



Das Zungenende des Gornergletschers liegt in einer engen Schlucht. Im Sommer kommt es an schmelzintensiven Tagen zu grossen Abflüssen aus dem Gletscher (mit starker tageszeitlicher Variation).

Kryosphäre in den Schweizer Alpen

Schnee, Gletscher und Permafrost 2005/06 und 2006/07¹

Schnee, Gletscher und Permafrost bilden zusammen die alpine Kryosphäre. Erstmals werden hier die Entwicklungen in den drei Bereichen gemeinsam präsentiert. Obwohl es Unterschiede gibt zwischen den einzelnen Phänomenen und Regionen, zeigt sich doch: Die steigenden Lufttemperaturen sind mitverantwortlich, dass die Schneebedeckung abnimmt, die Gletscher sich zurückziehen und die Untergrundtemperaturen ansteigen.

Die Berichterstattungen über die Veränderungen von Gletschern und Permafrost in den Schweizer Alpen, die bisher alternierend erfolgten, werden erstmals gemeinsam präsentiert. Sie werden ergänzt durch Daten zum Schnee. Alle drei zählen zur sogenannten Kryosphäre, die alle Formen von gefrorenem Wasser auf der Erde umfasst. Der Begriff leitet sich ab vom griechischen Wort «kryos» für kalt oder Kälte. Die drei Phänomene können sich gegenseitig beeinflussen, reagieren jedoch zum Teil unterschied-

lich auf Klimaänderungen. Systematische und langfristige Messungen, um Veränderungen festzustellen und zu dokumentieren, werden bei Schnee und Gletschern seit dem 19. Jahrhundert durchgeführt. Seit gut zehn Jahren wird dies auch für den Permafrost gemacht.

Für eine lückenlose Fortführung der bisherigen Berichterstattungen behandelt der vorliegende Bericht für Schnee und Gletscher die beiden Perioden 2005/06 und 2006/07, während für Permafrost nur auf die Periode 2006/07 eingegangen wird. Der Bericht umfasst wie bis anhin einen kurzen Überblick über

¹ Auszug aus dem 127. und 128. Bericht der Gletscherbeobachtungen sowie 8. Bericht zu Permafrostmessungen der Expertenkommission Kryosphäre der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (EKK/SCNAT) und ihrer Partnerinstitutionen.

die Witterung, in dem auf die für die weiteren Ausführungen zu Schnee, Gletschern und Permafrost entscheidenden Parameter Lufttemperatur, Niederschlag und insbesondere Schneefall eingegangen wird.

Witterung

In der Schweiz wie auch weltweit zählen die Jahre 2006 und 2007 erneut zu den wärmsten seit Beginn der instrumentellen Messungen 1864. Während die Niederschläge in der ersten Beobachtungsperiode 2005/06 im Schweizer Alpenraum eher unterdurchschnittlich ausfielen, waren besonders die westlichen Alpen in der zweiten Periode 2006/07 niederschlagsreich. Die Besonnung erreichte in beiden Perioden normale bis überdurchschnittliche Werte.

Abb. 1a: Entwicklung des Jahresniederschlags (Summe über die Periode 1. Oktober bis 30. September): Abweichung vom Normalwert in Prozent (langjähriger Mittelwert 1961–1990).

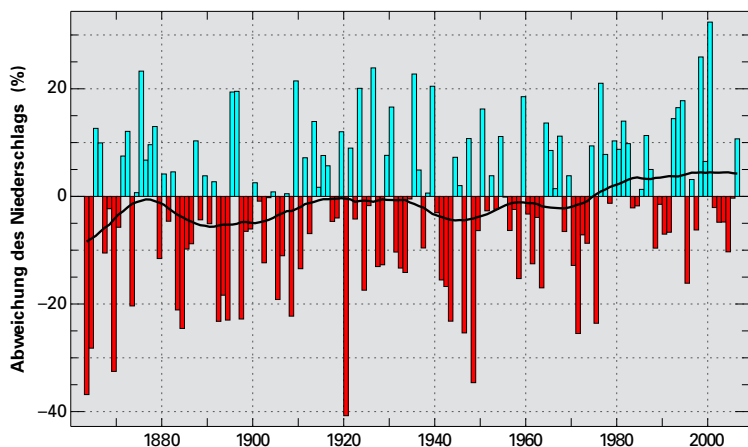
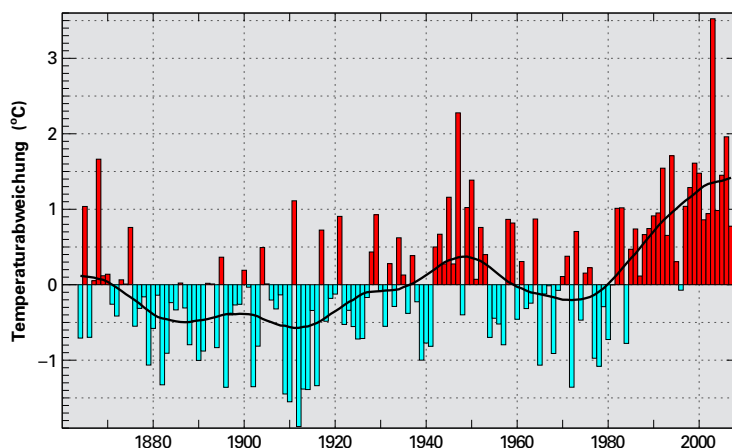


Abb. 1b: Entwicklung der Sommertemperaturen (Mittelwert über die Periode 1. Mai bis 30. September): Abweichung vom Normalwert in Grad Celsius (langjähriger Mittelwert 1961–1990).



2005/06: lange Zeit wenig Schnee

Die erste Beobachtungsperiode war gekennzeichnet durch einen milden, schneearmen Herbst und Frühwinter. Ende November waren die Schneehöhen an den meisten Stationen stark unterdurchschnittlich (weniger als 60% des langjährigen Mittelwerts), besonders in den inneralpinen Gebieten. Der häufige Wind sorgte für eine unregelmässige Schneehöhenverteilung. Erst tiefere Temperaturen und weitere Schneefälle im Dezember und Januar sorgten für eine langsame Zunahme der Schneehöhen. Nach bedeutenden Schneefällen teilweise bis ins Mittelland Ende Februar, Anfang März und April erreichten die Schneehöhen in den Schweizer Alpen durchschnittliche Werte. Der Frühling setzte zögerlich ein, erreichte aber im April und Mai einen deutlichen Wärmeüberschuss im gesamten Alpengebiet. Ausser im kühlen August erreichte die Temperatur in den Sommermonaten hohe bis sehr hohe Werte, und es resultierte die drittwärmste Sommerperiode (Mai–September) in der Schweiz, übertroffen einzig durch die beiden Hitzesommer 2003 und 1947 (Abb. 1b). Im Sommer fiel in den Bergen wenig Schnee, nennenswerte Schneefälle gab es nur Anfang Juni und August.

