

# Gravimetrische Untersuchungen im Permafrost des Blockgletschers Murtèl-Corvatsch (Oberengadin)

Autor(en): **Klingelé, E. / Vonder Mühl, D.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural**

Band (Jahr): **91 (1993)**

Heft 10

PDF erstellt am: **17.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-234984>

## **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.

# Gravimetrische Untersuchungen im Permafrost des Blockgletschers Murtèl-Corvatsch (Oberengadin)

E. Klingelé, D. Vonder Mühl

Auf dem eishaltigen, dauernd gefrorenen Terrain eines kriechenden Permafrostkörpers unterhalb des Piz Corvatsch (Oberengadin) wurden gravimetrische Messungen durchgeführt. Die beobachtete Schwereanomalie von maximal  $-1.5$  mgal erlaubt mit Hilfe von Bohrlochinformationen eine dreidimensionale Modellierung der Dichteverteilung über den ganzen Körper. Der Fels weist unter dem Blockgletscher die Form einer Schüssel auf.

*Des mesures gravimétriques ont été effectuées sur le glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch en contrebas du Piz Corvatsch (Haute Engadine). L'anomalie gravimétrique observée, d'une amplitude de  $-1.5$  mgal, a permis, grâce aux informations obtenues à partir de forages, de réaliser un modèle en trois dimensions de la répartition des densités sur l'ensemble du corps du glacier. Sours ce dernier, le rocher en place a la forme d'une cuvette.*

## Einleitung

In den Alpen tritt Permafrost oder Dauerfrostboden vor allem oberhalb der Waldgrenze auf, wo das Jahresmittel der Bodentemperatur negativ ist. Die Verbreitung hängt in erster Linie von der Lufttemperatur, dem Strahlungsangebot und vom Schnee (-dauer, -mächtigkeit) ab. Diese drei Grössen sind untereinander gekoppelt. In extrem schattigen Lagen, wo der Schnee lange liegen bleibt, kann sogar unterhalb der Waldgrenze Permafrost beobachtet werden. Aber auch Bodenbeschaffenheit, Wasserverfügbarkeit und Geologie spielen für die Verbreitung eine Rolle. Wo der Bodenfrost im Sommer nicht vollständig auftaut, bildet sich im Verlaufe der Zeit eine bis zu mehreren Dekametern mächtige Schicht im Untergrund, welche negative Temperaturen aufweist. Eindringendes Wasser, gleich ob es sich um Regen-, Schmelz- oder Grundwasser handelt, gefriert. Im Sommer taut an der Oberfläche eine einige Dezimeter mächtige Schicht (Auftauschicht) bis hinunter zum Permafrostspiegel auf. Liegen Schutthalten im Permafrost, bildet sich das Eis zunächst in den Zwischenräumen, bis das Geröll eisgesättigt ist. Wenn der Prozess weitergeht, entsteht ein eisübersättigtes Gemisch, in welchem das Eis bis weit über 50% des Volumens einnehmen kann. Das führt zu Hebungerscheinungen. Solche eisübersättigte, gefrorene Schutthalten kriechen, bedingt durch das sich unter der Schwerkraft deformierende Eis, mit einigen Zentimetern bis Dezimetern pro Jahr talwärts. Auffällige Formen des kriechenden Permafrostes nennt man Blockgletscher, obwohl weder ihre Entstehung, noch die Form oder die Charakteristik mit

einem klassischen Gletscher verglichen werden kann. Gletscher entstehen nämlich primär infolge einer positiven Schneebilanz und werden zur Hydrosphäre gezählt, während der Permafrost und somit auch die Blockgletscher ein Temperaturphänomen der Lithosphäre ist. Blockgletscher weisen meist eine Oberfläche mit grobblockigem Schutt auf und haben eine lavastromähnliche Form: interne Fliegsstrukturen (Rücken und Gräben) und steile Ränder (siehe Abb. 1). Ähnlich wie Lavaströme sind Blockgletscher nahe dem Schmelzpunkt talwärts fließende Körper. Die Stirn, der vorderste Teil des Blockgletschers, kann meist in drei Zonen unterteilt werden: zuoberst liegen die vom hinteren Teil nachstossenden grossen Blöcke. Fallen sie herunter, werden sie am Fusse der Stirn, als sogenannte Schuttschürze angelagert. Zwischen diesen beiden grobblockigen Zonen liegt ein aus Feinmaterial bestehender Teil, welche den natürlichen Böschungswinkel der trockenen Schüttung aufweist. Der Aktivitätsstand eines Blockgletschers kann in den Alpen anhand der Vegetation bestimmt werden. Durch die ständige Bewegung der Oberfläche und den wasserundurchlässigen Permafrostspiegel, welcher für eine Auswaschung des bodenbildenden Feinmaterials sorgt, können sich auf einem aktiven Blockgletscher kaum Pflanzen ansiedeln. Insbesondere im mittleren, aus Feinmaterial bestehenden Teil der Stirn werden die heranwachsenden Pflanzen durch herunterstürzende Blöcke dauernd zerstört. Wenn der Blockgletscher eine tiefere Höhenlage oder ein weniger abgeschattetes Gebiet erreicht, ändern sich die lokalklimatischen Bedingungen

