

UNTERSUCHUNGEN DER WASSERTAFEL AM KESSELWANDFERNER (ÖTZTALER ALPEN) AN EINEM 30 METER TIEFEN FIRNSCHACHT

Von W. AMBACH, M. BLUMTHALER, H. EISNER,
P. KIRCHLECHNER, H. SCHNEIDER, Innsbruck,
H. BEHRENS, H. MOSER, H. OERTER, W. RAUERT, München,
und H. BERGMANN, Graz

Mit 6 Abbildungen

ZUSAMMENFASSUNG

An einem ca. 30 m tiefen Firnschacht und an zahlreichen Bohrlöchern im Akkumulationsgebiet des Kesselwandfeners (Ötztaler Alpen) wurde in den Jahren 1974—1977 die Ausbildung einer mit Wasser gesättigten Firnschicht untersucht. Die gesättigte Firnschicht erstreckt sich über das ganze Akkumulationsgebiet, wobei die Tiefe des Wasserspiegels unter der Gletscheroberfläche zur Gleichgewichtslinie hin wegen abnehmender Jahresrücklagen abnimmt. Die Ausbildung einer gesättigten Firnschicht als Wassertafel im Übergangsbereich zwischen wasserdurchlässigem Firn und wasserundurchlässigem Gletschereis erfolgt zu Beginn der Ablationsperiode. Es treten witterungsbedingte Schwankungen der Mächtigkeit der gesättigten Firnschicht mit einer Reaktionszeit von ca. 3 Tagen auf. In Zeiten starker Ablation sind mit derselben Verzögerung tageszeitliche Variationen feststellbar. Durch Nachmessungen während der Wintermonate wurde festgestellt, daß die Wassertafel nach Ende der Ablationsperiode weitgehend abgebaut wird. Durch Impfung der Wassertafel mit einem Farbtracer wurden Informationen über die Wasserbewegung in der gesättigten Firnschicht gewonnen.

INVESTIGATIONS OF THE WATER TABLE OF KESSELWANDFERNER (ÖTZTAL ALPS) IN A 30 METERS SNOW PIT

ABSTRACT

The formation of the water saturated firn layer (water table) in the accumulation area was investigated by a firn pit 30 m in depth and by several drilled holes on the Kesselwandferner (Oetzal Alps) between 1974—1977. The water table is extended over the entire accumulation area. The depth of the water table beneath the glacier surface decreases towards the equilibrium line. The water table forms at the beginning of the ablation period. The thickness of the water saturated firn layer (thickness of the water table) reacts with a delay of ca. 3 days to changes in atmospheric conditions. During heavy ablation, daily variations were observed with the same delay. During winter the water saturated layer is removed. The flow in the water table was investigated by injection of dye into the water table.

1. EINLEITUNG

Es wurde vielfach vermutet, daß sich im Firnkörper eines temperierten Alpengletschers in der Grenzschicht unmittelbar über dem wasserundurchlässigen Gletschereis eine mit Schmelzwasser gesättigte Firnschicht aufbaut. Diese Vermutung wurde durch die Beobachtung gestützt, daß sich im Akkumulationsgebiet des Kesselwandfeners in tiefen Firnschächten (25—30 m) Schmelzwasser ansammelte. Ebenfalls wurde im selben Gebiet in ca. 30 m tiefen Bohrlöchern eine mit Wasser gesättigte Firnschicht festgestellt. Nach neueren Beobachtungen ist es wahrscheinlich, daß die Ausbildung einer schmelzwassergesättigten Firnschicht in der Übergangszone zwischen dem wasserundurchlässigen Firnkörper und dem wasserundurchlässigen Gletschereis nicht lokal beschränkt ist, sondern allgemein im Akkumulationsgebiet eines temperierten Gletschers auftritt. So haben Vallon et al. (1976) im Vallée Blanche

im Mont Blanc-Gebiet, H. Lang et al. (1977) und P. Schommer (1977) am Ewigschneefeld am Großen Aletschgletscher (Berner Alpen) und H. Oerter (1977) im Akkumulationsgebiet des Vernagtferners (Ötztaler Alpen) dieselben Feststellungen gemacht. Diese gesättigte Firnschicht ist mit einem wasserführenden Horizont in einem Lockergesteins-Grundwasserleiter vergleichbar. Bisweilen wird die wasser-gesättigte Firnschicht als Wassertafel ("water table") bezeichnet, weil in Bohrungen, die bis in diese wassergesättigten Schichten vorangetrieben werden, ein freier Wasser-spiegel nachgewiesen wird. Diese gesättigte Firnschicht erstreckt sich vermutlich über ein größeres Gebiet. Im Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt eines temperierten Gletschers erscheinen nun Aufbau, Abbau sowie witterungsbedingte Schwankungen der Wassertafel von besonderem Interesse.

2. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

In den Jahren 1963 und 1967 wurden im Akkumulationsgebiet des Kesselwandferners zwei ca. 20 m tiefe Firnschächte von 1–2 m Durchmesser zum Studium der Radioaktivitätsverteilung und zur Durchführung von Verformungsmessungen gegraben. Als Folge der Vertikalbewegung der Firnschichten gelangt der Schachtboden in größere Tiefen. Ab einer Schachttiefe von 23 m trat im unteren Bereich Wasser auf. Während der im Jahr 1963 gegrabene Schacht aus arbeitstechnischen Gründen nach einigen Jahren aufgelassen wurde, konnten im Schacht von 1967 die Veränderungen des freien Wasserspiegels verfolgt werden. Im Sommer 1973 wurde ein registrierender Schwimmerpegel installiert, um die tages- und jahreszeitlichen Niveauschwankungen zu registrieren. Außerdem wurden ab 1974 in der Umgebung des Schachtes bis zu ca. 500 m Entfernung mit einem Heißwasserbohrer, System Kasser¹, mehrere ca. 30 m tiefe Bohrlöcher von 6 cm Durchmesser gebohrt, um die lokale Ausdehnung und die Niveauschwankungen der Wassertafel in diesem Bereich zu studieren. Diese Bohrlöcher wurden in den obersten 2–3 m mit Plastikrohren befestigt und geodätisch eingemessen. Im Jahre 1976 wurden zusätzlich 5 Bohrlöcher im Längsprofil des Akkumulationsgebietes angelegt, um auch eine Information über die Ausbildung der Wassertafel im Längsprofil zu erhalten.

Folgende Experimente wurden am Bohrlochnetz und am Schacht durchgeführt:

- Beobachtung von kurz- und langfristigen Schwankungen des Niveaus des Wasserspiegels durch Verwendung eines registrierenden Schwimmerpegels am Schacht und durch Lichtlotmessungen in den Bohrlöchern.
- Absenken des Wasserspiegels im Schacht durch Abpumpen und Beobachtung des Wiederanstiegs des Wasserspiegels im Schacht.
- Abschätzung des Schmelzwasserzufflusses im Schacht durch Eingabe eines Fluoreszenztracers (Uranin) und Messung der Konzentration-Zeit-Verteilung im Schacht.
- Abschätzung der Fließ- und Sicker-geschwindigkeit in der Wassertafel und im ungesättigten Firnkörper durch Injektion von Fluoreszenztracern in Bohrlöcher in unmittelbarer Schachtnähe und Beobachtung des Traceraustrittes im Schacht.
- Messung von Tritiumkonzentrationen des Schachtwassers im Vergleich mit Tritiumkonzentrationen einer benachbarten Kernbohrung bis 13 m Tiefe.

¹ Für die Bereitstellung eines thermischen Bohrers (System Kasser) wird Herrn Prof. Dipl.-Ing. P. Kasser, Abteilung für Hydrologie und Glaziologie der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich bestens gedankt.

3. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

3.1. ALLGEMEINES

Auf Grund der angeführten Untersuchungen kann folgende Modellvorstellung über die hydraulischen Vorgänge im Akkumulationsgebiet eines temperierten Gletschers erstellt werden:

Im wasserundurchlässigen Firnkörper tritt während der Ablationsperiode ein Sickervorgang auf, der wegen der Inhomogenitäten im Firnkörper lokal unterschiedlich ist und entlang von Eisschichten in horizontalen Versetzungen abläuft. Es ist noch ungeklärt, ob dieser Sickervorgang durch die gravity-flow-Theorie der Wasserbewegung im homogenen Schnee (Colbeck, 1971) quantitativ richtig erfaßt werden kann. Der wasserundurchlässige Eiskörper wirkt als StauhORIZONT, wodurch ein Teil der Firnschicht mit Wasser gesättigt wird. Angaben über die Dicke dieser wassergesättigten Firnschicht sind noch unsicher, vermutlich beträgt sie wenige dm. Obwohl bekannt ist, daß bei Dichten von $0,82 \text{ g/cm}^3$ der wasserundurchlässige Firnkörper in den wasserundurchlässigen Eiskörper übergeht, muß angenommen werden, daß dieser Übergang wegen der Inhomogenitäten nicht in einer einheitlichen Tiefe erfolgt. Durch die geländebedingte Neigung des Übergangsbereiches tritt ein Fließvorgang in der wassergesättigten Firnschicht auf. Dieser Fließvorgang in einer gesättigten Schicht kann als Sonderfall des allgemeinen Gesetzes für den Sickervorgang in homogenem Schnee (Colbeck, 1974) oder mit den für Grundwasserströmungen bekannten Gesetzen behandelt werden. Diese wasserführende Schicht wird stellenweise durch Spalten unterbrochen und kann an der Gletscheroberfläche in der Nähe der Gleichgewichtslinie austreichen. Während der sommerlichen Ablationsperiode wird die wassergesättigte Firnschicht aufgebaut, ihre Mächtigkeit unterliegt tageszeitlichen und witterungsbedingten Schwankungen und sie wird nach Ende der Ablationsperiode weitgehend abgebaut.

3.2. JAHRESZEITLICHE NIVEAUSCHWANKUNGEN DER WASSERTAFEL

Die Niveauschwankungen des Wasserspiegels im Schacht sind für die Zeit vom Sommer 1973 bis zum Sommer 1977 in Abb. I zusammengestellt. Aus dieser Darstellung läßt sich gut der zeitliche Ablauf des Schmelzwasserzuflusses in den Schacht im Zusammenhang mit den Abpumpversuchen erkennen. Die Darstellung gliedert sich in folgende drei Abschnitte:

Im Abschnitt I ist die Variation des Wasserspiegels bei sonst ungestörten Verhältnissen im Schacht wiedergegeben. Zu Beginn der Ablationsperioden von 1974 und 1975 ist der Anstieg des Wasserspiegels ersichtlich, wobei der Anstieg des Jahres 1974 stark ausgeprägt ist. Die während der Ablationsperiode ausgeprägten Schwankungen sind durch die witterungsbedingte Schmelzwasserproduktion verursacht. Dabei schwankt der Wasserspiegel um einige dm, was der Größenordnung der Mächtigkeit der Wassertafel entsprechen dürfte. Zum Ende der Ablationsperiode, im Herbst, tritt dann ein Abfall des Wasserspiegels ein. Während der Wintermonate ergibt sich ein flacher Anstieg des Wasserspiegels relativ zum Schachtboden. Als wesentliche Ursachen hierfür sind die Metamorphose von Firn in wasserundurchlässiges Gletschereis (Vallon et al., 1976), die Vertikalbewegung des Schachtbodens, die Kompression des Schachtes durch die Bewegung und eine geringe Schmelzwasserzusickeung aus dem Firnkörper zu nennen.

