

Kartierung von wassergesättigten Firnschichten auf dem Kesselwandferner mit dem EMR-Verfahren

Von F. Thyssen, H. Eisner, N. Blindow und W. Ambach*

Zusammenfassung: Die räumliche Verteilung von Wasser im Akkumulationsgebiet eines Gletschers ist im Zusammenhang mit der hydrologischen Bilanz des Einzugsgebietes von besonderem Interesse. Es ist bekannt, daß sich im Akkumulationsgebiet von Alpengletschern an der Grenzfläche zwischen wasserdurchlässigem Firn und wasserundurchlässigem Gletschereis eine Wassertafel ausbildet, deren Ortung bisher nur durch Bohrung möglich war. Daher war die Erprobung eines elektromagnetischen Impulsverfahrens (EMR-Verfahren) zur Kartierung von wassergesättigten Firnschichten sinnvoll. Elektromagnetische Wellen werden an Strukturen mit unterschiedlicher Dielektrizitätskonstante reflektiert. Dichteunterschiede von trockenem Firn bedingen eine wesentlich geringere Reflexionsamplitude als Unterschiede im freien Wassergehalt bei gleicher Firndichte. Stark wasserhaltige Firnschichten können daher auf Grund einer großen Reflexionsamplitude erkannt werden. Die Feldarbeiten wurden im Juli 1980 am Kesselwandferner (Ötztaler Alpen) erfolgreich durchgeführt.

Summary: The spatial distribution of water in the accumulation area of a glacier is of fundamental interest for the water balance of the drainage area. It is known that in the accumulation area of Alpine glaciers a water table exists between the layers of water-permeable firn and water-impermeable ice; this has so far been detected only by drillings. Thus it seemed sensible to test an electromagnetic-impulse-method (EMR-method) in order to map the water-saturated firn layers within the glacier. Electromagnetic waves are reflected by all structures of different dielectric constants. Differences in density of dry firn cause a lower amplitude of reflexion than differences of the free water content of firn with the same density. Therefore firn layers with a high amount of free water can be detected by the high amplitude of the reflected signal. The field work was carried out successfully on Kesselwandferner (Oetzal Alps) during the July of 1980.

Einleitung

Ziel dieser Untersuchung war es, die Wege des Wassertransportes mit Hilfe von Reflexionen elektromagnetischer Wellen im Gletscher großflächig zu kartieren (EMR-Verfahren). Wesentlich hierfür ist die Tatsache, daß die Dielektrizitätskonstante von Wasser um mehr als eine Zehnerpotenz größer ist als die Dielektrizitätskonstante von trockenem Firn, so daß relativ hohe Reflexionsamplituden an wassergesättigten Firn- oder Eisschichten erwartet werden können. Als Meßfeld wurde das Akkumulationsgebiet des Kesselwandfeners (Ötztaler Alpen) gewählt, weil dort bereits mehrere Studien über die Ausbildung einer Wassertafel durchgeführt worden sind (AMBACH et al. 1978b). Die Messung wurde im Juli 1980 in einer Periode mit Schneeschmelze durchgeführt.

Direkte Beobachtungen des Abflusssystems der Gletscher sind bisher nur durch Bohrungen und Schachtgrabungen möglich gewesen. Indirekte Beobachtungen ergeben sich durch Verfolgung des markierten Schmelzwasserflusses. Da der Schmelzwasserfluß sowohl das Akkumulationsgebiet als auch das Ablationsgebiet durchfließt, konnten aus Fließgeschwindigkeit, Verweilzeiten und ähnlichem erste Ergebnisse gewonnen werden. So hat z. B. STENBORG (1968, 1969, 1973) aufgrund des Abflusses von Schmelzwasser Aussagen über die innere Struktur des Mikkgalaciären, Nordschweden, gemacht. Weitere Fortschritte wurden erzielt durch Markierung des Schmelzwasserflusses im Ablationsgebiet mit Hilfe von Fluoreszenztracern (AMBACH et al. 1972, BEHRENS et al. 1975). RÖTHLISBERGER (1972) hat durch Rechnung nachgewiesen, daß der Schmelzwasserfluß im Ablationsgebiet auch in einem geschlossenen Rohrsystem über große Entfernungen stattfinden kann.

* Prof. Dr. Franz Thyssen und Dipl.-Phys. Norbert Blindow, Forschungsstelle für Physikalische Glaziologie, Institut für Geophysik der Universität, Gievenbecker Weg 61, D-4400 Münster (Westf.).
Wiss. Oberrat Dr. Heinrich Eisner, Institut für Experimentalphysik der Universität, Schöpfstr. 41, A-6020 Innsbruck.
Prof. Dr. Walter Ambach, Institut für Medizinische Physik der Universität, Müllerstr. 44, A-6020 Innsbruck.