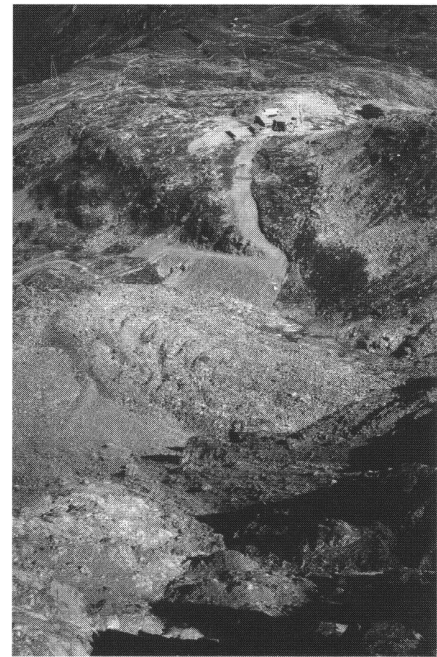
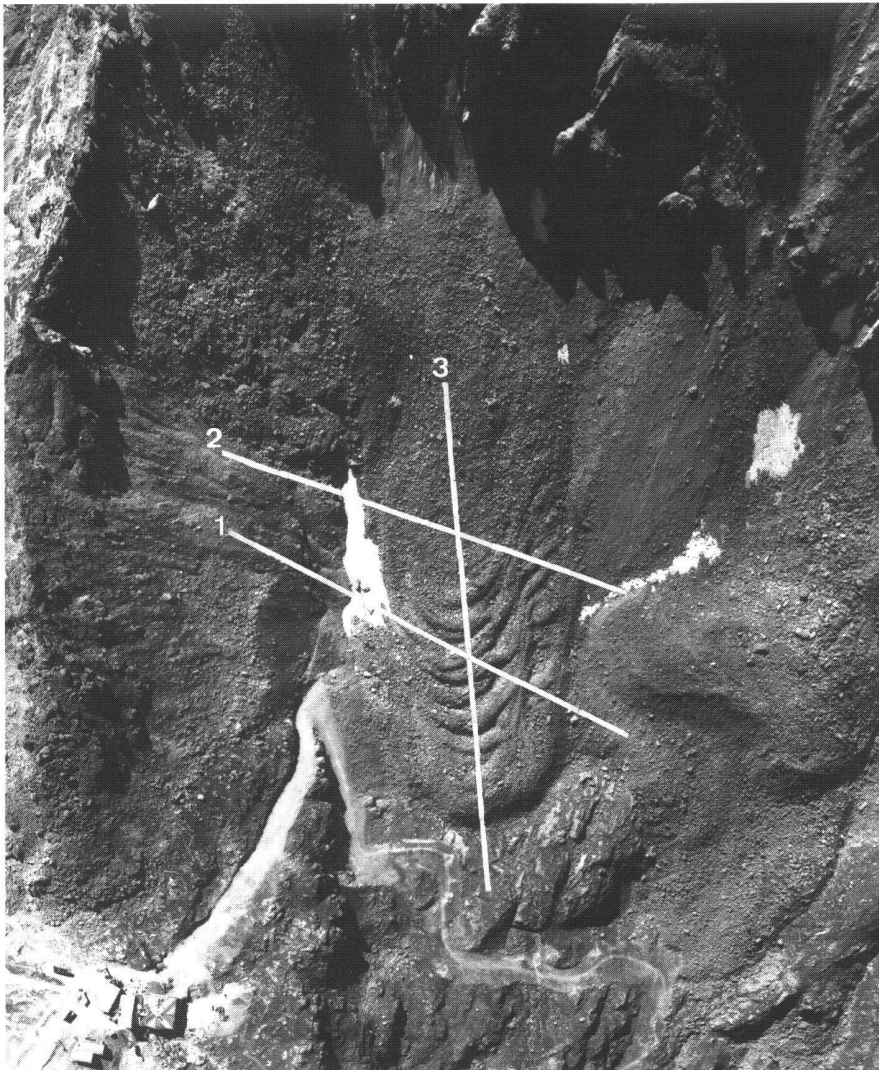


Abb. 1: Foto auf den Blockgletscher Murtèl-Corvatsch und die Mittelstation Murtèl der Luftseilbahn Surlej-Corvatsch, von welcher aus die Skipiste deutlich zu sehen ist. Der Blockgletscher zeichnet sich durch seine markanten Rücken und Gräben, welche als Folge des kompressiven Fließens entstanden sind, und durch die steilen Ränder aus. Er stösst auf permafrostfreies, vegetationsbedecktes Terrain vor. Foto: W. Schmid, VAW-ETH Zürich; November 1987.

und ein Teil des Eises schmilzt langsam aus. Dadurch wird das Kriechen des Blockgletschers abgebremst. Die Stirn wird dann vor allem im feinmaterialreichen Mittelteil von Vegetation besiedelt; man spricht von inaktiven Blockgletschern. Ist sämtliches Eis ausgeschmolzen, kollabiert das Gebilde, und es bleibt ein dicht bewachsener, reliktscher Blockgletscher übrig.

In den niederschlagsarmen Gebieten der Alpen, namentlich im südlichen Wallis und in Südbünden, sind viele Blockgletscher verschiedener Aktivitätsstufen zu beobachten.

Kurzfristig kann das Permafrostes steile Schutthalten hinsichtlich Erosionsprozesse stabilisieren. Bei der Ursachenanalyse der Unwetterereignisse von 1987 (Haeberli et al., 1991) wurde festgestellt, dass viele Murgänge an der unteren Verbreitungsgrenze des Permafrostes losgebrochen waren. Sollten sich die Klimaprognosen dahingehend bewahrheiten, dass sich die Atmosphäre durch anthropogen verursachte Effekte erwärmt, müsste mit einem Abschmelzen des Permafrostes und entsprechend mit einer Häufung von Murgangereignissen im Hochgebirge gerechnet werden.



**Abb. 2:** Die Mittelstation der Luftseilbahn (unten links) und die Skipiste dienen auf diesem Luftbild als Orientierung. Der Blockgletscher Murtèl-Corvatsch kriecht vom Fusse der Felswand talwärts. Die ganzjährig bestehenden (perennierenden) Schneeflecken sind typisch für Permafrostgebiete. Westlich (rechts) des untersuchten Blockgletschers befindet sich ein weiterer, der sich durch eine steile, hohe Stirnfront auszeichnet. Foto: Vermessungsflugdienst V+D, 8600 Dübendorf; 30. Aug. 1991.

