

# Datierung von kaltem Firn und Eis in einem Bohrkern vom Colle Gnifetti, Monte Rosa

Autor(en): **Schotterer, Ulrich / Haerberli, Wilfried / Good, Walter**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Annuaire de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative**

Band (Jahr): **158 (1978)**

PDF erstellt am: **17.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-90739>

## **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.

# Datierung von kaltem Firn und Eis in einem Bohrkern vom Colle Gnifetti, Monte Rosa

Ulrich Schotterer, Wilfried Haerberli, Walter Good, Hans Oeschger und Hans Röthlisberger

## Zusammenfassung

Am Beispiel eines 32 m langen Bohrkernes vom Colle Gnifetti (4450 m ü.M.) werden die Möglichkeiten der Datierung von kaltem Firn und Eis in den hochgelegenen Gebieten der Alpen diskutiert. Isotopenmessungen und Eislinenstratigraphie geben ein übereinstimmendes Bild der Akkumulationsgeschichte. Mit Strukturanalysen an Firnproben wird eine Möglichkeit untersucht, Niederschläge aus verschiedenen Jahreszeiten zu unterscheiden. Aufgrund einfacher rheologischer Überlegungen kann abgeschätzt werden, dass tiefere Bohrungen auf dem Colle Gnifetti Ablagerungen aus mehreren Jahrhunderten durchfahren könnten.

## Résumé

On discute les possibilités de datation de la glace et du névé froids situés dans les régions les plus élevées des Alpes en considérant une carotte, longue de 32 m, prélevée au Colle Gnifetti (4450 m). Les mesures isotopiques et l'étude de la stratigraphie des lentilles de glace donnent une image concordante de la chronologie de l'accumulation. Par l'analyse de la structure du névé prélevé on essaie de déterminer les saisons durant lesquelles les précipitations se sont produites. Des considérations rhéologiques élémentaires laissent entrevoir la possibilité de traverser des couches vieilles de plusieurs siècles par la réalisation de forages plus profonds au Colle Gnifetti.

## Einleitung

Seit 1976 werden auf dem Colle Gnifetti, Monte Rosa, Kernbohrungen durchgeführt. Zu den Hauptzielen dieser Arbeiten gehören

das Studium der Akkumulationsgeschichte in hochgelegenen alpinen Firngebieten, die Untersuchung der Beziehung zwischen Isotopenverhältnissen und meteorologischen Parametern und die Rekonstruktion der Entwicklungsgeschichte atmosphärischer Spurenstoffe seit dem Beginn der industriellen Zeit (Oeschger et al. 1978). Voraussetzung für die Entzifferung der in den Firnschichten gespeicherten Information ist die Erstellung einer zuverlässigen und gut auflösenden Zeitskala. Datierungen von temperierten oder doch stark von Schmelzwasser beeinflussten alpinen Firnschichten wurden seit den ersten Versuchen auf dem Jungfraujoch im Jahre 1957 (Oeschger et al. 1962) verschiedentlich vorgenommen (z.B. Ambach und Eisner 1965, Ambach et al. 1969, Eisner 1971, Schotterer et al. 1977). Der Colle Gnifetti liegt in einer Höhe von rund 4450 m ü.M. und damit in der Rekristallisations-Infiltrationszone der Alpen (Haerberli 1976) mit stark reduziertem Schmelzwassereinfluss und deutlich negativen Firntemperaturen (Oeschger et al. 1978). Es lag deshalb nahe, zur Datierung der hier erbohrten Kerne auch Methoden zu verwenden, wie sie in polaren Gebieten erfolgreich eingesetzt worden sind (Hammer et al. 1978). Die vorliegende Arbeit diskutiert Möglichkeiten und Grenzen einiger dieser Methoden für den Fall des Colle Gnifetti und stellt die bisher erarbeitete Chronologie des Bohrkerns von 1976 dar.

## Vorarbeiten

Über die zu erwartenden Akkumulationswerte (Firnzuwachs) bestanden vorerst nur Vermutungen. Vor Beginn der Bohrarbeiten wurde deshalb ein kleiner Probeschacht gegraben, um durch Isotopenanalysen erste Hinweise auf die effektiven Akkumulationswerte zu erhalten. Die entsprechenden Re-

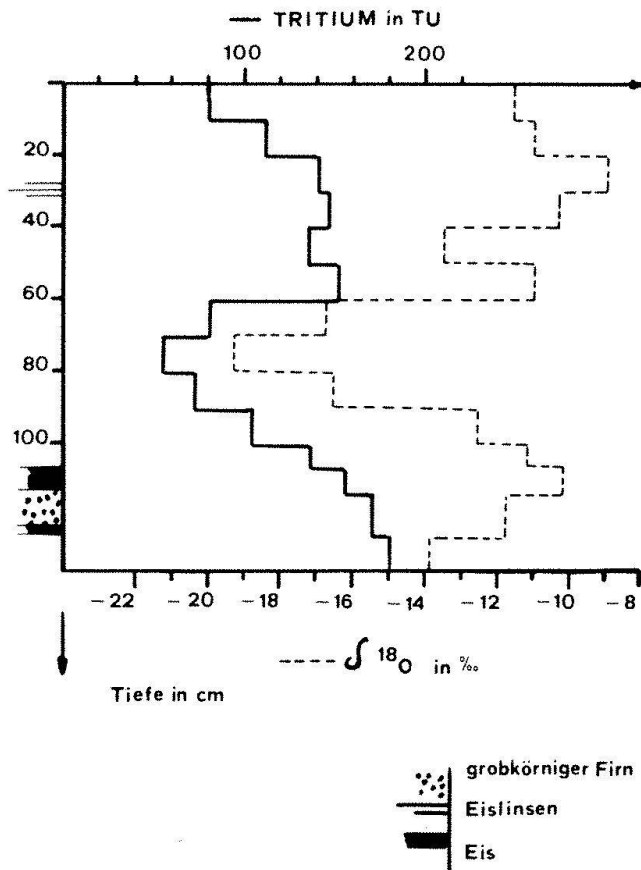


Abb. 1. Tritium- und  $\delta^{18}\text{O}$ -Profil im Probeschacht vom August 1976. Die beiden Maxima im  $\delta^{18}\text{O}$  erscheinen kurz oberhalb, im Sinne der Ablagerung «nach» den höchsten Tritiumwerten.

sultate sind in Abbildung 1 dargestellt. Sowohl Tritium wie  $\delta^{18}\text{O}$  zeigen Variationen, die dem aus direkten Niederschlagsmessungen bekannten Jahresgang entsprechen. Der Abstand der beiden im Schacht beobachteten (Sommer-)Maxima beträgt etwa 80–100 cm Schnee, resp. 30–40 cm Wasser bei einer geschätzten Dichte von 0.3 bis 0.4  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Mit dieser kleinen jährlichen Zuwachsrate war gewährleistet, dass auch bei geringer Mächtigkeit des Firnsattels auf dem Colle Gnifetti eine Bohrung wesentliche Zeitabschnitte des 20. Jahrhunderts umfassen würde. Anfangs September des gleichen Jahres (1976) wurde durch eine Gruppe von Mitarbeitern aus dem Physikalischen Institut der Universität Bern und der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich eine erste, rund 32 m tiefe Kernbohrung auf dem Colle Gnifetti durchgeführt.

