

## Die Gletscher der Schweizer Alpen 1999/2000<sup>1</sup>

Das 121. Berichtsjahr der Glaziologischen Kommission, das letzte im ausgehenden Jahrhundert, war klimatisch erneut durch Extreme (Hitze-Kälte, Dürre-Niederschläge) geprägt. Die global sich abzeichnende Klimaveränderung wirkt sich u. a. in der Längenänderung der Gletscher aus: 79 der 108 aktiv beobachteten Gletscher in den Schweizer Alpen befinden sich auf dem Rückzug. Im Anhang wird auf das Phänomen der kalbenden Gletscher eingegangen.

### Einleitung

Der kürzlich erschienene IPCC-Bericht<sup>2</sup> bestätigt die sich abzeichnende globale Klimaerwärmung. Inzwischen ist allgemein akzeptiert, dass die durch menschliche Aktivitäten verursachten Treibhausgase dazu ihren Beitrag leisten. Die Auswirkungen dieser globalen Erwärmung führen regional zu einem weiteren Rückzug der Gletscher. Die genaue Beobachtung des Verhaltens der Gletscher bildet nach wie vor eine wichtige Grundlage zur Erkennung und Überprüfung klimatischer Veränderungen. Jedoch sind nicht alle glaziologischen Phänomene direkt auf Veränderungen der klimatischen Verhältnisse zurückzuführen. Neben dem langfristigen Monitoring der Vergletscherung sind deshalb wissenschaftliche Grundlagenstudien notwendig, um das Verhalten der Gletscher und der daran beteiligten Prozesse besser zu verstehen. Die im Anhang vorgestellte Studie über kalbende Gletscher zeigt an-

1 Auszug aus dem 121. Bericht der Glaziologischen Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften (GK/SANW) und der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW/ETHZ)

2 IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change

**Tabelle 1: Titel der monatlichen Witterungsberichte der MeteoSchweiz Oktober 1999 bis September 2000**

<b>1999</b>	<b>Nass und doch warm – Lawinen, Überschwemmungen, Hagel, Orkan</b>
Oktober	Mild und im Norden föhnig, im Süden Wolkenstau
November	Kräftiger Wintereinbruch nach Monatsmitte, im Mittelland sonnenarm
Dezember	Im Norden Stürme und nass, in den Bergen sonnenarm
<b>2000</b>	<b>Aussergewöhnlich warm – extreme Herbstregen im Süden und Wallis</b>
Januar	Sonniger als normal und niederschlagsarm – im Süden niederschlagsfrei
Februar	Deutlich zu mild – trocken im Süden, nass auf der Alpennordseite
März	Sonnig im Westen und Süden, nass und trüb im Osten. Endlich Regen im Südtessin.
April	Im Süden nass und trüb, im Norden mild und oft föhnig
Mai	Extrem warme erste Maihälfte – ungewöhnliche Frühlingswärme
Juni	Sehr warm, zu wenig Regen und ausserhalb der Alpen ungewöhnlich sonnig
Juli	Kühl, regnerisch und sonnenarm
August	Nach unfreundlichem Beginn hochsommerlich warm mit viel Sonnenschein
September	Etwas zu warm, im Westen und Nordwesten sonnig – einzelne ergiebige Regenfälle

schaulich, wie neue Erkenntnisse von massgebenden Prozessen gewonnen werden konnten.

### Witterung und Klima

Überblick über das hydrologische Jahr 1999/2000

Auch das letzte Jahr im zu Ende gehenden Jahrtausend zählte weltweit wiederum zu den wärmsten und zeichnete sich erneut durch die gleichen klimatischen Verhältnisse der Extreme (Wärme, Kälte, Regenfälle, Dürren) aus. Das globale Mittel der oberflächennahen Lufttemperatur lag 0,3 °C über dem klimatologischen Mittelwert der Periode 1961–1990. Die acht wärmsten Jahre seit Beginn der instrumentellen Messung im Jahre 1860 wurden in den letzten 10 Jahren registriert (WMO, 2000).

Die Berichtsperiode war in der Schweiz einmal mehr überdurchschnitt-

lich warm und im Osten und auf der Alpensüdseite – verursacht durch einige Extremereignisse – relativ niederschlagsreich. Einem warmen Oktober folgte ein abrupter Wintereinbruch im November mit viel Schnee bis in die Niederungen und mit tiefen Temperaturen in der zweiten Monatshälfte. Bereits im Dezember gab es reichlich Tauwetter. Die Monate Februar bis Juni waren durchwegs zu warm, wobei besonders die Monate Mai und Juni mit mehr als 3 °C über dem Durchschnitt hervorstachen. Erst der Juli fiel überall in der Schweiz zu

Triftgletscher 1969



Foto: Archiv VAW/E. Pfister

Foto: A. Spieler



**Kalbungsfrent des Griesgletschers im Jahr 1968, zwei Jahre nach dem Stau des Griessees**



Foto: Archiv VAW

Foto: M. Funk



**Zunge des Griesgletschers im Jahr 1998. Der Gletscher hat den Kontakt zum See verloren.**

Die Detailaufnahme des Zungenendes vom Herbst 2000 zeigt den Kontaktverlust zur Felsbarriere und den entstandenen See mit der Kalbungsfrent. Es bestehen zudem Anzeichen, dass die Zunge in einzelne Teile zerbricht.

**Aufruf**  
Im Zusammenhang mit den sich am Triftgletscher momentan abspielenden Veränderungen werden die vorhandenen Informationen und das bestehende Datenmaterial wissenschaftlich aufgearbeitet. Dazu suchen wir datierte Darstellungen (Fotos,

Gemälde), die frühere Gletscherstände dokumentieren.  
Kontakt: Gletschermessnetz,  
Gloriastrasse 37/39,  
8092 Zürich, Tel. 01/632 41 12,  
E-Mail  
[bauder@vaw.baug.ethz.ch](mailto:bauder@vaw.baug.ethz.ch)



Foto: E. Streich



**2001. Der gewaltige Schwund der Zunge und ihr Rückzug aus der Felsbarriere heraus sind deutlich zu erkennen.**

kalt aus. Der August war aber bereits wieder zu warm.

Neben dem Orkan «Lothar», der nach Weihnachten 1999 grosse Verwüstungen anrichtete, wird die extrem milde erste Jahreshälfte in Erinnerung bleiben. Trotz langer Schlechtwetterperioden war der Sommer warm und trocken. Das Berichtsjahr 1999/2000 war – nach dem sonnenarmen Jahr 1998/99 – sonnig (vgl. Tab. 1).

**Temperatur**

In der Beobachtungsperiode setzte sich der anhaltende Trend von höheren durchschnittlichen Jahrestemperaturen fort. Die Monate Oktober, Dezember, Februar, April, Mai und Juni fielen deutlich zu warm aus, in den höheren Lagen jedoch etwas weniger ausgeprägt. Einzig die beiden Monate November und Juli waren kälter als der langjährige Durchschnitt. Die strahlungsintensiven Sommermonate sind für die Schneeschmelze (Mai und Juni) und Ausaperung (Juli bis September) von entscheidender Bedeutung. In dieser Periode lagen die Werte zwischen 1,0 und 2,5 °C über dem Durchschnitt (vgl. Fig. 1).