2006/07: wärmstes Winterhalbjahr seit Messbeginn

Der sehr trockene und wärmste Herbst seit Messbeginn und ein trockener und sehr milder Winter sorgten für eine verbreitete und anhaltende Schneearmut. Die wenigen grösseren Niederschläge im Hochwinter fielen zudem teilweise bis

über 2000 Meter als Regen. Die Schmelze setzte früh ein, sodass die maximalen Schneehöhen im Hochgebirge bereits Mitte März gemessen wurden. In der Regel werden sie zwischen Mitte April und Anfang Mai erreicht, also rund einen Monat später. An einigen Stationen erfolgte die Ausaperung darum so früh wie noch nie seit Messbeginn. Trotz teilweiser Rekordnässe war auch der Sommer 2007 leicht wärmer als der langjährige Durchschnitt. Abgesehen vom Juli brachten die Niederschläge im Sommer nur oberhalb von 2600 Metern Schnee. Über die gesamte Beobachtungsperiode entsprach die Niederschlagsmenge etwa dem langjährigen Durchschnitt (1961–1990).

Schnee

Die Dicke der Schneedecke und die gefallene Neuschneemenge werden in der Schweiz täglich an rund 140 Beobachtungsstationen des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) und des Bundesamtes für

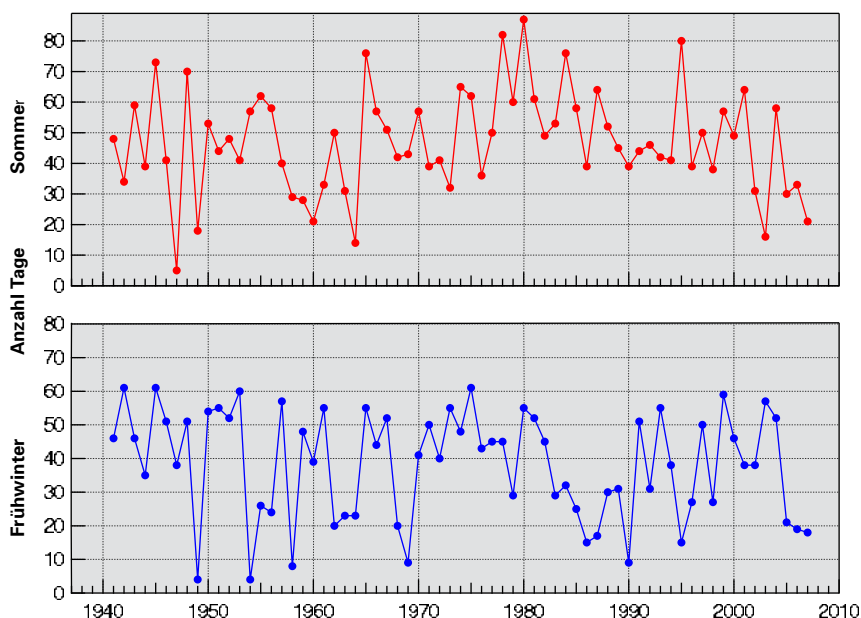


Abb. 2: Mittlere Anzahl Tage im Frühwinter (November und Dezember) mit einer Schneehöhe > 50 cm (blau) an den Stationen Grimsel (1980 m), Säntis (2490 m) und Weissfluhjoch (2540 m) und mittlere Anzahl Tage im Sommer (Juni–September) mit einer Schneehöhe > 10 cm (rot) von Säntis und Weissfluhjoch.

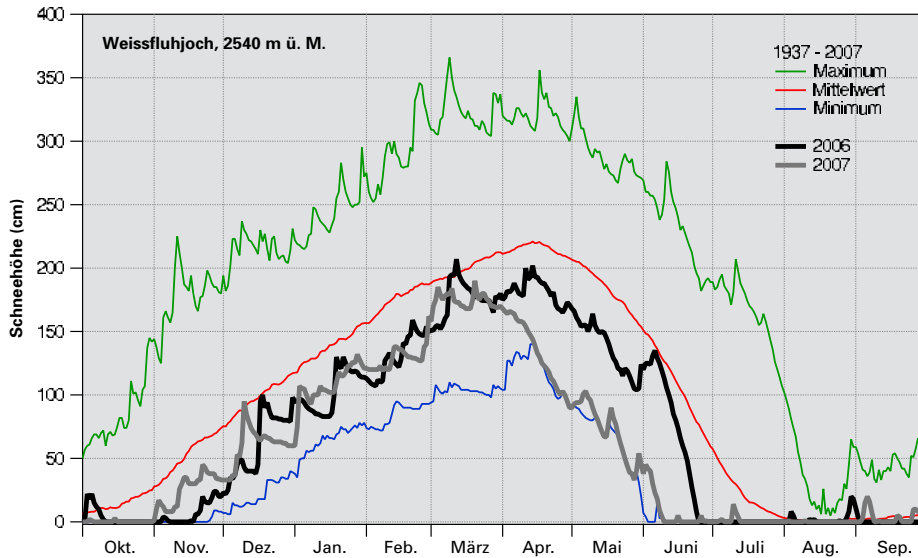
Meteorologie und Klimatologie (Meteo-Schweiz) erhoben. Diese manuellen Messungen finden mehrheitlich in bewohnten Orten unterhalb von 2000 Metern statt. Die Messreihen reichen rund 50 Jahre zurück, in Einzelfällen auch mehr als 100 Jahre. Im Gegensatz dazu messen die automatischen Stationen des SLF erst seit zehn Jahren und praktisch ausschliesslich an Standorten oberhalb von 2000 Metern. Aufgrund ihrer Höhenlage sind diese Stationen speziell interessant für die Beobachtung der Interaktion zwischen Schnee und Permafrost oder Schnee und Gletschern. Für langjährige Vergleiche im Hochgebirge muss jedoch

Foto: A. Bauder

Eisdickenmessung auf dem Gornergletscher (im Hintergrund Liskamm). Eisradar mit Sender auf dem vorderen und Empfänger auf dem hinteren Schlitten.



Abb. 3: Schneehöhenverlauf auf dem Weissfluhjoch (2540 m) der beiden hydrologischen Jahre 2005/06 und 2006/07 im Vergleich zum langjährigen (1937–2007) Mittel (rot), Maximum (grün) und Minimum (blau) pro Kalendertag.



auf die wenigen hoch gelegenen, manuellen Stationen zurückgegriffen werden. Von diesen Stationen fällt der Station Weissfluhjoch (2540 m) eine Sonderrolle zu: Sie ist der einzige Ort in den Alpen, an welchem seit über 70 Jahren tägliche Schneemessungen durchgeführt werden.