## Grobstratigraphie

Die Kerne dieser Bohrung wurden an der Bohrstelle selbst gewogen, photographiert und verpackt und anschliessend in gefrorenem Zustand in das Labor des Physikalischen Instituts der Universität Bern transportiert. Im Kälteraum wurde die visuelle Stratigraphie der Bohrkern im Maßstab 1:1 festgehalten. Dabei wurden nur Bruchstellen, Eislinsen und markante Staubschichten notiert, da für eine eingehende Feinstratigraphie (vgl. z.B. Langway 1967) vorerst zu wenig Material zur Verfügung stand und zudem die Anwendbarkeit der in polaren Regionen bewährten Prinzipien (Benson 1962) ohnehin für den extrem windbeein-

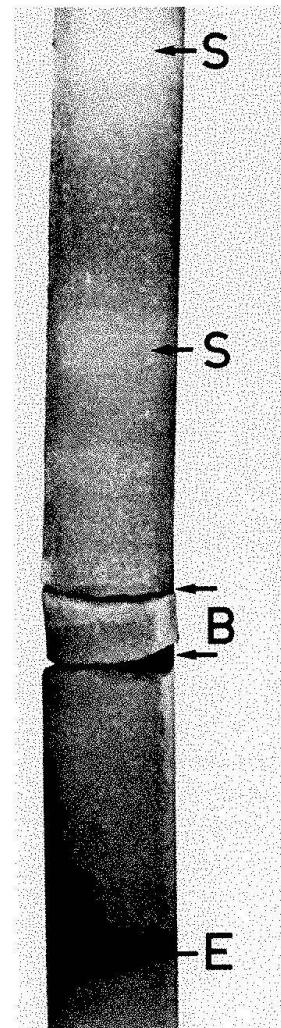


Abb. 2. Bohrkern Nr. 36 aus der 50 m tiefen Bohrung von 1977, aufgenommen im Kältelabor (Negativ). E = dünne Eislinse (wahrscheinlich aus dem Sommer 1936), B = Bruchstellen, S = Sahara-Staubschichten aus den Jahren 1936/37.

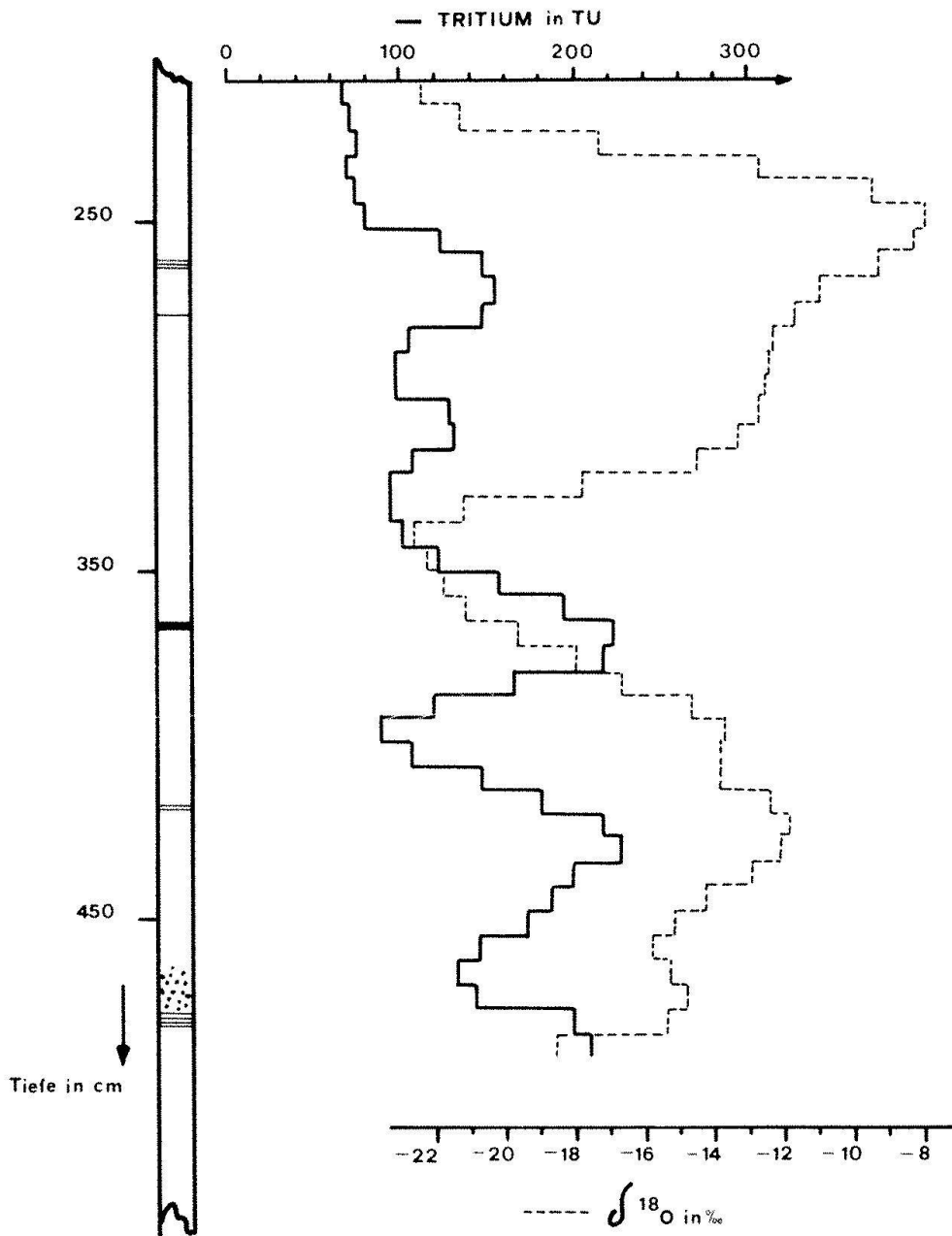


Abb. 3. Tritium- und  $\delta^{18}\text{O}$ -Profil im Bohrkern von 1976 zwischen 220 und 560 cm Tiefe. Die beinahe ideale Abfolge von  $^3\text{H}$ - und  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten aus Fig. 1 scheint hier gestört. Das  $\delta^{18}\text{O}$  ist weniger aufgelöst als das Tritium, das in diesem Abschnitt offensichtlich Jahreschwankungen repräsentiert. Man beachte das Auftreten von Eislinnen unmittelbar oberhalb der Tritium-Maxima.

