

MESSUNGEN DES DEUTERIUM- UND TRITIUMGEHALTES VON SCHNEE-, EIS- UND SCHMELZWASSERPROBEN DES HINTEREISFERNERS (ÖTZTALER ALPEN)

Von H. MOSER, W. RAUERT, W. STICHLER, München und
W. AMBACH, H. EISNER, Innsbruck

Mit 3 Abbildungen

ZUSAMMENFASSUNG

Die im Jahre 1970 begonnene Entnahme von Schnee-, Eis- und Schmelzwasserproben am Hintereisferner (Öztaler Alpen) während der Ablationszeit im Juli wurde im Jahre 1971 wiederholt und der Gehalt dieser Proben an Deuterium und Tritium gemessen. Die Isotopengehalte ergaben als Funktion der Höhe der Probennahme ein sehr ähnliches Bild wie bei der Meßreihe 1970, wobei allerdings bei den Schneeproben eine signifikante Zunahme des Deuteriumgehalts festgestellt wurde. Die Meßergebnisse werden in ihrer Korrelation zu den meteorologischen Verhältnissen und zum Abschmelzvorgang der Schneedecke am Gletscher diskutiert.

MEASUREMENTS OF DEUTERIUM AND TRITIUM CONTENT OF SNOW, ICE, AND MELTWATER SAMPLES OF HINTEREISFERNER (ÖTZTAL ALPS)

SUMMARY

The collection of snow, ice, and meltwater samples of Hintereisferner (Öztal Alps) was initiated in the ablation season (July) of 1970 and was repeated in 1971. The content of Deuterium and partly that of Tritium of these samples was determined, yielding a relation between isotope content and altitude of sampling site that was similar to the results of 1970 observations. In the snow samples, however, a significant increase of Deuterium content was found. The results are correlated to meteorological conditions and to melting processes in the snow cover of the glacier.

MESURES DU CONTENU D'ISOTOPES D'ÉCHANTILLONS DE NEIGE, DE GLACE ET D'EAU DE FONTE DE LA SURFACE DU GLACIER HINTEREISFERNER (ÖTZTAL, AUTRICHE)

RESUME

En temps d'ablation, en juillet 1970 et 1971 des échantillons de neige, de glace et d'eau de fonte furent du glacier Hintereisferner pour déterminer le contenu de deutérium et partiellement de tritium. La distribution des contenus d'isotopes en fonction de l'altitude se ressemblent en 1970 et 1971, seul les échantillons de neige montrent une augmentation en deutérium en 1971. Les résultats sont discutés par rapport aux données météorologiques et à la fonte de neige à la surface du glacier.

I. EINFÜHRUNG

In einer früheren Arbeit wurde bereits berichtet, daß die Abflußkomponenten eines Gletscherbachs (Eisschmelzwasser, Schneeschmelzwasser, subglazial abfließendes Quellwasser) durch ihren Deuterium- bzw. Sauerstoff-18- und Tritiumgehalt unterschieden werden können (Behrens *et al.*, 1971). Dies liegt im wesentlichen daran, daß altes Gletschereis kein Tritium aus den Kernwaffentests enthält und daß das oberflächlich abfließende Schmelzwasser aus Schnee und Eis im Vergleich zum subglazialen Quellwasser mit Deuterium bzw. Sauerstoff-18 angereichert ist. Diese Anreicherung ist dadurch bedingt, daß das Schmelzwasser aus an Deuterium angereicherten Sommerniederschlägen oder aus lange an der Oberfläche exponierten Winterniederschlägen stammt. Systematische Messungen der Isotopengehalte im Abfluß des Hintereisfernens (Öztaler Alpen) erbrachten unter Verwendung von einfachen

Deuterium- und Tritium-Bilanzgleichungen und unter Zuhilfenahme von Abflußmessungen mit der Farbverdünnungsmethode quantitative Aussagen über die absoluten Abflüsse der einzelnen oben genannten Abflußkomponenten während eines Tages und Einsichten in den Ablauf der Abschmelzung von Schnee und Eis während einer Ablationsperiode (Behrens *et al.*, 1971).