2005/06: Weissfluhjoch lange nicht weiss

Die erste Messperiode war durch sehr spätes Einschneien geprägt. So gab es auf dem Weissfluhjoch erst ab dem 19. No-

vember eine geschlossene, wenn auch nur dünne Schneedecke. In der 70-jährigen Messreihe ist das der zweitspäteste Zeitpunkt. Im Laufe des Winters wurde dieses anfängliche Defizit aber vielerorts mehr als ausgeglichen. Die Ausnahme bildeten die hochalpinen Lagen oberhalb von 2000 Metern. Unterhalb von 1800 Metern gehörte der Winter auf der Alpennordseite dagegen zu den drei schneereichsten der letzten 20 Jahre. Diese touristisch wichtigen Höhenzonen mussten jedoch in den letzten zwei Jahrzehnten

mit klar weniger Schnee auskommen als in den 40 Jahren vor 1988. Auf der Alpensüdseite oberhalb von 1300 Metern setzte sich die Serie der schneearmen Winter fort. Vor den Schneefällen von Ende Januar lagen beispielsweise auf dem Simplon Hospiz (2000 m) nur gerade 20 Zentimeter Schnee, was einen neuen Minusrekord für diese Jahreszeit bedeutet. Im Gegensatz zur Alpennordseite ist hier vor allem der Rückgang der Winter-niederschläge in den letzten Jahren für den Schneemangel verantwortlich. In einem warmen Sommer wie diesem fallen die ohnehin spärlicheren Niederschläge zudem häufig bis in hohe Lagen nicht in Form von Schnee.

2006/07: typisch für die letzten 20 Jahre

Wiederum sehr spätes Einschneien, geringe Schneemengen und sehr frühes Ausapern prägten die zweite Messperiode. Die Schneehöhen erreichten nur selten und für kurze Zeit durchschnittliche Werte. Teilweise wurden neue Minusrekorde gemessen. Für Schlagzeilen sorgten die zum Teil vergeblichen Versuche, die Pisten trotz hohen Dezember-temperaturen mit Kunstschnee einzuschneien, den fehlenden Januarschnee mit Helikoptern einzufliegen (Hahnenkammabfahrt, Kitzbühel), oder der Einsatz von Kunstdünger zur Verfestigung des wenigen Schnees (Lauberhornabfahrt, Wengen). Der Winter 2006/07 gehörte damit unterhalb von 2000 Metern zu den drei schneearmsten der letzten 60 Jahre. Die Schneemenge am 1. Mai war oberhalb von 2000 Metern so gering wie seit 1949 nicht mehr. Das Weissfluhjoch war am 12. Juni bereits schneefrei (Abb. 3), ein früherer Zeitpunkt mit solchen Verhältnissen gab es nur im Hitzesommer 1947 (3. Juni). Das resultierende Schneedefizit vermochte auch der über-

Foto: Emanuel Ammon



Untersuchung der Schneedecke im Versuchsfeld Weissfluhjoch oberhalb Davos.

Foto: F. Funk-Salamì



durchschnittlich nasse, aber temperaturmässig normale Sommer 2007 nicht mehr aufzubessern, sodass Gletscher und Permafrost früh ohne die schützende Schneedecke auskommen mussten.

Gletscher

Die Messresultate der Schweizer Gletscher während der beiden Berichtsperioden spiegeln nicht nur die langfristigen Veränderungen, sondern zeigen auch die oft unterschätzten grossen Fluktuationen von Jahr zu Jahr auf. Die globalen Erwärmungstendenzen zeigen regional ihre Auswirkungen, sodass sich die Gletscher in den Schweizer Alpen nach wie vor und unvermindert zurückziehen. Diesem allgemeinen und längerfristigen Trend vermögen die kurzfristig durch die normale Variabilität des Klimas verursachten Schwankungen in einzelnen Jahren nichts entgegenzusetzen. Während die vergletscherte Fläche und die Gletscherlängen eher die langfristigen klimatischen Signale wiedergeben, stehen der Schneezuwachs (Niederschlag) und der Eisabtrag (Schmelze) in direkter Beziehung zu den Witterungsverhältnissen während der Messperiode. Die zum Teil seit über 100 Jahren jährlich durch-

geführten Erhebungen an den Schweizer Gletschern belegen diese Zusammenhänge.

Längenänderung: anhaltender Schwund

Die Schweizer Gletscher haben in den Beobachtungsjahren 2005/06 und 2006/07 fast ausnahmslos an Länge eingebüsst. Von den rund 110 jährlich beobachteten Gletschern konnten bei den Erhebungen im Herbst 2006 98 Gletscherzungen besucht und für 92 konnte eine Längenänderung bestimmt werden.

Während sich 90 Gletscher zurückzogen, wurde nur bei zweien eine Zunahme der Länge registriert (vgl. Tab., S. 52). Die gemessenen Maximalbeträge zeigen geringe Vorstösse von 1 bis 3 Metern am Allalingsletscher und Glacier de Cheillon sowie einen Rückzug von über 700 Metern am Surettagletscher.

Im Herbst 2007 konnten dank erneuter starker Ausaperung 95 Zungen besucht und für 91 konnte eine Längenänderung ermittelt werden. Wiederum hatte sich die Mehrheit von 88 Gletschern

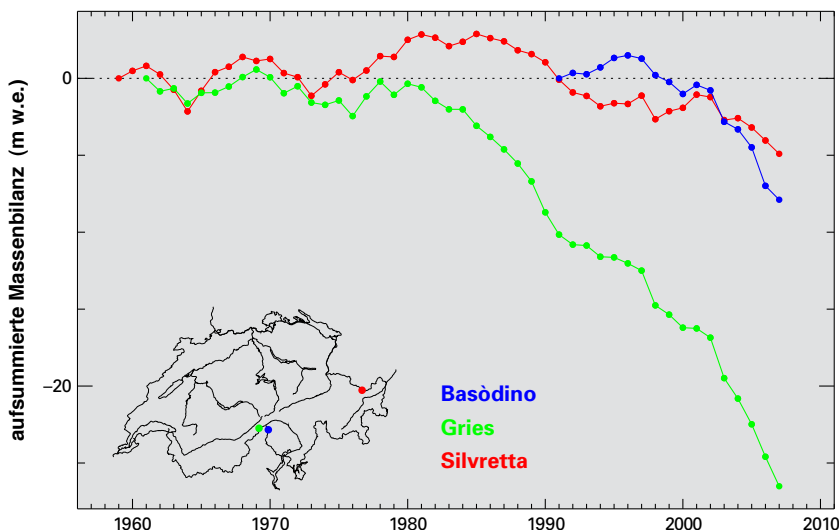


Abb. 4: Aufsummierte mittlere jährliche Massenbilanz (in m Wasseräquivalenten) der Gletscher Basòdino, Gries und Silvretta.



