

GRUNDLAGEN UND ERGEBNISSE VON KERN- PHYSIKALISCHEN UNTERSUCHUNGEN AUF ALPENGLETSCHERN

Von W. AMBACH und H. EISNER, Innsbruck

Mit 6 Abbildungen

ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über Anwendungsmöglichkeiten kernphysikalischer Arbeitsmethoden in der Glaziologie mit besonderer Berücksichtigung der Alpengletscher. Untersuchungen der Tiefenverteilung radioaktiver Spaltprodukte im Gletscherfirn werden hauptsächlich zur Bestimmung von Firnrücklagen angewendet. Durch Messungen der Tritiumkonzentration in einem Gletscherbach sind Aussagen über das Mischungsverhältnis von Schmelzwasser aus dem Ablations- und Akkumulationsgebiet möglich. Mit Hilfe von Radionukliden (^{210}Pb , ^{32}Si , ^{14}C) können Eisdattierungen an Gletscherzungen vorgenommen werden. Anwendungen der Isotopenthermometrie werden an einigen Beispielen behandelt. Der Bericht enthält auch eine Literaturzusammenfassung über jene Arbeiten, die seit 1963 von den Verfassern am Kesselwandferner und Hintereisferner (Ötztaler Alpen), am Jungfrauoch (Berner Oberland) und am Stubacher Sonnbliekkees (Hohe Tauern) durchgeführt worden sind.

RÉSUMÉ: ÉLÉMENTS FONDAMENTAUX ET RÉSULTATS DES RECHERCHES DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE, EFFECTUÉES SUR LES GLACIERS ALPINS

Le présent rapport donne un aperçu de l'utilisation de la physique nucléaire — et de ses méthodes de travail — en glaciologie et s'attache plus particulièrement aux glaciers alpins. Des recherches sur la répartition en profondeur dans les névés des produits radioactifs de fission permettent surtout de déterminer l'accumulation annuelle. Grâce aux mesures de la concentration en tritium effectuées dans le ruisseau — qui part du glacier — on peut évaluer le rapport de mélange entre l'eau qui provient de la zone d'ablation et l'eau qui provient de la zone d'accumulation. A l'aide des nucléides radioactifs on peut déterminer l'âge des glaces dans les langues glaciaires. Certains exemples traitent de l'utilisation des isotopes en thermométrie. Ce rapport contient aussi une bibliographie des travaux réalisés depuis 1963 par les auteurs de cet article au Kesselwandferner et Hintereisferner (Ötztaler Alpen), au Jungfrauoch (Berner Oberland) et au Stubacher Sonnbliekkees (Hohe Tauern).

EINLEITUNG

Im vorliegenden Bericht werden glaziologische Probleme behandelt, die durch kernphysikalische Untersuchungsmethoden gelöst werden können. Derartige Untersuchungen befassen sich mit Messungen von stabilen Isotopen und Radionukliden. Wasserstoff und Sauerstoff treten als Isotopengemische auf. Die Wasserstoffisotope sind Wasserstoff (^1H), Deuterium (^2H) und Tritium (^3H), wobei Wasserstoff und Deuterium stabile Formen sind und Tritium radioaktiv ist. Sauerstoff hingegen tritt nur in Form der stabilen Isotope ^{16}O , ^{17}O und ^{18}O auf. Durch Messung der Mischungsverhältnisse der stabilen Isotope $^2\text{H}/^1\text{H}$ und $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, sowie durch Radioaktivitätsmessungen von Tritium ergeben sich neue Methoden glaziologischer Forschung. Eine weitere Möglichkeit kernphysikalischer Untersuchungen bieten die im Gletschereis eingeschlossenen Luftblasen. Das in der Luft vorhandene CO_2 enthält ^{14}C -Atome, so daß zur Altersbestimmung von Gletschereis auch die bekannte Karbonatdatierungsmethode angewendet werden kann. Ein großer Fragenkomplex befaßt sich auch mit sonstigen Einschlüssen im Gletschereis. So sind die Gletscher seit der Durchführung von thermonuklearen Waffentests in der Atmosphäre durch die an Aerosolteilchen gebundenen radioaktiven Spaltprodukte kontaminiert worden. Durch Messung der Gesamt-Beta-Aktivität oder der Gesamt-Gamma-

Aktivität, sowie durch Untersuchung der einzelnen im Fallout enthaltenen Isotope können interessante glaziologische Aussagen gemacht werden.

In der Glaziologie sind kernphysikalische Untersuchungen zuerst hauptsächlich an kalten Gletschern durchgeführt worden. Im folgenden soll gezeigt werden, daß die Isotopenforschung auch über das Verhalten der temperierten Alpengletscher wertvolle Ergebnisse liefern kann. An temperierten Gletschern treten Störeffekte auf, die bei kernphysikalischen Untersuchungen viel kompliziertere Bedingungen als bei kalten Gletschern zur Folge haben. Im vorliegenden Bericht werden vor allem die wesentlichen Zusammenhänge in physikalischer und glaziologischer Sicht behandelt. Auf Einzelheiten in der Arbeitsmethodik, wie Probenpräparierung und Probenmessung im Labor wird nicht eingegangen. Ebenso wird auf eine ausführliche Diskussion von Einzelergebnissen unter Hinweis auf die betreffende Literatur verzichtet.

GRUNDLAGEN KERNPHYSIKALISCHER UNTERSUCHUNGSMETHODEN IN DER GLAZIOLOGIE

I. UNTERSUCHUNG DER RADIOAKTIVITÄT VON SPALTPRODUKTABLAGERUNGEN DES ATMOSPHÄRISCHEN FALLOUT:

Durch thermonukleare Waffentests, die seit 1952 in verschiedenen zeitlichen Intervallen mit Explosionsstärken im Megatonnen-Bereich durchgeführt wurden, sind große Mengen radioaktiver Spaltprodukte in die Atmosphäre gelangt und haben sich in großen Höhen über die ganze Erde verbreitet. Im atmosphärischen Fallout sind in den vergangenen zwei Dekaden starke Schwankungen der Spaltproduktaktivität aufgetreten, die bestimmten Perioden von thermonuklearen Waffentestserien zugeordnet werden können. Aus dieser Tatsache ergeben sich für glaziologische Untersuchungen zwei Anwendungsmöglichkeiten:

a) Datierung von Firnrücklagen mit auffallend hoher Radioaktivität:

Jahresschichten, die eine wesentlich höhere Spaltproduktaktivität aufweisen als darüber- und darunterliegende Schichten, können auf Grund der bekannten Chronologie der Kernwaffenversuche in der Atmosphäre (S. Glasstone, 1964) einer bestimmten Testserie zugeordnet und damit datiert werden. Dieses Datierungsverfahren beruht nicht auf der Anwendung des radioaktiven Zerfallsgesetzes wie etwa die vorher erwähnte Karbonatierungsmethode, sondern einfach darauf, daß die nach einer Periode starker Kernwaffentests sich ablagernde Schneeschicht kontaminiert wird. Die ersten derartigen Untersuchungen sind in der Antarktis durchgeführt worden (E. Picciotto und S. Wilgain, 1963). Als besonderes Merkmal hat man dort einen Anstieg der Gesamt-Beta-Aktivität in der Firnrücklage vom Januar/Februar 1955 festgestellt, der dem im März 1954 durchgeführten „Castle-Kernwaffentest“ zuzuschreiben ist.