**Niederschlag**

Nach 1998/99 mit überdurchschnittlich viel und starkem Niederschlag folgte 1999/2000 eine Periode auf normalem Niveau. Die östlichen Gebiete und die Alpensüdseite waren jedoch deutlich nasser als der Rest der Schweiz. Während in allen Regionen der Schweiz nur der Juli überdurchschnittlich nass ausfiel, waren nach Oktober und November 1999 auch der Januar, Mai, Juni und August 2000 überall zu trocken. Die Abweichungen lagen vorwiegend zwischen -10 und +30%, wobei Maximalbeträge bis über 40% auftraten. Im Oberwallis, Nordtessin und in den Bündner Südtälern wurde der nasseste Herbst des Jahrhunderts verzeichnet (vgl. Fig. 2).

**Sonnenschein**

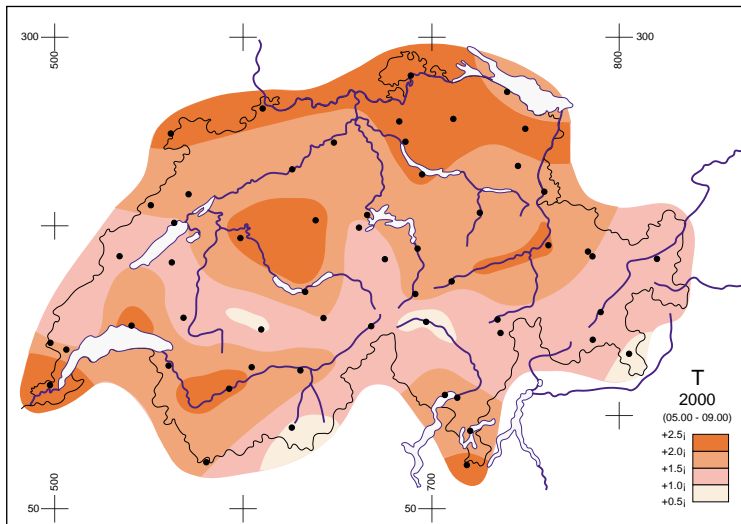
Nach dem vorangehenden sonnenarmen Berichtsjahr lag die Sonnenscheindauer 1999/2000 wieder über dem Durchschnitt. Der Überschuss an Sonnenschein fiel im Alpenraum weniger ausgeprägt aus als in den angrenzenden, nördlicheren Gebieten. Überdurchschnittlich sonnig waren vor allem Januar, Juni, August und September, wirklich sonnenarm war in den gesamten Schweizer Alpen einzig der Dezember 1999.

**Massenhaushalt**

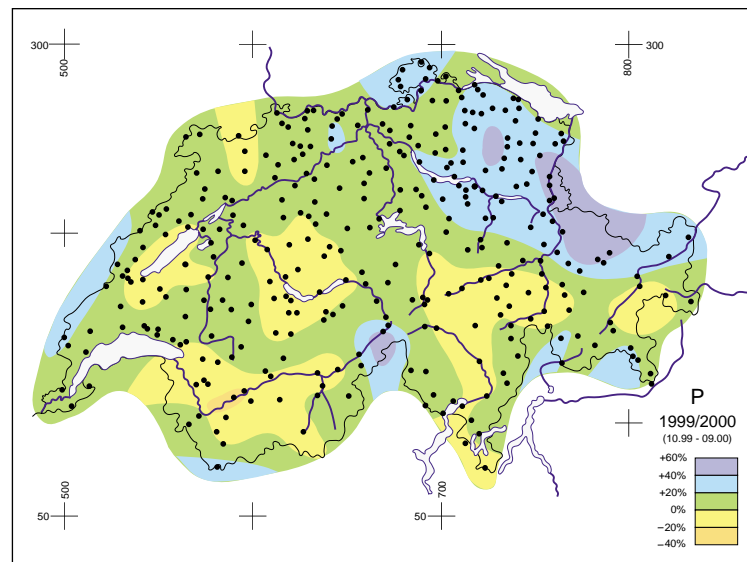
Der Massenhaushalt wurde an drei Gletschern mit der direkten, glaziologischen Methode bestimmt. Daneben wurden einzelne punktuelle Messungen der Massenänderung an Jungfraufirn (Aletsch), Clariden, Giétro, Corbassière sowie im Mattmarkgebiet durchgeführt.

Die Bestimmung des Massenhaushalts des gesamten Aletschgletschers anhand der hydrologischen Methode wird dagegen in Zukunft nicht mehr weitergeführt. Die verwendete Methode ist mit so grossen Unsicherheiten und Fehlern verbunden, dass ihr ein geringer Wert beigemessen wird. Von wissenschaftlich weit gösserer Bedeutung im Hinblick auf die Beantwortung von klimarelevanten Fragestellungen sind hingegen die punktuellen Messungen der Massenänderung.

Während der Griesgletscher im Nufenengebiet und der Ghiacciaio del Basodino im Tessin einen grossen Massenverlust erfuhren, gestaltete sich die Bilanz beim Silvrettagletscher im hinteren Prättigau sogar leicht positiv. Die Werte der mittleren, spezifischen Massenbilanz in Metern Wasseräquivalent betragen -0,91 m am Gries, -0,80 m am Basodino und schliesslich +0,15 m am Silvretta. Im Vergleich mit den vorangehenden Messungen fallen alle Werte tiefer aus als in der letzten Periode mit schneereichem Winter und höher als in



**Fig. 1**  
Sommertemperatur 2000  
(Mittelwert 1.5.–30.9.2000):  
Abweichung vom langjährigen  
Normalwert (1901 bis 1960)  
in Grad Celsius



**Fig. 2**  
Jahresniederschlag 1999/2000  
(Summe 1.10.1999–30.9.2000):  
Abweichung vom langjährigen  
Normalwert (1901 bis 1960)  
in Prozent

der vorletzten Periode mit massiver Schmelze im Sommer (vgl. Fig. 3). Das abgelaufene Beobachtungsjahr weist jedoch eine analoge räumliche Charakteristik wie das vorangehende auf. Während die beiden dem südlichen Wettereinfluss ausgesetzten Gletscher Basodino und Gries weiterhin markante Massenverluste erleiden, zeigt der nördlich vom Alpenhauptkamm liegende Silvretta zum zweiten Mal ein positives Ergebnis. Die punktuellen Messungen der Massenänderung widerspiegeln diese Tendenz ebenfalls. Feststellbar ist ein leichtes Gefälle von normalen, durchschnittlichen Werten im Norden zu eher tieferen im Süden (Wallis).

Die Bewegungsmessungen widerspiegeln den allgemeinen Trend des Zurückschmelzens der Alpengletscher. Die jeweils an gleicher Lage wiederholten Messungen weisen durchwegs rückläufige horizontale Geschwindigkeitsbeiträge auf. Die Fließgeschwindigkeit ist hauptsächlich von Oberflächenneigung und Eismächtigkeit abhängig. Es besteht deshalb ein Zusammenhang mit Veränderungen der Gletschergeometrie.

