

# Die Gletscher der Schweizer Alpen im Jahr 1996/97

■ Wissenschaft und Bergwelt  
 ■ Scienza e mondo alpino  
 ■ Science et montagne

M. Hoelzle und D. Vonder Mühl<sup>1</sup>, A. Bauder und G. H. Gudmundsson<sup>2</sup>

30

Kurzfassung des 118. Berichts der Glaziologischen Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften (GK/SANW) und der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW/ETH-Zürich)

## Einleitung

### Zielsetzungen heutiger Gletscherbeobachtungen

Als vor über 100 Jahren die Gletscherbeobachtung gegründet und national wie international vom Schweizer F. A. Forel koordiniert wurde, stand als Ziel die Erklärung der Gletscherschwankungen an erster Stelle (Forel 1895). Dank der bisherigen Forschungsarbeiten – inklusive der intensiven Gletscherbeobachtungen – konnten die Kenntnisse über die Gletscher stark verbessert werden. Was sind denn die heutigen Ziele der Gletscherbeobachtung? Diese Frage muss vor allem bei langfristigen Beobachtungen immer wieder von neuem gestellt werden. Die Antworten können wie folgt lauten:

- Weitere Verbesserung des Prozessverständnisses
- Validierung von Modellen (z.B. regionale Klimamodelle)
- Analyse der Klimaindikatorfunktion (Abschätzung über Geschwindigkeiten der Änderung und die entsprechenden Energieflüsse, die natürliche Variabilität oder allfällige Beschleunigungstendenzen)
- Abschätzung der direkten und indirekten Auswirkungen von Gletscheränderungen auf die Umwelt (z.B. Gletschergefahren, Meeresspiegelanstieg)

### Auswirkungen von Gletscheränderungen auf den Meeresspiegel

Nach neusten Studien lieferten die Gebirgsgletscher in der Periode 1961 bis 1990 einen Beitrag von  $0,25 \text{ mm} \pm 0,10 \text{ mm}$  pro Jahr zum globalen Meeresspiegelanstieg (Dyurgerov und Meier 1997). Für Grönland ergaben Schätzungen für den Zeitraum von 1865 bis 1990 einen jährlichen Beitrag zum Anstieg des Meeresspiegels von ca.  $0,3 \text{ mm}$  pro Jahr (Zuo und Oerlemans 1997). Das heisst also, dass die Gebirgsgletscher und Grönland zusammen

ca.  $\frac{1}{3}$  zum mittleren Meeresspiegelanstieg in den letzten 100 Jahren beigetragen haben. In Jahren mit ungewöhnlich grossen Massenverlusten haben die Gebirgsgletscher allein mit ca.  $0,9 \text{ mm}$  pro Jahr sogar rund die Hälfte zum gesamten mittleren Anstieg beigetragen. Seit Mitte der 80er Jahre und beschleunigt seit Ende der 80er Jahre hat sich der Beitrag des Massenverlustes der Gletscher nochmals erhöht. Vor allem die grossen Gebirgsgletscher in Gebieten wie Alaska oder Patagonien sind hinsichtlich der Meeresspiegelveränderung von grosser Bedeutung. Hingegen würde der komplette Schwund aller Alpengletscher mit einem geschätzten Volumen von ca.  $130 \text{ km}^3$  (1970er Jahre) nur einen Meeresspiegelanstieg von ca.  $0,35 \text{ mm}$  bewirken (Haerberli und Hoelzle 1995), was zeigt, dass die Alpengletscher in diesem Zusammenhang kaum eine Rolle spielen. Trotzdem sind die Eisreserven der Gletscher auch in kleineren Gebirgsregionen von grosser Bedeutung, da sie wichtige Süsswasserspeicher sind und den Wasserkreislauf wesentlich beeinflussen. In ariden Gebieten sind sie oft die einzigen Wasserlieferanten.

Im Gegensatz zu den Gebirgsgletschern sind natürlich die mächtigen Eisschilde in Grönland und der Antarktis für den Meeresspiegel von grosser Bedeutung, da sich bekanntlich der grösste Teil der Welt-Eismassen auf die beiden genannten Gebiete konzentriert. Dank heutiger Klimamodelle ist es möglich, für verschiedene Szenarien eine Abschätzung der zukünftigen Massenänderung dieser Eisschilde zu berechnen. Eine kürzlich erstellte Studie (Ohmura et al. 1996) kommt zum Schluss, dass die beiden Eisschilde auf eine Verdoppelung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes sehr unterschiedlich reagieren würden. Während man bei Grönland mit einem Massenverlust von jährlich  $390 \text{ km}^3$  (Wasseräquivalent) rechnet, kommt man bei der Antarktis auf einen jährlichen Massengewinn von  $325 \text{ km}^3$ . Das bedeutet, dass sich die vorausgesagten Massenänderungen der beiden Eisschilde gerade etwa kompensieren würden. Daraus kann gefolgert werden, dass auch in Zukunft die thermische Expansion des Ozeans und die Gebirgsgletscher weiterhin die grössten Verursacher des Meeresspiegelanstiegs bleiben werden.

### Gletscher als Klimaindikatoren

Die Gletscher gehören auch zu den zuverlässigsten und am leichtesten verständlichen Klimaindikatoren. Da sie zudem in den meisten Gebirgsregionen der Erde zu finden sind, werden die Gletscher im Bericht des «Intergovernmental Panel on Climate Change» (IPCC) als sogenannte «Dreisternindikatoren» klassiert (IPCC 1995), das heisst als Phänomen mit maximaler Signalwirkung. Selbst in

<sup>1</sup> M. Hoelzle, D. Vonder Mühl: Glaziologische Kommission der SANW und Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH-Zürich

<sup>2</sup> A. Bauder, G. H. Gudmundsson: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH-Zürich

den tropischen Gebirgen Afrikas (Kenya) und Südamerikas (Bolivien) werden im Rahmen des weltweiten Gletscherbeobachtungsnetzes Massenbilanzen erstellt. Sämtliche global gesammelte Daten werden durch den «World Glacier Monitoring Service» (WGMS) mit Sitz in Zürich in einem gemeinsamen Projekt der Universität und der ETH Zürich analysiert. In diesem Datenverbund trägt auch das schweizerische Messnetz zu diesem weltumspannenden System der Gebirgsgletscherbeobachtung seinen Teil bei. In Zukunft wird es immer wichtiger werden, Veränderungen der Gletscher nicht isoliert, sondern als Teil des gesamten Kryosphären-Systems zu erfassen, wobei inter- und transdisziplinäre Forschungsarbeiten innerhalb einzelner Systeme (z.B. der Kryosphäre) ständig an Bedeutung gewinnen. Aber auch darüber hinaus müssen die Grenzen traditioneller Wissenschaftszweige gesprengt werden, damit zentrale Fragen der Zukunft, etwa nach der Geschwindigkeit der Veränderungen im Klimasystem oder nach allfälligen Beschleunigungstendenzen, angegangen werden können. Auswirkungen von Gletscherschwankungen können zum Beispiel zu einer markanten Veränderung des Naturgefahrenpotentials führen, das sich je nach lokaler Situation verstärken oder vermindern kann.