## Der Blockgletscher Murtèl-Corvatsch

Ein sehr schön ausgeprägtes Exemplar eines Blockgletschers liegt nahe der Mittelstation der Luftseilbahn auf den Piz Corvatsch. Tektonisch gehört das Gebiet zur Corvatschdecke, eine der untersten Formationen des Ostalpins. Der 400 m lange und knapp 200 m breite aktive Blockgletscher weist ein prononciertes Relief auf. Durch kompressibles Fliessen haben sich im unteren Teil transversale Rücken und Gräben gebildet. Die Oberfläche wird durch zahllose, grobe Blöcke aus der rückwärtigen, kristallinen Felswand geprägt. Bereits in den frühen siebziger Jahren wurden erste refraktionsseismische Messungen von Barsch (1973) für die Bestimmung der Auftauschichtmächtigkeit durchgeführt. Eine erste Bohrung bis auf 10 m ergab, dass der Permafrost des Blockglet-

schers eisreich (50–60 Vol%) ist (Barsch, 1977). Weitere geophysikalische Abklärungen wurden von King et al. (1987) durchgeführt. Zwei geoelektrische Tiefensondierungen zeigten, dass der Permafrost mit einem elektrischen Widerstand von 600 k $\Omega$ m deutlich niedrigere Werte aufweist als Gletschereis (>10 M $\Omega$ m). Die Radarechos, welche auf dem Blockgletscher aufgenommen wurden, waren undeutlich, weil die Signale im Blockschutt stark gedämpft und gestreut wurden. 1987 konnte auf dem Blockgletscher Murtèl-Corvatsch eine 62 m tiefe Kernbohrung bis in den Fels realisiert werden (Haeberli et al., 1988). Weil das Bohrloch nicht mit Wasser aufgefüllt werden konnte, lieferte die Bohrlochgeophysik nebst dem Kaliberlog (Bohrlochdurchmesser) nur für die Gammasondierungen (Dichtemessung) zuverlässige Resultate (Vonder Mühl and Holub, 1992). Im Dichtelog wie auch in der

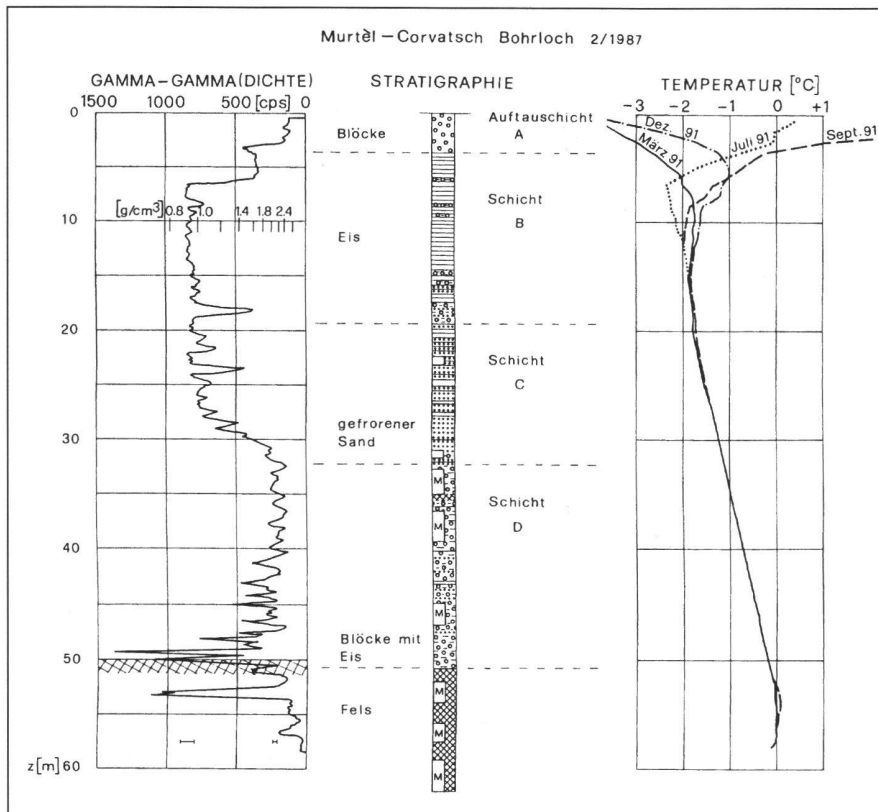
Kernstratigrafie (Abb. 3) kristallisierte sich eine markante Zweiteilung heraus: unter der grobblockigen, 3 m mächtigen Auftauschicht folgt eine Schicht aus fast reinem Eis. Zwischen 30 m Tiefe und dem Fels in 57 m Tiefe besteht der Blockgletscher aus eisgesättigten Blöcken, d.h. der Eisgehalt beträgt 30–40 Vol%. Ausser Temperaturfühlern wurden im Bohrloch ein Slope-Rohr für die horizontale und Magnetringe für die vertikale Deformationsbeobachtung installiert. Die mittlere Oberflächentemperatur liegt an der Bohrstelle bei  $-3^{\circ}\text{C}$ . Die Temperaturen sind bis in eine Tiefe von 58 m negativ, wobei zwischen 50 m und 55 m ein saisonales Auftauen beobachtet wird. Der Permafrost reicht bis in den Fels. Die Deformationsmessungen zeigen, dass 75% der Oberflächenbewegung von 6 cm/Jahr in 28–30 m Tiefe auftreten (Wagner, 1992). Dieser eigentliche Scherhorizont ist also für das Bewegungsfeld des Blockgletschers im Bereich des Bohrloches entscheidend. Die Bewegungsbeträge im cm-Bereich pro Jahr erfordern eine präzise geodätische Vermessung. Auch die Oberflächendeformationen werden mittels zweier Strain-Rosetten geodätisch bestimmt. Vom Gebiet des Blockgletschers Murtèl-Corvatsch existiert ein detaillierter digitaler Höhenkurvenplan mit einer Äquidistanz von 2 m. Die Dichteverteilung an der Stelle des Bohrloches wurde aufgrund des Gamma-Gamma-Logs (Dichtelog) der Bohrlochgeophysik bestimmt. Der oberflächennahe, eisübersättigte Teil, aber auch die darunterliegende gesättigte Schicht, weisen gegenüber dem anstehenden Fels eine deutlich geringere Dichte auf. Folglich ist mit einer gravimetrischen Anomalie über dem eisreichen Teil zu rechnen. Ausserdem hat die Gravimetrie gegenüber den bereits zum Einsatz gekommenen Methoden den Vorteil, dass die komplizierte Oberflächenstruktur bei der Auswertung mitberücksichtigt wird und die Tiefenwirkung wesentlich besser ist.

Die gravimetrische Methode wurde im Permafrost bisher kaum angewendet. Séguin and Freydecki (1990) haben z.B. im nördlichen Quebec, welches im kontinuierlichen Permafrostgürtel liegt, Eislinien mittels Gravimetrie, induzierter Polarisation und Geoelektrik untersucht. Ausgeprägte gravimetrische Anomalien werden auch auf Gletschern beobachtet (Klingelé and Kahle, 1977).