### Längenänderung

Von den im Beobachtungsnetz verzeichneten 121 Gletschern werden momentan 108 aktiv beobachtet. Die restlichen sind einerseits stark zusammenge-

schmolzen und oft auch schuttbedeckt, sodass eine sinnvolle Vermessung im Jahresrhythmus vorderhand nicht möglich ist. Andererseits wurden einige nur in unregelmässigen Abständen beobachtet, wobei die vereinzelt Messwerte erst noch sehr ungenau waren, was ein Beibehalten in den Aufstellungen und Analysen ebenso wenig rechtfertigt.

In der Berichtsperiode konnte bei 88 der 95 besuchten Gletscher eine Längenänderung bestimmt werden. Während gerade noch 5 Zungen vorstießen und 4 sich stationär (= ±1 m) verhielten, hat sich wiederum die grosse Mehrheit von 79 Gletschern zurückgezogen (vgl. Fig. 4). Die grössten Beträge erreichte der Turtmann mit +4,8 m Vorstoss einerseits und der Allalin mit -218 m Rückzug andererseits.

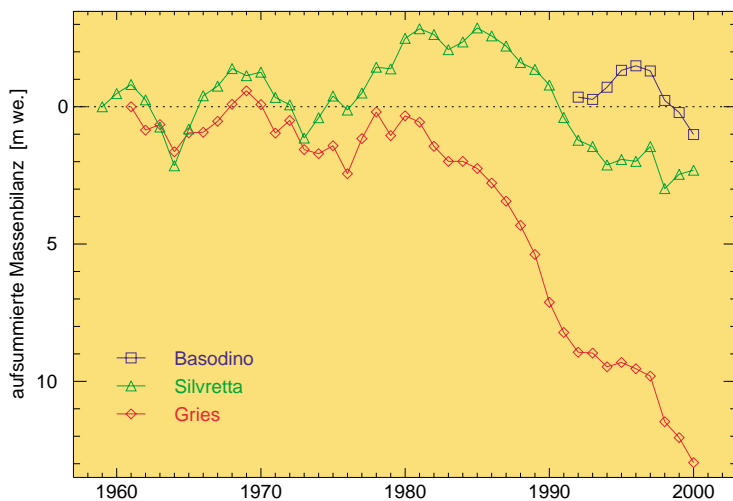
Der sehr grosse Rückzugsbetrag des Allalin hat einen speziellen Grund: Am 31. Juli 2000 stürzte mit etwa 1 Mio. Kubikmeter Eis fast die gesamte Zunge über die vorgelagerte steile Felspartie ins Tal. Ein ähnliches Ereignis (rund dreimal mehr Volumen), das damals 88 Todesopfer forderte, fand 1965 während der Bauarbeiten der Mattmarkstauwehr statt. Dank dem seither existierenden umfassenden Beobachtungsprogramm konnte bereits Mitte der Neunzigerjahre festgestellt werden, dass der Allalingletscher inzwischen wiederum eine ähnliche Ausgangslage erreichte, sodass mit einem Absturzereignis gerechnet werden

musste. Die deshalb angeordneten Schutzmassnahmen und Absperrungen erwiesen sich als angemessen und verhinderten ein erneutes Unglück.<sup>3</sup>

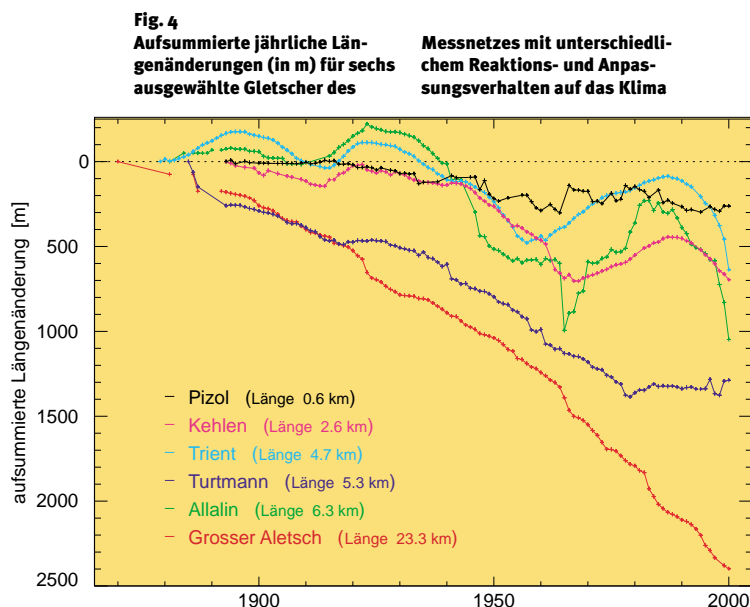
Nicht nur am Allalin, sondern auch am Trient war der Rückzug mit -180 m ausserordentlich gross. Auf eine anhaltende Vorstossperiode von Anfang der Sechziger- bis Ende der Achtzigerjahre folgte am Trient in den Neunzigerjahren ein massiver Schwund, wobei die letzte Messung sehr hoch ausfiel (vgl. Fig. 5). Die übrigen in der Berichtsperiode festgestellten grossen Längenänderungen bewegen sich um die -50 m. Die mehrheitlich negativen Messwerte auch der kleineren und deshalb auf klimatische Veränderungen rasch reagierenden Gletscher zeigen, dass sich die einmaligen, grossen Schneemengen des Winters 1998/99 kaum positiv auswirken. Die Resultate sind sehr uneinheitlich. Es ist kaum anzunehmen, dass sich ein Trend feststellen lassen wird, da ein allfälliges Signal in der Auflösung der Messung untergehen wird.

Zurzeit zeichnet sich am Trift im Susten-/Grimselgebiet (Gadmental) ein kollapsartiger Schwund der Zunge ab. Es handelt sich dabei um eine der am tiefsten hinunterreichenden Zungen in den Schweizer Alpen (ca. 1650 m ü. M.), die an einem Felsriegel anstand. In den letzten Jahren schmolz der Zungenbereich nicht nur gewaltig und verlor sehr viel