Im Zusammenhang mit dieser Studie wurden während einer Begehung des Hintereisferners vom 22. bis 24. Juli 1970 Proben verschiedener Art entnommen (Eis, Schnee, Schmelzwasser von Eis und Schnee) und deren Tritium- und Deuteriumgehalt untersucht. Diese Ergebnisse sind bereits veröffentlicht (Behrens *et al.*, 1971). Die Probensammlung wurde im darauffolgenden Jahr vom 24. bis 26. Juli 1971 wiederholt. Im folgenden wird vergleichend über die Messungen der beiden Probenreihen berichtet.

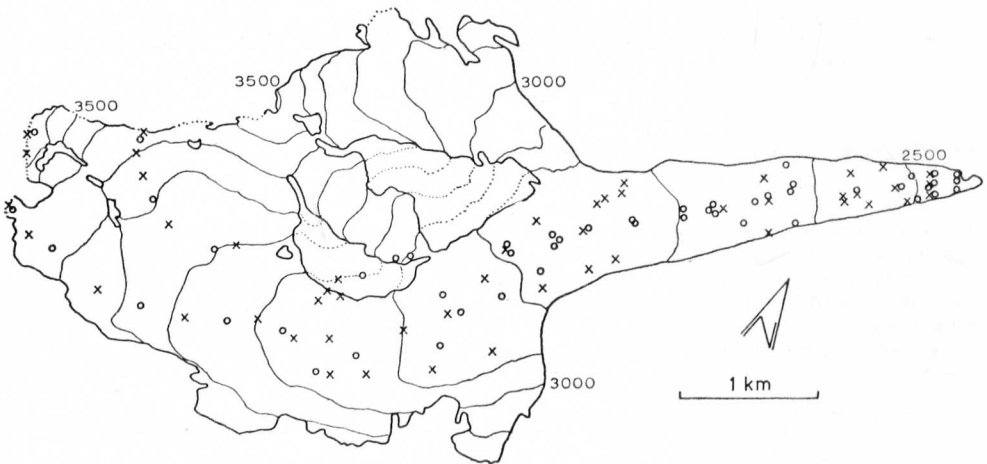


Abb. 1: Hintereisferner (Ötztaler Alpen) mit den Probenahmestellen der Begehungen vom 22. bis 24. 7. 1970 (o) und vom 24. bis 26. 7. 1971 (x).

2. PROBENAHE UND MESSUNG

In Abb. 1 sind die Probenahmestellen der beiden Begehungen dargestellt. Die an der Oberfläche des Gletschers entnommenen Schnee- und Eisproben wurden in geschlossenen Gefäßen ohne zusätzliche Erwärmung geschmolzen, um Verdunstungsverluste, die zu einer Verfälschung des Isotopengehalts führen (s. z. B. Moser und Stichler, 1971), zu vermeiden. Proben von Schmelzwasser wurden direkt in Flaschen abgefüllt. Die Proben wurden in luftdicht verschlossenen Flaschen aufbewahrt, damit kein Isotopenaustausch mit dem atmosphärischen Wasserdampf erfolgen kann. Die Messung der Proben wurde im Labor durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den üblichen Einheiten angegeben: der Tritiumgehalt in Tritiumeinheiten (T. U.)¹, der Deuteriumgehalt als relative Abweichung δD des Isotopengehalts in der Probe von dem des Standards SMOW (standard mean ocean water) (Näheres s. z. B. Moser und Stichler, 1971).

¹ 1 T. U. = 3.2 pCi/l.