An einem nichttemperierten Gletscher können durch die jahreszeitlichen Schwankungen des atmosphärischen Fallout gut meßbare Variationen der Gesamt-Beta-Aktivität und des Tritiumgehaltes von Firnproben auftreten. Dadurch ist es möglich, an einem Tiefenprofil der Gesamt-Beta-Aktivität oder der Tritiumkonzentration aus den jahreszeitlichen Schwankungen die einzelnen Jahresschichten abzuzählen (W. Ambach und W. Dansgaard, 1970).

b) Untersuchungen an Gletscherbächen:

Die im Akkumulationsgebiet eines Gletschers vorhandenen Firnrücklagen sind durch die mit dem Niederschlag abgelagerten Spaltprodukte des atmosphärischen Fallout

radioaktiv. Das aus diesen Firnschichten stammende Schmelzwasser zeigt im Gegensatz zu dem aus dem alten Gletschereis der Ablationszone gebildeten Schmelzwasser ebenfalls eine Spaltproduktaktivität. Dadurch lassen sich glazialhydrologische Probleme lösen, die mit der Vermischung von Schmelzwasser verschiedener Radioaktivität und verschiedenen Ursprungs zusammenhängen.

2. DATIERUNG VON EISPROBEN MIT HILFE BESTIMMTER RADIONUKLIDE UNTER ANWENDUNG DES RADIOAKTIVEN ZERFALLSGESETZES:

Für diese Datierungsverfahren sind in der Glaziologie die Radionuklide ^{210}Pb (Halbwertszeit 19,4 Jahre), ^{32}Si (HWZ ≈ 500 a?) und ^{14}C (HWZ 5570 a) geeignet. Damit stehen drei wesentlich verschiedene Zeitskalen zur Verfügung. ^{210}Pb ist ein Glied der natürlichen Uran-Radium-Radon-Zerfallsreihe und ist identisch mit dem Ra D. Es wird über das aus der Erdkruste diffundierende Radon der Atmosphäre und nach seiner Bindung an Aerosole mit dem Niederschlag der Gletscheroberfläche zugeführt. ^{32}Si und ^{14}C werden durch die kosmische Strahlung in der Atmosphäre produziert und gelangen von dort in die Firnschichten des Gletschers. Bei Altersbestimmungen von Eisproben nach diesen Methoden ist jedoch zu beachten, daß nur bei der ^{210}Pb -Methode mit einer zeitlich konstanten Anfangsaktivität gerechnet werden kann, während vor allem bei dem ^{32}Si - und weniger bei dem ^{14}C -Verfahren die Anfangsaktivität in den letzten Dekaden stärkeren Schwankungen unterworfen ist, weil die beiden Radioisotope auch bei thermonuklearen Detonationen in der Atmosphäre gebildet werden.

3. ISOTOPENTHERMOMETRIE:

Durch massenspektrometrische Untersuchung der relativen Zusammensetzung eines stabilen Isotopengemisches sind Temperaturvergleiche möglich. In der Glaziologie kann diese Methode durch Messung des Deuteriumgehaltes oder des ^{18}O -Gehaltes von Gletscherproben angewendet werden. Die Zusammensetzung der Isotopenmischung des am Gletscher abgelagerten Niederschlages ist nämlich neben anderen Einflüssen hauptsächlich von der Lufttemperatur während des Niederschlages abhängig. Daneben wirken sich auch andere Parameter aus, wie die Herkunft des Wasserdampfes, die Temperatur bei der Verdunstung und die Temperatur im Kondensationsniveau bei der Bildung des Niederschlages. Der Unterschied in der Zusammensetzung des Isotopengemisches von einem Standard (genannt SMOW = standard mean ocean water) (H. Craig, 1961) wird durch den δ -Faktor ausgedrückt, wobei gilt:

$$\delta = \frac{c_P - c_{\text{SMOW}}}{c_{\text{SMOW}}} \cdot 1000\text{‰}$$

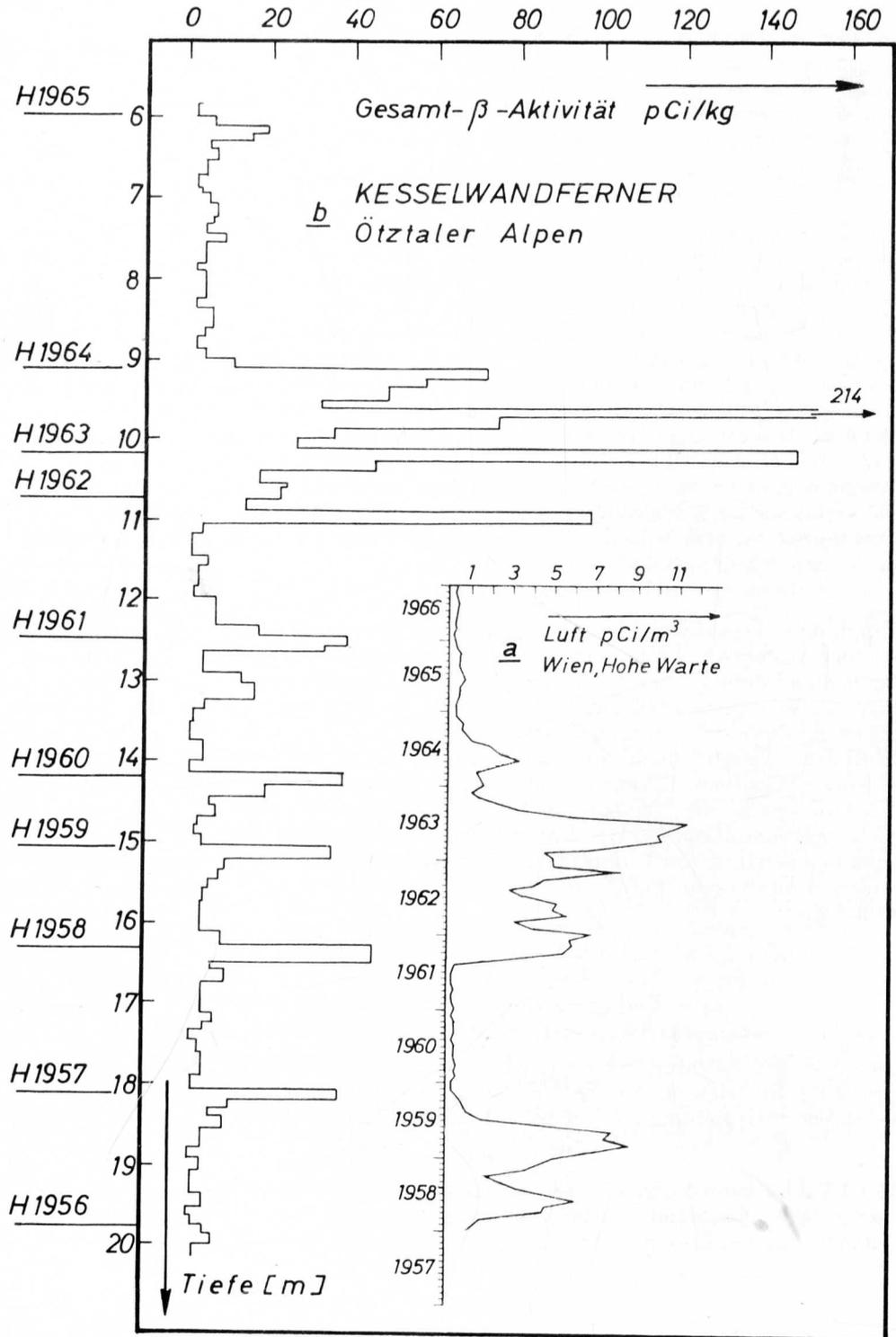
c_P = Verhältnis von $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ bzw. $^2\text{H}/^1\text{H}$ der Probe

c_{SMOW} = Verhältnis von $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ bzw. $^2\text{H}/^1\text{H}$ von SMOW.