<sup>3</sup> Vgl. ALPEN 9/2001, S. 33-37, Zur Geschichte des Allalin

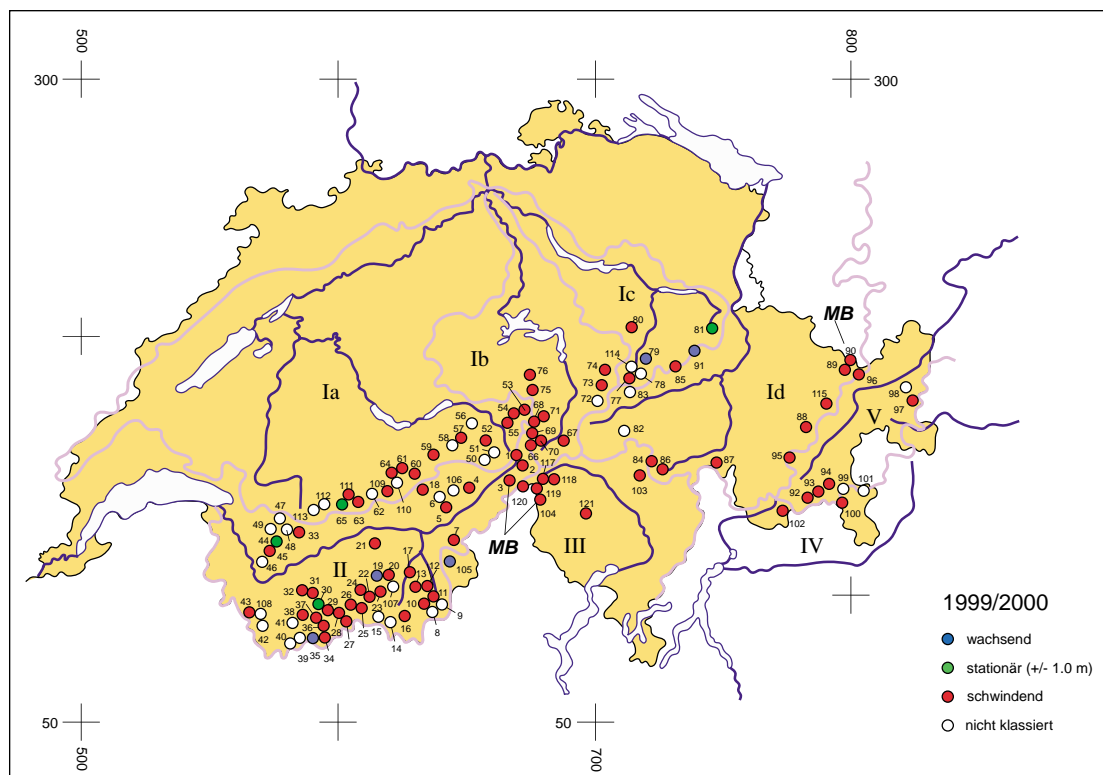


**Fig. 3**  
Aufsummierte mittlere jährliche Massenbilanz (in m Wasseräquivalenten) von den Gletschern Basodino, Gries und Silvretta



**Fig. 4**  
Aufsummierte jährliche Längenänderungen (in m) für sechs ausgewählte Gletscher des Messnetzes mit unterschiedlichem Reaktions- und Anpassungsverhalten auf das Klima

**Fig. 5**  
**Übersicht über die Längen-**  
**änderungen der Gletscher**  
**in den Schweizer Alpen**  
**1999/2000**



Masse, auch der Kontakt zum Felsriegel riss ab, wobei sich am Rand ein See bildete. In nächster Zukunft muss deshalb mit einem schnellen Verschwinden weiterer Teile der Zunge gerechnet werden. Leider sind wegen des schwierigen Zugangs und den geringen Veränderungen entlang der aufstauenden Felsbarriere nur spärliche Messungen der Längenänderung vorhanden.

### Dank

Die langfristigen Beobachtungen der Gletscher in den Schweizer Alpen durch die Glaziologische Kommission der SANW ist ohne die tatkräftige und langjährige Unterstützung vieler freiwilliger Helfer undenkbar. Ein besonderer Dank gilt allen regelmässig im Gelände bei der Aufnahme oder im Büro bei der Datenbearbeitung mitwirkenden Privatpersonen und Angehörigen der Forstdienste in den Gebirgskantonen, der Kraftwerke Aegina, Mattmark und Mauvoisin, von Bundesämtern, Forschungsanstalten, Hochschulen und Universitäten. Ein spezieller Dank richtet sich an die Abteilung Glaziologie und die Direktion der VAW an der ETH Zürich für ihre Unterstützung.

### Anhang: Von kalbenden Gletschern

Gletscher, die in einem See oder im Meer enden und von deren Gletscherende Eisberge abbrechen, werden als kalbende Gletscher bezeichnet. Die zeitliche Veränderung solcher Gletscher hängt nicht allein vom Klima beziehungsweise der Massenbilanz ab, sondern wird zusätzlich vom Prozess der Eisbergkalbung am Gletscherende beeinflusst. Die Kalbung ist ein sehr effizienter Ablationsmechanismus und bewirkt einen viel schnelleren Massenverlust, als durch Oberflächenschmelze allein möglich ist. Von allen Gletschern und Eiskappen der Erde beträgt der Anteil der Ablation durch Kalbung 70% (Van der Veen, 1997), wovon der grösste Teil auf Schelfeis und schwimmende Gletscherzungen in der Antarktis und Grönland entfällt. Unsere Ausführungen beschränken sich auf kalbende Gletscher, die überall auf dem Untergrund aufliegen, das heisst die Gletscherzunge schwimmt nicht auf. Neben den grösseren kalbenden Gletschern in Alaska und Patagonien finden sich auch vereinzelt kleinere in den Alpen wie zum Beispiel der Roseggletscher im Engadin oder seit kurzem der Triftgletscher im Berner Oberland.

### Schneller Rückzug des Columbia Glacier

Bei verschiedenen kalbenden Gletschern in Alaska und in Patagonien wurden plötzlich einsetzende, schnelle Rückzüge als Folge eines starken Anstiegs der Kalbungsrate (Differenz zwischen Längenänderung und Fliessgeschwindigkeit an der Kalbungsfrent) beobachtet (Meier and Post, 1987; Warren, 1993; Naruse and Skvarca, 2000). Anfang der Achtzigerjahre setzte beim Columbia Glacier in Alaska nach einer längeren stabilen Phase plötzlich ein schneller Rückzug (vgl. Fig. 6, Seite 30) mit einer mittleren Rückzugsrate von 700 m/Jahr ein. So liegt heute das Gletscherende etwa 12 km hinter der Position von 1982. Da die stark erhöhte Eisbergproduktion des Gletschers zu Beginn der Achtzigerjahre eine grosse Gefahr für die Öltanker auf der Route zum Hafen der Alaska-Pipeline darstellte, wurden das Verhalten des Columbia Glacier – und kalbender Gletscher im Allgemeinen – sowie der Prozess der Kalbung näher untersucht. Heute interessiert das Verhalten solcher Gletscher vor allem im Zusammenhang mit der Klimaänderung.