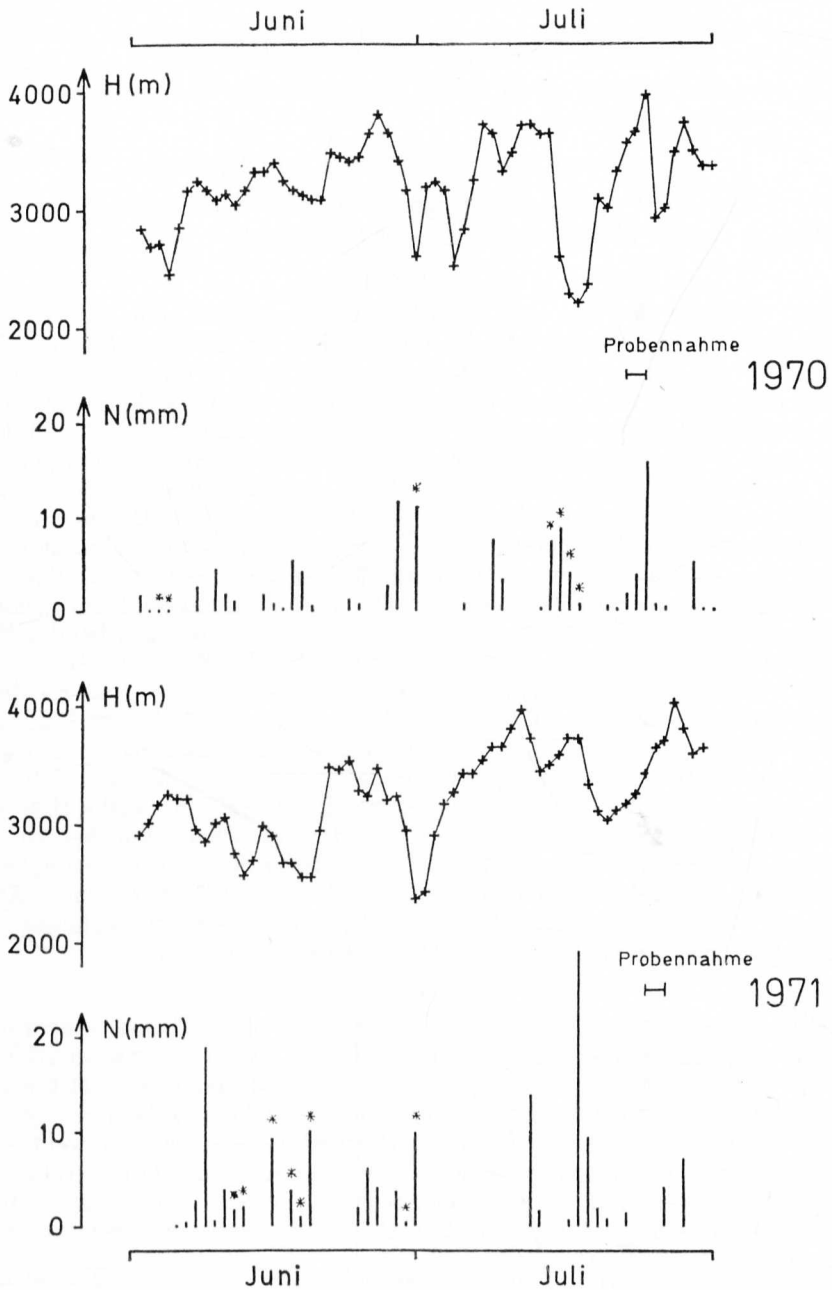


Abb. 2: Niederschlagsmengen N in Vent und Höhe der Nullgradgrenze H , berechnet aus der mittleren Temperatur in Vent (Temperaturgradient $-0,65^{\circ}/100$ m), für die Monate Juni und Juli der Jahre 1970 und 1971.

* bedeutet Schneefall in Vent.

Der Verlauf der Nullgradgrenze vor und während der Probenahme, berechnet aus den Temperaturen in Vent (1893 m ü. NN, Tagesmittel = $(T_{7^h} + T_{19^h} + T_{\max} + T_{\min}) : 4$), sowie die während dieser Zeit in Vent gefallenen Niederschlagsmengen sind in Abb. 2 graphisch dargestellt.

3. MESSERGESBNISSB UND DISKUSSION

In Abb. 3 sind die Tritium- und Deuteriumgehalte der beiden Probenserien in Abhängigkeit von der Höhe der Probenahme aufgetragen.