Zwischen dem δ -Faktor und der Lufttemperatur während des Niederschlages besteht eine gute Korrelation. Für den Fall des Sauerstoffisotopengemisches gilt für die δ -Temperaturbeziehung (W. Dansgaard und H. Tauber, 1969)

$$\delta(^{18}\text{O}) = 0,70 \text{ t} - 13,6 \text{ ‰}$$

Der δ -Faktor kann durch die massenspektrometrische Messung mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2\text{‰}$ bestimmt werden; das entspricht einer Temperaturunsicherheit von $\pm 0,3^\circ\text{C}$.



ERGEBNISSE KERNPHYSIKALISCHER UNTERSUCHUNGEN

1. ERGEBNISSE VON SPALTPRODUKTUNTERSUCHUNGEN AN ALPENGLETSCHERN:

Auf Grund der seit 1952 durchgeführten thermonuklearen Waffentests wäre zu erwarten, daß die seither abgelagerten Firnschichten im Akkumulationsgebiet eines Gletschers Schwankungen der Gesamt-Beta-Aktivität aufweisen, die ungefähr den Variationen der Luftaktivität im gleichen Zeitraum entsprechen (Abb. 1). Zuzufolge sekundärer Einflüsse wird jedoch auf den temperierten Alpengletschern die ursprüngliche Ablagerung der Spaltprodukte wesentlich gestört. Durch das Abschmelzen der Gletscheroberfläche tritt eine stärkere Konzentration von wasserunlöslichen Spaltprodukten bzw. deren Verbindungen in der Oberflächenschicht auf (W. Ambach, H. Eisner, F. A. Prantl und H. Slupetzky, 1969). Durch das einsickernde Schmelzwasser, das leichtlösliche Isotope enthält, werden die darunterliegenden Firnschichten kontaminiert. Dabei haben besonders Schmutzschichten eine stark adsorbierende Wirkung (W. Ambach, H. Eisner und F. A. Prantl, 1968). Analoge Vorgänge der Konzentrierung und Filterwirkung können auch bei der Anreicherung von Pollen in sommerlichen Schmelzhorizonten beobachtet werden (W. Ambach, S. Bortenschlager und H. Eisner, 1966). Das Ergebnis dieser Veränderungen der ursprünglichen Vertikalverteilung der Spaltproduktaktivität im Gletscherfirn ist an einem Beispiel in Abb. 1 dargestellt. Die besonderen Kennzeichen des veränderten Tiefenprofils sind die hohen Aktivitätswerte in den Jahresrücklagen 1961 bis 1964 und Spitzenwerte in dünnen, stark verschmutzten Firnschichten, die in den meisten Fällen Sommerablationshorizonten zugeordnet werden können.

Nach Voruntersuchungen (W. Ambach und H. Eisner, 1965 a und b) ist ein derartiges Datierungsverfahren für die Rücklagenbestimmung über längere Zeiträume im Akkumulationsgebiet des Kesselwandferners (Ötztaler Alpen) und am Eisschild des Jungfraujochs (Berner Oberland) erfolgreich angewendet worden (W. Ambach, H. Eisner, R. Haefeli und M. Zobl, in Bearbeitung). Bei diesem Verfahren ist es im Gegensatz zu den bisher üblichen glaziologischen Methoden der Rücklagenbestimmung nicht mehr notwendig, die einzelnen Jahresschichten in der Firnstratigraphie zu erkennen und die Schichten von der Oberfläche beginnend zu zählen. Beim kernphysikalischen Untersuchungsverfahren kann vielmehr ein Horizontmerkmal in tieferen Firnschichten einem bestimmten Datum zugeordnet werden, z. B. der auffallende Aktivitätsanstieg der Firnschichten vom Herbst 1961 oder das Aktivitätsmaximum der Jahresschicht 1963/64.

Der wesentliche Vorteil dieser Methode besteht darin, daß sie auch dann richtige Ergebnisse liefert, wenn einige Jahresrücklagen durch Abschmelzung oder Erosion fehlen (E. Picciotto, R. Cameron, G. Crozaz, S. Deutsch und S. Wilgain, 1968). Im Gegensatz dazu können Methoden, die auf einer Zählung von Jahresschichten beruhen, bei Fehlen von Jahresrücklagen zu falschen Ergebnissen führen.

←

Abb. 1: a) Variationen der Gesamt-Beta-Aktivität von Luftproben (Hohe Warte, Wien)¹. b) Tiefenprofil der Gesamt-Beta-Aktivität im Akkumulationsgebiet des Kesselwandferners (Ötztaler Alpen). Die sommerlichen Ablationshorizonte (H) sind an Spitzenwerten der Gesamt-Beta-Aktivität zu erkennen. Die Firnschicht zwischen 1962 und 1964 zeichnet sich durch besonders hohe Werte der Gesamt-Beta-Aktivität aus. Der Verlauf des Tiefenprofils unterscheidet sich wesentlich von den Variationen der Luftaktivität in den entsprechenden Jahren.

¹ Der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, wird für die Überlassung von Meßdaten freundlichst gedankt.

Die im Spaltproduktgemisch enthaltenen Isotope ^{90}Sr und ^{137}Cs haben Halbwertszeiten von 28 bzw. 30 Jahren. Das bedeutet, daß die charakteristischen Aktivitätsmerkmale der Firnschichten einige Jahrzehnte erhalten bleiben müßten. Durch die Sekundäreinflüsse kann das Aktivitätsprofil allerdings stark verändert werden. So ist bekannt, daß ^{90}Sr zu einem großen Teil aus den Firnablagerungen durch Schmelzwasser ausgewaschen wird (E. Picciotto, G. Crozaz, W. Ambach und H. Eisner, 1967) und daß ^{137}Cs bevorzugt von organischem Material adsorbiert wird (R. Reiter, 1964). ^{137}Cs kann bei gammaspektrometrischer Untersuchung der Firnproben besonders gut analysiert werden (F. A. Prantl, 1968).

