations glaciaires dans un réseau d'observations.

Einleitung 106 – Die Längenänderungen 107 – Die Flächenänderungen 115 – Die Dickenänderungen 117 – Die Massenänderungen 118 – Gletscherveränderungen und Abfluss 124 – Gletscherveränderungen und Klima 127 – Schlussbemerkungen 135.

## 1. Einleitung

Während Jahrhunderten waren die Gletscher kleiner als heute. Vom Grossen Aletschgletscher ist bekannt, dass er vor etwa 750 Jahren den heutigen Stand überschritt und seither nie mehr kleiner war (Oeschger und Röthlisberger 1961). Infolge der Klimaverschlechterung vor allem in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts stiessen die Gletscher der Alpen allgemein kräftig vor und erreichten die Maximalstände der sogenannten Kleinen Eiszeit erstmals schon nach wenigen Jahrzehnten. Verbunden mit dieser Entwicklung waren Missernten und wirtschaftliche Not sowie vereinzelte Gletscherkatastrophen, wie der Seeausbruch im Val de Bagnes, der im Jahre 1595 einen Teil von Martigny zerstörte und die Gletscherlawine, welche zwei Jahre später das Dorf Hohmatten am Simplonpass auslöschte (Lütschg 1926). Die Kleine Eiszeit dauerte bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts. Die Gletscher erreichten ihre Maximalstände nochmals um 1820 und 1850 (Patzelt 1973, Zumbühl 1975). Dies ist der Ausgangspunkt unserer Betrachtungen, die sich vor allem auf langfristige Beobachtungen stützen, um die rezenten Gletscherveränderungen in den Schweizer Alpen und die Beziehungen zur

Entwicklung des Klimas im Überblick zu beschreiben. Dabei soll jeweilen auch auf die Motivation für die Messungen eingegangen werden.

César Bordier in Genf regte im Jahre 1773 wohl als Erster an, langfristig periodisch wiederholte Gletschermessungen durchzuführen (Bordier 1773, 276-277). Es dauerte aber noch rund 100 Jahre, bis dieser Gedanke ernsthaft aufgegriffen wurde. 1868 stellte Eugen Rambert an der Jahresversammlung des Schweizerischen Alpenclubs (SAC) den Antrag, der SAC möge bei der systematischen wissenschaftlichen Erforschung der Gletscher mithelfen und sich zu diesem Zwecke mit der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft (SNG) in Verbindung setzen. Diese beschloss in ihrer Generalversammlung 1869 in Solothurn, mitzuwirken. Aus den Beratungen des aus je drei Mitgliedern des SAC und der SNG gebildeten «Gletscherkollegiums» (Heim 1915) ging bis 1873 folgendes Arbeitsprogramm hervor:

1. Es soll eine Instruktion für Gletscherbeobachtungen hergestellt werden, welche auch die Laien im SAC zu nützlichen Beobachtungen anleiten kann.
2. In einem Gletscherbuch sollen alle schon vorhandenen und künftigen Beobachtungen über die einzelnen Gletscher der Schweiz in Wort und Bild zusammengetragen werden.
3. Spezielle Gletscherbeobachtungen, welche von einzelnen Naturforschern vorgeschlagen und als nützlich befunden werden, sollen unterstützt werden.
4. An einem bestimmten Gletscher sollen eingehende allseitige topographische Aufnahmen und Vermessungen über die Veränderungen der Grösse, die Bewegungen etc. durchgeführt werden.

Die «Instruktion für die Gletscherreisenden» ist im Jahrbuch 1871 des SAC erschienen (Schweizer Alpenklub 1872). Das Gletscherbuch wurde durch J. Siegfried bearbeitet, nach seinem Tode im Jahre 1879 aber nicht weitergeführt. Zu den speziellen Gletscherbeobachtungen leistete Albert Heim einen methodischen Beitrag zur Messung der Gletscherbewegung. Als zentrales Untersuchungsobjekt wurde 1874 der Rhonegletscher gewählt. Das im Jahre 1916 erschienene Werk über die «Vermessungen am Rhonegletscher 1874-1915» ist eine grundlegende Arbeit in der Glaziologie (Mercanton 1916). Bei den Messungen wirkte das Eidgenössische topographische Büro massgebend mit.

Neben der rein wissenschaftlichen Neugierde gaben technische Probleme und Klimafragen immer mehr den Impuls für Gletscheruntersuchungen. Überschwemmungen des Genfersees im Jahre 1880 gaben den Anlass zum «Procès du Léman» vor Bundesgericht. Die Waadt machte Einbauten der Genfer in die Rhone für die Spiegelerhöhung verantwortlich, während die Genfer diese auf aussergewöhnlich grosse Schmelzwasserabflüsse der Walliser Gletscher zurückführten. Um diese Frage abzuklären, begann François Alphonse Forel mit den jährlichen Zungenmessungen und dem Aufbau des noch heute betriebenen Beobachtungsnetzes. Im Jahre 1893 übernahm die nach der Auflösung des «Gletscherkollegiums» neu gegründete Gletscherkommission der SNG die langfristige jährliche Beobachtung der Lageänderung der Gletscherzungen als zentrale Aufgabe. Johannes W. F. Coaz, Eidgenössicher Oberforstinspektor und Mitglied der Kommission, gewann die kantonalen Forstdienste zur Mitarbeit. Einen ganz entscheidenden Beitrag zur Bestimmung der Gletscherveränderungen leistete schon seit dem Ausgang der Kleinen Eiszeit das von Guillaume Henri Dufour 1838 gegründete Eidgenössiche Topographische Bureau, das heutige Bundesamt für Landestopographie (Huber 1979, Oberli 1979), durch die Aufnahme und Herausgabe seiner Kartenwerke, sowie in neuerer Zeit auch die Eidgenössische Vermessungsdirektion durch ihre Luftaufnahmen.

## Die Längenänderungen

In den hochgelegenen Firngebieten hat sich die Lage der Bergschründe seit der kleinen Eiszeit meist nur wenig verändert. Deshalb kann die Längenänderung der Gletscher mit guter Näherung durch die Lageänderung der Gletscherenden angegeben werden. Diese ist definiert durch die Flächenänderung an der Front des Gletschers dividiert durch die Breite des Kontrollstreifens an der eingemessenen Front (Kasser 1970).

In Abbildung 1 ist der Längenschwund von je vier ausgewählten Gletschern aus den

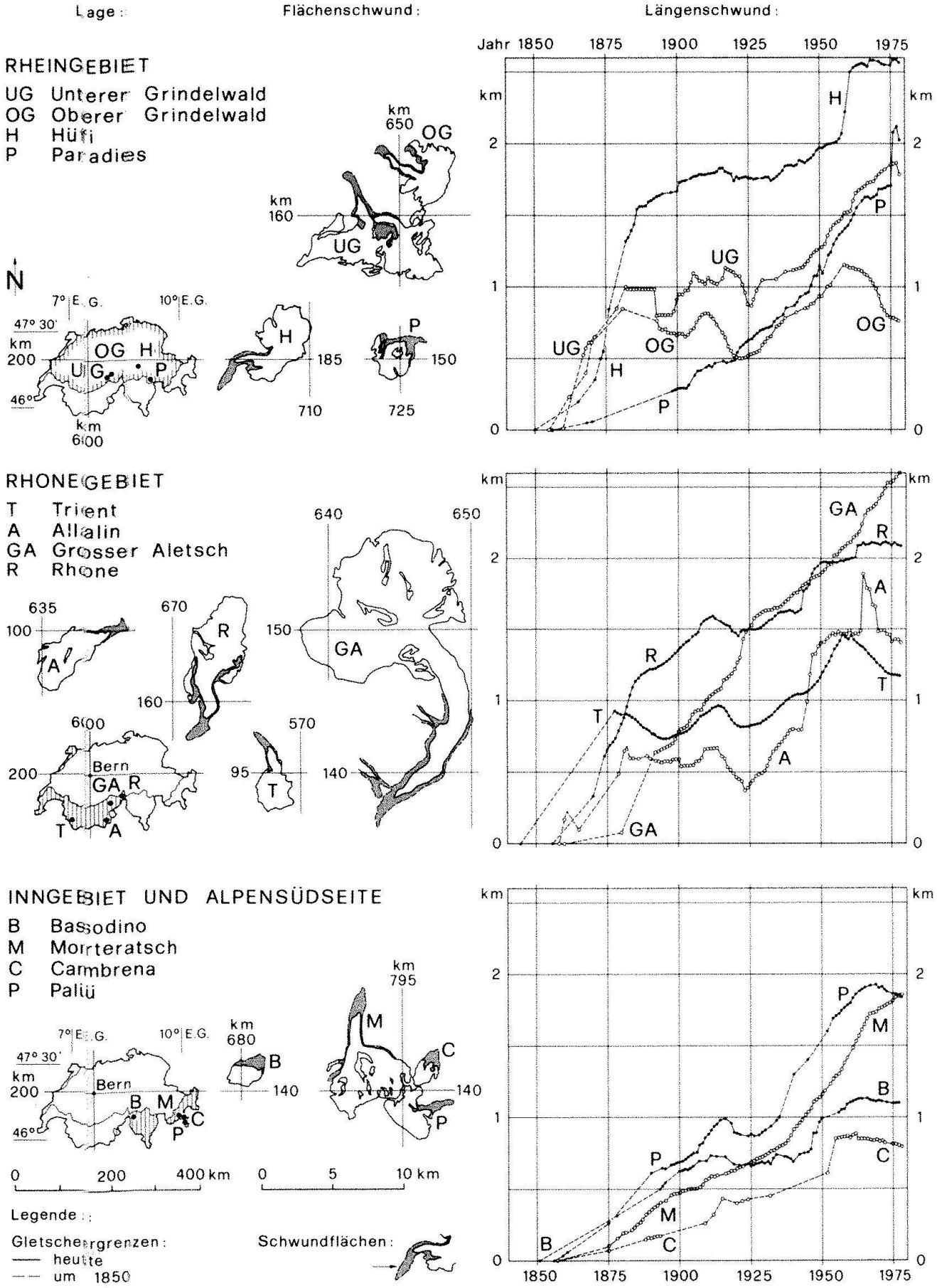



*Abb. 1.* Längenänderung einiger Schweizer Gletscher seit dem letzten Maximalstand um die Mitte des 19. Jahrhunderts.

Abflussgebieten des Rheins und der Rhone sowie aus den Gebieten südlich davon nach der Bearbeitung durch Markus Aellen aufgezeichnet. Als Ausgangspunkt dient für alle zwölf Gletscherenden der an den Moränen festgestellte Maximalstand um die Mitte des 19. Jahrhunderts. Die graphische Darstellung zeigt eindrücklich das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Gletscher. Der Längenschwund bis heute liegt etwa zwischen 0,7 und 2,6 km. Einzelne Gletscher, wie Paradies, Grosser Aletsch und Morteratsch sind andauernd kürzer geworden, andere rücken seit einigen Jahren vor und sind bereits um 1920, einzelne davon auch kurz vor 1900, vorgestossen.

Die Ausdehnung der Gletscher ist durch das Zusammenspiel von Klima und Topographie des Einzugsgebietes bedingt. Jeder Gletscher ist dauernd bestrebt, sich den wechselnden klimatischen Bedingungen anzupassen. Morphologische Parameter wie beispielsweise die Form und Grösse, die Verteilung der Flächen auf die Höhenstufen, das Längenprofil und die Exposition bestimmen bei vorgegebenen Klimabedingungen die Ernährung, den Abtrag und das Fliessverhalten eines Gletschers und damit auch die Reaktionszeit seines Zungenendes auf Klimaschwankungen. Der extreme Längenschwund der Gletscher Rhone (338 m von 1943–1950) und Cambrena (245 m von 1952–1955) ist durch Steilstufen bedingt, auf denen der «Rückzug» durch zahlreiche Eisabbrüche beschleunigt worden ist. Dasselbe gilt für den Allalin für normale Abbrüche (524 m von 1943–1947) und für den Gletschersturz am 30. August 1965. Das an diesem Tag freigegebene Gelände von 400 m Länge wurde innert fünf Jahren vom Gletscher wieder besetzt. Der Schwund des Hüfigletschers um das Jahr 1960 steht mit der Bildung des Zungenendsees im Zusammenhang.

Die Lageskizzen in Abbildung 1 zeigen Form und Grösse von zwölf Gletschern sowie das seit der Kleinen Eiszeit freigegebene Gelände, das sich in der Natur meist durch ein Band heller Felsen oder Moränenhänge, durch spärlich bewachsene Moränenkämme, oder in tieferen Lagen zuweilen auch durch jungen Wald von der Umgebung abhebt.

In Abbildung 2 sind die Gletscher eingetra-

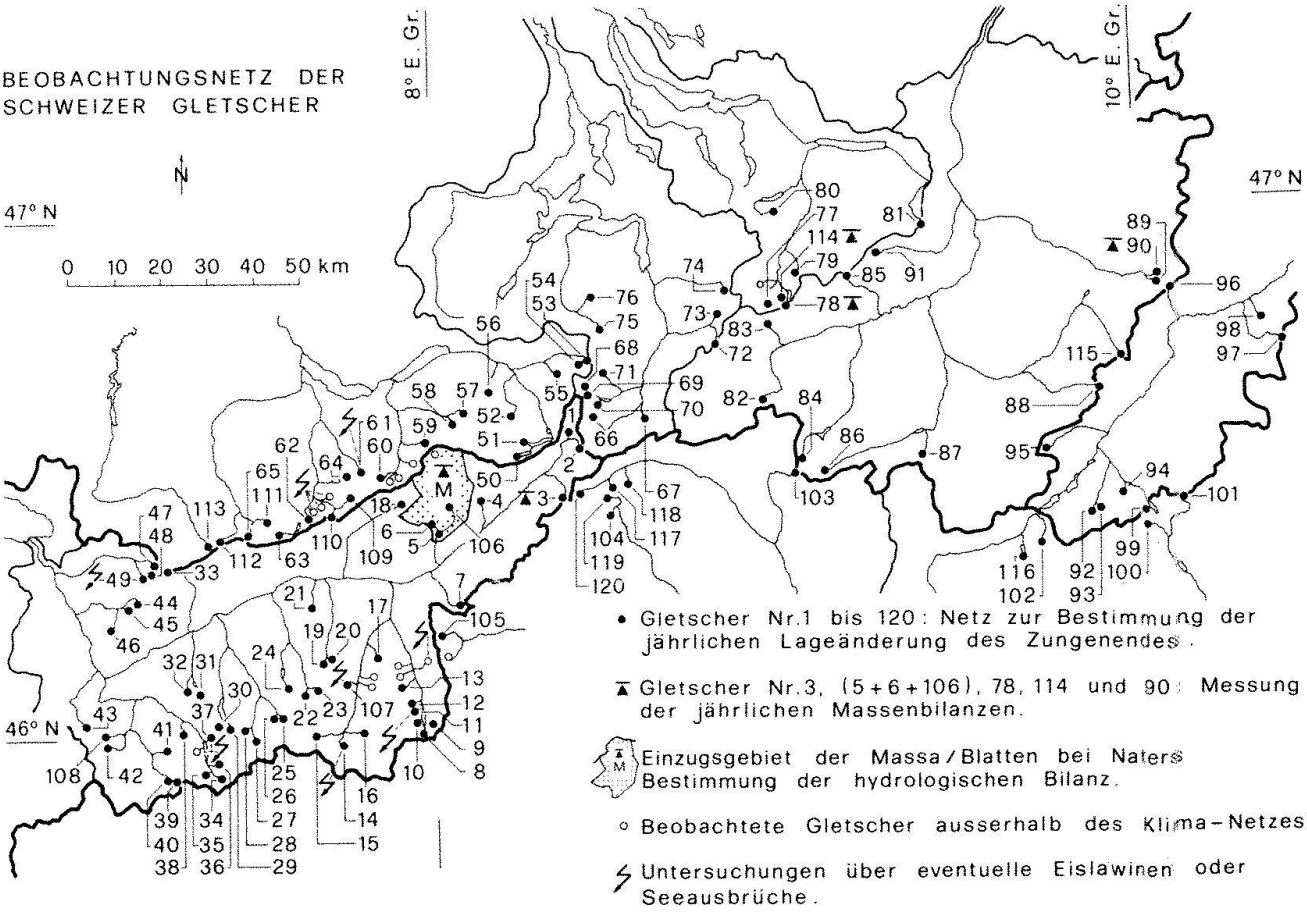



*Abb. 2.* Beobachtungsnetz für die Gletschermessungen.

gen, an denen langfristig systematische periodisch wiederholte Messungen durchgeführt werden. Die Namen der Gletscher Nr. 1 bis 120 des Beobachtungsnetzes für die Bestimmung der jährlichen Lageänderungen des Zungenendes sind in Tabelle 1 zu finden, samt Angaben über die Fläche, mittlere Neigung, Meereshöhe des Gletscherendes und die Exposition des Ablationsgebietes. Ferner sind die Längenänderungen der einzelnen Gletscher in den Jahren 1975/76 bis 1977/78 eingetragen. Die Gletschernummern in der Kolonne Gl. stimmen mit denjenigen in Abbildung 2 überein und beziehen sich auf das Netz der Gletscherkommission. Die Genauigkeit für die Messung der Lageänderung eines Zungenendes variiert mit der Messmethode und den Interpretationsschwierigkeiten im Einzelfall. Wird eine genügend grosse Anzahl zweckmässig ausgewählter Punkte der Gletscherfront eingemessen, sollte der Maximalfehler der mittleren Lageänderung des Zungenendes den Wert von 1 Meter in der Regel nicht überschreiten.

*Tab. 1.* Die Gletscher des Beobachtungsnetzes mit einigen morphologischen Parametern, sowie die Längenänderungen in den Jahren 1975/76, 1976/77 und 1977/78.

| Gletscher Nr. Gl. (1) | Name (2) | Morphologische Parameter (3) F km² | a % | $H_T$ m ü.M. | Exp. | Längenänderung in Metern im Jahre (4) 1975/76 | 1976/77 | 1977/78 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Einzugsgebiet der Rhone | | | | | | | |
| 1 | Rhone | 17.38 | 14.5 | 2140 | S | − 18.3 | + 15.4 | + 7.4 |
| 2 | Mutt | 0.57 | 38.2 | 2580 | NW | − 2.1 | + x(sn) | + 19.3[2a] |
| 3 | Gries (Aegina) | 6.60 | 15.8 | 2380 | NE | − 35.6 | − 4.7 | − 5.3 |
| 4 | Fiescher | 33.06 | 16.0 | 1640 | S | − 20.6 | − 12.8 | + 19.4 |
| 5 | Grosser Aletsch | 86.76 | 10.6 | 1520 | S | − 9.8 | − 27.1 | − 28.5 |
| 106 | Mittelaletsch | 8.50 | 32.9 | 2260 | SE | − 67.6 | − 10.2 | + 4.4 |
| 6 | Oberaletsch | 21.71 | 18.5 | 2180 | SE | − 7.2 | st | − 1.6 |
| 7 | Kaltwasser | 1.85 | 46.2 | 2620 | W | − 10.7[5a] | + 62 | + 35.5 |
| 8 | Tälliboden | 0.26 | 37.5 | 2640 | NW | − 22.5 | st(sn) | + x |
| 9 | Ofental | 0.40 | 40.0 | 2660 | N | n | st(sn) | + x |
| 10 | Schwarzberg | 6.20 | 21.4 | 2660 | NE | − 2.3 | + 13.1 | + 14.3 |
| 11 | Allalin | 9.94 | 28.6 | 2340 | E | − 17.1 | + 3.5 | + 20.5 |
| 12 | Kessjen | 0.61 | 42.2 | 2840 | NE | − 12.4 | st(sn) | + x |
| 13 | Fee (Nord) | 16.66 | 45.5 | 2040 | NE | + 7 ca. | + 46.6[4a] | + x |
| 14 | Gorner | 68.86 | 17.6 | 2120 | NW | − 47.8 | − 3.0 | − 12.9 |
| 15 | Zmutt | 16.98 | 22.5 | 2280 | E | − 46 | − 29.5 | − 53.5 |
| 16 | Findelen | 19.09 | 20.2 | 2320 | W | − 6.3 | − 22.0 | − 3.0 |
| 107 | Bis | 4.79 | 64.2 | 2060 | E | st | + x | + x |
| 17 | Ried | 8.26 | 35.2 | 2060 | NW | − 4.3 | − 4.7 | − 3.2 |
| 18 | Lang | 10.03 | 22.9 | 2140 | SW | − 17 | − 33 | + 26 |
| 19 | Turtmann-West | 6.98 | 33.7 | 2260 | N | − 3.8 | − 3.1 | − 2.8 |
| 20 | Brunegg | 6.12 | 35.9 | 2440 | NW | − 3.3 | + 5.2 | − 3.1 |
| 21 | Bella Tola | 0.31 | 50.0 | 2680 | N | − 23.9 | − 10.1 | + 7.7 |
| 22 | Zinal | 16.24 | 26.8 | 2000 | N | − 31.6 | − 25.2 | + 22.4 |
| 23 | Moming | 5.77 | 42.1 | 2460 | NW | n | + 14[2a] | + 0.5 |
| 24 | Moiry | 6.11 | 25.0 | 2420 | N | − 6.5 | − 0.5 | − 2.5 |
| 25 | Ferpècle | 9.79 | 25.3 | 2140 | N | + 3.8 | + 5.2 | + 5 |
| 26 | Mont Miné | 10.89 | 21.5 | 1980 | N | − 6.2 | + 19 | + 8 |
| 27 | Bas d'Arolla | 6.02 | 27.6 | 2140 | N | + 6 | + 8 | + 8 |
| 28 | Tsidijore Nouve | 3.12 | 30.0 | 2280 | NE | + 10 | + 16 | + 5 |
| 29 | Cheillon | 4.73 | 29.0 | 2660 | N | − 19.0 | − 7.0 | − 5.7 |
| 30 | L'tn Darrey | 1.86 | 47.5 | 2560 | NE | − 36.5 | − 0.7 | + x |
| 31 | Grand Désert | 1.85 | 20.9 | 2760 | N | − 4 | − 13.0 | n |
| 32 | Mont Fort | 1.10 | 30.0 | 2700 | N | − 6 | − 2.6 | n |
| 33 | Tsanfleuron | 3.78 | 16.1 | 2440 | E | − 15 | − 48 | + 16 |
| 34 | Otemma | 16.55 | 15.8 | 2460 | SW | − 17.5 | − 18 | − 5.3 |
| 35 | Mont Durand | 7.59 | 32.0 | 2280 | E | − 9 | − 5 | − 13 |
| 36 | Breney | 9.80 | 19.7 | 2560 | SW | − 30 | − 5.5 | − 8 |
| 37 | Giétro | 5.94 | 23.7 | 2540 | NW | − 0.4 | + 6.1 | + 3.8 |
| 38 | Corbassière | 17.44 | 21.2 | 2220 | N | 0 | 0 | + 7 |
| 39 | Valsorey | 2.34 | 32.2 | 2400 | N | + 3.5 | + 1.2 | + 5 |
| 40 | Tseudet | 1.73 | 40.7 | 2500 | N | − 9.0 | − 4.0 | − 26.0 |