flussten Colle Gnifetti fragwürdig schien. Die auffälligsten Strukturen, nämlich Häufungen von Eislinnen in 16,5 und 17,5 m Tiefe wurden den speziell heißen Sommern 1947 und 1950 zugeordnet, zwei auffällige gelbliche Schichten zwischen 21 und 22 m Tiefe den häufigen Saharastaubfällen von 1936/37 (Oeschger et al. 1978). Zusammen mit der über Volumen- und Gewichtsmessungen an den Kernen bestimmten Dichtekurve konnte somit die durchschnittliche Akkumulation an der Bohrstelle auf rund 35 cm Wasserwert pro Jahr geschätzt werden. Abbildung 2 zeigt einen Abschnitt des Bohrkerns, aufgenommen mit fluoreszierendem Durchlicht (Negativ), in dem neben einer

dünnen Eislinne (E) zwei Bruchstellen (B) und Saharastaubschichten aus der Zeit 1936/37 (im Negativ hell, S) zu sehen sind.

### Isotopenstratigraphie

Aufgrund der geschätzten mittleren Akkumulation von 35 cm Wasserwert pro Jahr und der Dichtemessungen wurden die Bohrkernkerne für das weitere Vorgehen in 7–10 cm lange, zeitlich möglichst aequidistante Abschnitte zersägt. Schon erste Analysen zeigten, dass das im Profil des Probeschachtes festgestellte, nahezu ideale Abbild von Isotopenvariationen in Niederschlägen keines-

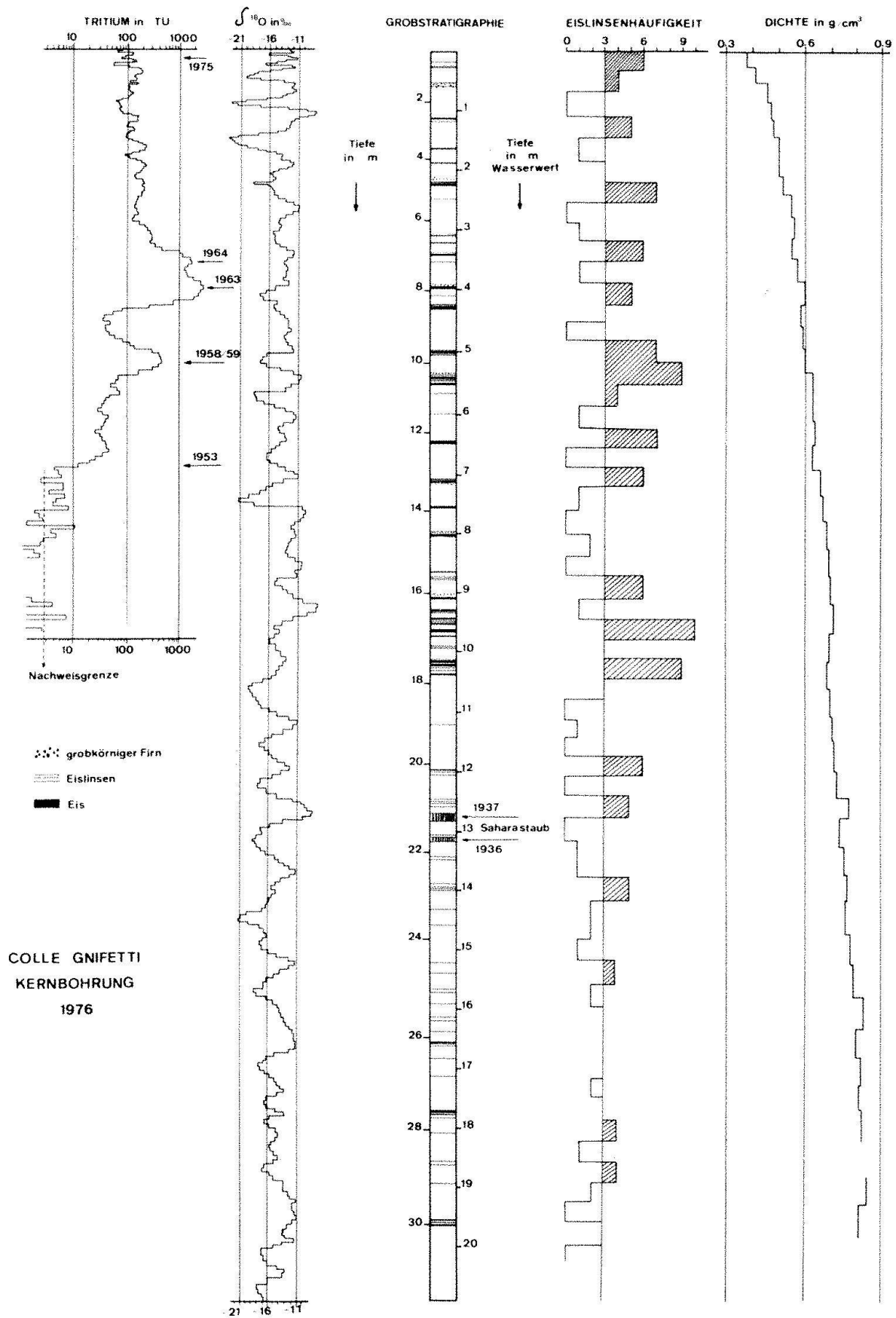


Abb. 4. Datierungsparameter des Bohrkerns von 1976. Die Tritiumwerte sind auf das Entnahmedatum (September 1976) bezogen. Den etwa 30 abzählbaren Schwankungen im  $\delta^{18}\text{O}$  steht eine datierte Zeitspanne von rund 65 Jahren gegenüber. Die Zahl der Eislinsenhäufigkeit bezieht sich auf jedes am Bohrkern visuell festgestellte Schmelzereignis in einem Abschnitt von 34 cm Wasseräquivalent. Die individuelle Dicke einzelner Eislinsen ist in dieser Darstellung nicht berücksichtigt.

wegs über die ganze Länge des Bohrkerns vorhanden ist. Der Abschnitt von 220–560 cm zeigt in Abbildung 3 zwischen  $^3\text{H}$  und  $\delta^{18}\text{O}$  sowohl Phasenverschiebung wie auch Gegenläufigkeit. Die Maxima im  $\delta^{18}\text{O}$  treten in den Niederschlägen in den Sommermonaten, im  $^3\text{H}$  im späten Frühjahr auf. Im Bohrkern sollten letztere also unterhalb (= vor) dem Maximum im  $\delta^{18}\text{O}$  des betreffenden «Jahres» erscheinen. Das  $\delta^{18}\text{O}$  ist weitgehend temperaturbedingt (Dansgaard 1964), «warme» und «kalte» Einzelniederschläge können jedoch zu jeder Jahreszeit auftreten. In der Meteorologie bekannte Singularitäten sind beispielsweise die Eiseheiligen oder das Weihnachtstauwetter.