## Witterung und Klima

### Das hydrologische Jahr 1997 im Überblick

Laut «World Meteorological Organization» WMO ist das Jahr 1997 weltweit als das wärmste je gemessene in die Annalen eingegangen. Seit 1979 verzeichneten sämtliche Jahre Temperaturüberschüsse. In der Schweiz zählt 1997 zu den vier wärmsten Jahren dieses Jahrhunderts.

Das hydrologische Jahr (Oktober 1996 bis September 1997) begann nass und trüb. In den Bergen kam der grosse Schnee bereits in der zweiten Novemberhälfte. Über die Festtage sank das Thermometer auf sibirische Werte. Bis im Mai 1997 war es dann, mit Ausnahme des Februars, generell mild und sonnig. Die Monate Juni und Juli waren wechselhaft und kühl, so dass sich der Sommer erst im August und September durchzusetzen vermochte. Die Schönwetterperiode wurde von schweren Unwettern in Schwarzsee und Sachseln begleitet.

**Der Glacier de Valsorey wird seit 1889 beobachtet. Er ist einer der südlichst gelegenen Gletscher des Messnetzes. Von seiner ursprünglichen Länge (rund 4,5 km) hat er beinahe 800 m eingebüsst.**



Foto: Andreas Wipf

Abbildungsfolge a-h  
Der Hügfigletscher in  
verschiedenen Jahren

a) 1961



c) 1968



d) 1973



e) 1983





b) 1964

h) 1997



g) 1988



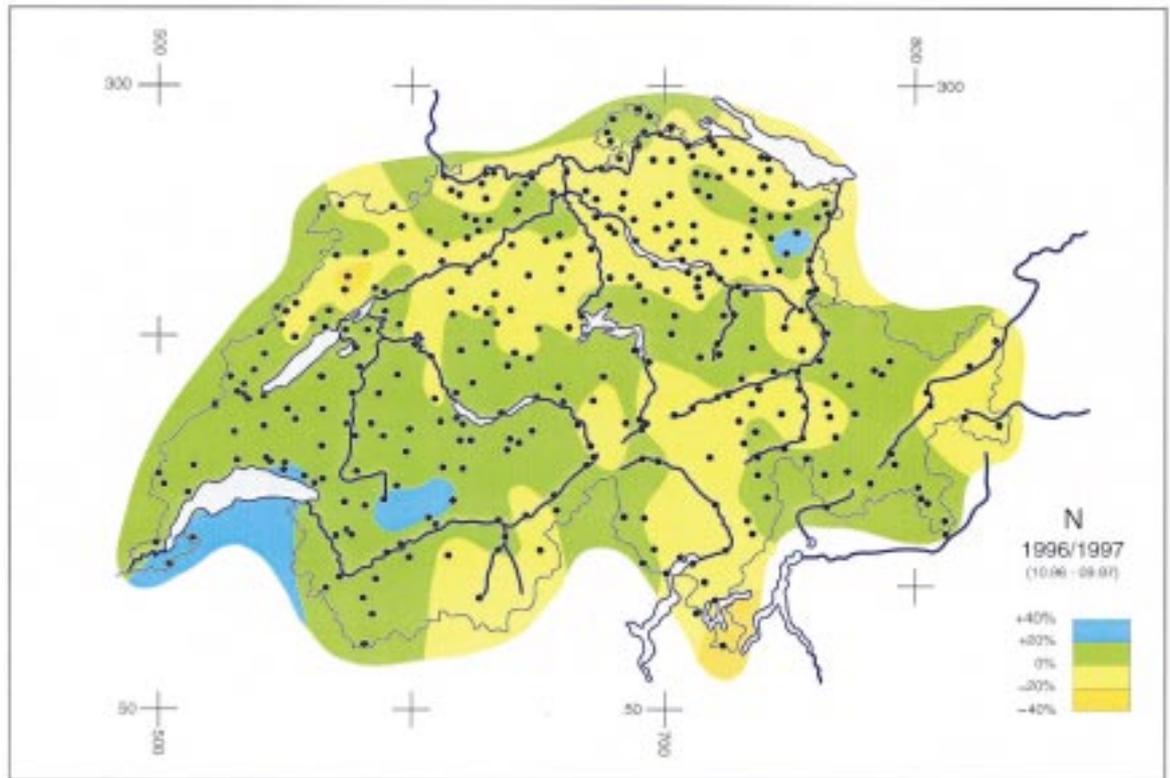
Fotos: Amt Lawinenschutz und Melioration des Kantons Uri



f) 1984

Figuren 1a und 1b  
 Jahresniederschlag  
 1996/1997 und Som-  
 mertemperatur 1997:  
 Abweichung vom Nor-  
 malwert 1901 bis 1960  
 (Quelle: SMA Zürich)

1a  
 Jahresniederschlag  
 1996/1997 (Summe  
 1.10.96 bis 30.9.97):  
 Abweichung in Pro-  
 zenten



**Titel der monatlichen Witterungsberichte  
 der SMA vom 10.96–09.97**

<b>1996</b>	
Oktober	Sehr wechselhaft, etwas zu warm, deutlich zu nass und trüb
November	Sehr nass, trüb und in den Bergen der grosse Schnee
Dezember	Eisiger Winter zwischen Weihnachten und Neujahr
Jahr	In vielen Gebieten das kälteste Jahr seit langer Zeit

<b>1997</b>	
Januar	Auf dem Corvatsch fast hundertmal mehr Sonne als in Neuenburg
Februar	Sonnig und sehr mild, auf der Alpennordseite viel Niederschlag
März	Wiederum viel zu mild und im Süden sehr trocken
April	Sehr sonnig. Viel Frost im Norden und Waldbrände im Süden
Mai	Erst wechselhaft, am Monatsende niederschlagsarm und sonnig
Juni	Zunehmend wechselhaft, kühl und vor allem im Süden nass
Juli	Nur kurze sommerliche Abschnitte
August	Hochsommer mit Unwettern in Schwarzsee und Sachslen
September	Wanderwetter
Jahr	Ausserordentlich warm, sehr sonnig und überwiegend niederschlagsarm