3.1 EISPROBEN

Die Tritiumgehalte der Eis- und Eisschmelzwasserproben vom Juli 1970 liegen erwartungsgemäß sehr niedrig, da das Gletschereis der Ablationszone aus Niederschlägen vor der Kernwaffentestperiode stammt. Daß überhaupt Tritium nachgewiesen werden konnte, kann mit einer Kontamination des Eisschmelzwassers durch von oben abschmelzenden Schnee oder durch Isotopenaustausch mit der Luftfeuchte erklärt werden. Dies gilt insbesondere für die in etwa 2700 m Höhe genommene Probe, bei der ein Tritiumgehalt von 65 T. U. gefunden wurde. Insgesamt wurde jedoch die im Abflußkomponentenmodell (Ambach *et al.*, 1971; Behrens *et al.*, 1971) zugrundegelegte Vorstellung bestätigt, daß der Tritiumgehalt des Eises in der Ablationszone gleich Null gesetzt werden kann. Wegen des klaren Sachverhalts wurde darauf verzichtet, an den Eisproben vom Juli 1971 Tritiumgehalte zu messen.

Die Deuteriumgehalte der Eis- und Eisschmelzwasserproben liegen bei der Meßserie 1970 im Bereich von $\delta D = -106\text{‰}$ bis -91‰ , bei der Meßserie 1971 im Bereich von $\delta D = -124\text{‰}$ bis -91‰ , wobei allerdings auch bei dieser Meßserie die Mehrzahl der Proben im gleichen Bereich wie 1970 liegt; nur 4 der 28 Proben liegen zwischen -124‰ und -106‰ . Im Vergleich zu der großen Streuung des Deuteriumgehalts der Schneeproben im Akkumulationsgebiet (s. Abschn. 3.2) sind die Unterschiede der δD -Werte der Eisproben gering, was auf eine starke Homogenisierung der Isotopengehalte im Eis eines temperierten Gletschers schließen läßt. Der im Verhältnis zum Jahresmittel der δD -Werte der Niederschläge² etwas zu hohe Mittelwert des Deuteriumgehalts der Eisproben von etwa -100‰ kann durch Anreicherung des Deuteriums des seinerzeit auf dem Gletscher exponierten Schnees, aus dem das Eis entstanden ist, erklärt werden (Moser und Stichler, 1970).

3.2 SCHNEEPROBEN

Die Tritiumgehalte der Schneeproben von 1970, die oberhalb der temporären Altschneelinie ca. 2800 m entnommen wurden, steigen von dort zunächst steil an und erreichen ab etwa 3000 m einen im Rahmen der Meßgenauigkeit konstanten Wert von etwa 260 T. U. Diese Tendenz findet sich auch bei den wenigen gemessenen Proben vom Juli 1971 wieder (temporäre Altschneelinie ca. 2900 m), wenn auch mit weitaus größeren Schwankungsbreiten. Dieser Verlauf kann damit erklärt werden (Behrens *et al.*, 1971), daß die zunehmende Abschmelzung mit abnehmender Höhe diejenigen Schneeschichten zutage treten läßt, die aus Niederschlägen vom Frühjahr

² Als Jahresmittel 1971 des δD -Werts der Niederschläge in Vent (1893 m) ergibt sich nach bisherigen Messungen (Stichler, bisher unveröffentlicht) etwa -70‰ . Im allgemeinen ist mit einer Abnahme des Deuteriumgehalts von etwa $3-4\text{‰}$ pro 100 m Höhenzunahme zu rechnen („Isotopenhöheneffekt“, s. z. B. Moser und Stichler, 1970; Friedman und Smith, 1970). Setzt man als „gewogenes“ Höhenmittel für die Akkumulationszone etwa 3100 m (Hoinkes, 1970, Abb. 10), so wäre demnach ein mittlerer δD -Wert von -105‰ bis -115‰ zu erwarten.