Am Zungenende des Rhonegletschers bilden sich randliche Schmelzwasserseen. Rechts davon Eisgrotte und Belvedere an der Furkapassstrasse.



Foto: A. Bauder

Abdeckungen wie hier auf dem Gurschenfirn können den Eisschwund verlangsamen. Im Vordergrund Messfeld, hinten die Rampe unterhalb der Bergstation der Gemsstockbahn. Unter der Abdeckung sind gut ein Meter weniger Eis abgeschmolzen.

Surettagletscher verliert Zunge

Die extremen Schwundwerte betreffen in einigen Fällen eine mehrjährige Zeitspanne, stammen von grösseren Gletschern oder sind auf lokale Effekte zurückzuführen. So kam die aussergewöhnliche Entwicklung beim Surettagletscher im Rheinwald nicht unerwartet: Die Gletscherzunge liegt in einem steileren Bereich, hat sich über die letzten Jahre stark ausgedünnt, und mehrere Felspartien sind kontinuierlich ausgeapert. Zudem sind Teilbereiche mit Schutt bedeckt, was das ungleichmässige Abschmelzen weiter verstärkt. Denn durchgehende Schuttbedeckung schützt das darunter liegende Eis vor der Sonneneinstrahlung und verringert die Schmelze. Wo die Schuttbedeckung fehlt, wie an den Rändern ausgeaperteter Felsen, setzt die Schmelze am stärksten an. Im vergangenen Sommer hat sich schliesslich ein grosser Bereich der Zunge in einzelne, nicht mehr zusammenhängende Eisreste aufgelöst, und der eigentliche Gletscher rand kam rund 700 Meter weiter hinten und 300 Meter höher zu liegen. Der Vadret da Tiatscha zeigt eine vergleichbare Entwicklung, indem in einer Steilstufe die Gletscherzunge vollständig ab-

getrennt wurde. Die Entstehung von solchen vorgelagerten, losgetrennten und oft schuttbedeckten sogenannten Toteismassen wird wegen des anhaltenden Schwundes in den letzten Jahren vermehrt beobachtet. Eine andere beschleunigte Entwicklung zeigt die Zunge des Vadret da Roseg mit dem vorgelagerten See. Die erhöhte Wärmezufuhr durch den direkten Kontakt mit dem Wasser sowie das Kalben (Aufschwimmen und Losbrechen randlicher Eismassen) beschleunigen den Rückzugsprozess.

«Vorstösse» durch lokale Phänomene

Dass vereinzelte Gletscher vorstossen, erklärt sich meist durch lokale Phänomene an der Zunge. Es handelt sich nicht um einen eigentlichen Gletschervorstoss als Reaktion auf einen im Nährgebiet entstandenen Massenüberschuss, der von vergangener kühlerer und niederschlagsreicherer Witterung herrührt. Vielmehr ist oft Schuttbedeckung auf der Zunge verantwortlich dafür, dass die Schmelze des darunter liegenden Eises lokal verringert wird. Solche Vorstösse, wie am Glacier de Cheillon oder Glacier de Tseudet, werden meist nur in einer einzelnen Messperiode beobachtet, und in den darauffolgenden Perioden setzt sich die Schwundtendenz der früheren Jahre wieder fort. Nachdem im Jahr 2000 der Allalingsgletscher durch einen Eissturz einen grossen Teil der Zunge verloren hatte, konnte der vorhandene Eisnachschub aus dem Nährgebiet die Schmelze am Zungenende kompensieren und sorgte damit für das ausgeglichene Verhalten mit leichter Vorstosstendenz in der Messperiode 2005/06.

zurückgezogen, während sich zwei Gletscherzungen stationär (± 1 m) verhielten und an einer Zunge eine Zunahme festgestellt wurde (vgl. Tab., S. 52). Die registrierten Maximalwerte zeigen einen Rückzug von 127 Metern am Vadret da Roseg, gefolgt von 100 Metern am Gauligletscher und einen kleinen Vorstoss am Glacier de Tseudet. In beiden Perioden liegt die Mehrheit der Messwerte zwischen 0 und -30 Metern.

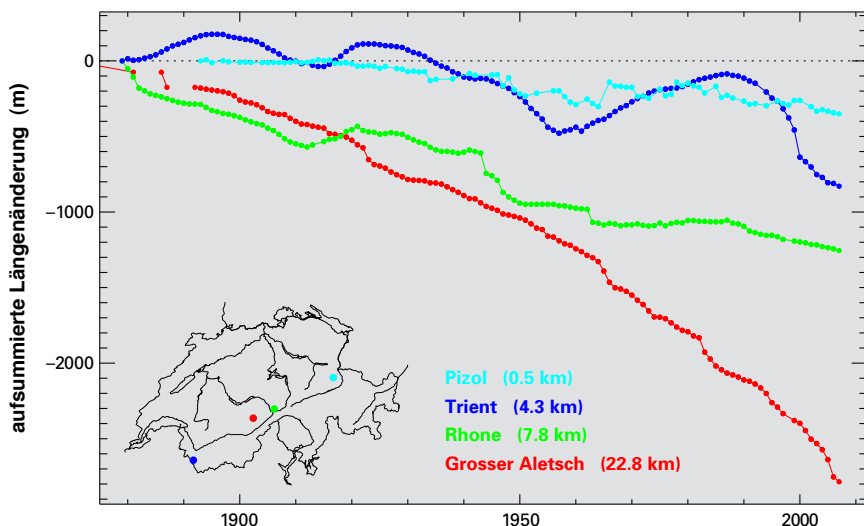


Abb. 5: Aufsummierte jährliche Längenänderungen (in m) für vier ausgewählte Gletscher des Messnetzes mit unterschiedlichem Reaktions- und Anpassungsverhalten auf das Klima.

