

# Permafrost im Schweizerischen Nationalpark

Autor(en): **Keller, Felix**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Jahresbericht der Naturforschenden Gesellschaft Graubünden**

Band (Jahr): **104 (1986-1987)**

PDF erstellt am: **24.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-594577>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## **Permafrost im Schweizerischen Nationalpark**

von Felix Keller

Anschrift des Verfassers:

Felix Keller

Via da Crusch

7503 Samedan

## 1. Einleitung

Die Arbeit enthält eine Auswahl von Ergebnissen aus der Diplomarbeit des Autors, die 1987 am Geographischen Institut der Universität Zürich ausgeführt wurde. Dabei wird der Zweck der Permafrostuntersuchungen, die gewählten Untersuchungsmethoden, sowie die Permafrostverbreitung im Schweizerischen Nationalpark beschrieben.

### 1.1 Definitionen, Begriffe

**Permafrost** (vgl. HÄBERLI 1973, S. 11ff) ist die Bezeichnung für permanenten Bodenfrost, welcher als Folgeerscheinung des regionalen Klimas angesehen werden darf. Die Mindestzeitdauer der Gefrorenis, welche definitionsgemäss unter den Begriff Permafrost fällt, beträgt 1 Jahr. Permafrost wird von der Gletscherwelt durch das beteiligte Material getrennt: Gletschereis bildet einen Bestandteil der Hydrosphäre (Wasserhülle), während gefrorener Boden zur Lithosphäre (Erdmantel) gezählt wird.

Man kann grob 3 Zonen unterscheiden (vgl. HÄBERLI 1975):

**Kontinuierlicher Permafrost**, in dem das Lithosphärenmaterial durchgehend gefroren ist,

**Diskontinuierlicher Permafrost**, in dem das Material nicht mehr durchgehend flächenbedeckend gefroren ist und

**Sporadischer Permafrost**, in dem der Permafrost in weitgehend isolierten Körpern vorhanden ist.

Eine besondere Erscheinungsform des **Alpinen Permafrostes** stellen die sogenannten Blockgletscher dar. Unter einem **aktiven Blockgletscher** (nicht vergleichbar mit einem üblichen Eisgletscher) versteht man eine permanent gefrorene eisreiche Schuttmasse, die sich unter dem Einfluss der Schwerkraft langsam, d.h. mit einer mittleren Geschwindigkeit von 5–100 cm/Jahr, hangabwärts bewegt. Ein **inaktiver** Blockgletscher bewegt sich nicht mehr, enthält aber im Gegensatz zum **fossilen** Blockgletscher noch einen Permafrostkörper (Abb. 1) (vgl. BARSCH, 1978).

### 1.2 Permafrostproblematik

Permafrostuntersuchungen in den Alpen stellen ein junges Forschungsgebiet dar. So dürften FURRER & FITZE (1970) in ihrem Beitrag zum Permafrostproblem in den Alpen wohl einen der ersten Schritte in dieser Richtung unternommen haben. Wir befinden uns in dieser Thematik aber nach wie vor in einer Pionierphase, das heisst es müssen grundlegende Untersuchungen stattfinden. In arktischen Regionen fanden schon viel früher Permafrostuntersuchungen statt, die z.T. auch in den Alpen Anwendung finden. So führte bereits A. von Middendorf um 1830 in Bergwerkschächten bei Yakutsk (Sibirien) Temperaturmessungen durch. Der Bau der



Abbildung 1: Aktiver Blockgletscher Valetta mit Piz Quattervals im Schweizerischen Nationalpark.

Alaska-Pipeline führte zur Einberufung der ersten internationalen Permafrostkonferenz. In verschiedenen Arbeiten konnte HAEBERLI, (1973, 1975, 1979) neue Methoden zur Bearbeitung des Alpinen Permafrostes entwickeln.

Kenntnisse über Permafrosterscheinungen sind in verschiedener Hinsicht wertvoll.

a) Meistens ist Permafrost eine unsichtbare Erscheinung. Dies weil der Frostkörper nicht an der Oberfläche erscheint und bei direkten Grabungen schmilzt. Missachtet man bei baulichen Massnahmen die Permafrostexistenz, so kann das teure Folgen haben. Als Beispiel sei die Corvatschbahn erwähnt, die an der Bergstation Schäden aufweist.

b) In Bergregionen befinden sich oft Siedlungen in Gefahrenzonen von Murgängen. Die ersten Erfahrungen der Unwetterschäden von 1987 in Poschiavo (GR) und Münster (VS) zeigen, dass die Anrissgebiete der Schadenereignisse im Periglazial liegen. Grundsätzlich besteht die Annahme, dass ein Zusammenspiel von mehreren Faktoren vorliegt. Extreme Niederschläge, freigewordene Schuttakkumulationen durch Gletscherrückzüge, permafrostbedingte Grundwasserstauung sowie erhöhtes Schmelzwasserangebot können alle als Folge einer Klimaerwärmung auftreten. Sollte uns eine prognostizierte Klimaerwärmung tatsächlich bevorstehen, müssen wir mit einer erhöhten geomorphologischen Aktivität rechnen, mit der wir leben lernen müssen.

c) Der Aufbau der unteren Hälfte der winterlichen Schneedecke wird u.a. durch den Wärmefluss des Bodens bestimmt. Permafrostböden haben einen kleineren Wärmefluss als wintergefrorene Böden. Dieser Umstand könnte einen Einfluss auf die Lawinentätigkeit haben.

d) Ähnlich dem Grönlandeis dürfte Permafrosteis Informationen aus früheren Jahrtausenden enthalten. Insbesondere radiometrische Messungen, Isotopen- und ev. auch Pollenanalysen liefern einige neue Daten. Dazu muss das Alter des Eises bekannt sein und die Annahme bestehen können, dass nie ein Aggregatzustandswechsel stattgefunden hat.

## 2. Zielsetzung der Arbeit

In meiner Arbeit soll im Schweizerischen Nationalpark Vorkommen und Verbreitung von Permafrost untersucht und kartographisch festgehalten werden. Dabei sollen verschiedene Untersuchungsmethoden zur Anwendung gelangen. Der Schweizerische Nationalpark stellt ein vielseitiges Untersuchungsgebiet dar:

- mit einer Höhendifferenz von 1750 m (Piz Quattervals 3164 m ü. M., Plan da Funtanas, Val S-charl 1400 m ü. M.) und dem Angebot aller Expositionen, können bereits viele lokal verschiedenartige Geländesituationen betrachtet werden.
- die klimatischen, topographischen und geologischen Verhältnisse bewirken eine relativ hohe Trockenheit mit intensiver Schuttproduktion. Auf dieser Basis entstehen gut sichtbare Zeigerphänomene für Permafrost (Blockgletscher, perennierende Schneeflecken).
- am Geographischen Institut der Universität Zürich wird der Nationalpark nach weiteren Nachbarfragestellungen untersucht. Besonders Untersuchungen zur Solifluktion (GAMPER, 1981), Studien zum Mikroklima (FLURY, 1988) sowie die Erforschung des Zusammenhanges zwischen Schneedecke und Solifluktion (STEURI, 1988) dürfen wertvolle Vergleiche liefern.