2. ERGEBNISSE VON TRITIUMMESSUNGEN:

a) Untersuchungen am Gletscherabfluß:

Tritium eignet sich als Tracer im Schmelzwasser bei der Untersuchung des hydrologischen Systems eines Gletschers besonders gut, weil es als Bestandteil der Wassermoleküle den Wassertransport unmittelbar mitmacht. Das alte Gletschereis der Ablationszone ist nahezu tritiumfrei, während die seit der Durchführung von thermonuklearen Waffentests abgelagerten Firnrücklagen einen um Zehnerpotenzen

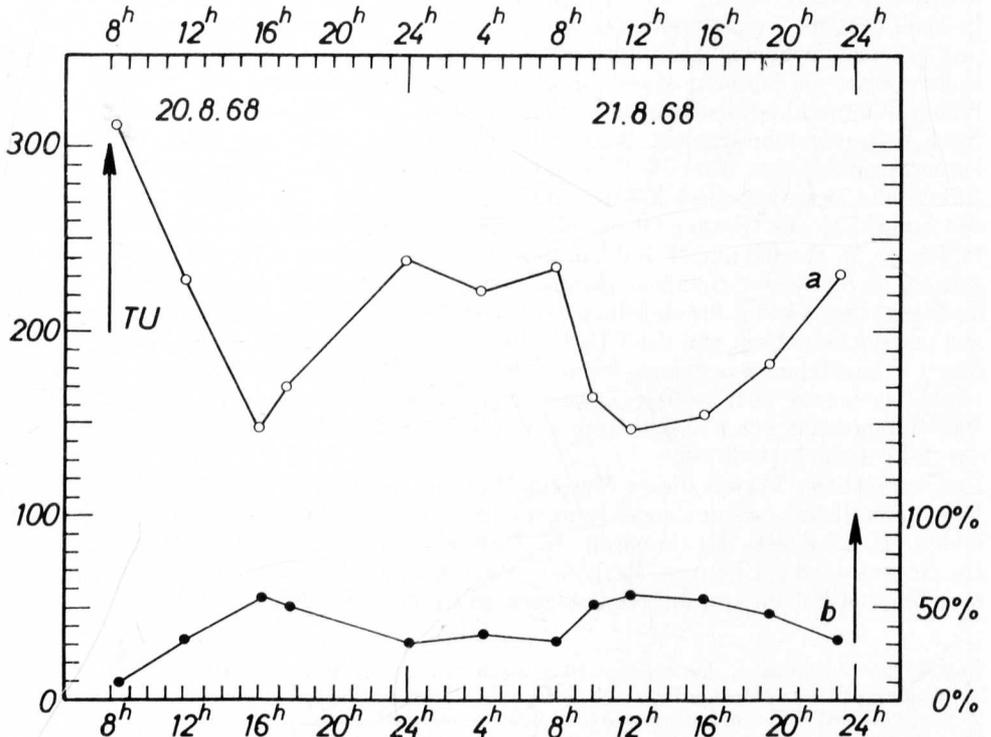


Abb. 2: a) Tageszeitlicher Gang der Tritiumaktivität im Gletscherbach des Kesselwandferners. b) Der daraus berechnete relative Anteil des Schmelzwassers aus altem Gletschereis. 100% bedeuten den Gesamtbetrag des Schmelzwassers aus dem Ablations- und Akkumulationsgebiet. (Wiedergegeben nach W. Ambach, H. Eisner und M. Url [1970]).

höheren Tritiumgehalt aufweisen (W. Ambach, H. Eisner und L. L. Thatcher, 1968). Durch Mischung von Schmelzwasser verschiedenen Ursprungs besitzt der am Zungenende des Gletschers abfließende Bach eine bestimmte Tritiumkonzentration. Unter bestimmten Voraussetzungen kann der Einfluß des Regenwassers und des Quellwassers im Gletscherbach vernachlässigt werden, so daß durch Lösung einer einfachen Mischungsaufgabe aus dem Tritiumgehalt des Gletscherabflusses auf den relativen Anteil des Schmelzwassers aus dem Ablationsgebiet und dem Akkumulationsgebiet geschlossen werden kann (W. Ambach, H. Eisner und M. Url, 1970).

Am Kesselwandferner (Ötztaler Alpen) zeigt sich zum Beispiel, daß bei starker Abschmelzung im Hochsommer das im Gletscherbach enthaltene Schmelzwasser zu ungefähr gleichen Teilen aus dem Ablations- und Akkumulationsgebiet stammt. Die Minimalwerte der Tritiumkonzentration im Gletscherabfluß treten dabei zur Mittagszeit oder in den frühen Nachmittagsstunden auf (Abb. 2). Daraus kann geschlossen werden, daß der Hauptteil des tritiumarmen Schmelzwassers aus der Ablationszone praktisch ohne Verzögerung zum Gletschertor kommt.

Bei derartigen Meßverfahren müssen allerdings die lokalen Verhältnisse besonders berücksichtigt werden, weil der Tritiumgehalt des schmelzenden Altschnees sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung stark variieren kann (W. Ambach, H. Eisner und L. L. Thatcher, 1968).

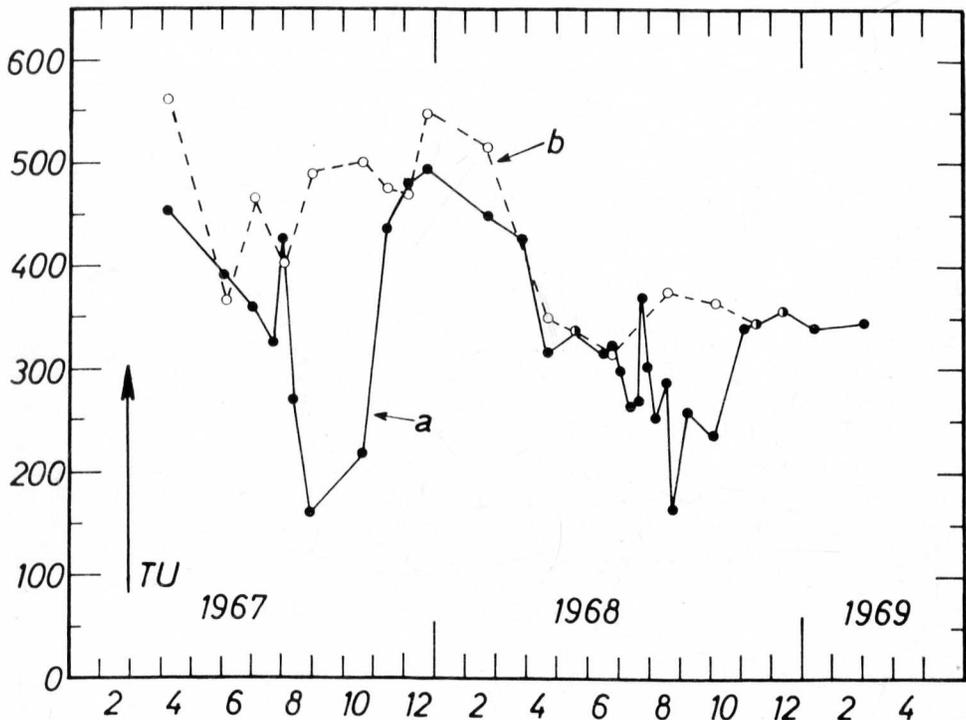


Abb. 3: a) Jahreszeitlicher Gang der Tritiumaktivität im Gletscherbach des Kesselwandfernners. b) Der entsprechende Verlauf der Tritiumaktivität von Quellwasser. (Wiedergegeben nach W. Ambach, H. Eisner und M. Url [1970]).

