

**Delegierter für Permafrost:**

Dr. Daniel Vonder Mühll, Universitäten Basel und Zürich  
Petergraben 35/3, Postfach; CH-4051 Basel,  
Tel.: +41(0)61 267 09 03, Fax: +41(0)61 267 12 39  
M@il: Daniel.VonderMuehll@UniBas.ch

Dezember 2001

**Dieses Dokument kann in farbiger pdf-Version im Internet bezogen werden:**  
<http://www.unibas.ch/vr-forschung/PERMOS>

## **Permafrost Monitoring Switzerland PERMOS**

### **1. Jahresbericht 1999/2000**

D. Vonder Mühll, R. Delaloye, W. Haeberli, M. Hölzle, B. Krummenacher  
mit Beiträgen von

L. Arenson, A. Bauder, H. Bösch, St. Harvey, E. Herren, M. Imhof, A. Kääh,  
C. Lambiel, D. Mihajlovic, M. Phillips, E. Reynard, S. Springman, Th. Stucki

## **Zusammenfassung**

Der vorliegende Bericht dokumentiert erstmals die in der Schweiz regelmässig erhobenen Daten zur Entwicklung des alpinen Permafrostes. Bei der für das Jahr charakteristischen Witterung spielt hinsichtlich des gefrorenen Untergrundes vor allem der Auf- und Abbau der Schneedecke eine wichtige Rolle. Was den Permafrost selbst anbetrifft, geben Bohrlöcher, Oberflächensondierungen und Luftbilder die beste Information. Speziell die Bohrlochtemperaturen erlauben es, einzelne Jahre auch mit längerfristigen Trends zu vergleichen. Insgesamt kann man aufgrund der Ergebnisse eines soeben abgelaufenen europäischen Programms davon ausgehen, dass die Permafrosttemperaturen im Gebirge mit ähnlicher Geschwindigkeit ansteigen wie die Lufttemperaturen. Die bisher längste Serie von Bohrlochtemperaturen in der Schweiz (Murtèl-Corvatsch, seit 1987) bestätigen diesen Trend auch für die letzten Jahre. Der Einfluss des Schnees macht jedoch die Beziehungen zwischen Atmosphäre und Untergrund komplex und schwer voraussehbar. Mit der hier vorgestellten Information soll eine Diskussionsbasis geschaffen werden, damit nach Abschluss der Pilotphase ein langfristig aufrecht zu erhaltendes Monitoring-Projekt für Permafrost in den Schweizer Alpen entwickelt werden kann.

Das Beobachtungsjahr 1999/2000 ist im soweit möglichen Vergleich ein anhaltend warmes, für die letzte Dekade jedoch wahrscheinlich ein durchschnittliches Jahr.

# Inhaltverzeichnis

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Zusammenfassung .....                                                        | 1  |
| Inhaltverzeichnis .....                                                      | 2  |
| Einleitende Bemerkung .....                                                  | 4  |
| 1 Permafrost.....                                                            | 4  |
| 1.1 Allgemeines .....                                                        | 4  |
| 1.2 Verbreitung des Permafrostes in den Alpen.....                           | 4  |
| 1.3 Blockgletscher .....                                                     | 5  |
| 1.4 Ausaperungsprozesse sowie hydrologische Bedeutung des Permafrostes ..... | 5  |
| 1.5 Untersuchungsmethoden im Permafrost.....                                 | 5  |
| 2 PERMOS - Allgemeines.....                                                  | 6  |
| 2.1 Einführung.....                                                          | 6  |
| 2.2 Zielsetzungen.....                                                       | 6  |
| 2.3 Messungen – Luftbildaufnahmen.....                                       | 7  |
| 2.4 Organisation.....                                                        | 7  |
| 2.5 Finanzen.....                                                            | 8  |
| 2.6 Aktivitäten im Berichtsjahr Oktober 1999 - September 2000 .....          | 8  |
| 3 Klima und Witterung.....                                                   | 9  |
| 3.1 Allgemeines .....                                                        | 9  |
| 3.2 Überblick über das hydrologische Jahr 1999/2000 .....                    | 10 |
| 3.3 Schnee.....                                                              | 11 |
| 3.3.1 Bedeutung des Schnees für den Permafrost.....                          | 11 |
| 3.3.2 Einschneiphase im Herbst und Frühwinter .....                          | 11 |
| 3.3.3 Mächtigkeit der winterlichen Schneedecke .....                         | 14 |
| 3.3.4 Verlauf der Ausaperung im Frühling und Frühsommer.....                 | 14 |
| 3.3.5 Schnee im Beobachtungsjahr 1999/2000.....                              | 16 |
| 4 Bohrlochtemperaturen.....                                                  | 17 |
| 4.1 Allgemeines .....                                                        | 17 |
| 4.2 Temperatur- und Mächtigkeitsmessungen der Auftauschicht .....            | 18 |
| 4.2.1 Allgemeines .....                                                      | 18 |
| 4.2.2 Messungen Murtèl-Corvatsch 1987 bis 2000 .....                         | 19 |
| 4.2.3 Bedeutung der Auftauschicht aus geotechnischer Sicht.....              | 20 |
| 4.3 Temperaturentwicklung im Permafrost.....                                 | 22 |
| 4.3.1 Allgemeines .....                                                      | 22 |
| 4.3.2 Bohrloch 2/1987 Murtèl-Corvatsch.....                                  | 23 |

|     |                                                                             |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4 | Deformationsmessungen im Permafrost.....                                    | 25 |
| 4.5 | Bohrlochtemperaturen im Beobachtungsjahr 1999/2000 .....                    | 26 |
| 5   | BTS-Gebiete .....                                                           | 26 |
| 5.1 | Allgemeines .....                                                           | 26 |
| 5.2 | Jährlich wiederholte BTS-Messungen im Gebiet Alpage de Mille 1996-2001..... | 27 |
| 5.3 | BTS-Messungen im Beobachtungsjahr 1999/2000 .....                           | 29 |
| 6   | Luftbildflüge.....                                                          | 30 |
| 7   | Schlussfolgerungen.....                                                     | 30 |
| 8   | Literatur .....                                                             | 31 |

# Einleitende Bemerkung

Der vorliegende Bericht ist die erste systematische Zusammenstellung von Messungen zur Beschreibung des Zustandes über den Permafrost in den Schweizer Alpen. Er entstand nach langjährigen Vorbereitungs- und Überzeugungsarbeiten. Letztlich verabschiedeten die Permafrostkoordinationsgruppe der SANW und die Glaziologische Kommission (GK) der SANW ein Konzept sowie einen ausführlichen Anhang für eine 3-jährige Pilotphase 2001 – 2003 des Permafrost Monitoring Switzerland.

Quasi als Vorbericht für die Berichterstattung der eigentlichen Pilotphase werden hiermit die verschiedenen unterschiedlich lange betriebenen Messreihen exemplarisch vorgestellt. Es werden auch grundsätzliche Sachverhalte und allgemeine Erwägungen aufgegriffen. Im Anhang sind sämtliche Erhebungen, die durch die GK der SANW unterstützt wurden, zusammengefasst. Er ist auch bewusst individuell und zweisprachig (deutsch/französisch) gehalten. Die Form des Berichtes verstehen wir als erste Version, welche sich im Laufe der Pilotphase entwickeln darf. Dementsprechend ist das Layout einfach gehalten. Die Verteilung von schwarz-weissen Hardcopies beschränkt sich auf die Mitglieder der GK, den Sponsoren sowie je ein Exemplar für jede betragende Institution. Der Bericht wie auch der Anhang stehen in farbiger Version ausserdem als pdf-File auf dem Internet zur Verfügung: <http://www.unibas.ch/vr-forschung/PERMOS>

## 1 Permafrost

### 1.1 Allgemeines

Dauernd gefrorener Boden, so die wörtliche Übersetzung von „Permafrost“, ist vor allem aus Sibirien und Alaska bekannt. In den Alpen wird dieses Temperaturphänomen seit den 1970er Jahren intensiver untersucht. Vereinfacht lässt sich die Entstehung des Permafrostes wie folgt erklären: Wird die während des Winters im Boden gespeicherte Kälte im Sommer nicht vollständig ausgeglichen, bleiben die Temperaturen unterhalb einer bestimmten Tiefe, dem sogenannten Permafrostspiegel, das ganze Jahr hindurch kälter als 0°C. Nur im obersten Teil, in der Auftauschicht, steigen die Werte im Sommer über den Gefrierpunkt. Darunter – und somit nicht direkt sichtbar – befindet sich der eigentliche Permafrost. Zwar steigt die Temperatur mit zunehmender Tiefe aufgrund des Erdwärmeflusses an; positive Werte werden jedoch erst wieder in der Tiefe der Permafrostbasis erreicht.

Permafrost ist in erster Linie über die Temperatur definiert. Das Eis im Permafrost, das sich aus unterkühltem Wasser bildet, ist lediglich eine Folgeerscheinung. Dementsprechend gibt es auch trockenen Permafrost, welcher kaum Eis enthält.

### 1.2 Verbreitung des Permafrostes in den Alpen

Generell muss bereits oberhalb der Waldgrenze mit Permafrost gerechnet werden. Neben der mittleren jährlichen Lufttemperatur bestimmt vor allem die einfallende Strahlung die Verbreitung von Permafrost. An nordexponierten Hängen tritt Permafrost deshalb in tieferen Höhenlagen auf als an südexponierten Hängen. Weitere massgebliche Faktoren sind Niederschlag (Schnee), Oberflächenbeschaffenheit und Wasserangebot.

### 1.3 Blockgletscher

Permafrost erkennt man besonders gut, wenn er sich im Lockermaterial gebildet hat, das vom Eis in den Porenräumen auseinandergedrückt wird. Oft wird dadurch der Porenraum zusätzlich vergrössert, und man spricht von eisübersättigtem Material. Für die Eigenschaften eines solchen Schutt-Eis-Gemisches spielt das Eis eine wichtige Rolle. Bei geneigter Topographie beginnt der Permafrost allmählich talwärts zu kriechen und bildet charakteristische lavastrom-ähnliche Formen. Diese werden Blockgletscher genannt, auch wenn sie weder ihre Entstehung noch ihr Verhalten mit Gletschern gemein haben.

Blockgletscher sind typischerweise einige hundert Meter lang; ihre Oberfläche ist mit grobem Schutt bedeckt. Sie bewegen sich mit einigen Dezimetern pro Jahr. Da diese Geschwindigkeiten zum Rand hin meist abnehmen, entstehen typische Fliessmuster. Die Stirn und die seitlichen Ränder sind oft sehr steil (bis 40°) und von grossen, groben Blöcken bedeckt. Diese fallen gelegentlich hinunter und lagern sich als sogenannte Schürze unten an. Dazwischen entsteht eine Zone aus Feinmaterial, in welcher sich bei inaktiven Blockgletschern erste Vegetation bilden kann. Fossile Blockgletscher enthalten zumeist kein Eis mehr, sind entsprechend zusammengefallen und stark bewachsen.

### 1.4 Ausaperungsprozesse sowie hydrologische Bedeutung des Permafrostes

In gefrorenem Lockerschutt wird die Hydrologie durch den praktisch undurchlässigen Permafrostkörper wesentlich beeinflusst. Weiter bestehen Wechselwirkungen zwischen dem Permafrost und der Ausaperung. So findet die Schneeschmelze in Permafrostgebieten etwa 15 bis 20 Tage später statt. Felduntersuchungen haben ergeben, dass sich der Permafrost hauptsächlich auf jene Bereiche beschränkt, die relativ wenig Direktstrahlung erhalten.

Die Schneeschmelze setzt im Frühjahr jeweils zu verschiedenen Zeitpunkten ein und verläuft unterschiedlich schnell. Dennoch gleicht sich das Muster der Ausaperung jedes Jahr stark. Es wird nämlich hauptsächlich durch Geländewölbung, Windverfrachtung, Strahlung und die Bodentemperaturen (Permafrost!) bestimmt. Umgekehrt erlaubt das Verfolgen der Ausaperung in Kombination mit der Strahlung Rückschlüsse auf die Permafrostverbreitung.

Die Hydrologie wird durch die tiefen Temperaturen (meist ein Jahresmittel von ca. -1°C), die spärliche Vegetation und den Permafrost geprägt. Charakteristisch ist die markante Saisonalität der hydrologischen Prozesse. Die Abflüsse besitzen ein nival geprägtes Regime mit kleinen Abflüssen im Winter und – infolge der Schneeschmelze – grossen Abflussmengen zwischen Mai und August.

### 1.5 Untersuchungsmethoden im Permafrost

Um die Zielsetzungen des Permafrostmonitoring in der Schweiz zu erreichen (vgl. Kapitel 2.2) werden folgende Beobachtungsergebnisse einbezogen und hauptsächliche Untersuchungsmethoden angewendet:

- Witterung im hydrologischen Jahr (Kapitel 3.2)
- Schneebeobachtungen (Kapitel 3.3)
  - Einschneiphase im Herbst
  - Verlauf der Ausaperung
  - Mächtigkeit der winterliche Schneedecke

- Bohrlochtemperaturen (Kapitel 4)
  - Temperatur- und Mächtigkeitsmessung der Auftauschicht
  - Temperaturbestimmung im ganzen Bohrloch
  - Deformationsmessungen im Bohrloch
- BTS-Messungen (Kapitel 5)
  - Verteilungsmuster der winterlichen Temperaturen in Kombination mit ganzjährigen Miniloggertemperaturen.

## 2 PERMOS - Allgemeines

### 2.1 Einführung

Die Kryosphäre widerspiegelt Klimaänderungen besonders deutlich. Neben den Gletschern reagiert auch der alpine Permafrost hochsensibel auf eine äussere Veränderung, weil die Temperaturen im gefrorenen Material meist nur wenig unter 0°C liegen. Als Untergrundphänomen entzieht er sich jedoch der direkten visuellen Beobachtung. Die Eigenschaften des Permafrostes beeinflussen zudem oft in entscheidender Weise hochalpine Ökosysteme, insbesondere Hangprozesse, den Wasserkreislauf und Wachstumsbedingungen.

Im Gegensatz zu den seit über 100 Jahren systematisch beobachteten Gletschern, gibt es über die thermischen und mechanischen Veränderungen des Permafrostes nur wenige und kurzzeitige Messreihen. Zur angemessenen Dokumentation solcher Veränderungen wird nun parallel zum Gletschermessnetz ein Messnetz im alpinen Permafrost eingerichtet.

Das Konzept für das Permafrost-Beobachtungsnetz PERMOS (**PER**mafrost **Mon**itoring **Sw**itzerland) wurzelt in der Erweiterung der ehemaligen Gletscherkommission zu einer generell für Schnee und Eis zuständigen Glaziologischen Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften (SANW) im Jahre 1997. Der Schweizer Alpen Club (SAC) unterstützte das Gedeihen des Projektes finanziell.

Das Messnetz ist international gut eingebettet: Einerseits ist es Teil des Europäischen Netzes, welches im Rahmen des EU-Projektes Permafrost and Climate (PACE, Harris et al. 2001) etabliert werden konnte, andererseits ist es in das durch die WMO und die IPA koordinierte Global Terrestrial Network Permafrost (GTN-P, Burgess et al. 2000) integriert.