Längenänderung der Gletscher in den Schweizer Alpen 2005/06 und 2006/07

Gletscher	Kt.	Änderung Länge (m) 2005/06	Änderung Länge (m) 2006/07	Gletscher	Kt.	Änderung Länge (m) 2005/06	Änderung Länge (m) 2006/07
Einzugsgebiet Rhone				Einzugsgebiet Reuss			
Allalin	VS	1,1	-14,3	Tschingel	BE	-6,8	-13,7
Arolla (Mont Collon)	VS	-35	-25	Unteraar	BE	x	x
Bella Tola	VS	n	n	Unterer Grindelwald	BE	x	x
Boveyre	VS	-23	-20	Einzugsgebiet Linth/Limmat			
Breney	VS	-26,2	-36,2	Biferten	GL	-6	n
Brunegg (Turtmann)	VS	n	n	Glärnisch	GL	-7,9	-13,7
Cheillon	VS	2,4	-6,7	Limmern	GL	-2,1	-10,1
Corbassière	VS	-36,2	-17,7	Pizol	SG	-9,1	-6,5
En Darrey	VS	-5,7	-1,3	Plattalva	GL	-16,8	-13,9
Fee (Nord)	VS	-4,4	-5,1	Sulz	GL	-2,1	-6,5
Ferpècle	VS	-33	-16	Einzugsgebiet Rhein			
Fiescher	VS	-14,3	-39,5	Lavaz	GR	x	n
Findelen	VS	-1,9	-12,1	Lenta	GR	-28,8	-36,1
Giétro	VS	-31,3	-21,4	Paradies	GR	-35,2	-5,7
Gorner	VS	n	-17,4	Porchabella	GR	-17	-26,6
Grand Désert	VS	-6,2	-40,6	Punteglias	GR	-3	-7,3
Grand Plan Névé	VD	-8,3	-3,1	Sardona	SG	-22,4	-37
Gries	VS	-50,1	-39,3	Scaletta	GR	-7,4	-19,6
Grosser Aletsch	VS	-114,6	-32,4	Silvretta	GR	-7,4	-10,4
Kaltwasser	VS	-30,4	-22	Suretta	GR	-725	-20
Kessjen	VS	-16,5	-3	Verstankla	GR	-20,7	-20,7
Lang	VS	-16,5	-19	Vorab	GR	-12,1	-24,4
Moiry	VS	-9	-18	Einzugsgebiet Inn			
Moming	VS	n	n	Calderas	GR	-12,2	-19,6
Mont Durand	VS	-19,6	-17	Lischana	GR	-4,8	n
Mont Fort (Tortin)	VS	-30,4	-3,2	Morteratsch	GR	-32,7	-19,3
Mont Miné	VS	-23	-10	Roseg	GR	-27,3	-127,3
Mutt	VS	-30	-9,4	Sesvenna	GR	-20,7 ²	-10,2
Oberaletsch	VS	x	-5,7 ²	Tiatscha	GR	-249,5 ⁶	-12,4
Otemma	VS	-99,8	-61	Tschierva	GR	-54,8	-51,4
Paneyrosse	VD	-4,2 ²	-1,7	Einzugsgebiet Adda			
Prapio	VD	x	-5 ²	Albigna	GR	n	n
Rhone	VS	-7,6	-11,6	Cambrena	GR	-20	-33,3
Ried	VS	-16,7	-9,1	Forno	GR	-23,7	-30,8
Saleina	VS	-15	-24	Palü	GR	-37 ²	-27
Schwarzberg	VS	-11	-11	Paradisino (Campo)	GR	-38	-2
Sex Rouge	VD	-1,5	-0,6	Einzugsgebiet Tessin			
Trient	VS	-5	-18	Basöдино	TI	-10,9	-29,8
Tsanfleuron	VS	n	n	Bresciana	TI	-13,8	-26,1
Tseudet	VS	n	7 ²	Cavagnoli	TI	-17,3	-16,5
Tsidjiore Nouve	VS	-40	-18	Corno	TI	-4,8	-8,4
Turtmann	VS	n	n	Croslina	TI	-9,5	-3,2
Valsorey	VS	n	-51 ²	Rossboden	VS	n	x
Zinal	VS	-6,7	-15	Val Torta	TI	-13,8	-4,2
Einzugsgebiet Aare				Valleggia	TI	-5,1	-6
Alpetli (Kanderfirn)	BE	-23	-25	Einzugsgebiet Tessin			
Ammerten	BE	-2,6	-0,8	Basöдино	TI	-10,9	-29,8
Blüemlisalp	BE	-35	-31,3	Bresciana	TI	-13,8	-26,1
Dungel	BE	-2	-5	Cavagnoli	TI	-17,3	-16,5
Eiger	BE	-20,5	n	Corno	TI	-4,8	-8,4
Gamchi	BE	-11,8	-18,3	Croslina	TI	-9,5	-3,2
Gauli	BE	-78	-100	Rossboden	VS	n	x
Gelten	BE	-5,1 ³	-14	Val Torta	TI	-13,8	-4,2
Lämmern	VS	-9	-41,1	Valleggia	TI	-5,1	-6
Oberaar	BE	x	x	Einzugsgebiet Tessin			
Oberer Grindelwald	BE	x	n	Basöдино	TI	-10,9	-29,8
Rätzli	BE	n	n	Bresciana	TI	-13,8	-26,1
Schwarz	VS	-3,1	x	Cavagnoli	TI	-17,3	-16,5
Stein	BE	-45	-14	Corno	TI	-4,8	-8,4
Steinlimmi	BE	-27	-14	Croslina	TI	-9,5	-3,2
Trift (Gadmen)	BE	-67,4	-71	Rossboden	VS	n	x

Abkürzungen
n = nicht beobachtet
x = Betrag nicht bestimmt
st = stationär (+/-1 m)

Bemerkung
 Gilt die Angabe für eine mehrjährige Zeitspanne, so zeigt die hochgestellte Zahl die Anzahl der Jahre an, Beispiel: Gelten -5,1³ = Schwund um 5,1 m in drei Jahren

Massenhaushalt: Ausdünnung geht weiter

Detaillierte Erhebungen des Massenhaushalts, der Bilanz zwischen Schneezuwachs und Eisabtrag, werden an den drei Gletschern Basöдино, Gries und Silvretta durchgeführt. Zusätzlich zu den umfassenden Untersuchungen an den drei Gletschern werden jeweils einzelne punktuelle Messungen der Massenänderung am Jungfraufirn, Claridenfirn, Glacier du Giétro, Glacier de Corbassière sowie an den Gletschern im Mattmarkgebiet vorgenommen. Im Frühjahr wird dazu mit Schneeschächten und Schneehöhensondierungen die Schneeakkumulation während des Winters ermittelt. Im folgenden Herbst bestimmt man mithilfe von Messstangen, die ins Gletschereis eingbohrt wurden, die während des Sommers erfolgte Schmelze. Für eine positive Massenbilanz ist in erster Linie eine späte Ausaperung in Verbindung mit einem kühlen und niederschlagsreichen Sommer notwendig. Im Gegensatz dazu führen schneearme Winter, gepaart mit warmen, strahlungsreichen Sommern, zu grossen Massenverlusten.



Foto: Bruno Peroni

In Anbetracht der Witterung während der beiden Beobachtungsperioden erstaunt es nicht, dass alle drei detailliert vermessenen Gletscher erheblich an Masse eingebüsst haben. Die Werte der mittleren spezifischen Massenbilanz in Meter Wasseräquivalent betragen in der Periode 2005/06 –2,5 Meter am Basòdino, –2,1 Meter am Gries und –0,8 Meter am Silvretta beziehungsweise –0,9 Meter, –1,9 Meter und –0,9 Meter in der Periode 2006/07 (vgl. Abb. 4).