**Tabelle 2:**  
**Gletscher der Schweizer Alpen – Längenänderung 1999/2000**

Nr.	Gletscher	Kt.	Längenänderung (m)	Nr.	Gletscher	Kt.	Längenänderung (m)	Nr.	Gletscher	Kt.	Längenänderung (m)
<b>Einzugsgebiet der Rhone (II)</b>				<b>Einzugsgebiet der Aare (Ia)</b>				<b>Einzugsgebiet des Rheins/Bodensee (Id)</b>			
1	Rhone	VS	-5,9	47	Sex Rouge	VD	x	84	Lenta	GR	-17,3
2	Mutt	VS	-111,8 <sup>6</sup>	48	Prapio	VD	x	85	Vorab	GR	-4,8 <sup>2</sup>
3	Gries	VS	-13,1	<b>Einzugsgebiet der Aare (Ia)</b>				86	Paradies	GR	-3,1
4	Fiescher	VS	-8,4	52	Gauli	BE	-11	87	Suretta	GR	-12
5	Grosser Aletsch	VS	-18,5	53	Stein	BE	-16	115	Scaletta	GR	-5
7	Kaltwasser	VS	-9,8	54	Steinlimmi	BE	-15	88	Porchabella	GR	-6,6
10	Schwarzberg	VS	-11	55	Trift (Gadmen)	BE	ca. -50	89	Verstankla	GR	-15
11	Allalin	VS	-218	57	Oberer Grindelwald	BE	ca. -50	90	Silvretta	GR	-2,0
12	Kessjen	VS	-13	58	Unterer Grindelwald	BE	x	91	Sardona	SG	+1,1
13	Fee (Nord)	VS	-36,8	59	Eiger	BE	-29,4	<b>Einzugsgebiet des Inns (V)</b>			
16	Findelen	VS	-58,5	60	Tschingel	BE	-2,8	92	Roseg	GR	-54,1
17	Ried	VS	-26,3	61	Gamchi	BE	-7,6	93	Tschierva	GR	-53,1
18	Lang	VS	-31	109	Alpetli	BE	-10,3	94	Morteratsch	GR	-29,6
19	Turtmann	VS	+4,8	62	Schwarz	VS	x	95	Calderas	GR	-8,1
20	Brunegg (Turtmann Ost)	VS	-11,5	63	Lämmern	VS	-11,7	96	Tiatscha	GR	-18,9
21	Bella Tola	VS	-2,3	64	Blümlisalp	BE	-32	97	Sesvenna	GR	-1,7
22	Zinal	VS	-18	111	Ammerten	BE	-1,5	98	Lischana	GR	x (sn)
23	Moming	VS	-29	65	Rätzli	BE	st	<b>Einzugsgebiet der Adda (IV)</b>			
24	Moiry	VS	-5	<b>Einzugsgebiet der Reuss (Ib)</b>				99	Cambrena	GR	x
25	Ferpècle	VS	-15	66	Tiefen	UR	-16,6	100	Palü	GR	-57
26	Mont Miné	VS	-20	67	Sankt Anna	UR	-11,1	101	Paradisino (Campo)	GR	x
27	Arolla (Mont Collon)	VS	-14	68	Kehlen	UR	-33,2	102	Forno	GR	-22,4
28	Tsidjiore Nouve	VS	-17	69	Rotfirn (Nord)	UR	-12,4	<b>Einzugsgebiet des Tessins (III)</b>			
29	Cheillon	VS	-6,5	70	Damma	UR	-20,8	120	Corno	TI	-3,3
30	En Darrey	VS	st	71	Wallenbur	UR	-4,6	117	Valleggia	TI	-7,7
31	Grand Désert	VS	-13,4	73	Hüfi	UR	-8,9	118	Val Torta	TI	-19,1
32	Mont Fort (Tortin)	VS	-3,2	74	Griess	UR	-22,7	103	Bresciana	TI	-23,4
33	Tsanfleuron	VS	-5	75	Firnalpeli (Ost)	OW	-2,5	119	Cavagnoli	TI	-11,2
34	Otemma	VS	-24	76	Griess	OW	-8 <sup>3</sup>	104	Basodino	TI	-19,6
35	Mont Durand	VS	+1,4	<b>Einzugsgebiet der Linth/Limmat (Ic)</b>				121	Croslina	TI	-3,6
36	Breny	VS	-15,9	77	Biferten	GL	-9,8	105	Rossboden	VS	+3,3
37	Giétro	VS	-2,9	79	Sulz	GL	+4,4				
38	Corbassière	VS	-9,5	80	Glärmisch	GL	-8,6				
43	Trient	VS	-180	81	Pizol	SG	st				
44	Paneyrosse	VD	st								
45	Grand Plan Névé	VD	-2,6								

**Abkürzungen**  
sn = eingeschneit  
x = Betrag nicht bestimmt  
st = stationär

**Bemerkungen**  
Gilt die Angabe für eine mehr-jährige Zeitspanne, ist die Zahl der Jahre angezeigt: -118<sup>6</sup> = Schwund um 118 m in 6 Jahren.

### Kalbung und basales Gleiten

Auf Grund von Beobachtungen an verschiedenen kalbenden Gletschern wurde festgestellt, dass die Kalbungsrate nahezu linear mit der Wassertiefe zunimmt (Brown et al., 1982). Wenn sich das Gletscherende nun in tieferes Wasser zurückzieht, erwartet man einen beschleunigten Rückzug. Die Abhängigkeit der Kalbungsrate von der Wassertiefe ist rein empirisch und beschreibt nicht den physikalischen Prozess der Eisbergkalbung.

Basierend auf den Beobachtungen vom Columbia Glacier wurde ein alternatives Konzept für die Kalbung vorgeschlagen (Van der Veen, 1996). Jener Teil einer dünner werdenden Gletscher-

zunge, der zu nahe ans Schwimmgewicht kommt, bricht ab als Folge der Auftriebskraft, die auf das Eis im Wasser wirkt. Das heisst, bevor die Gletscherzunge aufschwimmt, kalbt sie weg. Man spricht hier von der «auftrieb-induzierten Kalbung». Bei diesem Ansatz ist die Kalbungsrate vor allem ein Resultat der Änderung der Gletschermächtigkeit im Zungenbereich und damit eine Folge der Dynamik des ganzen Gletschers.

Für kleinere und langsam fliessende kalbende Gletscher, wie sie auch in den Alpen vereinzelt vorkommen, spielen Schmelzprozesse an der Kontaktfläche der Kalbungsfront mit dem Wasser für den Kalbungsprozess eine wichtige Rolle. Beim Beispiel des Hansbreen (Spitzbergen) entsteht durch Schmelz- und Wel-

lenerosion eine Kerbe an der Wasserlinie, was zum Abbrechen des darüber liegenden Eises führt. In diesem Fall bestimmt die Schmelzrate an der Wasserlinie die Kalbungsrate (Vieli, 2001).

Die hohen Fliessgeschwindigkeiten, die im Zungenbereich von kalbenden Gletschern typischerweise beobachtet werden, lassen sich durch stark erhöhtes Gleiten am Gletscherbett erklären und stehen in Zusammenhang mit dem hohen basalen Wasserdruck, der bei solchen Gletschern im Zungenbereich auftritt. Basales Gleiten ist auch verantwortlich für die Geschwindigkeitszunahme gegen die Kalbungsfront (vgl. Fig. 7).

Der Gleitprozess am Gletscherbett spielt deshalb für die Dynamik von kalbenden Gletschern eine wichtige Rolle.

Um das Verhalten von kalbenden Gletschern verstehen zu können, reicht es nicht, die beteiligten Prozesse wie die Eisbergkalbung, das Gletscherfließen oder basales Gleiten isoliert voneinander zu untersuchen, da diese Prozesse einander gegenseitig beeinflussen.