Zufolge des Firnkörpers im Akkumulationsgebiet liegen hier im Vergleich zum Ablationsgebiet für den Schmelzwasserfluß völlig andere Verhältnisse vor, wie Arbeiten auf dem South Cascade Glacier, dem Hintereisferner und dem Vernagtferner zeigten (KRIMMEL et al. 1973, AMBACH et al. 1974, BEHRENS et al. 1976, MOSER et al. 1976).

Zwei Schachtgrabungen im Akkumulationsgebiet des Kesselwandfeners bis in eine Tiefe von etwa 25 m ergaben erstmals einen deutlichen Hinweis darauf, daß im Akkumulationsgebiet eines temperierten Gletschers im Übergangsbereich vom wasserdurchlässigen Firnkörper in wasserundurchlässiges Gletschereis eine wassergesättigte Firnschicht auftritt (AMBACH et al. 1978). Bei einer Bohrung bis in diesen Tiefenbereich stellt sich an der Oberseite der wassergesättigten Firnschicht ein freier Wasserspiegel ein, so daß der Vergleich dieser wassergesättigten Firnschicht mit einer Wassertafel gerechtfertigt erscheint. Durch kontinuierliche Registrierung des freien Wasserspiegels der Wassertafel im Schacht wurden jahreszeitliche, witterungsbedingte und tageszeitliche Niveauschwankungen gemessen. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse über die Wasserspiegelschwankungen wurde bereits gegeben (AMBACH et al. 1978a). Ferner wurde durch verschiedene Überlegungen die Dicke der wassergesättigten Firnschicht abgeschätzt. Sie dürfte in der Größenordnung von 0,5 m liegen (AMBACH & EISNER 1981).

Die Ausbildung einer Wassertafel im Akkumulationsgebiet eines temperierten Gletschers dürfte eine allgemeine Erscheinungsform sein. So wurde von VALLON et al. (1976), LANG et al. (1977) und SCHOMMER (1977) durch Bohrungen in anderen Gebieten die Wassertafel erschlossen. Umfangreiche Untersuchungen der Wassertafel durch Bohrungen liegen ebenfalls vom Vernagtferner vor (MOSER et al. 1979).

Die Kenntnis der räumlichen Verteilung des Wassers und seines Transportsystems würde die bisher vorliegenden Ergebnisse entscheidend erweitern. Hierzu sind geophysikalische Kartierungsverfahren, die an der Gletscheroberfläche eingesetzt werden können, bisher vereinzelt genutzt worden.

Die elastischen Eigenschaften von Eis und Firn werden durch Wassergehalte verändert. Im Prinzip können daher seismische Verfahren eingesetzt werden, um das Schmelzwasser im Gletscherinneren und an der Grenzfläche Eis-Fels aufzuspüren (THYSSEN 1967). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen wird jedoch nur geringfügig durch den Wassergehalt modifiziert, viel entscheidender ist der Einfluß der Dichte. Die Trennung der Einflüsse von Wassergehalts- und Dichteschwankungen allein durch seismische Verfahren, z. B. durch Vergleich von P- und S-Wellengeschwindigkeiten, ist schwierig und bisher noch nicht gelöst.

Wellenlängen in der Größenordnung von 30 m, wie sie in der Seismik üblich sind, erlauben keine Kartierung kleinräumiger Strukturen, wie Gerinne für Schmelzwasser. Wesentlich kürzere Wellenlängen werden insbesondere im Firn stark absorbiert. Seismische Verfahren sind daher für die hier anstehenden Fragestellungen nur beschränkt einsetzbar.

2. Anwendung des EMR-Verfahrens zur Bestimmung von Wasserhorizonten im Gletscher

Bereits frühzeitig wurde versucht, durch Anwendung elektromagnetischer Impulsverfahren (EMR-Verfahren) Probleme der Glazialhydrologie zu lösen (GOODMAN & TERROUX 1973). Wie auch in der Seismik, lag auch hier das Ziel der Arbeiten vorrangig in der Bestimmung der Gletschermächtigkeiten. Bei geeigneter Ausbildung des elektromagnetischen Meßverfahrens lassen sich jedoch auch Feinstrukturen im Inneren der Gletscher untersuchen.