| Nr. Gl. (1) | Gletscher Name (2) | Morphologische Parameter (3) F km² | a % | $H_T$ m ü.M. | Exp. | Längenänderung in Metern im Jahre (4) 1975/76 | 1976/77 | 1977/78 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 41 | Boveyre | 1.99 | 40.0 | 2620 | NW | + 7.5 | + 2.6 | + 4 |
| 42 | Saleina | 5.03 | 33.1 | 1760 | NE | + 8.5 | + 6.5 | + 6.5 |
| 108 | Orny | 1.54 | 22.0 | 2640 | E | n | + 30[6a] ca. | n |
| 43 | Trient | 6.58 | 33.8 | 1800 | N | + 2.8 | + 4.6 | + 3.2 |
| 44 | Paneyrosse | 0.45 | 51.4 | 2400 | N | + 6.4[3a] | – 6.7 | + 35.8 |
| 45 | Grand Plan Névé | 0.20 | 50.0 | 2360 | N | + 11.2[3a] | – 8.2 | + 39.5 |
| 46 | Martinets | 0.59 | 30.0 | 2140 | NE | – x | n | + n |
| 47 | Sex Rouge | 0.72 | 25.0 | 2660 | NW | – 7.2 | + 3.0 | + 3.0 |
| 48 | Prapio | 0.37 | 55.6 | 2500 | NW | – 4 ca. | + 6.0 | + 11.0 |
| 49 | Pierredar | 0.67 | 58.0 | 2380 | N | – x | n | + x[2a] |
| | Einzugsgebiet der Aare | | | | | | | |
| 50 | Oberaar | 5.23 | 21.5 | 2300 | E | 0 | + 7.0 | + 6.2 |
| 51 | Unteraar | 28.41 | 16.1 | 1900 | E | – 16.5 | – 8.9 | – 32.8 |
| 52 | Gauli | 13.70 | 21.5 | 2140 | E | – 12.2 | – 5 | – 1 |
| 53 | Stein | 6.52 | 32.8 | 1960 | N | + 6 | + 7 | + 21.5 |
| 54 | Steinlimmi | 2.21 | 43.0 | 2140 | N | – 17 | + 2 | + 61 |
| 55 | Trift | 17.07 | 23.4 | 1720 | NW | – x | – x | st |
| 56 | Rosenlaui | 6.20 | 35.4 | 1860 | NE | n | n | st[4a] |
| 57 | Oberer Grindelwald | 10.07 | 45.5 | 1240 | NW | 0 | + 12 | + 6.3 |
| 58 | Unterer Grindelwald | 21.71 | 31.6 | 1260 | N | – 8 | – 4 | + 75 |
| 59 | Eiger | 2.27 | 73.1 | 2200 | NW | + 10.0 | + 8.4 | + 8.9 |
| 60 | Tschingel | 6.18 | 33.2 | 2240 | NE | + 2.4 | + 2.3 | + 10.4 |
| 61 | Gamchi | 1.73 | 31.9 | 1980 | N | – 2.8 | – 2.7 | + 6.6 |
| 109 | Alpetli | 14.02 | 13.8 | 2320 | SW | 0 | + 2.8 | + 1.6 |
| 110 | Lötschen | 0.91 | 28.0 | 2320 | N | n | n | n |
| 62 | Schwarz | 1.60 | 36.9 | 2220 | NW | – 4.0 | + 2.5 | – 0.8 |
| 63 | Lämmern | 3.35 | 28.0 | 2540 | E | – 16.0 | + 1.5 | + 4.3 |
| 64 | Blümlisalp | 2.98 | 50.3 | 2200 | NW | + x[2a] | + x | + x |
| 111 | Ammerten | 1.89 | 31.4 | 2360 | NW | – 9.8 | – 0.8 | + 1.3 |
| 65 | Rätzli | 9.80 | 16.0 | 2320 | NW | – 17.9 | – 2 | + 1.8 |
| | Einzugsgebiet der Reuss | | | | | | | |
| 66 | Tiefen | 3.17 | 27.1 | 2480 | SE | – 7.3 | + 5 | + 4 |
| 67 | St. Anna | 0.44 | 35.6 | 2580 | N | + 4.5 | + 4 | + 1 |
| 68 | Chelen | 3.15 | 39.4 | 2120 | SE | + 10.8 | + 5.4 | + 9.3 |
| 69 | Rotfirn (Nord) | 1.21 | 59.1 | 2000 | NE | + 3.8 | – 6.0 | + 2.8 |
| 70 | Damma | 6.32 | 44.8 | 2040 | NE | + 8.7 | + 5.2 | + 13.0 |
| 71 | Wallenbur | 1.70 | 46.4 | 2260 | SE | + 3.5[2a] | – 7.2 | + 12.5 |
| 72 | Brunni | 2.99 | 32.4 | 2340 | NE | – 25.5 | + 0.5 | + 49 |
| 73 | Hüfi | 13.73 | 21.1 | 1640 | SW | – 38 | 0 | + 18 |
| 74 | Griess | 2.48 | 83.1 | 2160 | N | – 5.4 | + 1.0 | + x |
| 75 | Firnälpli-Ost | 0.54 | 63.6 | 1880 | N | – 38.8 | + 22 | + 26.1 |
| 76 | Griess (Griessen) | 1.27 | 35.4 | 2420 | W | n | – 1.8[2a] | n |
| | Einzugsgebiet der Limmat | | | | | | | |
| 77 | Biferten | 2.86 | 41.4 | 1880 | NE | – 4.6 | + 4.1 | + 5.2 |
| 78 | Limmern | 2.39 | 40.0 | 2260 | E | – 11.4 | – 0.7 | + 3.7 |
| 114 | Plattalva | 0.73 | 38.2 | 2560 | E | – 7.6 | st(sn) | + 6 ca. |
| 79 | Sulz | 0.20 | 40.0 | 1920 | N | + 4.4 | – 2.0 | + 13.5 |
| 80 | Glärnisch | 2.09 | 26.1 | 2320 | W | + 4.0 | + 5.6 | + 1.2 |
| 81 | Pizol | 0.31 | 50.0 | 2480 | N | – 43.6 | + 9.0 | + 80.6 |
| | Einzugsgebiet des Rheins bis zum Bodensee | | | | | | | |
| 82 | Lavaz | 1.76 | 30.0 | 2280 | N | n | – 108.7[2a] | + 92.3 |
| 83 | Punteglias | 0.93 | 33.0 | 2340 | S | – 1.0 | – 3.5 | – 10 |
| 84 | Lenta | 1.38 | 42.3 | 2300 | N | – 7.0 | – 12.3 | – 2.8 |
| 85 | Vorab | 2.51 | 19.0 | 2580 | E | – 12.7 | + 11.3 | + x |
| 86 | Paradies | 4.60 | 28.9 | 2360 | NE | – 371 | – 43 | + 94.3 |
| 87 | Suretta | 1.17 | 45.0 | 2240 | N | – 128 | + 71 | – 14.4 |
| 88 | Porchabella | 2.59 | 28.0 | 2620 | N | – 20.0 | – 8.5 | – 3.5 |
| 115 | Scaletta | 0.66 | 54.5 | 2500 | N | n | n | n |
| 89 | Verstankla | 1.06 | 33.0 | 2400 | NW | – 6.5 | + 6.5 | + 6.5 |

| Gletscher Nr. Gl. (1) | Name (2) | Morphologische Parameter (3) F km² | α % | $H_T$ m ü.M. | Exp. | Längenänderung in Metern im Jahre (4) 1975/76 | 1976/77 | 1977/78 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 90 | Silvretta | 3.25 | 20.6 | 2440 | W | − 1.8 | − 10.2 | + 4.1 |
| 91 | Sardona | 0.38 | 57.1 | 2390 | E | − 9.6 | + 2.2 | + 6.6 |
| | Einzugsgebiet des Inn | | | | | | | |
| 92 | Roseg | 8.72 | 26.5 | 2180 | N | + 13.4 | n | − 0.8[2a] |
| 93 | Tschierva | 6.83 | 36.4 | 2180 | NW | − 34.5 | n | + 10.7[2a] |
| 94 | Morteratsch | 17.15 | 25.6 | 2100 | N | − 26.8 | − 5.2 | − 5.1 |
| 95 | Calderas | 1.12 | 29.0 | 2720 | NE | n | − 33.2[3a] | − 22.0 |
| 96 | Tiatscha | 2.11 | 28.3 | 2500 | S | 0 | + 1.2 | + 3.5 |
| 97 | Sesvena | 0.67 | 35.0 | 2720 | N | − 2.5 | + 1.6 | + 2.4 |
| 98 | Lisachana | 0.21 | 46.7 | 2740 | NW | n | st(sn) | + x |
| | Einzugsgebiet der Adda | | | | | | | |
| 99 | Cambrena | 1.72 | 38.4 | 2500 | NE | + 2.5 | + 8.5 | + 8 |
| 100 | Palü | 6.62 | 38.5 | 2320 | E | + 3.9 | + 8.3 | + 10 |
| 101 | Paradisino | 0.55 | 38.0 | 2800 | W | sn | n | + x |
| 102 | Forno | 8.74 | 17.4 | 2180 | N | n | − 27.0[2a] | − 11.7 |
| | Einzugsgebiet des Tessin | | | | | | | |
| 120 | Corno | 0.27 | 54.3 | 2500 | N | − 12.8 | + 40 ca. | n |
| 117 | Valleggia | 0.59 | 35.0 | 2400 | NE | + 0.1 | + 40 ca. | n |
| 118 | Val Torta | 0.17 | 43.3 | 2480 | N | − 44.0 | + 40 ca. | n |
| 103 | Bresciana | 0.87 | 53.3 | 2760 | W | n | st(sn) | 0 |
| 119 | Cavagnoli | 1.32 | 14.8 | 2520 | NE | — | sn | n |
| 104 | Basodino | 2.30 | 48.8 | 2440 | NE | − 3 | + x | + x |
| 105 | Rossboden | 1.89 | 50.8 | 2020 | NE | − 2 | − 0.7 | + 12.3 |

Bemerkungen:

(1) Nummer im Beobachtungsnetz Gl. der Gletscherkommission der SNG und der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH-Zürich (vergleiche Abbildung 2)

(2) Name im Beobachtungsnetz Gl.

(3) Die Werte für F, α, $H_T$ und Exp. sind dem Inventar 1973 entnommen (Müller, F., Caflisch, T. und Müller, G. 1976), mit einigen Anpassungen an das Beobachtungsnetz Gl. (Kasser, P. und Aellen, M. 1976).

F = Gletscherfläche — $H_T$ = Meereshöhe des Gletscherendes
α = mittlere Neigung — Exp. = Esposition des Zehrgebietes

(4) Wenn die Änderung für eine Periode von mehreren Jahren gilt, ist die Anzahl Jahre angegeben wie im folgenden Beispiel: − 13.6[6a] = Rückzug von 13.6 Metern in 3 Jahren. Ferner bedeuten:

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | nicht beobachtet | + | im Vorstoss | − | im Rückzug | ? | Resultat unsicher |
| sn | eingeschneit | st | stationär | x | Betrag nicht beziffert | ca | ungefährer Wert |

Welche jährlichen Längenänderungen sind als klein, mässig, gross oder sehr gross zu bezeichnen? Als Kriterium hiefür sollen alle Werte der Grösse nach geordnet und in zwölf gleichbesetzte Klassen, sogenannte Duodezile, eingeteilt werden. Dies wurde für die Gesamtheit von 7 Messjahren ausgeführt. In Tabelle 2 sind die Werte für die Duodezile sowie die Abweichungen vom 6. Duodezil oder Medianwert zusammengestellt. In der letzten Kolonne wird die Abweichung der Längenänderung vom Medianwert für die verschiedenen Klassen bewertet. Die äussersten zwei Klassen enthalten je $1/12$ aller Werte, die anderen je $1/6$. Werte ausserhalb des 1. beziehungsweise 11. Duodezils sind ungewöhnlich und deshalb in der Regel durch besondere Umstände bedingt. Gründe für sehr grosse Schwundbeträge können sein: Gletschersturz, durch Eislawinen beschleunigter Rückzug über eine Steilstufe, Lostrennen des Gletscherendes infolge Abschnürens durch die Schmelze, Abschmelzen eines grösseren, sehr dünn gewordenen Gletscher-

*Tab. 2.* Duodezilwerte und Abweichungen vom Medianwert für jährliche Längenänderungen von rund 100 Gletscherzungen

| Duodezilwerte[1]) in m | | Abweichung vom Medianwert in m | Bewertung der Abweichung vom Medianwert |
|---|---|---|---|
| Minimum | – 371.0 | – 365.8 | sehr gross |
| 1. Duodezil | – 33.0 | – 27.8 | |
| 2. Duodezil | – 23.0 | – 17.8 | gross |
| 3. Duodezil | – 16.5 | – 11.3 | |
| 4. Duodezil | – 11.4 | – 6.2 | mässig |
| 5. Duodezil | – 7.2 | – 2.0 | |
| 6. Duodezil[2]) | – 5.2 | 0 | klein |
| 7. Duodezil | – 2.0 | + 3.2 | |
| 8. Duodezil | – 0.0 | + 5.2 | mässig |
| 9. Duodezil | + 2.2 | + 7.4 | |
| 10. Duodezil | + 5.3 | + 10.5 | gross |
| 11. Duodezil | + 11.0 | + 16.2 | |
| Maximum | + 147.0 | + 152.2 | sehr gross |

[1]) Bestimmt aus der Gesamtheit der Messungen in den Jahren 1946/47, 63/64, 64/65, 71/72, 74/75, 76/77 und 77/78 (Kasser 1979).
[2]) Medianwert.

endes, Kalben in einen See, Wegschmelzen einer im Vorjahr fälschlicherweise zum Gletscher gerechneten Schneedecke.
Grosse Vorstossbeträge können durch aussergewöhnliche Gleitbewegungen der Zunge (Rutschungen), durch Anlagerung von Eis- und Schneelawinen vor der Front, durch Zusammenwachsen der Front mit einer vorgelagerten Toteismasse oder durch Auftauchen von Grundeis aus einem See am Gletscherende entstehen. Ausnahmsweise wird auch etwa eine im Berichtsjahr vor der Front abgelagerte Schneedecke zum Gletscher gezählt.
Seit Jahrzehnten wird immer wieder nach den wenigen repräsentativen Gletschern gesucht, auf deren Messung man sich stellvertretend für die anderen beschränken könnte, mit dem Ergebnis, dass nach jeder Überprüfung noch mehr Gletscher in die Beobachtung einbezogen werden. Anderseits erscheint die Zahl von gegenwärtig 117 beob-

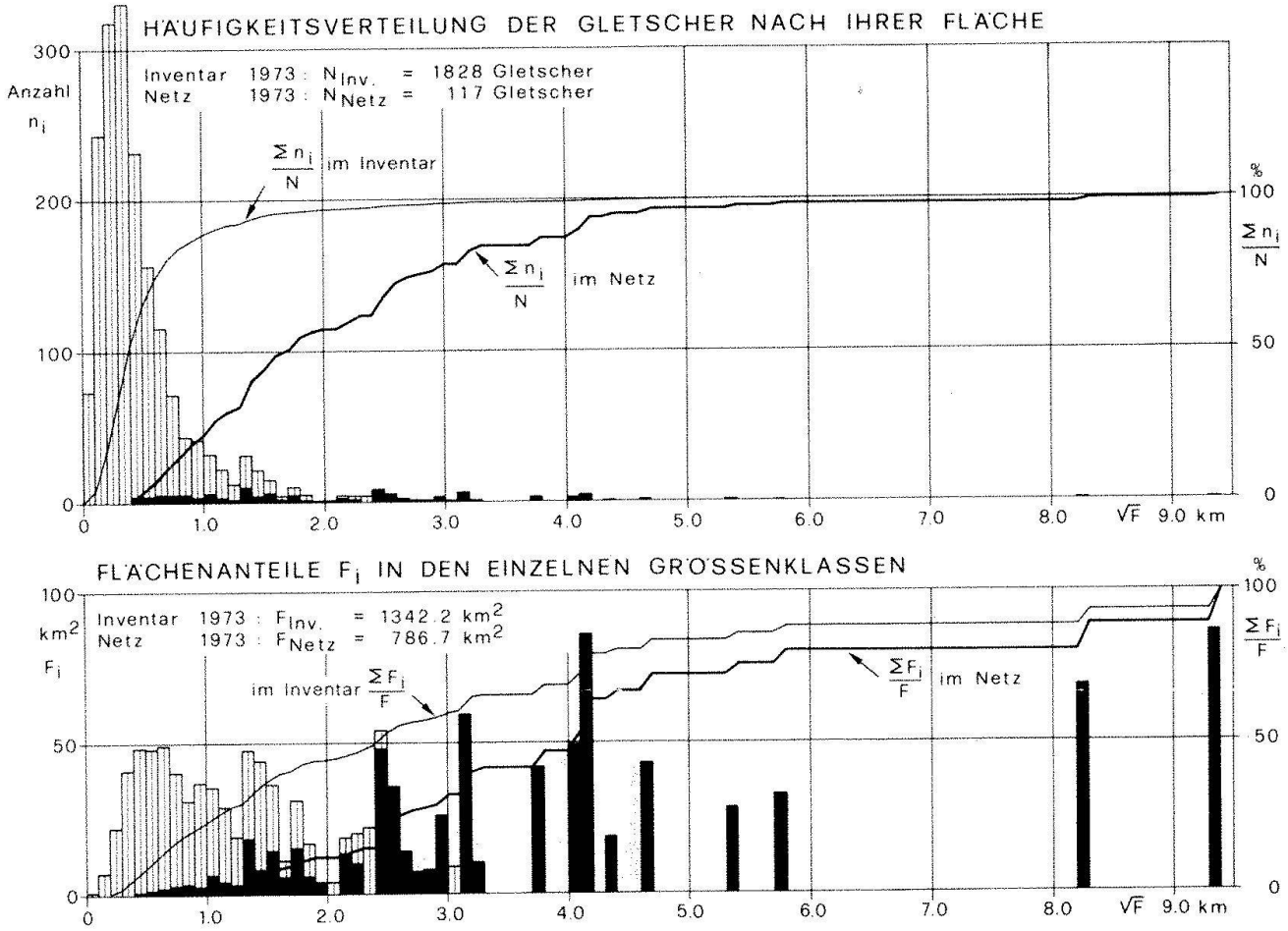



*Abb. 3.* Häufigkeitsverteilung der Schweizer Gletscher nach ihrer Fläche im Inventar 1973 und im Beobachtungsnetz – Die schwarzen Säulen beziehen sich auf das Beobachtungsnetz und gelten mit den aufgesetzten hellen Säulen zusammen für das Inventar.