## Theoretische Grundlagen

Das Schwerfeld an der Erdoberfläche hängt von fünf Faktoren ab:

- 1.) von der geographischen Breite,
- 2.) von der Höhe über Meer,
- 3.) von der Topographie der Umgebung,



**Abb. 3:** Eine Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse der Bohrung 2/1987: Die Stratigraphie der Bohrkerns (Mitte), die Messungen des Dichte-Logs (links), bei welchem die Werte tiefer als 40 m durch Kavernen und Auswaschungen im Bohrloch stark gestört sind, und das Temperaturprofil (rechts). Aufgrund der Stratigraphie und des Dichte-Logs wurden für die Auswertung vier Schichten unterschieden: Die Auftauschart (A) bis in 3 m Tiefe, eine Schicht (B) aus fast reinem Eis (3–20 m), eine Eis-Silt-Sand-Schicht (C) bis 30 m und die Schicht D mit Blöcken, deren Zwischenräume mit Eis gefüllt sind.

- 4.) von den Gezeiten sowie
- 5.) von der Dichteverteilung im Untergrund.

Der Einfluss der ersten vier Faktoren kann mit grosser Genauigkeit berechnet werden. Das Schwerfeld für ein Modell mit homogener Dichteverteilung im Untergrund ist also bekannt. Dementsprechend erlauben Messungen, welche unter Berücksichtigung der ersten vier Faktoren korrigiert werden, Rückschlüsse auf die Dichteverteilung im Untergrund. Die Differenz zwischen der gemessenen Schwere und der berechneten für eine homogene Dichteverteilung ( $g_{\text{Modell}}$ ) ergibt die sogenannte Schwereanomalie  $\Delta g$ :

$$\Delta g = g_{\text{gemessen}} - g_{\text{Modell}}$$

Der Einfluss der Gezeiten wird gemäss EAEG (1990) berechnet und der gemessene Schwerewert direkt korrigiert. Das homogene Modell wird stufenweise für jeden Faktor berechnet:

#### a) Effekt der geographischen Breite

Unter der Annahme, dass die Erde annähernd die Form eines Rotationsellipsoides

aufweist, ergibt sich der theoretische Wert der Schwere  $\gamma_0$  auf Meereshöhe als Funktion der geographischen Breite  $\varphi$ :

$$\gamma_0 = g_e(1 + \alpha \cdot \sin^2\varphi + \beta \cdot \sin^2 2\varphi)$$

wobei:

$$g_e = \text{Schwere am Äquator} = 9.7803185 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$\alpha = 0.053024$$

$$\beta = 0.0000059$$

#### b) Effekt der Höhe über Meer

Weil die Messstation in der Regel nicht auf dem Referenzellipsoid liegt, muss im Modell die Höhe über Meer mitberücksichtigt werden. Dies geschieht in zwei Schritten: Zunächst wird die Distanz  $\Delta H$  zwischen dem Ellipsoid und der Stationshöhe korrigiert:

$$\Delta g_{FL} = \frac{\partial \bar{g}}{\partial z} \Delta H$$

mit:  $\Delta g_{FL}$  = Höhenbedingte Schwereänderung, auch Freiluft-Korrektur genannt

$$\frac{\partial \bar{g}}{\partial z} = \text{Mittlerer vertikaler Schweregradient} (-0.3086 \text{ mgal/m, } 1 \text{ mgal} = 10^{-5} \text{ ms}^{-2})$$

$\Delta H = z =$  Höhe über dem Ellipsoid.

Im zweiten Schritt wird die Massenanziehung des Materials zwischen der Station und dem Ellipsoid berechnet, welche oben unberücksichtigt blieb. Der Einfachheit halber wird dabei eine homogene, unendlich ausgedehnte Platte (Bouguerplatte) tangential zum Ellipsoid angenommen. Somit ist die Korrektur  $\Delta g_B$  gegeben durch:

$$\Delta g_B = G\rho \iiint_{-\infty}^{\infty} \frac{z \, dx \, dy \, dz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} = G\rho \cdot 2\pi \cdot z$$

Die gesamte Höhenkorrektur ist also ( $[z] = \text{m, } [\rho] = \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ):

$$\Delta g_{\text{Höhe}} = \Delta g_{FL} + \Delta g_B = 0.3086 z + G \cdot 2\pi \cdot \rho z = -0.3086 \cdot z + 0.0419 \cdot \rho z$$

$$G = \text{Universelle Gravitationskonstante} = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$$

#### c) Topografischer Effekt

Bei der Berechnung des zweiten Terms der Höhenkorrektur wurde zwischen dem Referenzellipsoid und der Station eine horizontale Platte angenommen. Der Effekt von Tälern und Bergen wurde noch nicht berücksichtigt. Der Einfluss der Topographie auf die Schwere muss aber ebenfalls in Betracht gezogen werden. Üblicherweise geschieht dies mittels numerischer Integration eines digitalen Geländemodells. Daraus geht der topographische Faktor T hervor.

Schliesslich ergibt sich also für die Schwereanomalie  $\Delta g_{\text{Bouguer}}$  [mgal]:

$$\Delta g_{\text{Bouguer}} = g_{\text{gemessen}} - [\gamma_0 - 0.3086 \cdot z + 0.0419 \cdot \rho z - \rho T]$$

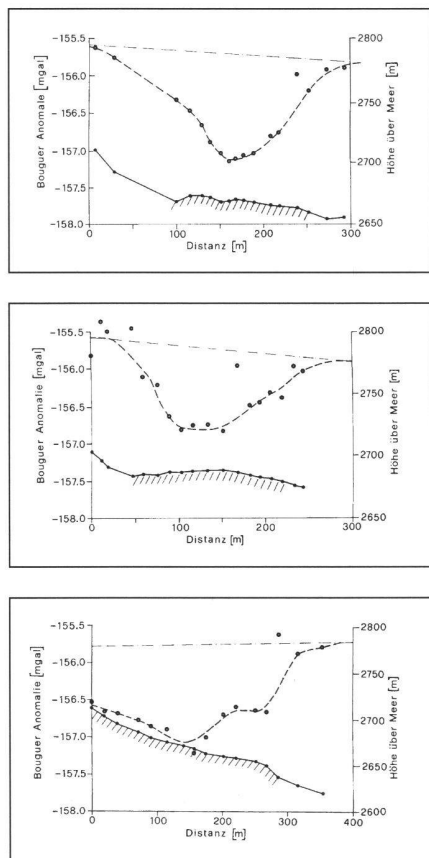
$$\rho = \text{Gesteinsdichte} [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$$

$$T = \text{Berechnete Topographiekorrektur für } \rho = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}.$$