Der entscheidende physikalische Parameter für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Gletschereis, sowie für ihre Reflexion im Gletscherinneren nach den Fresnel'schen Formeln, ist die komplexe Dielektrizitätskonstante ϵ . Durch Normierung mit der Dielektrizitätskonstante des Vakuums $\epsilon_0 =$

$8,8544 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}}$ ergibt sich die relative Dielektrizitätskonstante k_e zu

$$k_e = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} - j \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} = k_e' - j k_e''$$

Unter Einführung des Verlustwinkels ϑ mit $\text{tg } \vartheta = \frac{k_e''}{k_e'}$ folgt für die Ausbreitungsgeschwindigkeit V

$$V = c \left| \frac{k_e'}{2} \left((1 + \text{tg}^2 \vartheta)^{1/2} + 1 \right) \right|^{-1/2}$$

und für die Absorption α in db/m

$$\alpha = 8,686 \frac{\omega}{c} \left| \frac{k_e'}{2} \left((1 + \text{tg}^2 \vartheta)^{1/2} - 1 \right) \right|^{1/2}$$

Darin bedeuten c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und ω die Kreisfrequenz.

Werden elektromagnetische Reflexionsmessungen bei Frequenzen von ca. 30 Mhz und Eismächtigkeiten von Größenordnungen 100 m in temperierten Gletschern ausgeführt, so können die dissipativen Verluste weitgehend vernachlässigt werden. Es gilt in guter Näherung $\text{tg } \vartheta = 0$ und $\alpha = 0$. Mit dieser Näherung gelten die Fresnel'schen Formeln in der vereinfachten allgemein bekannten Form für verlustfreie Materialien.

Reflexionen treten auf, wenn sich die Dielektrizitätskonstanten an beiden Seiten einer Grenzfläche unterscheiden. Firn und Eis der temperierten Gletscher setzen sich aus reinem Eis, Luft und Wasser zusammen. Die Dielektrizitätskonstante ist daher durch Mischungsformeln zu berechnen. Hierzu gibt es eine Reihe von Arbeiten, z. B. WIENER 1910, BEEK 1967, BÖTTCHER 1952, LOOYENGA 1965. Die Dielektrizitätskonstante hängt von Dichte und Wassergehalt ab, Reflexionen aus dem Inneren des Gletschers treten sowohl bei Dichteunterschieden als auch bei Unterschieden im Wassergehalt auf. AMBACH & DENOTH (1972) legen eine empirische Bestimmung der Dielektrizitätskonstante im Firn der temperierten Alpengletscher vor. In Abhängigkeit von der Dichte ρ und dem Wassergehalt $W < 10 \text{ Vol}\%$ wird der folgende Zusammenhang abgeleitet:

$$k_e - 1 - 2,22 \rho = 0,236 W$$

Das Ziel dieser Untersuchung ist eine Kartierung von Wasserhorizonten in Firn und Eis. Es muß daher versucht werden, Horizonte, die durch Dichteunterschiede gekennzeichnet sind, von solchen, die auch Wasser enthalten, zu unterscheiden. Dieses kann über das Vorzeichen des reflektierten Signals im Vergleich zum Vorzeichen des einfallenden Signals oder aber über die Amplitude des reflektierten Signals vorgenommen werden. Das Vorzeichen des reflektierten Signals ändert sich, wenn die Dielektrizitätskonstante des Liegenden höher ist als die des Hangenden. Dieses kann auch ohne Wassergehalte bei Dichten im Firn von etwa 0,3 bis 0,8 g/cm³ dann auftreten, wenn trockener Firn einer Eisschicht überlagert ist. Allgemein kann also das Vorzeichen des reflektierten Signals höchstens als Hinweis für das Auftreten von Wasser herangezogen werden, da wasserhaltige Firnschichten ebenfalls eine höhere Dielektrizitätskonstante aufweisen als vergleichbarer trockener Firn. Reflexionen elektromagnetischer Wellen können daher nur in ihrer relativen Amplitude genutzt werden, um Wassergehalte oder starke Dichtesprünge anzuzeigen. Damit wird eine völlig eindeutige Zuordnung der elektromagnetischen Reflexionen zum Wassergehalt nicht möglich. Diese Schwierigkeiten sind jedoch nur in den oberen Metern der Firnschicht von Bedeutung. In größeren Teufen über 5 m ist der Bereich, in dem die Dichte des Firns schwankt, außer in Sonderfällen gemeinhin nicht größer als 0,5 bis 0,8 g/cm³. Eine Auflösung der oberen 5 m war mit dem im folgenden zu besprechenden Meßverfahren nicht angestrebt. Daher wird dieses Problem hier nicht weiter behandelt.