*Tab. 3.* Verteilung der Gletscher der Schweizer Alpen nach ihrer Grösse im Jahre 1973

| Klasse | Grösse km² | Anzahl Gletscher Inventar 1973 | Anzahl Gletscher Beobachtungsnetz | Vergletscherte Fläche in km² Inventar 1973 | Vergletscherte Fläche in km² Beobachtungsnetz |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.01–0.09 | 634 | 0 | 30.3 | 0 |
| 1 | 0.10–1.00 | 986 | 26 | 295.6 | 12.7 |
| 2 | 1.01–6.25 | 170 | 54 | 391.5 | 158.5 |
| 3 | > 6.25 | 38 | 37 | 624.8 | 615.5 |
| 0–3 | | 1828 | 117 | 1342.2 | 786.7 |

*Tab. 4.* Längenänderungen der Gletscher in den Jahren 1975/76, 1976/77 und 1977/78. Zusammenfassung

a) Anzahl Gletscher pro Einzugsgebiet

| Einzugsgebiet | 1975/76 | | | | | 1976/77 | | | | 1977/78 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $n_N$ | $n_B$ | + | st. | – | $n_B$ | + | st. | – | $n_B$ | + | st. | – |
| Rhone | 52 | 49 | 10 | 3 | 36 | 50 | 21 | 7 | 22 | 48 | 32 | 1 | 15 |
| Aare | 19 | 17 | 4 | 3 | 10 | 17 | 10 | 1 | 6 | 18 | 13 | 3 | 2 |
| Reuss und Limmat | 17 | 16 | 7 | 0 | 9 | 17 | 9 | 4 | 4 | 16 | 16 | 0 | 0 |
| Rhein/Bodensee | 10 | 9 | 0 | 1 | 8 | 10 | 4 | 0 | 6 | 10 | 6 | 0 | 4 |
| Inn | 7 | 5 | 0 | 2 | 3 | 5 | 2 | 1 | 2 | 7 | 4 | 1 | 2 |
| Adda und Tessin | 11 | 7 | 2 | 1 | 4 | 9 | 6 | 2 | 1 | 7 | 5 | 1 | 1 |
| Total | 116 | 103 | 23 | 10 | 70 | 108 | 52 | 15 | 41 | 106 | 76 | 6 | 24 |

$n_N$ Anzahl Gletscher im Beobachtungsnetz
$n_B$ Anzahl Gletscher mit bekanntem Vorzeichen der Längenänderung
\+ im Vorstoss, st. stationär, – im Rückzug

b) Klassierung der einzelnen Gletscher, die nachstehend mit ihren Nummern von Abbildung 2 und Tabelle 1 bezeichnet sind.

| Ergebnis der Beobachtung | 1975/76 Gletscher-Nummer: | 1976/77 Gletscher-Nummer: | 1977/78 Gletscher-Nummer: |
|---|---|---|---|
| nicht beobachtet | 9, 23, 56, 76, 82, 95, 98, 102, 103, 108, 110. | 46, 49, 56, 92, 93, 101, 110, 119. | 31, 32, 46, 76, 108, 110, 117, 118, 119, 120. |
| Resultat unsicher | 101, 119. | | |
| im Vorstoss | 13, 25, 27, 28, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 53, 59, 60, 64, 67, 68, 69, 70, 71, 79, 80, 99, 100. | 1, 2, 7, 10, 11, 13, 20, 23, 25, 26, 27, 28, 37, 39, 41, 42, 43, 47, 48, 50, 53, 54, 57, 59, 60, 62, 63, 64, 66, 67, 68, 70, 74, 75, 77, 80, 81, 85, 87, 89, 91, 96, 97, 99, 100, 104, 107, 108, 109, 117, 118, 120. | 1, 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 18, 21, 22, 25, 26, 27, 28, 30, 33, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 53, 54, 57, 58, 59, 60, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 85, 86, 89, 90, 91, 93, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 104, 105, 106, 107, 109, 111, 114. |
| stationär | 37, 38, 50, 57, 83, 92, 96, 107, 109, 117. | 6, 8, 9, 12, 24, 30, 38, 72, 73, 78, 98, 103, 105, 111, 114. | 23, 55, 56, 62, 92, 103. |
| im Rückzug | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 40, 46, 47, 48, 49, 51, 52, 54, 55, 58, 61, 62, 63, 65, 66, 72, 73, 74, 75, 77, 78, 81, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 93, 94, 97, 104, 105, 106, 111, 114, 118, 120. | 3, 4, 5, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 40, 44, 45, 51, 52, 55, 58, 61, 65, 69, 71, 76, 79, 82, 83, 84, 86, 88, 90, 94, 95, 102, 106. | 3, 5, 6, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 24, 29, 34, 35, 36, 40, 51, 52, 83, 84, 87, 88, 94, 95, 102. |

achteten Gletschern bescheiden im Vergleich zu den 1828 Gletschern im Inventar 1973 (Müller u. a. 1976).
Die Häufigkeitsverteilung der Gletscher nach ihrer Fläche in Abbildung 3 zeigt aber, dass die grösseren Gletscher nahezu vollzählig im Netz vertreten sind und die eingemessenen Gletscher 58,6% der gesamten Gletscherfläche in der Schweiz bedecken, obwohl nur 6,4% der 1828 Gletscher erfasst werden. Tabelle 3 bestätigt diesen Befund. Im Netz sind fast alle Gletscherenden aufgenommen, deren Zungenende in der Mehrzahl der Jahre mit einem vertretbaren Aufwand eingemessen werden kann. Die Lageänderung einer Gletscherfront resultiert aus der Differenz zwischen der Bewegung des Zungenendes oder Anlagerung von perennierendem Schnee an die Front und den Verlusten durch Abschmelzung und Eisabbrüche. Bei den kleinen Gletschern sind sowohl die Geschwindigkeit als auch die Abschmelzung meist gering. Mit Ausnahme weniger lawinenernährter Gletscher befinden sie sich in Höhenlagen um die mittlere Meereshöhe der Gleichgewichtsgrenze, wo sich Akkumulation und Ablation in einem Normaljahr die Waage halten. In allen schneereichen Jahren mit kühlen Sommern bleibt die Front aber unter der im Berichtsjahr gebildeten Schneedecke verborgen und kann ohne Grabarbeiten nicht festgestellt und eingemessen werden. Andere Zungenenden sind wegen der Oberflächenmoränen nicht erkennbar.
Tabelle 4 fasst die Resultate der letzten drei Jahre nach Einzugsgebieten geordnet zusammen. 1975/76 waren die Gletscher mehrheitlich im Rückzug, in den Jahren 1976/77 und 1977/78 im Vorstoss.
Die Beobachtung der Lageänderung der Gletscherenden ist wichtig im Zusammenhang mit der Untersuchung des Verhaltens einzelner Gletscher. Darüber hinaus lassen die Messresultate im Beobachtungsnetz die allgemeine zeitliche Entwicklung der Gletscherveränderungen erkennen, wie dies die zusammenfassende graphische Darstellung in Abbildung 17a (Seite ) für das Beobachtungsintervall von 1890/91 bis 1977/78 zeigt. Die Säulen im oberen Band geben die Anzahl der in den einzelnen Jahren eingemessenen Gletscher. Darunter sind im Punktraster von oben nach unten die Anteile der schwindenden, in der schwarzen Fläche von unten nach oben die Anteile der vorrückenden Gletscher in Prozenten der eingemessenen Anzahl aufgetragen. Im hellen Band dazwischen liegen die Prozentanteile der stationären Gletscher. Wie vor dem Jahre 1920 fällt auch seit dem Herbst 1964 eine wachsende Anzahl vorstossender Gletscher auf, mit einem Maximum von 71,7% im Jahre 1977/78. Eine lineare Regression von 1964/65 bis 1977/78 bestätigt diese Tendenz mit einem Schätzwert von rund 50% für 1977/78. Dies entspricht für die Gletscher des Beobachtungsnetzes einer gleichen Anzahl vorstossender wie schwindender Gletscher oder einem stationären Zustand. Ob sich daraus in den nächsten Jahren ein allgemeiner Vorstoss entwickeln wird, hängt vom weiteren Verlauf des Klimas ab und kann zur Zeit noch nicht beurteilt werden.

## Die Flächenänderungen

Die Gletscherflächen werden durch die Erstellung von Karten, meist aufgrund photogrammetrischer Aufnahmen, bestimmt. Die hohe Genauigkeit der Vermessungsmethoden kann dabei nicht immer voll ausgenützt werden, weil die Gletschergrenzen oft nicht mit Sicherheit erkennbar sind; der Rand der Gletscher kann stellenweise unter Moränenschutt oder Schnee verborgen sein, oder die Abgrenzung von Gletscher und Toteis lässt einen Spielraum für die Interpretation. Deshalb sind Neuaufnahmen von Gletschern für die Flächenbestimmung nur in Zeitintervallen von mehreren Jahren sinnvoll, unter Auswahl der Jahre, in denen die Interpretation der Grenzen dank extremer Ausaperung möglichst einfach ist.
Für die Gesamtheit der Schweizer Gletscher wurde erstmals eine Flächenbestimmung nach dem Siegfried-Atlas 1:50000 ausgeführt, mit einem zeitlichen Schwerpunkt um das Jahr 1876 (Jegerlehner 1902). Die zweite Bestandesaufnahme erfolgte nach der neuen Landeskarte 1:50000 mit einem zeitlichen Aufnahmeschwerpunkt um 1934 (Mercanton 1958). Schliesslich wurde für das Jahr 1973 eine zwischen dem 5. und 14. September erfolgte Flugaufnahme der gesamten Gletscher in den Schweizer Alpen zur Herstellung eines Gletscherinventars ausgewertet (Müller u. a. 1976). In Tabelle 5 sind die

*Tab. 5.* Gletscherflächen in den Abflussgebieten der Schweiz

| Einzugsgebiete | Gletscherflächen in km² im Jahre 1876 | 1934 | 1973 | in % der Fläche im Jahre 1876 1876 | 1934 | 1973 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ohne Ausland | | | | | | |
| Rhein oberhalb Aare | 163.3 | 105.9 | 83.9 | 100 | 65 | 51 |
| Aare oberhalb Reuss | 296.5 | 277.5 | 240.2 | 100 | 94 | 81 |
| Reuss | 133.8 | 112.1 | 94.0 | 100 | 84 | 70 |
| Limmat | 38.6 | 33.0 | 26.5 | 100 | 85 | 69 |
| Rhone oberhalb Genfersee | 930.4 | 841.6 | 746.6 | 100 | 90 | 80 |
| Toce + Ticino + Adda + Rom | 105.2 | 82.0 | 66.1 | 100 | 78 | 63 |
| Inn bis Landesgrenze | 146.6 | 101.5 | 83.2 | 100 | 69 | 57 |
| Fimberbach | 3.2 | 2.4 | 1.7 | 100 | 75 | 53 |
| Schweiz (CH): total | 1817.6 | 1556.0 | 1342.2 | 100 | 86 | 74 |
| Ausland | | | | | | |
| Rhein (I): Valle di Lei | 4.3 | 3.8 | | 100 | 88 | |
| Rhein (A): Ill | 26.3 | 15.7 | | 100 | 60 | |
| Rhone (F): L'Eau Noire | 2.5 | 1.7 | | 100 | 68 | |
| Inn (I): Spöl | 4.0 | 3.6 | | 100 | 90 | |
| Ausland: total | 37.1 | 24.8 | | 100 | 67 | |
| Einzugsgebiete: total | 1854.7 | 1580.8 | | 100 | 85 | |

Flächenbestimmungen für die mittleren Zeitpunkte von 1876, 1934 und 1973 nach Abflussgebieten geordnet zusammengestellt. Während im Aaregebiet, oberhalb der Reussmündung, und im Abflussgebiet der Rhone zum Genfersee die Gletscher dank ihrer hochgelegenen Nährgebiete und schmalen Zungen in den letzten hundert Jahren nur einen Fünftel ihrer Fläche verloren haben, sind die Gletscher des Rheingebietes oberhalb des Bodensees im gleichen Zeitintervall um die Hälfte kleiner geworden.

In Abbildung 17f sind die Flächenänderungen $\Delta F$ seit 1876 für 1934 und 1973 durch Kreise eingetragen. Die durch Punkte eingezeichneten Werte für jedes Jahr seit 1876 sind unter der Näherungsannahme geschätzt worden, dass die Flächenänderungen zwischen 1876 und 1934 sowie zwischen 1934 und 1973 dem Ausdruck $(v-r)/(v+r)$ proportional seien, wobei v und r die gleiche Bedeutung wie in Abbildung 17a haben.

In den letzten hundert Jahren haben die Gletscher in der Schweiz eine Fläche von etwa 475 km² eingebüsst. Diese Verlustfläche liegt zum grössten Teil im Zehrgebiet und steht im Sommer nach dem Abbau der Winterschneedecke für die Schmelze nicht mehr zur Verfügung. In einem Normaljahr entspricht dieser Schmelzwasserausfall gemittelt über die Verlustfläche einem Wasseräquivalent von etwa 3 m oder einem Wasservolumen von 1425 Mill. m³ oder etwa der Hälfte des Jahresabflusses der Limmat unterhalb der Sihlmündung. Um diesen Betrag ist infolge des Flächenverlustes der Gesamtabfluss der Schweizer Gletscher in einem klimatischen Normaljahr heute kleiner als vor hundert Jahren.

Für verschiedene Gletscher gibt es besonders sorgfältig ausgearbeitete wiederholte Flächenbestimmungen aufgrund von Spezialkarten in den Maßstäben 1:25000 und 1:10000. In Tabelle 6 sind die daraus resultierenden spezifischen Flächenänderungen in ‰ pro Jahr, jeweilen bezogen auf die Anfangsfläche des Messintervalls, zusammengestellt und mit den gesamtschweizerischen Durchschnittswerten für die gleichen Messintervalle verglichen. Die spezifischen Flächenänderungen grosser Gletscher wie des Aletsch sind kleiner als der Landesdurchschnitt, diejenigen kleiner Gletscher im allgemeinen grösser. Seit etwa zwanzig Jahren sind die relativen Flächenverluste progressiv kleiner geworden. Der grosse Wert von −7,7‰ pro Jahr für 1961–1967 am Griesgletscher ist durch den im Jahre 1965 erfolgten Einstau des Gletscherendes durch den Stausee Gries bedingt.

Die kürzlich fertiggestellte Landeskarte 1:25000 soll in sechsjährigen Intervallen nachgeführt werden (Eidgenössische Landestopographie 1952– ). Dank diesem Programm der Eidgenössischen Landestopogra-

*Tab. 6.* Flächenänderungen einzelner Gletscher in ‰ pro Jahr

| Gletscher | Periode Jahre von bis | Anzahl | Fläche bei Beginn km² | Ende km² | Flächenänderung ‰/Jahr[1]) |
|---|---|---|---|---|---|
| CH: total | 1876–1973 | 97 | 1817.6 | 1342.2 | −2.7 |
| | 1876–1934 | 58 | 1817.6 | 1556.0 | −2.5 |
| | 1934–1973 | 39 | 1556.0 | 1342.2 | −3.5 |
| Gries (Ägina) | 1923–1961 | 38 | 7.86 | 6.69 | −3.9 (−3.8) |
| | 1961–1967 | 6 | 6.69 | 6.38 | −7.7[2]) (−3.3) |
| Aletsch | 1927–1957 | 30 | 137.90 | 129.50 | −2.0 (−4.0) |
| | 1957–1973 | 16 | 129.50 | 128.56[4]) | −0.5 (−3.1) |
| Mattmark bis Zermeiggern | 1932–1946 | 12 | 26.07 | 24.88 | −3.8 (−4.7) |
| | 1946–1956 | 10 | 24.88 | 22.94 | −7.8 (−4.4) |
| | 1956–1967 | 11 | 23.29[3]) | 22.73 | −2.2 (−3.8) |
| | 1967–1973 | 6 | 22.73 | 22.91[1]) | +1.3 (−2.1) |
| Silvretta + Verstankla | 1938–1956 | 18 | 5.66[5]) | 4.92[5]) | −7.3 (−4.1) |
| | 1959–1973 | 14 | 4.27 | 4.13[6]) | −2.3 (−2.9) |
| Limmern + Plattalva | 1945–1959 | 14 | 3.65 | 3.28 | −7.2 (−4.3) |
| | 1959–1973 | 14 | 3.28 | 3.08[4]) | −4.4 (−2.9) |

[1]) In Klammern Vergleichswerte für CH-total.
[2]) Einstau der Zunge durch Griessee im Sommer 1965.
[3]) Neubearbeitung der Gletschergrenzen.
[4]) Wert aus Inventar.
[5]) Inklusive Chammgletscher.
[6]) Wert AHG: 3.150 (Silvretta) +0.984 (Verstankla).

phie wird es in Zukunft möglich sein, die wasserwirtschaftlich besonders wichtige Grösse der Flächenänderungen unserer Gletscher in angemessenen Zeitintervallen festzustellen.

## Die Dickenänderungen

Wie dick sind unsere Gletscher? Die grössten Eisdicken in den Alpen sind durch seismische Messungen bekannt. So ist der Grosse Aletschgletscher im Konkordiaplatz etwa 900 Meter (Mothes 1929, Thyssen und Ahmad 1969), am Ausgang des Platzes ungefähr 500 Meter mächtig. Grösste Werte wurden an den Gletschern Gorner mit rund 500 Metern (Süsstrunk 1951), Unteraar 400 Metern, in dessen Zuflüssen Finsteraar und Lauteraar sogar je 450 Metern (Süsstrunk 1952), Rhone mit 230 Metern (Jost 1936) und Z'Mutt mit 200 Metern (Eidgenössische Landestopographie 1967) gefunden. Ferner ist die Gletschersohle in vielen Punkten durch Tiefbohrungen erkundet worden. Schätzungen erfolgten in Querprofilen aus dem haushaltsmässig errechneten Eisdurchfluss und den gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten. Nach neueren Entwicklungen besteht die Hoffnung, nicht nur für die kalten, sondern auch für temperierte Gletscher die Höhenlage der Sohle mittels Radar relativ billig und rasch ausloten zu können (Watts und Anthony 1976). Aktuelle Schätzungen der mittleren Eisdicke sämtlicher Gletscher der Schweizer Alpen variieren von etwa 50 bis 100 Meter. Die Unsicherheit ist einerseits durch die Schätzmethoden bedingt, anderseits aber auch durch die unterschiedliche Definition eines Gletschers. Ist ein Firnfleck des Inventars 1973 von mindestens 1 ha Fläche schon als Gletscher zu bezeichnen?

Die Dickenänderungen eines Gletschers werden durch wiederholte Einmessung der Gletscheroberfläche, d.h. als Höhenänderungen der Oberfläche bestimmt. Die Dicke der Gletscher ändert sich in den hochgelegenen Firngebieten viel weniger stark als unten im Zehrgebiet. Tabelle 7 gibt die aus wiederholten photogrammetrischen Aufnahmen bestimmten mittleren Änderungen für verschiedene Höhenstufen der Aletschgletscher in der Schwundperiode von 1927–1957. Während in den höchsten Lagen sogar ein bescheidener Zuwachs festzustellen ist, nimmt der Schwund talwärts zu bis zu einem mittleren Verlust von 88 Metern auf der Höhenstufe von 2000 bis 1500 Meter über Meer, bei einem Mittelwert von −15 Metern über den gesamten Gletscher. Am Zungenende vom Jahre 1957 lagen dreissig Jahre früher noch etwa 200 Meter Eis (Kasser 1967). Diese Zunahme des Schwundes mit

*Tab. 7.* Mittlere Höhenänderungen der Gletscheroberflächen im Gebiet der Aletschgletscher für verschiedene Höhenstufen im Messintervall von 1927 bis 1957

| Höhenstufe m ü. M. von | bis | Gletscherfläche $10^3$ m² 1927[1]) | 1957 | Volumänderung $10^3$ m³ | Höhenänderung der Oberfläche m | m/Jahr |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4200 | 4000 | 187 | 185 | + 1380 | + 7.42 | +0.25 |
| 4000 | 3500 | 19830 | 19169 | + 9437 | + 0.48 | +0.02 |
| 3500 | 3000 | 59101 | 55825 | − 286240 | − 4.98 | −0.17 |
| 3000 | 2500 | 41223 | 37209 | − 900904 | −22.97 | −0.77 |
| 2500 | 2000 | 15495 | 15277 | − 664725 | −43.20 | −1.44 |
| 2000 | 1500 | 2049 | 2092 | − 182997 | −88.36 | −2.95 |
| 4200 | 1500 | 137886 | 129757 | −2024049 | −15.12 | −0.50 |

[1]) Nördlich etwa Märjelen schon im Herbst 1926 aufgenommen.

abnehmender Meereshöhe hängt teils mit dem während der Rezessionsperiode überwiegenden Einfluss der Temperaturzunahme, teils mit dem Fliessverhalten des Gletschers zusammen, das im Firngebiet zu einer Kompensation, im Ablationsgebiet zu einer Verstärkung des Änderungseffektes führt.

Die Höhenänderung der Oberfläche im Laufe der Zeit wird am Aletschgletscher auf dem Jungfraufirn auf ca. 3350 Meter über Meer seit dem Herbst 1941 verfolgt. Ein durch den Schnittpunkt von zwei Visuren definierter Punkt der Oberfläche wird jeden Herbst von einer Basis aus abgesteckt und der Höhe nach eingemessen. Ein jeweilen in diesem Fixpunkt aufgestellter, mit dem Gletscher wandernder Schneepegel, an dem während des Jahres die Schneehöhe abgelesen wird, erlaubt die Rekonstruktion der Oberfläche im Ablauf des Jahres. Abbildung 10a zeigt die extreme Schwundperiode von 1941 bis 1950 mit einem Höhenverlust von rund 8 Metern, der trotz weiteren Rückschlägen bis zum Herbst 1978 bis auf 2 Meter wieder aufgeholt worden ist. Weiter talwärts auf dem Jungfraufirn und im Konkordiaplatz hat J. R. Stengel im Jahr 1851 zwei auf dem Gletscher liegende Steine genau eingemessen. Vergleichsmessungen in den Jahren 1926, 1947 und 1957 ergeben die in Tabelle 8 zusammengestellten Höhenverluste in Meter/Jahr, mit einem Maximum von 1926 bis 1947 und einem Minimum von 1851 bis 1926.

In Tabelle 9 schliesslich werden für verschiedene Gletscher und Messintervalle seit 1923 Vergleichswerte der mittleren Höhenänderungen angegeben, die einerseits das unterschiedliche Verhalten der Gletscher, anderseits die einheitliche Tendenz zu kleineren Verlusten in den letzten zwanzig Jahren zeigen.

Alle Gletscher der Schweizer Alpen zusammen haben seit dem Maximalstand um 1850 bis heute im Mittel ungefähr 30 Meter an Dicke verloren, was bezogen auf eine mittlere Gesamtfläche von rund 1600 km² einem Verlustvolumen von 48 km³ oder einem anderthalbfachen Jahresabfluss des Rheins in Basel entspricht.

## Die Massenänderungen

Massenänderungen werden bestimmt entweder aus wiederholten Vermessungsaufnahmen der Gletscheroberfläche (Volumenänderung, geodätische Methode), oder aus der Messung von Akkumulation und Ablation in vielen Punkten der Oberfläche (Pegelmethode, glaziologische Bilanz), oder aus dem Vergleich von Niederschlag, Abfluss und Verdunstung (hydrologische Bilanz).

Die geodätische Methode eignet sich nur für längere Zeitintervalle von mehreren Jahren, weil die Meereshöhe der Oberfläche photogrammetrisch bei kontrastarmen Schneeflächen nur mit beschränkter Genauigkeit ausgemessen werden kann. Deshalb werden mit Vorteil nur Jahre mit starker Ausaperung ausgewertet. Die Volumenänderungen werden meist mit einem Raumgewicht von 0,9 t m$^{-3}$ auf Massenänderungen umgerechnet, was für einjährige Bilanzen kaum zulässig ist.

Bei der Methode der glaziologischen Bilanz werden in der Oberflächenschicht des Gletschers Stangen als Pegel eingesetzt. Bezogen auf die Oberfläche bei Messbeginn wird an den Pegeln im Falle von Akkumulation der Zuwachs, im Falle von Ablation der Abtrag

*Tab. 8.* Höhenänderungen der Gletscheroberfläche in 2 Punkten des Grossen Aletschgletschers für verschiedene Messintervalle

| Punkt Nr. | Höhe 1957 | Höhenänderungen in m/Jahr 1851–1957 | 1851–1926 | 1926–1947 | 1947–1957 |
|---|---|---|---|---|---|
| | m ü. M. | (106 Jahre) | (75 Jahre) | (21 Jahre) | (10 Jahre) |
| III | 2957.9 | −0.30 | −0.15 | −0.71 | −0.55 |
| VIII | 2729.1 | −0.53 | −0.38 | −0.96 | −0.80 |

*Tab. 9.* Mittlere Höhenänderungen der Oberfläche für verschiedene Gletscher

| Gletscher | Messintervall von bis | Anzahl Jahre | Fläche bei Beginn km² | Ende km² | Höhenänderung der Oberfläche cm/Jahr |
|---|---|---|---|---|---|
| Aletsch | 1927–1957 | 30 | 137.90 | 129.76 | −50 |
| Mattmark | 1932–1946 | 12 | 26.07 | 24.88 | −19 |
| (bis Zermeiggern) | 1946–1956 | 10 | 24.88 | 22.94 | −47 |
| | 1956–1967 | 11 | 23.29 | 22.73 | + 3 |
| Gries | 1923–1961 | 38 | 7.86 | 6.69 | −83 |
| Limmern | 1945–1959 | 14 | 2.85 | 2.57 | −31 |
| Plattalva | 1945–1959 | 14 | 0.80 | 0.72 | −36 |
| Silvretta | 1938–1956 | 18 | 3.73 | 3.33 | −51 |
| | 1959–1973 | 14 | 3.22 | 3.15 | −10 |
| Verstankla | 1938–1956 | 18 | 1.93[1]) | 1.59[1]) | −44 |
| | 1959–1973 | 14 | 1.04 | 0.98 | − 3 |

[1]) Inklusive Chammgletscher.