Demgegenüber treten die höchsten  $^3\text{H}$ -Werte nach dem Einbruch von Stratosphärenluft etwa zwischen April und Juni auf, da die Stratosphäre immer noch durch Kernwaffenproduziertes Tritium ( $^3\text{H}$ ) abgibt. Die heute mit der verbreiteten industriellen Anwendung verbundene Emission von Tritium verwischt allerdings zeitweilig diesen regelmäßigen jahreszeitlichen Gang. Wenn zudem wesentliche Teile eines Jahresniederschlags in der Firnrücklage fehlen, was wegen des starken Windeinflusses am Colle Gnifetti nicht auszuschliessen ist, wird es schwierig, einzelne Firnschichten durch Isotopenmessungen bestimmten Jahreszeiten zuzuordnen.

Das «Abzählen» von Jahresschichten in Firn und Eis, wie es an Bohrkernen aus dem grönländischen Inlandeis angewendet wird (Hammer et al. 1978), ist am Colle Gnifetti eine fragwürdige Datierungsmethode, obwohl in einzelnen Fällen nahezu ideale Sequenzen zu beobachten sind. Wegen der starken Konzentrationsanstiege infolge von Kernwaffentests ist hingegen die Datierung der Tritiumhorizonte in 12.8 m Tiefe auf 1953/54, in 10.3 m Tiefe auf 1958/59 und in 8.3 m Tiefe auf 1962/63 gesichert.

Eine Tritiumdatierung in der Zeit vor 1953 ist wegen der geringen Konzentrationen zur Zeit messtechnisch nicht möglich. Für den zu erwartenden Altersbereich der erbohrten Firn- und Eisschichten am Colle Gnifetti ist jedoch  $^{210}\text{Pb}$  (22.3 Jahre Halbwertszeit) eine zusätzliche Datierungshilfe (Gäggeler 1978). Erste Messungen bestätigen, dass die über den Aktivitätsabfall von  $^{210}\text{Pb}$  mit der Tiefe ermittelte Firnzuwachsrate mit den übrigen

Datierungen weitgehend übereinstimmt (s. u.). Abbildung 4 gibt eine Zusammenstellung von Datierungsparametern für die Kernbohrung 1976 auf dem Colle Gnifetti.

### Eislinsenstratigraphie

Aufgrund der vorliegenden Datierung konnte nun der mittlere Firnzuwachs für die Zeitperioden 1937–1953 (36 cm/Jahr), 1954–1958 (34 cm/Jahr), 1959–1962 (28 cm/Jahr) und 1963–1975 (31 cm/Jahr) bestimmt werden. Die massive Häufung von Eislinsen bei rund 17 m Tiefe – interpretiert als zweite Hälfte der 40er Jahre – bestätigte die Tendenz zu erhöhter Akkumulation in den warmen Jahren der Jahrhundertmitte. Es wurde deshalb versucht, die Feindatierung des Bohrkerns anstatt mit einer konstanten mittleren Akkumulation mit Hilfe von Beziehungen zwischen Eislinsenhäufigkeit, Lufttemperatur und Akkumulation vorzunehmen. Es wurde dabei angenommen, dass (1) durch Schmelze an der Schneeoberfläche kein Massenverlust entsteht, da das Schmelzwasser nahe der Oberfläche im kalten Schnee wieder gefriert, (2) das Ausmass der Schmelze und damit die Dicke der in den Bohrkernen beobachteten Eislinsen eine Funktion der Lufttemperatur (als «Vertreter» der Strahlung) im Sommer ist, (3) die im Sommer entstehenden Eislinsen die darunterliegende Schneedecke vor dem Abtrag durch an der Bohrstelle oft beobachtete Winderosion schützen und (4) deshalb sowohl zwischen Eislinsendicke resp. -häufigkeit und Firnzuwachs, wie auch zwischen Firnzuwachs und Lufttemperatur, resp. Lufttemperatur und Eislinsendicke Beziehungen existieren. Als Grundlagen wurden verwendet: (a) die mittlere Abweichung der Temperatur der Ablationsperiode (Mai bis September) im Durchschnitt der sieben Bergstationen Sonnblick, Vent, Zugspitze, Hohenpeissenberg, Säntis, St. Gotthard und St. Bernhard vom 100jährigen Mittel 1851–1960, nach Patzelt (1977, im weiteren als T ( $^{\circ}\text{C}$ ) bezeichnet), (b) die Dicke der Eislinsen nach der im Masstab 1:1 vom Bohrkern erstellten Grobstratigraphie in cm/Jahr, im weiteren als E bezeichnet, (c) die nach den Dichtekurven berechneten Wasseraequivalente (w.e.) und (d) die erwähnten Zeitmarken. Es galt also, einen