Die Diplomarbeit soll folgendermassen gegliedert werden: Um eine einheitliche Verwendung der Begriffe zu gewährleisten, stützt sich meine einleitende Permafrostsystematik auf die von HÄEBERLI (1985) erarbeitete Gliederung. Die Frage nach den entscheidenden Einflussgrössen auffälliger morphologischer Phänomene (z.B. Blockgletscher), dürften den Ursprung von Permafrostuntersuchungen bilden. Sichtbare Permafrosterscheinungen erklären jedoch nicht die physikalischen Zusammenhänge, welche deshalb in einer anschliessenden Permafrostcharakteristik dargestellt werden sollen. Im letzten Abschnitt des theoretischen Teils werden die benutzten Untersuchungsmethoden vorgestellt.

Der nun folgende Teil bezieht sich auf die Feldarbeit. Das Verbreitungsmuster von Permafrost kann als Ergebnis der klimatischen und topographischen Voraussetzungen bezeichnet werden. In meinen Untersuchungen wurden verschiedene Methoden eingesetzt. Quellwasser- und Bodentemperaturmessungen, Hammer-schlagseismik sowie eine Klimastation sind punktuelle Untersuchungen. Im Gegensatz dazu kann bei der Luftbildkartierung von einer flächenhaften Erfassung gesprochen werden. Wegen Lawinengefahr konnte die BTS-Methode (HÄEBERLI, 1973) nur ausserhalb des Nationalparks angewendet werden.

Die Verknüpfung der angewandten Untersuchungsmethoden bildet eine interessante Aufgabe, zeigt aber auch die Grenzen der entstehenden Kartierung der Permafrostverbreitung.

### 3. Feldarbeit

#### 3.1 Luftbildkartierung

Die Luftbildkartierung der morphologischen Phänomene stellt die Ausgangslage für Felduntersuchungen dar. Im Vordergrund stehen 2 Formenelemente: a) Blockgletscher und b) perennierende Schneeflecken:

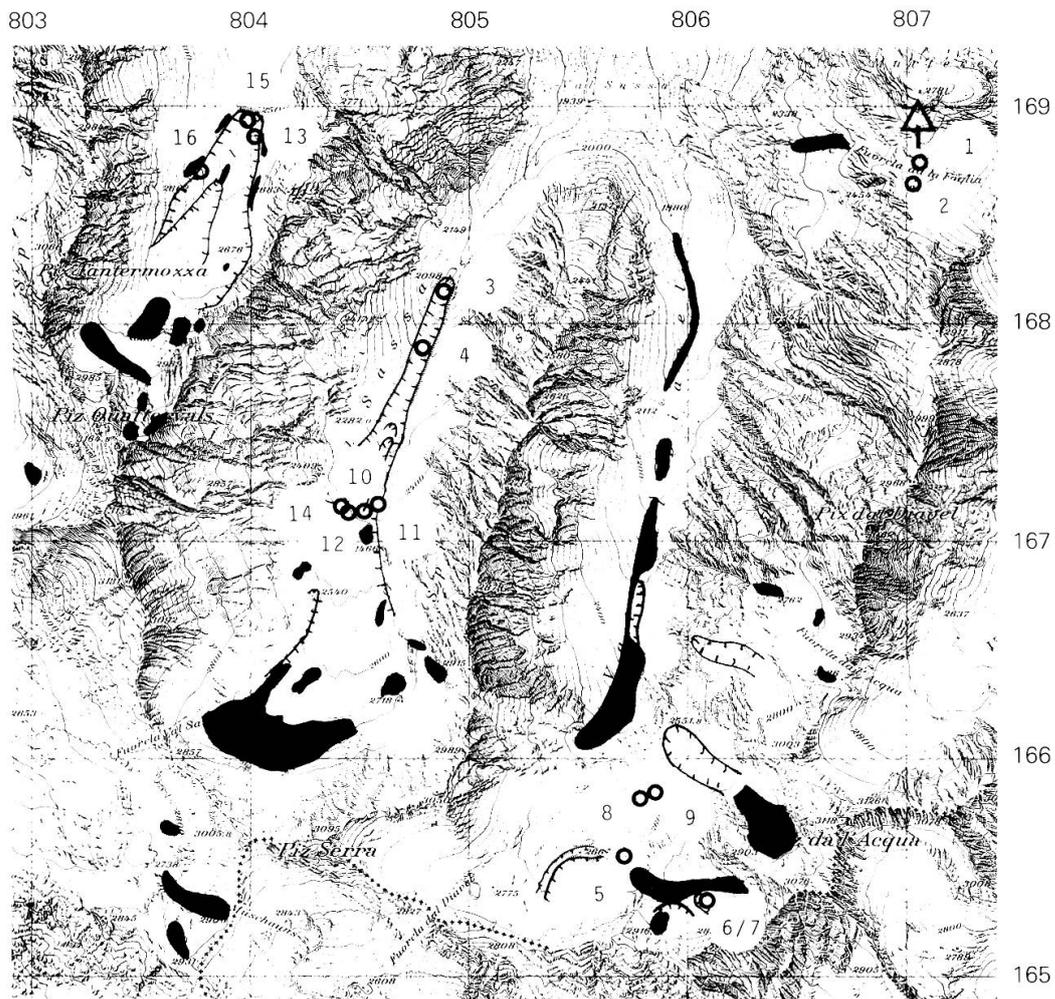
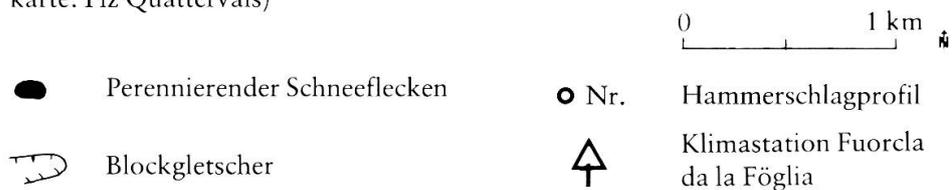


Abbildung 2: Luftbildkartierung und Standorte der Hammerschlagprofile. (Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 8. Februar 1988. Landeskarte: Piz Quattervals)



a) Blockgletscher: Geologisch gesehen besteht der Nationalpark aus den Quaternals-Decken, welche vor allem aus Hauptdolomit der oberen Trias gebildet werden. Das Inneralpine Klima bewirkt heute eine Niederschlagsarmut, welche eine Gletscherbildung verunmöglicht. Die Temperaturen der nivalen Höhenstufe, Dolomit als Ausgangsgestein, sowie die Trockenheit bilden zusammen eine ideale Voraussetzung für eine ausgeprägte Blockgletscherbildung (Val Sassa, Val da l'Acqua und Valetta).

b) Schneeflecken, welche das ganze Jahr überdauern (= **perennierende Schneeflecken**) deuten auf Permafrostexistenz hin. Perennierende Schneeflecken können von saisonalem Schnee nach einem warmen, trockenen Sommer im September identifiziert werden, sofern kein Neuschnee eingetreten ist.

Anhand der Luftbilder der Schweizerischen Landestopographie vom September 1973 wurde eine erste Arbeitskarte der Verteilung der perennierenden Schneeflecken und der Blockgletscher gezeichnet, welche als Grundlage für die Standortwahl der Hammerschlagseismik benutzt wurde (Abb. 2).

