

Eine zweite Eichung im Feld kann angebracht sein, um sich zu vergewissern, dass alle Thermistoren inklusive Kabel den Transport schadlos überstanden haben und einwandfreies Material im Firn/Eis eingefroren wird. Im Sommer bei Schneeschmelze vergräbt man dazu die ganze Thermistorenkette im wasserdurchtränkten Schnee (0 °C) und überdeckt das ganze mit einer Blache, um eine Erwärmung durch die direkte Sonnenstrahlung möglichst auszuschliessen.

3.3 Beschreibung der vier Messstellen

3.3.1 Altelsgletscher

Der Altelsgletscher ist ein steiler, nordwestwärts abfallender Hängegletscher im Gebiet südlich von Kandersteg (Berner Oberland). Er erstreckt sich vom Gipfel der Altels (3629 m) auf einer Länge von rund 1.5 km und mit einer durchschnittlichen Neigung von 33° über eine Höhendifferenz von knapp 1000 m. In seinem oberen Teil ist er bedeutend steiler (bis über 40°) und bedeckt die gesamte, aus abwärts geschichteten Kalkplatten aufgebaute Altels-NW-Flanke. Gegen unten (ab rund 3000 m ü. M.) wird die Gletscherzunge flacher und deutlich eingeeengt und verläuft im "Schatten" eines 20 - 30 m hohen, senkrechten Felsbandes. Dieser Teil wird oft als "Altels-Seitengletscher" bezeichnet. Das momentane Zungenende sitzt auf einem höckerartigen Wulst am unteren Ende dieses seitwärts angrenzenden Felsbandes (Fig. 3.1, Foto 6).

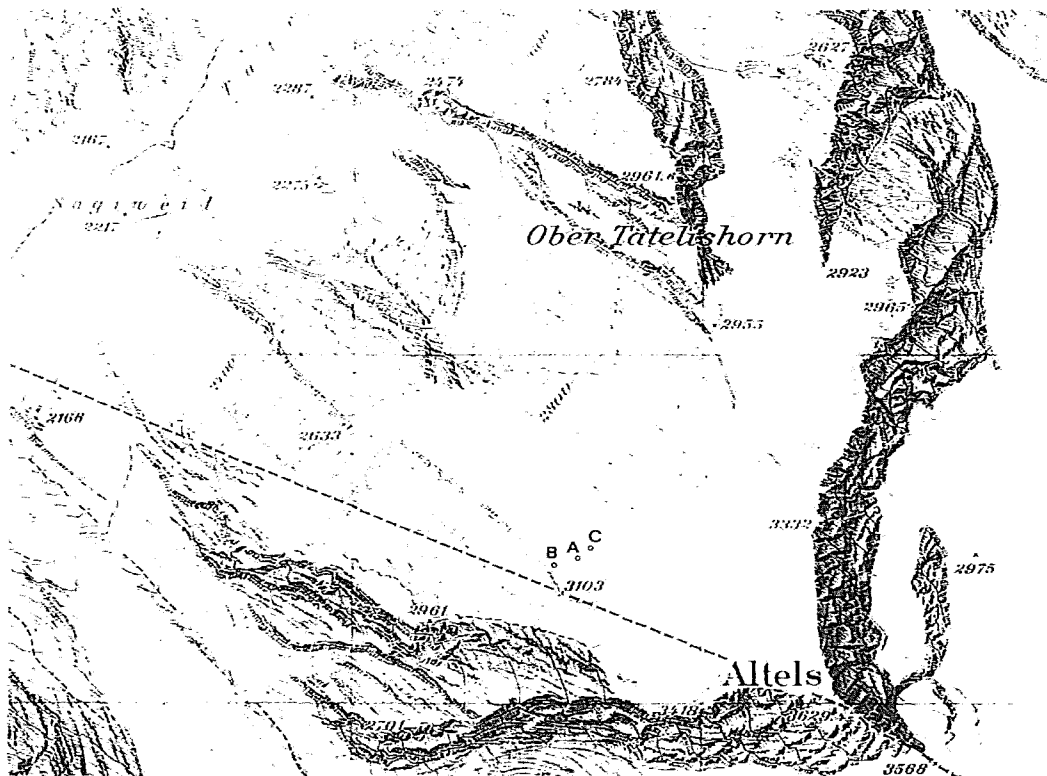


Fig. 3.1 Kartenausschnitt aus der LK 1:25'000, Blatt 1267 (Gemmi)
[vergrössert auf 115%]