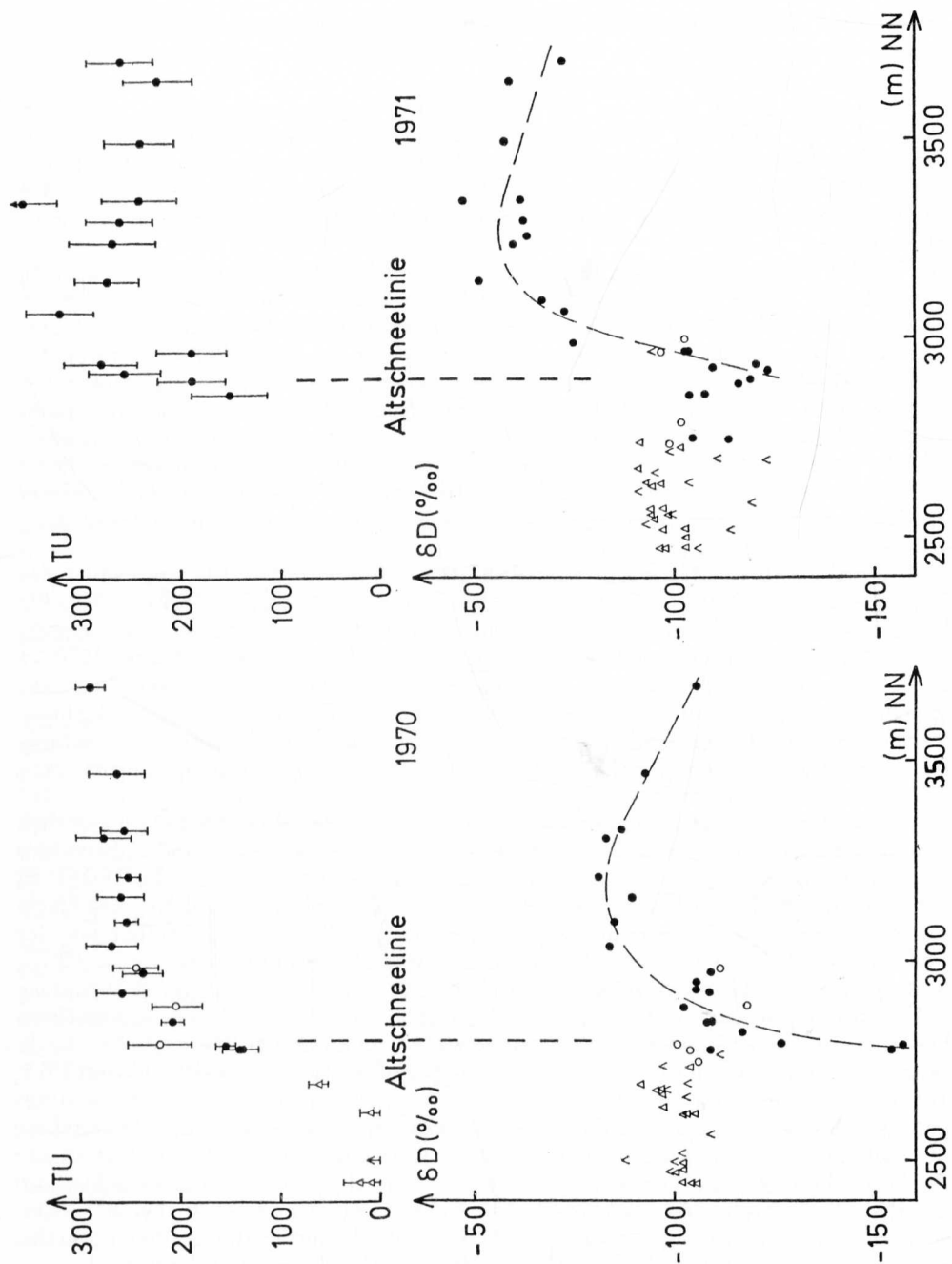


Abb. 3: Deuterium- und Tritiumgehalte von Schnee-, Eis- und Schmelzwasserproben, gesammelt vom 22. bis 24. Juli 1970 und vom 24. bis 26. Juli 1971 in Abhängigkeit von der Höhe über NN der Probenahme stelle.