### 3.2 Hammerschlagseismik

#### Einführung in das Refraktionsverfahren

Die Erkenntnisse aus der Seismologie (Erdbebenkunde) liefern die Grundlagen für das Verhalten von elastischen Wellen und damit auch die Basis für die Entwicklung von seismischen Verfahren. Schon seit den siebziger Jahren (BARSCH, 1971) werden seismische Methoden zur Untersuchung von Alpinem Permafrost verwendet.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten von seismischen Wellen hängen vom beteiligten Material ab. Auf der Erdoberfläche breitet sich die sogenannte **Oberflächenwelle** kreisförmig. Nach unten breiten sich die seismischen Wellen kugelförmig aus. Trifft nun eine solche Wellenfront auf eine seismisch schnellere Schicht, wird die Welle gebrochen. Ähnlich der Oberflächenwelle breitet sich auf der Schichtgrenze eine kreisförmige Welle aus. In alle anderen Richtungen werden wieder Kugeloberflächen ausgebildet, entsprechend den seismischen Geschwindigkeiten. So gelangen also immer wieder Wellensignale von unten an die Oberfläche. Für die Hammerschlagseismik ist nun nur das Auftreten einer seismisch schnelleren Schicht von Bedeutung. Liegt nämlich ein solcher Fall vor, trifft ab einer bestimmten Entfernung vom Startpunkt einer Welle, die **refraktierte Welle** (Welle, die den Umweg über den schnelleren Untergrund nimmt) vor der Oberflächenwelle ein. Dabei nimmt sie den folgenden Weg (Abb.3): Gleichschnell wie die Oberflächenwelle dringt die betrachtete Welle in die Tiefe vor. Erreicht sie nun eine schnellere Schicht, so wird sie gebrochen und läuft nun mit höherer Geschwindigkeit dieser Schicht entlang. Von jedem Punkt dieser Schicht gelangt wieder eine Welle an die Oberfläche zurück. Ab der **Knickpunktdistanz (Xc)** wird diese refraktierte Welle vor der Oberflächenwelle eintreffen. Bei der Hammerschlagseismik wird nun die Zeit von der Auslösung einer Welle bis zum Eintreffen des ersten Wellensignals gemessen, wobei die Distanz zwischen Auslösung und Messung variiert wird.

Die Hammerschlagseismik eignet sich zur Beantwortung der Frage, ob an einem bestimmten Punkt Permafrost vorliegt. Der grosse Geschwindigkeitsunterschied zwischen gefrorenem und ungefrorenem Material, sowie die geringen Auftautiefen erlauben den Einsatz der tragbaren Hammerschlagseismik.

Die Berechnung der seismischen Geschwindigkeiten ist sehr einfach. Die Geschwindigkeit berechnet sich als Quotient aus Distanz und Zeitdifferenz. Für die grössere Geschwindigkeit bilde man die Differenz aus 2 Messpunkten, die zur refraktierten Welle gehören. Existiert eine seismisch schnellere Unterlage, entsteht das typische Bild von 2 (oder mehr) sich schneidenden Geraden, welche die Oberflächenwelle und die refraktierte Welle darstellen. Die Berechnung der Sichtdicke ist ein trigonometrisches Problem, welches in den folgenden Formeln gelöst wird.

$$v_1 = \frac{x_c}{t_c}$$

$$v_2 = \frac{x_2 - x_c}{t_2 - t_c}$$

Berechnung der Wegstrecke der refraktierten Welle:

$$\overline{G'F'} = GF = \frac{D}{\cos \alpha t} \quad \overline{F'F} = X - 2D \frac{\sin \alpha t}{\cos \alpha t}$$

Berechnung der Laufzeit der refraktierten Welle:

$$t = \frac{2(FG)}{v_1} + \frac{(FF')}{v_2} = \frac{x}{v_2} + \frac{2D \cos \alpha t}{v_1}$$

Tiefe D der schnelleren Schicht:

$$D = \frac{x_c}{2} \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}}$$

wobei  $x_c = \frac{2D \cdot \cos \alpha t}{v_1 \cdot \left( \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right)}$

Tabelle 1. Typische seismische Geschwindigkeiten (KING 1984)

$v_p$ in m/s	Material
300 bis 650:	trockener Blockschutt
500 bis 1100:	feinmaterialreicher Schutt
1100 bis 2000:	feuchter oder wassergesättigter Schutt
1800 bis 3000:	Permafrostmaterial mit Temperaturen von 0° C oder wenig darunter
2700 bis 3700:	Permafrostmaterial mit Temperaturen unter -1° C
3500 bis 3700:	Lockermaterial mit Temperaturen unter -2° C
3500 bis 3800:	Gletschereis, je nach Temperatur und Tiefe

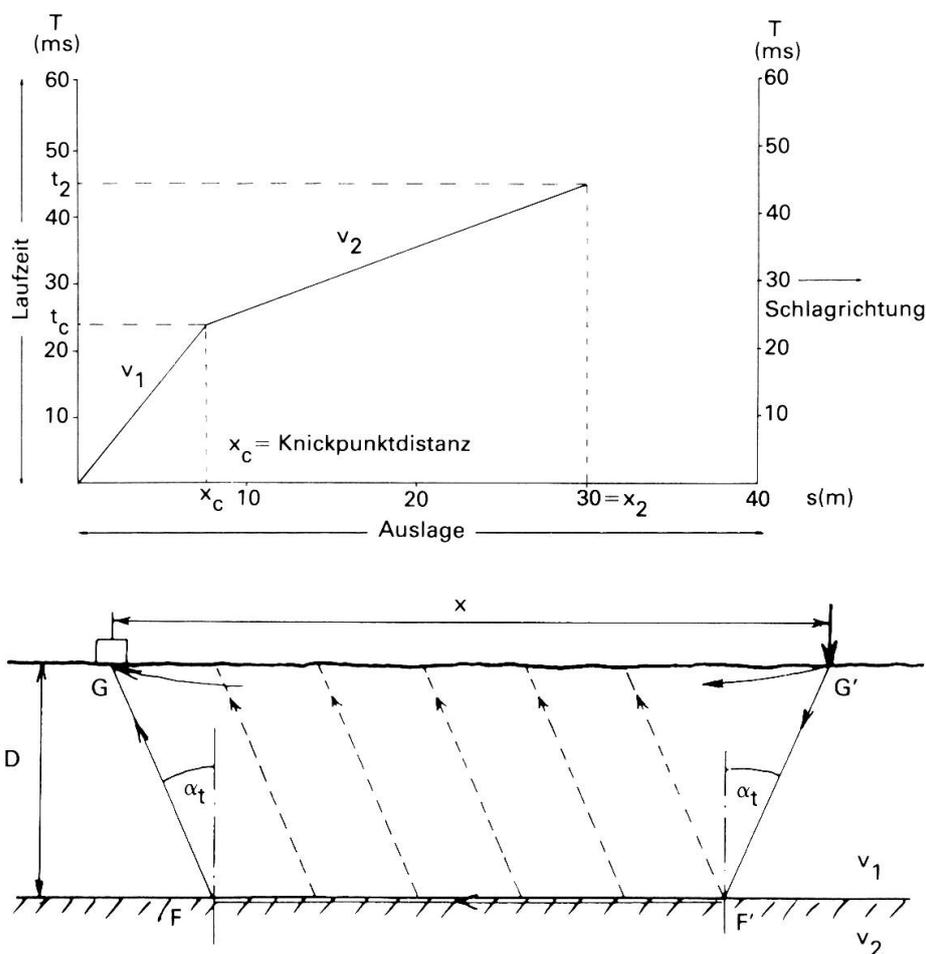


Abbildung 3: Berechnung der Schichtdicke im Refraktionsverfahren.