Im Abschnitt II sind die natürlichen Schwankungen des Wasserspiegels durch Abpumpen des Schachtwassers gestört: Im Sommer 1975 wurde der Schacht vom 16. Juli bis 4. September zweimal täglich leergepumpt. Der in Abb. I ersichtliche Wiederanstieg in dieser Periode ist auf einen Pumpenausfall zurückzuführen. Nach

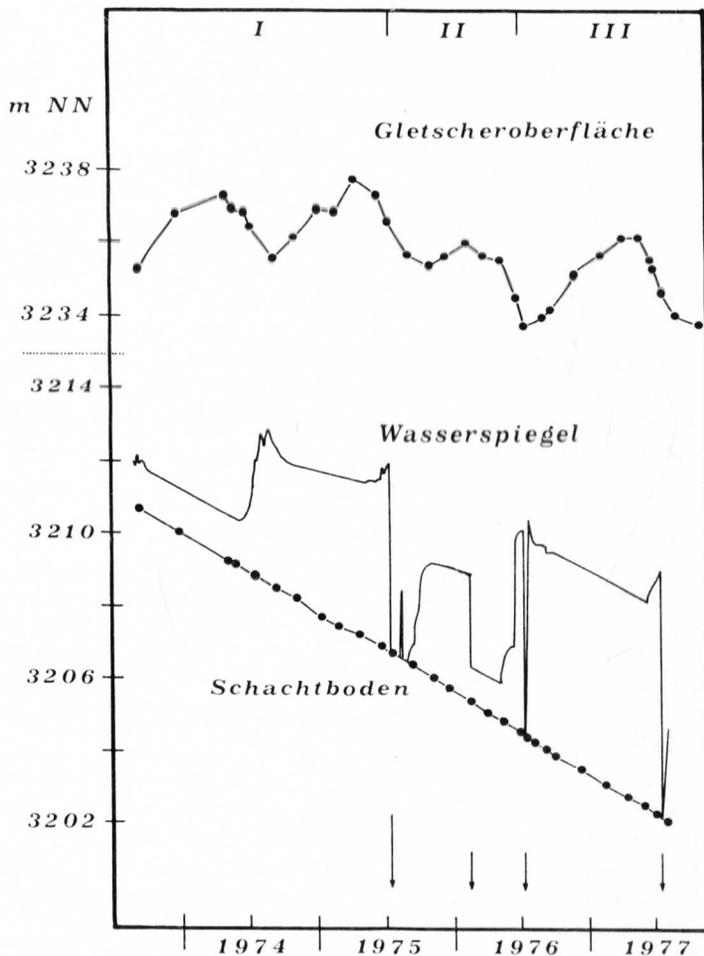


Abb. 1: Zeitlicher Verlauf der Höhe des Wasserspiegels im Schacht. Gletscheroberfläche, Wasserspiegel und Schachtboden in absoluten Höhen über NN; die Pfeile geben die Zeit an, in welcher der Schacht abgepumpt wurde, wobei der lange Pfeil intermittierendes Abpumpen markiert.

Ende dieses intermittierenden Abpumpens steigt der Wasserspiegel durch Schmelzwasserzufluß zunächst rasch an, anschließend ist wieder der flache Winteranstieg wie in Abschnitt I erkennbar. Im Februar 1976 wurde nochmals abgepumpt. Das Einsetzen der Ablation geschah im Frühjahr 1976 in zwei Stufen, was auch im Anstieg des Wasserspiegels ersichtlich ist. Im übrigen füllt der starke Schmelzwasserzufluß den Schacht nach einem wartungsbedingten Abpumpen schnell wieder auf. Abschnitt III zeigt den ungestörten Verlauf der Schwankungen des Wasserspiegels zwischen den Absenkungen im Juli 1976 und im Juli 1977. Es ergibt sich die analoge Interpretation wie in Abschnitt I.

Sowohl das Absinken des Schachtbodens durch die Vertikalbewegung als auch die jahreszeitlichen Variationen der Gletscheroberfläche sind aus Abb. 1 ebenfalls deutlich erkennbar. Während der Beobachtungsperiode sinkt der Schachtboden schneller als die mittlere Gletscheroberfläche ab. Dies ist dadurch begründet, daß die Gletscheroberfläche durch die Schneeakkumulation aufgehöhht wird.