Etwa alle fünf Jahre tritt der obere Teil des Altels-Seitengletschers in eine "Schnellgleitphase", die sich im Laufe der Zeit nach unten weiter ausdehnt. Dabei können die Oberflächengeschwindigkeiten das 10 - 20 fache des Normalwertes erreichen. Damit verbunden öffnen respektive schliessen sich periodisch einige charakteristische Spalten, die sich quer über den ganzen Gletscher hinziehen und kleinere Eisabbrüche produzieren. Während der letzten Jahre wurden in der "interessanten" Zone auf rund 3000 m ü. M. bereits ausgedehnte Messungen der Oberflächengeschwindigkeit (automatische Kamera, Theodolit), Radarmessungen zur Erfassung des Gletscherbettes, Wasserspiegelmessungen in Bohrlöchern sowie Luftbildauswertungen zur Berechnung von Dickenänderungen durchgeführt (unveröffentlichte Untersuchungen der VAW).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden nun erstmals auch Firntemperaturen gemessen, mit dem Ziel, das örtlich und zeitlich unterschiedlich rasche Eindringen von Schmelzwasser in den Firnkörper hinein im Frühjahr/Sommer zu dokumentieren. Dabei dürfte insbesondere der "Abschattungseffekt" des markanten Felsbandes zwischen 3100 m und 2700 m ü. M. auf das Temperaturregime im Gletscher von Bedeutung sein.

Am 25. Juni 1991 wurden auf rund 3020 m ü. M. entlang einer horizontalen Linie zwischen dem Felsband im Westen und der östlichen Gletscherbegrenzung drei Thermistorenketten installiert (Fig. 3.1 und 3.2). Die Löcher dazu wurden mit dem Dampfbohrer gebohrt. Die genauen Positionen wurden mit Theodolit und Distomat (auch nachträglich mehrmals) eingemessen. Eine detaillierte Beschreibung der Messstelle (exakte Koordinaten, Schneehöhen, Beschriftung der Kabelenden) befindet sich im Anhang III-1.

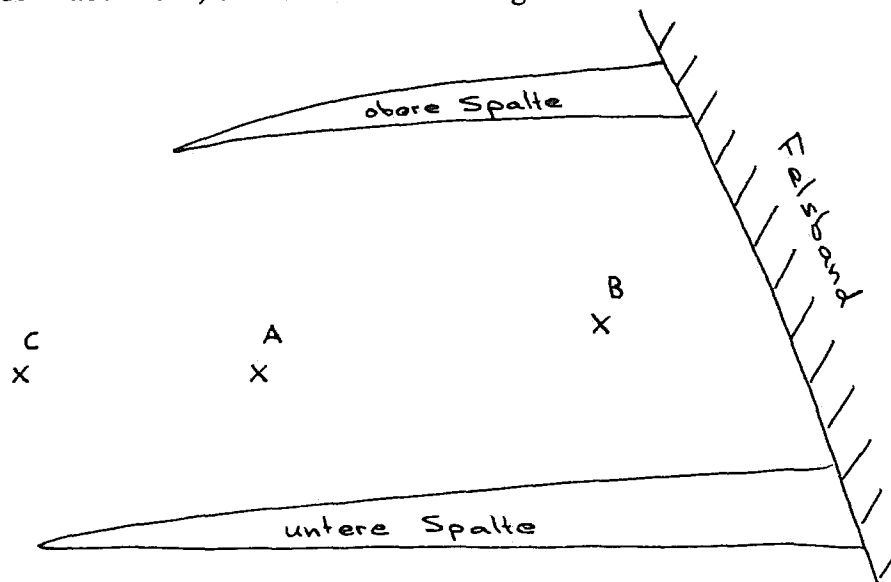


Fig. 3.2 Grossmassstäbliche Skizze der Firntemperaturmessstellen auf dem Altels-Seitengletscher. Man beachte die besondere Reihenfolge von B, A und C!