### Hammerschlagseismik auf dem Blockgletscher Val Sassa

Der Blockgletscher Val Sassa wird schon seit 1918 untersucht. Damals konnte CHAIX (1923) eine Wandergeschwindigkeit von 1,4 m/Jahr feststellen. DOMARADZKI (1951) beschrieb den Blockgletscher eingehend und stellte eine Abnahme der Aktivität fest. Die ersten refraktionsseismischen Untersuchungen führte BARSCH (1973) durch. Er schlug 8 Profile auf der Stirne. Nach seinen Messungen liegt direkt unter der Stirnoberkante der gefrorene Schuttkörper tiefer als 10 m (S. 159). 100 m oberhalb der Stirne liegt die gemessene Auftautiefe bei 5 m. Auch er spricht von einer Abnahme der Aktivität. Mich interessiert nun die Fortsetzung dieser Entwicklung.

Zu dritt schlugen wir u.a. auf dem Blockgletscher der Val Sassa 16 Profile, deren Standorte in der beiliegenden Karte ersichtlich sind. An den Standorten der Hammerschlagprofile 3 und 4 konnte ich keinen Permafrost identifizieren, so dass von einer weiteren Fossilisierung im Stirnbereich gesprochen werden kann. Nun gilt es aber zu beachten, dass der Blockgletscher Val Sassa im Vergleich zu denjenigen in den Nachbartälern eine relativ niedrige Höhenstufe von 2100 m ü. M. erreicht hat

und wohl dadurch ausapert. Wieweit sich auch die klimatisch Erwärmung unseres Jahrhunderts auf das Verhalten des Blockgletschers ausgewirkt hat, ist schwer abzuschätzen. Dieser Frage versuche ich durch den folgenden Ansatz nachzugehen (Abb. 4).

Die Profile 10, 11, 12 und 14 bilden einen Querschnitt durch den Blockgletscher und seine nähere Umgebung. Die gewählte Höhenlage von 2400 m. ü. M. wurde nach 2 Gesichtspunkten gewählt: 1. Die Permafrostuntergrenze dürfte sich in dieser Gegend in NO-Exposition auf dieser Höhe befinden. 2. Die «Nachbarblockgletscher» befinden sich ebenfalls in der gewählten Höhenlage, so dass Vergleiche möglich sind.

Die Auswertung der zugehörigen Profile zeigt, dass der Übergangsbereich von aktivem zu passivem Permafrost sich auf dieser Höhe befindet. Die Permafrostuntergrenze liegt etwa auf 2300 m. ü. M. Während die Profile 11 und 12 auf Permafrost hinweisen, befindet sich das Profil 14 auf einem eisfreien Schuttkamm, welcher in Zusammenhang mit einer am Standort 10 vermuteten Felsrippe stehen könnte.

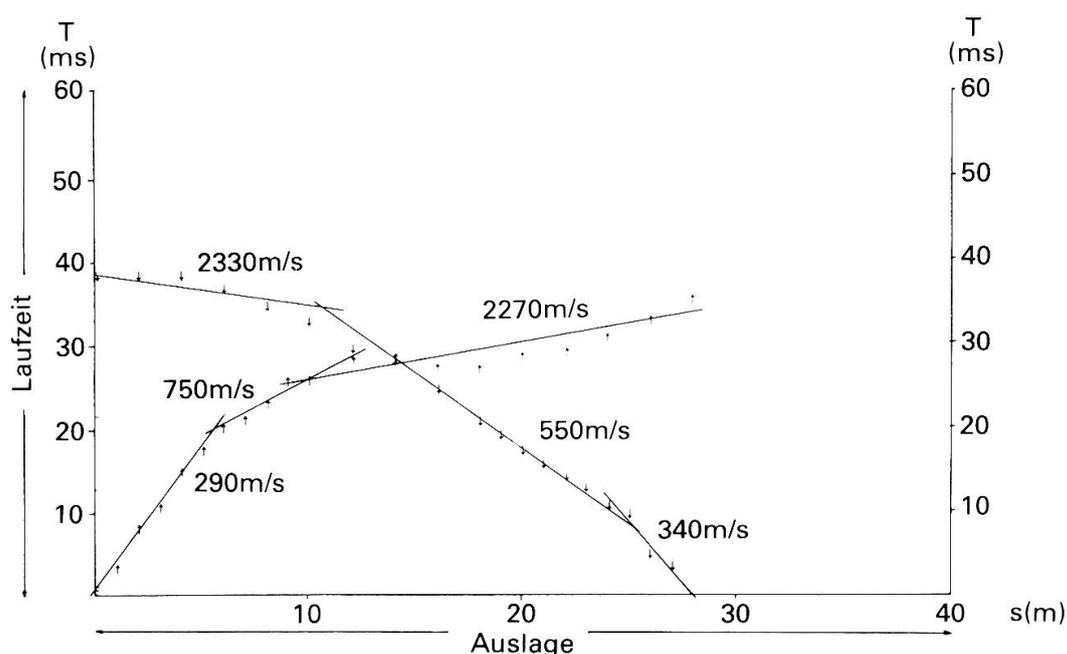


Abbildung 4: Das Refraktionsseismische Profil Nr. 12 ist ein Beispiel aus dem gewählten Talquerschnitt. Der aus der entgegengesetzten Schlagrichtung gewonnene Mittelwert von  $v_3$  mit 2300 m/s liegt im Bereich von Permafrostmaterial um 0 Grad. Die gerechnete Tiefe der Permafrostoberfläche (Permafrostspiegel) beträgt  $D_2 = 5\text{m}$ .

### 3.3 Temperaturmessungen

Über die Permafrostexistenz entscheidet schlussendlich der zeitliche Verlauf der Bodentemperatur, welcher sich v.a. aus der Strahlung, der Lufttemperatur und dem Wärmefluss aus dem Erdinnern zusammensetzt. Die Bodentemperatur hängt somit von der Bodentiefe ab. Wie lassen sich nun die 3 genannten Einflussgrößen trennen?

Klimastation auf der Fuorcla da la Fögli (2700 m ü. M.)

Auf der Fuorcla da la Fögli wurde jede 3 Stunden die Temperatur 150 und 5 cm über Boden, sowie in 5 und 50 cm Bodentiefe gemessen. Das daraus entstandene Bild (Abb. 5) zeigt deutlich die Dämpfung von Temperaturschwankungen mit zunehmender Tiefe. Während im Sommer die Bodentemperatur im Wesentlichen von der Lufttemperatur bestimmt wird, trennt im Winter die isolierende Schneedecke den Luft- vom Bodentemperaturverlauf (vgl. BTS-Messungen). Weiter stellt sich nun die Frage, ob die Bodentemperatur statistisch signifikant bei schönen Sommertagen schwächer mit der Lufttemperatur korreliert als bei Tagen mit Bewölkung. Ist eine solche Abweichung feststellbar, dürfte es sich dabei um den Einfluss der Strahlung handeln.