Zeitraster für den Bohrkern zu finden, innerhalb dessen dann sowohl die Eislinsendicke mit der Lufttemperatur wie auch die jährliche Akkumulation ( $b$ , cm w.e./Jahr) mit der Lufttemperatur, resp. der Eislinsendicke positiv korreliert war. Ein Vergleich von  $b$  und  $T$  aus diversen Kombinationen der gegebenen Zeitmarken ergab im Mittel die Beziehung  $b = 30.41 + 7.35 T$ , wobei nur Zeitintervalle berücksichtigt sind, die mindestens 10 Jahre umfassen, und der Sommer 1947 auf eine Tiefe von 16.2 m festgelegt ist. Damit wurden nun die Firnzuwachswerte aufgrund der gegebenen  $T$ -Werte für 5-Jahresintervalle geschätzt und gleichzeitig für alle sich ergebenden 5-Jahresintervalle die totale Eislinsendicke gemessen. Da bei gleichmässiger Verteilung der Eislinsen über die Bohrkernlänge ( $E/L$ ängeneinheit konstant bei  $T = \text{konstant}$ ) automatisch bei grösserer Akkumulation auch die totale Eislinsendicke grösser sein müsste, wurde in der Folge die Differenz zwischen der gemessenen und der bei gleichmässiger Eislinsenverteilung zu erwartenden Eislinsendicke für alle vollständigen 5-Jahresintervalle mit  $T$  korreliert. Es stellte sich eine eindeutig positive Korrelation ( $r = 0.724$ , 12 stochastisch abhängige Wertepaare) mit einem krassen «Ausreisser» (Intervall 1960/61 – 1965/66) ein. Bei der plausibleren Annahme einer (theoretisch) gleichmässigen Verteilung der Eislinsen über die Zeit ( $E/Zeiteinheit$  konstant bei  $T = \text{konstant}$ ) kann die gemessene Eislinsendicke direkt mit  $T$  korreliert werden ( $r = 0.810$ ). Es konnte somit angenommen werden, dass die gewählte Zeiteinteilung den beobachteten Trends in der  $b/T$ - und  $E/T$ -Beziehung einigermaßen gerecht wird. Als nächster Schritt wurden die markantesten Eislinsenanhäufungen innerhalb der nun festgelegten 5-Jahresintervalle mit den höchsten  $T$ -Werten aus den gleichen Zeitabschnitten in Beziehung gesetzt. Durch einen Vergleich zwischen dieser Eislinsendatierung und der gewählten, als sinnvoll betrachteten Zeiteinteilung konnte der Datierungsfehler auf rund  $\pm 1$  Jahr geschätzt werden. Der unterste Abschnitt der Bohrung von 1976 wird demnach dem Jahre 1911 zugeordnet. Dieses Resultat stimmt innerhalb der angegebenen Fehlergrenzen mit demjenigen der davon völlig unabhängig ermittelten  $^{210}\text{Pb}$ -Datierung überein. Auf alle Fälle darf angenom-

men werden, dass die über die Eislinsenverteilung ermittelte Bohrkernchronologie der Wirklichkeit besser entspricht als eine Datierung mit einer konstanten durchschnittlichen Akkumulation, da diese den Firnzuwachs in der Mitte des 20. Jahrhunderts unter- und denjenigen in der ersten Jahrhunderthälfte überschätzt hätte.

### **Erste Anwendungen: Akkumulationsgeschichte und pH-Entwicklung**

In Abbildung 5 sind die am Bohrkern gemessenen pH-Werte als Funktion der nun als bekannt vorausgesetzten Zeit in gleitenden dreijährigen Mitteln aufgetragen. Die pH-Messungen wurden unmittelbar nach dem Aufschmelzen in Plastikbehältern an den Proben (20–50 ml) für die  $^3\text{H}$ - und die  $\delta^{18}\text{O}$ -Bestimmung gemessen, um einen ersten Überblick zu erhalten, und sollten in ihrer Genauigkeit nicht überschätzt werden. Generell scheint das pH der auf dem Colle Gnifetti abgelagerten Niederschläge seit etwa 1915 zwischen den Werten von 5.6 und 6.3 mit extremen Einzelwerten von 5.1 und 6.9 geschwankt zu haben, der Mittelwert für die Periode 1916–1965 beträgt  $6.0 \pm 0.2$ . Seit rund 1965 ist eine deutliche Tendenz zu niedrigen pH-Werten zu beobachten, was durch Messungen an Schachtproben vom Colle Gnifetti im Oktober 1979 bestätigt wird. Der Trend, der auch in direkten Messungen beobachtet wird, muss im Zusammenhang mit der stark steigenden Emission von Schwefeloxiden durch die Verbrennung fossiler Kohlenstoffe gesehen werden (Likens et al. 1979). Aktuelle Werte von Firnproben am Colle Gnifetti liegen bei pH 5 mit Einzelwerten bis hinunter auf pH 4. Eine detaillierte Analyse dieser Entwicklung wird erst möglich sein, wenn die stark streuenden Einzelmessungen durch eine differenziertere Stratigraphie zeitlich besser eingeordnet werden können und exaktere Messungen vorliegen.

In Abbildung 6 ist die Akkumulationsgeschichte auf dem Colle Gnifetti aufgrund der erwähnten Temperatur-Akkumulationsbeziehung rekonstruiert. Dargestellt sind wiederum gleitende dreijährige Mittel, da die benützte Beziehung wohl nur generelle

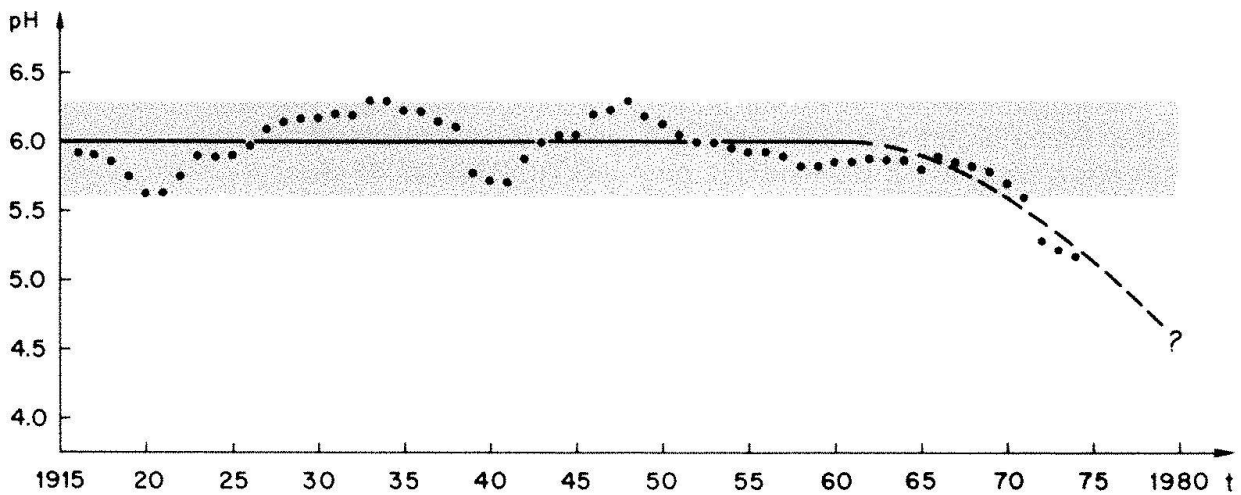
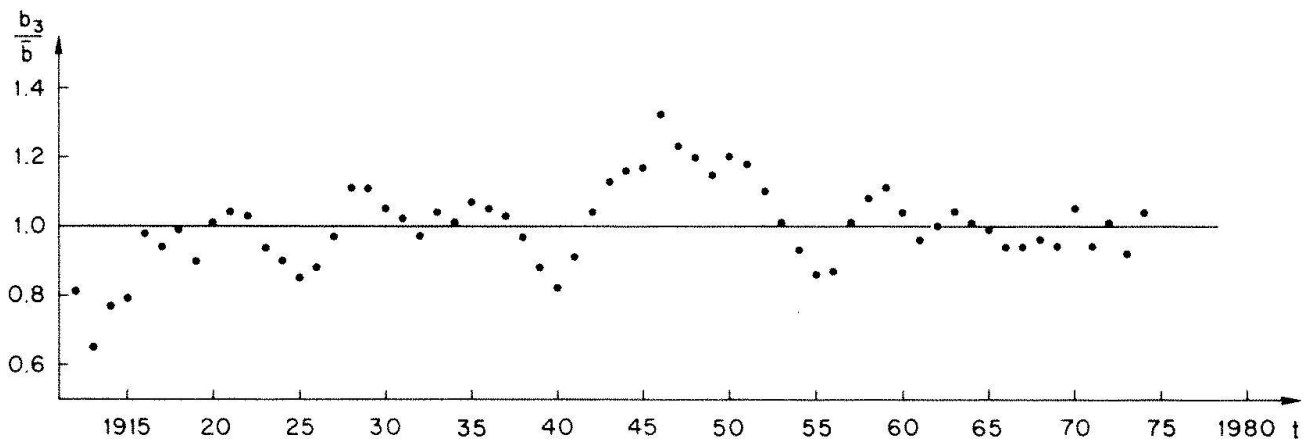