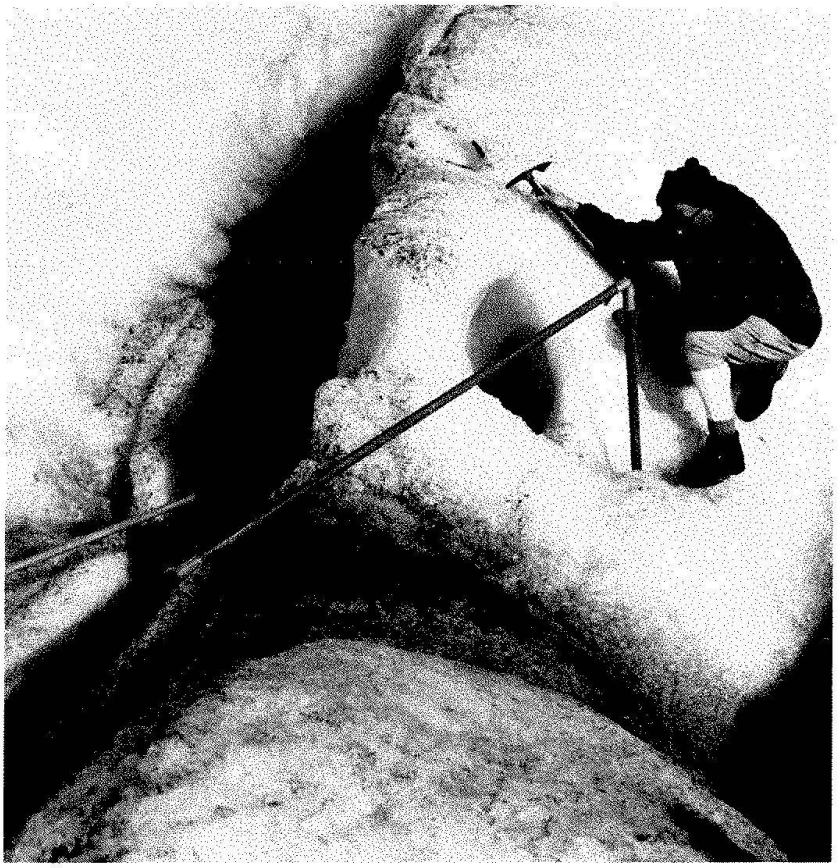


*Abb. 4.* Firnpegel 11 im Ewigschneefeld des grossen Aletschgletschers auf 3445 m ü. M. Photo Markus Aellen, VAW-ETHZ, 18.09.1963.
*Abb. 5.* Ablationspegel «im Sand» des Grossen Aletschgletschers auf 1900 m ü. M. Photo Erwin Brügger, VAW-ETHZ, 4.09.1963.

gemessen. Diese Beträge sind ein Mass für die Massenänderung im Messpunkt.
Die Abbildungen 4 und 5 zeigen solche Meßstellen am Grossen Aletschgletscher. Bezogen auf die Oberfläche im Herbst, ist an Pegel 11 auf 3445 Metern über Meer im Ewigschneefeld im Sommer 1945 eine maximale Schneehöhe von 11,3 m abgelesen worden. Der Jahreszuwachs an dieser Stelle beträgt im langjährigen Mittel 5,4 m Schnee, entsprechend einem Wasseräquivalent von 2,8 m oder 2,8 $t\,m^{-2}$. Ablationspegel werden in Bohrlöchern montiert. Das Ausschmelzen der Pegel gibt das Mass der Ablation. An der Meßstelle von Abbildung 5 «im Sand» auf 1900 m über Meer schmilzt bezogen auf die Eisoberfläche vom Herbst in einem mittleren Jahr eine Eisschicht von 10 m, auf 1640 m über Meer eine solche von rund 13 m. Die Pegelmethode eignet sich sowohl für Jahresbilanzen als auch für einzelne Jahreszeiten. Die Methode erfordert aber sehr viele Meßstellen und wird des Aufwandes wegen eher an kleineren Gletschern angewendet.

In den Schweizer Alpen werden die jährlichen Massenänderungen langfristig in vier Gebieten gemessen. Am Aletschgletscher entwickelten sich diese Untersuchungen aus Schneemessungen, die in der Gegend des Jungfraujochs in den Jahren 1940 und 1941 von der Eidgenössischen Kommission für Schnee- und Lawinenforschung durchgeführt worden sind, um die Zweckmässigkeit von Lawinenforschung bis in den Bereich der Viertausender hinauf zu prüfen. Die Massenänderungen werden am Aletsch mit der Methode der hydrologischen Bilanz bestimmt, die für die Periode 1927 bis 1957 mit der geodätischen Bilanz geeicht worden ist und durch Pegelmessungen laufend kontrolliert wird. In den drei anderen Gletschergebieten werden die jährlichen Haushaltsmessungen überall nach der Pegelmethode durchgeführt und für langjährige Messintervalle durch die geodätische Bilanz überprüft. In diesen drei Gebieten gaben Probleme bei der Projektierung von Wasserkraftanlagen den Anlass zu diesen Studien. Nach dem

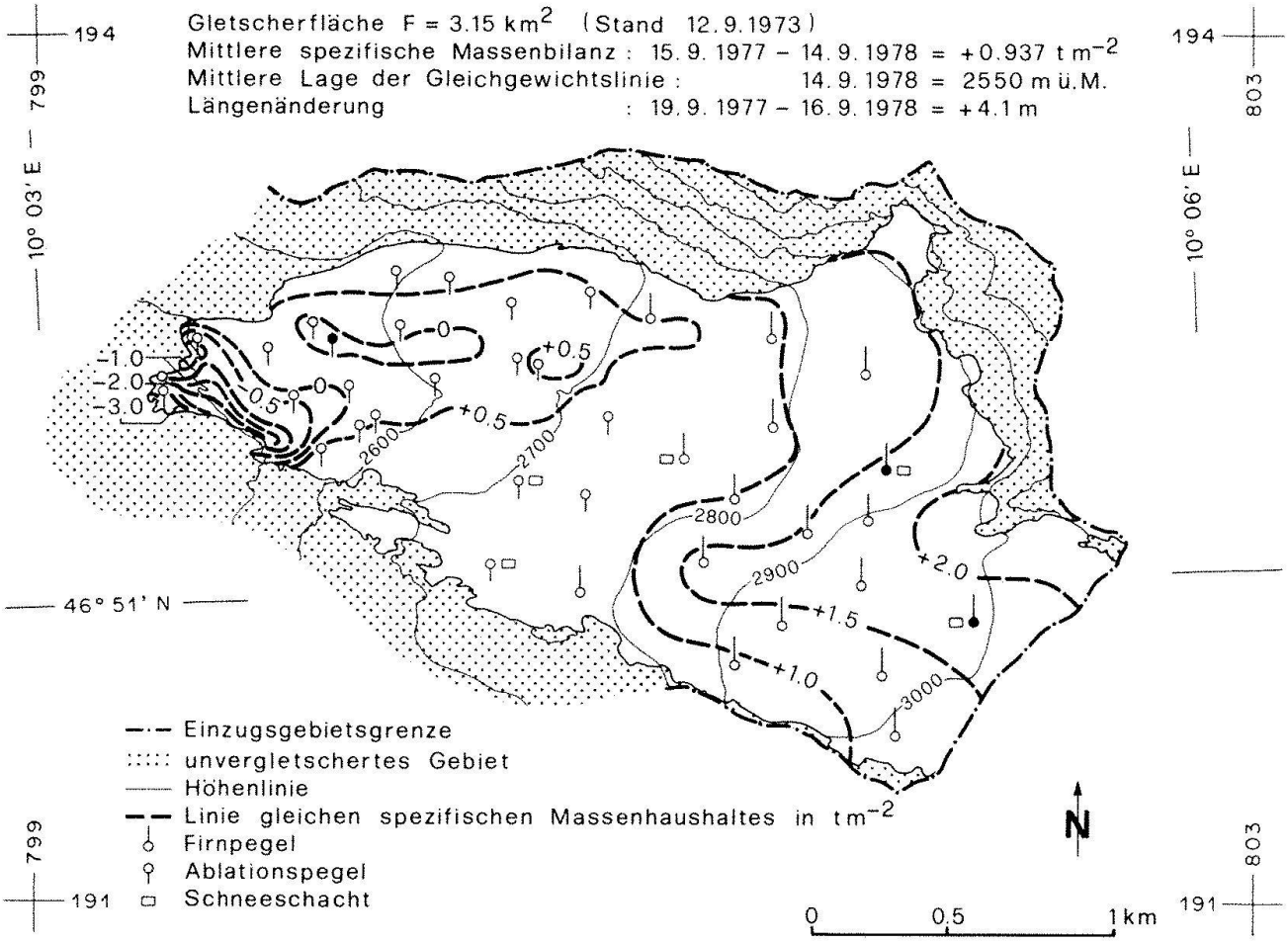



*Abb. 6.* Pegelnetz am Silvrettagletscher und Isolinien der spezifischen Massenbilanz in $t\,m^{-2}$ im Messjahr 1977/78.

Jahre 1944 galt es durch die Arbeiten an den Gletschern Limmern und Plattalva, zusammen mit Niederschlags- und Quellenuntersuchungen, herauszufinden, warum die spezifischen Abflussmengen bei der Pantenbrücke um etwa 30% kleiner waren, als aufgrund von Messungen in Vergleichsgebieten zu erwarten war. Ab 1959 waren die Studien am Silvrettagletscher notwendig, um die verfügbaren Wassermengen in den hochgelegenen Fassungsgebieten abzuschätzen. Für den Griesgletscher, der seit 1965 durch den künstlichen See eingestaut ist, mussten 1960 die Wahrscheinlichkeit eines Gletschervorstosses bis zur projektierten Staumauer in Abhängigkeit der Zeit untersucht werden sowie die Häufigkeitsverteilung des jährlichen Zuflusses zum See.

Heute sind die Programme an allen vier Haushaltsgletschern auf grundlegende methodische Studien und auf anwendungsorientierte Forschung ausgerichtet.

Für den Silvrettagletscher sind in Abbildung 6 das Pegelnetz und die Höhenkurven der Gletscheroberfläche eingezeichnet. Aufgrund der Messresultate im Haushaltsjahr 1977/78 an den Pegeln sind ferner die Linien gleichen spezifischen Massenhaushalts konstruiert worden. Die mit Null angeschriebene Isolinie ist die sogenannte Gleichgewichtslinie oder Equilibrium Line, wo die Jahresakkumulation durch die Jahresablation gerade aufgezehrt wird. In Abbildung 6 liegt diese Linie in der Nähe des Zungenendes und ist damit charakteristisch für ein gletscherfreundliches Jahr, in welchem der grösste Teil des Gletschers zum Nährgebiet gehört.

In Abbildung 7 sind die Isolinien des Jahreshaushalts für die extremen Jahre 1963/64 mit dem grössten Massenverlust und 1964/65 mit dem grössten Gewinn sowie für die beiden Jahre 1969/70 und 1971/72 mit nahezu ausgeglichenem Haushalt dargestellt. Aus solchen Haushaltskarten werden die Massenänderungen eines Gletschers für ein bestimmtes Jahr berechnet, indem durch

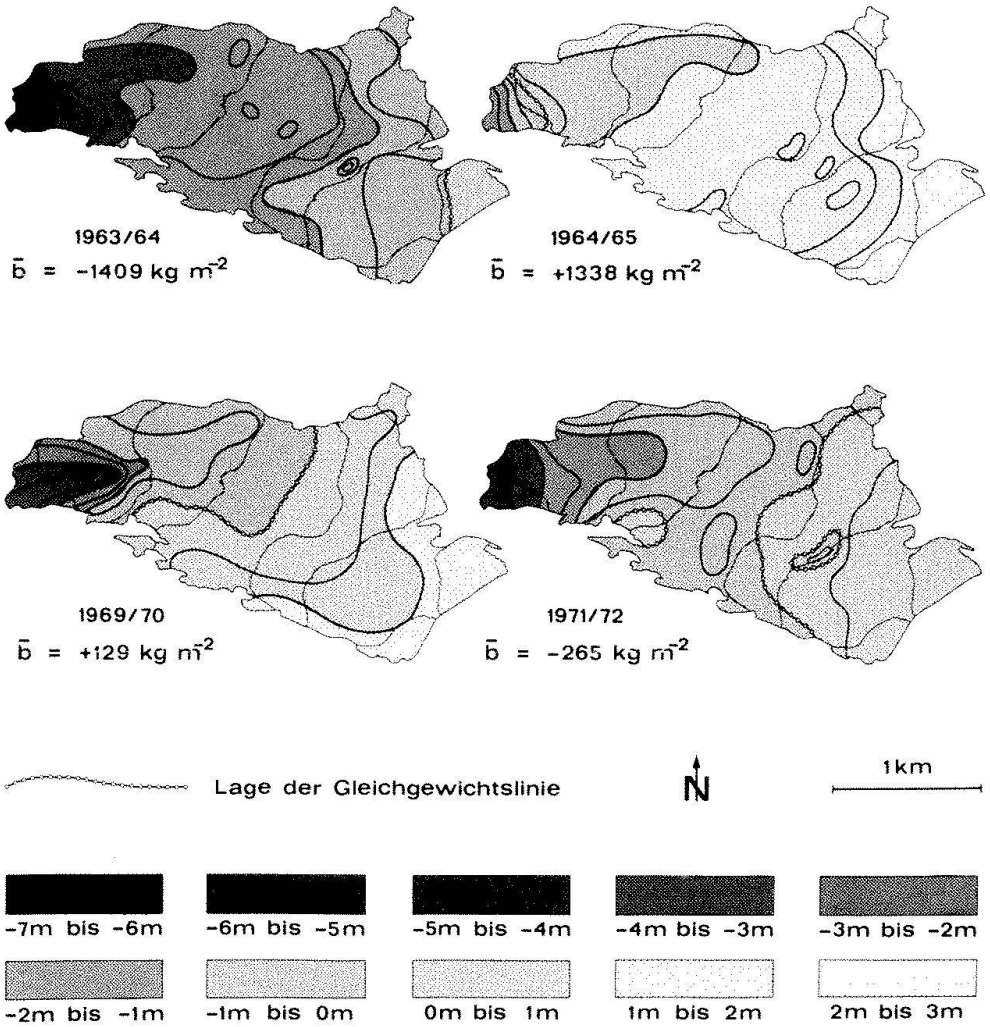



*Abb. 7.* Isolinien der spezifischen Massenbilanz des Silvrettagletschers in den Haushaltsjahren 1963/64, 1964/65, 1969/70 und 1971/72. Unter dem Haushaltsjahr ist jeweilen die mittlere spezifische Massenbilanz des gesamten Gletschers in kgm$^{-2}$ (= mm Wasseräquivalent) eingetragen.

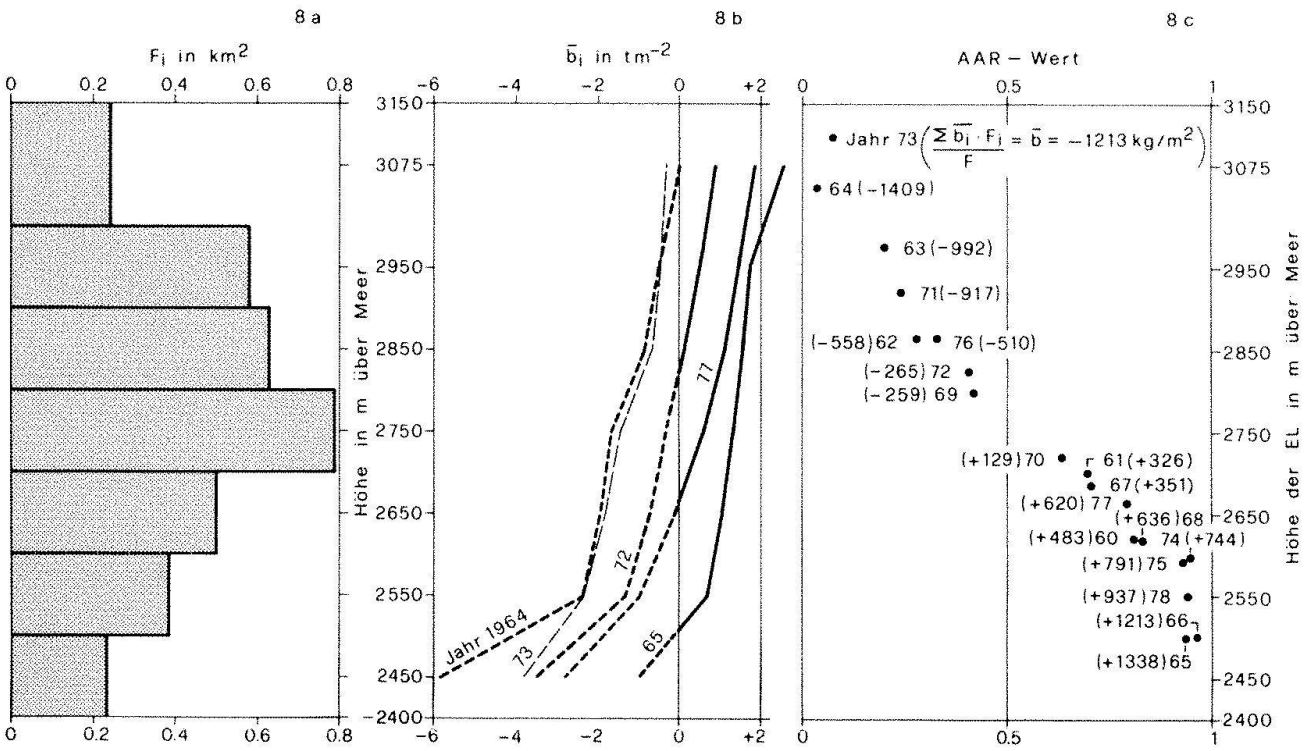



*Abb. 8.* Massenbilanzen des Silvrettagletschers in den Jahren 1960/61 bis 1977/78 (mit 61 bis 78 angeschrieben). a) Flächen $F_i$ der Höhenstufen. b) Mittlere spezifische Massenbilanzen $\bar{b}_i$ für die Höhenstufen, in ausgewählten Messjahren. c) Meereshöhe der Gleichgewichtslinie EL (Equilibrium Line), AAR-Wert (Accumulation area ratio) und Bilanzen $\bar{b}$ für die 18 Messjahre.

Ausmessung der Flächen vorerst für jede Höhenstufe $F_i$ deren mittlere spezifische Massenbilanz $\bar{b}_i$ bestimmt und der Ausdruck $\bar{b}_i \cdot F_i$ über alle Höhenstufen summiert wird. Diese Summe, verteilt über die Gesamtfläche F, also $\Sigma\, \bar{b}_i F_i / F = \bar{b}$ gibt dann die durchschnittliche spezifische Massenänderung $\bar{b}$ für den ganzen Gletscher. Bei einer genügend grossen Zahl von Messpunkten kann $\bar{b}$ mit einer Genauigkeit von etwa $\pm$ 50 kg m$^{-2}$ bestimmt werden.

In Abbildung 8 sind für den Silvrettagletscher links die Höhenstufenflächen $F_i$, in der Mitte für ausgewählte Jahre $\bar{b}_i$ versus H aufgezeichnet. Im Teil rechts ist für jedes der 18 Messjahre von 1959/60 bis 1977/78 das Verhältnis der Fläche des Nährgebietes zur Gesamtfläche des Gletschers, der sogenannte AAR-Wert (Accumulation Area Ratio) in Beziehung zur Meereshöhe der Gleichgewichtslinie (EL) dargestellt. Jeder Punkt ist mit der Jahreszahl des Haushaltssommers angeschrieben, in Klammern steht der zugehörige Wert der mittleren jährlichen Massenänderung $\bar{b}$. Die Meereshöhe der Gleichgewichtslinie ergibt sich als Schnitt der Beziehung $b_i$ versus Meereshöhe H mit $b_i$ = Null.

Auf andere Möglichkeiten zur Bestimmung der Gleichgewichtslinie soll hier nur hingewiesen werden (Gross, Kerschner und Patzelt 1976). Die Meereshöhe der EL variiert für die 18 Messjahre zwischen 2510 m und 3110 m über Meer oder über einen Bereich von 600 Höhenmetern.

Für ein und denselben Gletscher sind die Gradienten von $b_i$ mit der Meereshöhe H für alle Jahre sehr ähnlich, wie dies Abbildung 8 für den Silvrettagletscher zeigt. Verschiedene Gletscher können sich aber in bezug auf diesen Gradienten sehr wesentlich unterscheiden.