Während in der ersten Messperiode beim Ghiacciaio del Basòdino im hinteren Maggiatal der Maximalschwund von 2003 sogar übertroffen wurde, ordnen sich der Verlust beim Griesgletscher im Nufenengebiet und beim Silvrettagletscher im hinteren Prättigau nach 2003 und 1998 an dritter Stelle innerhalb der letzten zehn Jahre ein. Die Massenverluste in der zweiten Beobachtungsperiode fallen am Gries- und Silvrettagletscher etwa gleich hoch aus wie in der vorangegangenen Periode. Beim Ghiacciaio del Basòdino dagegen ist die Einbusse deutlich geringer. Im langjährigen Vergleich

liegen die Resultate an vierter Stelle hinter den grössten Schwundjahren 2002/03, 2005/06 und 1997/98 in der jeweiligen Messreihe.

Die Resultate in den beiden Messperioden sind im Unterschied zu 2003 vor allem auf geringe Winterniederschläge zurückzuführen. Während in der ersten Periode der warme Sommer 2006 mitverantwortlich war, konnten in der zweiten Periode die relativ moderaten Schmelzbedingungen während des Sommers 2007 die negative Bilanz auch nicht verhindern.

Mangelnder Eisdruck führt zu Felsstürzen

Viel Beachtung in der Öffentlichkeit hat im Sommer 2006 der Untere Grindelwaldgletscher wegen des drohenden Felssturzes an der Gletscherzunge gefunden. Die Gletscheroberfläche ist an der Zunge seit 1860 um rund 200 Meter abgesunken. Wegen des nun fehlenden Eisdrucks ist eine an der Ostseite des Eiger-

massivs gelegene zwei Millionen Kubikmeter grosse Felsmasse instabil geworden. Diese bewegte sich mit bis zu 75 Zentimetern pro Tag in den Gletscher hinein. Die laufend abbröckelnden Teile bedecken das in einer Talverengung liegende Zungenende mit Geröll. Das weitere Abschmelzen des darunter liegenden Eises wird durch diese Schuttbedeckung stark reduziert. Gletscheraufwärts sinkt die Oberfläche um sechs bis zehn Meter pro Jahr ab, und in der Senke hat sich ein Gletschersee gebildet. Findet das Wasser einen Ausfluss durch den Gletscher, entleert sich der Gletschersee sehr schnell. Es wird erwartet, dass sich der See in Zukunft rasch vergrössern wird und im darunter liegenden Lütschental mit Hochwassern zu rechnen ist.

Permafrost

Permafrost ist Untergrundmaterial, das während des gesamten Jahres eine Temperatur unter 0 °C aufweist. Er ist in den

Zwei Millionen Kubikmeter Fels stürzten im Sommer 06 von der Eigerostflanke auf den Unteren Grindelwaldgletscher. Die Instabilität war eine Folge des Gletscherschwundes.



Schuttbedeckte Zunge des Unteren Grindelwaldgletschers mit Schmelzwasserseen und Felsablagerung unterhalb der instabilen Felsmasse bei der Verengung zur Gletscherschlucht. Blick durch die Gletscherschlucht nach Grindelwald. Rechts oben die neue Bäregghütte.



Foto: M. Funk



Foto: J. Nötzli

Da kein Gletscher mehr Druck erzeugt, ist die Ostflanke weiterhin felssturzgefährdet.



Foto: S. Gruber

Auslesen von Standorten für Felstemperaturmessungen mit dem Laptop nahe der Fuorcla Surlej, Oberengadin.

Alpen oberhalb der Waldgrenze weitverbreitet und existiert verborgen in Schutthalden, Felswänden und ganzen Gipfelregionen. Seine Beobachtung ist aus verschiedenen Gründen wichtig: So erfordert zum Beispiel das Bauen von Infrastruktur wie Seilbahnstationen oder Lawinenverbauungen auf Permafrost spezielle Anpassungen. Weiter können Felsstürze oder Murgänge mit Permafrost verknüpft sein, und in Bohrlöchern gemessene Temperaturen liefern Informationen über Klimaveränderungen. Zur Beobachtung von Permafrost und seiner Veränderungen werden an verschiedenen hochalpinen Standorten Oberflächen- und Bohrlochtemperaturen gemessen. Zusätzlich werden an rund einem Dutzend Blockgletschern, einer besonderen Form des Permafrosts, mittels fotogrammetrischer Analyse von Luftbildern und Vermessung vor Ort die Kriechbewegungen erhoben.

Nach sechsjähriger Pilotphase ist Permafrost Monitoring Switzerland (PERMOS) im Jahr 2007 in den definitiven Betrieb übergegangen. Im letzten September wurde das 20-Jahre-Jubiläum der ersten wissenschaftlichen Permafrostbohrung in den Alpen gefeiert, die

im Jahr 1987 auf dem Blockgletscher Murtèl-Corvatsch im Oberengadin realisiert wurde und von der die längste Datenreihe von Permafrosttemperaturen im Gebirge stammt. Im vorliegenden Artikel präsentieren wir in erster Linie Messdaten von diesem Standort.

Einfluss der Witterung auf den Permafrost

Die Permafrosttemperaturen werden durch die Oberflächentemperaturen, die Topografie und Untergrundeigenschaf-

ten bestimmt. Im Wesentlichen reagiert der Permafrost auf Faktoren, die die Oberflächentemperatur beeinflussen. Zentral sind dabei Zeitpunkt, Dicke und Dauer der Schneedecke: Ist die Schneedecke früh dick genug, um zu isolieren, bleiben die hohen Sommertemperaturen im Untergrund gespeichert. Kommt der Schnee hingegen erst spät und nur spärlich wie in der zweiten Berichtsperiode, kann die Winterkälte den Untergrund auskühlen. Während der schneefreien Zeit (ca. Mai–September) sowie in steilen Felspartien sind vor allem Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung bestimmend. An flachen Stellen mit Schutt oder groben Blöcken zeigen die Oberflächentemperaturen den gemeinsamen Einfluss von Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Schneedecke und möglicher Luftzirkulation in Hohlräumen.