Eine wasserführende Schicht und insbesondere auch die Wassertafel wird durch poröse, wasserhaltige Firnschichten gebildet, wobei als Stauer eine impermeable Eisschicht unterlagert ist. Berechnet man für $r = 0,5 \text{ g/cm}^3$ und $r = 0,82 \text{ g/cm}^3$ für wasserfreien Firn den Reflexionskoeffizienten und vergleicht ihn mit dem Reflexionskoeffizienten für Firn der Dichte $r = 0,5 \text{ g/cm}^3$ wasserfrei und 10 Vol% Wassergehalt als Mindestwert in der gleichen Firnschicht, so sind die Reflexionskoeffizienten und damit die reflektierten Amplituden im zweiten Fall mehr als doppelt so groß wie im Übergang Firn — Eis. Im allgemeinen darf angenommen werden, daß Reflexionen von wasserhaltigen Schichten mit größeren Wasseranteilen im Porenvolumen ein deutlich größeres reflektiertes Signal ergeben als es, außer in Sonderfällen, nur durch Dichteunterschiede erbracht werden kann. Abb. 1 zeigt zwei benachbarte Registrierergebnisse, im oberen Teil mit einer Reflexion von der Wassertafel, im unteren Teil ohne dieses Signal. Zusammenfassend kann gesagt werden, die wasserhaltigen Firnschichten können i. a. durch ihre größere Reflexionsamplitude von Reflexionen an normal auftretenden Dichteschwankungen unterschieden werden. Die Unterscheidung ist jedoch nicht in jedem Falle sicher. Durch eine Messung vor Beginn des Schmelzprozesses und ihre Wiederholung auf dem gleichen Profil nach Einsetzen des Schmelzens wäre eine sichere Unterscheidung möglich. Derartige Messungen konnten jedoch aus logistischen Gründen auf dem Kesselwandferner bisher noch nicht ausgeführt werden.

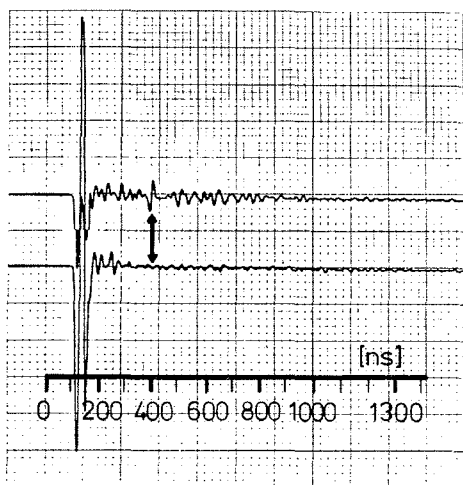


Abb. 1: Vergleich von direkt benachbarten Registrierungen: Mit Wassertafel (oben) und ohne Wassertafel (unten), gekennzeichnet durch einen Pfeil.

Fig. 1: Comparison of signals from adjacent sites: with water table (above) and without water table (below), indicated by an arrow.

In Abb. 1 ist erkennbar, welche Informationen das EMR-Verfahren direkt liefert, nämlich die Reflexionsamplituden als Hinweis auf Unterschiede der Dielektrizitätskonstante und die Laufzeiten als Hinweis für die Tiefenlage der Reflektoren. Um aus diesen Informationen die Tiefe der Wassertafel zu berechnen, ist die Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen notwendig. Diese ist auf verschiedene Weise mit geophysikalischen Verfahren zu ermitteln. Auf dem Kesselwandferner konnten Bohrlochversenkmessungen bis nahezu zur Wassertafel ausgeführt werden (ca. 18 m Teufe). Hierbei wird der Sender im Bohrloch in verschiedene Teufen versenkt und an der Oberfläche mit dem festliegenden Empfänger die Laufzeit der elektromagnetischen Signale auf dem Wege vom Sender zum Empfänger gemessen. Das Ergebnis ist in Abb. 2 aufgezeigt. Die Geschwindigkeit ist in erster Näherung im Rahmen der erreichten Meßgenauigkeit konstant und durch einen linearen Zusammenhang mit $189 \text{ m}/\mu\text{s}$ zu berechnen. Dieses entspricht einer mittleren Dielektrizitätskonstante von 2.52 über die gesamte Teufe. Der Einfluß dünner Wasserschichten ist bei dieser Durchstrahlungsmessung zu vernachlässigen. Eine detaillierte Diskussion der Teufenabhängigkeit dieser Größen sollte einer vorbereiteten Messung mit höherer Genauigkeit vorbehalten bleiben. Für das in dieser Arbeit zu behandelnde Problem ist die hier ermittelte mittlere Geschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen bis nahezu zur Wassertafel ausreichend. Aus den Laufzeiten kann so die Teufe bis zur Wassertafel ermittelt werden.

Punkt förmige Vermessungen sind vergleichbar mit Einzelbohrungen. Das Meßverfahren konnte jedoch so modifiziert werden, daß die Horizonte kontinuierlich auf Profilen vermessen und kartiert werden können. Ein leichter PVC-Rohrrahmen mit Monopulsender und Antenne wird in geeignetem, aber festem Abstand von 8 m hinter einem gleichen Rahmen für die Empfangsantenne geschleppt, die batteriebetriebene Aufnahmeapparatur mit digitaler Magnetbandaufzeichnung auf einem Schlitten mit Hand gezogen.