## Gravimetrische Messungen und Korrekturen

Im Sommer 1991 wurden insgesamt drei gravimetrische Profile auf dem Blockgletscher Murtèl-Corvatsch aufgenommen (siehe Abb. 2). Profil 1 besteht aus 17 Punkten und verläuft quer zur Fließrichtung genau über das Bohrloch 2/1987. Profil 2, ebenfalls ein Querprofil mit 18 Messpunkten, liegt ca. 50 m oberhalb von Profil 1. Das dritte Profil (Profil 3) verläuft als Längsprofil von der Blockgletscherstirn über das Bohrloch bis in ca. 2720 m ü.M. Die Punkte wurden so ausgewählt, dass





**Abb. 4: Gemessene (Kreise) und geglättete (gestrichelte Linie) Werte der Bouguer Anomalie entlang der Profile 1 (oben), 2 (Mitte) und 3 (unten). Die topographische Korrektur bis 167 km Entfernung wurde mit der Reduktionsdichte von  $2670 \text{ kg m}^{-3}$  berechnet. Der regionale Trend ist durch die strich-punktierte Linie gegeben. Die Topografie der Messpunkte (ausgezogene Linie) sowie der auf dem Blockgletscher liegende Teil der Profile (schraffierter Bereich) ist unten dargestellt.**

die Korrektur der Nahtopographie (Dezimeterbereich) vernachlässigt werden konnte, d.h. dass die nächste Umgebung der Punkte möglichst ähnlich waren. Jeder Punkt wurde mit dem automatisch registrierenden Theodoliten T1600 und dem Distanzmessgerät DI3000 von einem Fixstativ aus vektoriell eingemessen. Die Lage der Punkte wurde in Schweizer Landeskoordinaten berechnet. Neben den drei Profilen wurden einige Punkte um den Blockgletscher herum aufgenommen, um den regionalen Trend des Schwerfeldes zu bestimmen.

Für die gravimetrischen Messungen wurde ein LaCoste and Romberg G-Gravimeter verwendet. Das absolute Schwerfeld wurde bei der Kirche Silvaplana gemessen, einer Station erster Ordnung des Schweizer Schwerenetzes. Die Instrumentendrift wurde durch regelmässige Kontrollmessungen an derselben Station beobachtet. Während den Messungen war

die Drift kleiner als  $5 \mu\text{gal}$  pro Stunde. Sowohl die Drift als auch der Effekt der Gezeiten wurden direkt bei der Berechnung der gemessenen Schwere korrigiert.

Die Breiten- und Höhenabhängigkeit wurde gemäss den oben erwähnten Grundlagen berechnet. Bei der Reduktion des topografischen Effektes war sowohl das ausgeprägte Relief des Blockgletschers als auch der alpinen Umgebung zu berücksichtigen. Im Umkreis von 100 m um die Station wurde ein digitales Geländemodell mit einer Maschenweite von 5 auf 5 m benutzt. Entfernungen zwischen 100 m und 2500 m wurden mit einem Gitterabstand von je 50 m modelliert. Der Einfluss jeder Gitterzelle wurde mittels der rechtwinkligen Prismenformel nach Nagy (1966) berechnet. Das Gelände, welches zwischen 2.5 km und 26 km von der Station entfernt ist, wurde in ein Gitter von 1 Bogenminute Abstand eingeteilt, zwischen 26 km und 167 km wurde über 3 Bogenminuten-Elemente gemittelt. Diese Korrekturen erfolgten nach der «line-of-mass»-Formel mittels der Methode von Plouff (1966). Für sämtliche Korrekturen wurde mit einer für Granite typischen Dichte von  $2.67 \text{ g cm}^{-3}$  gerechnet. Dieser Wert geht auch aus dem Gamma-Gamma-Log hervor.

Da die Methode der Gravimetrie additiv ist, ergibt sich die gesamte Anomalie als Summe aller Teilanomalien, produziert von Störkörpern, welche von der Reduktionsdichte abweichen. Die gravimetrische Interpretation beginnt folglich immer mit der Beschränkung auf die interessierende Struktur. Die Form einer Anomalie hängt direkt mit der Grösse und/oder der Tiefe des Störkörpers ab. Grosse und/oder tiefgelegene Körper erzeugen Anomalien mit grosser Wellenlänge. Solche Anomalien nennt man Regionalanomalien, die verbleibende heisst Residualanomalie.

Im Falle des Blockgletschers Murtèl-Corvatsch setzt sich die Anomalie aus der Überlagerung der Effekte des eishaltigen Permafrostes und der Grossstruktur der Alpen zusammen. Letztere ist aufgrund der grossen Tiefe der Alpenstruktur im Untersuchungsgebiet eine schwach geneigte Ebene. Die Regionalanomalie entspricht also einer Ebene resp. einer Geraden durch die Profilpunkte, welche ausserhalb des Blockgletschers liegen. Aus der Abbildung 4 geht eine nach Westen leicht abnehmende regionale Anomalie mit einem Mittelwert von ungefähr  $-156 \text{ mgal}$  hervor. Die Nord-Süd verlaufende Komponente ist indessen schwierig zu bestimmen, da im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes kein Fels zutage tritt. Die daraus resultierende Unsicherheit für die Residualanomalie wird mit  $\pm 0.1 \text{ mgal}$  beziffert.