3.3. WITTERUNGSBEDINGTE SCHWANKUNGEN DES ZUFLUSSES

Durch wiederholtes Abpumpen des Schachtwassers und Messung des Wiederanstieges des Wasserspiegels kann eine Aussage über die Zuflußrate des Schmelzwassers in den Schacht gewonnen werden. Der Zufluß erfolgt teilweise über die gesättigte Firnschicht und teilweise als stufenweise versetzter vertikaler Sickerprozess im Firn mit Austritt an der Schachtwand. Durch Beobachtung im Schacht ist evident, daß der Hauptanteil des Zuflusses aus der gesättigten Firnschicht erfolgt. In Abb. 2

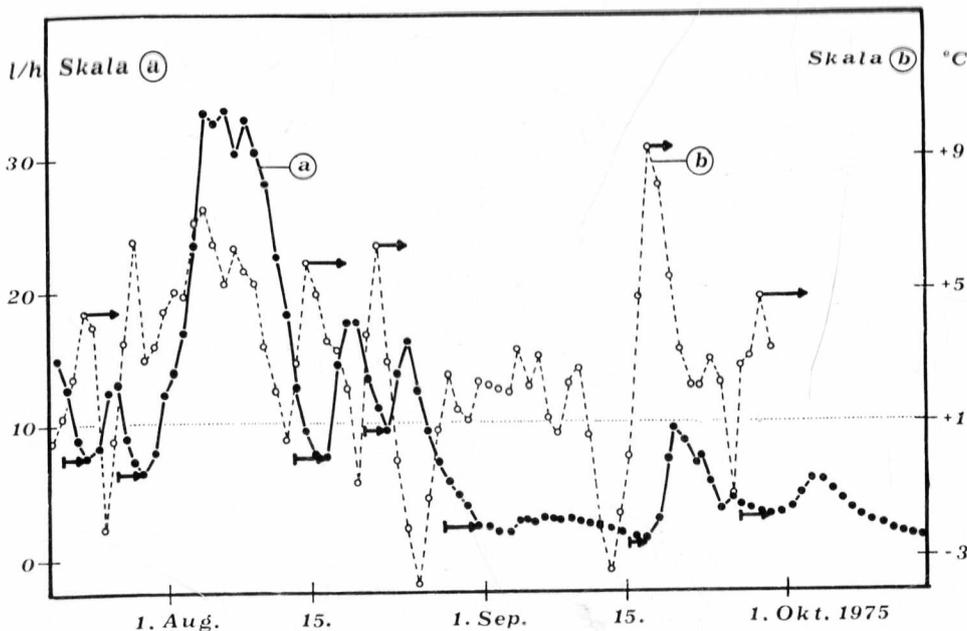


Abb. 2: Zeitliche Variationen der Tagesmittel des Wasserzuflusses in den abgepumpten Schacht (Kurve a) und strichliert die Tagesmitteltemperaturen auf der Station Hintereisferner (3030 m NN, Kurve b). Die Pfeile markieren die zeitliche Verzögerung der Reaktion des Zuflusses auf ausgeprägte Temperaturänderungen.

sind in Kurve a die Tagesmittel der Zuflußrate in Liter/Stunde vom 20. 07. 1975 bis 18. 10. 1975 dargestellt. Es ergeben sich signifikante Variationen des Zuflusses von ca. 1 l/h bis 35 l/h. Diese Variationen sind durch witterungsbedingte Schwankungen der Schmelzwasserproduktion zu interpretieren. Obwohl diese eine vom gesamten Wärmehaushalt gesteuerte komplexe Größe ist, wird ersatzweise die Tagesmitteltemperatur als Parameter zur Interpretation herangezogen (Abb. 2, Kurve b). Die Temperaturwerte wurden auf der Station Hintereis (3030 m NN) gemessen², die ca. 200 m tiefer liegt als der Schacht am Kesselwandferner. Es zeigt sich eindeutig, daß mit steigender Temperatur auch die Zuflußrate mit einer Verzögerung von ca. 3–4 Tagen ansteigt und umgekehrt. Die zeitliche Verschiebung der Kurven der Tagesmitteltemperaturen und der Zuflußraten ist in Abb. 2 für die Maxima

² Die Daten der Tagesmitteltemperaturen wurden in dankenswerter Weise vom Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck zur Verfügung gestellt.

und Minima durch horizontale Pfeile markiert. Während die zeitliche Verschiebung der Maximalwerte beider Größen unmittelbar ablesbar ist, ist beim Vergleich der Minima zu berücksichtigen, daß erst bei Überschreiten einer Schwellwerttemperatur eine neuerliche Schmelzwasserproduktion an der Oberfläche einsetzen kann. In der Auswertung wurde als Schwellwerttemperatur 1°C gewählt, um die Höhendifferenz zwischen der Klimastation Hintereis und dem Schacht am Kesselwandferner zu berücksichtigen. Aus Abb. 2 ist unmittelbar ersichtlich, daß die Aussage über die Dauer der zeitlichen Verschiebung nicht wesentlich von dieser Annahme beeinflusst wird. Als mittlere Dauer der zeitlichen Verschiebung ergibt sich ca. 3 Tage. Daraus ergibt sich bei einer Tiefe von ca. 25 m eine Sickergeschwindigkeit von ca. 8,3 m/Tag bzw. 0,35 m/h. H. Sharp (1951) hat unter ähnlichen natürlichen Bedingungen Sickergeschwindigkeiten der gleichen Größenordnung erhalten. Für einen Vergleich mit Daten von S. Colbeck und G. Davidson (1973) muß eine Abschätzung der Fließraten vorliegen. Es ergibt sich eine Sickergeschwindigkeit von 0,35 m/h bei einer Fließrate von $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$, wie sie auch für das vorliegende Experiment abgeschätzt wurde.