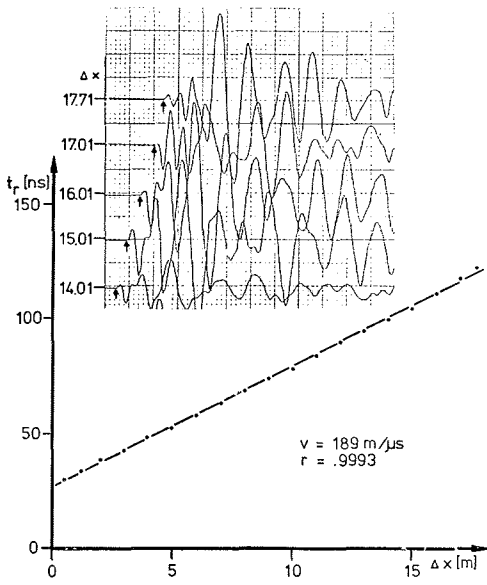


Abb. 2: Laufzeitkurve von Bohrlochversenkmessungen mit elektromagnetischen Wellen auf dem Kesselwandferner (unten). Beispiele für Registrierungen aus dem unteren Teufenbereich (oben).

Fig. 2: Travel-time-curve for electromagnetic waves in a bore hole on Kesselwandferner (below). Records from deeper parts of the hole (above).

Sender und Empfänger waren fest an diesen Schlitten gebunden. Der Meßweg, von einem Meßrad mit 0,1 m Schritten erfaßt, konnte parallel auf Magnetband registriert werden. Darüber hinaus wurden Marken an allen geodätisch eingemessenen Balisen auf Magnetband genommen. Durch den manuellen Transport bedingt und als Folge des Gewichts der Anlage, der Steigungen und des weichen Schnees, war die Meßgeschwindigkeit etwa 1 km pro Stunde. Es wurde darauf geachtet, die Meßgeschwindigkeit möglichst konstant zu halten, um so die Folge der Meßpunkte so weit wie möglich äquidistant zu haben. Alle Registrie-

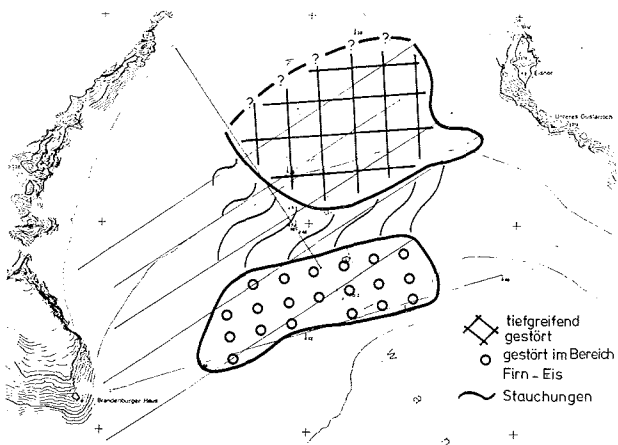


Abb. 3: Lage der Profile auf dem oberen Teil des Kesselwandferner. Skizze der gestörten Bereiche. Kennzeichnung wie Text.

Fig. 3: Map of the profiles on the upper part of Kesselwandferner. Outline of the zones of disturbances, marked as in the text.

rungen wurden sofort nach dem Abschluß der einzelnen Profile oder Profilabschnitte zur Kontrolle auf Registrierpapier abgespielt. So konnten technische Defekte weitgehend vermieden werden.

3. Diskussion der Ergebnisse

Die folgende Abb. 3 gibt die Lage der auf dem Kesselwandferner ausgeführten Profilmessungen an. Die Gesamtprofillänge betrug ca. 7,5 km. Der obere Teil des Kesselwandferners ist somit dicht vermessen. Die Abb. 3 enthält außerdem eine Skizze der Gebiete mit gestörtem Schichtverlauf, der im weiteren diskutiert wird.

Abb. 4 zeigt Beispiele für die Gliederung des Firns, wie sie auf den Profilen A, B und C mit dem EMR-Verfahren gemessen wurde. Die Registrierungen wurden durch Umwandlung der Amplitudenwerte in 16 Graustufen gewonnen. Größere Reflexionsamplituden ergeben dunklere Grautöne als kleine Amplituden. Es bestand die Wahl, die positiven oder die negativen Amplituden zu bewerten. In Abb. 4 sind zum Vergleich nur die positiven Amplituden in Graustufen gewandelt, die negativen Amplituden erscheinen weiß.