### Numerische Modell-Experimente

In einem numerischen Gletschermodell ist es möglich, die wichtigsten Prozesse zu verknüpfen. Anhand eines solchen

numerischen Modells (Vieli, 2001) kann das Verhalten kalbender Gletscher, insbesondere schneller Rückzüge, besser verstanden werden. Es berechnet die zeitliche Evolution der Gletschergeometrie sowie die Fließgeschwindigkeiten und Spannungen entlang einer Fließlinie. Für die Kalbung wird der Ansatz der «Auftrieb induzierten Kalbung» verwendet. Als Beispiel werden hier Berechnungen eines Gletscherrückzugs durch eine basale Übertiefung gezeigt (vgl. Fig. 8). Die gewählte Gletscher- und Bettgeometrie mit der basalen Übertiefung im



Hansbrengletscher



Fotos: A. Vieli



**Frontalansicht der Kalbungsfront des Hansbreen (Spitzbergen), aufgenommen bei Ebbe im Juli 1998. Die ausgeschmolzene**

**Kerbe an der Wasserlinie erstreckt sich entlang der ganzen Front und war während des ganzen Sommers sichtbar.**



**Sicht auf die Gletscherzunge des Hansbreen, eines relativ kleinen kalbenden Gletschers in Spitzbergen. Die Gletscherzunge ist 2 km breit, die Höhe der Kalbungsfront über dem Wasser liegt zwischen 30 und 45 m, und die maximale Wassertiefe an der Front beträgt 70 m.**

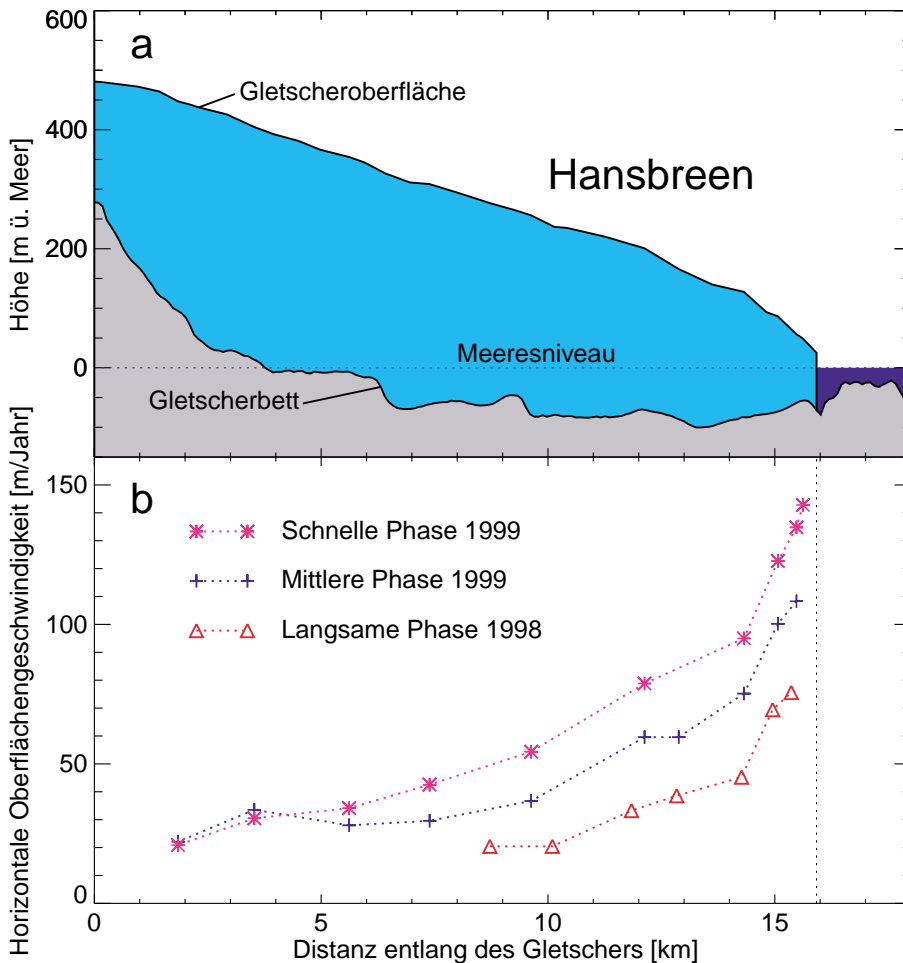


Zungenbereich ist typisch für kalbende Gletscher.

Der Gletscher wird aus seinem klimatischen Gleichgewicht gebracht, indem künstlich eine leicht negativere Massenbilanz vorgegeben wird. Das heisst, die Akkumulation (Massenzunahme) wird kleiner und die Ablation (Schmelze) nimmt zu. Der Gletscher wird deshalb dünner und die Kalbungsfront zieht sich

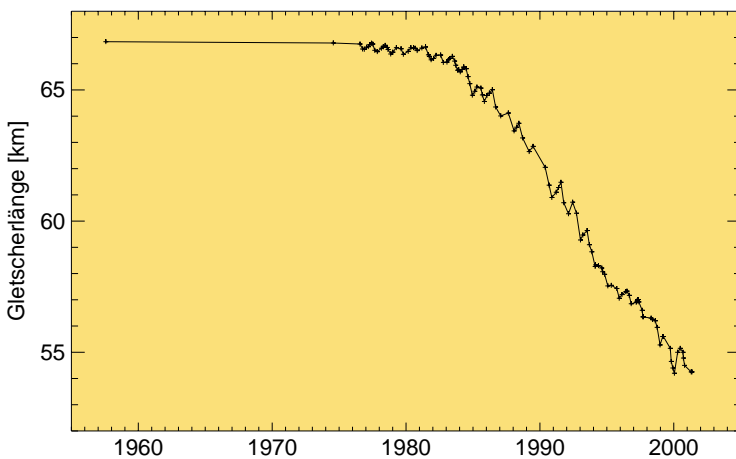
langsam zurück (vgl. Fig. 9). Mit dem Rückzug in weniger tiefes Wasser nehmen Kalbungsrate und Geschwindigkeit ab. Wenn sich die Gletscherfront über

**Fig. 7**  
Zunahme der Fließgeschwindigkeit gegen die Kalbungsfront am Hansbreen (Spitzbergen): (a) Oberfläche- und Bettgeometrie entlang eines Längsprofils. (b) Oberflächengeschwindigkeit entlang des gleichen Längsprofils, gemessen über verschiedene Zeitperioden.



den höchsten Punkt des basalen Hügels (A) zurückgezogen hat, beschleunigt sich der Rückzug als Folge eines starken Ansteigens der Kalbungsrate. Damit kommt die Kalbungsfront in immer tieferes Wasser zu liegen, die Kalbungsrate steigt weiter stark an und der Rückzug wird noch schneller. Sobald aber das Gletscherende den tiefsten Punkt (B) überschritten hat und die Wassertiefe an der Front kleiner wird, nimmt die Kalbungsrate ab und der Rückzug verlangsamt sich wieder. Das Rückzugsverhalten ist dann wieder jenem in der Anfangsphase vergleichbar. Die Fließgeschwindigkeit am Gletscherende verhält sich mit der Zeit ähnlich wie die Kalbungsrate: Mit dem Rückzug in tieferes Wasser nimmt sie zu und wird geringer, wenn sich die Wassertiefe reduziert. Da diese Änderungen kleiner als jene der Kalbungsrate sind, resultiert durch die basale Übertiefung ein beschleunigter Rückzug.