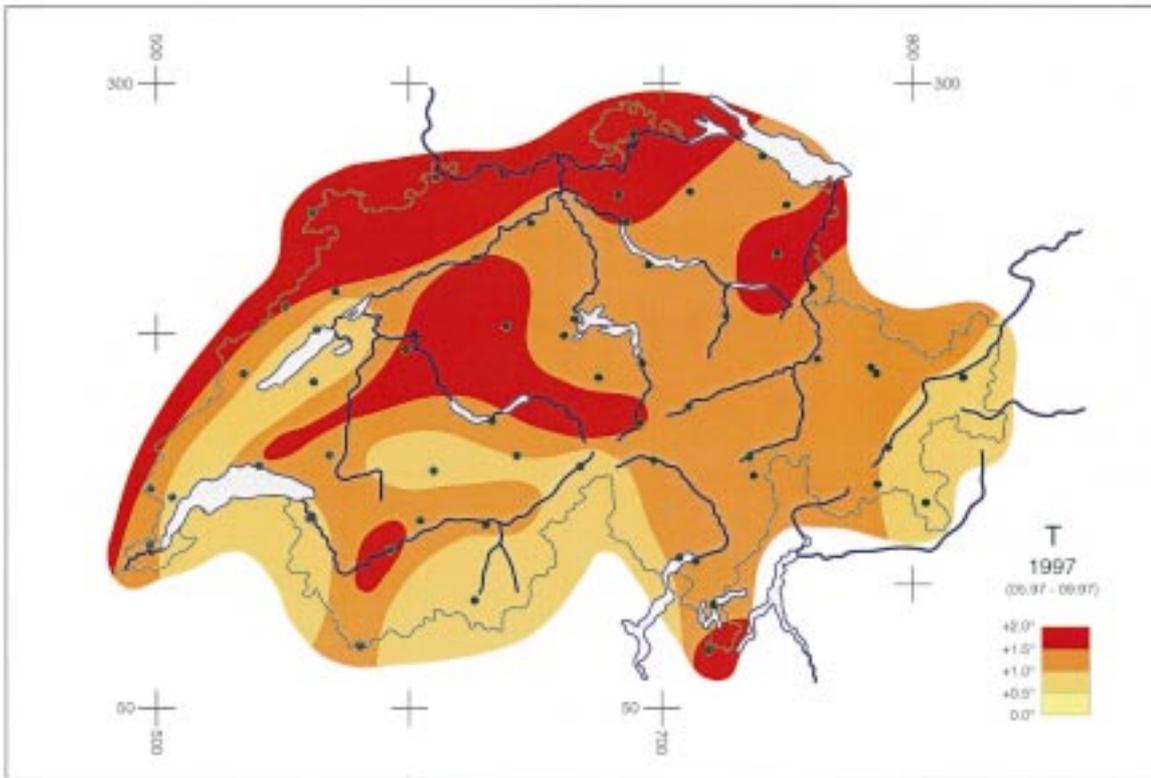
Quelle: SMA

**Temperatur**

Die meisten Monate waren deutlich zu warm, wobei die grössten Überschüsse im November, Februar, März, August und September zu verzeichnen waren. Etwas zu kühl fielen einzig Januar, Juni und Juli aus. Frühling und Herbst haben also am meisten zu den Wärmeüberschüssen beigetragen. Wie Figur 1b zeigt, war insbesondere der Sommer (Mai bis September) in der ganzen Schweiz durchwegs bis 2°C zu warm. In den Gebirgsregionen bewegte sich der Überschuss um 0,5° bis 1,0°C.

**Niederschlag**

Verglichen mit den langjährigen Mittelwerten war es 1997 rund 10 bis 20% zu trocken. Deutlich zeigte sich auch, dass einzelne Starkniederschläge und langanhaltende Trockenperioden in der Statistik der Jahressumme nicht zum Ausdruck kommen, weil sie sich gegenseitig aufheben. Dies gilt besonders für das Tessin: Im Zeitraum des hydrologischen Jahres wurden diese Defizite durch die nassen Monate Oktober und November beinahe kompensiert. Zu nass waren ebenfalls Juni und Juli und gebietsweise Dezember und Februar. Besonders niederschlagsarm fielen Januar und August, im Süden auch Februar und März aus. Figur 1a dokumentiert, dass das hydrologische Jahr 1996/97 ein durchschnittliches war. Die Abweichungen erreichen nur gebietsweise Werte über 20%.



**1b**  
Sommertemperatur 1997  
(Mittelwert 1.5.97 bis  
30.9.97): Abweichung in  
Grad Celsius

### Sonnenschein

Ausser in den beiden Schlechtwettermonaten Juni und Juli zeigte sich die Sonne immer überdurchschnittlich lange. Dies führte über das Jahr gesehen zu einem Überschuss von bis zu 20%.

### Massenhaushalt

Im Rahmen der Gletscherbeobachtungen wurden an drei ausgewählten Gletschern Massenbilanzmessungen durchgeführt. Die Massenbilanz ist ein wertvoller Klimaindikator, weil sie, im Gegensatz zur Längenänderung, auf die jährlichen Witterungseinflüsse (vor allem Niederschlag und Temperatur) unverzögert reagiert. Die Auswertungen der diesjährigen Messungen der drei Gletscher Silvretta, Gries und Aletsch ergeben folgendes Bild (vgl. auch Fig. 2):

– Am Silvretta wurde bis Mitte September ein kräftiger Massengewinn festgestellt, wobei unter der warmen Witterung im September und Oktober wahrscheinlich noch einiges an Eis dahingeschmolzen sein dürfte. Die Massenbilanz ist mit +540 mm deutlich positiv.

– Auch der Griesgletscher verzeichnete bis zu Beginn des Septembers noch eine leichte Zunahme, die aber bis Ende des hydrologischen Jahres (Ende des Monats) aufgebraucht wurde. Dementsprechend ist seine Bilanz mit –270 mm negativ.



**Figur 2**  
Summierte jährliche Massenänderung (in m) der Massenhaushaltgletscher Aletsch, Gries und Silvretta

– Im Einzugsgebiet der Aletschgletscher (Grosser-, Ober- und Mittelaletschgletscher) wird die Massenbilanz mit der hydrologischen Methode bestimmt. Sie war im Gegensatz zum Jahr 1995/96 leicht positiv (+149 mm).

Die positiven Massenbilanzen von Silvretta und Aletsch lassen sich dadurch erklären, dass es in den für die Schmelze wichtigen Monaten Juni und Juli 1997 überall relativ kühl und niederschlagsreich war, obwohl es im Jahresdurchschnitt generell zu warm und zu trocken war.

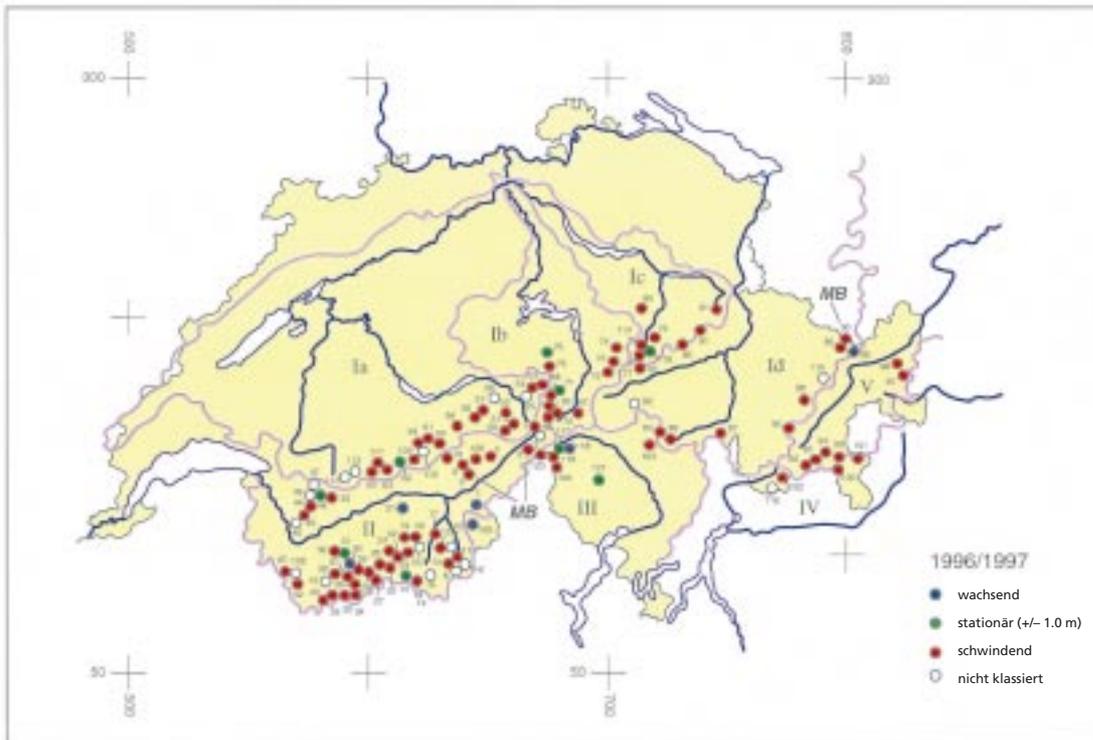
Zusammengefasst kann das Jahr 1996/97 somit als ziemlich ausgeglichen angesehen werden.