- **Bohrloch A** enthält vier Thermistoren (Typ: Fenwal UUB31J1, $0^{\circ}\text{C} \approx 2700 \Omega$) auf den Niveaus 4 m, 6 m, 8 m und 11 m unter der Oberfläche (zum Zeitpunkt der Installation). Gletscherdicke > 20 m.
- **Bohrloch B** enthält fünf Thermistoren (Typ: YSI 44'004, $0^{\circ}\text{C} \approx 7355 \Omega$) auf den Niveaus 4 m, 6 m, 8 m, 11 m und 21 m unter der Oberfläche. Gletscherdicke ca. 21 m.
- **Bohrloch C** enthält vier Thermistoren (Typ: YSI 44'004, $0^{\circ}\text{C} \approx 7355 \Omega$) auf den Niveaus 2 m, 4 m, 6 m und 9 m unter der Oberfläche. Gletscherdicke ca. 9 m.

Temperaturablesungen fanden statt am 25. und 26. Juni (je 2 mal), am 10. und 21. Juli sowie am 22. August 1991.

3.3.2 Oberer Jungfraufirn

Der Jungfraufirn liegt in den Berner Alpen und ist neben dem Grossen Aletschfirn, dem Ewigschneefeld und dem Grüneggfirn einer der vier Haupteisströme, die zusammen den Grossen Aletschgletscher bilden. Sein stark vergletschertes Eiszugsgebiet erstreckt sich vom Jungfraujoch und den umliegenden Gipfeln (Kranzberg, Lauihorn, Rottalhorn, Jungfrau, Mönch, Trugberg) über grösstenteils sanft geneigte Hänge nach SE, wo er sich nach rund 6 km mit den drei oben genannten Gletschern im Konkordiaplatz vereinigt. Seine Höhenausdehnung reicht von über 4100 m ü. M. bis hinunter auf etwa 2750 m ü. M. (Fig. 3.3).

Temperaturmessungen östlich des Sphinxstollens zwischen 3400 und 3500 m ü. M. (Hughes und Seligman, 1939) sowie unmittelbar südlich des Jungfraujochs auf 3350 m ü. M. (Perutz, 1950) ergaben für Firn und Eis durchwegs temperierte Werte. Messungen auf dem benachbarten Ewigschneefeld in vergleichbarer Höhe und Exposition zeigten dasselbe Resultat (Lang et al. 1977). Ganz anders sind dagegen die Temperaturverhältnisse in den Gratkalotten der Region: Haefeli und Brentani (1955) fanden in Eisstollen unter dem Jungfraujoch (3475 m ü. M.) Temperaturen von -1°C bis -3°C (vgl. auch Hughes und Seligman, 1939). In einem 70 m tiefen Bohrloch durch Firn, Eis und Fels (Permafrost) des Sphinxgrates (3525 m ü. M.) wurden unmittelbar unter der Eiskappe in 10 m Tiefe Temperaturen von rund -6°C gemessen (interner VAW-Bericht, 1982). Schliesslich beschreibt Mathys (1974) am Jungfrau-Ostgrat (PTT-Station, 3700 m ü. M.) Felsjahresmitteltemperaturen von -6°C (Südwand) bis -13°C (Nordwand).