Als Berichtsperiode wurde in Anlehnung an die Berichte über die Gletscher das hydrologische Jahr gewählt, das heisst für den vorliegenden Bericht vom 1. Oktober 1999 bis 30. September 2000.

### 2.2 Zielsetzungen

Das übergeordnete Ziel des Messnetzes besteht darin, die langfristigen Veränderungen des alpinen Permafrostes zu dokumentieren. Dadurch können Prozesse besser verstanden und langfristige Entwicklungen erkannt werden. Konkret heisst „dokumentieren,“:

1. erfassen der thermischen Veränderungen im Permafrost;
2. messen der Variation der Mächtigkeit der Auftauschicht;
3. erheben der notwendigen Grundlagen zur photogrammetrischen Ermittlung von geomorphologischen Phänomenen, welche als Folge von Permafrostveränderungen zu erwarten sind;
4. verbessern der Kenntnisse der beteiligten Prozesse und Formen.

Mit dem Monitoring-Programm werden anerkannte Schlüsselgrössen (1, 2) sowie wichtige Grundlagen (3) erhoben. Da beteiligte Prozesse und Formen zur Zeit noch nicht vollständig verstanden werden (4), ist es möglich, dass das Messnetz künftig mit weiteren Parametern ergänzt werden muss. Die Zielsetzungen müssen laufend hinterfragt und gegebenenfalls angepasst werden.

## 2.3 Messungen – Luftbildaufnahmen

In der Pilotphase (2000-2003) wurden rund elf bestehende Bohrstandorte und zirka zehn BTS-Gebiete ausgewählt, in welchen folgende Parameter erhoben werden:

1. **Bohrungen:** in Permafrost-Bohrlöchern werden die Temperaturen aufgenommen sowie, je nach Situation, horizontale und vertikale Deformationen ermittelt.
2. **BTS-Gebiete:** die Temperaturen an der Basis der Schneedecke (BTS) und an der Bodenoberfläche (BOT) werden gemessen und die qualitative Entwicklung der Schneedecke, wie z.B. die Mächtigkeit in Abhängigkeit der Jahreszeit, festgehalten.
3. **Luftbildaufnahmen (schwarz-weiss oder infrarot):** Jährlich wird in mindestens einem Gebiet ein Luftbildflug durchgeführt. Damit werden die Grundlagen für photogrammetrische Auswertungen von Blockgletschern (Kääb und Vollmer 2000) und für die Dokumentation von geomorphologischen, hydrologischen und biologischen Veränderungen in Permafrostgebieten gesichert.

## 2.4 Organisation

Die Messungen werden durch verschiedene Hochschul-Institute im Auftrag der Glaziologischen Kommission (GK) der SANW (Schweizerischen Akademie für Naturwissenschaften) durchgeführt. Die Akademie trägt zusammen mit der Eidgenössischen Forstdirektion und dem Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) die Kosten für die Feldarbeiten der Pilotphase (2000-2003). Ab 2004 muss die finanzielle Trägerschaft des Beobachtungsnetzes gesichert sein.

Die beteiligten Hochschul-Institute sind:

- ETH Zürich: Institut für Geotechnik (IGT-ETH)
- ETH Zürich: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW-ETH)
- Universität Bern: Geographisches Institut (GIUB)
- Universität Zürich: Physische Geographie (GIUZ)
- Université de Fribourg: Institut de Géographie (IGUF)
- Université de Lausanne: Institut de Géographie (IGUL)
- Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos (SLF, EISLF oder WSL)

Weitere Institutionen, die sich mit Permafrostuntersuchungen beschäftigen:

- EPF Lausanne: Laboratoire de mécanique des sols
- ETH Zürich: Institut für Geophysik
- Universität Basel: Geographisches Institut

Private Büros:

- Institut für Tourismus und Landschaft, ITL-Academia Engadina
- Geo7, Bern
- Geotest AG, Zollikofen

## 2.5 Finanzen

Mit der Umgestaltung der Gletscherkommission in die Glaziologische Kommission (GK) der SANW, welche sich neben den Gletschern explizit auch dem Permafrost widmet, wurde der Permafrost-Delegierte der GK beauftragt, ein Konzept für ein systematisches Permafrost-Monitoring zu erarbeiten. Gleichzeitig wurden finanzielle Mittel als Beitrag zur Deckung der Feldspesen an die operationell tätigen Institute zur Verfügung gestellt (1998: Fr. 8'000; 1999: Fr. 10'000; 2000: Fr. 10'500). Im Jahre 2000 wurden diese wie folgt ausbezahlt: Bohrungen Fr. 4'630, BTS-Gebiete Fr. 5'870. Für die Erarbeitung des PERMOS-Konzeptes stellte der Schweizer Alpen Club SAC Fr. 20'000 zur Verfügung.

Tabelle 1.1: Übersicht über die Verteilung der Feldspesen an die verschiedenen Institute im Jahr 2000.

| Institut        | Bohrungen                                                                                                | BTS-Gebiete                            | Betrag in Fr. |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------|
| <b>GIUB</b>     | Keine                                                                                                    | Gemmi, Schilthorn                      | <b>1500</b>   |
| <b>GIUZ</b>     | Murtèl-Corvatsch 2/1987, Schafberg-Pontresina 1/1990, Schilthorn 51/1998                                 | Murtèl-Corvatsch, Schafberg-Pontresina | <b>1000</b>   |
| <b>IGT</b>      | Muragl Blockgletscher H1/1999, H3/1999, H4/1999                                                          | Muragl                                 | <b>430</b>    |
| <b>IGUF</b>     | Lapires                                                                                                  | Alp. de Mille, Challand, Réchy         | <b>2400</b>   |
| <b>IGUL</b>     | Keine                                                                                                    | Lapires, Yettes Condja                 | <b>1300</b>   |
| <b>SLF</b>      | Mt. Dolin (Arolla), Randa Wisse-Schijen, Schafberg-Pontresina 2/1990, Schafberg-Pontresina A, B, Emshorn | keines                                 | <b>2650</b>   |
| <b>VAW-ETHZ</b> | Emshorn, Jungfrauoch Nord, Süd, Murtèl-Corvatsch 2/1987, Schafberg-Pontresina 1/1990, Schilthorn 51/1998 | Muragl                                 | <b>1220</b>   |

## 2.6 Aktivitäten im Berichtsjahr Oktober 1999 - September 2000

|                         |                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 18. Nov. 1999           | Meeting der Permafrost-Koordinationsgruppe der SANW, Verabschiedung des Konzeptes.                                                                                                                                                                 |
| Dez 1999                | Publikation des Permafrost News Flash 4.                                                                                                                                                                                                           |
| 14. Jan 2000            | Das PERMOS-Konzept wird von der Glaziologischen Kommission (GK) der SANW gutgeheissen.                                                                                                                                                             |
| Februar 2000            | Der Delegierte für Permafrost erteilt die Aufträge an die beteiligten Institutionen.                                                                                                                                                               |
| 28. Feb 2000            | Gesuch der GK an SANW-Präsident Hauck über jährlich kFr. 25 für die Periode 2001-2003.                                                                                                                                                             |
| März 2000<br>April 2000 | BTS-Messungen:<br>Gemmi – Furggentälti (GIUB), Alpage de Milles (IGUF), Réchy (IGUF), Challand (IGUF, nicht vorgesehen, trotzdem durchgeführt), Lapires (IGUL), Yettes Condja (IGUL), Muragl (VAW-ETH), Murtèl-Corvatsch (GIUZ), Schilthorn (GIUB) |
| 12. Jun 2000            | International Permafrost Association (IPA) - Workshop "Global Terrestrial Network – Permafrost" (GTN-P), Fairbanks (Alaska): "Permafrost Monitoring in Switzerland – PERMOS: Concept and initiation".                                              |
| 21. Jun 2000            | PERMOS Sitzung SANW Bern (Delaloye, Hoelzle, Lambiel, Mihajlovic, Schwab, Preiswerk, Vonder Mühl).                                                                                                                                                 |
| 5. Jul 2000             | Interdepartementale Kommission für Umweltbeobachtung (IKUB): „Permafrost-Beobachtung in der Schweiz: PERMOS“.<br>Besprechung über Beteiligung der Eidgenössischen Forstdirektion (Greminger, Vonder Mühl, Preiswerk).                              |

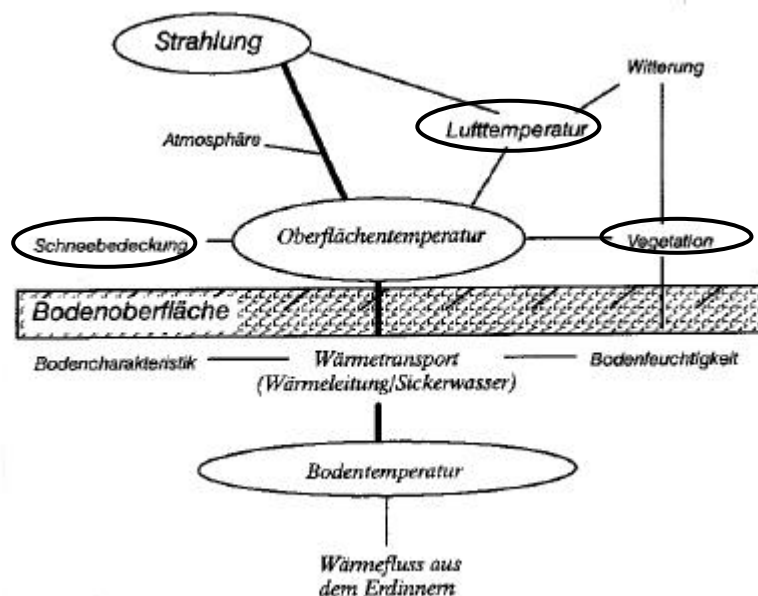


|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 31. Aug 2000 | WMO-Generalsekretär Obasi bittet Aussenminister Deiss, in der Schweiz den Aufbau eines nationalen Beobachtungsnetzes für Permafrost zu unterstützen.                                                                                                                                                                                                                           |
| 20. Sep 2000 | SANW-Zentralvorstand bewilligt das im Februar eingereichte Gesuch über Fr. 75'000 für drei Jahre (2001-2003). Landeshydrologie und –geologie LHG (Fr. 15'000) und Forstdirektion / BUWAL (Fr. 21'000) beteiligen sich massgeblich (Vertrag zwischen BUWAL und SANW).                                                                                                           |
| Laufend      | Auslesen der UTL-Logger in den BTS-Gebieten und Logger-Registrierung der Temperaturen und Deformationen (teilw.) in Bohrlöchern:<br>Murtèl-Corvatsch 2/1987 (VAW), Schafberg-Pontresina 2/1990 (SLF), Jungfrauoch Nord (VAW), Schafberg-Pontresina A (SLF), Mt. Dolin (Arolla) (SLF), Schilthorn 51/1998 (VAW; GIUZ), Lapires (IGUF), Muragl Blockgletscher H4/1999 (IGT, VAW) |
| 20. Sep 2000 | Bestimmung der Mächtigkeit der Auftauschicht am Emshorn.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 21. Sep 2000 | Pressemitteilung der SANW über PERMOS.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 2. Okt 2000  | Das EDA (Eidgenössisches Departement für Auswärtige Angelegenheiten) sichert in seinem Antwortschreiben der WMO (World Meteorological Organization) zu, dass sich die Schweiz auch künftig der langfristigen Beobachtung des Permafrostes widmen werde.                                                                                                                        |

### 3 Klima und Witterung

#### 3.1 Allgemeines

Permafrost ist in erster Linie ein Temperaturphänomen: liegt die Jahresmitteltemperatur an der Oberfläche unter 0°C, bewirkt das im Allgemeinen eine ganzjährig gefrorene Schicht im Untergrund. Die Energiebilanz an der Oberfläche steuert zusammen mit den Oberflächeneigenschaften die Permafrostverbreitung. Für die Verbreitung in den Alpen sind vor allem Strahlung und Lufttemperatur, aber auch Oberflächeneigenschaften (Schneebedeckung, Vegetation) sowie (Schnee-) Niederschlag entscheidend. Die beiden Grössen Strahlung und Oberflächeneigenschaften ändern sich aber über lange Zeiten nur sehr geringfügig (vgl. Figur 3.1). Deshalb sind Schnee (insbesondere der Zeitpunkt des ersten grossen Schneefalls und die Schneemenge) und Temperatur (vor allem während der schneefreien Periode) die Witterungsfaktoren, welche die Veränderungen der Permafrosttemperaturen am stärksten beeinflussen.

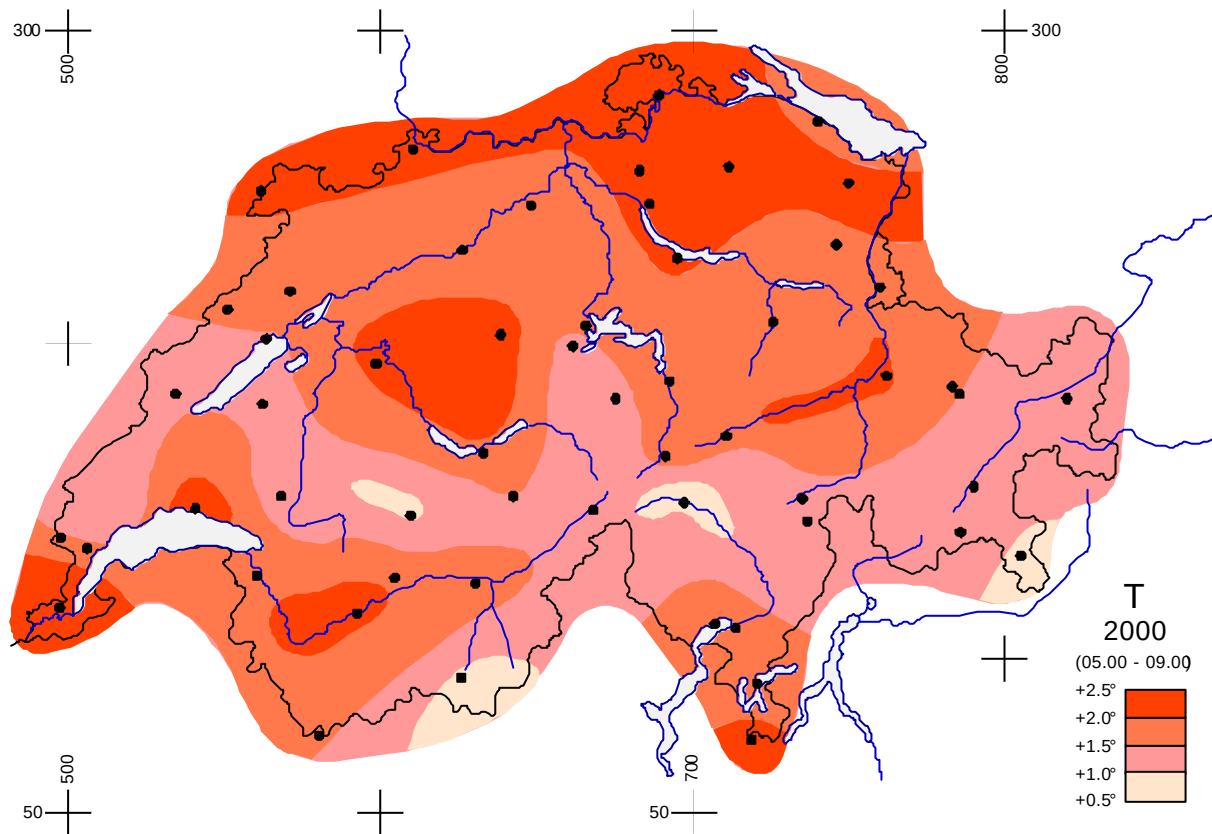


Figur 3.1: Energiebilanzfaktoren der Erdoberfläche (aus Keller, 1994)

### 3.2 Überblick über das hydrologische Jahr 1999/2000

Weltweit zählte das letzte Jahr im zweiten Jahrtausend wiederum zu den wärmsten und zeichnete sich wie die vorhergehenden Jahre durch klimatische Verhältnisse der Extreme (Wärme, Kälte, Regenfälle, Dürren) aus. Das globale Mittel der oberflächennahen Lufttemperatur lag  $0.3^{\circ}\text{C}$  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 auch in der Schweiz überdurchschnittlich 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 tiefen Temperaturen in der zweiten Monatshälfte. Bereits im Dezember gab es reichlich Tauwetter. Die Monate Februar bis Juni waren durchwegs überdurchschnittlich warm, wobei besonders die Monate Mai und Juni mit mehr als  $3^{\circ}\text{C}$  über dem Durchschnitt hervorstachen. Erst der Juli fiel überall in der Schweiz kälter aus als der langjährige Durchschnitt. Der August war aber bereits wieder sehr warm. 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  $2.5^{\circ}\text{C}$  über dem Durchschnitt (vgl. Figur 3.2)



Figur 3.2: Mittlere Temperatur im Sommer 2000 – Abweichung vom Mittelwert 1901 - 1960. Abweichung in Grad Celsius.