Oberflächentemperaturen: in der Eiger-Nordwand bereits im April positiv

In den Schweizer Alpen messen über 100 Sensoren rund alle zwei Stunden die Oberflächentemperaturen. Sie ergänzen die Temperaturmessungen in den Bohrlöchern und sind in einem weiten Umkreis der Bohrung an verschiedenen charakteristischen Orten im stark inhomogenen Hochgebirgsgelände platziert: in Schutthalden, Blockgletschern und flachen bis beinahe senkrechten Felspartien. Die lange Periode mit überdurchschnittlich hohen Lufttemperaturen vom Sommer 2006 bis zum Frühling 2007 ist in den Messdaten aus steilem, schneefreiem

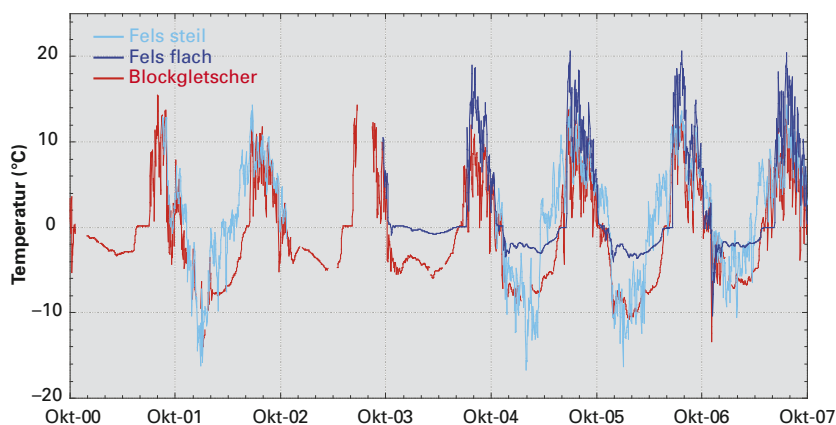
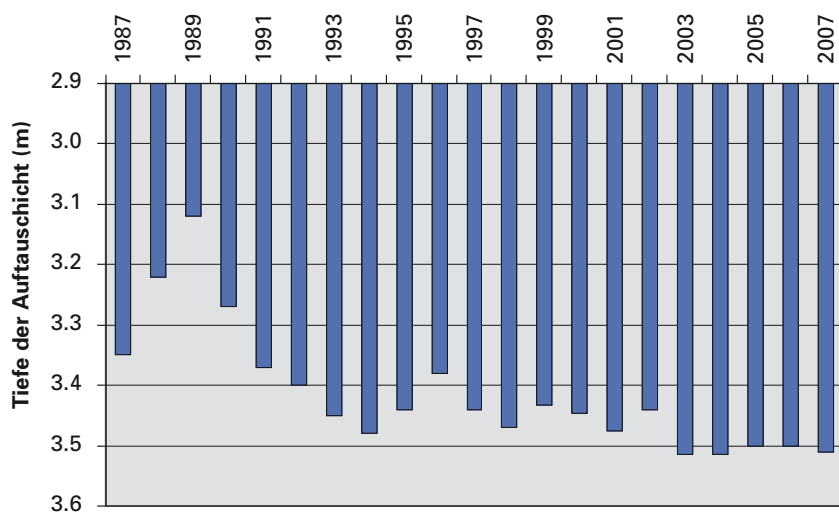


Abb. 6: Vergleich von täglichen Mitteln der Oberflächentemperaturen gemessen im steilen und flachen Fels sowie auf einem Blockgletscher. Alle drei Messstandorte befinden sich bei Murtèl-Corvatsch.

Fels deutlich sichtbar (Abb. 6). So wurden zum Beispiel in der Eiger-Nordwand auf 2800 Metern bereits in der zweiten Hälfte des Aprils während mehrerer Wochen durchwegs positive Temperaturen gemessen. Messungen im flachen Fels oder auf Blockgletschern zeigen zusätzlich den Einfluss des schneearmen Winters 2006/07: Durch die späte und geringe Winterschneedecke war der Boden schlecht gegen die Winterkälte isoliert. Der Winter 2006/07 war allerdings sehr mild und weniger kalt als im Jahr zuvor, sodass der Boden nicht so stark abkühlte.

Nachdem der Jahrhundertssommer 2003 die Oberflächentemperaturen an allen Messstandorten in den Alpen um ca. 2 bis 3 °C anhub, sanken die Messwerte bereits 2004 wieder auf das Niveau des zehnjährigen Durchschnitts. In der Berichtsperiode sind die Oberflächentemperaturen wieder leicht angestiegen, sind aber noch etwa 1 °C niedriger als in der Periode 2002/03.

Abb. 7: Tiefen der Auftauschicht für das Bohrloch im Blockgletscher Murtèl-Corvatsch von 1987 bis 2007.



Untergrundtemperaturen: zeigen die langfristige Entwicklung

Die oberflächennahe Schicht, die im Sommer positive Temperaturen aufweist, heisst Auftauschicht. Ihre Mächtigkeit ist vor allem von den Sommertemperaturen beeinflusst und stellt ein unverzögertes Klimasignal dar, ähnlich wie die Massenbilanz der Gletscher. Der absolute Messwert hängt allerdings stark von den Untergrundeigenschaften am Messstandort ab: Eis kann das Weiterleiten der oberflächlichen Veränderungen verlangsamen, da Energie gebraucht wird, um Eis in Wasser umzuwandeln. Zirkuliert dagegen Wasser, kann in tiefere Zonen transportierte Wärme den Veränderungsprozess beschleunigen: Während im eisreichen Permafrost am Murtèl-Corvatsch die Marke vom Sommer 2003 (3,5 m) auch in den folgenden Sommern (2007: 3,5 m) fast erreicht wurde (Abb. 7), blieben die neun Meter vom Sommer 2003 im eisarmen Permafrost auf dem Schilthorn unerreicht. Im Messjahr 2006/07 wurden hier – wie vor und nach dem extremen Sommer 2003 – generell durch-

schnittliche Werte für die Mächtigkeit der Auftauschicht gemessen (2007: 4,5 m).

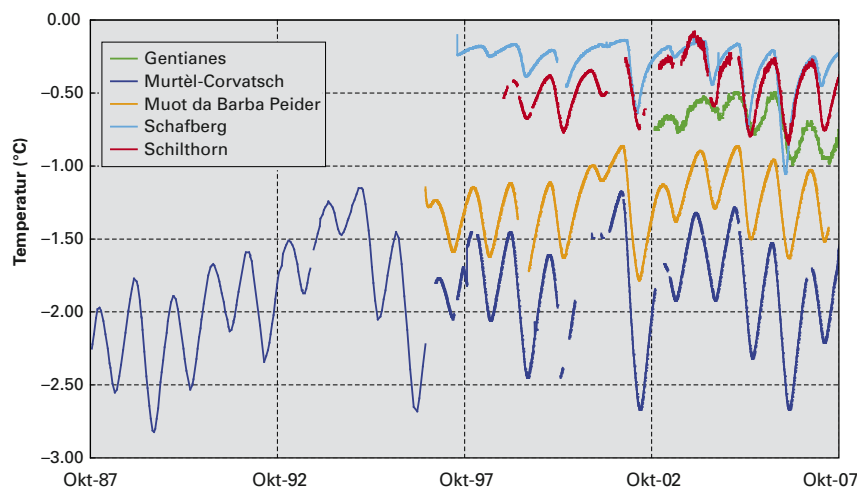
Die saisonale Entwicklung der Permafrosttemperaturen wird in rund zehn Metern Tiefe beobachtet und zwischen verschiedenen Standorten verglichen (Abb. 8). Die Oberflächenschwankungen kommen hier abgeschwächt und rund ein halbes Jahr zeitverzögert an. Die Witterung im Berichtsjahr bewirkt im Sommer in den meisten Bohrlochern ähnliche Temperaturen wie in den vorangegangenen Jahren, jedoch mit deutlich weniger tiefen Temperaturen im Winter als im Jahr zuvor. Der Einfluss des schneearmen und milden Winters 2006/07 ist in der Messreihe des Blockgletschers Murtèl-Corvatsch deutlich sichtbar.