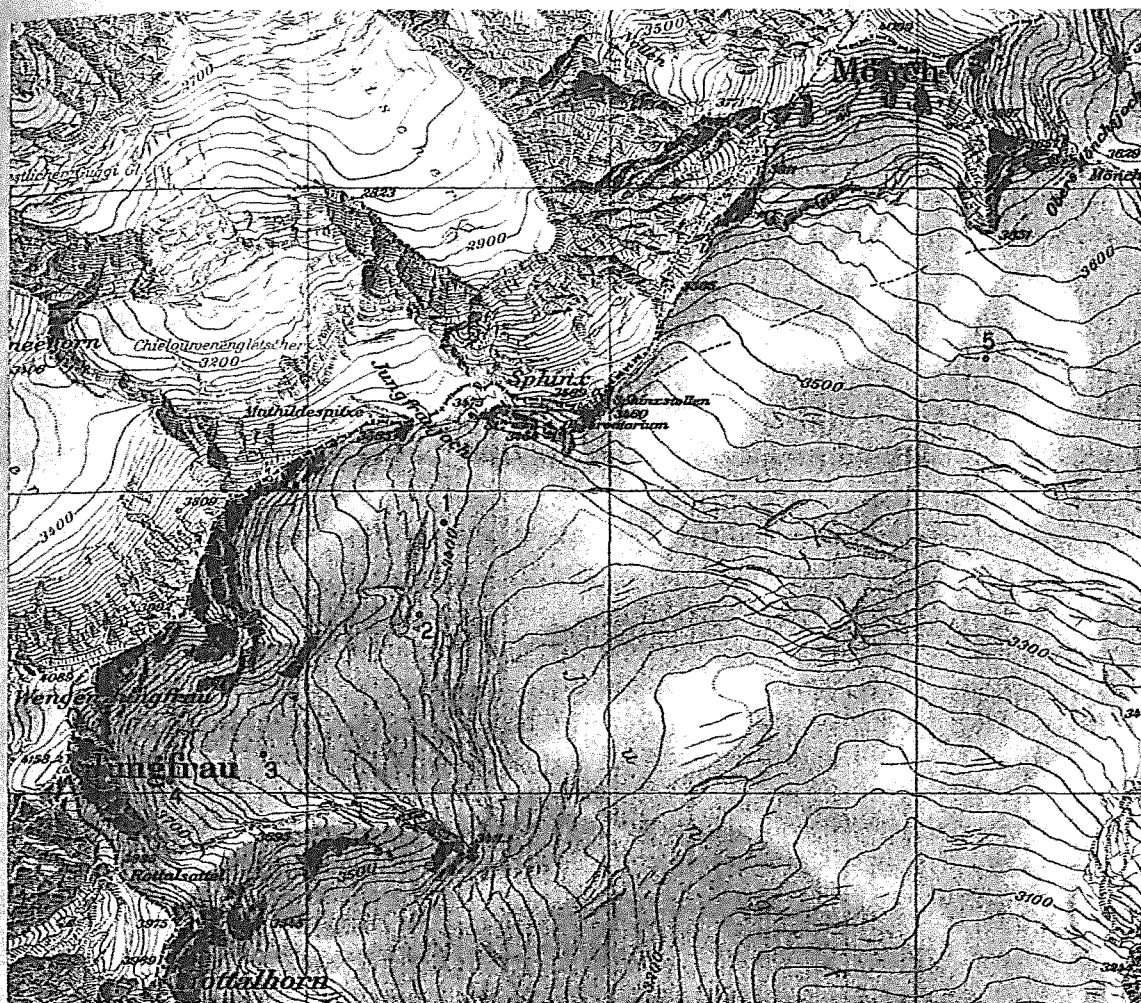


Fig. 3.3 Kartenausschnitt aus der LK 1:25'000, Blatt 1249 (Finsteraarhorn)

Für die vorliegende Arbeit wurden im oberen Bereich des Jungfraufirns erneut Firntemperaturen gemessen. Dabei sollte nach Möglichkeit der Übergang vom temperierten zum kalten Firngebiet erfasst werden. Dieses Ziel schien im eher schattigen, engen und ostexponierten Kar, das sich gegen die Jungfrau-Ostwand und den Rottalsattel hinaufzieht, am ehesten erreichbar (Foto 7). Ferner wurden zwei Messstellen in unmittelbarer Nähe zu grossen Spalten eingerichtet, um einen allfälligen Einfluss derselben auf das Temperaturregime im Gletscher zu dokumentieren.

Die fünf Messstandorte sind in Fig. 3.3 eingezeichnet (Kompass-Einmessung):

- **Bohrloch 1** liegt am Hangfuss eines kurzen Steilhanges (30°) ca. 50 m unterhalb einer grossen Querspalle.
 - Koordinaten: ca. 641 430 / 154 880
 - Meereshöhe: ca. 3410 m ü. M.
 - Exposition: ESE
 - Sonnenscheindauer (beobachtet) am 12. März: ca. 8 Std. (von 07:20 - ca. 15:30)

- **Bohrloch 2** liegt mitten in einer stark zerrissenen Spaltenzone auf etwa horizontaler Fläche.
 - Koordinaten: ca. 641 370 / 154 580
 - Meereshöhe: ca. 3410 m ü. M.
 - Exposition: ESE
 - Sonnenscheindauer am 12. März: ca. $8\frac{3}{4}$ Std. (von 07:15 - ca. 16:00)

- **Bohrloch 3** liegt im hinteren Teil des spaltenlosen, flachen Gletscherkares Richtung Rottalsattel.
 - Koordinaten: ca. 640 850 / 154 140
 - Meereshöhe: ca. 3540 m ü. M.
 - Exposition: ENE
 - Sonnenscheindauer am 12. März: ca. $7\frac{1}{2}$ Std. (von 07:05 - ca. 14:30)