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.

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.

Tabelle 3.1: 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. |

### 3.3 Schnee

#### 3.3.1 Bedeutung des Schnees für den Permafrost

Dass die Oberflächeneigenschaften im Hochgebirge während einer grossen Anzahl von Tagen im Jahreszyklus durch die Schneedecke geprägt werden, ist evident. Dieser Sachverhalt ist im Zusammenhang mit der Permafrostaktivität jedoch von grosser Wichtigkeit. Besondere Beachtung ist dabei folgenden Parametern zu schenken:

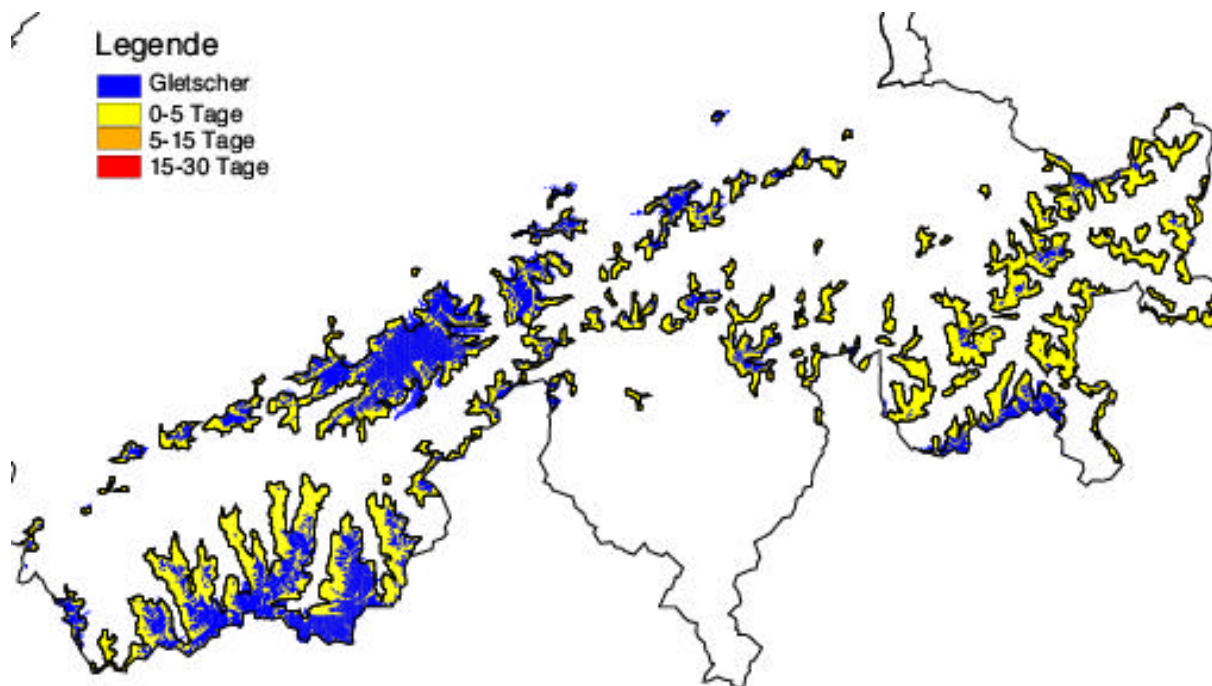
- a) die Einschneiphase im Herbst
- b) die Mächtigkeit der winterlichen Schneedecke
- c) der Verlauf der Ausaperung im Frühjahr bis Sommer

#### 3.3.2 Einschneiphase im Herbst und Frühwinter

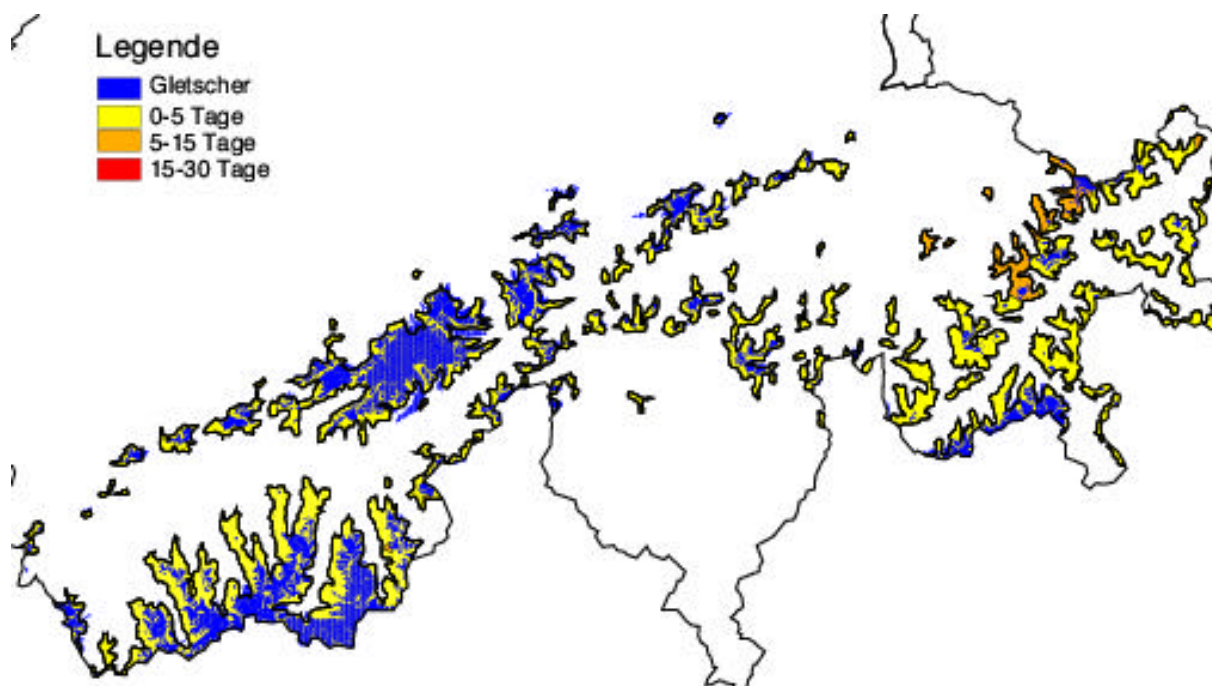
Neben dem Verlauf des Energie-Eintrages in den oberflächennahen Untergrund durch die Sonneneinstrahlung während der Sommermonate und der herbstlich- und frühwinterlichen „Auskuhlphase“, ist besonders der Einschneivorgang im Herbst (vgl. Figur 3.3a bis 3.3d) ein entscheidender Faktor. Durch ein frühes, mit einer mächtigen Schneedecke gekennzeichnetes Einschneien im Herbst wird die Auskuhlung des Untergrundes stark vermindert oder sogar verhindert. Als Folge kann der Permafrost lokal inaktiv werden, d.h., dass die Auftauschicht nicht mehr durchfriert. Dieser Sachverhalt kann durch eine permanente Aufzeichnung der Boden Oberflächentemperatur (BOT, Krummenacher et al. 1998) bzw. durch entsprechend warme Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke (BTS)-Werte eruiert werden.

Legende zu den Figuren 3.3a bis 3.3d: Karten der Einschnei-Situation im Winter 1999-2000. Die Karten stellen für die Monate September, Oktober, November und Dezember definierte Zeitsequenzen dar mit einer Schneedecke mächtiger als 20 cm (die minimale Schneedecke von 20 cm wurde aus messtechnischen Gründen des IMIS Netzes festgelegt). Die Zeitsequenzen entsprechen Zeiträumen von 0-5 Tagen, 5-15 Tage oder 15-30 Tage, die eine Schneebedeckung mächtiger als 20 cm in Folge sowie Oberflächentemperaturen kälter als 0.5°C aufweisen.

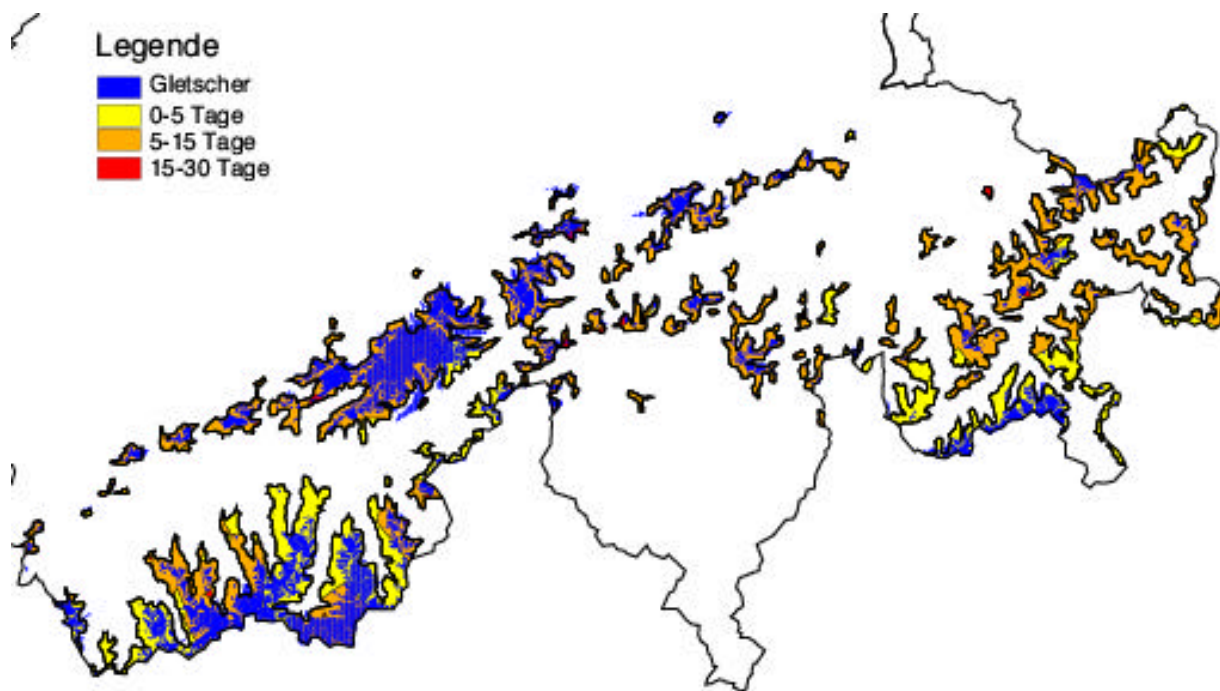
Für die Analyse wurden automatische Messwerte aller IMIS Stationen oberhalb 2200 m ü. M. gewählt. Datenquelle: Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos.



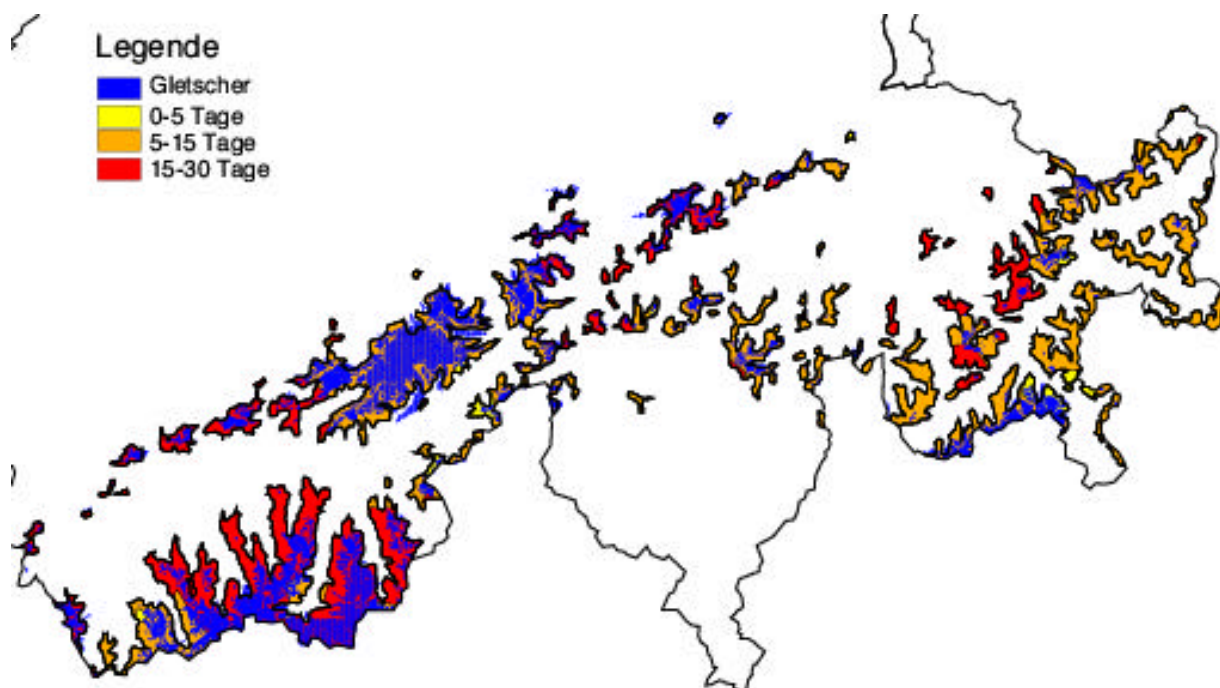
Figur 3.3a: September 1999



Figur 3.3b: Oktober 1999



Figur 3.3c: November 1999



Figur 3.3d: Dezember 1999

Im Rahmen des langfristigen Permafrostmonitorings ist deshalb die Erfassung des jährlichen Einschneiverhalten wichtig. Insbesondere erlauben die entsprechenden Kenntnisse auch die Interpretation der im Hochwinter erhobenen BTS-Messungen. In der Pilotphase muss ein noch festzulegendes Zeitfenster bestimmt werden, das als „Standard – Fenster“ für die Einschneiphase gilt. Die Figuren 3.3a bis 3.3.d sind erste Vorschläge dazu.