Neben den tageszeitlichen Schwankungen weist der Tritiumgehalt eines Gletscherbaches im Laufe eines hydrologischen Jahres auch jahreszeitliche Schwankungen auf (Abb. 3). Dabei tritt das Minimum der Tritiumkonzentration während der hochsommerlichen Ablationsperiode auf, weil zu dieser Zeit das tritiumarme geschmolzene Gletschereis des Ablationsgebietes seinen größten Beitrag zum Gesamtabfluß liefert (W. Ambach, H. Eisner und M. Url, 1970).

Für analoge Studien ist auch die Gesamt-Beta-Aktivität des Abflußwassers untersucht worden (M. Url, 1970). Dabei ist aber zu beachten, daß die Gesamt-Beta-Aktivität durch ein Isotopengemisch hervorgerufen wird, in welchem Isotope mit verschiedenen langen Halbwertszeiten auftreten. Dadurch ist die Interpretation der Meßergebnisse viel problematischer als bei den Tritiumergebnissen. Durch die starken Sandbeimengungen und die teilweise sehr niedrigen Aktivitätswerte des Abflußwassers ergeben sich auch meßtechnische Schwierigkeiten.

b) Untersuchungen an Firnrücklagen:

Zur Untersuchung allgemeiner hydrologischer Probleme ist die Kenntnis des Tritiumgehaltes des Niederschlages von besonderer Bedeutung. Im Alpenraum werden derartige Messungen erst ab 1961 regelmäßig durchgeführt (International Atomic Energy Agency, 1969). Um Rückschlüsse auf den Tritiumgehalt der Niederschläge für die Zeit vor 1961 ziehen zu können, sind Firnproben aus einem 20 m tiefen Schacht am Kesselwandferner und aus Bohrungen am Eisschild des Jungfraujochs untersucht worden (W. Ambach, H. Eisner und G. Sauzay, 1969).

3. ALTERSBESTIMMUNGEN VON GLETSCHEREIS MIT HILFE BESTIMMTER RADIONUKLIDE UNTER ANWENDUNG DES RADIOAKTIVEN ZERFALLSGESETZES:

Bei der Anwendung solcher Datierungsmethoden muß berücksichtigt werden, daß zwischen dem Gletscherfirn und der Atmosphäre Austauschprozesse stattfinden können. Erst nach Umwandlung von Firn in Gletschereis sind die Radionuklide so weit isoliert, daß Aussagen mit Hilfe des radioaktiven Zerfallsgesetzes möglich werden (Abb. 4). Das auf diese Weise bestimmte Alter der Eisproben wird also von dem Zeitpunkt an gezählt, zu dem die Eisbildung abgeschlossen ist. Die Zeitspanne für die Umwandlung des am Gletscher abgelagerten Niederschlages in kompaktes Gletschereis hängt von den lokalen Bedingungen ab. Bei einer Untersuchung am Kesselwandferner ist z. B. festgestellt worden, daß dieser Umwandlungsvorgang an einer Meßstelle in der Mitte des Akkumulationsgebietes (3240 m Seehöhe) etwa 15 bis 20 Jahre dauert (W. Ambach und H. Eisner, 1966).

Ein weiteres Problem besteht darin, daß unter rheologischer Beanspruchung im Gletschereis ein Reinigungsprozeß durch Rekristallisierung stattfinden kann (H. W. Georgii, 1962). Es wäre denkbar, daß auch an Salze gebundene Radionuklide diesem Reinigungsprozeß unterworfen sind und aus dem Eiskörper ausgeschieden werden. Dies wäre nach einer neueren theoretischen Modellvorstellung von Nye möglich, nach der auch altes Gletschereis schwach wasserdurchlässig sein soll (J. F. Nye, 1969).

a) Datierungen mit Hilfe von ^{210}Pb :

Zur Altersbestimmung des Gletschereises im Ablationsgebiet des Kesselwandfernens wurde die lokale Verteilung der ^{210}Pb -Aktivität in dieser Zone untersucht (E. Picciotto, G. Crozaz, W. Ambach und H. Eisner, 1967; W. Ambach und H. Eisner, 1968). Außerdem wurde überprüft, ob das Gletschereis kein Radium als Muttersubstanz

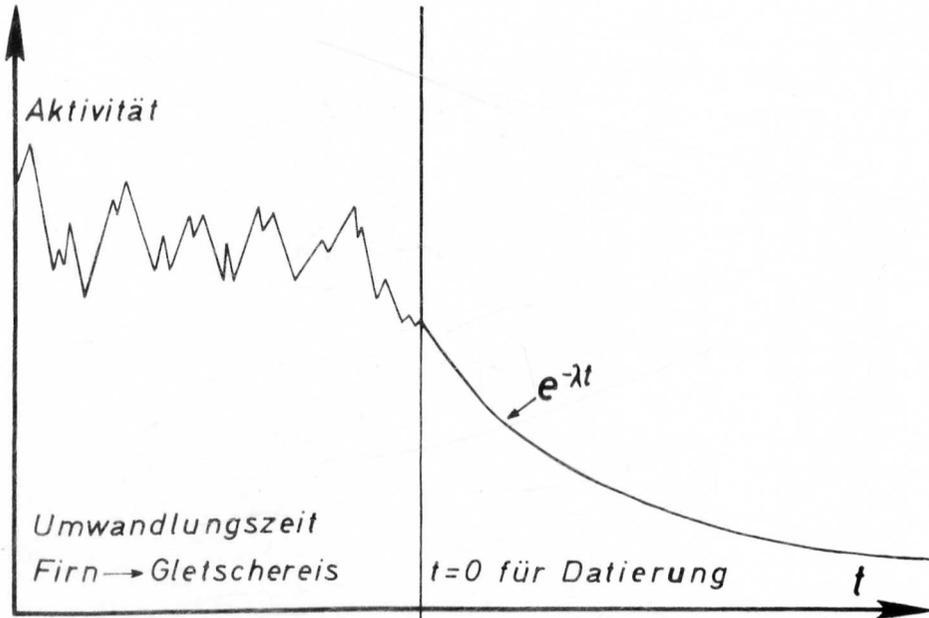


Abb. 4: Skizze zur Erklärung des „radioaktiven Alters“.

für ^{210}Pb enthält, weil sonst das radioaktive Zerfallsgesetz zur Altersbestimmung nicht anwendbar wäre. Als Anfangsaktivität zum Zeitpunkt der Ablagerung wurde der Mittelwert über mehrere Jahre aus den Aktivitätswerten von Firnproben verwendet, die im Akkumulationsgebiet gesammelt wurden. Die Ergebnisse für das Alter des Eises in diesem Gebiet sind in Abb. 5 angegeben. Die vier tiefstgelegenen Meßstellen zeigen keine ^{210}Pb -Aktivität; dort muß das Eis älter als 150 Jahre sein. Zur Gleichgewichtslinie zwischen Ablations- und Akkumulationsgebiet hin nimmt die ^{210}Pb -Aktivität zu und somit das Alter der Eisproben ab. Unregelmäßigkeiten treten in der Bruchzone im Bereich der Höhenlinie 3000 m auf.