- **Bohrloch 4** liegt rund 100 m unterhalb des Bergschrundes im etwa 25° steilen Bereich der nach oben ständig steiler werdenden Jungfrau-Ostwand.
 - Koordinaten: ca. 640 530 / 154 060
 - Meereshöhe: ca. 3630 m ü. M.
 - Exposition: ENE
 - Sonnenscheindauer am 12. März: ca. 7 Std. (von 07:00 - ca. 14:00)

- **Bohrloch 5** liegt im relativ flachen Hang unmittelbar unterhalb der obersten, grossen Querspalte Richtung Oberes Mönchsjoch.
 - Koordinaten: ca. 643 220 / 155 440
 - Meereshöhe: ca. 3530 m ü. M.
 - Exposition: SSW
 - Sonnenscheindauer am 12. März: ca. 11 Std. (von 08:40 - ca. 17:45)

Die rund 20 m tiefen Bohrlöcher wurden in der Zeit vom 2. - 10. März 1991 mit dem Dampfbohrer abgeteuft. Die ebenso langen, darin versenkten Thermistorenketten sind mit vier Thermistoren im Abstand von je fünf Metern bestückt. Dabei sind die oberen drei Thermistoren vom Typ Fenwal UUB31J1 ($0^{\circ}\text{C} \approx 2700 \Omega$) und der unterste ist jeweils ein YSI 44'004 ($0^{\circ}\text{C} \approx 7355 \Omega$). Vom 2. - 13. März wurden zum Teil mehrmals täglich Temperaturablesungen durchgeführt. Das Wetter war dabei oft sehr neblig und stürmisch, was Probleme beim Ablesen zur Folge hatte ("Kriechstromeffekt", siehe Abschnitt 3.4). Weitere Messungen folgten am 1. Mai (Bohrlöcher 1, 2, 3 und 5), am 26. Juli (1, 2, 3 und 5) und am 27. August 1991 (1, 2 und 5). Trotz einer 4 m langen Markierungsstange konnte Bohrloch 4 infolge sehr grosser

Triebsschneeakkumulationen und Lawinenablagerungen am 1. Mai bereits nicht mehr aufgefunden werden. Bei Bohrloch 5 muss die Markierungsstange im Herbst ausgeschmolzen oder von Touristen ausgerissen worden sein, denn auch diese wurde im Oktober 1991 (nach ersten geringen Schneefällen) nicht mehr gefunden. Weitere Details (Schneehöhen, Beschriftung der Kabelenden) im Anhang III-2.

3.3.3 Breithornplateau

Das Breithornplateau ist ein offenes, weites Gletscherplateau südlich von Zermatt im Grenzgebiet Schweiz - Italien. Es liegt etwa im Dreieck zwischen den beiden Eisgipfeln Breithorn (4164 m) und Gobba di Rollin (3899 m) und dem Felsgipfel des Klein Matterhorns (3883 m) auf einer Höhe von rund 3800 - 3850 m ü. M. Ausser vom Breithorn her (steile Südflanke) fliesst das Eis auf alle Seiten etwa gleichmässig verteilt ab: auf Schweizer Seite durch den engen, steilen und stark zerklüfteten Kleinmatterhorn Gletscher sowie über das flachere Plateau Rosa (Sommerskigebiet) in den Unteren und Oberen Theodulgletscher und auf der italienischen Seite durch den eher flachen Ghiacciaio di Ventina (nach SW), sowie den über senkrechte Felsabstürze abbrechende und gewaltige Seitenmoränen auftürmende Grande Ghiacciaio di Verra (nach SE) ins obere Valle d'Ayas (Fig. 3.4, Foto 8).