### 3.3.3 Mächtigkeit der winterlichen Schneedecke

Die mittlere Wintertemperatur des Untergrundes wird einerseits durch den Zeitpunkt des Einschneiens geprägt. Mittelbar und untergeordnet spielt jedoch auch die Mächtigkeit der Schneedecke während der Wintermonate eine Rolle. Eine lang andauernd geringmächtige Schneedecke in den Monaten November bis Februar ermöglicht beispielsweise eine starke Absenkung der mittleren Oberflächentemperatur und begünstigt somit den Erhalt oder sogar die Förderung von Permafrost. Häufig vom Wind kahl geblasene Geländekanten weisen deshalb oft fleckenhaften Permafrost auf.

Eine flächendeckende quantitativ exakte Beschreibung der Entwicklung der Schneehöhen ist z.Z. nicht möglich. Der Versuch, die aus den automatischen IMIS – Stationen (Interkantonales Mess- und Informationssystem) erhobenen Schneehöhen räumlich zu interpolieren, stellt eine Notlösung dar. Bei der Interpretation der Karten in den Figuren 3.2 und 3.3 ist zu beachten, dass die in verschiedenen Höhen über Meer (IMIS-Stationen oberhalb 2200 m ü. M.) gemessenen Schneehöhen nicht standardisiert sind. Es sollte im Rahmen der PERMOS Testphase abgeklärt werden, inwieweit eine Auswertung der Schneedeckenmächtigkeit via Satelliten-Fernerkundung kostengünstig erstellt werden könnte.

### 3.3.4 Verlauf der Ausaperung im Frühling und Frühsommer

Der Zeitpunkt des Ausaperns ist wiederum ein entscheidender Faktor, weil durch eine lange Schneebedeckung die Aufwärmung des oberflächennahen Untergrundes stark vermindert und verzögert werden kann. Ist dieser Umstand gekoppelt mit einem sehr späten Einschneien, sowie mit einer optimalen Auskühlung des Bodens im Frühwinter, kann Permafrost erhalten oder sogar neu gebildet werden.

Wird die Ausaperung durch häufige Frühjahrs- und Sommerschneefälle zeitlich sehr stark hinausgezögert, ist es möglich, dass sich perennierende Schneeflecken bilden. Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Verbreitung von Permafrost und perennierenden Schneeflecken, unter welchen die Bodentemperatur nicht über 0°C ansteigen kann.

Für PERMOS heisst das, dass mit einer geeigneten Erfassung des Ausaperungszeitpunktes für bestimmte Höhenstufen (vgl. Figuren 3.4) und evtl. eine Erfassung der „Dynamik“ der perennierenden Schneeflecken (Krummenacher et al. 1998) ein wichtiger Indikator für die räumlich – zeitliche Entwicklung der Permafrostverbreitung erfasst und langfristig dokumentiert werden kann.

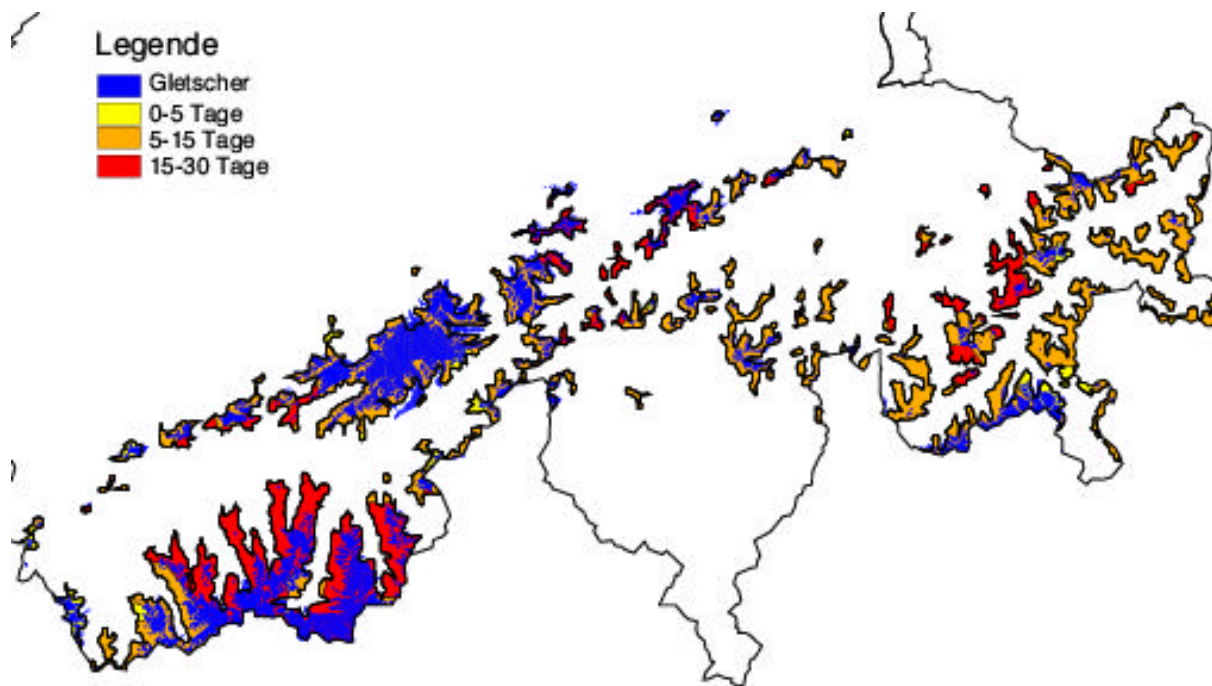
Zur Darstellung der „Ausaperungsgeschichte“ (Figuren 3.4a bis 3.4d) muss im Rahmen des langfristigen Permafrostmonitorings das jährliche Ausaperungsverhalten in verschiedenen Höhenlagen klar und lückenlos dokumentiert werden. Die Ausaperung kann durch eine Abfolge von Karten entsprechend dem Beispiel der Figuren 3.4a bis 3.4d in bestimmten Zeitschritten bewerkstelligt werden. Dabei müssen in der Testphase die entsprechenden Zeitfenster und Regionengrenzen eruiert werden, die dann analog zur Einschneisituation als Standard – Fenster definiert werden können.

Aufgrund der UTL-Logger-Daten aperten die westlichen Gebiete 2000 rund 7 bis 13 Tage früher als 1999.

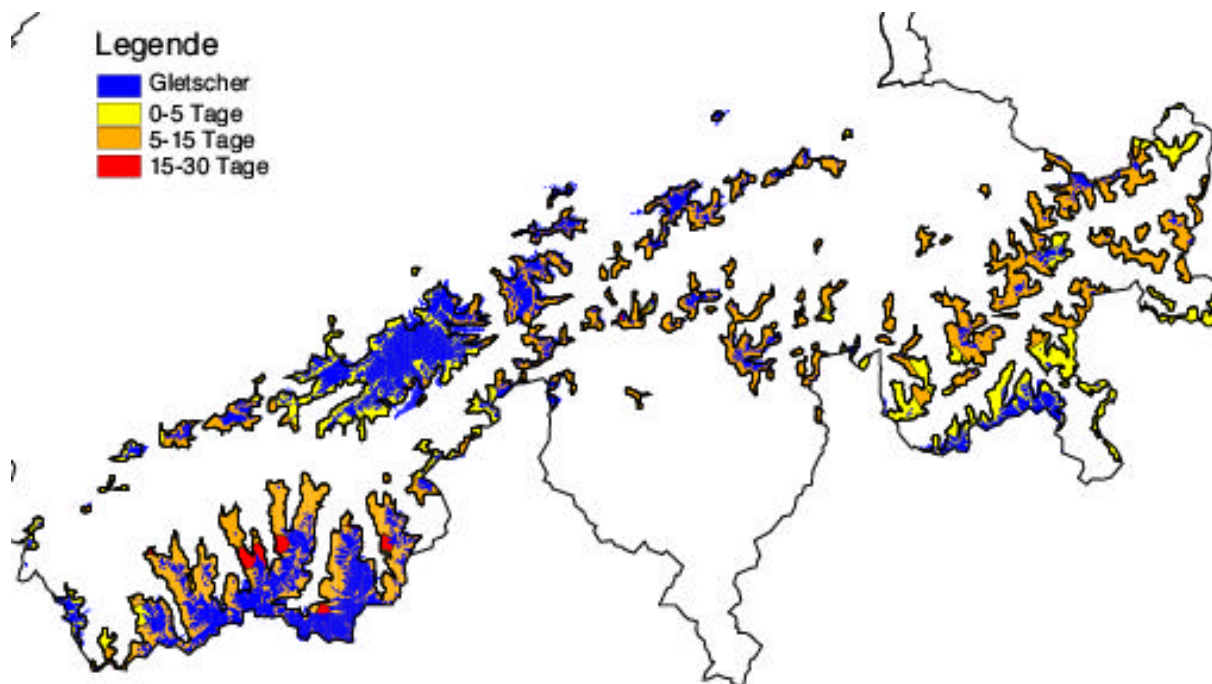


Legende zu den Figuren 3.4a bis 3.4d: Karten der Ausaperungssituation im Winter 2000. Die Karten stellen für die Monate Mai, Juni, Juli und August 2000 definierte Zeitsequenzen dar, in welchen die Schneedecke dünner als 20 cm war (der Wert von 20 cm wurde aus messtechnischen Gründen des IMIS Netzes festgelegt). Die Zeitsequenzen entsprechen Zeiträumen von 0-5 Tagen, 5-15 Tage resp. 15-30 Tage, in welchen die Schneebedeckung geringer als 20 cm in Folge sowie Oberflächentemperaturen von über 2°C gemessen wurden.

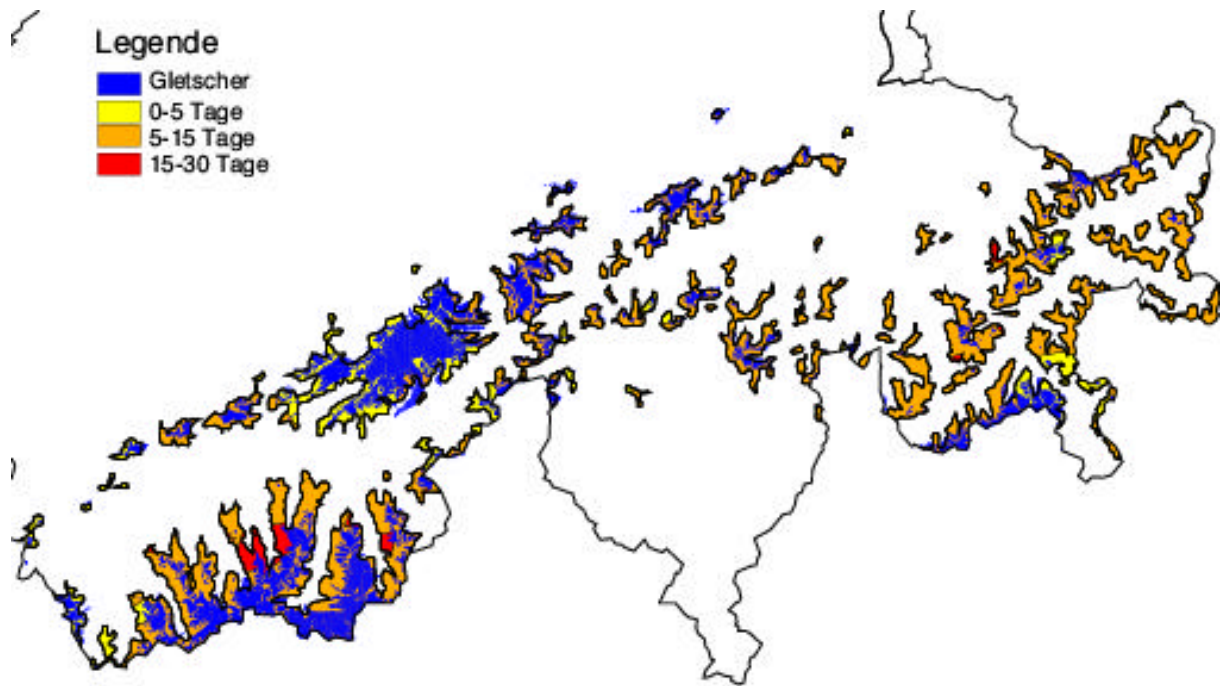
Für die Analyse wurden automatische Messwerte aller IMIS Stationen oberhalb 2200 m ü. M. gewählt. Datenquelle: Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos.