Abb. 5 zeigt die neuesten Messwerte für die Zeit vom August 1986 bis Februar 1987. Die genaue Auswertung dieser Daten erfolgt bei FLURY (1988). Der Fühler «-5 cm» zeigt im Februar eine Temperatur von ca.  $-5^{\circ}\text{C}$ . Bei der Annahme, dass mehr als 1 m Schnee zu dieser Zeit lag, wäre dies eine BTS, die Permafrost anzeigt.

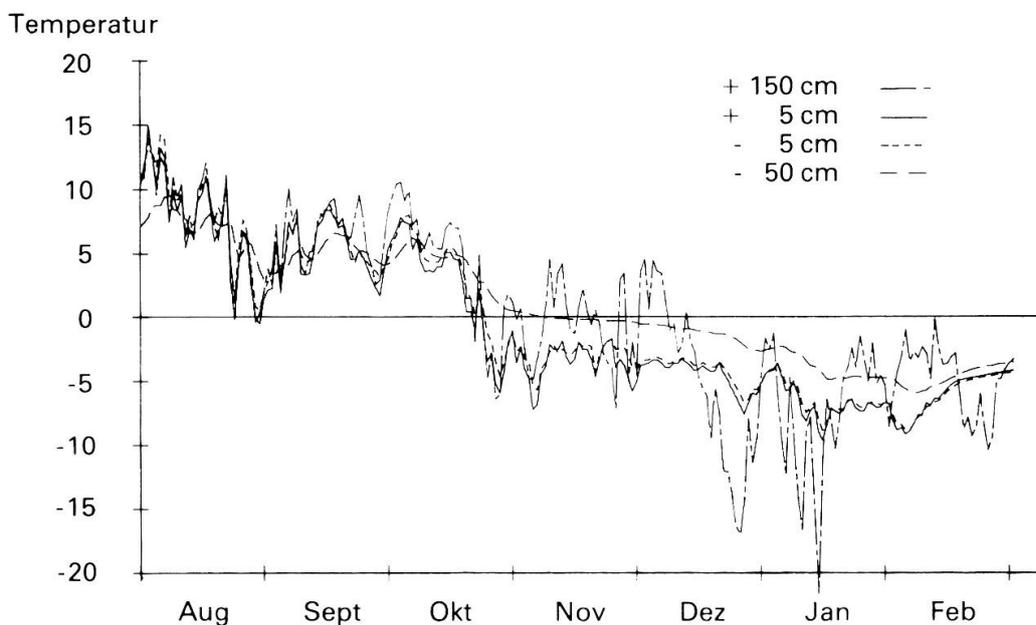


Abbildung 5: Diese Grafik zeigt den Verlauf der Temperatur in verschiedenen Lagen während den Monaten August 1986 bis Februar 1987. Deutlich ist die Dämpfung mit zunehmender Tiefe erkennbar. (Grafik M. Flury)

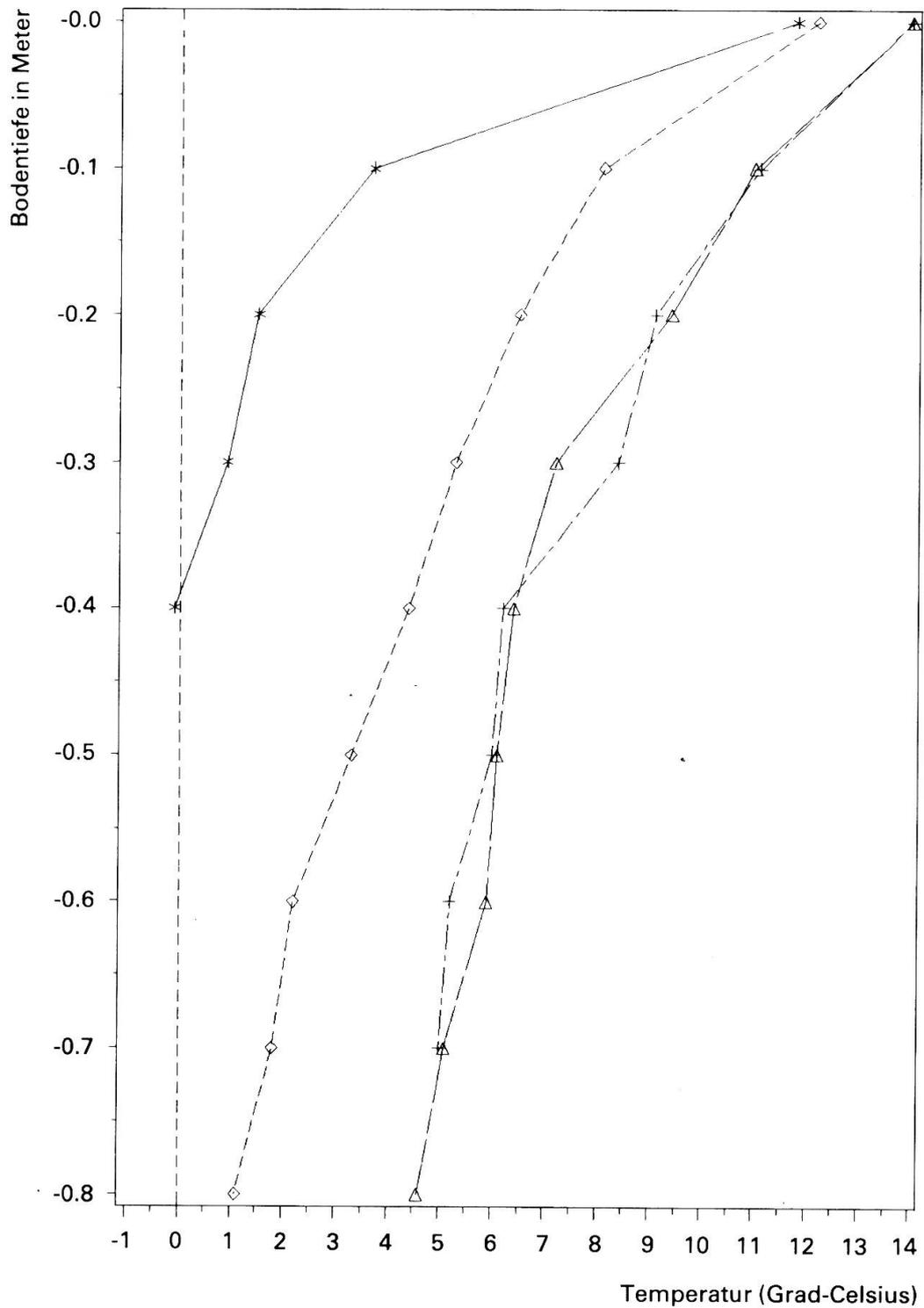


Abbildung 6: Temperaturprofile am Piz Nair (Nordostexposition).

Höhe: \* = 2780 m ü.M. ◇ = 2750 m ü.M. + = 2720 m ü.M. △ = 2690 m ü.M.