In Abbildung 9 sind für jeden der vier Haushaltsgletscher die Werte $b_i = b_{i0}$ für eine ausgeglichene Jahresbilanz des Gesamtgletschers in Abhängigkeit von der Meereshöhe aufgezeichnet, zusammen mit den relativen Flächen $F_i/F$ für Höhenstufen von je 100 m. Der Gradient $db_{i0}/dH$ ist für den südexponierten Aletsch deutlich grösser als für den westexponierten Silvretta und die ostexponierten Gries und Limmern. Beim Silvretta nimmt der Wert gegen das Zungenende hin wegen Expositionsänderung gegen Südwesten hin zu. Einen besonders kleinen Gra-

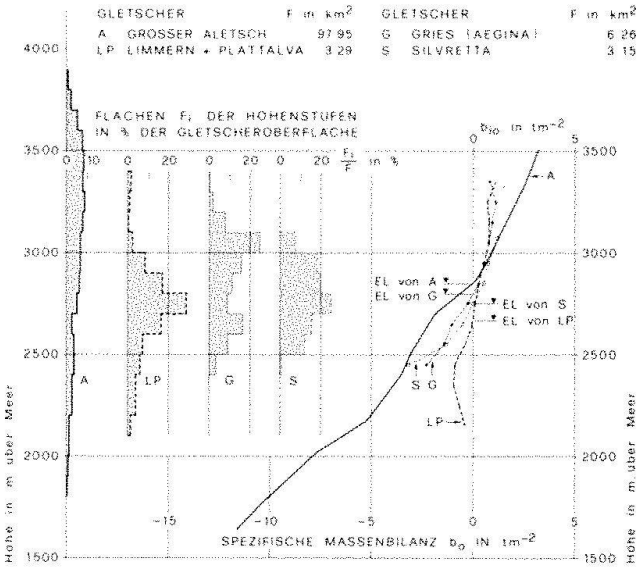



*Abb. 9.* Normierte Verteilung der Gletscherflächen auf Höhenstufen von 100 m und zugehörige mittlere spezifische jährliche Massenänderungen bei ausgeglichenem Massenhaushalt der Gletscher des Aletschgebietes, Limmern + Plattalva, Gries und Silvretta. Grosser Aletsch: $F = 97.95 km^2$ schliesst Mittelaletsch ein (Kolonnen 1–11, 18, 21, 27 und 33 von table 15, part 4 in (Kasser 1967)).

dienten weist der Limmerngletscher auf, weil dieser im Schatten des Bifertengrates liegt und aus dessen Nordflanke im ganzen Zungengebiet zusätzlich durch Lawinen ernährt wird. Deshalb reicht das Zungenende, gemessen an der Verteilung der Gletscherflächen auf die Höhenstufen, relativ tief hinab.

Die an den Aletschgletschern verwendete Methode, die Massenänderung mit der hydrologischen Bilanz zu bestimmen, erlaubt eine gute zeitliche Auflösung.

In Abbildung 10 sind die Massenänderungen im Einzugsgebiet der alten Abflussmeßstation Massaboden aufgrund von Monatswerten vom Oktober 1941 bis zum September 1978 dargestellt. Der Jahresrhythmus dieser Kurve ist durch den Aufbau und Abbau der Winterschneedecke auch ausserhalb des Gletschers mitbedingt. Deshalb kann die Massenänderung des ganzen Einzugsgebietes mit guter Annäherung nur für Zeitintervalle ganzer Jahre, von Herbst zu Herbst, dem Gletscher zugeschrieben werden und dies nur dann, wenn die Wasserreserven

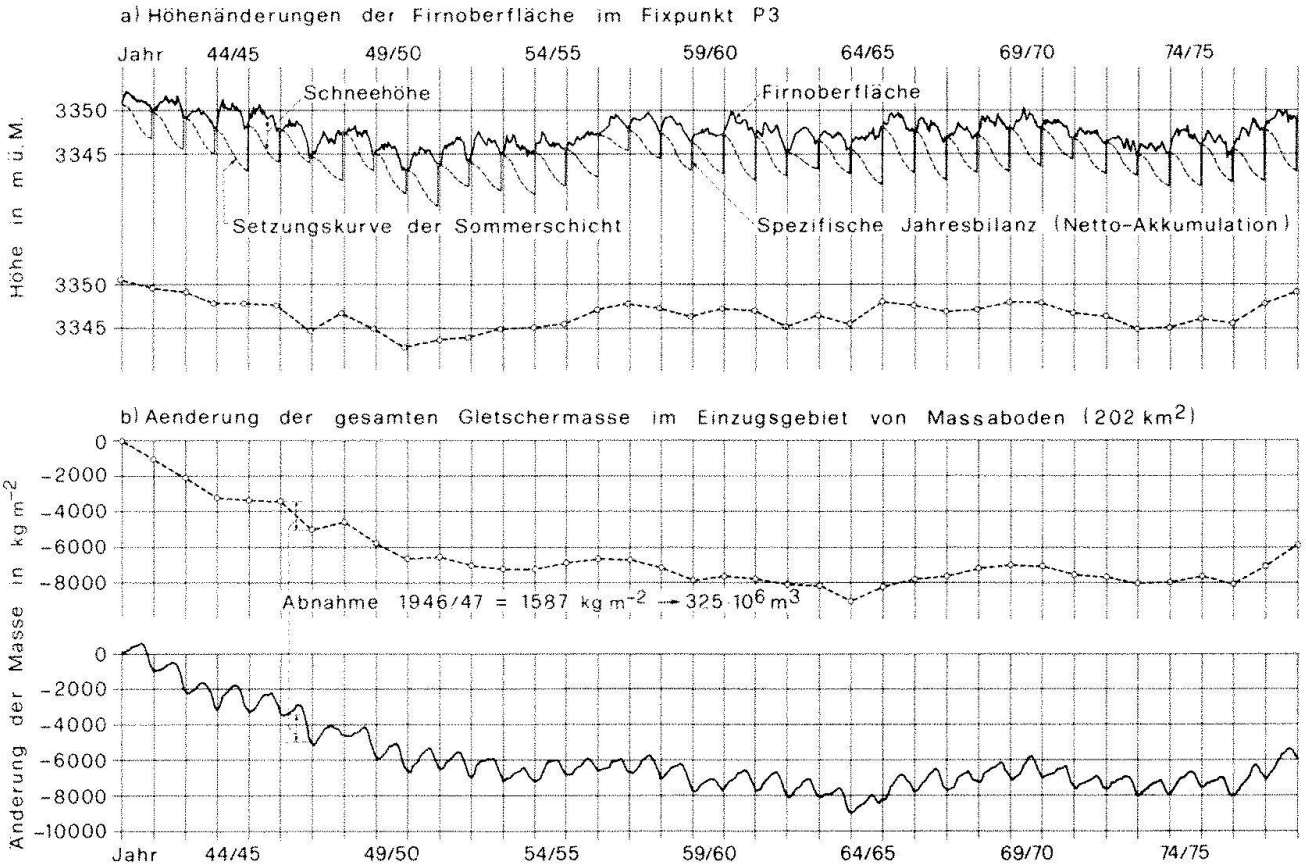



*Abb. 10.* Höhenänderungen und Massenbilanzen am Grossen Aletschgletscher vom 1. Oktober 1941 bis 30. September 1978. a) Höhenänderungen der Firnoberfläche bei Pegel 3 des Jungfraufirns; b) Summenlinie der monatlichen Massenbilanzen der Gletscher im Einzugsgebiet der Massa von Massaboden ($202 km^2$).

ausserhalb des Gletschers am Anfang und am Ende des Haushaltsjahres als gleich angenommen werden dürfen. Wenn ausserhalb des Gletschers beträchtliche Schneemengen bis ins neue Haushaltsjahr überdauern oder derart entstandene alte Reserven aufgezehrt werden, ist die Umrechnung vom Einzugsgebiet auf die Gletscherfläche problematisch. Die Aletschgletscher bedecken rund zwei Drittel des Einzugsgebietes von Massaboden. Deshalb sind die spezifischen Jahreshaushaltwerte von Abbildung 10 ungefähr mit dem Faktor 1,5 vom Einzugsgebiet auf die Gletscheroberfläche umzurechnen.
In Tabelle 10 sind die Massenbilanzergebnisse $\bar{b}$ für die vier Haushaltsgletscher und die Jahre 1963/64 bis 1977/78 zusammengestellt, mit Fussnoten, die auf den Beginn der Messreihen und den Stand der Bearbeitung hinweisen. Über die langfristige Entwicklung geben die in Abbildung 17g gezeichneten Summenlinien der Haushaltswerte einen besseren Überblick als die nebeneinandergestellten Werte der Einzeljahre. Als gemeinsamer Nullpunkt der Summenlinien wurde der Herbst 1964 gewählt, der Zeitpunkt für das Minimum der Gletscher Aletsch und Silvretta und des Beginns einer wesentlichen Erholung aller Gletscher. Durch eine horizontale Linie kann sofort festgestellt werden, dass zum Beispiel die Gesamtmasse der Aletschgletscher im Herbst 1978 wieder ungefähr gleich gross war wie im Herbst 1949.

*Tab. 10.* Mittlere spezifische Massenänderung $\bar{b}$ einiger Schweizer Gletscher in den Jahren 1963/64–1977/78

| Jahr | Gletscher Gries[1]) Gl. 3 | Aletsch[2]) Gl. 5 + 6 + 106 | Limmern[3]) Gl. 78 + 114 | Silvretta[4]) Gl. 90 |
|---|---|---|---|---|
| | kg m$^{-2}$ | kg m$^{-2}$ | kg m$^{-2}$ | kg m$^{-2}$ |
| 1963/64 | − 862 | − 1269 | − 1833 | − 1409 |
| 1964/65 | + 925 | + 1178 | + 924 | + 1338 |
| 1965/66 | − 279 | + 620 | + 505 | + 1213 |
| 1966/67 | + 260 | + 296 | − 363 | + 351 |
| 1967/68 | + 332 | + 668 | + 397 | + 636 |
| 1968/69 | + 269 | + 308 | − 140 | − 259 |
| 1969/70 | − 519 | − 124 | − 158 | + 129 |
| 1970/71 | − 1069 | − 705 | − 1336 | − 917 |
| 1971/72 | + 446 | − 218 | − 245 | − 265 |
| 1972/73 | − 1116 | − 529 | − 1010 | − 1213 |
| 1973/74 | − 159 | + 70 | + 85 | + 744 |
| 1974/75 | + 280 | + 559 | + 573 | + 791 |
| 1975/76 | − 1056 | − 688 | − 964 | − 510 |
| 1976/77 | + 1263 | + 1478 | + 658 | + 620 |
| 1977/78 | + 950 | + 1805 | + 911 | + 937 |

[1]) Vorläufige Werte. Die Reihe beginnt im Herbst 1961 und muss gesamthaft noch überarbeitet werden.
[2]) Die Reihe beginnt im Herbst 1922.
[3]) Vorläufige Werte. Die Messungen begannen 1945. Die Reihe wird zur Zeit bis zum Jahre 1947 zurück überarbeitet.
[4]) Bereinigte Werte. Die Reihe beginnt im Herbst 1960.

## Gletscherveränderungen und Abfluss

Woher kommt das Wasser zum Gletscherbach?
In Abbildung 11 sind die Abflusszonen eines vergletscherten Einzugsgebietes schematisch dargestellt. Vom gesamten Einzugsgebiet fliesst der Jahresniederschlag, soweit er nicht verdunstet oder im Firn des Nährgebietes abgelagert wird, als Wasser ab. Im Zehrgebiet ($b_i < 0$) werden nach Massgabe der spezifischen Haushaltszahlen $b_i$ alte Reserven geschmolzen, die sich zum Abfluss aus Niederschlag gesellen. An der Gleichgewichtslinie ($b_i = 0$) fliesst gerade die Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung ab. Gletscheraufwärts, im Nährgebiet ($b_i > 0$), verringert sich dieser Wert bis gegen Null an der Wasserabflussgrenze. In diesem einfachen Schema ist nicht berücksichtigt, dass perennierende Schneereserven auch im Randgebiet ausserhalb des Gletschers gebildet und aufgezehrt werden und Schnee durch Wind und Lawinen zwischen den Teilgebieten verfrachtet wird. Der hypothetische Begriff der Wasserabflussgrenze stellt eine starke Vereinfachung dar, ist doch aus neue-

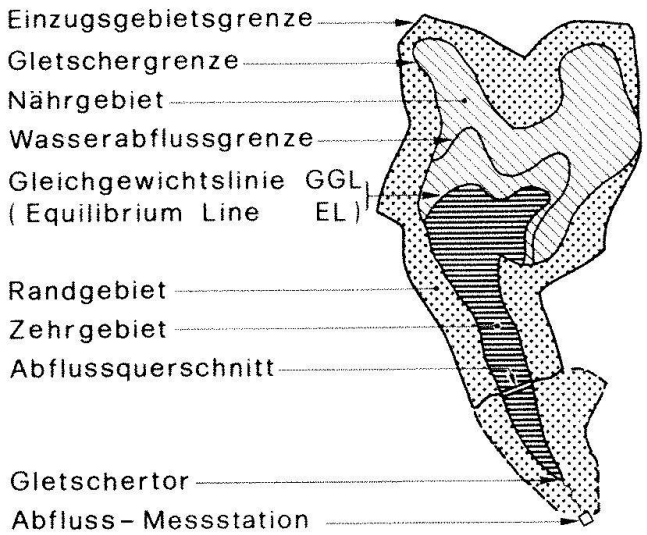



*Abb. 11.* Abflusszonen eines Gletschers.

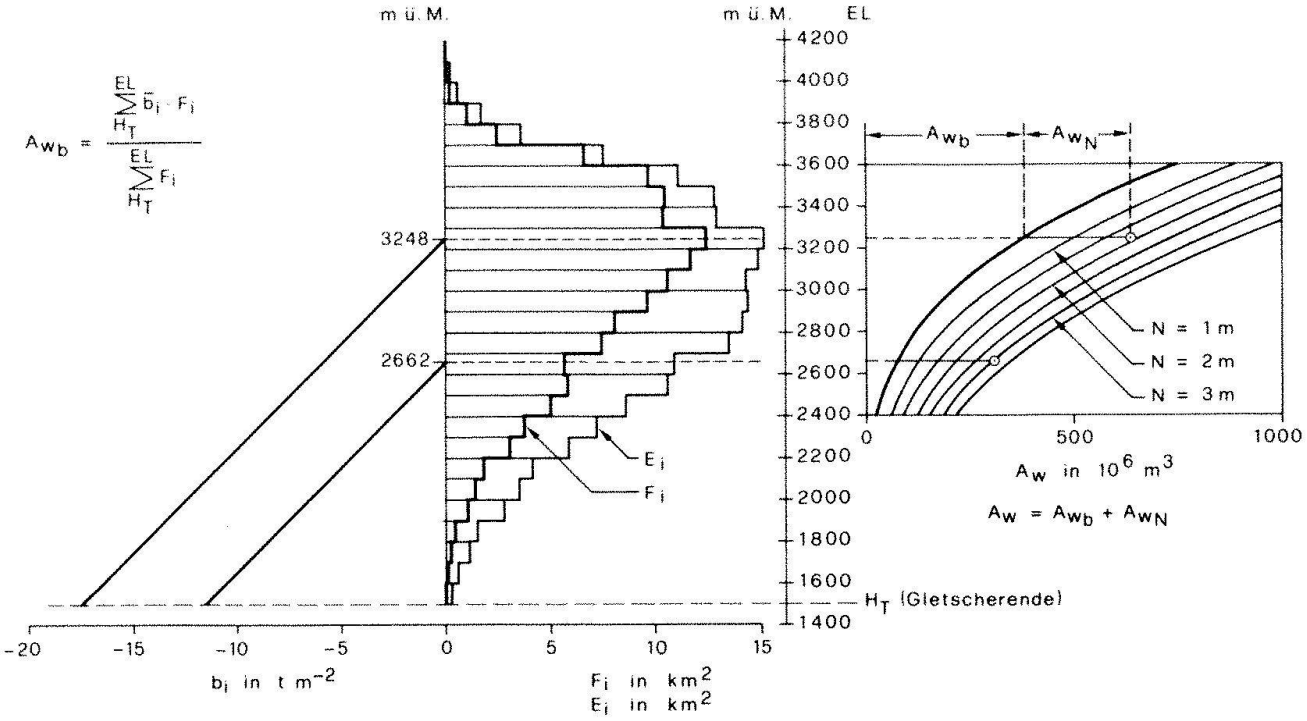



*Abb. 12.* Bestimmung der Gleichgewichtslinie im Einzugsgebiet der Aletschgletscher aus den Abflussmengen $A_w$ in der Station der Massa in Blatten bei Naters und aus den jährlichen Gebietsmittelwerten N des Niederschlages. $b_i$ = mittlerer spezifischer Massenhaushalt der Höhenstufe i, $A_{wb}$ = Abfluss aus Aufbrauch alter Reserven, $A_{wN}$ = Abfluss aus dem Niederschlag des Messjahres, $E_i$ = Höhenstufenfläche des Einzugsgebietes, $F_i$ = Höhenstufenfläche der Gletscher.

ren Untersuchungen bekannt, dass in temperierten Firngebieten (Lang, Schädler und Davidson 1976, Schommer 1976) und im Ablationsgebiet (Röthlisberger 1976) zeitlich variable Grundwasserspiegel auftreten können. Ausserdem gibt es veränderliche Wasserreserven im Untergrund. Ablationsmessungen an Pegeln geben in spaltenfreien Teilen der Gletscheroberfläche im allgemeinen kleinere Werte als in zerklüfteten Teilen mit grösserer Oberfläche oder an den Gletscherrändern, wo die Rückstrahlung und warme Luft von den Uferhängen zusätzliche Schmelzung bewirken. Eis wird auch durch Bäche geschmolzen, die sich an den Seitenhängen im Randgebiet erwärmt haben, in der Gletscherzunge verschwinden und sich dort abkühlen. Schliesslich bewegen sich sowohl das Eis des Gletschers als auch das abfliessende Wasser talwärts und setzen ihre potentielle Energie dabei über die Reibung in Wärme um. Über eine Höhendifferenz von 1000 Meter kann das abfliessende Wasser auf diese Art eine Eismenge schmelzen, die etwa 3% seiner eigenen Masse entspricht. Diese «Fallarbeit» vermöchte Firn und Eis über 427 Meter Höhendifferenz um 1°K zu erwärmen oder beim Schmelzpunkt ungefähr 1,25% der bewegten Masse zu schmelzen. Das hydrologische System eines Einzugsgebietes ist noch schwieriger zu erfassen, wenn Schneeverfrachtungen oder unterirdischer Wasseraustausch über die topographischen Grenzen hinweg in Rechnung zu stellen sind.

Für einen Abflussquerschnitt oberhalb des Gletschertors setzt sich der gesamte Abfluss aus dem Eisdurchfluss und dem Wasserabfluss zusammen. Für die Bilanz, den Eisabfluss und den Wasserabfluss lassen sich Gleichungssysteme formulieren (Kasser 1959). Mit dem Modell für den Wasserabfluss können aus den gemessenen Abflussmengen sowohl die Höhenlage der Gleichgewichtslinie als auch die Herkunft des Abflusses aus dem Niederschlag des Haushaltsjahres und aus den aufgebrauchten älteren Reserven berechnet werden. Dies wurde für das Einzugsgebiet der Aletschgletscher mit der Abflussmeßstation der Massa bei «Blatten bei Naters» für die Haushaltsjahre 1930/31 bis 1977/78 durchgeführt, mit folgenden Annahmen: Der Jahresniederschlag nehme pro 100 Höhenmeter um je 60 mm Wasseräquivalent zu. Die Wasserabflussgrenze liege 400 Meter höher als die Gleichgewichtslinie. Der

spezifische Jahreshaushalt b nehme talwärts der Gleichgewichtsgrenze pro 100 Meter Höhenabnahme um 1000 $kg\,m^{-2}$ zu. In diesem Wert sind die innere Ablation, die mit den Messungen an Ablationspegeln nicht erfasst wird, sowie Zuschläge für spaltenreiche Zonen mitberücksichtigt.

Abbildung 12 zeigt, wie durch Summierung der Produkte aus den höhenspezifischen Massenänderungen $\bar{b}_i$ und den Höhenstufenflächen $F_i$ vom Gletschertor bis zur Gleichgewichtslinie der Abflussanteil Awb aus den aufgebrauchten alten Reserven geschätzt wird, und wie sich der Abflussanteil aus Niederschlag in Abhängigkeit vom Jahresniederschlag auf den Wasserabfluss auswirkt. Bei der Berechnung für ein gegebenes Jahr wird die Höhenlage der Gleichgewichtslinie variiert, bis der gesamte Wasserabfluss dem gemessenen entspricht.

In Abbildung 13 ist der Wasserabfluss für jedes der 48 Jahre von 1930/31 bis 1977/78 in Abhängigkeit der Höhenlage der Gleichgewichtslinie dargestellt. Seit 1946/47 wird

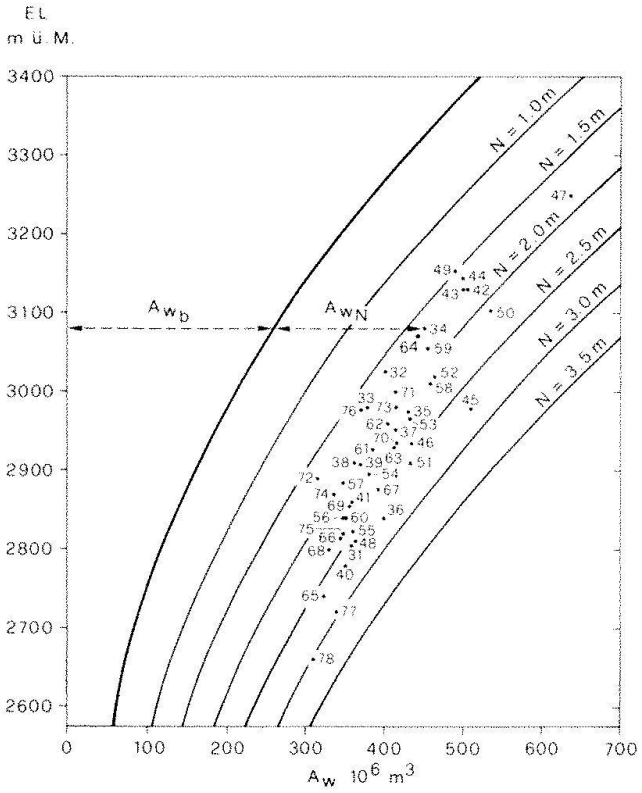


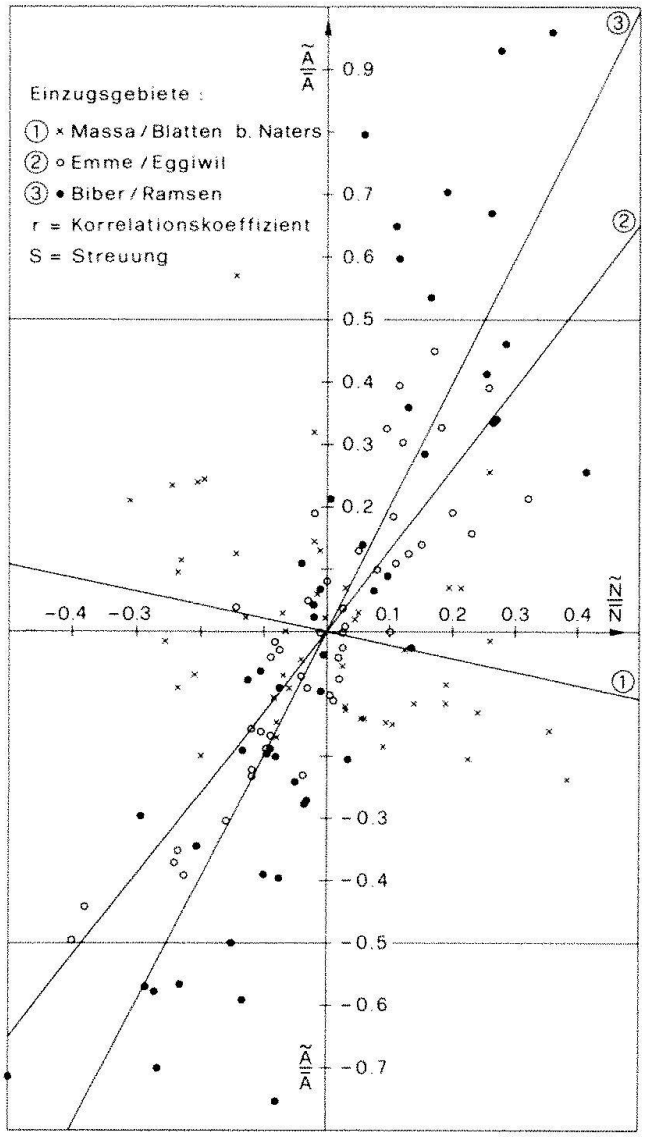

*Abb. 13.* Abfluss $A_w$ der Station Massa, Blatten bei Naters, in Abhängigkeit von der Meereshöhe der Gleichgewichtslinie auf den Aletschgletschern, für die 48 Jahre von 1930/ 31 bis 1977/78. Die Punkte sind mit der Jahrzahl des Sommers der Haushaltsjahre angeschrieben (vergleiche auch Abb. 12).

die Gleichgewichtslinie auch aus Pegelmessungen im Eis des Jungfraufirns bis unterhalb Konkordia bestimmt. Für die 32 Jahre bis 1977/78 liegt die berechnete Gleichgewichtslinie im Mittel 16,5 Meter höher als die nach vorläufiger Auswertung von Markus Aellen mit den Pegeln gemessene; die Streuung der Differenz beträgt ±44 Meter. Eine Regression der Differenz zwischen Modellrechnung und Messung mit der Zeit ergibt einen Trend von +45,6 Meter im Jahre 1946/47 nach −15,7 Meter im Jahre 1977/78. Dieser Trend ist darauf zurückzuführen, dass die Abnahme der Gletscherflächen während der Referenzperiode in der Rechnung nicht berücksichtigt worden ist.