## Längenänderung

### Fortsetzung der Rückzugsbewegung

Dank der diesjährigen günstigen Witterungsverhältnisse konnten im Herbst 1997 102 Gletscher eingemessen und deren Längenänderung ausgewertet werden. So viele Messwerte kamen in den vergangenen Jahren nur selten zusammen. Die Analysen zeigen, dass sich 86 Gletscher zurückzogen und 6 Gletscher vorstießen. Die übrigen 10 Gletscher blieben unverändert (Fig. 3). Den Negativrekord erbrachte mit einem Rückzug von 108 m der Tsidjiore Nouve Gletscher oberhalb von Arolla (VS). Demgegenüber wurde am nahegelegenen Bella Tola (VS, 30 km von Arolla entfernt) mit +26 m der grösste Vorstoss registriert. Die seit Mitte der 80er Jahre anhaltende allgemeine Schwundtendenz setzte sich auch dieses Jahr fort. Weil die Gletscherzungen auf Klimaänderungen mit einer zum Teil erheblichen Verzögerung reagieren, ist das nicht erstaunlich. Die Reaktion eines Gletschers auf eine Klimaänderung hängt stark von seiner Geometrie ab, insbesondere von der Länge und der Neigung.

**Figur 3**  
Längenänderung der Gletscher in den Schweizer Alpen 1997 (qualitativ dargestellt)



### Bessere Vergleichbarkeit durch Längensklassierung

Um die oben erwähnten Effekte zu verdeutlichen und anschaulich darzustellen, wurden in den Figuren 4a bis 4d verschiedene Gletscher nach ihrer Länge klassiert. Aus den Klassierungen lässt sich einfach erkennen, dass vor allem die Länge eines Gletschers seine Längenänderung stark beeinflusst. Grosse Gletscher wie Aletsch, Unteraar, Gorner oder Fiescher zeigen keine kurzfristigen Schwankungen, sondern ziehen sich seit Mitte des letzten Jahrhunderts ohne Unterbruch zurück. Aus den Figuren 4a bis 4d kann man ableiten, dass kleine Gletscher (Fig. 4a) auf Veränderungen im Bereich einzelner Jahre, mittelgrosse und steile Gebirgsgletscher (Fig. 4b und 4c) auf Jahrzehntvariationen und grosse flache Talgletscher (Fig. 4d) auf Jahr-

Foto: Martin Lüthi

Heisswasser-Bohrung auf dem Unteraargletscher



Foto: Hilmar Gudmundsson



hundertrends reagieren. Deshalb sollten auch nur Gletscher mit ähnlicher Geometrie (Länge und Neigung) direkt miteinander verglichen werden: Die Längenänderungen des Aletschgletschers, des Pizolgletschers oder des Ferpèclegletschers widerspiegeln nicht nur Klimaveränderungen unterschiedlicher Frequenz und Amplitude, sondern auch unterschiedlich lang zurückliegende klimatische Ereignisse.

### Verknüpfung Längenänderung – Massenbilanz

Dank geeigneter Parametrisierungen ist es heute möglich, über Zeiträume von Jahrzehnten (charakteristische Anpassungszeiten der Gletscher oder Vielfache davon) durch Gleichgewichtsbetrachtungen die Längenänderung mit der Massenbilanz zu verknüpfen (Johannesson 1989). Für jeden Gletscher ist dabei die Anpassungszeit zu bestimmen. Der mittlere jährliche Massenverlust wurde für 68 Gletscher aus den Messungen der Längenänderung abgeschätzt. Anschliessend wurden die Gletscher wiederum den vier Längenklassen zugewiesen. Aus diesen Abschätzungen geht hervor, dass die Gletscher seit Mitte des letzten Jahrhunderts im Mittel 0,12 bis 0,24 m Wasseräquivalent pro Jahr verloren haben (vgl. Tab. 1), wobei die grösseren Gletscher tendenziell mehr Masse verloren haben als die kleinen (Peschke 1998). Diese Resultate werden unabhängig davon auch durch Untersuchungen von Maisch et al. (1998) im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes 31 (Klimaänderungen und Naturkatastrophen) bestätigt. Interessant ist vor allem der Vergleich mit Gletschern, für welche die Massenbilanz direkt aufgrund von Messungen be-

stimmt wurde. Hier ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung (Tab. 2). Auch ein Vergleich mit den durch Präzisionsphotogrammetrie seit Ende des letzten Jahrhunderts bestimmten Volumenänderungen an einigen Alpengletschern bestätigen diese Aussagen (Haeberli 1998).

### Dank

Die Glaziologische Kommission der SANW ist bei der Beobachtung der Gletscher in der 118. Messperiode wiederum tatkräftig unterstützt worden. Den Helfern, auf deren regelmässiges Mitwirken sie angewiesen ist, dankt sie herzlich: allen direkt oder indirekt beteiligten Personen bei den Forstdiensten der Gebirgskantone, bei den Kraftwerken Ägina, Mattmark, Mauvoisin und Oberhasli, im Vermessungsbüro Flotron, im Bundesamt für Landestopographie, in der Eidgenössischen Vermessungsdirektion, an der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, in der Landeshydrologie und -geologie, am Schweizerischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung, den Geographischen Instituten der ETH und der Universität Zürich sowie der Abteilung Glaziologie und der Direktion der VAW an der ETHZ. Besonders dankt sie allen bei den Aufnahmen im Gelände oder bei der Daten- und Textbearbeitung im Büro privat mitwirkenden Personen.



GPS-Referenzstation bei der Lauteraarhütte

Unterargletscher; Blick in Richtung Zusammenfluss von Lauteraar- und Finsteraargletscher

**Tabelle 1**  
**Mittlere Massenbilanzen für die Periode 1850 bis 1996 für verschiedene Längenklassen von 68 ausgewählten Schweizer Gletschern**

Längenklassen der Gletscher in [km]. Datengrundlage bilden 68 Gletscher des schweizerischen Messnetzes.	Mittlere Massenbilanz für die Beobachtungsperiode 1850 bis 1996 [in m Wasseräquivalent pro Jahr]
< 1	-0,11
1 - 4,9	-0,17
5 - 9,9	-0,20
> 10	-0,24
Mittel	-0,17

## Anhang: Glaziologische Forschung auf dem Unteraargletscher

### Schon im 19. Jahrhundert im Zentrum des Interesses

Der Unteraargletscher gehört zu den am besten untersuchten Alpengletschern. Er weckte schon in vergangenen Jahrhunderten das Interesse der Naturforscher. Deshalb ist dieser Gletscher auch eng mit der historischen Entwicklung wichtiger glaziologischer Kenntnisse und deren Urhebern verbunden. Davon zeugen zum Beispiel die Namen der umliegenden Gipfel: Agassizhorn, Escherhorn, Grunerhorn, Hugisattel, Scheuchzerhorn und Studerhorn.