3.4. TAGESZEITLICHE SCHWANKUNGEN DES ZUFLUSSES

Zusätzlich zu den witterungsbedingten Schwankungen der Zuflußrate treten in ausgeprägten Ablationsperioden tageszeitliche Variationen des Zuflusses auf. In Abb. 3a bis 3e sind die Schwankungen des Zuflusses während drei Perioden von

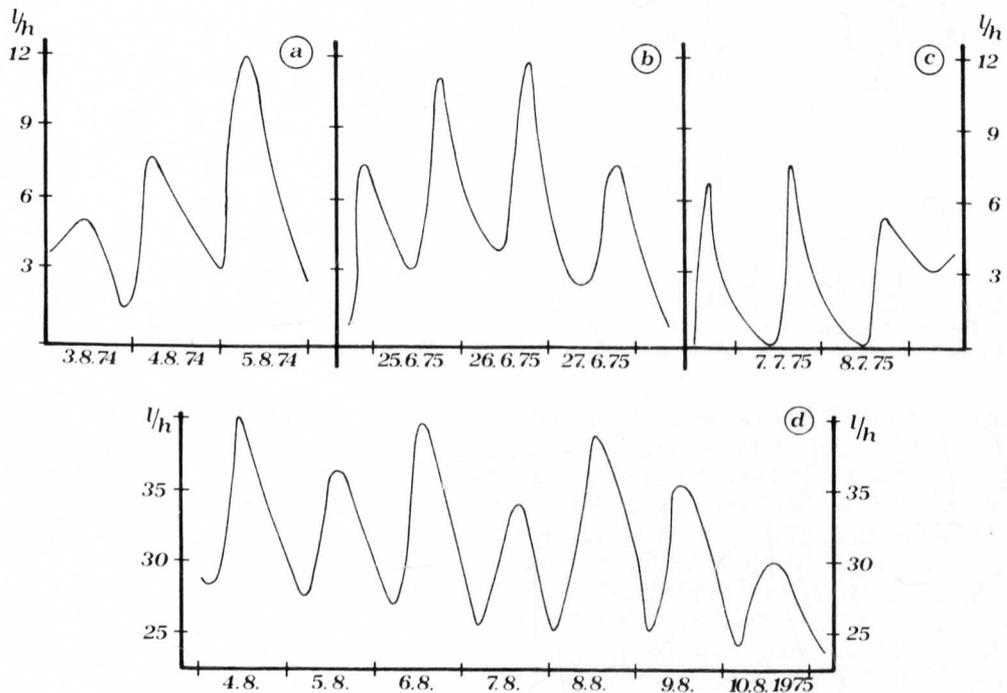


Abb. 3a–3c: Tageszeitliche Variationen des Zuflusses im Schacht aus registrierten Schwankungen des ungestörten Wasserspiegels während ausgeprägter Ablationsperioden.

Abb. 3d: Tageszeitliche Variationen des Zuflusses in den ausgepumpten Schacht während einer ausgeprägten Ablationsperiode.

3 bis 4 Tagen dargestellt. Der Zufluß wurde aus den am Schwimmerpegel kontinuierlich registrierten Wasserstandsänderungen im Schacht (Steigggeschwindigkeit des Wasserspiegels) und der dazugehörigen Querschnittsfläche des Schachtes ermittelt. In Abb. 3d ist die tageszeitliche Schwankung des Zuflusses über 8 Tage während eines Pumpversuches im Sommer 1975 (siehe Abb. 1) gezeigt. Die Extremwerte der Zuflußrate sind nicht mit jenen der Schmelzwasserproduktion desselben Tages oder jenen des Vortages korreliert; es tritt vielmehr jene systematische Verschiebung von ca. 3 bis 4 Tagen auf, wie sie unter Punkt 3.3. bereits diskutiert wurde. Dabei ist zu beachten, daß grundsätzlich verschiedene Versuchsbedingungen während der Zeiträume herrschten, für welche die Zuflußganglinien einerseits in Abb. 3a–3c und andererseits in Abb. 3d dargestellt sind. Im letzteren Fall wurde nämlich der Zufluß zum Schacht während des Pumpversuches bei intermittierender Absenkung des Wasserspiegels bis zum Schachtboden gemessen, während im ersten Fall für die Ermittlung der Zuflußrate eine kontinuierliche Registrierung des Schachtwasserstandes in einem vom Pumpen unbelasteten Zustand vorlag.

Im unbelasteten Zustand (Abb. 3a–3c) entspricht das Niveau des Wasserspiegels im Schacht der Obergrenze der wassergesättigten Firnschicht in der Schachtumgebung. Es liegt ein konstanter Wasserdurchfluß durch den Schacht vor, der im vorliegenden Fall aber quantitativ nicht bekannt ist. Schwankungen der Wassertafel im Firnkörper durch Änderungen der Schmelzwasserproduktion bewirken entsprechende Schwankungen des Wasserspiegels im Schacht. Diese Niveauschwankungen des Wasserspiegels im Schacht können zusammen mit der Querschnittsfläche des Schachtes in Änderungen des Flusses umgerechnet werden, die in Abb. 3a–3c dargestellt sind. Im gestörten Zustand (Abb. 3d) ist der Wasserspiegel im Schacht durch Abpumpen abgesenkt. In diesem Fall wird der Zufluß in den Schacht durch die gesamte Wasserführung in der gesättigten Firnschicht bestimmt. Dieser Zufluß wurde aus dem Anstieg des Wasserspiegels und der Querschnittsfläche berechnet und ist in Abb. 3d dargestellt. Aus den angeführten Gründen sind die Zuflüsse in dem durch die Wasserentnahme belasteten Zustand (Abb. 3d) wesentlich größer als im unbelasteten Zustand (Abb. 3a–3c). Die Amplituden der Zuflußänderungen sind aber in allen vier Darstellungen der Abb. 3 etwa von der gleichen Größenordnung. Sie werden in allen Fällen durch die tageszeitlichen Schwankungen der Schmelzwasserproduktion bestimmt.