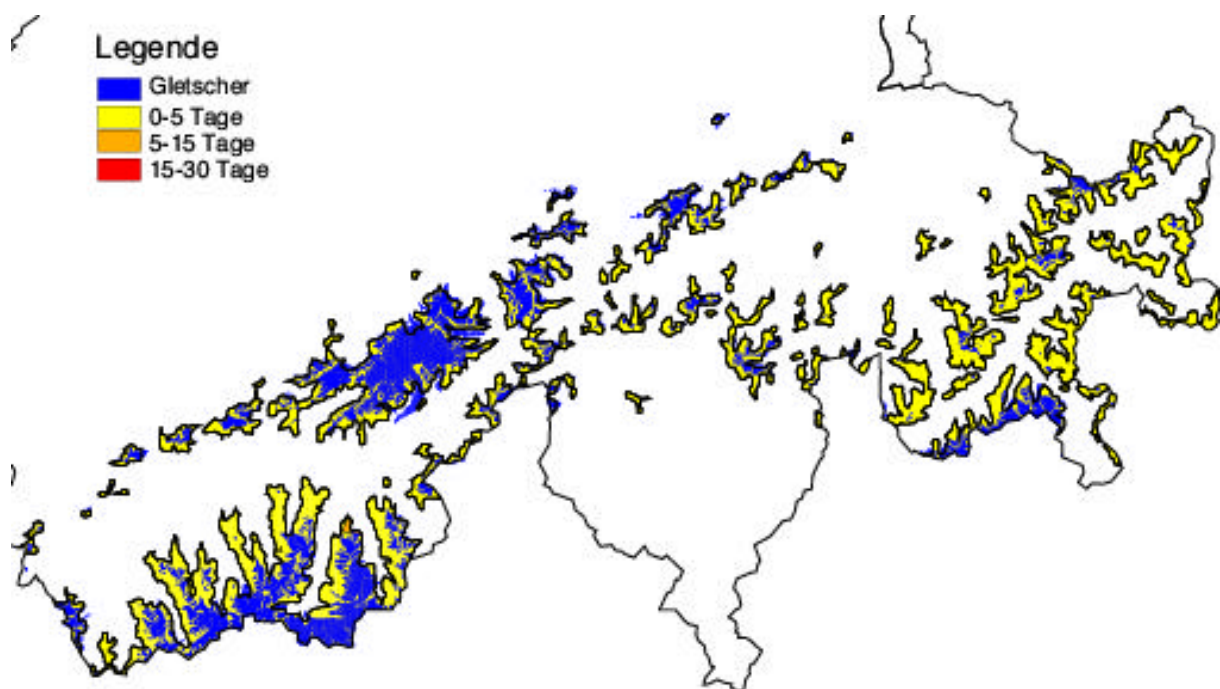
Figur 3.4a: Mai 2000



Figur 3.4b: Juni 2000



Figur 3.4c: Juli 2000



Figur 3.4d: August 2000

### 3.3.5 Schnee im Beobachtungsjahr 1999/2000

Den ersten Wintereinbruch erlebten hochalpine Regionen am 20. September, und anfangs Oktober gab es dann erstmals Schnee bis in tiefe Lagen. Dieser schmolz aber nochmals bis in mittlere Höhenlagen weg, bis anfangs November das Einschneien erfolgte (vgl. Fig. 3.2, Karten September-November 1999). Der Dezember war geprägt von wiederholten Schneefällen aus Westen und stürmischen Winden (vgl. Fig. 3.2 Karte Dezember 1999). Dies gipfelte gegen Ende des Monats mit dem Sturm „Lothar“ und am Alpennordhang mit ergiebigen Schneefällen. Verschiedentlich



stiessen Lawinen in bekannten Bahnen bis in Tallagen vor. Nach diesen Schneefällen waren am 31. Dezember die Schneehöhen im Engadin und in den Vispertälern durchschnittlich, sonst in allen Regionen überdurchschnittlich. Am Alpennordhang waren das Zwei- bis Dreifache der sonst üblichen Schneehöhen weit verbreitet.

Die erste Januarhälfte glänzte dann durch meist schönes Wetter und klare Nächte. So wurde vor allem in Mittelbünden, dem Engadin und in Teilen des südlichen Wallis die Schneedecke umgewandelt und in allen Regionen gab es zeitweise ausgeprägte Oberflächenreifbildung. An Stellen, wo die Schneedecke nur gering mächtig war, wandelte sie sich fast vollständig zu kantigen Formen und Schwimmschnee um. Diese Konstellation ermöglichte an Stellen mit einer sehr dünnen Schneedecke eine gute Auskühlung des oberflächennahen Untergrundes.

Während es in den südlichen Regionen weiterhin trocken blieb, erlebte der Alpennordhang in der ersten Februarhälfte erneut mehrere Niederschlagsperioden mit stürmischen Winden. Auch im März hielt das eher unbeständige Wetter mit wiederholten Schneefällen an. Gegen Ende Monat erhielt das Oberengadin erstmals seit Ende Dezember nennenswerte Niederschläge. Dieser Neuschnee brachte die Schneehöhe im Oberengadin auf den 31. März gerade an den langjährigen Mittelwert. Auch im Westen waren die Schneehöhen meist im Mittel. Im Chablais, im Unterengadin, in Mittelbünden und der Zentralschweiz waren die Werte überdurchschnittlich (110 bis 150%) am östlichen Alpennordhang und in Nordbünden nach wie vor stark überdurchschnittlich (Werte zwischen 161 und 252%).

Erst in der zweiten Aprilhälfte schneite es am Alpensüdhang ergiebig. Bei sehr warmer Witterung schritt in der Folge der Abbau der Schneedecke vor allem bis Mitte Mai zügig voran (vgl. Fig. 3.3, Karten Mai – August 2000). Am 6. Juni lagen auf der Vergleichsstation Weissfluhjoch (2540 m ü. M.) noch 113 cm Schnee, was in der 64-jährigen Messreihe dem Rang 44 entspricht.

## 4 Bohrlochtemperaturen

### 4.1 Allgemeines

Die Mächtigkeit des Permafrostes wird im Wesentlichen durch die Temperatur an der Basis der Auftauschicht sowie die thermischen Eigenschaften des gefrorenen Materials gesteuert. Auf eine äussere Veränderung reagiert der Permafrost thermisch in drei zeitlichen Phasen (Haeberli and Beniston 1998), wobei sich Fragestellung, Messmethodik und Aufwand mit zunehmender Tiefe verändern.

#### 1. Anpassung der Auftauschicht und des Permafrostspiegels (Mächtigkeit und Temperatur) innerhalb von einem bis mehreren Jahren

Die Messreihe des Bohrlochs Murtèl-Corvatsch (seit 1987) zeigt, dass sowohl Temperatur wie auch Mächtigkeit der Auftauschicht in entscheidendem Masse vom Verlauf des Festniederschlags (Schnee) beeinflusst werden (Vonder Mühll et al. 1998, Vonder Mühll 2001). Es ist deshalb wichtig, zusätzlich die bodennahe Oberflächentemperatur (Krummenacher et al. 1998) und den zeitlichen, qualitativen Verlauf der Schneehöhe zu erfassen.

Diese Datenreihen ermöglichen, statistisch/empirische Beziehungen zwischen Klimaparametern und oberflächennahen Permafrosttemperaturen herzuleiten. Entsprechende Modelle helfen, frühere Permafrosttemperaturen zu rekonstruieren, die Sensitivität von Permafrosttemperaturen gegenüber verschiedenen Klimafaktoren zu untersuchen und Szenarien möglicher zukünftiger Entwicklungen zu entwerfen.

## **2. Krümmung des Temperatur-Tiefen-Profiles innerhalb von Jahren bis Jahrzehnten**

Die Temperatur in den obersten 10 bis 20 Metern muss in entsprechenden Bohrlöchern gemessen werden. In Bereichen bis rund 20 m wird der Jahresgang der Temperatur widerspiegelt. Das Verhältnis von Nutzsignal zu Rauschen ist in diesen Tiefen bezüglich dem jährlichen Verlauf optimal. In 20 m Tiefe entspricht das gemessene Signal ungefähr dem jährlichen Mittel. Ein mittelfristiger Trend ist hier besonders gut erkennbar.

In einigen Bohrlöchern ist die Temperatur über einen Tiefenbereich von mehreren Metern isotherm bei 0°C, ein deutliches Zeichen einer aktuellen Veränderung der Permafrosttemperatur (Schafberg-Pontresina 2/1990, Lapires).

## **3. Anpassung der Permafrostmächtigkeit innerhalb von Jahrzehnten, Jahrhunderten bis Jahrtausenden**

Bohrlochtemperaturen aus grösserer Tiefe (mehrere Dekameter) geben Auskunft über die Mächtigkeit der Permafrostschicht und das verzögerte Eindringen thermischer Störungen in grössere Tiefe. Variationen der Oberflächentemperatur, welche mehrere Jahrzehnte zurück liegen, äussern sich in Form von Änderungen des Temperaturgradienten (Isaksen et al. 2000). Der langfristige Effekt ist wichtig, um allfällige Veränderungen in vergangener Zeit, von welcher keine systematischen Messungen vorliegen, abzuschätzen. Entscheidend sind insbesondere die Veränderungen und Auswirkungen auf den Anteil ungefrorenen Wassers oder die Porenwasserdrücke und daraus resultierende veränderte Stabilitätsverhältnisse von Steilhängen.

Die Temperatur ist also nicht nur die Grösse, welche den Permafrost definiert, sondern sie erlaubt auch durch eine relativ einfache Messung, in verschiedenen Zeit- resp. Tiefenskalen ablaufende Veränderungen zuverlässig zu dokumentieren.

## **4.2 Temperatur- und Mächtigkeitsmessungen der Auftauschicht**

### **4.2.1 Allgemeines**

Im Sommer taut der Permafrost an der Oberfläche auf. Dieser Prozess beginnt nachdem der Schnee vollständig weggeschmolzen ist. Im Herbst oder Frühwinter erreicht die Mächtigkeit der Auftauschicht (engl. active layer) ihr Maximum und sie gefriert von der Oberfläche wie auch vom Permafrostspiegel her.

Die Mächtigkeit der im Sommer ungefrorenen Schicht hängt von örtlichen (Höhe, Exposition, Bodencharakteristik, Wasserverfügbarkeit etc.) aber auch klimatischen (Dauer und Dicke der Schneedecke, Sommertemperaturen und -Strahlung, erster Schneefall/Wintereinbruch) Faktoren ab. Im Bereich der Auftauschicht sind sowohl Temperatur wie auch Auftauschichtmächtigkeit von den Verhältnissen des Vorjahres weitgehend unbeeinflusst. Dementsprechend handelt es sich also um ein Signal, welches das Beobachtungsjahr repräsentiert, vergleichbar mit der Massenbilanz der Gletscher.

Die maximale Mächtigkeit lässt sich thermisch (interpolieren zwischen zwei Temperatursensoren) oder mechanisch („ertasten“ des herbstlichen Permafrostspiegels in einem Bohrloch) bestimmen. Letzteres erfolgt durch Messen der Eistiefe in einem mit Wasser gefüllten Permafrostbohrloch. Es gibt folgende zwei Arten von Messungen zur Bestimmung der Auftauschichtmächtigkeit: (a) Datalogger (hier müssen Daten in der Periode September/Okttober vorhanden sein) und (b) eine Temperaturmessung pro Jahr jeweils im September/Okttober.

Tabelle 4.1: Übersicht der maximalen Auftauschichtmächtigkeit (Z<sub>max</sub>) der beobachteten PERMOS-Bohrlöcher.

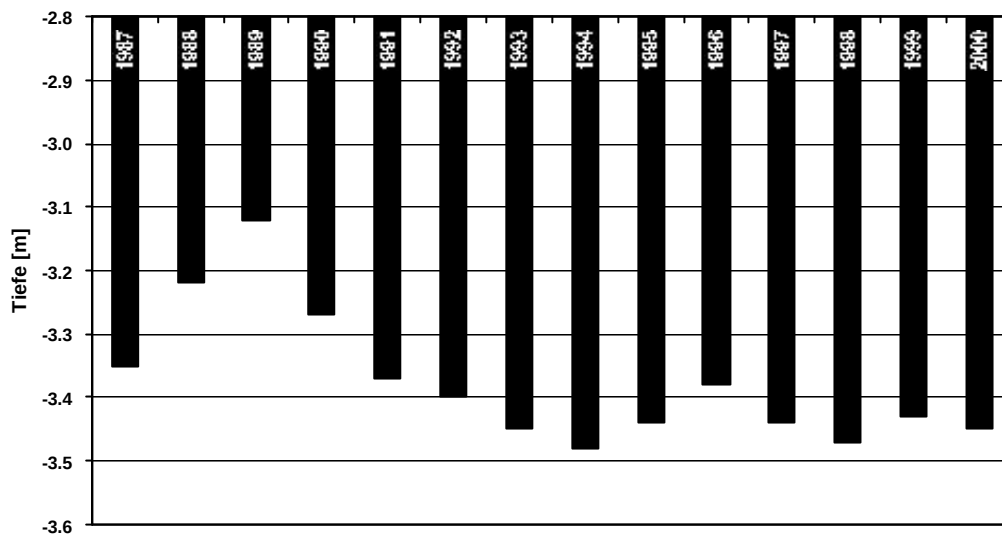
| Lokalität                                 | Methode                       | Z <sub>max</sub> [m]<br>Auftauschicht | Datum         |
|-------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|---------------|
| Murtèl-Corvatsch 2/1987                   | Temperatur<br>(Data-Logger)   | 3.5                                   | 27. Aug 2000  |
| Schafberg-Pontresina 2/1990               | Temperatur<br>(Data-Logger)   | 3.2                                   | 7. Sept 2000  |
| Jungfrauoch Nord                          | Temperatur<br>(Data-Logger)   | Fehlt                                 |               |
| Schafberg-Pontresina A                    | Temperatur<br>(Data-Logger)   | 0.5                                   | 5. Sept. 2000 |
| Schafberg-Pontresina B                    | Temperatur<br>(Data-Logger)   | 1.0                                   | 5. Jul 2000   |
| Mt. Dolin (Arolla)                        | Temperatur<br>(Data-Logger)   | 1.5                                   | 2. Sept 2000  |
| Emshorn (BL 5)                            | Einzelmessung<br>(mechanisch) | 3.3                                   | 21. Sept 2000 |
| Schilthorn 51/1998                        | Temperatur<br>(Data-Logger)   | 4.9                                   | 06. Okt 2000  |
| Lapies                                    | Temperatur<br>(Data-Logger)   | 3.7                                   | 25. Okt 2000  |
| Randa Wisse-Schijen                       | Temperatur<br>(UTL-Logger)    | Keine Daten                           | -             |
| Muragl Blockgletscher<br>H3/1999, H4/1999 | Temperatur<br>(Data-Logger)   | Datenlücke                            | -             |

#### 4.2.2 Messungen Murtèl-Corvatsch 1987 bis 2000

Europas längste Temperaturreihe (seit Juli 1987) im Permafrost stammt aus der 58 m tiefen Bohrung 2/1987 durch den Blockgletscher Murtèl-Corvatsch. Der Abstand der Thermistoren beträgt einen Meter, seit 1993 werden die Daten über einen Datalogger einmal täglich erhoben. Zuvor wurde rund alle drei Wochen eine Hand-Messung durchgeführt. Die maximale Mächtigkeit der Auftauschicht wurde durch lineare Interpolation zwischen den beiden Thermistoren in 2.5 m und 3.5 m Tiefe bestimmt. Die Datenreihe wurde auch dem Programm des amerikanischen National Science Foundation NSF „Circumpolar Active Layer Monitoring CALM“ (Brown et al., in press) zur Verfügung gestellt.

In Figur 4.1 ist die Entwicklung der maximalen Mächtigkeit der Auftauschicht der Bohrung 2/1987 Murtèl-Corvatsch zwischen 1987 und 2000 dargestellt. Es fällt auf, dass diese von Jahr zu Jahr stark variieren. Alle Werte liegen zwischen 3.1 und 3.5 m. In Jahren mit kalten Permafrosttemperaturen (z.B. 1989, siehe Kapitel 4.3) ist die Mächtigkeit gering, in aus Permafrost-sicht warmen Jahren ist sie gross (z.B. 1994). Wichtige steuernde Komponente ist der Schnee (vgl. Kapitel 3.2).

Ein langfristiger Trend kann aus der Datenreihe nicht ermittelt werden, da die Daten von einem Jahr zum anderen voneinander unabhängig sind und die Stichprobe zu klein ist.