Bereits im 19. Jahrhundert besuchte Franz Joseph Hugi (1793–1855) während mehrerer Sommer den Unteraargletscher und beschrieb anschliessend die ersten Beobachtungen über dessen Veränderungen (Hugi 1830, Hugi 1842). Der Be-

**Tabelle 2**  
**Vergleich zwischen direkt gemessenen und aus Längenänderungen berechneten mittleren Massenbilanzen für die Massenhaushaltgletscher der Schweiz**

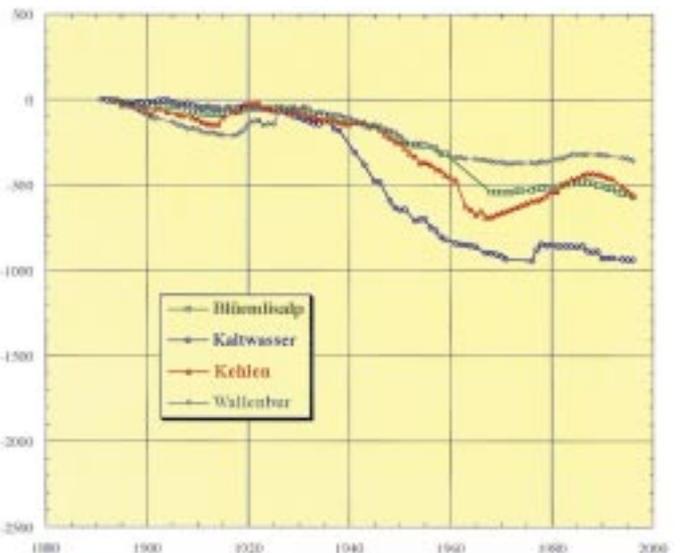
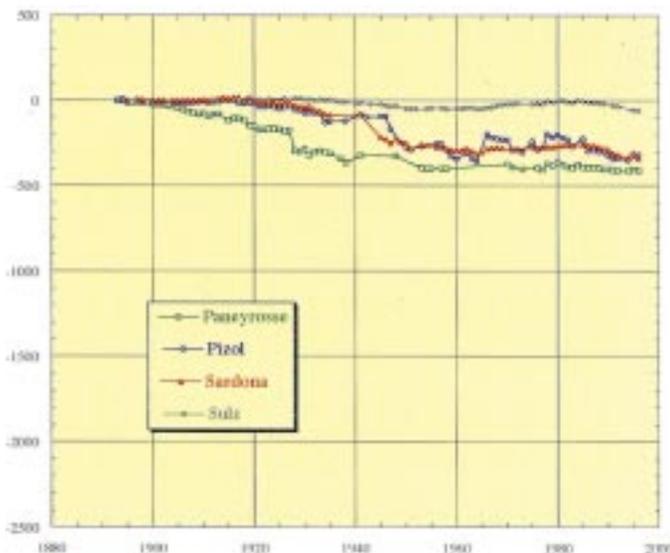
Gletscher	Zeitperiode	Mittlere Massenbilanz <sup>1</sup>	Bemerkungen
Gries	1962–1996	-0,27	Messreihe (glaziologische Methode)
	1962–1996	-0,22	Berechnet aus Längenänderung
Silvretta	1960–1996	-0,05	Messreihe (glaziologische Methode)
	1960–1996	-0,02	Berechnet aus Längenänderung
Grosser Aletsch	1920–1996	-0,22	Messreihe (hydrologische Methode)
	1920–1996	-0,22	Berechnet aus Längenänderung

<sup>1</sup> in m Wasseräquivalent pro Jahr

ginn der modernen experimentellen Forschungstätigkeit geht auf Louis Agassiz (1807–1873) zurück. J. Wild stellte im Rahmen dieser Arbeiten die erste topographische Karte eines Gletschers von wissenschaftlichem Wert her. Diese exakte Darstellung des Unteraargletschers im Massstab 1:10 000 weist jedoch noch keine Höhenlinien auf (Agassiz 1847). Neben der Messung der klimatischen Parameter Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck beschäftigten sich Agassiz und seine Mitarbeiter auch mit dem genauen Erfassen der Bewegung an der Gletscheroberfläche. Dabei wurden Methoden eingesetzt, die noch heute gebräuchlich sind: z.B. Vermessung von in den Gletscher eingebohrten Stangen mit dem Theodoliten.

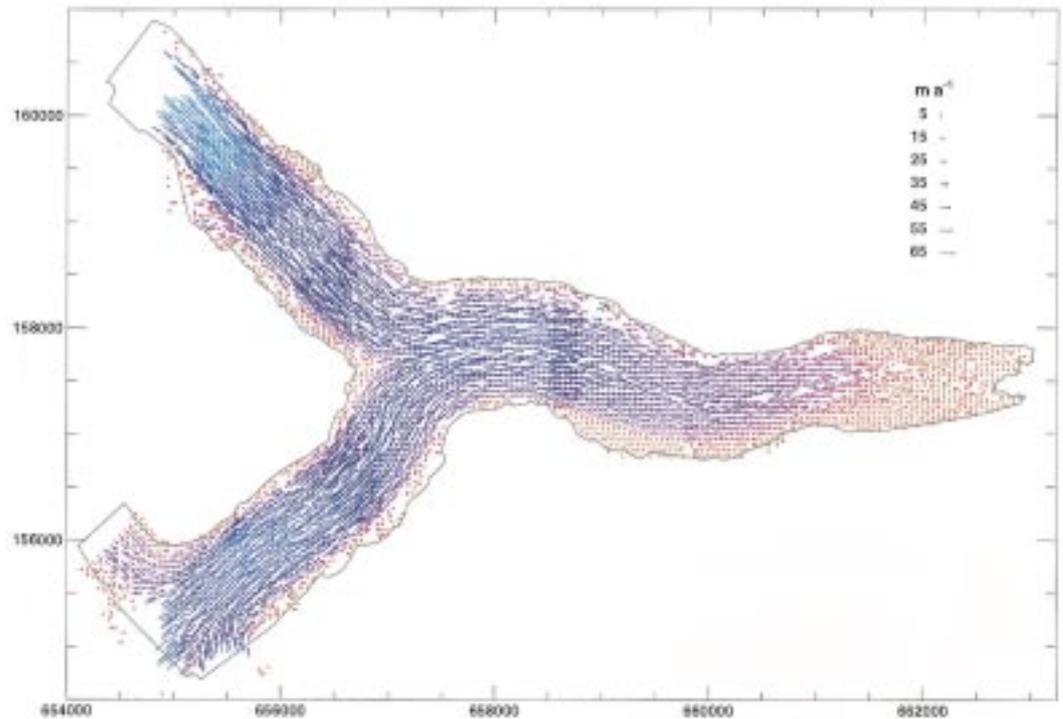
**Figuren 4a bis 4d**  
**Summierte jährliche Längenänderung (in m) für Gletscher in verschiedenen Längenklassen:**