## Modellierung

Die gravimetrische Interpretation besteht darin, den die Schwereanomalie verursachenden Störkörper zu bestimmen. Es gibt dazu zwei Möglichkeiten: die indirekte Methode, auch Modellierung oder «trial and error» genannt, und die direkte Methode oder Inversionsmethode. Bei letzterer wird versucht, direkt anhand der Anomalie auf die Form des Störkörpers zu schliessen. Diese Methode wird eingesetzt, wenn der Störkörper eine einheitliche Dichte aufweist. Wie das Dichtelog der Bohrung 2/1987 zeigt, ist diese Bedingung für den Blockgletscher Murtèl-Corvatsch jedoch nicht erfüllt. Bei der indirekten Methode wird die Massenverteilung des Untergrundes aufgrund von der Gravimetrie unabhängiger Parameter (Informationen aus Bohrlöchern, anderen geophysikalischen Methoden, der Geomorphologie oder der Geologie) vorgegeben und die daraus resultierende Schwereanomalie berechnet. Diese wird mit der gemessenen Anomalie verglichen und die Geometrie der Massenverteilung entsprechend angepasst, bis die Differenz möglichst klein ist.

In einem ersten Schritt wurde eine Modellierung in  $2\frac{1}{2}$  Dimensionen (Cady, 1980) durchgeführt. Bei einem  $2\frac{1}{2}$ -dimensionalen Modell wird der Störkörper entlang dem Profil in polygonale Teilkörper unterteilt und seitlich parallel zum Profil über eine bestimmte Distanz ausgedehnt. Die daraus resultierenden Dichteverteilungen wurden für die 3-dimensionale Geometrie jeder Schicht des Störkörpers benutzt. Als Störkörper gilt für den vorliegenden Fall der kriechende Permafrostkörper, welcher aufgrund des darin enthaltenen Eises eine geringere Dichte aufweist als der anstehende Fels, für welchen eine homogene Dichte von  $2.67 \text{ g cm}^{-3}$  angenommen wurde. Massgebend für die in Abbildung 5 dargestellte Geometrie der modellierten Schichten war in erster Linie das Gamma-Gamma-Log (Dichte-Log) der Bohrung 2/1987 (siehe Abb. 3). Es wurden vier Schichten unterschieden:

### Schicht A:

Die grobblockige Auftauschicht, welche beim Bohrloch 3 m mächtig ist (Dichte:  $2.47 \text{ g cm}^{-3}$ ).

### Schicht B:

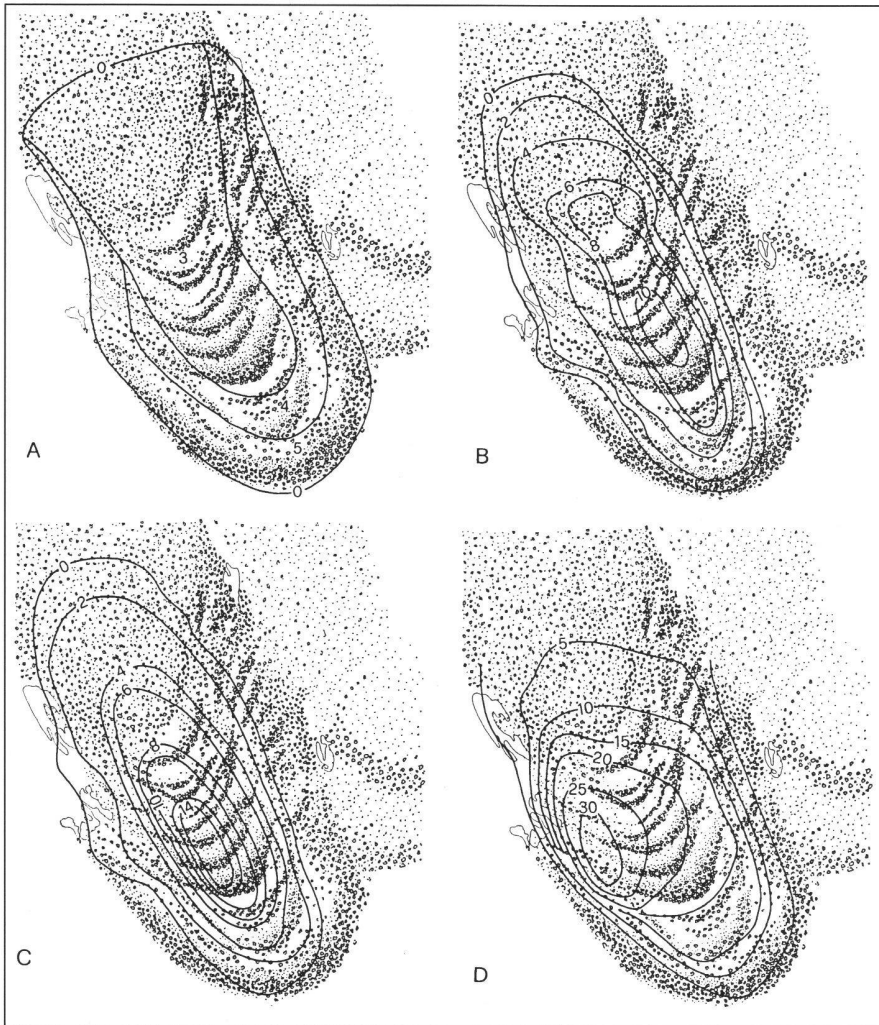
Das fast reine Eis bis in eine Tiefe von 20 m (Dichte:  $0.95 \text{ g cm}^{-3}$ )

### Schicht C:

Das etwas schwerere Eis-Sand-Gemisch zwischen 20 m Tiefe und dem Scherhorizont in 30 m (Dichte:  $1.00 \text{ g cm}^{-3}$ ).

### Schicht D:

Die zwischen dem Scherhorizont und dem Fels liegende Schicht besteht aus Blöcken, ähnlich wie sie an der Oberfläche vor-



**Abb. 5:** Mächtigkeiten der vier Schichten in Meter für die gravimetrische Modellierung. Die Struktur des Blockgletschers ist dem Luftfoto entnommen. Die Dichten der vier Schichten:  $2470 \text{ kg m}^{-3}$  (A),  $950 \text{ kg m}^{-3}$  (B),  $1000 \text{ kg m}^{-3}$  (C) und  $2200 \text{ kg m}^{-3}$  (D).

kommen. Die Zwischenräume sind mit Eis gefüllt (Dichte:  $2.20 \text{ g cm}^{-3}$ ).