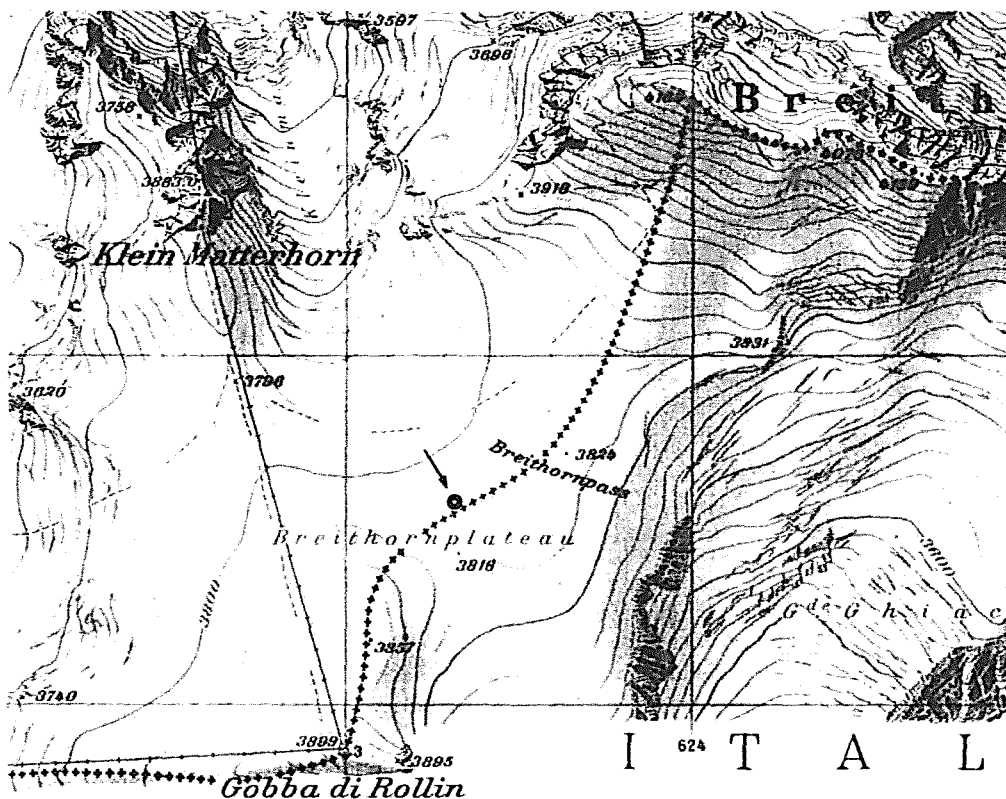


Fig. 3.4 Kartenausschnitt aus der LK 1:25'000, Blatt 1348 (Zermatt)
[vergrössert auf 115%]

Direkte Firntemperaturmessungen auf dem Breithornplateau wurden bis anhin keine gemacht. Allerdings haben italienische Bergführer in den Jahren 1960 und 1961 im Auftrag von Joel E. Fisher auf rund 4000 m ü. M. in der benachbarten Breithorn-Südflanke zwei horizontale Eisstollen bis auf den anstehenden Fels vorangetrieben (Fisher 1963). Die Temperaturen im Eis der je gut 60 m langen Tunnels nahmen von - 5.5 °C (Nähe Oberfläche) bis auf etwa - 0.5 °C am Felsbett zu. Im einen Fall wurde sogar eine riesige, mit Wasser gefüllte Kaverne angebohrt! Die Temperaturen in Oberflächennähe (10 - 30 m) scheinen also trotz der extremen Südlage deutlich kalt zu sein.

Nach den Darstellungen von Haeberli (1976, S. 211) und Haeberli und Alean (1985, S. 161) dürften für das Breithornplateau durchaus noch negative Firntemperaturen erwartet werden, umso mehr als es sich nicht um einen südexponierten Gletscher, sondern um ein äusserst flaches (bei der Messstelle sogar leicht nach NNW geneigtes) Plateau handelt. Zudem dürfte sich das von der Breithorn-Südflanke zufließende Eis während den knapp 200 Höhenmetern kaum um 5.5 °C erwärmt haben.

In Fig. 3.4 ist der ungefähre Standort der Messstelle eingezeichnet (Kompass-Einmessung):

- Koordinaten: ca. 623 300 / 086 550
- Meereshöhe: ca. 3810 m ü. M.

Der Ort liegt etwa 120 m nördlich des Sattelpunktes (Pt. 3816) des Breithornplateaus ziemlich genau auf der Landesgrenze Schweiz - Italien. Das Terrain rundherum ist sehr flach, bei der Messstelle selbst leicht nach NNW geneigt. Das ganze Plateau wird, ausser am frühen Morgen, kaum vom Schattenwurf umliegender Berge beeinträchtigt.