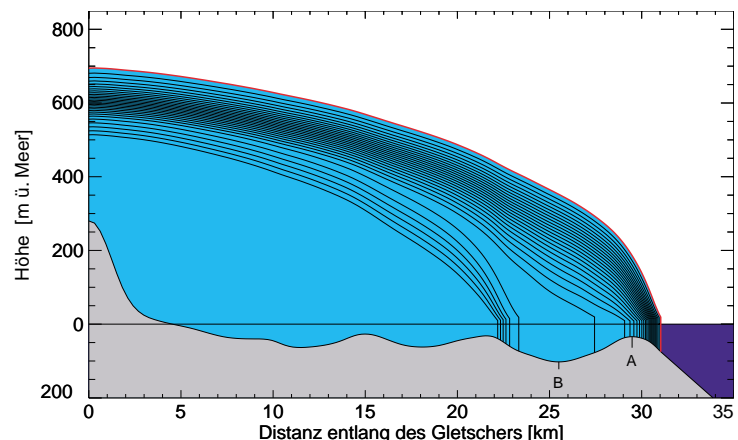
Da in den Modellrechnungen die Massenbilanz nur am Anfang geändert und damit ein konstantes Klima angenommen wurde, ist der schnelle Rückzug kein direktes Klimasignal, sondern ein Effekt der basalen Übertiefung. Das Dünnerwerden des Gletschers als Folge der negativen Massenbilanz spielt allerdings als Auslöser für den drastischen Rückzug eine entscheidende Rolle. Diese Modellrechnungen zeigen, dass Längenänderungen bei kalbenden Gletschern stark von der Gletscherbetttopografie beeinflusst werden. Für kalbende Gletscher sind Bettübertiefungen im Zungenbereich typisch, und drastische Gletscherrückzüge können demzufolge bereits bei einer leichten Erwärmung des



**Fig. 6**  
Längenänderung des Columbia Glacier (Alaska) seit 1957 (Daten: R. Krimmel, U.S. Geological Survey)

**Fig. 8**  
Modellierter Gletscherrückzug durch eine basale Übertiefung: Dargestellt ist ein Längsprofil des Gletschers mit dem Gletscherbett und der Oberfläche in zeitlichen Abständen von zwei

Jahren. Die rote Linie bezeichnet die Anfangs-Oberflächengeometrie und A und B den Ort der untiefsten bzw. tiefsten Stelle des Gletscherbettes im Zungengebiet.



Klimas auftreten. Im Gegensatz zum Rückzug durch eine Bettübertiefung braucht es für einen Vorstoss neben einer stark positiven Massenbilanz viel Zeit (Hunderte von Jahren), sodass mittelfristig ein solch schneller Rückzug ein irreversibler Prozess ist.

### Kalbende Gletscher in den Alpen

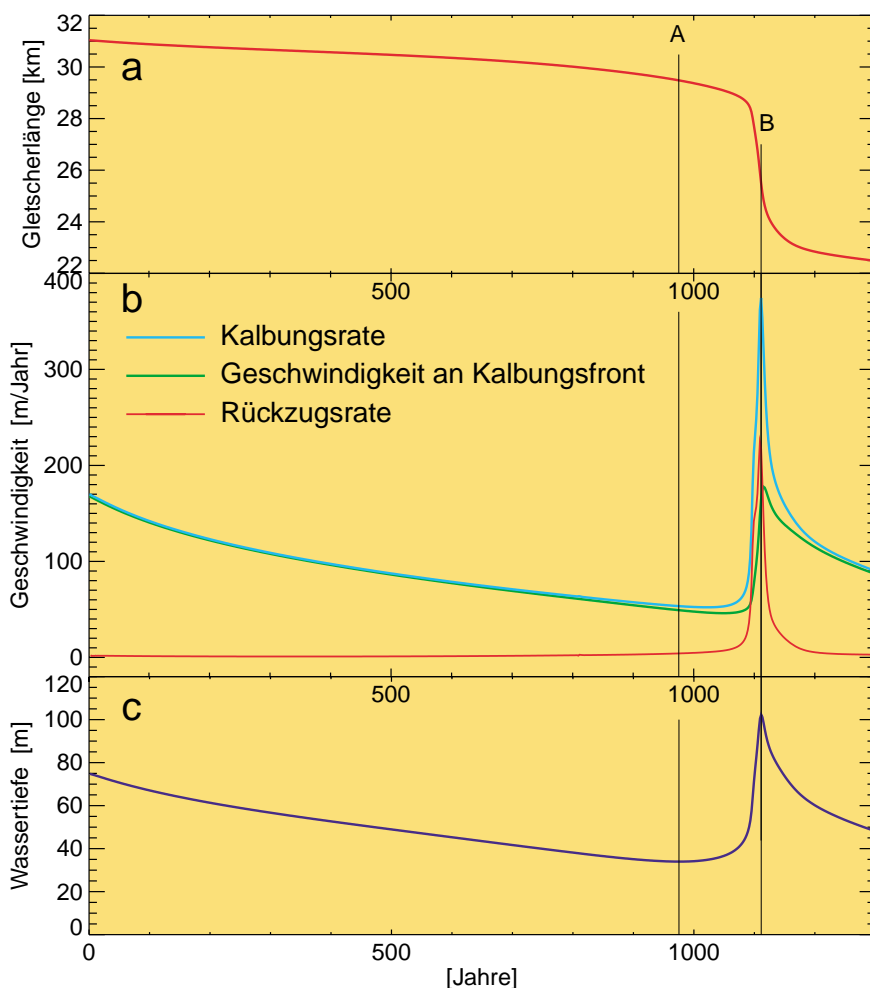
Kalbende Gletscher sind in den Alpen relativ selten. Die Kalbrungsraten sind verglichen mit den Beispielen aus Alaska und Patagonien relativ gering. Eine wichtige Rolle für die Kalbrung spielt die Schmelze an der Front. Als sich beim Rückzug des Roseggletschers (Engadin) an der Front ein See bildete, begann der Gletscher zu kalben. Auf Grund der geringen Wassertiefe kann der Einfluss der Kalbrung auf den Rückzug kaum ausgemacht werden (vgl. Fig. 10). Auch beim

Triftgletscher hat sich beim Rückzug in den letzten zwei Jahren ein See mit einer Kalbrungsfront gebildet, weshalb in den nächsten Jahren eine Zunahme des Rückzugs erwartet wird.