Weitere Anhaltspunkte, vor allem für die Modellierung der vom Bohrloch entfernten Bereiche, gaben die Resultate der seismischen Untersuchungen von Barsch (Barsch 1973, Barsch und Hell 1975; insbesondere für die Mächtigkeit der Auftauschicht) sowie die Morphologie des kriechenden Permafrostkörpers allgemein und der auf der Ostseite des Blockgletschers anstehende Fels. Im Westen liegt ebenfalls ein Blockgletscher, welcher eine auffällige konvexe Form aufweist (siehe Abb. 2). Die Felstiefe zwischen den beiden Blockgletschern dürfte im Bereich weniger Meter liegen, da auf der Höhe der Stirn des untersuchten Blockgletschers der Fels an die Oberfläche tritt. Auf der orographisch linken Seite des Blockgletschers Murtèl-Corvatsch deutet die Präsenz von Feinmaterial und einigen Flechten und Pflanzen auf einen zunehmend inaktiv werdenden Permafrost und somit auf weniger Bodeneis hin. Die Abbildung 5 zeigt

die Mächtigkeitsverteilung der vier Schichten wie sie der letzten Berechnung zugrunde lag.

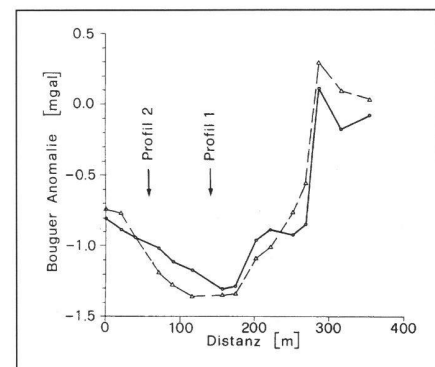
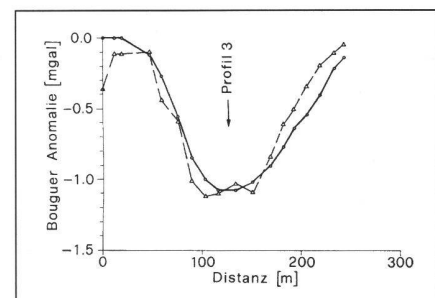
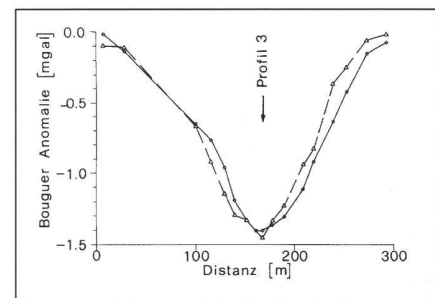
Die Geometrie der vier Schichten wurde durch vertikale, quadratische Prismen (10 auf 10 m) modelliert und deren Einfluss auf die Schwere, ähnlich der oben beschriebenen Methode für die topographische Korrektur, berechnet.

## Resultate und Diskussion

Die gravimetrischen Messungen im Gebiet des Blockgletschers Murtèl-Corvatsch ergaben für die Bouguer Anomalie einen Wert von ca.  $-156 \text{ mgal}$ , was mit der Schwerekarte der Schweiz (Klingelè et Olivier, 1980) übereinstimmt. Auf dem kriechenden Permafrost selbst ist die Schwere um bis zu  $1.5 \text{ mgal}$  geringer als im benachbarten Gelände. Die kleine Wellenlänge dieser Anomalie lässt darauf schließen, dass sie durch das Eis des Blockgletschers verursacht wird. Wie Abbildung 6 zeigt, führt die Modellierung zu einer Differenz von ungefähr  $0.1 \text{ mgal}$  zwi-

schen den gemessenen und den berechneten Werten. Dies entspricht einer Auflösung der Schichtmächtigkeiten von ungefähr  $5 \text{ m}$ , was angesichts der rauhen Topographie zufriedenstellend ist.

Die orographisch linke (westliche) Seite des Blockgletschers konnte aber auch nach mehreren Anpassungsversuchen nicht optimal modelliert werden (Profile 1 und 2). Auf dieser Seite liegt ein weiterer Blockgletscher, welcher sich durch die konvexe Form und die steile Stirnpartie deutlich abhebt. Aufgrund der auffälligen, markanten Form dürfte auch dieser Permafrost eisreich sein. Bei der Modellierung wurde für sämtliche Gebiete ausserhalb des Störkörpers eine einheitliche Dichte von  $2.67 \text{ g cm}^{-3}$  eingesetzt. Allfällige eishaltige und somit spezifisch leichtere Teilkörper wie der benachbarte Blockgletscher wurden also nicht berücksichtigt. Dementsprechend kann die nur bedingt zutreffende Modellierung erklärt werden. Die vier Schichten erstrecken sich über den Blockgletscher wie folgt:



**Abb. 6:** Gemessene (Kreise) und berechnete (Dreiecke) residuale Bouguer Anomalie entlang der drei Profile: 1 (oben), 2 (Mitte) und 3 (unten). Die Modellierung erfolgte in 3 Dimensionen gemäss den vier Schichten von Abbildung 3.

Schicht A: Die grobblockige Auftauschicht wurde mit einer Dichte von  $2.47 \text{ g cm}^{-3}$  modelliert, wobei der Wert eher die obere Grenze darstellt. Die Mächtigkeit nimmt gemäss Barsch (1973) von den randlichen Partien zur Mitte des Blockgletschers hin von 5 m auf 3 m ab. Das sind gemittelte Werte über die 10 mal 10 m grossen Flächen, denn in den Gräben ist die Auftauschicht lediglich einige Dezimeter mächtig.

Schicht B und C: Das fast reine Eis, welches sich in den Bohrkernen zwischen 3 und 20 m Tiefe erstreckt, mit einer Dichte von  $0.95 \text{ g cm}^{-3}$  (B) und der Teil bis zum Scherhorizont (C, Dichte:  $1.00 \text{ g cm}^{-3}$ ) bilden die beiden wesentlichen und leichten Schichten. Ihre Form wurde einerseits der Morphologie des Blockgletschers, andererseits den gravimetrischen Daten angepasst. So kristallisiert sich ein längliches Gebilde für diese beiden Schichten heraus, welche bis zu 17 m (B) resp. 10 m (C) mächtig sind. Die grössten Mächtigkeiten treten im Umkreis von ca. 30 m um das Bohrloch herum auf.