**4a) Sehr kleine Gletscher mit einer Länge von weniger als 1,0 km**



**4b) Kleine Gebirgsgletscher mit einer Länge von 1,0–4,9 km**

**Figur 5**  
Mittlere Jahresgeschwindigkeiten (in m/Jahr) an der Oberfläche des Unteraargletschers (im Koordinatensystem eingezeichnet, mit Koordinatenzahldistanz von 2000 m) für die Periode von August 1990 bis August 1991, bestimmt an Hand von Luftbildern



### Detaillierte Untersuchungen im 20. Jahrhundert

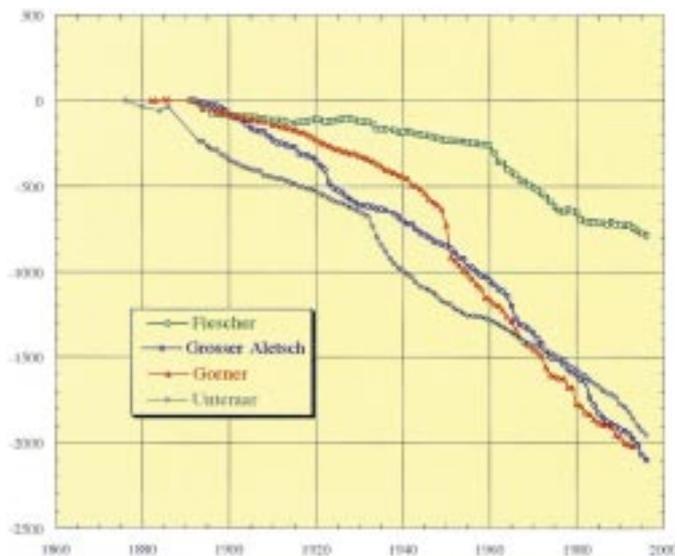
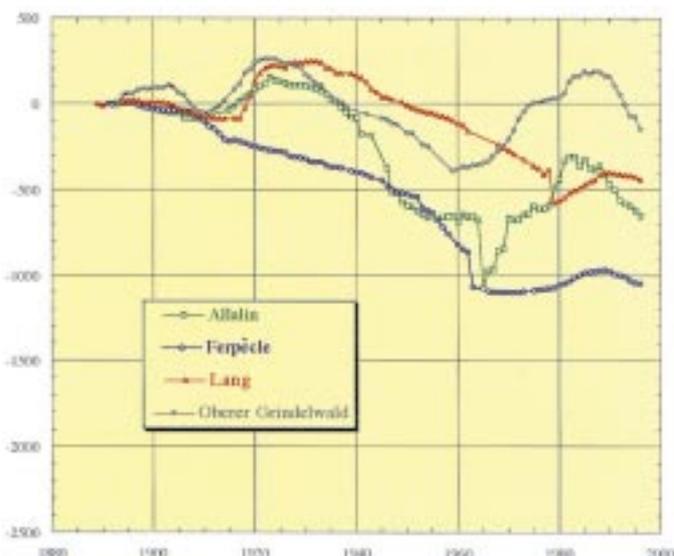
Später wurde weiterhin intensiv auf dem Unteraargletscher geforscht. Seit 1924 werden im Auftrag der Kraftwerke Oberhasli (KWO) sowohl die Zunge vermessen als auch an ausgewählten Profilen Geschwindigkeiten und Dickenänderungen ermittelt (Flotron, 1924 bis heute). Im Rahmen dieser Untersuchungen werden seit 1969 jährlich Luftbilder aufgenommen, und seit Anfang der 90er Jahre werden davon digitale Geländemodelle erstellt. Daraus lassen sich die zeitlichen und räumlichen Höhen- und Volumenänderungen berechnen.

Die geophysikalischen Untersuchungsmethoden Seismik, Gleichstrom-Geoelektrik und Radar-Echolotsondierungen kamen zur Anwendung, um die

Topographie und die Charakteristik des Gletscherbetts zu bestimmen (Knecht und Süssstrunk 1952, Röthlisberger 1967, Funk et al. 1994).

In den letzten Jahren wurde intensiv das Fließverhalten untersucht. Dazu waren einerseits detaillierte Bewegungsmessungen an der Oberfläche, aber auch in bis ans Gletscherbett reichende Bohrlöcher notwendig (vgl. Figuren 5–7). Diese dienen zusammen mit der Oberflächen- und Gletscherbett-Topographie als Grundlage für numerische Modellierungen (Gudmundsson 1994).

**4c) Grössere Gebirgs-gletscher mit einer Länge von 5,0–9,9 km**



**4d) Grosse Talgletscher mit einer Länge von mehr als 10 km**

**Tabelle 3**  
**Gletscher der Schweizer Alpen – Längenänderung 1996/1997**

Nr.	Gletscher	Längen- änderung [m]	Nr.	Gletscher	Längen- änderung [m]	Nr.	Gletscher	Längen- änderung [m]
<b>Rhonegebiet (II)</b>			46	Martinets	n	79	Sulz	- 1,5
1	Rhone	- 18	47	Sex Rouge	?	80	Glärnisch	- 2
2	Mutt	n	48	Prapio	st	81	Pizol	- 17,1
3	Gries	- 10,4	49	Pierredar	n	114	Plattalva	- 1,6
4	Fiescher	- 13,2	106	Mittelaletsch	- 29 <sup>5</sup>	<b>Rheingebiet (Id)</b>		
5	Grosser Aletsch	- 43	107	Bis	n	82	Lavaz	n
6	Oberaletsch	- 25 <sup>7</sup>	108	Orny	n	83	Punteglias	- 2
7	Kaltwasser	+ 14,3	<b>Aaregebiet (Ia)</b>			84	Lenta	- 21,7
8	Tälliboden	n	50	Oberaar	- 5,4	85	Vorab	- 9,8
9	Ofental	n	51	Unteraar	- 30,8	86	Paradies	- 11,2
10	Schwarzberg	- 12	52	Gauli	- 6	87	Suretta	- 13,9
11	Allalin	- 6	53	Stein	- 11	88	Porchabella	- 13,7 <sup>3</sup>
12	Kessjen	n	54	Steinlimmi	- 9	89	Verstankla	- 1,8
13	Fee (Nord)	- 25,3	55	Trift (Gadmen)	n	90	Silvretta	- 10 <sup>2</sup>
14	Gorner	- 30,5	56	Rosenloui	n	91	Sardona	- 5,5
15	Zmutt	0	57	Oberer Grindelwald	- 10 ca.	115	Scaletta	n
16	Findelen	n	58	Unterer Grindelwald	- x	<b>Inngebiet (V)</b>		
17	Ried	- 14,7	59	Eiger	- 13,4	92	Roseg	- 62,8
18	Lang	- 35	60	Tschingel	- 3	93	Tschierva	- 25,4
19	Turtmann	- 83,9	61	Gamchi	- 4,7	94	Mortersatsch	- 10,8
20	Brunegg (Turm. E)	- 5,5	62	Schwarz	- 1	95	Calderas	- 1,8
21	Bella Tola	+ 26	63	Lämmern	- 9	96	Tiatscha	+ 7,8
22	Zinal	- 14	64	Blümlisalp	- 11	97	Sesvenna	- 6,9
23	Moming	- 36	65	Rätzli	- 5 <sup>2</sup> ca.	98	Lischana	- 1,5 <sup>2</sup>
24	Moiry	- 5	109	Alpetli	- 6,5	<b>Addagebiet (IV)</b>		
25	Ferpècle	- 10	110	Lötschberg	n	99	Cambrena	- 5 <sup>2</sup>
26	Mont Miné	- 7	111	Ammerten	- 1,8	100	Palü	- 7,1
27	Arolla (Mt. Collon)	- 7	112	Dungel	n	101	Paradisino (Campo)	- 4,5
28	Tsidjiore Nouve	- 108	113	Gelten	n	102	Forno	- 24
29	Cheillon	- 17	<b>Reussgebiet (Ib)</b>			116	Albigna	n
30	En Darrey	+ 15	66	Tiefen	- 10,6	<b>Tessingebiet (III)</b>		
31	Grand Désert	- 0,6	67	Sankt Anna	- 2,8 <sup>2</sup>	103	Bresciana	- 16,8
32	Mont Fort (Tortin)	- 20,5 <sup>2</sup>	68	Kehlen	- 28,6	104	Basodino	- 6,7
33	Tsanfleuron	- 5	69	Rotfirm (Nord)	- 6,9	105	Rossboden	+ 4,6
34	Otemma	- 44,4	70	Damma	- 9,3	117	Valleggia	0
35	Mont Durand	- 3,2	71	Wallenbur	+ 0,4	118	Val Torta	+ 2,9
36	Brenèy	- 27,1	72	Brunni	- 8,7 <sup>7</sup>	119	Cavagnoli	- 13,1
37	Giétro	- 7,5	73	Hüfi	- 24,3	120	Corno	- 1,2
38	Corbassière	- 12	74	Griess	- 5,5	121	Croslina	+ 0,82 <sup>2</sup>
39	Valsorey	- 31 <sup>2</sup>	75	Firnalpeli (Ost)	- 17 <sup>2</sup>	<b>Linthgebiet (Ic)</b>		
40	Tseudet	- 53 <sup>2</sup>	76	Griessen	- 1 <sup>2</sup>	77	Biferten	- 7,6
41	Boveyre	n				78	Limmern	- 0,4
42	Saleina	- 79,1 <sup>2</sup>						
43	Trient	- 50						
44	Paneyrosse	- 1,9						
45	Grand Plan Névè	- 6,2						