▲ Eis, △ Eisschmelzwasser, ● Schnee, ○ Schneeschmelzwasser.

und Winter stammen und daher einen geringeren Tritiumgehalt besitzen (s. z. B. Rauert, 1971), während die ab 3000 m beobachteten Tritiumwerte den kurz vor der Probenahme gefallenem Schnee repräsentieren.

Im Jahr 1971 fielen kurz vor der Probenahme starke Niederschläge, wobei die Nullgradgrenze über den Gipfel der Weißkugel (3739 m) angestiegen war (Abb. 2). Die starken Schwankungen des Tritiumgehalts mögen dadurch bedingt sein, daß bei der Probenahme je nach der Durchlässigkeit des Schnees wechselnde Anteile der ursprünglichen Schneedecke und des Regenwassers dieser Niederschläge entnommen wurden.

Der Verlauf des Deuteriumgehalts der Schneeproben beginnt, wie beim Tritiumgehalt, ebenfalls mit einem steilen Anstieg von der Altschneelinie bis etwa 3100 m. Nach Überschreiten eines Maximums bei etwa 3200 m fällt der δD -Wert mit zunehmender Höhe ab. Auch hier kann der Abfall zur Altschneelinie hin mit dem Zutagetreten des an Deuterium abgereicherten Schnees aus der kälteren Jahreszeit (s. z. B. Moser und Stichler, 1971) erklärt werden. Die Verminderung des Deuteriumgehalts mit zunehmender Höhe muß jedoch dem Isotopenhöheneffekt der frisch gefallenem Niederschläge zugeordnet werden: In der Tat entspricht die beobachtete Größe dieser Abreicherung (Juli 1970: ca. $-5\text{‰}/100\text{ m}$, Juli 1971: ca. $-3,5\text{‰}/100\text{ m}$) den bisher gemessenen Werten des Isotopenhöheneffekts an Schnee- und Regenniederschlägen (Moser und Stichler, 1970; 1971).

Auffällig ist, daß die δD -Werte vom Juli 1971 um etwa $20\text{--}30\text{‰}$ gegenüber der Meßserie vom Juli 1970 erhöht sind. Dies kann durch meteorologische Gründe bedingt sein: Es muß beachtet werden, daß die wesentlichen Schneefälle des Winters 1969/70 im Hochwinter und Vorfrühling gefallen sind, während im Winter 1970/71 nach einer Niederschlagsperiode im Spätherbst erst wieder im späten Frühjahr ergiebige Schneefälle auftraten. Dies hat zur Folge, daß die unteren Schneeschichten, welche während der Probenahme im Juli nahe oberhalb der Altschneelinie zutage-treten, im Jahr 1970 aus einer kälteren Periode stammen und damit einen niedrigeren δD -Wert besitzen als 1971.

Daß auch der oberhalb 3100 m gesammelte Schnee bei der Meßserie 1971 wesentlich höhere Deuteriumgehalte ergibt als 1970, dürfte einen anderen Grund haben: hier sind im wesentlichen die kurz vor der Probenahme gefallenem Niederschläge zu berücksichtigen. In der Tat ergibt sich für die in Vent gesammelten Niederschlagsproben (s. Abb. 2) im Zeitraum vom 5. bis 16. 7. 1970, also unmittelbar vor der Probenahme 1970, ein gewogener Mittelwert des Deuteriumgehalts von -69‰ , während sich für die Niederschläge vom 17. bis 18. 7. 1971, also vor der Probenahme 1971, ein entsprechender Wert von -41‰ ergibt (W. Stichler, bisher unveröffentlicht). Der Unterschied von 28‰ entspricht etwa dem bei den Schneeproben beobachteten Unterschied der δD -Werte zwischen den Meßserien Juli 1970 und Juli 1971. Der zwischen Vent und dem Hintereisferner sich ergebende Höheneffekt ist allerdings geringer als erwartet; dies mag daran liegen, daß in der Zeit zwischen der Probenahme in Vent und am Hintereisferner eine gewisse Anreicherung des Deuteriums an der Schneedecke des Gletschers stattgefunden hat und daß der Regenniederschlag am 17. und 18. 7. 1971 wohl am Gletscher mit Schnee eines anderen früheren Niederschlags vermischt entnommen wurde, wodurch auch vermutlich die aus dem normalen Kurvenverlauf fallenden Meßpunkte bei 3100 m und 3350 m zu erklären sind.