Schicht D: Die groben Blöcke, deren Porenraum eisgesättigt ist, erstrecken sich im Bohrloch zwischen dem Scherhorizont und dem Fels in 55 m Tiefe. Der Eisgehalt liegt bei 30–40 vol%, was einer Dichte von  $2.20 \text{ g cm}^{-3}$  entspricht. Offensichtlich taucht der Fels auf der Ostseite des Blockgletschers ziemlich steil ab und steigt zur Westseite fast bis zur Oberfläche auf. Es kann von einer eigentlichen Übertiefung gesprochen werden.

Der Blockgletscher Murtèl-Corvatsch hat sich unter den Permafrostbedingungen im Kar unter den Steilwänden, welche ihn südlich begrenzen, gebildet. Durch das Kriechen ist der Permafrostkörper im trogförmigen Felsbett talwärts vorgestossen. Die leichte Gegensteigung hatte eine Verlangsamung der Geschwindigkeit zur Folge, wodurch sich an der Oberfläche markante Stauchstrukturen (Rücken und Gräben) ausbilden konnten.

Die Bohrung 2/1987, welche ziemlich genau in der Mitte des Blockgletschers liegt, durchfuhr den Permafrost an der Stelle, an welcher die Schichtmächtigkeiten am grössten sind. Für die trog- oder rinnenförmige Struktur des anstehenden Fels spricht auch die Tatsache, dass in einer Tiefe von 50 m saisonale Temperaturschwankungen um  $0^\circ\text{C}$  beobachtet wer-

den. Diese Schwankungen werden als Aquifer über dem kompakten Fels interpretiert, welcher vorwiegend im Sommer aktiv ist und mit dem Wasser Wärme zuführt (Vonder Mühl 1992).

## Zusammenfassung

Die gravimetrischen Messungen auf dem Blockgletscher Murtèl-Corvatsch ergaben eine lokale Schwereanomalie von bis zu  $-1.5 \text{ mgal}$ . Aufgrund der Bohrung 2/1987 und des Gamma-Gamma-Logs (Dichte-Log) ist die Stratigrafie und insbesondere die Dichteverteilung am Ort der Bohrung bekannt. Wie die Modellierung der gravimetrischen Daten zeigt, dehnen sich die beiden Schichten mit einem sehr hohen Eisgehalt von über 90 vol% linsenförmig über den ganzen Blockgletscher aus. Ihre gesamte Mächtigkeit ist bei der Bohrstelle mit 17 m am grössten. Zur Seite hin nimmt sie fast symmetrisch ab. Der Fels weist eine schüsselartige Form auf, wobei die Bohrung nahe der tiefsten Stelle liegt. Auf der Ostseite taucht er steiler ab als auf der Westseite.

## Literatur:

- Barsch, D. (1973): Refraktionsseismische Bestimmungen der Obergrenze des gefrorenen Schuttkörpers in verschiedenen Blockgletschern GR. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Vol. IX, No.1–2, 143–167.
- Barsch, D. (1977): Ein Permafrostprofil aus Graubünden, Schweizer Alpen. Zeitschrift für Geomorphologie, NF 21, 79–86.
- Barsch, D. and Hell, G. (1975): Photogrammetrische Bewegungsmessungen am Blockgletscher Murtèl I, Oberengadin, Schweizer Alpen. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band IX, Heft 2, 111–142.
- Cady, J. W. (1980): Calculation of gravity and magnetic anomalies of finite-length right polygonal prisms. Geophysics, Vol. 45, No. 10, 1507–1512.
- EAEG, (1990): Tidal gravity correction for 1991. European Association of Exploration Geophysicists. Special issue. 53.
- Haeberli, W.; Huder, J.; Keusen, H.-R.; Pika, J. and Röthlisberger, H. (1988): Core drilling through rock glacier-permafrost. Fifth international conference on permafrost, Trondheim N. Proceedings, Vol. 2, 937–942.
- Haeberli, W.; Rickenmann, D.; Zimmermann, M. und Rösli, U. (1991): Murgänge. In: Ursa-

chenanalyse der Hochwasser 1987 – Ergebnisse der Untersuchungen. Mitteilungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4 und Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie Nr. 14, 77–88.

King, L.; Fisch, W.; Haeberli, W. and Wächter, H. P. (1987): Comparison of resistivity and radioecho sounding on rock glacier permafrost. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 23, Heft 2, 77–97.

Klingelé, E. and Kahle, H.-G. (1977): Gravity profiling as a technique for determining the thickness of glacier ice. Pure and Applied Geophysics, 115, 989–998.

Klingelé, E. et Olivier, R. (1980): La nouvelle carte gravimétrique de la Suisse (Anomalies de Bouguer). Matériaux pour la géologie de la Suisse, Série géophysique, No. 20, Kümmerly et Frey, Berne.

Nagy, D. (1966): The gravitational attraction of a right rectangular prism. Geophysics, Vol. 31, No. 2, 362–371.

Plouff, D. (1966): Digital terrain correction based on geographic coordinates. Paper presented at the 36th meeting of the Society of Exploration Geophysicists.

Séguin, M. K. and Frydecki, J. (1990): Geophysical detection and possible estimation of ice content in permafrost in northern Quebec. Geophysics: the leading edge of exploration, 25–29.

Vonder Mühl, D. (1992): Evidence of intrapermafrost groundwater flow beneath an active rock glacier in the Swiss Alps. Permafrost and Periglacial Processes. Vol. 3, No. 2, 169–173.

Vonder Mühl D. and Holub, P. (1992): Borehole logging in alpine permafrost, Upper Engadin, Swiss Alps. Permafrost and Periglacial Processes. Vol. 3, No. 2, 125–132.

Wagner, S. (1992): Creep of Alpine permafrost, investigated on the Murtèl rock glacier. Permafrost and Periglacial Processes. Vol. 3, No. 2, 157–162.

## Adressen der Verfasser:

- Prof. Dr. E. Klingelé  
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
ETH-Hönggerberg  
CH-8093 Zürich
- Dr. D. Vonder Mühl  
Versuchsanstalt für Wasserbau und Glaziologie  
ETH-Zentrum  
CH-8092 Zürich