**Abkürzungen:**

+ wachsend  
 st stationär  
 - schwindend  
 ca. ungefährender Wert

x Betrag nicht bestimmt  
 sn eingeschnitten  
 ? Ergebnis unsicher (Luftbild)  
 n nicht beobachtet

**Bemerkungen**

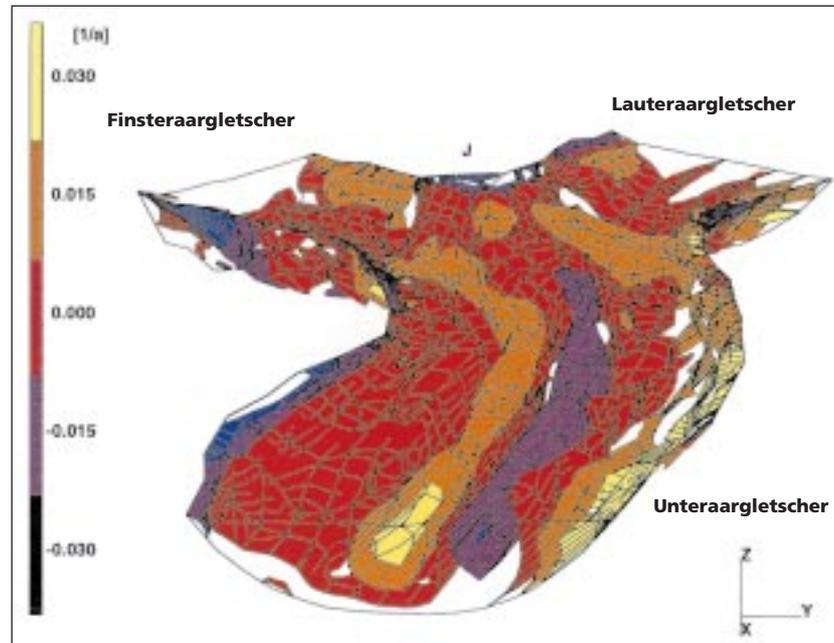
Gilt die Angabe für eine mehr-  
 jährige Zeitspanne, ist die Zahl der  
 Jahre angezeigt: -13,4<sup>2</sup> = Schwund  
 um 13,4 m in 2 Jahren.

### Massenbilanzänderungen und Gletscher- verhalten

Ein laufendes interdisziplinäres Forschungsprojekt vereint die modernsten Methoden sowohl der Glaziologie als auch der Geodäsie und Photogrammetrie mit dem Ziel, die Massenbilanz einfacher be-

stimmen zu können. Der Zusammenhang zwischen den Massenbilanzänderungen und dem Verhalten der Gletscher ist vor allem im Hinblick auf das Verständnis von klimatischen Variationen von fundamentalem Interesse. Damit wird nämlich der Zustand eines Gletschers viel umfassender beschrieben als dies mit der Messung von Vorstoss und

**Figur 7**  
Vertikale Dehnungsraten, berechnet anhand eines dreidimensionalen Fließmodells, dargestellt als Isoflächen. Negative Werte zeigen die vertikale Stauchung, positive Werte hingegen die vertikale Dehnung des Eises.



Rückzug der Zunge möglich ist. Die Bestimmung der Massenbilanz mit der glaziologischen Methode bedingt sehr aufwendige und kostspielige Feldmessungen. Fortschritte in der photogrammetrischen Auswertung von Luftbildern ermöglichen nicht nur digitale Geländemodelle zu generieren, sondern auch direkt und mit hoher Präzision das Geschwindigkeitsfeld der Gletscheroberfläche zu ermitteln. In den Akkumulationsgebieten wurde erstmals ein «laser scanning»-System eingesetzt. Diese neue Methode liefert auch dort zuverlässige Resultate, wo photogrammetrische Auswertungen an ihre Grenzen stoßen. Eines der zentralen Ziele ist es, die Massenbilanz durch die Kombination von Fernerkundungsmethoden und dreidimensionalem numerischem Fließmodell zu bestimmen.

Gleichzeitig sind vertiefte Studien zur Erforschung der noch ungenügend bekannten basalen Prozesse sowie der verschiedentlich festgestellten jahreszeitlichen Schwankungen (Iken et al. 1983) der Fließbewegung im Gang. Dabei interessiert in erster Linie die Entwicklung des subglazialen Wasserabflusssystemes, denn es wird hier ein Einfluss auf die Struktur des Gletscherbettes, die basale Bewegung und die Fließbewegung vermutet. Dazu wird der Zusammenhang zwischen den Schwankungen des Wasserdruckes, dem basalen Widerstand und der Oberflächengeschwindigkeit untersucht.