Die Abschätzung des Eisalters durch Messung der Oberflächengeschwindigkeit (H. Schneider, 1970) deckt sich befriedigend mit den erhaltenen Ergebnissen. Diese Altersabschätzung ist jedoch mit Vorbehalt durchzuführen, denn nach der Theorie von S. Finsterwalder (1897) unterströmt das Eis das Gebiet um die Gleichgewichtslinie in Strömungsröhren. Richtig wäre, das Alter der Eisproben abzuschätzen aus dem Fließweg längs der Strömungsröhren und dem örtlichen und zeitlichen Mittel der Fließgeschwindigkeit, die jedoch nicht identisch mit der Oberflächengeschwindigkeit ist.

In der Antarktis ist die ^{210}Pb -Datierungsmethode auch zur Altersbestimmung von tieferliegenden Firnschichten angewendet worden (G. Crozaz, E. Picciotto und W. De Breuck, 1964). Dadurch ist es möglich, eine mittlere Akkumulationsrate über sehr lange Zeiträume zu bestimmen, wobei fehlende Jahresschichten das Resultat nicht verfälschen können. Auf temperierten Gletschern liefert diese Anwendung der ^{210}Pb -Datierungsmethode aber keine brauchbaren Ergebnisse, weil durch das Schmelzwasser zu große Störungen auftreten.

b) Datierungen mit Hilfe von ^{32}Si :

Um eine genügende Substanzmenge zur Altersbestimmung des Gletschereises zu erhalten, müssen bei der Anwendung dieser Methode für eine einzige Probe etwa drei Tonnen Eis geschmolzen und chemisch präpariert werden. Die Anfangsaktivität muß an Eisproben bestimmt werden, die bereits vor dem Beginn der thermodynamischen Waffentests als kompakte Eismassen am Gletscher vorhanden waren. Dazu wurden Eisproben aus dem Ablationsgebiet des Kesselwandferners verwendet, deren Alter durch die Anwendung der ^{210}Pb -Datierungsmethode bekannt war. An der untersten Gletscherzunge des benachbarten Hintereisferners wurden dann drei Eisproben entnommen, deren Alter nach der ^{32}Si -Methode zu etwa 1200 Jahren bestimmt wurde. Bei der Auswertung der Meßergebnisse wurde die Halbwertszeit von ^{32}Si mit 500 Jahren angenommen (H. B. Clausen, B. Buchmann und W. Ambach, 1968).

c) Datierungen mit Hilfe von ^{14}C :

Während der Feldarbeiten zur Anwendung der ^{32}Si -Methode am Hintereisferner wurde in Zusammenarbeit mit einer Arbeitsgruppe von H. Oeschger auch die ^{14}C -Methode auf einem temperierten Gletscher zum erstenmal technisch erprobt. Bei Altersbestimmungen nach der ^{14}C -Methode bilden die im alten Gletschereis eingeschlossenen Luftblasen, die ^{14}C in der Verbindung CO_2 enthalten, das Probenmaterial. Am Boden eines Bohrloches, das durch eine aufblasbare Dichtung vakuumdicht abgeschlossen ist, befindet sich ein Heizsystem (H. Oeschger, B. Alder und C. C. Langway, 1967). Während des Schmelzens entgast das Gletschereis. Die freigegebene Luft wird abgepumpt und aus ihr wird CO_2 durch Adsorptionsfilter abgetrennt. Bei dieser Art der Probenentnahme muß das Gletschereis ein vakuumdichtes System bilden.

4. ISOTOPENTHERMOMETRIE:

Die Zusammensetzung der Isotopenmischung im Schnee hängt hauptsächlich von der Lufttemperatur bei der Bildung des Niederschlages ab (W. Dansgaard und H. Tauber, 1969). Durch die Messung des Deuterium- und ^{18}O -Gehaltes der Firnproben können daher Aussagen über glaziologische Vorgänge gemacht werden, die mit der Temperatur zusammenhängen.

a) Jahreszeitliche Variationen in der Zusammensetzung des Isotopengemisches:

In kalten Gletschern bleiben die durch die jahreszeitlichen Temperaturvariationen hervorgerufenen Unterschiede im $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnis der Firnrücklagen lange Zeit erhalten. An einem Tiefenprofil sind die einzelnen Jahresschichten an den Spitzenwerten des $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnisses deutlich zu erkennen. Bei temperierten Gletschern werden aber die typischen jahreszeitlichen Variationen durch den Einfluß des Schmelzwassers verwischt (S. Deutsch, W. Ambach und H. Eisner, 1966), so daß diese Methode nur in den höchstgelegenen Teilen eines alpinen Akkumulationsgebietes angewendet werden kann.

b) Höheneffekt:

Die Temperaturabnahme mit der Höhe bewirkt einen Höheneffekt des Deuterium- bzw. ^{18}O -Gehaltes im abgelagerten Niederschlag. Zum Nachweis des Höheneffektes im Gletscherfirn müssen Jahresmittelwerte des Deuterium- bzw. ^{18}O -Gehaltes verglichen werden, wodurch die jahreszeitlichen Variationen unberücksichtigt bleiben können. Im arktischen und antarktischen Gebiet ist der Höheneffekt schon