Im Durchschnittsverhalten nimmt in stark vergletscherten Einzugsgebieten der Wasserabfluss mit zunehmendem Jahresniederschlag ab. In unvergletscherten Einzugsgebieten ist es umgekehrt.

In Abbildung 14 werden für die 48 Jahre von 1930/31 bis 1977/78 die normierten Abweichungen der Abflussmengen von ihrem Mittelwert in Abhängigkeit der normierten Abweichungen der Niederschläge für das Einzugsgebiet der Aletschgletscher oberhalb der Station der Massa, Blatten bei Naters, verglichen mit denen der unvergletscherten Einzugsgebiete der Emme oberhalb Eggiwil und der Biber oberhalb Ramsen. Die Steigung der Regressionsgeraden ist negativ für Aletsch, positiv für Emme und Biber. Die Streuung der normierten Niederschläge ist in allen Gebieten ungefähr gleich gross. Weil Gletscher infolge des Temperatureinflusses ausgleichend auf die Jahresabflussmengen wirken, ist im Aletschgebiet deren Streuung in Prozenten der Mittelwerte kleiner als diejenige der Niederschläge, in den beiden anderen Gebieten dagegen grösser wegen des überwiegenden Einflusses der Verdunstung und der Änderung der flüssigen Reserven. Der verschiedene Jahresgang des Abflusses aus vergletscherten und unvergletscherten Gebieten kommt deutlich im Verhältnis von Abfluss zu Niederschlag für die einzelnen Monate zum Ausdruck.

Diese sogenannten Abflusskoeffizienten verdeutlichen in Abbildung 15 die gebietsweisen Unterschiede in der Reservenbildung während der Wintermonate und im Abbau dieser Reserven während des Frühjahrs und Sommers. Aus dem Vergleich der Abbildun-




$$\text{est}\ \frac{\tilde{A}}{\bar{A}} = a \cdot \frac{\tilde{N}}{\bar{N}}$$

| Gebiet | E km² | $F_{1930}$ km² | $F_{1978}$ km² | Ho m.ü.M. | Hm 1957 m.ü.M. | Hu m.ü.M. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ① | 194.7 | 136.8 | 128.3 | 4195 | 2950 | 1448 |
| ② | 102 | 0 | 0 | 2221 | 1330 | 773 |
| ③ | 162 | 0 | 0 | 831 | 570 | 404 |

| Gebiet | $\bar{A}$ kg m⁻² | $\bar{N}$ kg m⁻² | $S_A/\bar{A}$ % | $S_N/\bar{N}$ % | a | r |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ① | 2083 | 2161 | ±16.4 | ±23.5 | -0.217 | -0.312 |
| ② | 1148 | 1548 | ±22.8 | ±15.5 | +1.301 | +0.883 |
| ③ | 235 | 840 | ±44.5 | ±18.7 | +1.984 | +0.835 |

*Abb. 14.* Beziehung zwischen Jahresabfluss A und Jahresniederschlag N vergletscherter und unvergletscherter Einzugsgebiete, dargestellt durch die normierten Abweichungen vom Mittelwert, für die Jahre 1930/31 bis 1977/78. Es sind $\bar{N}$ und $\bar{A}$ Mittelwerte, $\tilde{N} = N - \bar{N}$ und $\tilde{A} = A - \bar{A}$, E = Einzugsgebietsfläche, $F_{1930}$ = Gletscherfläche im Herbst 1930, Ho = höchste, Hm = mittlere und Hu = tiefste Meereshöhe von E.

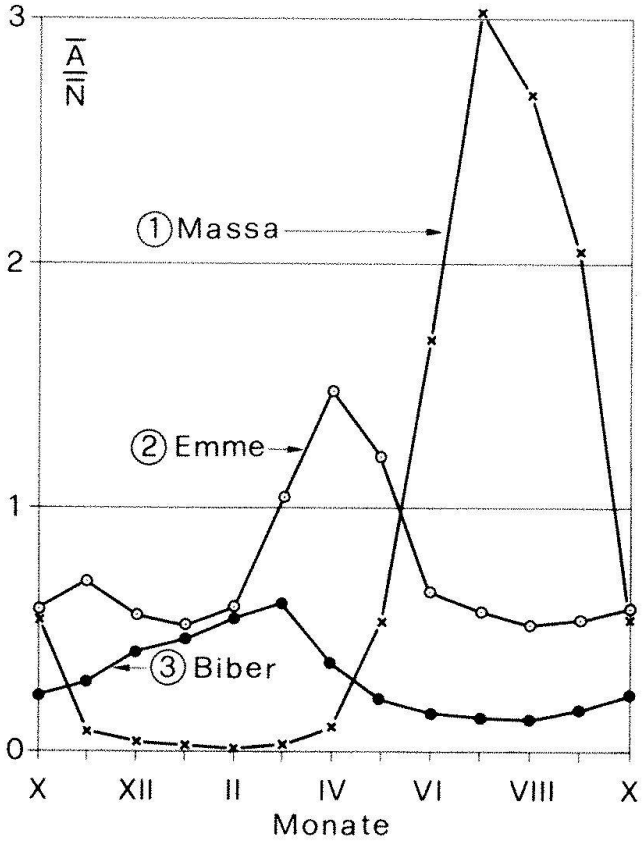



*Abb. 15.* Verhältnis von Abfluss zu Niederschlag (Abflusskoeffizienten) für Monatswerte in vergletscherten und unvergletscherten Einzugsgebieten, im Durchschnitt der Periode 1930/31 bis 1977/78 (Bezeichnungen wie in Abbildung 14).

gen 14 und 15 geht hervor, dass der Gletscher zwar ausgleichend auf die Jahreswerte des Abflusses eines Gebietes wirkt, gleichzeitig aber die Schwankungen der monatlichen Abflussmengen im Lauf eines Jahres verschärft.

## Gletscherveränderungen und Klima

Das Klima wirkt auf die Gletscher einerseits über die Ernährung durch Schneeniederschlag, anderseits über die Aufzehrung durch Schmelzprozesse. Die Reaktion der Gletscherenden auf Klimaschwankungen hängt zudem vom Transport von Firn und Eis durch die Gletscherbewegung und in einzelnen Fällen auch durch Lawinen ab. Alle diese Vorgänge sind auch Funktionen morphologischer Einflüsse. Die Ernährung der Gletscher ist vor allem durch die Niederschlagsmengen und die Höhenlage über Meer bestimmt. Auf 800 Metern über Meer

fallen ungefähr 20% des Jahresniederschlages in fester Form. Auf 2000 Metern sind es rund 60%, auf 2600 Metern etwa 80%. Oberhalb 3600 Metern über Meer fällt praktisch der gesamte Niederschlag als Schnee (Maurer, Billwiller und Hess 1909).
Die Aufzehrung ist durch den komplexen Mechanismus des Energieumsatzes, der die Wärmebilanz an der Gletscheroberfläche bewirkt, gesteuert. Grundlegende Betrachtungen und viele Literaturhinweise finden sich bei Geiger (1961), die ersten Messungen über Wärmeumsatz und Ablation auf Alpengletschern wurden am Vernagtferner in den Ötztaler Alpen (Hoinkes und Untersteiner 1952) und am Hornkees im Zillertal (Hoinkes 1953) ausgeführt. Die Schmelzwassermenge $A_S$ in $g\,cm^{-2}$ ist:

$$A_S = \frac{1}{L} \cdot Q_E,$$

worin $Q_E$ = Wärmebilanz der Gletscheroberfläche in $gcm^{-2}$

und $L = 79.7\ cal \cdot g^{-1}$ = latente Schmelzwärme des Eises.
Die Wärmebilanz $Q_E$ setzt sich zusammen aus

$$Q_E = Q_R + Q_S + Q_L + Q_N + Q_C,$$

worin $Q_R$ = Strahlungsbilanz (kurzwellig + langwellig)
$Q_S$ = fühlbarer Wärmestrom (Übergang von der Atmosphäre zum Gletscher)
$Q_L$ = latente Wärmeumsätze (Verdunstung und Kondensation)
$Q_N$ = Wärmeabgabe von Regenwasser an das Eis
$Q_C$ = Wärmestrom durch Wärmeleitung im Eis.

Die Strahlungsbilanz $Q_R$ ist

$$Q_R = S_K + S_L,$$

worin $S_K = G(1-\alpha)$ = Strahlungsbilanz im kurzwelligen Bereich, mit der Globalstrahlung G (= Strahlung von Sonne + Himmel) und der Albedo $\alpha$ (= Verhältnis der reflektierten zur auftreffenden kurzwelligen Strahlung), und $S_L = -\varepsilon \cdot \sigma (T_S^4 - T_A^4)$ = Strahlungsbilanz im Langwellenbereich, mit dem Emissionsvermögen $\varepsilon$, dem Stefan Bolzmannfaktor $\sigma$ und der absoluten Temperatur $T_S$ der Schneeoberfläche und $T_A$ der Gegenstrahlung aus der Atmosphäre in °K.

In den Monaten Juli und August 1965 wurde durch die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich mit Beteiligung des Osservatorio Ticinese in Locarno-Monti der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt eine eingehende Untersuchung über die Schmelzwasserbildung am Grossen Aletschgletscher durchgeführt. In dem vom Jungfraufirn herkommenden Eisstrom wurde in einer Druckzone des Gletschers auf etwa 2185 Metern über Meer ein Abflussfeld von 4480 m² Fläche abgegrenzt. Die gleichzeitige Messung von Niederschlag und Abfluss, ferner der Ablation an 50 Meßstellen, sowie der zur Berechnung der Wärmebilanz notwendigen meteorologischen Grössen erlaubt die Bestimmung der Schmelzwassermenge mit drei verschiedenen, voneinander unabhängigen Methoden. Vergleichende meteorologische Beobachtungen wurden am Ufer ausserhalb des Gletscherwindes durchgeführt. Über alle diese Arbeiten sind Berichte erschienen, in denen einzelne Aspekte behandelt werden (Lang 1967, 1968, 1973, 1978, 1979; Schönbächler 1967). Eine Publikation mit den Ergebnissen aus den Wärmehaushaltsmessungen ist in Vorbereitung. Zur Illustration des Problemkreises folgen nachstehend einige bisher un-

*Tab. 11.* Wärmehaushaltsstudie vom 2.–27. August 1965 am grossen Aletschgletscher – Bestimmung der Schmelzwassermenge $A_S$ mit drei verschiedenen Methoden (Summe der 26 Messtage)

| Methode | Schmelzwassermenge $A_S$ in $g/cm^2$ |
|---|---|
| Hydrologische Bilanz<br>Abfluss A minus Regen | 118 |
| Ablationsmessung<br>Mittel aus 50 Meßstellen mit Raumgewicht des Eises von 0.9 $gcm^{-3}$ | 114 |
| Wärmebilanz (vergleiche Tabelle 12)<br>+ 9719 $calcm^{-2}$/79.7 $cal.g^{-1}$ | 122 |

veröffentlichte Angaben, die sich auf die Messungen und Auswertungen von Herbert Lang und Meinrad Schönbächler (Wärmebilanz), Markus Aellen (Abfluss und Niederschlag) und Hans Siegenthaler (Ablation) stützen. In Tabelle 11 sind die Werte für die Schmelzwassermenge im Zeitintervall vom 2.–27. August für die drei Bestimmungsmethoden verglichen. Tabelle 12 gibt die Anteile der Bilanzen aus Strahlung, fühlbarer Wärme und latenter Wärme an der gesamten Wärmebilanz. Die Grössen $Q_N$ und $Q_C$ durften in diesem Fall als sehr klein vernachlässigt werden. Das positive Vorzeichen der Bilanz $Q_L$ für die latenten Wärmeumsätze zeigt, dass für den Schmelzvorgang im Messintervall mehr Wärme aus Kondensation gewonnen wurde als durch Verdunstung verloren ging.

*Tab. 12.* Wärmehaushaltsstudie vom 2.–27. August 1965 am Grossen Aletschgletscher – Wärmebilanz vom 2.–27. August (Summen der 26 Messtage)

| Art der Bilanz | | Bilanzwerte cal.cm$^{-2}$ | % |
|---|---|---|---|
| Strahlungsbilanz | $Q_R$ | +6950 | 71.5 |
| Bilanz der fühlbaren Wärme | $Q_S$ | +2026 | 20.9 |
| Bilanz der latenten Wärme | $Q_L$ | + 743 | 7.6 |
| Gesamte Wärmebilanz | $Q_E$ | +9719 | 100.0 |

*Tab. 13.* Wärmehaushaltsstudie vom 2.–27. August 1965 am Grossen Aletschgletscher – Wärmebilanzen vom 7. und 26. August

a) Tageswerte von Globalstrahlung G, Lufttemperatur t, Dampfdruck e, Windgeschwindigkeit v und gemessene Schmelzwassermenge $A_S$.

| Tag | G cal.cm$^{-2}$ | t °C | e mmHg | v m·s$^{-1}$ | $A_S$ $10^{-1}$ g.cm$^{-2}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 7. August | 556 | +9.2 | 6.52 | 4.5 | 94 |
| 26. August | 518 | +1.9 | 3.77 | 1.7 | 29 |

b) Strahlungsbilanz $Q_R = S_K + S_L$

| Tag | $\alpha$ % | $S_K$ cal.cm$^{-2}$ | $S_L$ cal.cm$^{-2}$ | $Q_R$ cal.cm$^{-2}$ |
|---|---|---|---|---|
| 7. August | 21 | 434 | – 27 | 407 |
| 26. August | 30 | 367 | – 116 | 251 |

c) Wärmebilanz $Q_E = Q_R + Q_S + Q_L$ in cal.cm$^{-2}$

| Tag | $Q_R$ cal.cm$^{-2}$ | $Q_S$ cal.cm$^{-2}$ | $Q_L$ cal.cm$^{-2}$ | $Q_E$ cal.cm$^{-2}$ |
|---|---|---|---|---|
| 7. August | 407 | 157 | 177 | 741 |
| 26. August | 251 | 42 | – 39 | 254 |

d) $Q_R$, $Q_S$ und $Q_L$ in % von $Q_E$

| Tag | $Q_R$ % | $Q_S$ % | $Q_L$ % | $Q_E$ % |
|---|---|---|---|---|
| 7. August | 55 | 21 | 24 | 100 |
| 26. August | 99 | 16 | – 15 | 100 |

Für Tageswerte können die Anteile von $Q_R$, $Q_S$ und $Q_L$ innerhalb von weiten Grenzen variieren. Obwohl die Sonnenstrahlung die primäre Ursache für die Erwärmung von Erdoberfläche und Atmosphäre ist, gibt es keine einfache Beziehung zwischen Globalstrahlung und Abschmelzung. In Tabelle 13 werden die Daten für zwei ausgewählte Tage verglichen, die sich in bezug auf die Globalstrahlung G nur wenig, in bezug auf die Schmelzwassermengen dagegen wesentlich unterscheiden. Die Globalstrahlung des 26. August beträgt 93% derjenigen vom 7. August, die Schmelzwassermenge dagegen nur 31%. Gegenüber dem 26. August ist der 7. August ausgezeichnet durch höhere Lufttemperatur, grösseren Dampfdruck der Atmosphäre, stärkeren Wind und kleinere Albedo. Alle drei in Tabelle 13c aufgeführten Komponenten der Wärmebilanz sind am 26. August kleiner als am 7. August. Die Hauptursachen für diese Unterschiede sind bei der Strahlungsbilanz $Q_R$ im kurzwelligen Bereich die kleinere Gegenstrahlung aus der Atmosphäre, bei der Bilanz $Q_S$ der fühlbaren Wärmeströme die tiefere Lufttemperatur und bei der Bilanz $Q_L$ des Austausches latenter Wärme der kleinere Dampfdruck der Luft. Bei $Q_S$ und $Q_L$ wirkt auch die kleinere Windgeschwindigkeit in der gleichen Richtung. Am 7. August überwogen die Bedingungen für Kondensation, am 26. August diejenigen für Verdunstung. Auf eine feinere Analyse der Zusammenhänge zwischen der Schmelzwasserbildung und der diese beeinflussenden Grössen im Tagesablauf soll hier nicht eingetreten werden.

Für ingenieurmässige Abschätzungen der Schmelzwassermengen stehen die Wärmehaushaltsgrössen meist nicht zur Verfügung. In diesem Fall wird normalerweise die Lufttemperatur stellvertretend für die Gesamtheit der Einflussgrössen verwendet. Diese empirischen statistischen Beziehungen sind aber nur für längere Zeitintervalle, etwa für einige Wochen oder Monate, brauchbar.

Oft wird mit der Summe der positiven Ta-

gesmittel $+t$ °C der Lufttemperatur gearbeitet, mit der empirischen Formel

$$A_S = a \cdot \sum_{1}^{n} + t,$$

worin $A_S$ = Schmelzwassermenge in $10^{-1}$ gcm$^{-2}$ oder in kg m$^{-2}$
$a$ = Gradfaktor in $10^{-1}$ gcm$^{-2}$ °C$^{-1}$ oder in kg m$^{-2}$ °C$^{-1}$
$n$ = Anzahl der Tage mit positivem Tagesmittel $+t$ °C

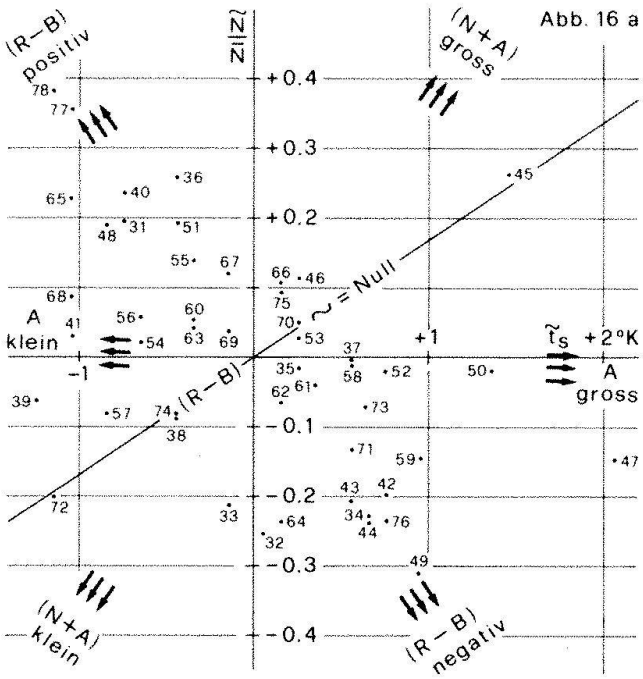
Theodor Zingg hat für die Schneeoberfläche im horizontalen Versuchsfeld auf Weissfluhjoch (2640 m ü.M.) für a einen mittleren Wert von 4,5 gefunden (Zingg 1951). Eine kritische Analyse über den Gradtagfaktor a ist kürzlich erschienen (de Quervain 1979).

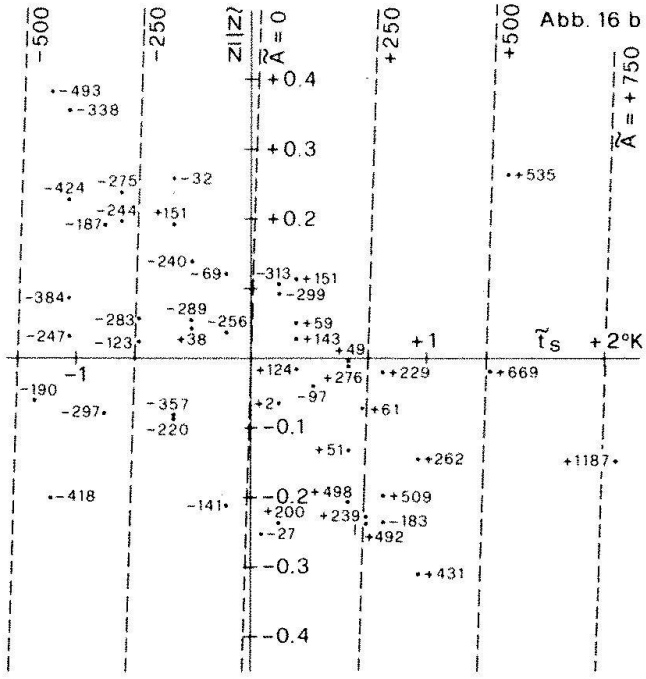
Wenn Abfluss, Massenumsatz und Massenbilanz für ein bestimmtes stark vergletschertes Einzugsgebiet in Abhängigkeit von Jahresniederschlag und Sommertemperatur für eine längere Jahresreihe untersucht werden sollen, können auch die Sommertemperaturen einer Klimastation ausserhalb des Gebietes verwendet werden. Dies ist besonders interessant, weil es unter den Klimagrössen nur von Niederschlag und Temperatur einige Messreihen gibt, die bis vor den letzten Maximalstand der kleinen Eiszeit zurückreichen. Die Resultate eines solchen Versuchs sind für das die Aletschgletscher entwässernde Einzugsgebiet der Massa von Blatten bei Naters in Abbildung 16 dargestellt.