Die Wasserspiegelschwankungen betragen ca. 1 bis 2 cm/Tag. Die Auswertung war daher nur möglich, weil eine genügend genaue und kontinuierliche Registrierung der Schachtwasserstände vorlag. Nach den bisherigen Erfahrungen sind sporadische Lichtlotmessungen für derartige Auswertungen weniger geeignet.

3.5. FLIESSVERHALTEN IN DER WASSERTAFEL

Der Fließvorgang zwischen einem Bohrloch und dem Schacht wurde mit folgendem Tracerexperiment untersucht:

Das Schachtwasser wurde abgepumpt und dadurch die wassergesättigte Schicht in unmittelbarer Umgebung stark beansprucht. Der Fluoreszenztracer (Eosin) wurde in diesem Bereich in ein Bohrloch in 6 m Entfernung vom Schacht eingebracht. Der zeitliche Eosin – Konzentrationsverlauf im Schachtwasser ist in Abb. 4 dargestellt. Zusätzlich ist in Abb. 4 der theoretische Verlauf nach der Gleichung

$$C = \frac{K}{\sqrt{D}} \frac{1}{\sqrt{t}} \exp \left[-\frac{(x - vt)^2}{4Dt} \right]$$

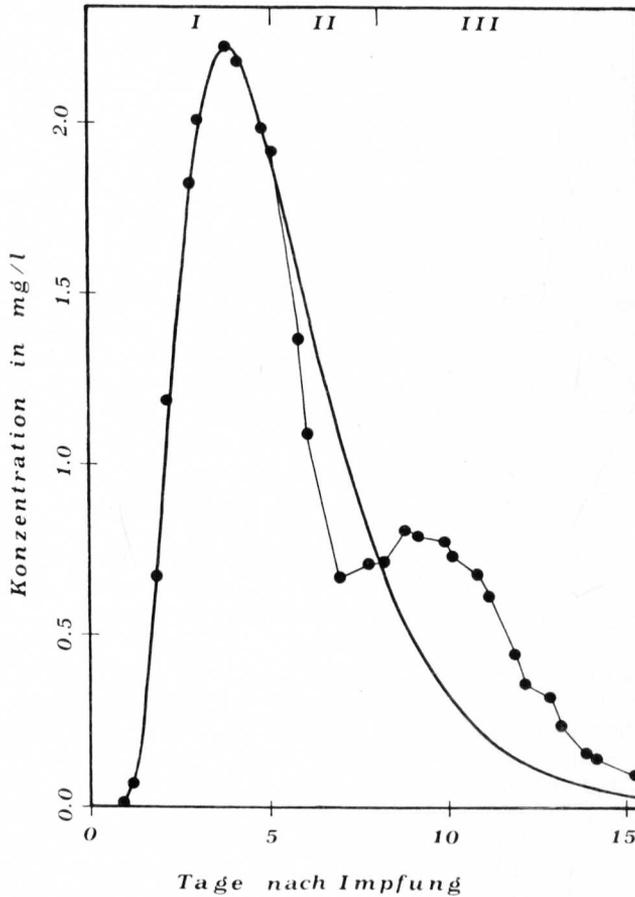


Abb. 4: Zeitlicher Konzentrationsverlauf des Eosins im Schachtwasser nach einer Eosinjektion in einem Bohrloch, das 6 m oberhalb des Schachtes lag. Die glatte Kurve zeigt den Verlauf einer einfachen Dispersionsgleichung im Vergleich zu den Meßwerten. Datum der Impfung: 19. 07. 1975.

eingetragen, die sich als Lösung der eindimensionalen Gleichung der hydrodynamischen Dispersion ergibt, wobei die Größen K und D Konstante, C die Tracerkonzentration, t die Zeit, x die Ausbreitungsrichtung und v die Ausbreitungsgeschwindigkeit bedeuten. Die Parameter K , D und v wurden so gewählt, daß unter stationären Verhältnissen der Beginn und das Maximum der theoretischen Kurve zeitlich mit der Meßkurve übereinstimmen. Gründe für die Abweichungen von der theoretischen Kurve sind Schwankungen im Schmelzwasserzufluß, die eine kleinere bzw. größere Konzentration bewirken und mögliche Verzweigungen im Fließweg des markierten Wassers. Wegen der beanspruchten gesättigten Firnschicht gibt die aus diesem Experiment folgende Fließgeschwindigkeit von ca. 1 m/Tag nur größenordnungsmäßig die Fließgeschwindigkeit in der ungestörten gesättigten Schicht an.

3.6. TRITIUMKONZENTRATION DES SCHACHTWASSERS

Vom Schachtwasser wurden in unterschiedlicher Zeitfolge über mehrere Jahre (1974–1977) Proben zur Tritiumbestimmung entnommen. Für einen Vergleich wurde 1976 in ca. 50 m Entfernung vom Schacht eine Kernbohrung bis 13 m Tiefe