Die einzelnen Meßspuren im Abstand von einigen Dezimetern wurden dann wegabhängig durch Steuerung des Papiervorschubes aufgezeichnet.

Die Kartierungen zeigen deutlich die Existenz mehrerer, wahrscheinlich wasserführender Firnschichten. Diese verlaufen keineswegs immer in gleicher Weise. Die unterste dieser wasserführenden Horizonte ist

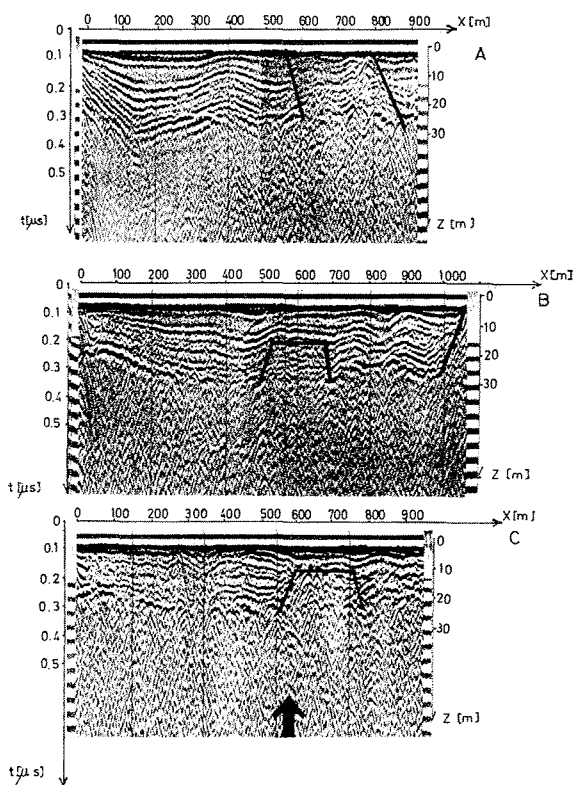


Abb. 4: Beispiele für die EMR-Profile auf dem Kesselwandferner. 4A und 4B zeigen auf dem linken Rand den Einfluß des Felsuntergrundes, der in etwa 50 m am Rand ansteht (Brandenburger Haus). 4A und 4B am rechten Rand zeigen Beispiele für tiefgreifende Störungen. 4B und 4C zeigen in der Mitte Störungen im Bereich Firn — Eis überlagert mit nahezu ungestörten Schichten. 4C zeigt im unteren Teil eine tiefgreifende in das Eis hineinreichende Störung (Pfeil).

Fig. 4: Examples of EMR-profilings on Kesselwandferner. 4A und 4B show on the left-hand side the influence of the rock bottom which crops out at height of 50 m (Brandenburger Haus). 4A and 4B show on the right-hand side examples of deeply disturbed layers. 4B and 4C show in the middle part disturbances in the transition zone firn — ice, superimposed by practically undisturbed layers. 4C shows in the lower part a disturbance extending into the impermeable ice zone (arrow).

die Schicht, die sich am Übergang zum impermeablen Eis ausbildet. Diese wird im Schacht und in den Bohrlöchern mit dem Lichtlot erfaßt. Manche Zwischenschichten sind nur kleinräumig ausgebildet und verschwinden nach wenigen Zehner-Metern oder einigen hundert Metern (z. B. Abb. 4C, Mitte). Da die Messungen auf der Schneeoberfläche ausgeführt wurden, spiegeln sich Modulationen der Geländehöhe abgeschwächt im umgekehrten Verlauf der Schichtungen wider (z. B. Abb. 4A, linke Seite).

Neben den gut ausgebildeten Horizonten werden auch tiefgreifend gestörte Bereiche erfaßt. Im großen Umfang sind die Schichtenfolgen aufgelöst, z. T. zeigen sich Stauchungen und steile Faltungen, die an den Rändern der Störungszonen in leichten Wellungen der wasserführenden Schichten auslaufen. Trägt man diese gestörten Bereiche in die Karte Abb. 3 ein, so sind deutlich zwei gestörte Zonen im Ostteil des Meßgebietes erkennbar, die räumlich durch einen mehr oder weniger ungestörten Bereich getrennt sind. Im oberen Teil des Meßgebietes erfassen die Störungen alle Schichten bis nahe der Oberfläche. Im unterhalb liegenden Störungsgebiet sind z. T. gut ausgebildete, nicht gestörte Horizonte der Störung überlagert. Es liegt die Vermutung nahe, daß es sich bei den gestörten Bereichen um räumlich begrenzte und zeitlich nacheinander entstandene Gebiete handelt, die aus der Akkumulationszone des Fluchtkogels herunters wandern. Es sollte sich also um Bildungen handeln, die in den höheren Teilen des Fluchtkogels entstanden sind. Die Störungen sind besonders intensiv in unmittelbarer Nähe des Übergangs Eis — Firn und greifen z. T. tiefer in das heutige Eis ein. Dieses ist sicher teilweise als Folge der Vertikalkomponenten der Bewegung zu sehen. Die Stauchungen in der Umgebung der Störungszonen lassen vermuten, daß als Folge der großen Beanspruchung des Firns bei diesen Prozessen auch die Dichteverteilung mit der Tiefe verändert wurde. Dieses müßte noch genauer untersucht werden.