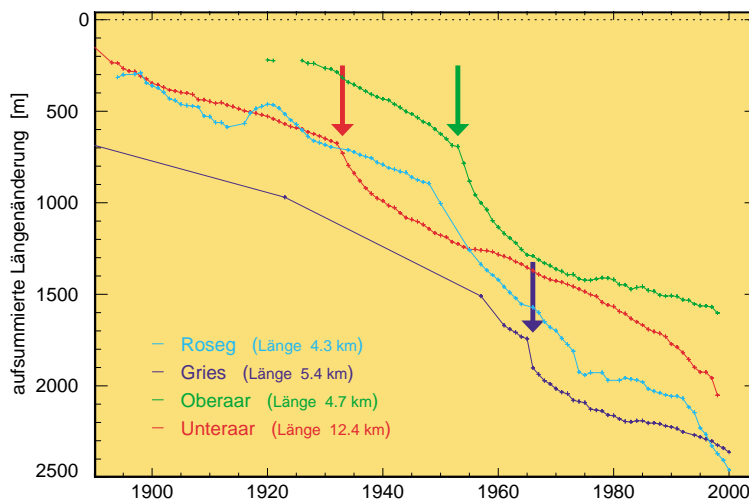
Als beim Bau von Wasserkraftwerken verschiedene Gletscherzungen eingestaut wurden, entstanden künstlich kalbende Gletscher wie 1933 beim Unteraar, 1953 beim Oberaar und 1966 beim Gries. Die Kalbrung beschleunigte dabei den Rückzug kurzfristig deutlich (vgl. Fig. 10), alle drei Gletscher haben sich seither aus dem See zurückgezogen. ▀

Andreas Bauder, Andreas Vieli und Martin Hoelzle, VAW-ETHZ

**Fig. 9** Modellierter Gletscherrückzug durch eine basale Übertiefung: Änderung der Gletscherlänge (a), der Kalbrungsrate, der Geschwindigkeit an der Gletscherfront und der Rückzugsrate (b) und der Wassertiefe an der Kalbrungsfront (c) mit der Zeit.



**Fig. 10** Aufsummierte jährliche Längenänderungen (in m) für den Unteraar, Oberaar, Gries und Roseg mit zeitweise in einem See endender Zunge. Die Pfeile markieren den Beginn des Einstaus.



### Literatur

Brown C. S., Meier M. F. and Post A. (1982): Calving speed of Alaska tidewater glaciers, with application to Columbia glacier. *Technical report*, US Geological survey professional paper 1258-C.

Meier M. F. and Post A. (1987): Fast tidewater glaciers. *Journal of Geophysical Research* 92 (B 9): 9051–9058.

Naruse R. and Skvarca P. (2000): Dynamic Features of Thinning and Retreating Glacier Upsala, a Lacustrine Calving Glacier in Southern Patagonia. *Artic, Antarctic, and Alpine Research*, 32(4): 485–491.

Van der Veen C. J. (1996): Tidewater calving. *Journal of Glaciology*, 42(141): 375–385.

Van der Veen C. J., editor (1997): Calving Glaciers: Report of a Workshop, *BPRC Report No. 15*, Byrd Polar Research Center, Ohio State University, Columbus, Ohio.

Vieli A. (2001): On the Dynamics of Tidewater Glaciers. *PhD thesis*, ETH Zürich. No. 14100.

Warren C. R. (1993): Rapid recent fluctuations of the calving San Rafael Glacier, Chilean Patagonia: climatic or non-climatic? *Geografiska Annaler*, 75: 111–125.

WMO (2000): WMO Statement of the Status of the Global Climate in 2000. World Meteorological Organization WMO Press Releases (<http://www.wmo.ch>), No. 657.

**Ansicht des Columbia Glacier (Alaska) von 1961. Die Gletscherzunge ist etwa 4 km breit, und die Wassertiefe an der Front beträgt etwa 100 m.**

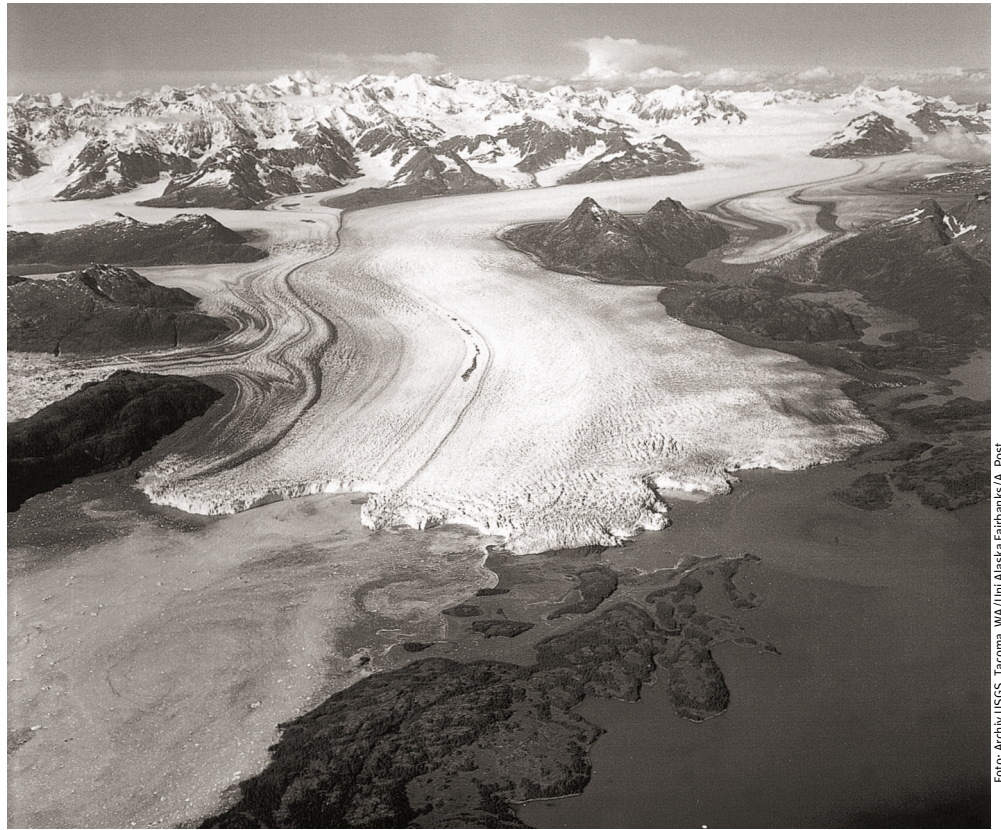


Foto: Archiv USGS, Tacoma, WA / Uni Alaska Fairbanks / A. Post

Foto: Archiv USGS, Tacoma, WA / Uni Alaska Fairbanks / R. Krimmel



**Ansicht des Columbia Glacier von 1994 während der Phase des drastischen Rückzugs, der Anfang der Achtzigerjahre begonnen hat. Die unzähligen Eisberge, die den Fjord bedecken, deuten auf eine hohe Kalbungsrate hin. Seit 1961 (vgl. S. 26) hat sich der Gletscher um etwa 10 km zurückgezogen. Der Fjord ist an der Kalbungsfront bis gegen 350 m tief.**