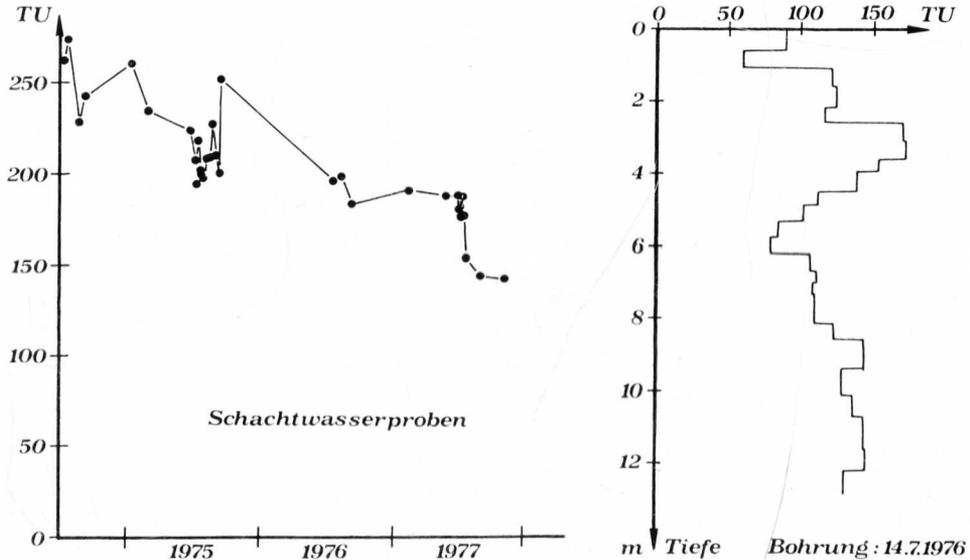


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Tritiumgehalte des Wassers im Schacht von Juli 1974 bis Oktober 1977 und Tiefenprofil der Tritiumgehalte des Bohrkerns vom Juli 1976 am Kesselwandferner bis 13 m Tiefe.

durchgeführt, so daß ein Tiefenprofil der Tritiumwerte vorliegt. Aus dem Vergleich der Tritiumwerte der Kernbohrung mit jenen des Wassers im Schacht (Abb. 5) ergeben sich folgende Aussagen:

- Die Tritiumwerte des Tiefenprofils schwanken zwischen 60 und 170 TU. Es ist keine systematische Zunahme der Tritiumwerte mit der Tiefe feststellbar. Da die Tritiumwerte auf den Zeitpunkt der Probennahme bezogen sind und die Bohrtiefe vermutlich der Rücklagen über die letzten 6–8 Jahre überstreicht, sind die Tritiumwerte der tieferen Schichten durch den radioaktiven Zerfall reduziert.
- Die Tritiumwerte des Wassers im Schacht zeigen eine Abnahme im Wertebereich von 275 TU (Juli 1974) bis auf 140 TU (November 1977). Diese Tritiumwerte sind auf den Tag der Probennahme bezogen.
- Die Messungen zeigen somit, daß die Tritiumwerte der Kernbohrung deutlich niedriger sind als die des Wassers im Schacht. Der Grund dafür ist, daß während der Ablationsperiode vorwiegend Frühjahrs- und Sommerniederschlag mit hohen Tritiumgehalten abgeschmolzen wird, der dann dem Schacht zufließt. Der Herbst- und Winterniederschlag mit niedrigen Tritiumgehalten wird dagegen akkumuliert und ist daher durch die Kernbohrung erfaßt. Eine eingehende Diskussion dieses Sachverhaltes unter Heranziehung der Tritium-Messungen in den Niederschlägen in Vent erfolgt an anderer Stelle.

3.7. VERHALTEN DER WSSERTAFEL IN UNMITTELBARER SCHACHTUMGEBUNG

Im Jahre 1975 wurden in einer Umgebung bis zu 40 m vom Schacht 14 Bohrlöcher bis ca. 30 m Tiefe angelegt, um die Lage der gesättigten Firnschicht in diesem Bereich zu erfassen. Mit diesen Bohrlöchern wurde festgestellt, daß das Niveau der Wassertafel etwa parallel zur Oberfläche ist, wobei die Geländeneigung in diesem Bereich ca. 3° beträgt. Im unmittelbaren Schachtbereich von einigen Metern ist eine An-

hebung des Wasserspiegels erkennbar. Dieser Effekt ist als Störung der Wassertafel durch den Schacht zu interpretieren. Die Tiefe des Wasserspiegels wurde fallweise mit Lichtlotmessungen bestimmt. Da einerseits ein einzelnes Bohrloch nur einen sehr kleinen Einzugsbereich der Wassertafel erfaßt und andererseits bei Bohr-
löchern keine kontinuierliche Registrierung vorliegt, waren die in den Bohrlöchern festgestellten Schwankungen der Wassertafel wenig aussagekräftig.

3.8. LAGE DER WASSERTAFEL IM LÄNGSPROFIL DES AKKUMULATIONSGBIETES

Die Lage des Wasserspiegels der gesättigten Firnschicht wurde in einem Längs-
schnitt im Akkumulationsgebiet gemessen. Die an fünf Punkten gewonnenen Ergeb-
nisse sind in Abb. 6 dargestellt. Da das Niveau des Wasserspiegels von der Mächtigkeit