Abb. 5. pH-Werte vom Bohrkern 1976, nach der bisher erarbeiteten Datierung als Funktion der Zeit aufgetragen (gleitende 3jährige Mittel).

Trends gibt und für Einzeljahre nicht überschätzt werden sollte. Falls die Beobachtungen auf dem Colle Gnifetti auf andere hochgelegene Akkumulationsgebiete der Alpen mit kaltem Firn übertragen werden können, ergäben sich interessante Informationen über den Massenhaushalt steiler, hochgelegener Hängegletscher über rund 4000 m ü.M. In temperierten Firngebieten der Alpen ist eine negative Korrelation zwischen Sommertemperatur und Firnzuwachs bekannt (Ambach und Eisner 1967), so dass

Abb. 6. Firnzuwachs (Nettomassenbilanz) am Colle Gnifetti (gleitende 3jährige Mittel,  $b_3$ ) im Vergleich zum Durchschnittswert für den ganzen Bohrkern 1976 (32 cm Wasseräquivalent,  $b$ ), rekonstruiert aufgrund der Beziehung  $b = 30.41 + 7.35 T$  (vgl. Text), nach der bisher erarbeiteten Datierung als Funktion der Zeit aufgetragen.

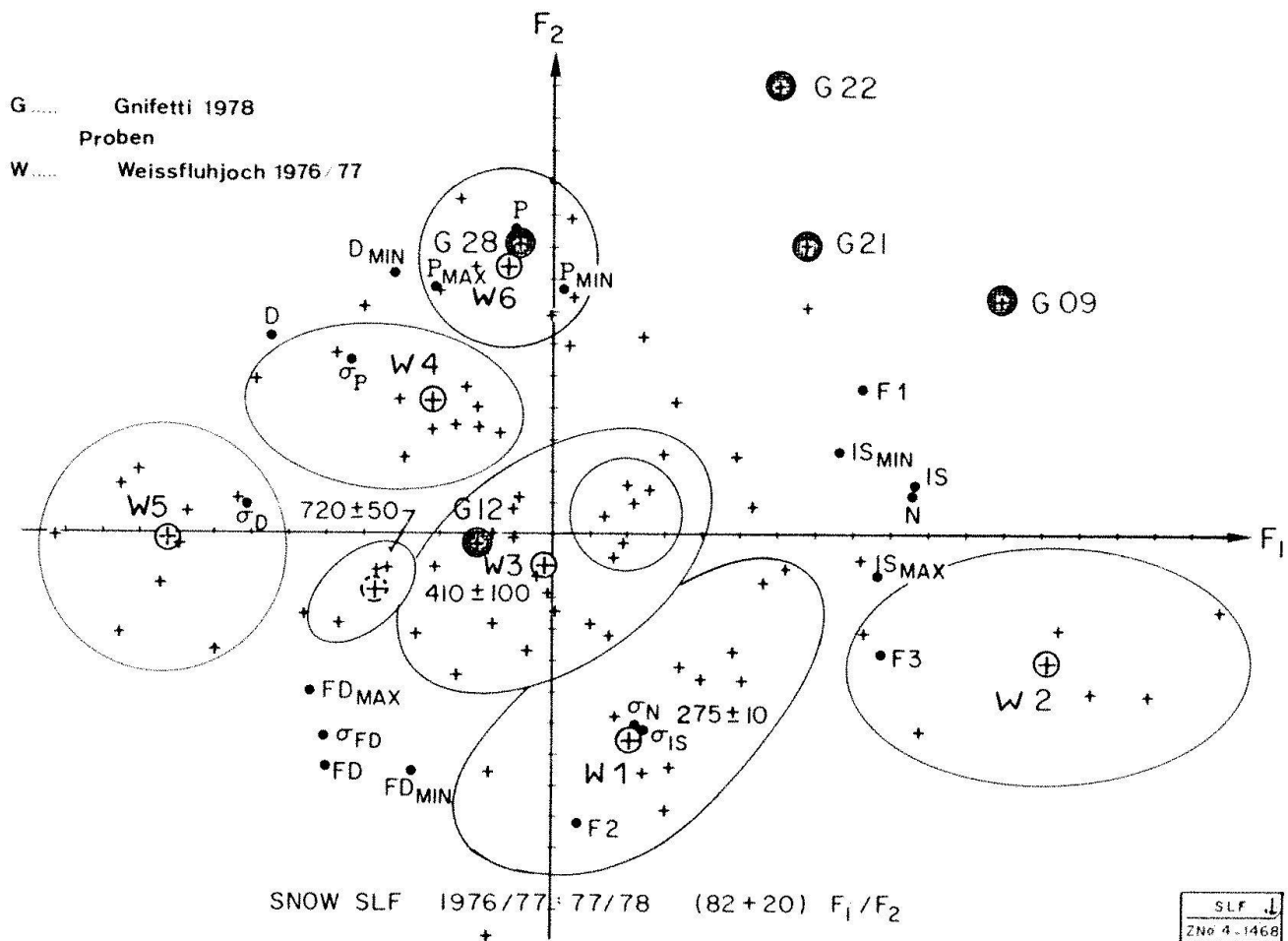


sich in kalten und temperierten Firngebieten (Pass- und Muldenlagen?) möglicherweise gegenläufige Bilanzentwicklungen abspielen. Zwei Hauptfragen stellen sich im Zusammenhang mit diesen und ähnlichen Zeitreihen, nämlich: Wie kann ein differenzierterer Zeitraster erstellt werden? Wie weit zurück lässt sich die Entwicklung anhand von Bohrkernen auf dem Colle Gnifetti rekonstruieren?