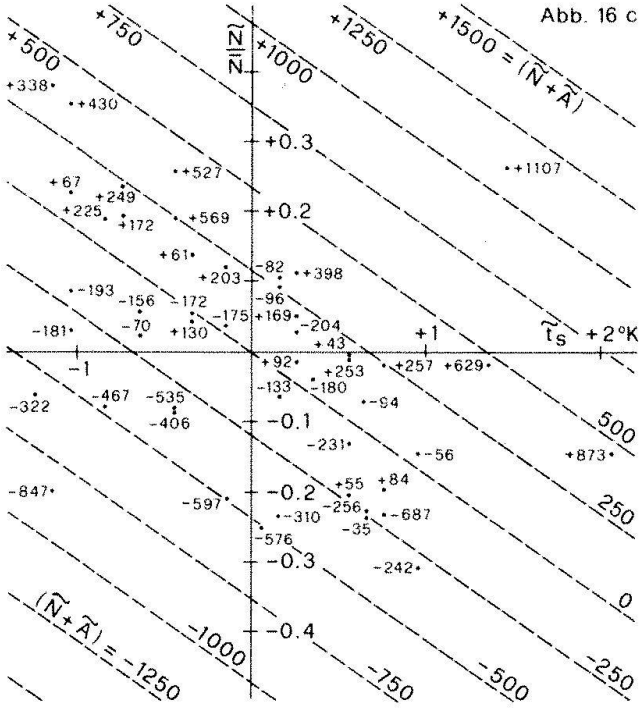
Untersucht werden durch multiple Regressionen der Einfluss des Jahresniederschlages N und der Sommertemperatur $t_s$ vorerst auf den jährlichen Wasserabfluss A in Abbildung 16b, dann auf die für den Massenumsatz eingeführte Grösse $(N + A)$ in 16c und schliesslich auf die jährliche Reservenänderung $(R - B)$ des Einzugsgebietes in 16d. Die Werte von A, $(N + A)$ und $(R - B)$ sind durch die Bestimmungsgleichung der hydrologischen Bilanz $(N - V) - A = (R - B)$ linear verknüpft. Deshalb stimmen die Regressionskoeffizienten $a_2$ und die partiellen Korrelationskoeffizienten $r_{y2.1}$ der Sommertemperatur in den drei Gleichungen abgesehen vom Vorzeichen miteinander überein. Alle Variablen werden zentriert, also als Abweichungen von den Mittelwerten der 48-jährigen Messperiode von 1930/31 bis 1977/78 eingeführt. In jeder der 4 Abbildungen 16a bis 16d sind die Jahresniederschläge auf der Ordinate, die Sommertemperaturen auf der Abszisse aufgetragen. Die 48 Punkte, welche je ein Wertepaar darstellen, sind in 16a mit der Jahreszahl des Haushaltssommers angeschrieben, in 16b mit dem Wert für den Abfluss, in 16c für den Massenumsatz und in 16d für die Reservenänderungen. In 16a zeigen die dicken Pfeile schematisch, wie sich die Schätzgrössen $\tilde{A}$, $(\tilde{N} + \tilde{A})$ und $(\tilde{R} - \tilde{B})$ grundsätzlich verhalten, in 16b bis 16d stellen die Geraden mit der Schätzgrösse als Parameter das aus den Regressionen folgende Durchschnittsverhalten quantitativ dar.

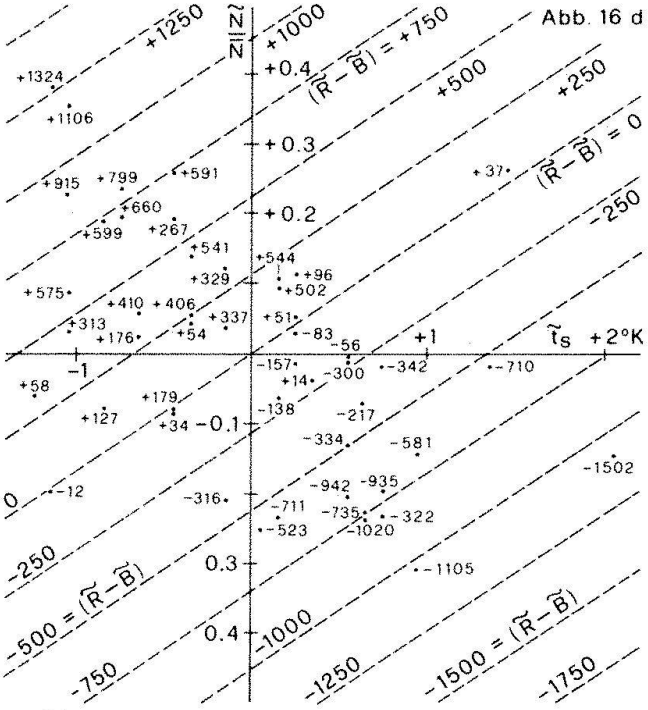
Die Geraden für $\tilde{A}$ in 16b weichen nur wenig von der Richtung der Ordinate ab. Dies bedeutet, dass der jährliche Wasserabfluss vorwiegend durch die Temperaturen bestimmt wird und vom Jahresniederschlag nahezu unabhängig ist, was auch durch den nur wenig von Null verschiedenen Wert des partiellen Korrelationskoeffizienten $r_{y1.2}$ des Niederschlags bestätigt wird. Im Gegensatz zum Wasserabfluss hängen der Massenumsatz in 16c und die Reservenänderung in 16d in ähnlichem Ausmass von Niederschlag und Temperatur zugleich ab. Die gemessenen Variationsbreiten von Jahresniederschlag und Sommertemperaturen sind am Beispiel der Genfer Reihen für 143 Jahre in den Abbildungen 17b und 17c ersichtlich. Sie

*Abb. 16.* Einfluss von Jahresniederschlag und Sommertemperatur auf den Abfluss, den Massenumsatz und die Reservenänderungen im Einzugsgebiet der Massa in Blatten bei Naters in den 48 Jahren von 1930/31 bis 1977/78. N = Gebietsmittel des Jahresniederschlags, A = Jahresabfluss der Massa in Blatten bei Naters, $(N + A)$ = Mass für den Massenumsatz, $(R - B)$ = Rücklagen minus Aufbrauch = Reservenänderung, $t_s$ = durchschnittliche Sommertemperatur = Temperaturtagesmittel der Monate Mai bis September von Genf. Mittelwerte von 48 Jahren: $\bar{N} = 2160{,}6$ kg m$^{-2}$, $\bar{A} = 2083{,}1$ kg m$^{-2}$, $(\bar{N} + \bar{A}) = 4243{,}7$ kg m$^{-2}$, $(\bar{R} - \bar{B}) = -132{,}5$ kg m$^{-2}$, $\tilde{N}$, $\tilde{A}$, $(\tilde{R} - \tilde{B})$ und $\tilde{t}_s$ sind die Abweichungen von den Mittelwerten.




$$\hat{y} = a_1 x_1 + a_2 x_2 = a_1 \frac{\tilde{N}}{\tilde{N}} + a_2 \cdot \tilde{t}_s$$

| $\hat{y}$ kg m$^{-2}$ | REGRESSIONS-KOEFFIZIENTEN | | KORRELATIONS-KOEFFIZIENTEN | | | STANDARD-ABWEICHUNG | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $a_1$ | $a_2$ | MULTIPLE R | PARTIELLE $r_{y1.2}$ | PARTIELLE $r_{y2.1}$ | $s_y$ kg m$^{-2}$ | $s_{x1}$ | $s_{x2}$ °K |
| $\hat{y}$ = est $\tilde{A}$ | − 46 | + 373 | 0.853 | −0.039 | +0.821 | ± 341 | ± 0.170 | ± 0.77 |
| $\hat{y}$ = est $(\tilde{N}+\tilde{A})$ | +2116 | + 373 | 0.888 | +0.875 | +0.821 | ± 387 | | |
| $\hat{y}$ = est $(\tilde{R}-\tilde{B})$ | +2208 | − 373 | 0.954 | +0.883 | −0.821 | ± 595 | | |

betragen ungefähr $+0{,}6\ \tilde{N} > \tilde{N} > -0{,}4\ \tilde{N}$ und $+2°K > \vartheta_s > -2°K$. Tabelle 14 zeigt, wie sich diese extremen Abweichungen auf Abfluss, Umsatz und Reservenänderung auswirken, wenn man sie auf das zu rund zwei Dritteln vergletscherte Einzugsgebiet der Massa überträgt. Wird dabei die Reservenänderung (R – B) voll dem Gletscher zugeschrieben, ergibt sich eine jährliche mittlere spezifische Haushaltszahl $\bar{b}$ der Aletschgletscher von $\bar{b} = \sim 1{,}5$ (R – B). Die Temperatureinheit von 1°K ist ein sehr grobes Mass. Eine dauernde Änderung der Lufttemperaturen um diesen Betrag hat, dem mittleren Gradienten der Temperatur mit der Meereshöhe entsprechend, eine Verschiebung der Klimastufen um rund 150 Höhenmeter zur Folge. Verschärft wird die Auswirkung einer Temperaturänderung auf die Gletscher noch durch die negative Regression zwischen Sommertemperatur und Jahresniederschlag (vergleiche Abbildung 14).

In jeder der Abbildungen 16b bis 16d stimmen einige der Messwerte, mit denen die 48 Punkte angeschrieben sind, ziemlich schlecht mit den Werten der Regressionsgeraden überein. Diese «Ausreisser» zeigen, dass die Grössen A, (N + A) und (R – B) nur in erster Annäherung durch Jahresniederschlag und Sommertemperatur bestimmt werden können. Einflussgrössen wie zum Beispiel der Schneeanteil am Niederschlag, der Ablationsausfall infolge sommerlicher Kälteeinbrüche mit Schneefall (Hoinkes 1970), die Dauer der Ablationsperiode sowie der zeitliche Ablauf der Witterung und die zeitliche Änderung der Gletscherfläche (Kasser 1973) sind ebenfalls wichtig. Die Prüfung solcher zusätzlicher, unabhängiger Variablen kann zum Beispiel mittels Hauptkomponentenanalysen, durch die Untersuchung von Residuen oder durch die Analyse extremer «Ausreisser» erfolgen.

In Tabelle 15 sind die Daten für die Jahre mit den Extremwerten von N, $\vartheta_s$, A, (N + A), (R – B) und $\bar{b}$ zusammengestellt. Bei den vier Fällen der extremen Abflussmengen und Reservenänderungen sind mit gegensätzlichen Vorzeichen ausschliesslich die beiden Jahre 1946/47 und 1977/78 beteiligt, das erste mit maximalen Temperaturen bei mässig unterdurchschnittlichem Niederschlag, das zweite mit maximalen Niederschlägen und den nahezu tiefsten Sommertemperaturen. Naturgemäss fallen die 1944/45 und 1971/72 beobachteten Extremwerte für den Umsatz auf Jahre mit nahezu ausgeglichenem Massenhaushalt. Für diese vier Jahre stimmen in den Abbildungen 16b bis 16d mit Ausnahme von 1946/47 die aus der hydrologischen Bilanz bestimmten Messwerte für $\tilde{A}$, $(\tilde{N} + \tilde{A})$ und $(\tilde{R} - \tilde{B})$ sehr gut mit denjenigen der Regressionsgeraden überein. Im Jahre 1946/47 sind die Messwerte für den Abfluss und Umsatz um 420 $kg\,m^{-2}$ grösser, als nach den Regressionen zu erwarten wäre, die Reservenänderung um diesen Betrag stärker negativ. Hauptursachen für dieses von der Norm abweichende Verhalten dürften die lange Ablationsperiode mit ungewöhnlichen ununterbrochenen Schönwetterperioden mit Strahlungswetter und die starke Verschmutzung der Oberfläche in den Firngebieten sein (Kuhn 1947, 1948), (Firnberichte 1913/14ff.).

Einen Überblick über den zeitlichen Ablauf der rezenten Gletscherveränderungen in den Schweizer Alpen bis zum Herbst 1978 gibt Abbildung 17.

Die Häufigkeit von Vorstoss und Rückzug der Gletscherenden ist seit 1890 aufgezeichnet, die Änderung der gesamten Gletscherfläche seit 1876 und die Summenlinie von Haushaltswerten einzelner Gletscher seit 1922. Die in bezug auf Stationswechsel homogenisierten Messreihen des Jahresniederschlages und der Sommertemperaturen von Genf illustrieren die klimatische Entwicklung seit dem Herbst 1835. Die gleitenden Fünfjahresmittel dieser Klimareihen lassen die Zusammenhänge mit den Gletscherveränderungen in den grossen Linien erkennen. Im 19. Jahrhundert kommen die Bedingungen für den Maximalstand um 1850 und die Einleitung der Schwundperiode in der zweiten Hälfte der 50er Jahre klar zum Ausdruck. Im 20. Jahrhundert führen Niederschlagsreichtum und relative Kälte im zweiten Dezennium zum sogenannten 1920er Vorstoss der Gletscher, die trockenen und warmen 40er Jahre bringen den Höhepunkt der Rezession, der seit etwa 1954 eine vorerst zögernde, ab 1964 deutlichere Erholung folgt. Kleine Gletscher stossen in den letzten Jahren grösstenteils vor, die grossen sind meist noch im Rückzug begriffen. Im Beobachtungsnetz waren in den letzten Jahren im Durchschnitt etwa gleich viele Gletscher im

Vorstoss wie im Rückzug, die Gletscher sind dank der relativ gletscherfreundlichen Witterung der letzten fünfzehn Jahre mit dem Klima ungefähr ins Gleichgewicht gekommen. Diese klimatischen Bedingungen hätten allerdings in bezug auf die Sommertemperaturen bei weitem nicht genügt, um den Maximalstand von 1850 zu erhalten (Patzelt 1976). Dies gilt auch dann noch, wenn man berücksichtigt, dass in der Genfer Reihe von Abbildung 17 die Erwärmung infolge der Entwicklung der Stadt nicht eliminiert ist. Nach persönlicher Mitteilung von Max Schüepp dürfte diese Erwärmung im Falle der Genfer Reihe ungefähr 0,6 bis 0,7°K ausmachen und damit weniger als die Hälfte der Temperaturdifferenzen zwischen der Mitte des 19. Jahrhunderts und den zu Ende gehenden 1970er Jahren betragen. Nach den reichlichen Niederschlägen seit dem Herbst 1964 ist zu erwarten, dass auch einige grössere Gletscher bald vorzustossen beginnen. Ob es zu einem nachhaltigen allgemeinen Vorstoss kommen wird oder nicht, hängt aber von der weiteren Entwicklung der klimatischen Verhältnisse ab.

*Tab. 14.* Mögliche extreme Abweichungen von Jahresniederschlag und Sommertemperatur vom Normalwert und ihre Auswirkungen auf Wasserabfluss, Massenumsatz und Massenhaushalt im Einzugsgebiet der Massa in Blatten bei Naters

| $\tilde{N}$ | $\tilde{t}_s$ | $\tilde{A}$ | $\tilde{A}$ | $(\tilde{N}+\tilde{A})$ | $(\tilde{N}+\tilde{A})$ | $(\tilde{R}-\tilde{B})$ | $\tilde{b}$ |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | °C | $kgm^{-2}$ | % | $kgm^{-2}$ | % | $kgm^{-2}$ | $kgm^{-2}$ |
| 0 | +2 | +746 | +36 | + 746 | +18 | − 746 | −1119 |
| 0 | −2 | −746 | −36 | − 746 | −18 | + 746 | +1119 |
| +0.6 | 0 | − 28 | − 1 | +1270 | +30 | +1325 | +1988 |
| −0.4 | 0 | + 18 | + 1 | − 846 | −20 | − 883 | −1325 |

*Tab. 15.* Beobachtete Extremwerte der Jahreshaushaltsgrössen im Einzugsgebiet der Massa von Blatten bei Naters und entsprechende Abweichungen $\tilde{t}_s$ der Sommertemperaturen von Mai bis September in Genf vom Mittelwert $\bar{t}_s = 17.24$ °C, im Zeitintervall von 1930/31–1977/78

$(R-B)=(N-V)-A$; $\bar{b}=E\ (R-B)/F=\sim 1{,}5\cdot(R-B)$, $(R-B)$ = Reservenänderung bezogen auf Einzugsgebiet $E=194.7\ km^2$, N = Niederschlag, V = Verdunstung = 210 $kgm^{-2}$, A = Abfluss, $\bar{b}$ = mittlere spezifische Haushaltszahl bezogen auf Gletscherfläche F.

| Jahr | N | $\tilde{t}_s$ | A | N+A | R−B | $\bar{b}$ |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | $kgm^{-2}$ | °C | $kgm^{-2}$ | $kgm^{-2}$ | $kgm^{-2}$ | $kgm^{-2}$ |
| | Extreme Niederschläge N | | | | | |
| 1977/78 | 2991 | −1.14 | 1590 | 4581 | +1191 | +1805 |
| 1948/49 | 1487 | +0.96 | 2514 | 4001 | −1237 | −1827 |
| | Extreme Temperaturen $\tilde{t}_s$ | | | | | |
| 1946/47 | 1846 | +2.06 | 3270 | 5116 | −1634 | −2402 |
| 1938/39 | 2028 | −1.24 | 1893 | 3921 | − 75 | − 108 |
| | Extreme Abflussmengen A | | | | | |
| 1946/47 | 1846 | +2.06 | 3270 | 5116 | −1634 | −2402 |
| 1977/78 | 2991 | −1.14 | 1590 | 4581 | +1191 | +1805 |
| | Extremer Umsatz N + A | | | | | |
| 1944/45 | 2732 | +1.46 | 2618 | 5350 | − 96 | − 141 |
| 1971/72 | 1731 | −1.14 | 1665 | 3396 | − 144 | − 218 |
| | Extreme Reservenänderungen R − B und $\bar{b}$ | | | | | |
| 1977/78 | 2991 | −1.14 | 1590 | 4581 | +1191 | +1805 |
| 1946/47 | 1846 | +2.06 | 3270 | 5116 | −1634 | −2402 |
| | Durchschnittswerte | | | | | |
| 1930/31 bis 1977/78 | 2161 | 0 | 2083 | 4244 | − 132 | |

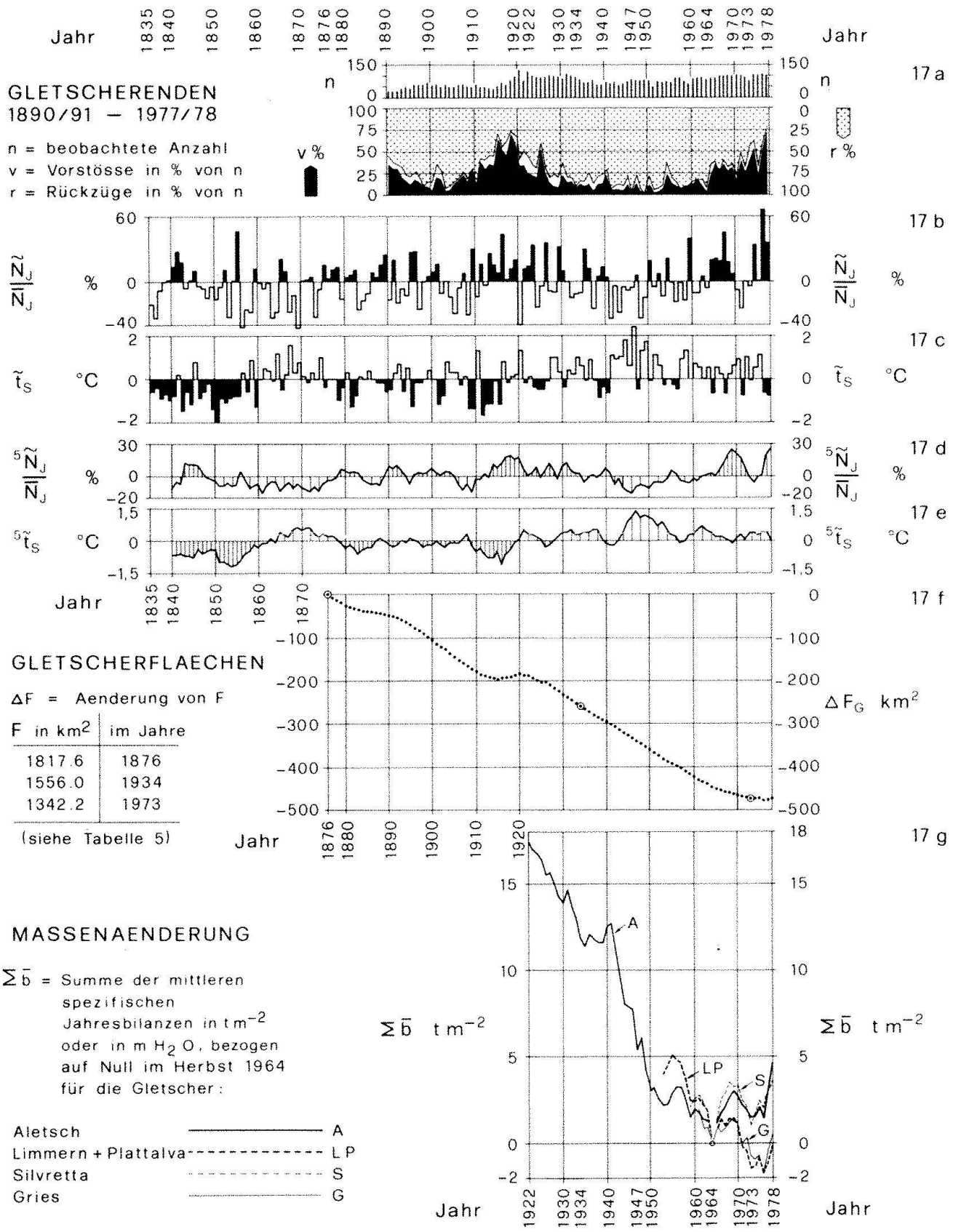



*Abb. 17.* Häufigkeit von Vorstoss und Rückzug, Änderung der Flächen und der Massen der Schweizer Gletscher, sowie die Niederschläge und Temperaturen von Genf. $N_J$ = Jahresniederschlag Oktober bis September, $t_S$ = Sommertemperaturen Mai bis September, $\bar{N}_J$ = 884,2 mm, bzw. $\bar{t}_S$ = 16,9 °C sind Mittelwerte 1835/36–1977/78. $\tilde{N}_J = N_J - \bar{N}_J$, $\tilde{t}_S = t_S - \bar{t}_S$, ${}^5\tilde{N}_J$ bzw. ${}^5\tilde{t}_S$ sind 5jährige gleitende Mittelwerte.