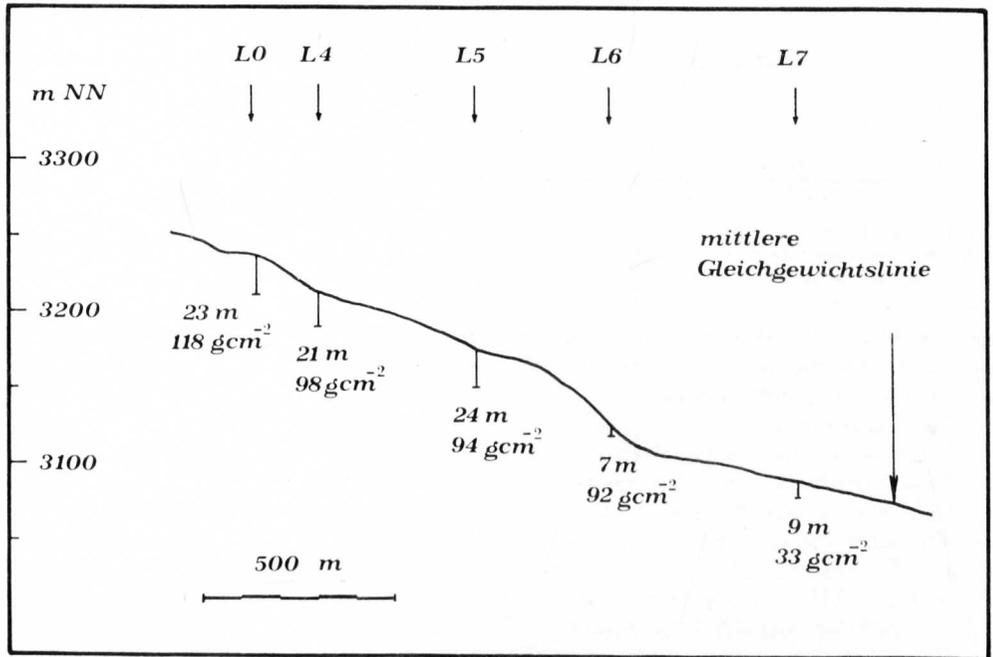


Abb. 6: Längsprofil im Akkumulationsgebiet des Kesselwandferners, Position der fünf Bohr-
löcher, Abstand des Wasserspiegels von der Gletscheroberfläche in m und die über
die Jahre 1961–1975 gemittelte Jahresrücklage in g/cm^2 .

der den Eiskörper überlagernden Firnschicht abhängt, tritt der Wasserspiegel an
Stellen mit geringer Jahresrücklage in geringer Tiefe unter der Oberfläche auf. In
Abb. 6 sind die beobachteten Tiefen des Wasserspiegels und die mittleren Jahres-
rücklagen an den Beobachtungsstellen vergleichsweise eingetragen³; diese Ergebnisse
entsprechen weitgehend den Beobachtungen am Vernagtferner (Oerter, 1977). Zur
Erfassung der zeitlichen Variationen des Niveaus des Wasserspiegels stehen nicht
genug Nachmessungen zur Verfügung.

³ Für die Überlassung der Daten der mittleren Jahresrücklagen am Kesselwandferner
wird dem Institut für Meteorologie und Geophysik an der Universität Innsbruck gedankt.

DANK

Der Österreichischen Akademie der Wissenschaften wird für die finanzielle Unterstützung der Feldarbeiten, dem Bundesministerium für Inneres für die Materialtransporte mit einem Hubschrauber und allen freiwilligen Helfern für die Mitarbeit bei den Feldarbeiten an dieser Stelle gebührend gedankt.

LITERATUR

- Colbeck, S., 1971: One dimensional water flow through snow. CRREL Research Report 296.
- Colbeck, S. and G. Davidson, 1973: Water percolation through homogeneous snow. The role of snow and ice in hydrology. (Proceedings of Banff Symposia, 1972), UNESCO-WMO-IAHS, Vol. 1: 242—257.
- Colbeck, S., 1974: Water flow through snow overlying an impermeable boundary, Water resources research, Vol. 10, No. 1: 119—123.
- Lang, H., B. Schädler and G. Davidson, 1977: Hydroglaciological investigations on the Ewigschneefeld (Gr. Aletschgletscher, Z. f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie 12, 2 (1976): 109—124.
- Oerter, H., 1977: Wasserbewegung in einem Gletscher, dargestellt an den Feldarbeiten auf dem Vernagtferner. Sonderforschungsbereich 81 der Technischen Universität München, Vortragsveranstaltung am 9. 2. 1977, München.
- Schommer, P., 1977: Wasserspiegelmessungen im Firn des Ewigschneefeldes (Schweizer Alpen), 1976, Z. f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie, 12, 2 (1976): 125—141.
- Sharp, R., 1951: Meltwater behaviour in firn on upper Seward Glacier, IAHS, General Assembly at Brussels: 246—253, zitiert nach S. Colbeck, 1971.
- Vallon, M., J.-R. Petit and B. Fabre, 1976: Study of an ice core to the bedrock in the accumulation zone of an Alpine glacier, Journal of Glaciology, Vol. 17, No. 75: 13—28.

Manuskript eingelangt am 17. 5. 1978.

Adressen der Autoren: Univ.-Prof. Dr. Walter Ambach, M. Blumthaler,
 Dr. Heinrich Eisner und P. Kirchlechner
 Physikalisches Institut der Universität Innsbruck
 Schöpfstraße 41, A-6020 Innsbruck

Dr. Heralt Schneider
 Institut für Mathematik der Universität Innsbruck
 Innrain 52, A-6020 Innsbruck

Dipl.-Ing. Horst Behrens, Prof. Dr. Heribert Moser,
 Dipl.-Ing. Hans Oerter, Dipl.-Phys. Werner Rauert
 Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für
 Strahlen- und Umweltforschung (GSF)
 Ingolstädter Landstraße 1, D-8042 Neuherberg

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Heinz Bergmann
 Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für
 Strahlen- und Umweltforschung (GSF), jetzt
 Institut für Hydromechanik, Hydraulik und Hydrologie
 der Technischen Universität Graz
 Dietrichsteinplatz 15/7, A-8010 Graz