Messdatum: 30. Juli 1986

## BTS-Messungen

Die Idee der Messung der Basis-Temperatur der Schneedecke (BTS) beruht auf dem Umstand, dass sobald mehr als 1 m Schnee liegt, der geothermische Wärmefluss die Temperatur am Übergang Schnee-Boden bestimmt (HABEBERLI, 1973). Liegt nun unter dem Messstandort ein Permafrostkörper, so zeigen die bisherigen Messungen, dass die BTS kälter als  $-3^{\circ}\text{C}$  ist. Beträgt sie weniger als  $-2$  Grad liegt kein Permafrost vor. Das Unsicherheitsintervall befindet sich zwischen  $-2$  und  $-3^{\circ}\text{C}$ .

Die BTS-Methode ist eine zuverlässige und hocheffiziente Untersuchungsmethode zur Permafrostkartierung. Weitere Vorteile liegen in der attraktiven Anwendung. Im Gegensatz zur 20 kg schweren Hammerschlagseismik lassen sich BTS-Messungen mit leichten Messgeräten im hochwinterlichen Februar durchführen.

Im Frühjahr 1986 führte ich im Val Tuoi ausserhalb des Untersuchungsgebietes solche Messungen durch. Wie bereits erwähnt, konnten wir im vergangenen Winter wegen Lawinengefahr keine BTS-Messungen im Nationalpark durchführen.

## Einfache Temperaturmessungen

Die Messung von Quellwassertemperaturen, wie auch diejenige der Abkühlung des Bodens mit zunehmender Tiefe gibt ohne grossen Aufwand gute Hinweise über die Permafrostexistenz. Beispiel: In einer Schutthalde wollte ich die lokale Untergrenze der Permafrostverbreitung ermitteln. In der Nordostflanke des Piz Nair (Koord. 817/172) hob ich mit dem Spaten alle 30 Höhenmeter ein Loch aus und mass die Temperatur. Das Bild der entstehenden Temperaturkurve (Abb. 6) zeigt, ob mit einem Durchgang durch 0 Grad zu rechnen ist. Ab einer gewissen Tiefe ist mit dem Einfluss der Erdwärme zu rechnen, welcher der Abkühlung entgegenwirkt. Während ich annehme, dass das Profil auf 2750 m. ü. M. etwa in 1 m Tiefe 0 Grad erreicht, wird die nächsttiefere Höhenlage von 2720 m. ü. M. eher im positiven Bereich bleiben. Diese Messung ergibt für die Permafrostuntergrenze eine Höhe von 2740 m. ü. M. ( $\pm 15\text{m}$ ).

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Die Blockgletscher Valletta, Val Sassa und Val dal Diavel

Bereits aus grosser Entfernung zeichnet sich der Piz Quattervals durch die drei scharf geschnittenen Täler Valletta, Val Sassa und Val dal Diavel aus, die sich alle in gleicher nordöstlicher Exposition befinden. Der triadische Dolomit sorgt für einheitliche geologische Voraussetzungen. In Bezug auf die Höhenlage und das Relief sind folgende Unterschiede festzuhalten: Die Valletta besitzt von 1800 m. ü. M. bis 2800 m. ü. M. (Talkessel) auf 2,8 km Länge den grössten Höhenunterschied. Der Blockgletscher liegt relativ flach und endet oberhalb einer grossen Stufe. Die Val Sassa liegt mit einer Länge von 3,5 km zwischen 1800 m. ü. M. und 2850 m. ü. M. (Fuorcla Val Sassa). Das Tal öffnet sich gegen oben und endet in einem grossen schuttgefüllten Kessel. Die Val dal Diavel endet nach 3,5 km auf einer Höhe von 2820 m. ü. M. (Fuorcla dal Diavel). Der untere flache Talabschnitt wird durch steile Schutthalden begrenzt. Auf 2500 m. ü. M. liegt eine Stufe, die den Talabschluss formt. Im Gegensatz zu den anderen beiden Tälern fehlt in der Val dal Diavel ein eigentlicher Talkessel mit Schuttakkumulation. Hingegen existieren einige Senken, die durch wallartige Schuttakkumulationen begrenzt sind. Die einerseits gleichen Grundvoraussetzungen (Geologie, Mesoklima und Exposition) und andererseits unterschiedliche Reliefs und Höhenlagen bilden eine gute Ausgangslage, die unterschiedliche Blockgletscherausbildung als Produkt der variierenden Umweltfaktoren zu analysieren.

Die bearbeiteten Daten entstammen aus der Luftbildkartierung, den refraktionsseismischen Profilen, sowie Feldbeobachtungen.

Zur Luftbildkartierung: In allen drei Tälern sind grössere perennierende Schneeflecken vorhanden. Während in der Val dal Diavel der ewige Schnee bis hinunter auf 2000 m. ü. M. anzutreffen ist, beschränkt er sich in den beiden Nachbartälern auf Höhen über 2600 m. ü. M., d. h. auf die Talkessel. Der Vergleich der Ausdehnung der Blockgletscher zu derjenigen der Schneeflecken zeigt eine erneute Sonderstellung der Val dal Diavel, durch die Existenz von perennierendem Schnee unterhalb der Blockgletscherzunge.

Mit Hilfe der Hammerschlagseismik wurde der Aufbau der Blockgletscher untersucht. Die Profile auf dem Blockgletscher Valletta (13, 15 und 16) weisen auf eine Permafrostauftautiefe von weniger als 6 m hin, sodass von einem aktiven Blockgletscher gesprochen werden kann. In der Val Sassa wurden 6 Profile geschlagen, vier auf dem Blockgletscher und zwei unmittelbar neben dem Blockgletscher. Auf 2400 m. ü. M. befindet sich die Grenze zwischen aktivem und passivem Permafrost. Die Profile in der Val dal Diavel befinden sich oberhalb des kleinen Blockgletschers. Interessanterweise deuten die Profile 8 und 9 bereits auf 2600 m. ü. M. auf die Permafrostuntergrenze, so dass der höchstgelegene Punkt des soeben genannten kleinen Blockgletschers etwa 100 m unter dieser Grenze liegt.

Die Feldbeobachtungen konzentrieren sich auf Quellwassertemperaturen und Hinweisen aus dem Grad der Vegetationsbedeckung. Die dreimalige Messung der Wassertemperatur am Austritt des Blockgletschers Valletta ergibt einen Mittel-