Bewegen sich wasserführende Horizonte durch größere Spalten, so treten keinesfalls Störungen wie in Abb. 4 auf. Dieses zeigt deutlich Abb. 5. Die Horizonte werden im Spaltenbereich zwar beeinflusst und z. T. leicht gekippt; unterhalb der Spalte sind sie jedoch wieder gut ausgebildet. Die Spalte ist in der Abb. 5 durch die Beugungshyperbeln an ihren Rändern gekennzeichnet. Ähnliche Hyperbeln treten als Folge der Beugung überall im Profil auf, wo punktförmige Inhomogenitäten oder punktförmig in Profilrichtung angeschnittene Inhomogenitäten der Dielektrizitätskonstante auftreten. Sie sind auch in Abb. 4 an einzelnen Stellen sichtbar. In Abb. 4C tritt in der gestörten Zone eine kleinräumige Schichtenstruktur in der horizontalen Ausdehnung von etwa 50 m auf, die bis tief im impermeablen Eis erkennbar bleibt. In diesem Gebiet könnte u. U. Wasser aus den Firnschichten bis an die Grenzfläche Eis — Fels absinken und abfließen. Sichere Informationen wären hier nur durch eine dichte Folge eng benachbarter Profile zu gewinnen, um so ein räumliches Bild dieses Vorgangs rekonstruieren zu können.

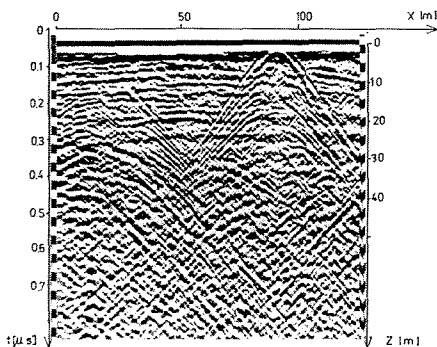


Abb. 5: Schichtenverlauf senkrecht durch eine größere Spalte etwa in Fließrichtung des Gletschers.

Fig. 5: Perpendicular EMR-profile through a big crevasse and in the direction of the glacier flow. Diffraction-hyperbolas from the edges of the crevasse.

Das EMR-Verfahren, flächenmäßig ausgeführt, zeigt einen sehr kompliziert aufgebauten Firnkörper. Das Verfahren ist in der Lage, die inhomogenen Strukturen im Firnkörper und z. T. auch im impermeablen Eis zu erfassen und profilmäßig abzubilden. Viele der bisher in eng benachbarten Bohrungen aufge-

tretenen Unterschiede in der Schichtung dürften so deutbar werden. Es ist jedoch wünschenswert, gezielt Bohrungen und Schächte anzulegen, um die Ergebnisse des EMR-Verfahrens zu überprüfen, zu erweitern und zu sichern.

Wir danken den Herren H. Canaval und B. Leuthold für ihren persönlichen Einsatz bei der Durchführung des Meßprogramms und insbesondere der Vermessungsgruppe unter Leitung von Herrn Dr. H. Schneider für ihre hervorragende Unterstützung bei der Feldarbeit sowie der Österreichischen Akademie der Wissenschaften für die finanzielle Unterstützung und dem Bundesministerium für Inneres für Materialtransporte.