Am 30. Juli 1991 wurde mit dem Dampfbohrer ein rund 30 m tiefes Loch abgeteuft und eine ebenso lange Thermistorenkette darin versenkt, an welcher alle 2 m ein Thermistor angebracht ist (Typ: Fenwal UUB31J1, 0 °C \approx 2700 Ω). Temperaturablesungen fanden an folgenden Tagen statt: 30. und 31. Juli, 1. und 8. August, 27. Oktober, 4. Dezember 1991 sowie am 10. April 1992 (weitere Details im Anhang III-3).

3.3.4 Colle Gnifetti - oberer Grenzgletscher

Der Colle Gnifetti ist ein hochalpiner Gletschersattel im Monte Rosa-Massiv (Walliser Alpen). Auf einer Höhe von 4452 m ü. M. liegt er zwischen den rund 100 m höheren Gipfeln der Zumsteinspitze im Norden und der Signalkuppe (Punta Gnifetti) im Süden exakt auf der Landesgrenze zwischen der Schweiz und Italien. Gegen Osten bricht das Eis jäh in die stark

vergletscherte, steile Monte Rosa-Ostwand ab und endet mehr als 2500 m tiefer unten auf der Zunge des stark schuttbedeckten Ghiacciaio del Belvedere (Macugnaga, Valle Anzasca). Gegen Westen fliesst das Eis gemächlicher den mächtigen und stark zerschrundeten Grenzgletscher hinunter Richtung Zermatt (Fig. 3.5, Foto 9).

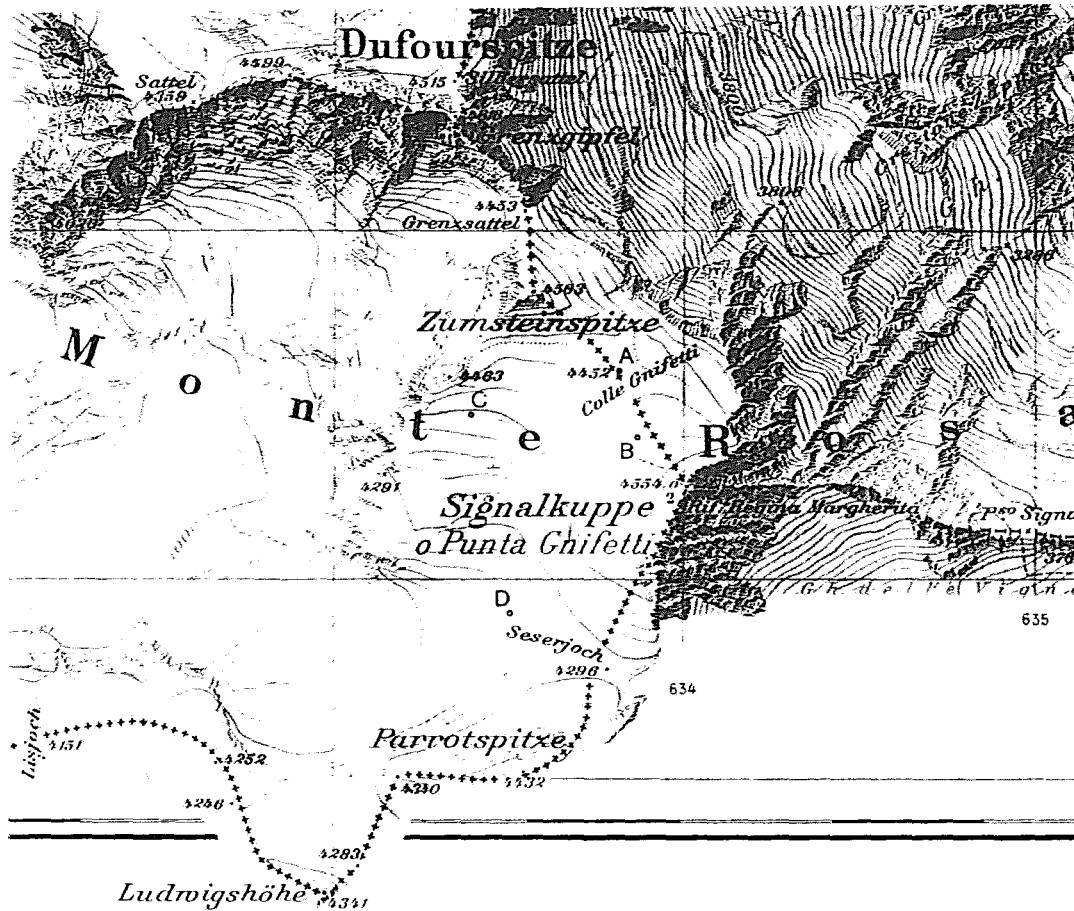


Fig. 3.5 Kartenausschnitt aus der LK 1:25'000, Blatt 1348 (Zermatt)
[vergrössert auf 115%]