wert von  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Im vordersten Teil des Blockgletschers treten vereinzelt ausgesprochene Pionierpflanzen auf. Etwa 550 m unterhalb der Stirne des Blockgletschers Val Sassa tritt ein Bach an die Oberfläche mit einer Wassertemperatur von  $1,2^{\circ}\text{C}$ . Auf dem Blockgletscher Val Sassa sind grössere Pflanzenpolster, die wahrscheinlich keine mechanischen Störungen durch Blockgletscherbewegung erleiden, anzutreffen. Entsprechend dem Namen der Val dal Diavel (Teufelstal) enthält die durch Schnee geprägte Talsohle keine Vegetation. Hingegen existieren auf 2660 m. ü. M. im westlichen Talabschluss bis zu  $5\text{ m}^2$  grosse Graspolster. Die unterschiedliche Blockgletscherausbildung in den drei untersuchten Tälern zeigt fast modellhaft die Bedeutung der einzelnen Umweltgrössen: Feuchtigkeit, Temperatur und Relief. Zusätzlich zur klimabedingten Trockenheit, liegt ein NO ausgerichtetes Tal im Niederschlagsschatten vom Süd- wie auch vom Nordwetter. Dieser Einfluss wird durch das Berninamassiv im Süden, sowie die Silvretta im Norden verstärkt. Insbesondere der Talkessel in der Val Sassa erinnert mit seinen grossen Schneeflecken an ein trockenes Gletscherkar. In allen drei Tälern ist die Voraussetzung bezüglich Trockenheit erfüllt. Die zweite genannte Umweltgrösse, die Temperatur, hat zur Folge, dass der höher gelegene Blockgletscher Valletta aktiv ist, während der Blockgletscher Val Sassa in tieferen Lagen als inaktiv zu bezeichnen ist. Die sich unter der Permafrostuntergrenze befindende Höhenlage des Blockgletschers in der Val dal Diavel führt uns zum dritten Umwelteinfluss, dem Relief. Der flache stufenartige Talabschluss verhindert eine grössere Schuttakkumulation, die zu einer zu den Nachbartälern vergleichbaren talfüllenden Blockgletscherbildung führt. So entstehen an jeder Schutthalde kleinere Blockgletscherzungen. Der enge steilbegrenzte untere Talabschnitt enthält in der Talsohle isolierte Permafrostkörper, welche durch Lawinenschnee verursacht werden. Die Schuttproduktion ist äusserst intensiv, denn ein grosser Teil der Schneemassen liegt unter einer Schuttdecke, so dass dieses Phänomen im Luftbild nicht erkannt werden kann. Es ist anzunehmen, dass damit der Strahlungshaushalt an der Oberfläche verändert wird. Ob daraus eine positive oder negative Energiebilanz resultiert, kann ich nicht beurteilen; die wichtigsten Einflussgrössen dürften Strahlungsintensität (Ein- und Austrahlung), Schichtdicke und beteiligtes Material darstellen. Die durch Permafrost gekennzeichnete Talsohle bildet die Voraussetzung für die Ausbildung des kleinen Blockgletschers unterhalb der Permafrostuntergrenze. In diesem Fall erscheint es mir sinnvoll von einem reliefbedingten Blockgletscher zu sprechen.

## 4.2 Permafrostverbreitung im Nationalpark

Das Zusammenspiel von Klima und Relief bestimmt im Wesentlichen das Permafrostverbreitungsmuster. Im Rahmen des Regionalklimas hängt die Temperatur an der Bodenoberfläche von der Höhenlage und der Strahlungsmenge ab. Alle Untersuchungen zur Frage der Untergrenze des diskontinuierlichen Permafrostes weisen darauf hin, dass im Nationalpark in der Regel die Permafrostuntergrenze 100 m höher liegen könnte, als HAEBERLI (1985) für andere Gebiete in den Faustregeln zusammenfasst. Die Strahlungsmenge wird in erster Linie durch die Expo-

sition bestimmt. So ist in der Abb. 8 ein klarer Unterschied zwischen nördlicher und südlicher Orientierung festzustellen. Erreicht die Permafrostuntergrenze an Südexpositionen Höhen bis 3200 m. ü.M., muss in NW-Exposition bereits ab 2600 m. ü.M. mit Permafrost gerechnet werden. Aufgrund der tieferliegenden Permafrostuntergrenze sind West-Expositionen im Vergleich zu Ost-Expositionen als kälter zu bezeichnen. Die Ursache kann auf 2 Prozesse zurückgeführt werden:

1. Im Durchschnitt nimmt im Laufe des Tages der Wasserdampfgehalt zu, so dass die Morgenstrahlung stärker als die Abendstrahlung auf die Bodenoberfläche wirkt (HAEBERLI, 1975 s. 177).

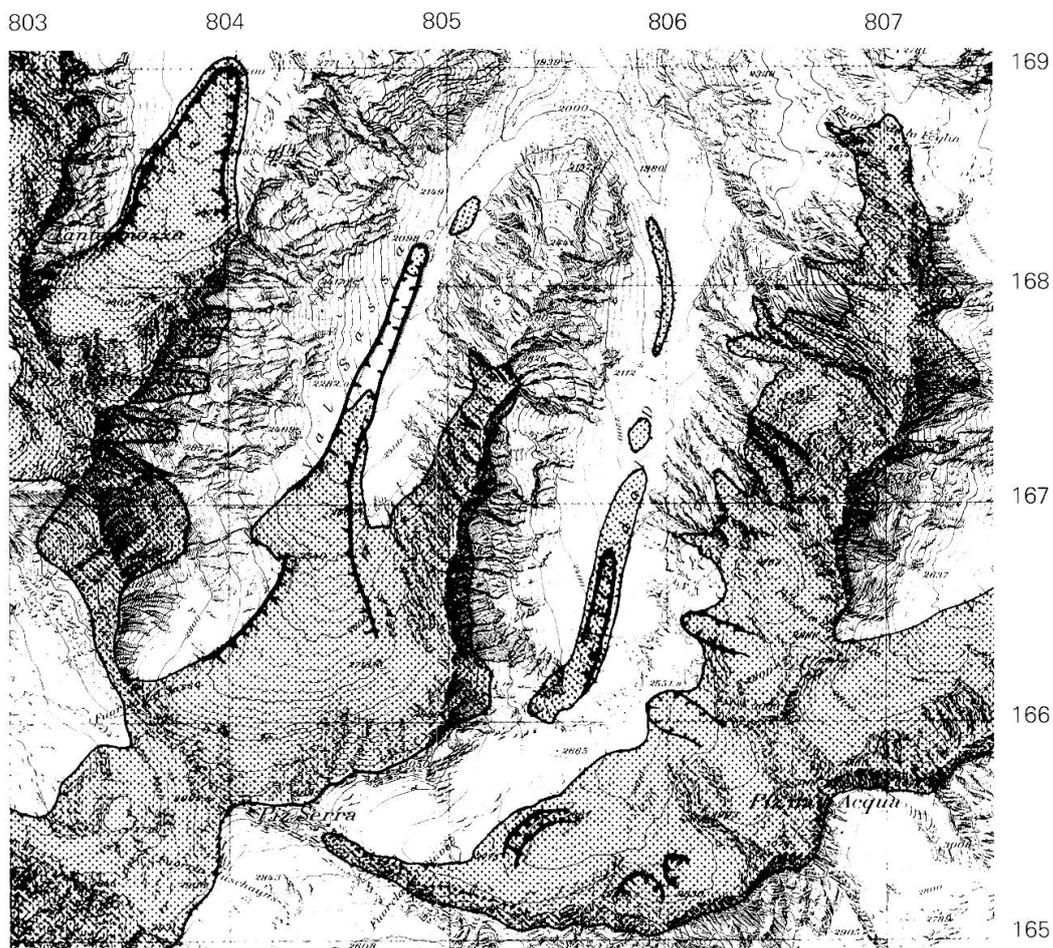


Abbildung 7: Permafrostverbreitung im Schweizerischen Nationalpark. (Ausschnitt Valletta, Val Sassa, Val dal Diavel. Reproduziert mit der Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 8. Februar 1988. Landeskarte: Piz Quattervals.)

-  Permafrostgebiet (mutmasslich)
-  Blockgletscher

0 1 km 

2. Aufgrund des Westwindes sind Schneeverfrachtungen in NO-exponierten Hängen häufiger anzutreffen als in Westhängen. Eine dünne Schneedecke könnte somit zu einer grösseren Bodenabkühlung führen.