Die nahe unterhalb der Altschneelinie genommenen Schnee- und Schneeschmelzwasserproben haben i. a. einen um -100‰ liegenden δD -Wert. Es ist zu vermuten,

daß hier eine Durchmischung mit Eisschmelzwasser stattgefunden hat, dessen Deuteriumgehalt etwa diesen Wert besitzt (s. oben).

4. SCHLUSSFOLGERUNG

Die vorangehende Diskussion zeigt, daß in einem Gletschergebiet die lokalen Variationen des Tritium- und Deuteriumgehalts von Schnee- und Eisproben einen komplexen Charakter haben. Trotzdem lassen sich gewisse Gesetzmäßigkeiten bestätigen: Altes Gletschereis ist tritiumfrei und hat einen relativ konstanten Deuteriumgehalt. Die Tritium- und Deuteriumkonzentrationen von Schneeproben erweisen sich als abhängig von der Höhenlage der Entnahmestellen. Dies kann auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden: auf das Ausapern von Schichten aus verschiedenen Niederschlagsperioden und auf den „normalen“ Höheneffekt des Deuteriumgehalts von Neuschneeproben.

Die Ergebnisse geben einen wesentlichen Einblick zur Isotopenhydrologie eines vergletscherten Einzugsgebietes und bestätigen die Annahmen, die bei einer modellmäßigen Behandlung des Abflußsystems gemacht wurden. Weitere systematische Untersuchungen werden in Zusammenschau mit Abflußmessungen und meteorologischen Beobachtungen dieses Bild noch verfeinern.

Unser Dank gilt der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, für die finanzielle Unterstützung, dem Bundesministerium für Inneres, Wien, für den Transport der Proben und des Arbeitsmaterials, sowie Herrn Univ.-Professor Dr. H. Hoinkes, Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck, für die freundliche Überlassung von Klimadaten der Station Vent. Gleichfalls wird allen Helfern bei den Feld- und Laborarbeiten gebührend gedankt.

LITERATUR:

- Ambach, W., H. Eisner, H. Moser, W. Stichler, 1971. Ergebnisse von Isotopenmessungen am Gletscherbach des Kesselwandferners (Ötztaler Alpen); *Ann. Meteorol. N. F.* **5**, 209–212.
- Behrens, H., H. Bergmann, H. Moser, W. Rauert, W. Stichler; W. Ambach, H. Eisner, K. Pessl, 1971. Study of the discharge of Alpine glaciers by means of environmental isotopes and dye tracers; *Z. Gletscherkde. Glazialgeologie* **7**, 79–102.
- Friedman, L., G. I. Smith, 1970. Deuterium content of snow cores from Sierra Nevada area; *Science* **169**, 467–470.
- Hoinkes, H., 1970. Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern; *Z. Gletscherkde. Glazialgeologie* **6**, 37–90.
- Moser, H., W. Stichler, 1970. Deuterium measurements on snow samples from the Alps; In: *Isotope Hydrology 1970*, IAEA, Wien 1970, 43–55.
- Moser, H., W. Stichler, 1971. Die Verwendung des Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalts bei hydrologischen Untersuchungen; *Geologica Bavarica* **64**, 7–35.
- Rauert, W., 1971. Über Messungen von Tritium und Kohlenstoff-14 bei hydrologischen Untersuchungen; *Geologica Bavarica* **64**, 36–74.

Manuskript eingegangen am 18. September 1972.

Anschriften der Verfasser: Prof. Dr. Heribert Moser, Dipl.-Phys. Werner Rauert, Dipl.-Phys. Willibald Stichler: Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH.
Luisenstraße 37, D-8000 München 2.
Prof. Dr. Walter Ambach, Dr. Heinrich Eisner:
Physikalisches Institut der Universität Innsbruck,
Schöpfstraße 41, A-6020 Innsbruck.