Temperaturen aus noch grösserer Tiefe eignen sich in erster Linie zur Beobachtung von langfristigen Trends. Jahreszeitliche Schwankungen sind nur bis in eine Tiefe von 15 bis 20 Metern messbar und werden weiter unten herausgefiltert. Temperaturen in der Tiefe reagieren nur langsam und verzögert auf Veränderungen an der Oberfläche. So dauert es beispielsweise über zehn Jahre, bis ein Oberflächensignal eine Tiefe von 100 Metern erreicht hat.

Kriechbewegungen

Blockgletscher bestehen aus eisdurchdrungenen Schuttmassen im Permafrostgebiet, die sich mit wenigen Dezimetern pro Jahr Richtung Tal bewegen. Seit den 1990er-Jahren wurde in verschiedenen Studien eine zunehmende Kriechgeschwindigkeit von Blockgletscher-Oberflächen im Alpenraum fest-

Abb. 8: Bohrlochtemperaturen in einer Tiefe von rund zehn Metern in sechs ausgewählten Bohrlochern in den Schweizer Alpen.



Zusätzliche Daten auf dem Web

Viele der hier vorgestellten Messresultate sowie die langjährigen Datensätze sind auf den Websites des SLF (www.slf.ch), des Schweizerischen Gletschermessnetzes (www.glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers) und von Permafrost Monitoring Switzerland (PERMOS) (www.permos.ch) grafisch aufbereitet und frei zugänglich. Neben den regelmässig erscheinenden Berichten und Medienmitteilungen finden sich auf diesen Sites auch weitere Informationen und Analysen.²

gestellt. Erste Auswertungen zeigen auch für die Berichtsperiode und den Blockgletscher Murtèl-Corvatsch solche Veränderungen. Dies deutet darauf hin, dass die hohen Temperaturen des letzten Jahrzehnts den Scherhorizont in ca. 30 Meter Tiefe, wo sich der Blockgletscher gegenüber dem Untergrund hauptsächlich bewegt, erreicht haben könnten.

Veränderung der Kryosphäre

Die präsentierten Messresultate aus den drei Bereichen der alpinen Kryosphäre im Schweizer Hochgebirge helfen, die komplexen Vorgänge aufzuzeigen, und illustrieren, wie unterschiedlich sie auf

**Zunge des Gauligletschers:
Die erhöhte Wärmezufuhr
durch den direkten Wasser-
kontakt sowie das Kalben
beschleunigen den Rückzug.**

klimatische Veränderungen reagieren. Die Lufttemperaturen im Winter sind massgebend für die Mächtigkeit und Dauer der Schneedecke. Wenn kein oder nur wenig Schnee liegt, beeinflussen die Lufttemperaturen auch die oberflächennahen Untergrundtemperaturen. Die Schmelze im Sommer auf den Gletschern ist in erster Linie das Resultat der Strahlungsbedingungen und nicht direkt von den vorherrschenden Lufttemperaturen. Weiter hat die zeitliche Entwicklung und Ausdehnung der Schneedecke ganz unterschiedliche Auswirkungen auf Gletscher und Permafrost. Während für die Gletscher hauptsächlich der am Ende des Winters vorhandene Schnee zählt, sind die Zeitpunkte des Einschneiens und der Ausaperung von zentraler Bedeutung für die Entwicklung des Permafrosts.

Zusammenfassend zeigt sich folgendes Bild: In den für Gletscher und Permafrost massgebenden Höhenzonen oberhalb von 2000 Metern sind die Wintertemperaturen trotz Erwärmung bis jetzt noch genügend tief, dass sich keine klaren Veränderungen der Schneedecke feststellen lassen. Die globale Erwärmung zeichnet sich hingegen in den schwindenden Eismassen der seit über einem Jahrhundert vermessenen Gletscher bereits deutlich ab. Die Permafrost-Messreihen sind noch zu kurz, als dass bereits eindeutige Resultate dieses langfristigen Prozesses zu sehen wären.

Der starke und anhaltende Schwund der Gletscher über die letzten Jahre er-

schwert die Messungen vielerorts. Einige Gletscherzungen haben sich in steiles und unzugängliches Gelände zurückgezogen, bei anderen lässt sich das Gletscherende unter der zunehmend dicker werdenden Schuttbedeckung nur schwer auffinden.

Die Schneebedeckung und die Ausdehnung der Gletscher sind nicht nur für die touristische Nutzung, sondern auch als Wasserspeicher von Bedeutung. Permafrost spielt insbesondere beim Bauen und für die Felsstabilität eine Rolle. Alle drei Formen der alpinen Kryosphäre sind im Zusammenhang mit Naturgefahren von Interesse im Schweizer Alpenraum. ▲

Andreas Bauder (ETH Zürich),
Christoph Marty (SLF Davos) und
Jeannette Nötzli (Uni Zürich)

² Schneedaten werden vom SLF und von Meteo-Schweiz im Rahmen ihrer Aufgaben erhoben. Die langfristigen Beobachtungen der Gletscher in den Schweizer Alpen sind ohne die tatkräftige und langjährige Unterstützung durch viele freiwillige Helfer undenkbar. Ein besonderer Dank gilt allen mitwirkenden Privatpersonen, Angehörigen der Forstdienste in den Gebirgskantonen, der Kraftwerke Aegina, Mattmark und Mauvoisin sowie den Mitarbeitern von Bundesämtern und der ETH Zürich. Die Messdaten der Permafrostbeobachtungen werden durch die Universitäten Bern, Fribourg, Lausanne und Zürich sowie die ETH Zürich und das SLF aufgenommen und zur Verfügung gestellt. Die Kryosphärenmessnetze profitieren von der finanziellen Unterstützung durch die SCNAT, das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Meteo-Schweiz.



Foto: R. Straub