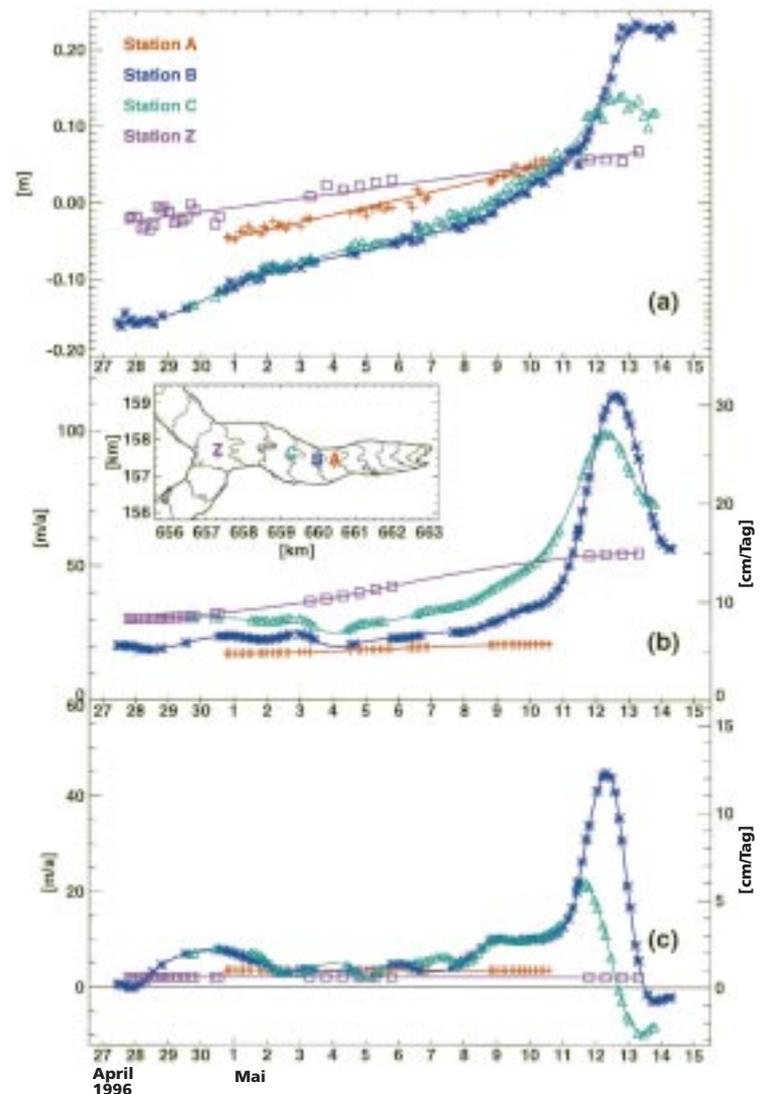
## Literatur

Agassiz, L. (1847): Première partie: *Nouvelles études et expériences sur les glaciers actuels, leur structure, leur progression et leur action physique sur le sol*, V. Masson, Paris, 2 vols

Dyrgerov, M. B., und Meier, M. F. (1997): Year-to-Year fluctuations of global mass balance of small glaciers and their contribution to sea-level changes. *Arctic and Alpine Research*, 29(4), 392–402

Flotron, A. (1924 bis heute): *Jährliche Berichte über die Ergebnisse der Gletschermessungen im Auftrag der Kraftwerke Oberhasli*

Forel, F. A. (1895): Les variations périodiques des glaciers. Discours préliminaire, *Archives des sciences physiques et naturelles, Genf*, 34, 209–229



**Figuren 6a bis 6c**  
Beispiel von hochauflösenden Bewegungsmessungen an der Oberfläche mit dem satellitenunterstützten GPS-System. Damit lassen sich kurzzeitige Schwankungen feststellen, wie die im Frühling bei beginn-

der Schneeschmelze wegen des Wassers hervorgerufene Hebung. Dargestellt sind für die vier GPS-Stationen (A, B, C bzw. Z) die Hebung (a), die horizontale (b) und die vertikale Geschwindigkeit (c).

Funk, M., Gudmundsson, G.H., und Hermann, F. (1994): Geometry of the glacier bed of the Unteraargletscher, Bernese Alps, Switzerland. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 30, 1–8

Gudmundsson, G.H. (1997): Ice deformation at the confluence of two glaciers investigated with conceptual map-plane and flowline models. *Journal of Glaciology*, 43 (145), 537–547

Gudmundsson, G.H., Iken, A., und Funk, M. (1997): Measurements of ice deformation at the confluence area of Unteraargletscher, Bernese Alps, Switzerland. *Journal of Glaciology*, 43 (145), 548–556

Haeberli, W., und Hoelzle, M. (1995): Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps. *Annals of Glaciology*, 21, 206–212

Haeberli, W. (1998): Historical evolution and operational aspects of worldwide glacier monitoring. In: *Into the second century of world wide glacier monitoring: prospects and strategies* (W. Haeberli, M. Hoelzle und S. Suter): *studies and reports in hydrology*, IAHS, 56, 35–51

Hugi, F.J. (1830): *Naturhistorische Alpenreise*. Amiet-Lutiger, Solothurn

Hugi, F.J. (1842): *Über das Wesen der Gletscher*. J. G. Cotta'scher Verlag, Stuttgart und Tübingen.

Iken, A., Röthlisberger, H., Flotron, A., und Haeberli, W. (1983): The uplift of the Unteraargletscher at the beginning of the melt season – a consequence of water storage at the bed? *Journal of Glaciology*, 29 (101), 28–47

Johannesson, T., Raymond, Ch., und Waddington, E. (1989): Time-scale for adjustment of glaciers to changes in mass balance. *Journal of Glaciology*, 35 (121), pp. 355–369

Knecht, H., und Süssstrunk, A. (1952): *Bericht über die seismischen Sondierungen der Schweizerischen Gletscherkommission auf dem Unteraargletscher, 1936–1950*, Bericht Nr. 512

Maisch, M., Wipf, A., Denneler, B., Battaglia, J., und Benz, C. (1998): Die Gletscher der Schweizer Alpen: Gletscherhochstand 1850 – Aktuelle Vergletscherung – Gletscherschwund-Szenarien. *Schlussbericht NFP 31*. vdf Hochschulverlag AG, Zürich (im Druck)

Ohmura, A., Wild, M., und Bengtsson, L. (1996): Present and future mass balance of the ice sheets simulated with GCM. *Annals of Glaciology*, 23, 187–193

Peschke, W. (1998): Erste Ergebnisse einer Auswertung der Längenänderungsdaten der Schweizer Messnetzgletscher. *Praktikumsbericht an der VAW/ETHZ*

Röthlisberger, H. (1967): Recent DC resistivity soundings on Swiss glaciers. *Journal of Glaciology*, 6 (47), 607–621.

Zuo, Z., und Oerlemans, J. (1997): Contribution of glacier melt to sea-level rise since AD 1865: a regionally differentiated calculation. *Climate Dynamics*, 13, 835–845. ■

**Als im Jahre 1894 die Gletschermessungen im Val Roseg begannen, gab es lediglich den Roseggletscher. Dieser hat sich seither um beinahe 2 km zurückgezogen. In seinem Vorfeld befindet sich heute ein See, der 1954 ausbrach. Im Jahr**

**1934 trennte sich der Tschierva- vom Roseg-Gletscher. Aus der Westwand des Piz Morteratsch löste sich 1988 auf ca. 3200 m ü. M. ein 300 000 m<sup>3</sup> grosser Felssturz. Das Material wurde auf der rechten Gletscherseite abgelagert.**