Der äusserst windexponiert gelegene Colle Gnifetti liegt in der Rekristallisations-Infiltrationszone (Shumskii, 1964; nach Müller, 1962: Perkolationszone A). Das heisst im Sommer kann oberflächlich Schmelze stattfinden; das Schmelzwasser gefriert aber innerhalb der obersten Jahresschicht wieder und es können sich eine oder mehrere Eislin sen pro Jahr bilden (Haeberli und Alean, 1985). Durch das Wiedergefrieren von Schmelzwasser in der obersten Schnees chicht wird latente Wärme frei und es darf erwartet werden, dass die MAFT (mean annual [surface] firn temperature) geringfügig höher ist als die MAAT (mean annual air temperature; letztere beträgt rund -14.0 bis -14.5°C , Haeberli und Funk 1991). Die Jahresakkumulation ist gering und beträgt ca. 0.5 m (Wasseräquivalent), schwankt allerdings je nach Exposition zwischen 0 und rund 1 m (Haeberli und Alean 1985).

Zum erstenmal wurden 1976 in einem 33 m tiefen Bohrloch auf dem Colle Gnifetti Firntemperaturen gemessen. Die Temperatur in 15 m Tiefe betrug -14.4°C . Eine Extrapolation des zwischen 12 und 32 m Tiefe gemessenen Temperaturgradienten bis zur Oberfläche ergab dort -14.8°C (Oeschger et al. 1978). Auch in den darauffolgenden Jahren, zuletzt 1985, wurden z.T. umfangreiche Temperaturmessungen unternommen (Haeberli und Funk, 1991).

Die vier Orte (A, B, C, D), an denen für die vorliegende Arbeit Firntemperaturmessungen durchgeführt wurden, sind in Fig. 3.5 eingezeichnet (Kompass-Einmessung):

- **Bohrloch A** liegt auf dem Sattelpunkt des Colle Gnifetti (ca. 5 m westlich des Meteomastes)
 - Koordinaten: 633 820 / 086 580
 - Meereshöhe: 4452 m ü. M.
- **Bohrloch B** liegt auf der Schulter zwischen Colle Gnifetti und Signalkuppe (beim ehemaligen "Chemie-Core" B 822). Das Terrain ist ganz leicht geneigt und NW-exponiert (ausser im Hochsommer starker Schattenwurf durch die Signalkuppe).
 - Koordinaten: 633 870 / 086 420
 - Meereshöhe: ca. 4470 m ü. M.
- **Bohrloch C** liegt ca. 20 m in der nordwestlichen Verlängerung der obersten grossen Querspalte des Grenzgletschers. Südexponierte Hanglage von etwa 20° Neigung.
 - Koordinaten: ca. 633 400 / 086 500
 - Meereshöhe: ca. 4400 m ü. M.
- **Bohrloch D** liegt im obersten Firnkessel des Grenzgletschers, ca. 300 m unterhalb (nordwestlich) des Seserjochs. Leicht geneigt, Muldenlage, am Morgen lange schattig.
 - Koordinaten: ca. 633 500 / 085 900
 - Meereshöhe: ca. 4250 m ü. M.

Die rund 30 m tiefen Löcher wurden vom 2. - 4. August 1991 mit dem Dampfbohrer abgeteuft. Auch hier kamen 30 m lange und jeweils im Abstand von 2 m mit Thermistoren bestückte Kabelketten zum Einsatz (Thermistor-Typ: Fenwal 197-104QAG-A01, $0^{\circ}\text{C} \approx 351'000 \Omega$). In den folgenden Tagen bis zum 9. August wurden zum Teil mehrmals täglich Temperaturablesungen durchgeführt. Während einem "Jahrhundert-Gewitter" am 8. August schlug der Blitz in die beiden Messstationen A und B ein und zerstörte diese ganz (A) oder teilweise (B). Weitere Messungen folgten am 26. Oktober 91 sowie am 11. April 92. Letztere konnten allerdings für diese Arbeit *nicht* mehr berücksichtigt werden (Details im Anhang III-4).