Literatur

- Ambach, W., Behrens, H., Bergmann, H. & H. Moser (1972): Markierungsversuche im inneren Abflußsystem des Hintereisferners (Ötztalalpen). — *Z. Gletscherkde. Glazialgeol.* 8 (1—2): 137—145.
- Ambach, W. & A. Denoth (1972): Studies on the dielectric properties of snow. — *Z. Gletscherkde. Glazialgeol.* 8 (1—2): 113—123.
- Ambach, W., Elsässer, M., Behrens, H. & H. Moser (1974): Studie zum Schmelzwasserabfluß aus dem Akkumulationsgebiet eines Alpengletschers (Hintereisferner, Ötztalalpen). — *Z. Gletscherkde. Glazialgeol.* 10: 181—187.
- Ambach, W., Blumthaler, M., Eisner, H., Kirchlechner, P., Schneider, H., Behrens, H., Moser, H., Oerter, H., Rauert, W. & H. Bergmann (1978a): Untersuchungen der Wassertafel am Kesselwandferner (Ötztalalpen) an einem 30 m tiefen Firnschacht. — 15. Intern. Tagung für Alpine Meteorologie 19.—23. 9. 1978, Grindelwald, Schweiz; Veröff. d. Schweizerischen Meteor. Zentralanst. 40, Tagungsbericht 1. Teil: 251—253, Zürich.
- Ambach, W., Blumthaler, M., Eisner, H., Kirchlechner, P., Schneider, H., Behrens, H., Moser, H., Oerter, H., Rauert, W. & H. Bergmann (1978b): Untersuchungen der Wassertafel am Kesselwandferner (Ötztalalpen) an einem 30 m tiefen Firnschacht. — *Z. Gletscherkde. Glazialgeol.* 14 (1): 61—71.
- Ambach, W. & H. Eisner (1981): Ein Tracerexperiment zum Schmelzwasserfluß in der Wassertafel eines temperierten Gletschers. — *Z. Gletscherkde. Glazialgeol.* (im Druck).
- Beek, L. K. H. van (1967): Dielectric behaviour of heterogeneous systems. — *Progress in Dielectrics* 7: 69—114, London.
- Behrens, H., Bergmann, H., Moser, H., Ambach, W. & O. Jochem (1975): On the water channels of the internal drainage system of the Hintereisferner, Oetztal Alps, Austria. — *J. Glaciol.* 14 (72): 375—382.
- Behrens, H., Löschnhorn, U., Ambach, W. & H. Moser (1976): Studie zum Schmelzwasserfluß aus dem Akkumulationsgebiet eines Alpengletschers (Hintereisferner, Ötztalalpen) — II. Mitteilung. — *Z. Gletscherkde. Glazialgeol.* 12 (1): 69—74.
- Böttcher, C. J. F. (1952): Theory of electric polarization. — 48—51, 419, 457—459, Amsterdam.
- Goodman, R. H. & A. C. D. Terroux (1973): Use of radio-echo sounder techniques in the study of glacial hydrology. — Symposium on the Hydrology of Glaciers, Cambridge, September 7—13, 1969, IASH Publ. 95 (149).
- Krimmel, R. M., Tangborn, W. V. & M. F. Meier (1973): Water flow through a temperate glacier. — The role of snow and ice in hydrology, Proceedings of the Banff Symposium, Sept. 1972, 1: 401—416.
- Lang, H., Schädler, B. & G. Davidson (1977): Hydroglaciological investigations on the Ewigschneefeld (Gr. Aletschgletscher). — *Z. Gletscherkde. Glazialgeol.* 12 (2): 109—124.
- Looyenga, H. (1965): Dielectric constants of heterogeneous mixtures. — *Physica* 31: 401—406.
- Moser, H. & Mitarb. (1976): Farbauslegung am Vernagtferner. — Inst. f. Radiohydrometrie d. Ges. f. Strahlen- u. Umweltforschung m. b. H. München, Jahresber. 1975: 165—169, München.
- Moser, H. & Mitarb. (1979): Untersuchungen in Bohrungen am Vernagtferner. — Inst. f. Radiohydrometrie d. Ges. f. Strahlen- u. Umweltforschung m. b. H. München, Jahresber. 1978: 235—238, München.
- Röthlisberger, H. (1972): Water pressure in intra- and subglacial channels. — *J. Glaciol.* 11 (62): 177—203.
- Schommmer, P. (1977): Wasserspiegelmessungen im Firn des Ewigschneefeldes (Schweizer Alpen), 1976. — *Z. Gletscherkde. Glazialgeol.* 12 (2): 125—141.
- Stenberg, T. (1968): Glacier drainage connected with ice structures. — *Geogr. Annaler* 50A (1): 25—53.
- Stenberg, T. (1969): Studies of the internal drainage of glaciers. — *Geogr. Annaler* 51A (1—2): 13—41.
- Stenberg, T. (1973): Some viewpoints on the internal drainage of glaciers. — Symposium on the Hydrology of Glaciers, Cambridge, September 7—13, 1969: 117—130.
- Thyssen, F. (1967): Die Temperaturabhängigkeit der P-Wellengeschwindigkeit in Gletschern und Inlandeisen. — *Z. Geophys.* 33 (2): 65—79.
- Vallon, M., Petit, J. R. & B. Fabre (1976): Study of an ice core to the bedrock in the accumulation zone of an Alpine glacier. — *J. Glaciol.* 17 (75): 13—28.
- Wiener, O. (1910): Zur Theorie der Refraktionskonstanten. — *Ber. Verh. d. Königl. Sächs. Ges. d. Wiss. z. Leipzig, Math.-Phys. Kl.* 62 (5): 256—277.