## Schlussbemerkungen

Dank der Weitsicht und Beharrlichkeit von François Alphonse Forel, Paul-Louis Mercanton und anderen gibt es Tausende von Beobachtungen und Messresultaten, die sich zum Gesamtbild zusammenschliessen, das in Abbildung 17 dargestellt ist und einen Überblick über die rezenten Gletscherveränderungen in den Schweizer Alpen gibt. Die Messbedingungen an Gletschern ändern sich dauernd. Es ist deshalb wichtig, dass ein Netz von Gletscherbeobachtungen nicht als Routineangelegenheit betrieben wird. Die Interpretation der Beobachtungen erfordert eine wissenschaftliche Bearbeitung. Es wurde versucht, auf die Motivation für Gletscheruntersuchungen, die Möglichkeiten und Grenzen für die Durchführung von Messungen sowie auf die Schwierigkeiten bei der Interpretation hinzuweisen, wie auch einige wichtige Zusammenhänge mit den Klimaschwankungen anzudeuten. Manches musste Fragment bleiben. Einige Zwischenresultate aus noch in Arbeit begriffenen Studien sind vorweggenommen, verschiedene Probleme nur in ihren Umrissen skizziert worden. Ein Fragenkomplex, der im Rahmen dieser Arbeit gar nicht behandelt werden konnte, betrifft den Einfluss der morphologischen Parameter auf die Gletscherveränderungen (Kasser und Aellen 1976; Kasser 1979).

Unter dem Eindruck der Rezession der Gletscher wurde vor zwanzig Jahren (Kasser 1959) über die möglichen Entwicklungen unter anderem geschrieben: «Seit wir über zuverlässige Abflussmengenmessungen von erheblich vergletscherten Gebieten verfügen, d.h. seit dem zweiten Jahrzehnt unseres Jahrhunderts, lässt sich nachweisen, dass unsere Gletscherbäche auf zu grossem Fuss leben. Die Wasserführung der letzten Jahrzehnte kann nur auf Kosten des Gletscherkapitals andauern, wozu aber ein Andauern des Temperaturanstieges notwendig ist.

Mit einem Andauern des Temperaturanstieges dürfen wir kaum rechnen. Seit 1950 hat die Aufwärtsbewegung aufgehört. Die Gletscher haben angefangen, sich im Firngebiet zu erholen, die Massenbilanzen sind nahezu ausgeglichen. Der Schwund in den Zungengebieten geht noch weiter, bis sich der Nachschub an Eis durch die Gletscherbewegung wieder normalisiert hat. Mit historischen Maßstäben gemessen, ist unser Klima sehr warm geworden. Seit rund 750 Jahren waren die Alpengletscher nie kleiner als heute. Steigen die Temperaturen nicht weiter an, sondern bleiben auf dem Niveau der letzten 20 Jahre, werden die Abflussmengen zurückgehen, bis sie wieder den Niederschlagsverhältnissen entsprechen. ... Wesentlich einschneidender müsste sich ein Temperaturrückgang auswirken. Es gibt doch zu einigen Überlegungen Anlass, wenn wir feststellen, dass beispielsweise der Gornergletscher im Jahre 1949 über 160 Mio $m^3$ Wasser lieferte, in der Periode 1921/34 115 Mio $m^3$/Jahr, dem stationären Zustand für die Niederschlagsverhältnisse 1901/40 nur 90 Mio $m^3$ Abfluss entspricht und in einer Rücklageperiode noch bedeutend weniger abfliessen wird.»

Abschliessend soll die Bedeutung der Gletscherbeobachtungen für die wissenschaftliche Forschung und für die technisch-wirtschaftliche Anwendung an einigen weiteren Beispielen illustriert werden:

- Langfristige Messreihen sind notwendig, um die Beziehungen der Gletscherveränderungen mit den klimatischen und morphologischen Einflussgrössen zu untersuchen. Die Resultate dieser Forschungen sollen mithelfen, ein möglichst vollständiges Bild der Gletscherveränderungen und der Klimaschwankungen vergangener Zeiten zu rekonstruieren und die möglichen zukünftigen Entwicklungen zu beurteilen.
- In der Rezessionsperiode waren die Abflussmengen vergletscherter Gebiete auf Kosten der Gletschersubstanz wesentlich grösser als in den letzten 14 Jahren mit einem nahezu stationären Zustand der Gletscher. Für das Aletschgebiet sind von den 48 Jahren seit 1930/31 alle sieben abflussreichsten Jahre zwischen 1942 und 1950 zu finden, acht der zehn abflussärmsten dagegen zwischen 1965 und 1978. Für die Energieproduktion aus Wasserkraft im Hochgebirge waren die letzten vierzehn Jahre wesentlich ungünstiger als die vierziger Jahre. In einer allgemeinen Vorstossperiode würden die verfügbaren Abflussmengen noch kleiner werden.
- Die Frage nach den Kriterien zur Wahl der Bemessungswassermengen für Wasserkraftanlagen in vergletscherten Einzugsgebieten stellt sich sowohl in bezug auf Periodenmit-

telwerte als auch auf Häufigkeitsverteilungen im Zusammenhang mit der wirtschaftlichen Ausbaugrösse der Werke.

- Als Folge des Schmelzwasserausfalls wegen der Flächenverminderung der Gletscher wären die Jahresabflussmengen der Rhone in Porte du Scex bei einer spezifischen Vergletscherung von nur etwa 14% bei gleichen klimatischen Bedingungen wie im Jahre 1915/16 heute ungefähr 13% kleiner als damals. Aus den während des Winters im Einzugsgebiet gebildeten Schneereserven können die Sommerabflussmengen in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens geschätzt werden. Prognosegleichungen, die aus der Referenzperiode von 62 Jahren seit 1915 berechnet werden, geben systematisch zu optimistische Werte für die Abflussvorhersagen, wenn die Flächenverminderung der Gletscher nicht berücksichtigt wird (Kasser 1973).
- Kurzfristige Abflussprognosen, wie sie zur wirtschaftlichen Optimierung von Kraftwerkbetrieben wie der Grande Dixence SA ausgearbeitet werden, stützen sich auf die Einflussgrössen, welche den Gletscherabfluss bestimmen (Jensen und Lang 1973).
- Mit dem Rückzug der Gletscher sind viele Bauten wie Kraftwerke, Seilbahnen und Strassen in dem erst seit der kleinen Eiszeit eisfrei gewordenen Gelände erstellt worden. Die Abschätzung des Vorstossrisikos bis zum Standort geplanter oder sogar bestehender Bauten erfordert Kenntnisse über das Verhalten der Gletscher.
- Die Gefährdung durch Gletscherstürze oder durch den Ausbruch eisgestauter Seen hängt vom Stand der Gletscher ab. Sowohl bei Vorstössen als auch bei Rückzügen können Gefahren verschwinden oder neu entstehen. Durch unsere Modelle lassen sich die Vorgänge in der Natur nur annähernd erfassen. Es braucht viel Erfahrung, um die Risiken nach dem Prinzip des «Calculated Risk» zu beurteilen und gegebenenfalls Massnahmen vorzuschlagen, die nicht im Widerspruch zu den komplexen Mechanismen der Natur stehen, sondern das natürliche Verhalten einbeziehen und auch keine wesentlichen neuen Risiken zur Folge haben.

Es dürfte kaum ein Zweifel daran bestehen, dass es sinnvoll ist, die langfristigen Erhebungen über die Veränderungen der Schweizer Gletscher weiterzuführen und weiterzuentwickeln. Die Gletscherkommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft und die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich, welche das Netz der Gletscherbeobachtungen in den Schweizer Alpen betreiben und auswerten, danken allen beteiligten Institutionen und Beobachtern, insbesondere den kantonalen Forstdiensten, die alljährlich mehr als zwei Drittel der Zungenmessungen ausführen, für ihre langjährige Mitarbeit. Eine zentrale Rolle spielt die Eidgenössische Landestopographie, auf deren kompetente Hilfe wir immer wieder angewiesen sind. Auch die Vermessungsflüge der Eidgenössischen Vermessungsdirektion liefern alljährlich wertvolle Grundlagen. Die Abflussdaten der Schweizerischen Landeshydrologie (A+W 1917ff.), die Klimadaten der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA 1864ff.) und die Informationen über Schnee und Lawinen des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung (EISLF 1936/37ff.) bilden eine Brücke von den Gletscherveränderungen zu den Klimaschwankungen. Der Autor dieser Übersichtsarbeit dankt auch den Mitarbeitern der VAW, vor allem Markus Aellen für die Leitung der Zungenmessungen und der Arbeiten am Aletschgletscher, wie auch für seine Anregungen bei der kritischen Durchsicht des Manuskripts, Hans Siegenthaler für die langjährigen Haushaltsmessungen an Gries, Limmern und Silvretta, Dietmar Grebner für die Bearbeitung der Klimareihen von Genf, Fredy Kobelt für seine Mitarbeit bei der Ausführung statistischer Berechnungen, Holger Jensen, Wilfried Haeberli und Herbert Lang für ihre Bemerkungen sowie Bruno Nedela für das Zeichnen der Cliché-Vorlagen.

## Literatur


A+W 1917ff.: Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz Jahrgang 1 (1917) bis Jahrgang 61 (1977). Herausgegeben vom Eidgenössischen Amt für Wasserwirtschaft, Bern. Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.

Bordier, L.C. (Mr.B), 1773: Voyage pitoresque aux glaciers de Savoie, fait en 1772. 303 pages, Genève.

Eidgenössische Landestopographie 1952ff.: Landeskarte 1:25000.

Eidgenössiche Landestopographie, Bern. 1967: Atlas der Schweiz, Blatt 15, Gewässer II, Karten und Diagramme. u.a. Rückgang des Zmuttgletschers von 1859 bis 1961, mit Topographie des Untergrundes, nach einem unveröffentlichten Gutachten von A. Süsstrunk.

EISLF 1936/37ff.: Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen - Winterberichte des Eidgenössischen Institutes für Schnee- und Lawinenforschung Weissfluhjoch/Davos. Nr.1 (1936/37)-Nr.42 (1977/78).

Firnberichte 1913/14ff.: Der Firnzuwachs pro ... in einigen schweizerischen Firngebieten. 1913/14-1919/20 in Jahrbuch «Ski» mit Titel: Berichte der Gletscherkommission der Physikalischen Gesellschaft Zürich. 1920/21-1976/77 in Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich. Autoren: Rutgers, F. Berichte 1 (1913/14)-3 (1915/16). Billwiller, R.4 (1916/17)-33 (1945/46). Kuhn, W.34 (1946/47)-49 (1961/62). Lemans, A.50 (1962/63)-64 (1976/77).

Geiger, R. 1961: Das Klima der bodennahen Luftschicht, Die Wissenschaft Band 78.

Gletscherberichte. 1881-1979: Jahresberichte über die Veränderungen der Schweizer Gletscher, ab 1894 als Publikation der Gletscherkommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Die Berichterstatter waren: Nr.1 (1880) bis 15 (1893/94): F.A. Forel, Nr.16 (1894/95) und 17 (1895/96): F.A. Forel und L. Du Pasquier, Nr.18 (1896/97) bis 27 (1905/06): F.A. Forel, M. Lugeon und E. Muret, Nr.28 (1906/07): F.A. Forel, E. Muret, P.Ls. Mercanton und E. Argand, Nr.29 (1907/08) bis 32 (1910/11): F.A. Forel, E. Muret und P.Ls. Mercanton, Nr.33 (1911/12) bis 34 (1912/13): E. Muret und P.Ls. Mercanton, Nr.35 (1913/14) bis 70 (1948/49): P.Ls. Mercanton, Nr.71 (1949/50) bis 75 (1953/54): P.Ls. Mercanton und A. Renaud, Nr.76 (1954/55) bis 83 (1961/62): A. Renaud, Nr.84 (1962/63) bis 91 (1969/70): P. Kasser, Nr.92 (1970/71) bis 99 (1977/78): P. Kasser und M. Aellen

Die Berichte sind in folgenden Zeitschriften erschienen: Nr.1 und 2: Echo des Alpes XVII und XVIII, Genève 1881 und 1882. Nr.3 bis 44: Jahrbuch des Schweizer Alpenklub, Bände XVIII bis LVIII, Bern 1883 bis 1924. Nr.45 bis 99: Die Alpen, Jahrgänge 1 bis 55, Bern 1925 bis 1979, Nr.71 bis 75 ohne Tabellen, Nr.85 bis 99 gekürzt.

Gross, G., Kerschner, H. und Patzelt, G. 1976: Methodische Untersuchungen über die Schneegrenze in alpinen Gletschergebieten. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 12, Heft 2, 223-251.

Heim, A. 1915: Die Gletscherkommission. Neue Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, Band L, Jahrhundertfeier, 171-180.

Hoinkes, H. und Untersteiner, N. 1952: Wärmeumsatz und Ablation auf Alpengletschern, I. Vernagtferner (Oetztaler Alpen), August 1950. Geografiska Annaler, Vol.XXXIV, 99-158.

Hoinkes, H. 1953: Wärmeumsatz und Ablation auf Alpengletschern, II. Hornkees 1951. Geografiska Annaler, Vol.XXXV, 116-140.

Hoinkes, H. 1970: Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. Ergebnisse der Messreihe Hintereisferner (Oetztaler Alpen) 1953-1968. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie Band 6, Heft 1-2, 37-90.

Huber, E. 1979: Die Eidgenössiche Landestopographie 1935-1978. Die Alpen, 55.Jg. 1.Quartal, 20-24.

Jegerlehner, J. 1902: Die Schneegrenze in den Gletschergebieten der Schweiz. Gerlands Beiträge zur Geophysik, Band V, 486-566.

Jensen, H. und Lang, H. 1973: Forecasting discharge from a glaciated basin in the Swiss Alps. Proceedings of the Banff Symposia 1972 "On the Role of Snow and Ice in Hydrology". Unesco-WMO-IAHS, Volume 2, 1047-1054.

Jost, W. 1936: Die seismischen Eisdickenmessungen am Rhonegletscher 1931. Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 71, Abhandlung 2.

Kasser, P. 1959: Der Einfluss von Gletscherrückgang und Gletschervorstoss auf den Wasserhaushalt. Wasser- und Energiewirtschaft, 51.Jahrgang, Nr.6, 155-168.

Kasser, P. 1967: Fluctuations of Glaciers 1959-1965: International Commission on Snow and Ice of the International Association of Scientific Hydrology and Unesco.

Kasser, P. 1970: Gründung eines «Permanent Service on the Fluctuations of Glaciers». Zeitschrift für Gletscherkunde und Glacialgeologie, Band 6, Heft 1-2, 193-200.

Kasser, P. 1973: Influence of changes in the glacierized area on summer runoff in the Porte du Scex drainage basin of the Rhone. Publication No95 de l'AISH, 219-225.

Kasser, P. und Aellen, M. 1976: Les variations des glaciers suisses en 1974/75 et quelques indications sur les résultats récoltés pendant la Décennie Hydrologique Internationale de 1964/65 à 1973/74. La Houille Blanche, No. 6/7, 467-481.

Kasser, P. 1979: On the effect of topographic orientation on the variations of glacier length. Rivista Italiana di Geofisica e Scienze affini, Vol.V, 93-96. Auch in: Proceedings of the Riederalp Workshop, September 1978, IAHS/AISH - Publication no.126, 305-311.

Kuhn, W. 1947: Der Firnzuwachs in einigen schweizerischen Firngebieten, XXXIV. Bericht. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich XCII (1947), 269-273.

Kuhn, W. 1948: Der Firnzuwachs in einigen schweizerischen Firngebieten, XXXV. Bericht. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich. XCIII (1948), 271-275.

Lang, H. 1967: Über den Tagesgang im Gletscherabfluss. 9. Internationale Tagung für Alpine Meteo-

rologie, Brig und Zermatt 14.–17. September 1966. Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, Nr. 4, 32–38.

Lang, H. 1968: Relations between glacier runoff and meteorological factors observed on and outside the glacier. IUGG – General Assembly of Bern, 1967. IAHS – Commission on Snow and Ice. IAHS-Publication Nr. 79, 429–439.

Lang, H. 1973: Variations in the relation between glacier discharge and meteorological elements. ICSI AIHS and IGS, Symposium on Hydrology of Glaciers, 1969 in Cambridge (England) Publication No. 95 de l'AIHS, 85–94.

Lang, H., Schädler, B. und Davidson, G. 1976: Hydroglaciological Investigations on the Ewigschneefeld (Gr. Aletschgletscher). Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 12, Heft 2, 109–124.

Lang, H. 1978: Über die Bedeutung der Lufttemperatur als hydro-meteorologischer Informationsträger. 14. Internationale Tagung für Alpine Meteorologie, 1976, Rauris. Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, Heft 227, III/25, 1–8.

Lang, H. 1979: Einige Angaben zum Mesoklima im Gletscherbereich im Hinblick auf hydrologisch-glaziologische Berechnungen. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich, Nr. 41, 155–167.

Lütschg, O. 1926: Über Niederschlag und Abfluss im Hochgebirge, Sonderdarstellung des Mattmarkgebietes. Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, Verbandschrift Nr. 14. Veröffentlichung der Hydrologischen Abteilung der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt.

Maurer, J., Billwiller, R. und Hess, C. 1909: Das Klima der Schweiz, Band I, 89, herausgegeben durch die Stiftung Schnyder von Wartensee mit Unterstützung der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt.

Mercanton, P.Ls. 1916: Vermessungen am Rhonegletscher. Neue Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, Band LII.

Mercanton, P.L. 1958: Aires englacées et cotes frontales des glaciers suisses. Wasser- und Energiewirtschaft, Jg. 50, 347–351.

Mothes, H. 1929: Neue Ergebnisse der Eisseismik. Zeitschrift für Geophysik, Jg. 5, Heft 3/4, 120–144.

Müller, F., Caflisch, T. und Müller G. 1976: Firn und Eis der Schweizer Alpen (Gletscherinventar). Geographisches Institut der ETHZ, Nr. 57, mit einem Ergänzungsband (Photoliste).

Oeschger, H. und Röthlisberger, H. 1961: Datierung eines ehemaligen Standes des Aletschgletschers durch Radioaktivitätsmessung an Holzproben und Bemerkungen zu Holzfunden an weiteren Gletschern. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band IV, Heft 3, 191–205.

Oberli, A. 1979: Dufour-Karte und Siegfried-Atlas. Die Alpen, 55. Jg. 1. Quartal, 9–16.

Patzelt, G. 1973: Die neuzeitlichen Gletscherschwankungen in der Venedigergruppe (Hohe Tauern, Ostalpen) Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 9, Heft 1–2, 5–57.

Patzelt, G. 1976: Statistik der Längenmessungen an den österreichischen Gletschern 1960–1975. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie Band 12, Heft 1, 91–94.

de Quervain, M. 1979: Schneedeckenablation und Gradtage im Versuchsfeld Weissfluhjoch. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH, Zürich, Nr. 41, 215–232.

Röthlisberger, H. 1976: Thermal consequences of the pressure fluctuations in intra- and subglacial water drainage channels. Journal of Glaciology, Vol. 16, Nr. 74, 309–310.

Schommer, P. 1976: Wasserspiegelmessungen im Firn des Ewigschneefeldes (Schweizer Alpen). Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 12, Heft 2, 125–141.

Schönbächler, M. 1967: Beziehung zwischen Strahlungsbilanz und Ablation des Aletschgletschers (vorläufige Mitteilung). 9. Internationale Tagung für Alpine Meteorologie in Brig und Zermatt 14.–17. September 1966. Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt Nr. 4. 39–42.

Schweizer Alpenklub (SAC), 1872. Instruktion für die Gletscherreisenden des SAC, Jahrbuch des SAC, 7. Jahrgang, 1871–1872. 352–384, Bern.

SMA 1864ff.: Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, Zürich, Jahrgang 1 (1864) – Jahrgang 114 (1977). Ab Jahrgang 1959 mit Beiheften zur Klimatologie der Schweiz.

Süsstrunk, A. 1951: Sondage du glacier par la méthode sismique. La Houille Blanche, No spécial A/1951, 309–317.

Süsstrunk, A. 1952: Bericht über die seismischen Sondierungen der Schweizerischen Gletscherkommission auf dem Unteraargletscher, 1936–1950. Unveröffentlichtes Gutachten Nr. 512 vom 4. Dezember 1952 der Firma Dr. H. Knecht, Geologe, und A. Süsstrunk, Dipl. Physiker ETH, Geotechnische und Geophysikalische Untersuchungen.

Thyssen, F. und Ahmad, M. 1969: Ergebnisse seismischer Messungen auf dem Aletschgletscher. Polarforschung Band VI, Jahrgang 39, 283–293.

Watts, R.D. und Anthony, W. 1976: Radio-Echo Sounding of temperate Glaciers: Ice Properties and Sounder Design Criteria. Journal of Glaciology, Volume 17, Number 75, 39–48.

Zingg, Th. 1951: Beziehung zwischen Temperatur und Schmelzwasser und ihre Bedeutung für Niederschlags- und Abflussfragen, IUGG General Assembly Bruxelles, IAHS Publication Volume I, 267–269.

Zumbühl, H. 1975: Die Schwankungen des Unteren Grindelwaldgletschers in den historischen Bild- und Schriftquellen des 12. bis 19. Jahrhunderts. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 11, Heft 1, 12–50.

*Anschrift des Verfassers:*

Dipl. Ing. Peter Kasser, Tit. Prof. ETH
Rennweg 45
CH-8704 Herrliberg