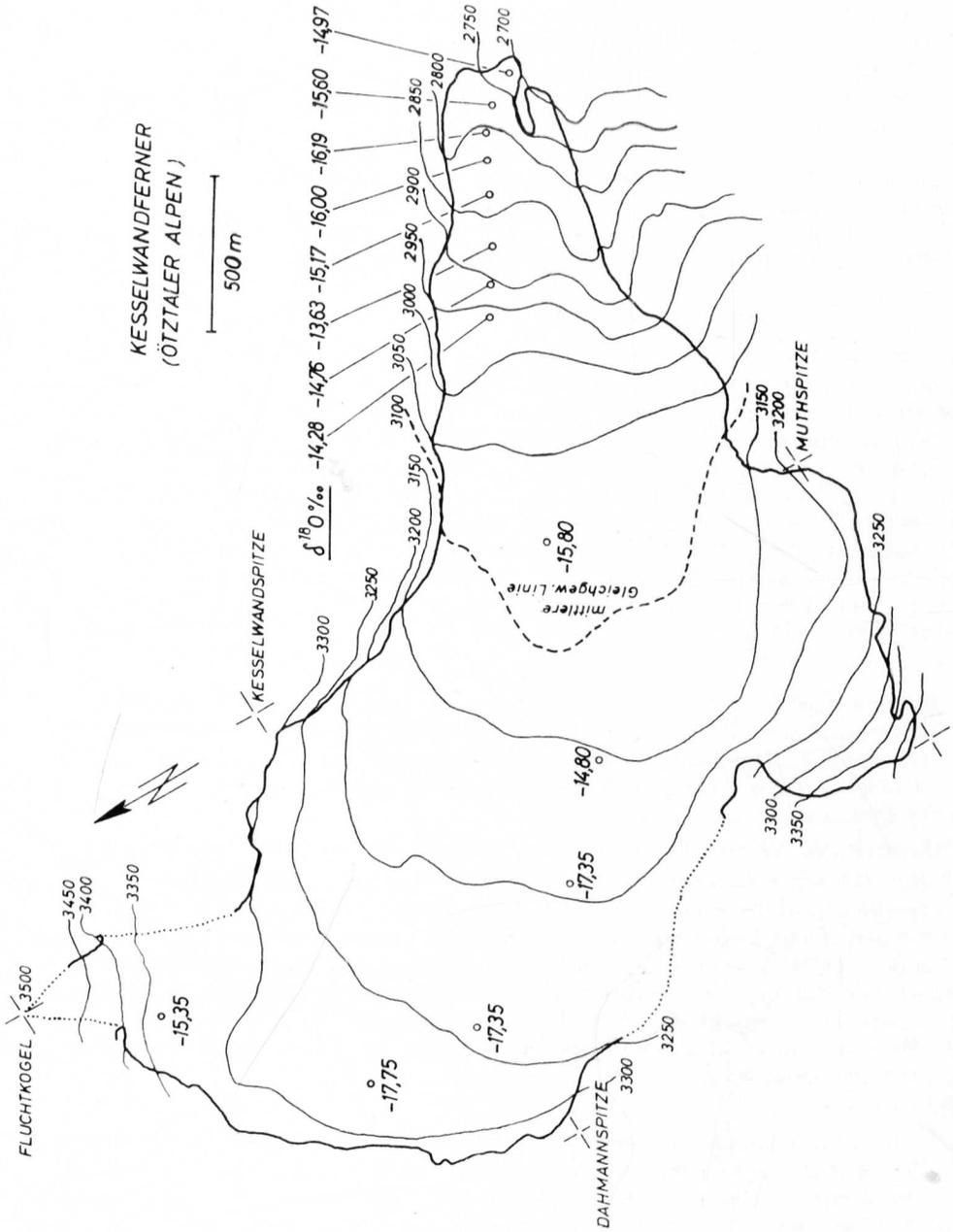


Abb. 6: Die Verteilung der ¹⁸O/¹⁶O-Konzentration der obersten Schichte im Längsschnitt des Kesselwandferners. (Wiedergegeben nach W. Ambach, W. Dansgaard, H. Eisner und J. Möller [1968]).

mehrmals nachgewiesen worden (W. Dansgaard, 1961); im Alpengebiet hingegen ist er praktisch nicht vorhanden. An winterlichen Schneeproben, die an drei Meßstellen (Innsbruck-Hungerburg-Hafelekar) mit einem Höhenunterschied von 1700 m gesammelt wurden, läßt sich kein Höheneffekt feststellen. Sommerliche Regenproben an denselben Meßstellen zeigen einen Höheneffekt von $0,2\text{‰}/100$ m. Der im Sommer festgestellte Höheneffekt wird jedoch dem Verdunstungsvorgang auf der Fallstrecke des Niederschlages zugeschrieben. Diese Vermutung läßt sich durch zusätzliche Deuteriummessungen bestätigen, weil das $^{18}\text{O}/^{2}\text{H}$ -Verhältnis einen Faktor ergibt, der auf schnelle Verdunstung hinweist (W. Ambach, W. Dansgaard, H. Eisner und J. Möller, 1968).

Werden diese Ergebnisse auf die Verhältnisse bei einem Alpengletscher sinngemäß übertragen, so ist im Bereich des Akkumulationsgebietes praktisch kein Höheneffekt zu erwarten. Die geringen Variationen, die an Oberflächenproben eines Gletschers in verschiedenen Höhen gemessen werden, sind durch Sekundäreinflüsse zu erklären. In verschiedenen Höhenlagen des Akkumulationsgebietes schmilzt der abgelagerte Altschnee während der sommerlichen Ablationsperiode verschieden stark ab. Die Firnrücklagen im unteren Akkumulationsbereich bestehen hauptsächlich aus dem in der ersten Winterhälfte gefallenen Schnee, während in höher gelegenen Gebieten auch ein Teil des im Hochwinter abgelagerten Niederschlages erhalten bleibt. Dadurch werden Unterschiede im ^{18}O -Gehalt der Oberflächenproben auftreten. Messungen des ^{18}O -Gehaltes an Firn- und Eisproben, die durch Bohrungen im Längsschnitt des Kesselwandferners entnommen wurden, zeigen im Ablationsgebiet die dem Akkumulationsgebiet entsprechenden Variationen (Abb. 6), wie dies nach dem Strömungsmodell der Gletscherbewegung zu erwarten ist (W. Ambach, W. Dansgaard, H. Eisner und J. Möller, 1968).

Neuere Messungen des Deuteriumgehaltes im Abfluß des Kesselwandferners zeigen tageszeitliche und jahreszeitliche Variationen (W. Ambach, H. Eisner, H. Moser und W. Stichler, 1970). Dieses Ergebnis führt zur Vermutung, daß durch sekundäre Vorgänge im Ablationsgebiet höhere Werte des Deuteriumgehaltes auftreten als im Akkumulationsgebiet. Damit wäre die Möglichkeit gegeben, durch Messung des Deuteriumgehaltes im Gletscherabfluß ähnliche Untersuchungen über das hydrologische System eines Gletschers durchzuführen wie mit Tritium. Die für den Kesselwandbach vorliegenden Meßergebnisse sind derzeit noch nicht vollständig ausgewertet.

c) Klimabeziehungen:

Durch ^{18}O -Analysen von Proben aus einem 1390 m langen Bohrkern des Grönländischen Inlandeises ist die Klimageschichte der Eiszeit über einen Zeitraum von etwa 100.000 Jahren erforscht worden (W. Dansgaard, S. J. Johnson, H. B. Clausen und C. C. Langway). Es ist heute noch ungewiß, ob diese eindrucksvolle Studie auch bei Alpengletschern erfolgreich durchgeführt werden kann. Innerhalb der an Alpengletschern erfaßbaren Zeitspanne von etwa 1000 Jahren werden die Klimaschwankungen nur eine kleine Änderung des $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnisses zur Folge haben. Die Störeinflüsse können aber so groß sein, daß sie den zu erwartenden kleinen Meßeffect überdecken.

Die von den Autoren durchgeführten Arbeiten wurden unterstützt von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, dem Österreichischen Forschungsrat, dem Bundesministerium für Inneres, der Alpinen Forschungsstelle Obergurgl der Universität Innsbruck und dem

Österreichischen Alpenverein. Bei den Laboruntersuchungen haben mitgearbeitet: Institut für Strahlenschutz im Reaktorzentrum Seibersdorf (Dr. Chr. Tritremmel); I. A. E. A. — Wien (Dr. B. R. Payne); Service de Géologie et Géochimie Nucléaires, Université Libre de Bruxelles, Belgien (Prof. Dr. E. Picciotto); H. C. Ørsted Institut, Universität Kopenhagen (Prof. Dr. W. Dansgaard); Institut für Radiohydrometrie, Gesellschaft für Strahlenforschung, München (Prof. Dr. H. Moser); Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, Wien (Dr. J. Mairhofer). Allen sei gebührend gedankt.