Das Relief kann lokal die Permafrostuntergrenze verschieben oder sporadische Permafrostkörper verursachen. In der Val dal Diavel sorgt auf dem Permafrostspiegel abfliessendes Wasser für eine Senkung des diskontinuierlichen Permafrostbereichs um etwa 100 m. Weitere reliefbedingte Einflüsse auf die Permafrostuntergrenze sind schattenspendende Gipfel in der näheren Umgebung, die praktisch immer zu berücksichtigen sind. Sporadische Permafrostkörper entstanden in der Val dal Diavel unter altem Lawinschnee, der u.a. auch auf das Relief zurückzuführen ist.

Über die klimatischen Verhältnisse der subnivalen Höhenstufe in den Alpen weiss man bis heute noch wenig. Als Folge des Zusammenspiels von Klima und Relief stellt das Permafrostverbreitungsmuster einen Schritt zur Charakterisierung des Hochgebirgsklimas dar. Zudem sind aufgrund der langen Reaktionszeit auf Klimaveränderungen Rückschlüsse auf frühere Verhältnisse möglich.

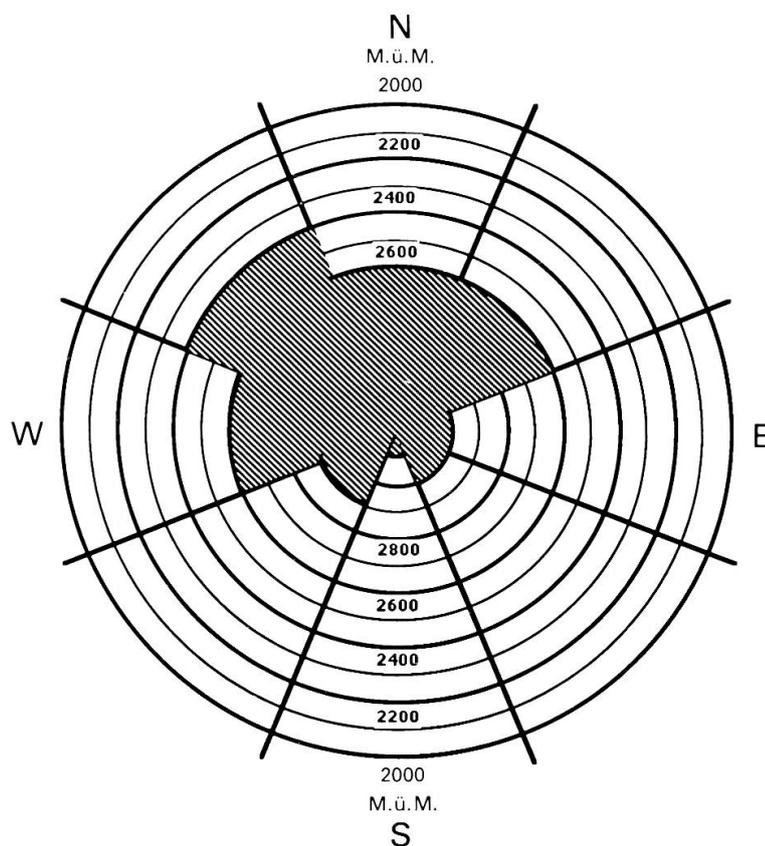


Abbildung 8: Schlüssel zur Permafrostverbreitung. (Nach Faustregeln von HAEBERLI, 1985.) Die Abbildung zeigt die Permafrostverbreitung in Abhängigkeit von Höhe und Exposition. Unsicherheitsbereich: 200 m unterhalb.

 Permafrost wahrscheinlich

## 5. Zusammenfassung

Im Rahmen einer Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Zürich wurde der Nationalpark hinsichtlich Permafrostverbreitung untersucht. In Zusammenhang mit den Unwettern von 1987, der Frage nach Klimaveränderungen, sowie dem möglichen Einfluss auf die Lawinentätigkeit, wird der Zweck der Untersuchungen dargestellt. Nach der Beschreibung der verwendeten Untersuchungsmethoden folgen ausgewählte Ergebnisse der Arbeiten auf den Blockgletscher Valletta, Val Sassa und Val dal Diavel, sowie ein grober Überblick zur allgemeinen Permafrostverbreitung im Nationalpark.

## 6. Literatur

- BARSCH, D. (1973): Refraktionsseismische Bestimmung der Obergrenze des gefrorenen Schuttkörpers in verschiedenen Blockgletschern Graubündens, Schweizer Alpen. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie Bd IX., S. 143–167
- BARSCH, D. (1978): Rock glaciers as indicators of discontinuous Alpine permafrost. An example from the Swiss Alps. Third International Conference on Permafrost.
- CHAIX, A. (1923): Les Coulées de blocs du Parc National Suisse d'Engadine. In: Le Globe 62, S. 1–35, Genève.
- DOMARADZKI, J. (1951): Blockströme im Kanton Graubünden. In: Ergebnisse d. wiss. Untersuchungen des Schweiz. Nationalparkes, Band 3 (NF) Nr. 24, S. 177–235.
- FLURY, M. (1988): Mikroklimatische und standortkundliche Untersuchungen in der Alpen Stufe des Schweiz. Nationalparkes, Diplomarbeit, UNI-Zürich, 117 S.
- FURRER, G. & FITZE, P. (1970): Beitrag zum Permafrostproblem in den Alpen. Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft, Zürich, S. 213–221.
- JÄCKLI, H. (1981): Der Blockstrom in der Val da l'Acqua im Schweizerischen Nationalpark. Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft 1978, wissenschaftlicher Teil, S. 213–221.
- GAMPER, M. (1981): Heutige Solifluktuationsbeiträge von Erdströmen und klimamorphologische Interpretation fossiler Böden. In: Ergebnisse d. wiss. Untersuchungen des Schweiz. Nationalparkes, Band XV, S. 355–443.
- HÄBERLI, W. (1973): Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen in: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Bd. XII, Heft 2, S. 221–227.
- HÄBERLI, W. (1975): Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (GR), Diss. UNI-Basel, Mitteilungen der VAW Nr. 17, ETH-Zürich, 221 S.
- HÄBERLI, W. (1982): Klimarekonstruktion mit Gletscher-Permafrost-Beziehungen. In: Materialien zur Physiogeogr. 4: S. 9–17, Basel.

- HÄBERLI, W. (1985): Creep of mountain permafrost: Internal structure and flow of Alpine Rock Glaciers. Mitteilungen der VAW Nr. 77, ETH-Zürich, 142 S.
- KING, L.: Permafrost in Skandinavien, Untersuchungsergebnisse aus Lappland, Jotunheimen und Dovre/Rondane, UNI-Heidelberg, 251 S.
- STEURI, M. (1988): Solifluktion und Schneedeckenaufbau im Schweiz. Nationalpark, Diplomarbeit UNI-Zürich, 65 S.
- VORNDRAN, G. (1972): Kryopedologische Untersuchungen mit Hilfe von Bodentemperaturmessungen (an einem zonalen Strukturvorkommen in der Silvretta-Gruppe), UNI München, 70 S.
- WASHBURN, A.L. (1979): Geocryology: A survey of periglacial processes and environments, Arnold London, 406 S.