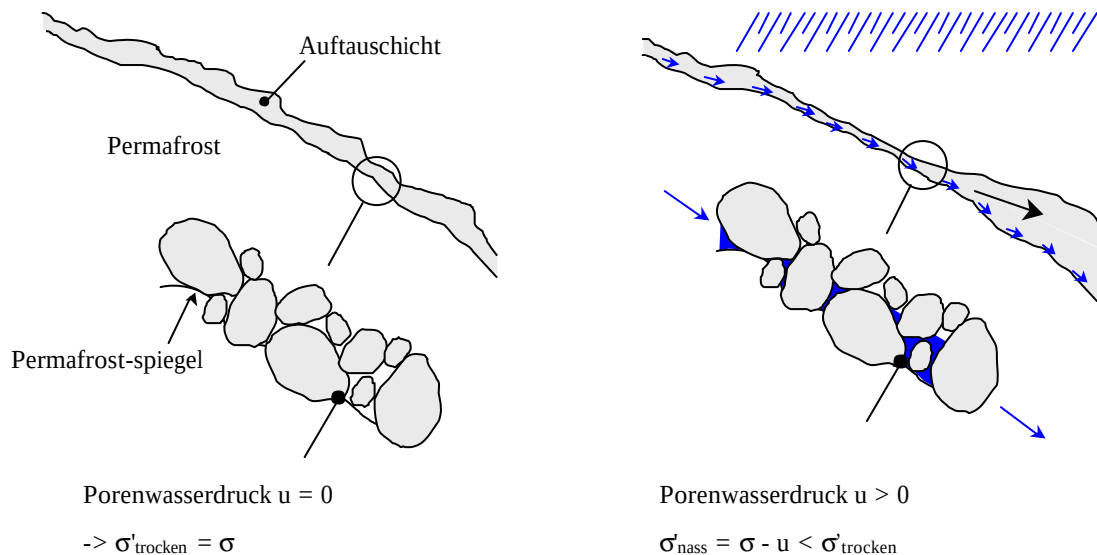


Figur 4.1 Die maximale Mächtigkeit der Auftauschicht auf dem Blockgletscher Murtèl-Corvatsch zwischen 1987 und 2000 (interpoliert aufgrund der Temperaturmessungen in 2.6 und 3.6m Tiefe in Bohrloch 2/1987).

#### 4.2.3 Bedeutung der Auftauschicht aus geotechnischer Sicht

Die Auftauschicht, welche in den warmen Sommermonaten die oberen Dezimeter bis Meter auftauen lässt, ist einerseits für Bautätigkeiten im Gebiet des Permafrostes, andererseits aber auch für die Stabilität von Permafrosthängen sehr wichtig. Zu Stabilitätsproblemen, d.h. Instabilitäten kann es kommen, wenn die Spannungen zwischen den einzelnen Bodenkörnern, welche effektive Spannungen ( $\sigma'$ ) genannt werden, aufgrund des vorhandenen Wasserdrucks ( $u$ ) reduziert werden (Figur 4.2). Grosse Wassermengen, zum Beispiel nach einem Starkniederschlag während der Schneeschmelze, welche auf der noch gefrorenen Permafrostoberkante, resp. Permafrostspiegel, hangparallel talwärts strömen, können so Bodenmaterial wegschwemmen, die Scherfestigkeit entlang eines möglichen Scherhorizontes reduzieren und Rutschungen auslösen.

In bezug auf Bautätigkeiten müssen zwei Aspekte berücksichtigt werden. Einerseits kann ein Bauwerk aufgrund seiner Wärmestrahlung und Bodenpressung die Auftauschicht vergrössern, was zu Setzungen der Konstruktion führt. Da die thermische, aber auch statische Belastung oft nicht gleichmässig unterhalb eines Bauwerkes verteilt ist, setzt sich das Fundament unterschiedlich. Das kann zu unerwünschten Verkippungen und Rissen in der Konstruktion führen. Andererseits können Lawinenverbauungen zum Beispiel aufgrund ihrer schneeansammelnden Eigenschaften aber auch dazu führen, dass die Auftauschicht weniger tief in den Boden eindringen kann. Dadurch werden die hydraulischen Bedingungen in den obersten Schichten beeinflusst, so dass örtlich grosse Wasserdrücke entstehen können, und somit die Stabilität des Untergrundes beeinflusst wird.



Figur 4.2 Reduktion der effektiven Spannungen  $\sigma'$  auf dem Permafrostspiegel infolge Niederschlag. Links: trocken; rechts: mit Hangwasser

Die sehr komplexen Zusammenhänge zwischen den Wasserabflüssen, dem Permafrost und allenfalls vorhandenen Bauwerken sind zur Zeit noch zu wenig bekannt, um eindeutige Aussagen machen zu können. Die Ursache für grosse Ereignisse wie Felssturz, Murgänge etc. ist jedoch meist ein Zusammenspiel unterschiedlichster Faktoren.

Tabelle 4.2: Messungen der Maximal- und Minimaltemperaturen im Jahr 1999/2000 und zugehörige Kalenderdaten in rund 10 m Tiefe sowie Tiefenlage der Temperatursensoren.

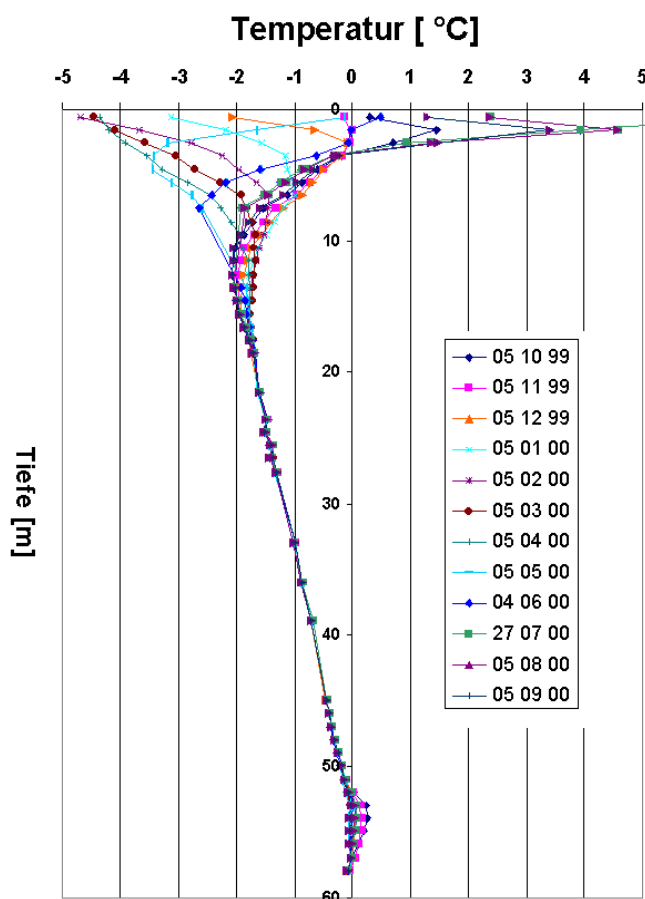
| Lokalität                           | Vorhandene Daten<br>(1.10.99 – 30.9.00)                                                                   | $T_{\min}$ und Datum<br>[°C]                                | $T_{\max}$ und Datum<br>[°C]       |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Murtèl-Corvatsch<br>2/1987          | 1.10.99 - 30.9.00<br>(ohne 2.3.00 - 4.5.00; 5.6.00 - 26.7.00)                                             | 10.55 m:<br>-1.62 am 10.1.00<br>7.55 m:<br>-2.74 am 23.5.00 | 7.55m:<br>-1.15 am 19.12.99        |
| Schafberg-Pontresina<br>2/1990      | 1.10.99 - 9.10.00<br>(ohne 14.4.00 - 7.7.00) und keine Daten<br>unterhalb von 9.2 m von 15.7.00 - 9.10.00 | 9.2 m:<br>-0.46 am 9.7.00                                   | 9.2 m:<br>-0.22 am 3.3.00          |
| Jungfrauoch Nord                    | 1.10.99 - 30.9.00                                                                                         |                                                             |                                    |
| Schafberg-Pontresina A              | 1.10.99 - 30.9.00 (ohne 20.6.00 - 7.7.00)                                                                 | 10 m:<br>-1.71 am 16.6.00                                   | 10 m:<br>-1.33 am 19.2.00          |
| Schafberg-Pontresina B              | 1.10.99 - 30.9.00                                                                                         | 10 m:<br>-1.14 am 20.2.00                                   | 10 m:<br>-1.14 am 20.2.00          |
| Mt. Dolin (Arolla)                  | 1.10.99 - 30.9.00 (ohne 8.4.00 - 2.7.00)                                                                  | 5.5 m:<br>-0.07 am 9.9.00                                   | 5.5 m:<br>-0.09 am 20.11.99        |
| Emshorn                             | 28.9.00                                                                                                   |                                                             |                                    |
| Schilthorn 51/1998                  | 1.1.00 - 31.12.00<br>(ohne 21.-23.10.00)<br>alle 6 Stunden                                                | 10.0 m:<br>-0.78 (08.06.00)                                 | 10.0 m:<br>-0.32 am 30.12. 00      |
| Lapires                             | 1.10.99 – 30.9.00<br>alle 3 Stunden                                                                       | 10.0 m:<br>0.0 (isotherm)                                   | 10.0 m:<br>0.0 (isotherm)          |
| Randa Wisse-Schijen                 | Keine Messungen                                                                                           |                                                             |                                    |
| Muragl H1/1999,<br>H3/1999, H4/1999 | 4.1.00 – 5.4.00                                                                                           |                                                             | H4/1999: 10.0 m:<br>-0.40 (9.1.00) |

## 4.3 Temperaturentwicklung im Permafrost

### 4.3.1 Allgemeines

Die saisonalen Temperaturschwankungen sind im Permafrost bis rund 20 m registrierbar. Unterhalb des Permafrostspiegels wird Energie fast ausschliesslich durch Wärmeleitung transportiert. Um die Resultate der Bohrungen miteinander vergleichen zu können, sind in Tabelle 4.2 Maximal- und Minimaltemperatur sowie zugehörige Kalenderdaten in rund 10 m Tiefe zusammengestellt. Diese Daten hängen von ortsspezifischen Parametern wie thermische Charakteristik oder Eis-/Wassergehalt ab. Diese können jedoch für denselben Standort als von Jahr zu Jahr ähnlich angenommen werden. Ausserdem sind die Tiefenlage der Temperatursensoren sowie vorhandene Messungen angegeben.

Es gibt drei verschiedene Arten von Temperaturprofilen: (a) 1x (September), (b) 4x (quartalsweise: März, Juni, Sept., Dez.) und (c) 12x (monatsweise). Exemplarisch sind in Figur 4.3 die Daten aus dem Bohrloch 2/1987 Murtèl-Corvatsch dargestellt. Die Resultate der in Tabelle 4.2 zusammengefassten Bohrungen sind in Anhang A zu finden.



Figur 4.3: Temperaturprofil des Bohrlochs 2/1987 Murtèl-Corvatsch von Herbst 1999 bis Herbst 2000.

### 4.3.2 Bohrloch 2/1987 Murtèl-Corvatsch

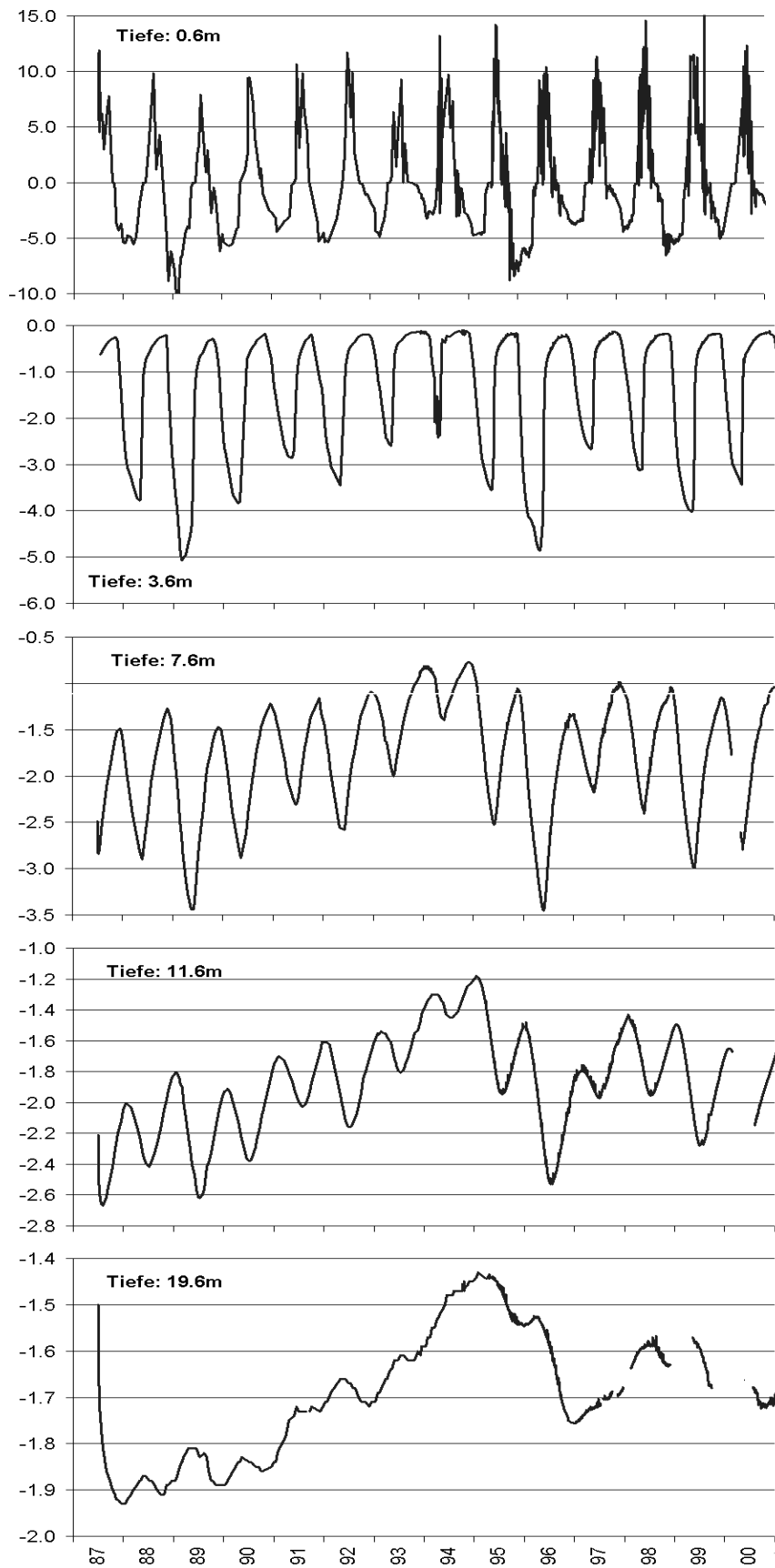
In Figur 4.4 sind die Temperaturenreihen vom Bohrloch 2/1987 aus verschiedenen Tiefen dargestellt. Es handelt sich dabei um die längste kontinuierliche Reihe aus Alpinem Permafrost, ein guter Start für ein Beobachtungsnetz. Dass die Reihe keine 15 Jahre aufweist, zeigt jedoch auch deutlich, wie jung die systematische Permafrostforschung.