LITERATUR

- Ambach W., S. Bortenschlager and H. Eisner (1966): Pollenanalytical Investigations of a 20 m Firn Pit on the Kesselwandferner (Oetztal Alps). *J. Glaciol.* **6** (44), 233—236.
- Ambach W. and W. Dansgaard (1970): Fallout and Climate Studies on Firn Cores from Carrefour, Greenland. Zum Druck eingereicht: *Earth a. Planetary Science Letters*.
- Ambach W., W. Dansgaard, H. Eisner and J. Möller (1968): The Altitude Effect on the Isotopic Composition of Precipitation and Glacier Ice in the Alps. *Tellus* **20** (4), 595—600.
- Ambach W. and H. Eisner (1965 a): Radioaktivitätsmessungen zur Bestimmung der Firnrücklagen eines Alpengletschers. *Naturw.* **52**. Jg. (7), 154.
- Ambach W. und H. Eisner (1965 b): Untersuchungen der Radioaktivität der Firnschichten eines Alpengletschers zur Festlegung von Datierungsmarken. *Acta Physica* **XX** (1—4), 58—62.
- Ambach W. and H. Eisner (1966): Analysis of a 20 m Firn Pit on the Kesselwandferner (Oetztal Alps). *J. Glaciol.* **6** (44), 223—231.
- Ambach W. and H. Eisner (1968): Pb-210-Methode zur Datierung von Eis eines alpinen Gletschers. *Acta Physica Austriaca* **XXVII**, 271—274.
- Ambach W., H. Eisner, H. Moser und W. Stichler (1970): Deuteriumgehalt des Wassers im Gletscherabfluß. *Naturw.* **57**. Jg. (2), 86.
- Ambach W., H. Eisner and F. A. Prantl (1968): Investigations on Fission Products in the Accumulation Area of an Alpine Glacier (Kesselwandferner, Oetztal Alps). *International Association of Scientific Hydrology Publ.* **79**, General Assembly of Bern, Commission of Snow and Ice, 117—125.
- Ambach W., H. Eisner, F. A. Prantl and H. Slupetzky (1969): Studies on Vertical Total-Beta-Activity Profiles of Fission Products in the Accumulation Area of the Stubacher Sonn- blickkees (Hohe Tauern, Salzburg, Austria). *Pure and Applied Geophysics* **74**, 83—91.
- Ambach W., H. Eisner and G. Sauzay (1969): Tritium Profiles in Two Firn Cores from Alpine Glaciers and Tritium Content in Precipitation in the Alpine Area. *Arch. Met. Geophys. Bioklim. Serie B* **17**, 93—104.
- Ambach W., H. Eisner and L. L. Thatcher (1968): Tritium Content in the Firn Layers of an Alpine Glacier. *International Association of Scientific Hydrology Publ.* **79**, General Assembly of Bern, Commission of Snow and Ice, 126—134.
- Ambach W., H. Eisner and M. Url (1970): Tritium Activity Variations in Run-Off from an Alpine Glacier. *International Association of Scientific Hydrology, Commission of Snow and Ice, Symposium Cambridge (U. K.), 1969*, im Druck.
- Clausen H. B., B. Buchmann and W. Ambach (1968): ³²Si Dating of an Alpine Glacier. *International Association of Scientific Hydrology Publ.* **79**, General Assembly of Bern, Commission of Snow and Ice, 135—140.
- Craig H. (1961): Standard for Reporting Concentrations of Deuterium and Oxygen-18 in Natural Waters. *Science* **133**, 1833—1834.
- Crozaz G., E. Picciotto and W. De Breuck (1964): Antarctic Snow Chronology With Pb-210. *J. Geophys. Res.* **69** (12), 2597—2604.
- Dansgaard W. (1961): The Isotopic Composition of Natural Waters. *Medd. Grönland* **165** (2), 1—120.

- Dansgaard W., S. J. Johnson, H. B. Clausen and C. C. Langway Jr.: Ice Cores and Paleoclimatology. Proc. XII Noble Symposium Uppsala (Schweden), August 1969 (im Druck).
- Dansgaard W. and H. Tauber (1969): Glacier Oxygen-18 Content and Pleistocene Ocean Temperatures. *Science* **166**, 499—502.
- Deutsch S., W. Ambach and H. Eisner (1966): Oxygen Isotope Study of Snow and Firn on an Alpine Glacier. *Earth Planetary Science Letters* **1** (4), 197—201.
- Finsterwalder S. (1897): Der Vernagtferner, seine Geschichte und seine Vermessung in den Jahren 1888 und 1889. *Wiss. Erg.-Hefte d. Z. D. u. ÖAV I* (1).
- Georgii H. W. (1962): Der Spurenstoffgehalt des Gletschereises. *Polarforschung V*, Jg. 32 (1/2), 140—144.
- Glasstone S. (1964): Die Wirkungen der Kernwaffen. Heymanns Verlag KG, Köln-Berlin-Bonn, 645—661; Übersicht ebenfalls bei: F. A. Prantl (1968).
- International Atomic Energy Agency (1969): Environmental Isotope Data Nr. 1.
- Nye J. F. (1969): Where is the Water Phase Situated in the Grain Structure of a Temperate Glacier? International Association of Scientific Hydrology, Commission of Snow and Ice, Vortrag Symposium Cambridge (U. K.) 1969.
- Oeschger H., B. Alder and C. C. Langway Jr. (1967): An in situ Gas-Extraction System to Radio-Carbon Date Glacier Ice. *J. Glaciol.* **6** (48), 939—942.
- Picciotto E., R. Cameron, G. Crozaz, S. Deutsch and S. Wilgain (1968): Determination of the Rate of Snow Accumulation at the Pole of Relative Inaccessibility, Eastern Antarctica: A Comparison of Glaciological and Isotopic Methods. *J. Glaciol.* **7** (50), 273—287.
- Picciotto E., G. Crozaz, W. Ambach and H. Eisner (1967): Lead-210 and Strontium-90 in an Alpine Glacier. *Earth Planetary Science Letters* **3**, 237—242.
- Picciotto E. and S. Wilgain (1963): Fission Products in Antarctic Snow, a Reference Level for Measuring Accumulation. *J. Geophys. Res.* **68** (21), 5965—5972.
- Prantl F. A. (1968): Untersuchungen der radioaktiven Stratigraphie in temperierten Gletschern. *Diss. Phil. Fak. Univ. Innsbruck*.
- Reiter R. (1964): Felder, Ströme und Aerosole in der unteren Troposphäre. *Wiss. Forschungsber. Naturw. Reihe 71*, Absehn. 7. 1, 544—548, Dr. Dietrich Steinkopff Verl. Darmstadt.
- Schneider H. (1970): Die Grundlagen der Vermessungen am Kesselwandferner (Ötztaler Alpen) und die Bewegung dieses Gletschers in den Haushaltsjahren 1965/66, 1966/67 und 1967/68. *Diss. Phil. Fak. Univ. Innsbruck*.
- Url M. (1970): Glazialhydrologische Untersuchungen mit Tritium und radioaktiven Spaltprodukten. *Diss. Phil. Fak. Univ. Innsbruck*.

Manuskript eingegangen am 29. Jänner 1970.

Anschrift der Verfasser: Univ.-Prof. Dr. Walter Ambach und Dr. Heinrich Eisner
Physikalisches Institut der Universität Innsbruck
Schöpfstraße 41
A-6020 Innsbruck