### Weiterführende Arbeiten

Im Frühjahr 1978 wurden in einem Schacht bei der Bohrstelle Proben aus rund 3 Jahresschichten entnommen, um die Schneeablagerungen auf dem Colle Gnifetti detaillierter zu analysieren. In erster Linie soll bei dieser Untersuchung eine Vielzahl charakteristischer Parameter von Schneeschichten aus verschiedenen Jahreszeiten und Herkunftsgebieten bestimmt und damit für die Bohrkernkerne eine Art «Interpretationsschlüssel» erarbeitet werden. Neben den Analysen von





Pollen, Isotopen, Staub, Haupt- und Spurenelementen werden auch umfassende Strukturuntersuchungen durchgeführt. Dabei werden durch Ausgiessen der Kornzwischenräume bereits ablaufende Umlagerungsvorgänge gestoppt und das Gefüge des Schnees (Firns) stabilisiert. Anschliessend wird ein Dünnschnitt der Probe mit einem Mikrophotometer automatisch abgetastet und auf 47 verschiedene Parameter analysiert, wovon 20 in einer Faktordarstellung Verwendung finden (Good 1975, 1976). Ein Beispiel mit Proben vom Colle Gnifetti ist in Abbildung 7 dargestellt. Wegen der geringen Anzahl von Proben wurden diese nicht nur unter sich, sondern im Verband mit Proben aus der natürlichen Winterschneedecke 1977/78 am Weissfluhjoch verglichen, wo Stichproben aus ein und derselben Ablagerungsschicht von Ende Dezember 1977 in Abständen von 14 Tagen entnommen, fixiert und analysiert wurden. Die strukturelle Probencharakterisierung ergibt Punktgruppierungen, deren Schwerpunkte in Abbildung 7 mit W1-W6 bezeichnet sind. Sie werden ergänzt durch

Abb. 7. Faktordarstellung von Strukturelementen einiger Gnifettiprobe (G ...) im Verband mit Schneeprüben vom Versuchsfeld Weissfluhjoch (W ...).  $F_1$  und  $F_2$  sind die Faktorenachsen, D ist die Dichte, IS und N stehen beispielsweise für die Anzahl der Randpunkte und den Durchmesser von Firn- oder Schneekörnern im Präparat.

die Erwartungswerte der 20 Parameter, der nicht eindeutig zuzuordnenden Individuen und der 5 Gnifettiprobe (G ...). So wird ersichtlich, dass sich letztere von den Punkten, welche die Winterschneedecke charakterisieren, zum Teil deutlich abheben. In dieser Darstellung ist zudem die Bedeutung der Faktorachsen anschaulich dargestellt: Mit der  $F_1$ -Achse positiv korreliert sind zum Beispiel die Anzahl der Randpunkte (IS), mit der Achse  $F_2$  die Dichte (P) und der Durchmesser (D). G12 ordnet sich zwanglos in die Gruppe der Schneeprüben, die zwischen Mitte Februar und Mitte März entnommen wurden, und G25 in die Elemente des bis Mai gealterten Schnees ein. G09, G21 und G22 bilden eine Gruppe für sich im ersten Quadranten.

Es wäre sicher verfrüht, eine Zuordnung aufgrund der strukturellen Merkmale zu wagen, da zu viele unkontrollierte Phasen in der Probenbeschaffung vorhanden sind. Hingegen ist der Abstand zwischen den einzelnen Proben im Faktorraum gross genug – alle waren denselben unkontrollierten Bedingungen ausgesetzt –, so dass wesentliche Unterschiede in der Gefügestruktur sichtbar werden und als Hilfe in der Datierung herangezogen werden können.

Für die Datierung langer Bohrkerne – im Idealfall bis hinunter auf das Felsbett – bieten sich in erster Linie rheologische Betrachtungen an. Nach einer photogrammetrischen Auswertung von Luftbildern des 6. September 1977 durch A. Flotron, Meiringen, und einer terrestrischen Vermessung durch W. Schmid, VAW, mit Kern DKM 2A und DM 501 (Distanzmessung) am 19. Oktober 1979 verschob sich die Bohrstelle im genannten Zeitraum mit einer Geschwindigkeit von rund 1.7 m pro Jahr nach Norden. Aufgrund der gemessenen Verschiebung kann in erster Näherung angenommen werden, dass die durch die Bohrstelle verlaufende Fliesslinie etwa in der Falllinie unter der Capanna Margherita (Signalkuppe-Gipfel) am Hangfuss beginnt, sich entlang der Firnscheide zur Bohrstelle hinzieht und im Bereich der Bohrstelle langsam auf den Abbruch im Osten hin abschwengt. Eine wichtige Folgerung aus dieser Beobachtung ist, dass die Fliesslinie, die zum Bohrloch führt, offenbar senkrecht zur Hauptwindrichtung verläuft, was wohl die erstaunliche Konstanz der im Bohrfern festgestellten Akkumulation erklärt (keine Veränderungen der Luv-/Lee-Effekte entlang der Fliesslinie!). Die Länge der Fliesslinie (ca. 320 m) erlaubt eine grobe Abschätzung der minimalen Zeitspanne, welche in einem bis zum Felsuntergrund reichenden Bohrkern enthalten ist, dies unter der Voraussetzung, dass die Fliessgeschwindigkeit des Eises am Felsbett gleich gross ist wie an der Oberfläche und entlang der Fliesslinie konstant bleibt. Demnach muss im Eis an der Bohrstelle ein Intervall von mindestens 190 Jahren enthalten sein. Die im Bohrloch gemessenen Temperaturen (Oeschger et al. 1978) lassen jedoch darauf schliessen, dass die Temperatur an der Grenzfläche zwischen Fels und Eis bei etwa  $-10$  bis  $-12^{\circ}\text{C}$  liegt. Der Gletscher ist des-

halb zweifellos am Felsbett angefroren und die Geschwindigkeit am Felsbett wird damit 0. Für diesen Fall geben Hammer et al. (1978) gestützt auf Betrachtungen von Haeffeli (1961) eine rheologisch begründete Datierungsmethode, die zumindest grobe Extrapolationen erlaubt, nämlich mit  $t = \text{Zeit}$

$$t = \frac{H}{\lambda_H} \ln \frac{H}{y}$$

(Jahre),  $H = \text{Eismächtigkeit in w.e. (m)}$ ,  $\lambda_H = \text{jährlicher Firnzuwachs in w.e. (m), Jahr}$  und  $y = \text{Distanz vom Felsbett in w.e. (m)}$ . Bei einer im Frühling 1978 ermittelten Eismächtigkeit von rund 90 m an der Bohrstelle (Thyssen, in Vorbereitung), entsprechend 70 m.w.e. (Oeschger et al. 1978), und unter Annahme einer konstanten Akkumulation von 0.32 w.e.(m) pro Jahr können sowohl Entstehungszeit wie auch Ausdünnung von früher abgelagerten Schichten als Funktion der Tiefe geschätzt werden. Für die Bohrung von 1976 sind die Verdünnungseffekte noch vernachlässigbar, könnten aber in den tiefsten Kernen bereits geringfügige Zeitverschiebungen gegenüber der bisherigen Datierung ergeben.