Unterhalb 3.6 m sind die Temperaturen ganzjährig unter 0°C. Die Maximaltemperatur im Spätsommer beträgt zumeist rund -0.2°C, hingegen variieren die winterlichen Minimaltemperaturen beträchtlich (zwischen -2.5 und -5.0°C). Mit zunehmender Tiefe nehmen die hochfrequenten Signalanteile ab und die Jahresschwankungen werden sinusförmiger. Gleichzeitig erfolgt aufgrund der Lösung der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung einerseits eine exponentielle Amplitudenreduktion, andererseits eine Phasenverschiebung. Beträgt in 3.6 m Tiefe die Jahres-Doppelamplitude noch rund 4.0°C, vermindert sie sich in 10.6 m auf rund 0.5°C und in 19.6 m auf weniger als 0.1°C. Die Phase ist in 10.6 m um ein halbes Jahr verschoben.

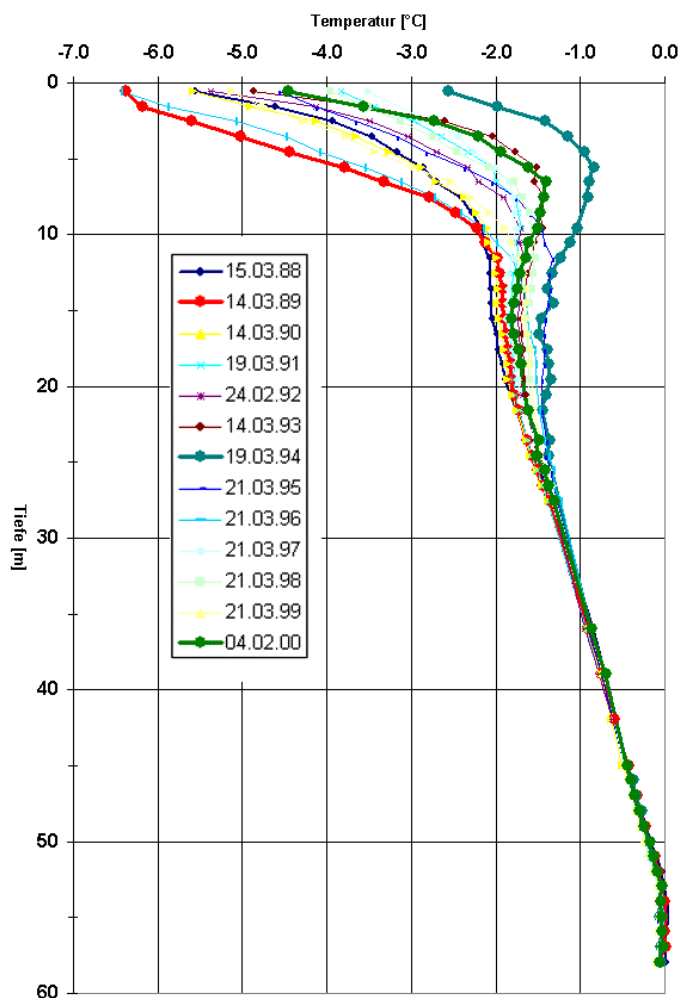
In den Kurven stechen zwei Jahre deutlich hervor: Der kalte Winter 1988/1989 und die beiden warmen Sommer 1993 und 1994. In beiden Jahren spielt der Zeitpunkt des ersten Schneefalls eine wesentliche Rolle: Im Winter 88/89 liess der erste richtige Schneefall bis im Februar auf sich warten, weshalb der Untergrund kräftig auskühlte. In den beiden Sommern 1993 und 1994 fiel bereits im Spätsommer (September resp. August) beträchtlich Schnee, welcher das Bohrloch bis zum Winter nicht mehr freigab. Die während des Sommers in der Auftauschicht gespeicherte Wärme blieb somit unter der Schneedecke gefangen und wärmte den Permafrost dementsprechend auf.

Figur 4.5 zeigt die Temperaturvariationen über die Beobachtungsperiode 1988 bis 2000 anhand je eines Temperatur-Tiefen-Profils jeweils im März resp. Februar. Auch hier sind die physikalischen Effekte der Wärmeleitung (Amplitudenverminderung und Phasenverschiebung mit der Tiefe) sowie die kalten (1989) und warmen (1994) Jahre deutlich erkennbar. Unterhalb 30 m Tiefe wurden bisher keine bedeutenden Temperaturvariationen registriert.





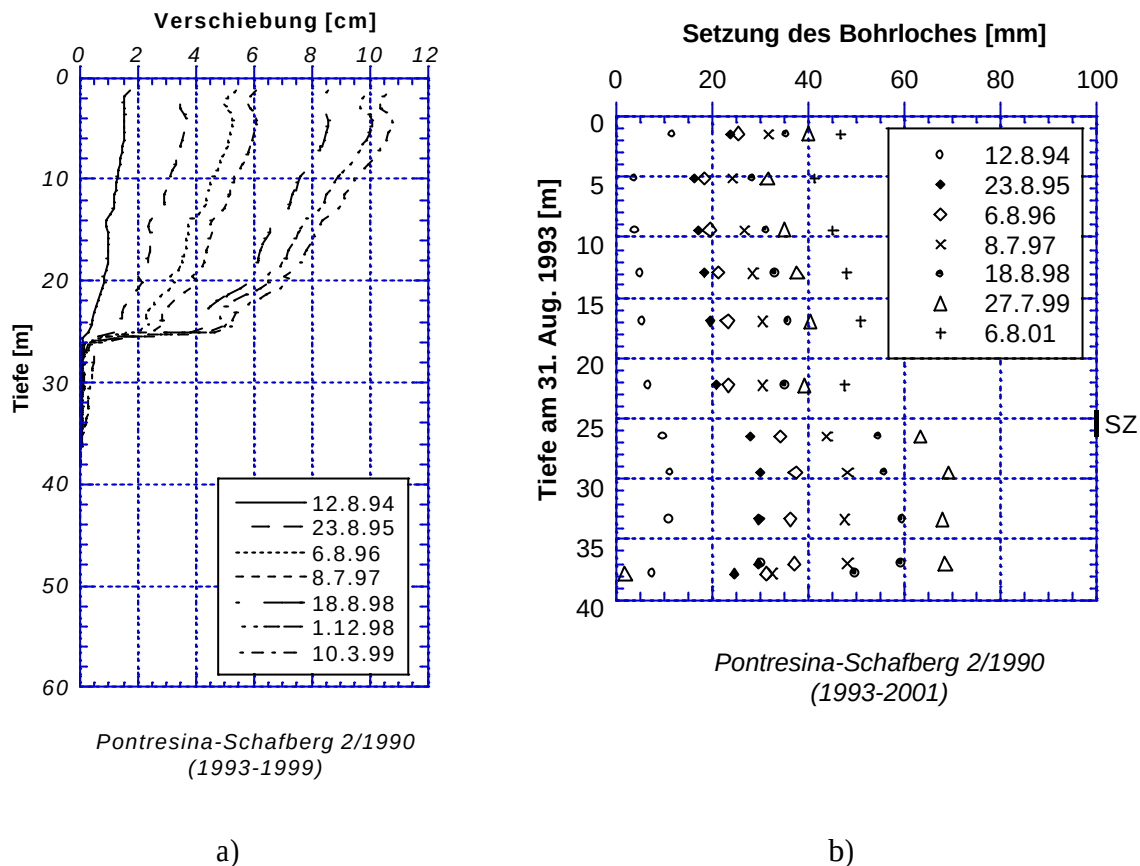
Figur 4.4: Entwicklung der Temperaturen im Bohrloch 2/1987 Murtèl-Corvatsch zwischen 1987 und 2000. Die Kurven stammen aus folgenden Tiefen (von oben nach unten): 0.6m, 3.6m, 7.6m, 11.6m und 19.6m.



Figur 4.5: Entwicklung des Temperatur-Tiefen-Profil im Bohrloch 2/1987 Murtèl-Corvatsch zwischen 1987 und 2000 jeweils im März resp. Februar.

#### 4.4 Deformationsmessungen im Permafrost

Mit Hilfe von Deformationsmessungen in einem Bohrloch kann das Verformungsverhalten von Permafrost mit der Tiefe beobachtet werden. Die Bohrlöcher 1/1990 und 2/1990 am Pontresina-Schafberg wurden mit Inklinometerrohren für die horizontale Deformationsmessung sowie Magnetringen für die vertikale Deformationsmessung ausgerüstet (Hoelzle et al. 1998). In Figur 4.6 sind die Messungen vom Bohrloch 2/1990 für die Jahre 1993 – 1999/2001 dargestellt. Aufgrund der zu grossen Krümmung des Inklinometerrohres kann die Messsonde (Typ SINCO) seit 1999 nicht mehr ins Bohrloch heruntergelassen werden. Die Messungen zeigen ein für Blockgletscher sehr typisches Profil mit einer beinahe unbeweglichen Zone in grösserer Tiefe bis zu einer Scherfläche, in welcher der grösste Anteil der Verformung gemessen wird. Im oberen, eher eisreicheren Teil sind zusätzliche Kriechbewegungen feststellbar. Die durchschnittliche Gesamtverformung ist über die Jahre mehr oder weniger konstant geblieben und beträgt an der Oberfläche 1.78 cm/Jahr. Neben dem allgemeinen Deformationsmuster können auch lokale Phänomene festgestellt werden, welche auf eine heterogene Struktur im Untergrund hindeuten. Unterhalb der Auftauschicht (ca. 3 m) aber auch in Tiefen von 14.5 m und 20 m sind Unstetigkeiten im horizontalen Deformationsprofil feststellbar, welche auf grössere Blöcke hindeuten, die sich langsamer als der restliche Boden bewegen.



Figur 4.6: Horizontale a) (links) und vertikale b) (rechts) Bohrlochverschiebungen, Pontresina-Schafberg Bohrloch 2/1990; SZ: Scherzone

## 4.5 Bohrlochtemperaturen im Beobachtungsjahr 1999/2000

Im Vergleich – wo dies möglich ist – mit vorhergehenden Jahren ist das Beobachtungsjahr ein durchschnittlich bis eher warmes „Permafrost-Jahr“. Die Auftauschichtmächtigkeit an den Standorten Murtèl-Corvatsch wie auch Schilthorn waren eher gross und die Phase positiver Temperaturen eher lang, die Temperatur-Tiefen-Werte (Figur 4.5) dagegen liegen in der Mitte (extrem warm war 1994, 1989 extrem kalt).

## 5 BTS-Gebiete

### 5.1 Allgemeines

Es gibt eine einfache und sehr effiziente Methode, um den Permafrost räumlich erfassen zu können. Diese Methode wird BTS genannt und beruht auf der Messung der **B**asis-**T**emperatur der trockenen Winter-**S**chneedecke (BTS). Normalerweise wird die Messung im Alpenraum in den Monaten März und April durchgeführt. Die früh- und hochwinterliche Schneedecke, welche eine sehr kleine Wärmetransportkapazität aufweist, isoliert den Boden vor kurzfristigen Schwankungen der Energiebilanzkomponenten an der Oberfläche. Deshalb ist die Entstehung der Schneedecke im Herbst und Frühwinter entscheidend für die Entwicklung der BTS (Vonder Mühll et al. 1998). Während dem Frühjahr, wenn die Schneedecke in den Alpen ca. 1 Meter oder mehr beträgt und die Schmelze noch nicht eingesetzt hat, bleibt die Basistemperatur der Schneedecke annähernd konstant (Keller und Gubler 1993). Die BTS wird dann vorwiegend durch den Wärmetransport der obersten Bodenschichten kontrolliert, welche wiederum stark durch die

Präsenz oder die Absenz von Permafrost beeinflusst werden (Haeberli et al. 1998). Dabei kann man drei Klassen von Basistemperaturen unterscheiden:

wahrscheinlicher Permafrost:  $BTS < -3^{\circ}\text{C}$ ,

möglicher Permafrost:  $-3^{\circ}\text{C} < BTS < -2^{\circ}\text{C}$

kein Permafrost:  $BTS > -2^{\circ}\text{C}$

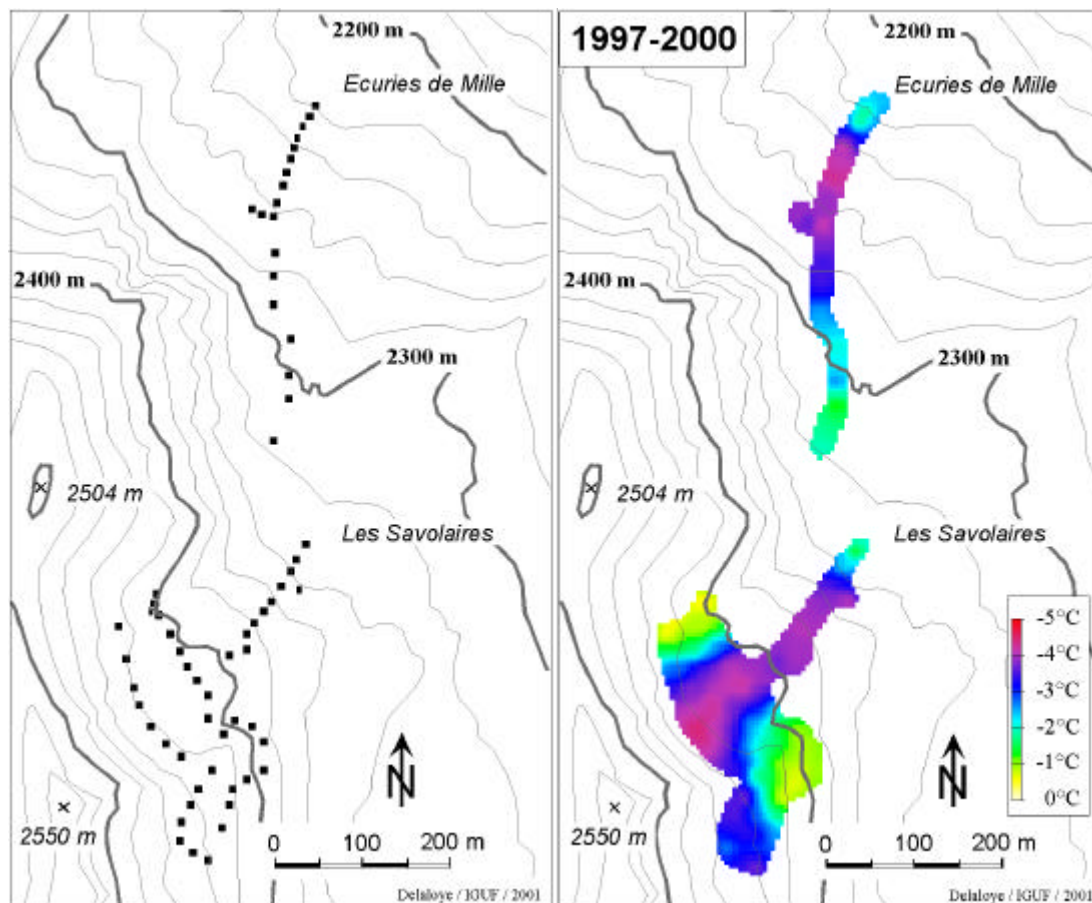
Punktuelle BTS-Messungen im Frühjahr sollten heute immer gleichzeitig mit Miniloggermessungen im jeweils untersuchten Gebiet unterstützt werden. Damit wird die Interpretation der Daten stark erleichtert (Hoelzle et al. 1999).

## **5.2 Jährlich wiederholte BTS-Messungen im Gebiet Alpage de Mille 1996-2001**

Im Gebiet Alpage de Mille (VS/Entremont) werden unter der Leitung von R. Delaloye/IGUF seit 1996 jedes Jahr systematisch BTS-Messungen durchgeführt. Die 64 Messungen werden jeweils am gleichen Ort (rund 10 m, siehe Figur 5.1a) und wenn immer möglich am gleichen Datum (10. März +/- 5 Tage) durchgeführt.

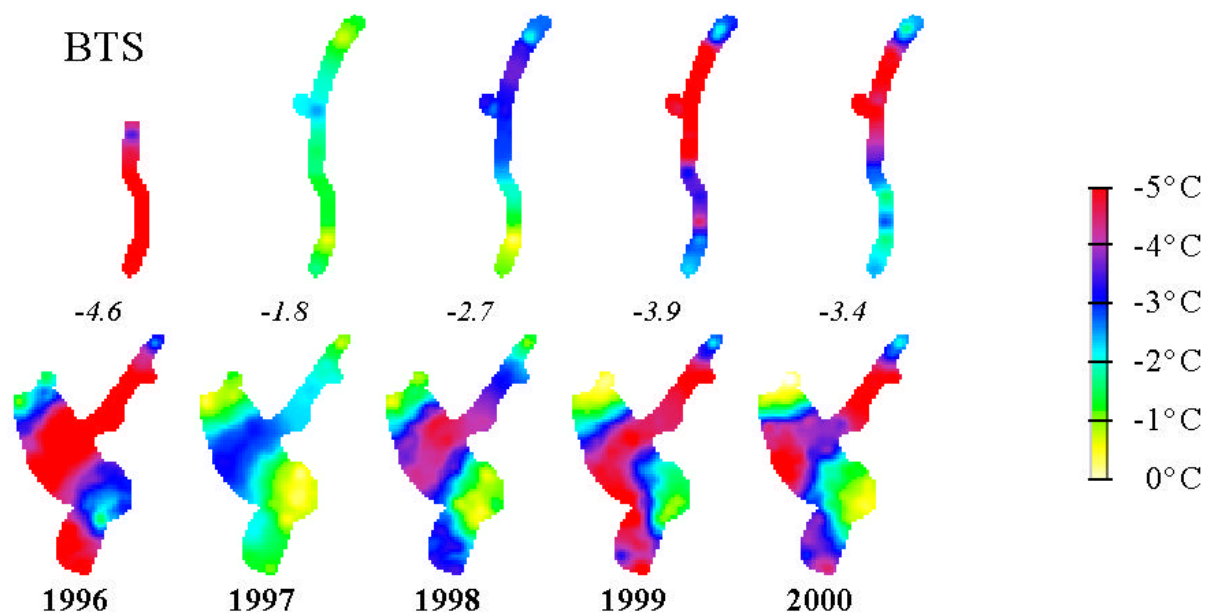
Das Untersuchungsgebiet liegt am Fusse der ENE-Flanke des Mont-Brûlé (2550 m) und erstreckt sich zwischen 2220 und 2460 m ü.M. Die Gesteine des Untergrundes bestehen aus Gneissen und die Oberfläche besteht grösstenteils aus überwachsenem Gehängeschutt (grobe Blöcke, inaktiver und fossiler Blockgletscher). Grösstenteils ist das Gebiet mit alpinem Rasen, einigen Alpenrosen und Heidelbeersträuchern bewachsen.

In Figur 5.1 b) ist die mittlere BTS-Verteilung der vier Messungen aus den Jahren 1997-2000 dargestellt. Die kälteste Zone liegt mit 2240 m ü. M. sehr tief. Im Allgemeinen entsprechen die im Mittel kalten BTS-Werte (kälter als  $-2^{\circ}\text{C}$ ) den Orten mit grossen, groben Gesteinsblöcken.



Figur 5.1: Alpage de Mille (VS). a) (links): Standorte der BTS-Messpunkte. b) (rechts): Mittelwert der BTS-Temperatur der jeweiligen Messorte aus den vier Messungen 1997 – 2000. Die Messungen erfolgten einmal jährlich, jeweils ungefähr am 10. März.

Vergleicht man die einzelnen Jahresmessungen (vgl. Figur 5.2) fällt auf, dass diese von Jahr zu Jahr sehr stark variieren. Im Winter 1995/1996, als es nur wenig Schnee gab, wurden ausserordentlich kalte BTS-Werte gemessen. Im Gegensatz dazu war der Frühwinter 1996/1997 schneereich und die Temperatur dementsprechend wärmer. Die Differenz der BTS-Werte zwischen diesen beiden extremen Jahre beträgt im Mittel rund 3°C. Ausserdem zeigt sich durch die wiederholten Messungen deutlich, dass das generelle Muster der BTS-Verteilung sich von Jahr zu Jahr gleicht, wenn auch kleine Unterschiede auszumachen sind. Deshalb erlaubt der Mittelwert aller BTS-Messungen des entsprechenden Jahres einen Vergleich mit den anderen Jahren.



Figur 5.2: Alpage de Mille (VS): Räumliche Verteilung der BTS-Werte sowie jeweiliger Mittelwert in den Jahren 1996 bis 2000. Die Messungen wurden jeweils ungefähr am 10. März durch geführt.

### 5.3 BTS-Messungen im Beobachtungsjahr 1999/2000

Im Beobachtungsjahr konnten in allen Gebieten die winterlichen BTS-Messungen wie vorgesehen durchgeführt werden. Der Zugang zu den beiden Lokalitäten “Schafberg-Pontresina” und “Challand” ist lawinengefährlich, weshalb sich dort die Beobachtungen auf Herauslesen der Miniloggerdaten im Sommer beschränkt. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die erfolgten Messungen. Detaillierte Resultate sind im Anhang zusammengestellt.

Da noch keine langjährigen Reihen von BTS-Messungen existieren, ist eine Einordnung der 2000-er Messungen schwierig. In der Alpage de Mille entsprechen die Daten dem Mittelwert 1996-2000, gegenüber 1999 sind sie rund 0.5°C wärmer. Auch in den Gebieten Challand und Lapires waren die Werte 2000 um 0.3 bis 0.4°C wärmer als im Vorjahr.

Tabelle 5.1: BTS-Gebiete im Rahmen von PERMOS sowie Datum der winterlichen BTS-Untersuchungen.

| Messort               | BTS-Messungen         |
|-----------------------|-----------------------|
| Gemmi                 | 8. März 2000          |
| Murtèl-Corvatsch      | 8. März 2000          |
| Schafberg-Pontresina  | Keine Wintermessungen |
| Schilthorn            | 10. März 2000         |
| Réchy                 | 7. - 8. März 2000     |
| Yettes Condja         | Keine Wintermessungen |
| Alp. de Mille         | 6. März 2000          |
| Challand              | März 2000             |
| Lapires / Mt. Gelé    | 24. Februar 2000      |
| Muragl Blockgletscher | 7. März 2000          |

## 6 Luftbildflüge

Tiefgeflogene Luftbilder werden im Rahmen von PERMOS ausschliesslich zu Dokumentationszwecken erhoben. Verschiedene Gebiete werden bereits seit den 1980-er Jahren im Turnus befliegen (Tabelle 6.1). Die Luftbilder werden archiviert, um zu einem späteren Zeitpunkt in einem Projektrahmen (z.B. Dissertation, Diplomarbeit, etc.) ausgewertet zu werden. Es ist vorgesehen, mindestens ein Luftbildflug pro Jahr durchzuführen.

Wichtig für photogrammetrische Auswertungen und Analysen ist, dass Luftbilder in regelmässigen Abständen aufgenommen werden. Die Informationsdichte von Oberflächenphänomenen zu einem bestimmten Zeitpunkt ist auf einem Luftbild sehr gross und es kann daher mittels photogrammetrischer Methoden quantitativ verschiedene Grössen bestimmt werden (z.B. Kriechgeschwindigkeit des Permafrostes über Jahrzehnte, Veränderungen der Vegetation oder der geomorphologischen Aktivitäten). Wichtiger Indikator ist beispielsweise der Bewegungsbetrag eines aktiven Blockgletschers.

Tabelle 6.1: Gebiete mit Blockgletschern, die im Rahmen der systematischen Permafrostbeobachtung seit den 1980-er Jahren im Turnus befliegen werden (tiefgeflogene schwarz-weiss Aufnahmen).

| Gebiet       | Art       | Max. Beweg. | Vorhandene Luftbilder                                                              |
|--------------|-----------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Murtèl       | tief, s-w | 15 cm       | 1987, 1988, 1991, 1995, 1996                                                       |
| Muragl       | tief, s-w | 50 cm       | 1981, 1985, 1990, 1994, 1998, 1999, 2000                                           |
| Schafberg    | tief, s-w | 10 cm       | 1991, 1994, 1998, 1999, 2000                                                       |
| Réchy        | tief, s-w |             | 1986, 1991, 1995, 1999                                                             |
| Gruben       | tief, s-w | 100 cm      | 1967, 1975, 1983, 1985, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1994, 1995, 1996, 1997, 2000 |
| Suvretta     | tief, s-w | 200 cm      | 1992, 1997                                                                         |
| Gross Gufer  | tief, s-w |             | 1987, 1994, 2000                                                                   |
| Furggentälti | tief, s-w | 70 cm       | 1990, 1995, 1999, 2000                                                             |

Im Sommer 2000 wurde durch die Eidgenössische Vermessungsdirektion und das Bundesamt für Landestopographie folgende Gebiete befliegen: Muragl, Schafberg und Gross Gufer.

Ausserdem wurden entsprechende Luftaufnahmen im Auftrag der Uni Bern im Furggentälti aufgenommen: September 2000 (digimage / Swissboogie / Photogrammetrie Perrinjaquet).

## 7 Schlussfolgerungen

Naturgemäss ist im ersten Bericht eines langfristig angesetzten Beobachtungsprogrammes die Einordnung der erhobenen Werte eher schwierig. Dennoch kann bezüglich des Permafrostes aufgrund der einzelnen bereits längere Zeit erfassten Messreihen davon ausgegangen werden, dass das hydrologische Jahr 1999/2000 ein durchschnittliches bis eher warmes Jahr war.

Die Schneedeckenentwicklung verlief unspektakulär. Im Hochwinter wurden dann auch durchschnittliche BTS-Werte gemessen. Das Ausapern vollzog sich im Mai innerhalb relativ kurzer Zeit. Im Alpenraum waren die Sommertemperaturen der Luft rund 1°C wärmer als das langjährige Mittel. Dadurch war ein bedeutender Wärmeeintrag in die Auftauschicht über eine verhältnismässig lange Zeit möglich.

## 8 Literatur

- Bauder A., Vieli A. und Hoelzle M. (2001): Die Gletscher der Schweizer Alpen 1999/2000. Zeitschrift des Schweizer Alpen-Clubs „Die Alpen“. 10/2001.
- Burgess, M.M., Smith, S.L., Brown, J., Romanovsky, V., and Hinkel, K. (2000): The Global Terrestrial Network for Permafrost (GTNet-P): Permafrost monitoring contributing to global climate observations. in Current Research 2000E, Geological Survey of Canada.
- Brown J, Hinkel K.M and Nelson, F.E. (in press): The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: research designs and initial results. Polar Geography.
- Haeberli, W. and Beniston, M. (1998): Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio*, 27/4, 258-265.
- Haeberli, W., Hoelzle, M., Käab, A., Keller, F., Vonder Mühll, D. and Wagner, S. (1998): Ten years after drilling through the permafrost of the active rock glacier Murtèl, Eastern Swiss Alps: answered Questions and new perspectives. Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost, Yellowknife, Canada, Collection Nordicana, 57, 403-410.
- Harris, Ch., Haeberli, W., Vonder Mühll, D and King, L. (2001): Permafrost Monitoring in the High Mountains of Europe: the PACE Project in its Global Context. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 3-11.
- Hoelzle, M., Wagner, S., Käab, A., and Vonder Mühll, D. 1998. Surface movement and internal deformation of ice-rock mixtures within rock at Pontresina-Schafberg, Upper Engadin, Switzerland. In Lewkowicz, A.G.a.A., M., ed., Seventh International Conference on Permafrost, 57: Yellowknife, Canada, Collection Nordicana, 465-471.
- Hoelzle, M., Wegmann, M. and Krummenacher, B. (1999): Miniature temperature Dataloggers for mapping and monitoring of permafrost in high mountain areas: First experience from the Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 10(2). 113-124.
- Isaksen, K., Vonder Mühll, D., Kohl, T., Gubler H. and Sollid, J.L. (2000): Permafrost temperatures and climatic reconstruction from a deep borehole at Janssonhaugen, Svalbard. *Annals of Glaciology*, 31. 287-294.
- Käab, A., and Vollmer, M. 2000. Surface Geometry, thickness changes and flow fields on creeping permafrost: automatic extraction by digital image analysis. *Permafrost and Periglacial Processes*, 11, 315-326.
- Keller, F. (1994): Interaktionen zwischen Schnee und Permafrost. Eine Grundlagenstudie im Oberengadin. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich. 127.
- Keller, F. and Gubler, H.U. (1993): Interaction between snow cover and high mountain permafrost Murtèl-Corvatsch, Swiss Alps. Sixth International Conference on Permafrost, Beijing. Proceedings 1. 332-337.
- Krummenacher, B., Budmiger, K., Mihajlovic, D., Blank, B. (1998): Periglaziale Formen und Prozesse im Furggentäli, Gemmipass. Analysen zur räumlich-zeitlichen Entwicklung der Permafrostverbreitung und der Solifluktion, basierend auf der Entwicklung und Anwendung moderner Arbeitsmethoden. Mitteilungen des Eidgenössischen Institutes für Schnee-und Lawinenforschungsinstitutes, 56.
- Vonder Mühll, D. (2001): Thermal variations of mountain permafrost: An example of measurements since 1987 in the Swiss Alps. In Visconti et al (eds.): Global Change in Protected Areas. Kluwer Academic Publisher. 83-95.



- Vonder Mühl, D., Stucki, T. and Haeberli, W.(1998): Borehole Temperatures in Alpine Permafrost: A Ten Year Series. 7th International Conference on Permafrost, Yellowknife Canada. Proceedings. 1089-1095.
- 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.