Bereits auf rund 40% der ursprünglichen Mächtigkeit sind die Jahresschichten in den untersten Kernen der Bohrung von 1977 bis 65 m Tiefe (Oeschger et al. 1978) ausgedünnt. Dieser Bohrkern dürfte annähernd 200 Jahre umfassen. Der klimatologisch besonders interessante Beginn der «Kleinen Eiszeit» um 1600 n. Chr. dürfte in einer Tiefe von rund 75–80 m zu erwarten sein, wobei mit jährlichen Schichtdicken von nur noch 5–10 cm zu rechnen ist. Es erscheint im Rahmen dieser Betrachtungsweise nicht unmöglich, auf dem Colle Gnifetti mit tiefen Bohrungen Jahresschichten von einigen cm Dicke aus dem Hochmittelalter zu bergen. Da jedoch die hier verwendete Berechnungsmethode für grössere Tiefen nur sehr grobe Schätzungen erlaubt, ist geplant, aufgrund weiterer Geschwindigkeits-, Akkumulations- und Dickenmessungen ein präziseres Modell für den Fall des Colle Gnifetti zu rechnen.

## Literatur

- Ambach, W. und Eisner, H. 1965: Radioaktivitätsmessungen zur Bestimmung der Firnrücklagen eines Alpengletschers. *Die Naturwissenschaften* 52, no.7, 154.
- Ambach, W. und Eisner, H. 1967: Klimatologische Interpretation eines Firnpollenprofils. 9. Internationale Tagung für alpine Meteorologie in Brig und Zermatt 1966. Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt Nr.4, 25-31.
- Ambach, W., Eisner, H. und Sauzay, G. 1969: Tritium profiles in two firn cores from alpine glaciers and tritium content in precipitation in the alpine area. *Arch. Met. Geoph. Bioklim. Serie B*, 17, 93-104.
- Benson, C.S. 1962: Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland ice sheet. *CRREL Research Report* 70, 93 p.
- Dansgaard, W. 1964: Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, Vol. 16, No.4, 436-468.
- Eisner, H. 1971: Bestimmung der Firnrücklagenverteilung im Akkumulationsgebiet des Kesselwandferners (Oetztaler Alpen) durch Messung der Gesamt- $\beta$ -Aktivität von Bohrproben. *Zeitschrift für Gletscherkunde* Bd. 7, H. 1-2, 65-78.
- Gäggeler, H. 1978:  $^{210}\text{Po}$  ( $^{210}\text{Pb}$ ) Dating on the Colle Gnifetti core 1976. Appendix A in Oeschger et al (1977). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 13, H. 1/2 (1977), 204-206.
- Good, W. 1975: Numerical parameters to identify snow structure. *Snow Mechanics Symposium, Proceedings of the Grindelwald Symposium*, April 1974, IAHS Publ. No. 114, 91-102.
- Good, W. 1976: Multivariate data analysis to describe intra- and intergranular relations in thin sections. *Proceedings of the Fourth International Congress for Stereology at NBS - Gaithersburg 1975*. National Bureau of Standards Special Publication 431, 75-78.
- Haeberli, W. 1976: Eistemperaturen in den Alpen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 11, H. 2 (1975), 203-220.
- Haefeli, R. 1961: Contribution to the movement and the form of ice sheets in the Arctic and Antarctic. *Journal of Glaciology* Vol. 3, No. 30, 1133-1150.
- Hammer, C.U., Clausen, H.B., Dansgaard, W., Gundestrup, N., Johnson, S.J. und Reeh, N. 1978: Dating of Greenland ice cores by flow models, isotopes, volcanic debris, and continental dust. *Journal of Glaciology* Vol. 20, No. 82, 3-26.
- Langway, C.C.Jr. 1967: Stratigraphic analysis of a deep ice core from Greenland. *CREEL Research Report* 77, 130 p.
- Likens, G.E., Richard, F.W., Galloway, J.N. and Butler, T.J. 1979: Acid Rain. *Scientific American* Vol. 241, No. 4, 39-47.
- Oeschger, H., Renaud, A. und Schumacher, E. 1962: Essai de datation par le tritium des couches de névé du Jungfraujoche et détermination de l'accumulation annuelle. *Bull. Soc. Vaudoise des Sciences Naturelles* 68, no. 306, 49-56.
- Oeschger, H., Schotterer, U., Stauffer, B., Haeberli, W. und Röthlisberger, H. 1978: First results from alpine core drilling projects. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 13, H. 1/2 (1977), 193-208.
- Patzelt, G.: Statistik der Längenmessungen an den österreichischen Gletschern 1960-1975. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* Bd. 12, H. 1 (1976), 91-94.
- Schotterer, U., Finkel, R., Oeschger, H., Siegenthaler, U., Wahlen, M., Bart, G., Gäggeler, H. und von Gunten, H.R. 1977: Isotope measurements on firn and ice cores from alpine glaciers. *Isotopes and Impurities in Snow and Ice, Proceedings of the Grenoble Symposium, August/September 1975*, IAHS Publication No. 118, 232-236.
- Thyssen, F. (in Vorbereitung).

Die beschriebenen Untersuchungen wurden vom Schweizerischen Nationalfonds und von der ETH Zürich unterstützt.

Für die sorgfältigen  $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen sei K. Hänni, Physikalisches Institut Universität Bern, und für die Beratung in statistischen Fragen der Eislinsenuntersuchung H. Jensen, VAW/ETH Zürich, herzlich gedankt.

### *Anschrift der Autoren:*

Ulrich Schotterer  
Prof. Dr. Hans Oeschger  
Physikalisches Institut der Universität Bern  
Sidlerstrasse 5  
CH-3012 Bern

Dr. Walter Good  
Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung  
CH-7260 Weissfluhjoch-Davos

Dr. Wilfried Haeberli  
PD Dr. Hans Röthlisberger  
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich  
ETH-Zentrum, Gloriastrasse 37/39  
CH-8092 Zürich