

MARKIERUNGSVERSUCHE AM INNEREN ABFLUSS-SYSTEM DES HINTEREISFERNERS (ÖTZTALER ALPEN)

Von W. AMBACH, Innsbruck, H. BEHRENS, H. BERGMANN und H. MOSER, München

Mit 3 Abbildungen

ZUSAMMENFASSUNG

Um Aussagen über die Abfluvvorgänge des Schmelzwassers im Gletscher zu erhalten, wurden Zuflüsse von Mühlen und Spalten im Ablationsgebiet des Hintereisferners mit Fluoreszenzfarbstoffen markiert und deren Wiederaustritt am Gletschertor verfolgt. Dabei wurde ein Meßverfahren angewandt, mit dem verschiedene Fluoreszenzfarbstoffe in einer Wasserprobe nebeneinander qualitativ und quantitativ bestimmt werden können. Die mittleren Fließgeschwindigkeiten ergaben sich in der Größenordnung von 0,5 m/sec, wobei eine deutliche Abhängigkeit von der Wasserzufuhr zur Eingabestelle feststellbar war. Die Breite der Tracerwolke, gemessen zwischen 10% der Maximalkonzentration, war beim Austritt maximal ein Drittel der Fließzeit von der Eingabe bis zum Austritt. Die Konzentration-Zeit-Verteilung des Tracers an der Meßstelle ergab bei den bisher durchgeführten Versuchen keine Hinweise für das Vorhandensein von größeren wassergefüllten Hohlräumen im Fließweg des Tracers.

TRACING EXPERIMENTS IN THE DISCHARGE SYSTEM OF HINTEREISFERNER

SUMMARY:

In order to investigate the processes of discharge of meltwater in the glacier, runoff disappearing in moulins and crevasses was labelled with fluorescent dyes which was monitored in the stream in front of the terminus. A method was applied that distinguishes quantitatively as well as qualitatively between different kinds of fluorescent dyes in the discharge. Average flow speed was of the order of 0.5 m/sec, a significant dependence on discharge volume of flow speed being detectable. At the outlet the width of the tracer-cloud, as measured between the respective ten-percent-levels of maximum concentration, was one third, at the most, of the time of passage through the ice body. From the dispersion curve of dye concentration at the measuring site there was no indication for the existence of larger, waterfilled cavities in the path of the tracer flow.

EXPERIENCES DE TRACER DANS LE SYSTEME D'ÉCOULEMENT DU HINTEREISFERNER (ÖTZTAL ALPES)

RESUME:

Afin de recevoir des indications précises concernant le cours d'écoulement des eaux de la fonte dans le glacier, des affluents de moulins et crevasses dans la région d'ablation du Hintereisferner ont été tracés de colorants fluorescents et leur réapparition à la sortie du torrent glaciaire a été observée. Le procédé de mesure était de telle façon, qu'il était possible de déterminer des différents colorants fluorescents dans un échantillon d'eau en même temps qualitativement et quantitativement. La vitesse moyenne d'écoulement se montait à 0,5 m/sec; la dépendance de l'adduction de l'eau à l'endroit d'adduction était constatable. La largeur des traceurs, mesurée entre 10% de la concentration maximale, se montait à la sortie, au maximum, d'un tiers du temps d'écoulement de l'adduction jusqu'à la sortie. La variation de la concentration des traceurs à l'endroit de jaugeage ne donnait, dans le cas des expériences faites, aucune indication concernant la présence de plus grandes cavités remplies d'eau dans l'écoulement des traceurs.

I. EINLEITUNG

Über das Abflußsystem des Schmelzwassers innerhalb eines Gletschers sind bisher nur wenige quantitative Studien bekannt geworden. Erste Hinweise über Abflußzeiten des Schmelzwassers im Hintereisferner (Ötztaler Alpen) wurden von H. Lang (1966) gegeben.

In letzter Zeit hat Th. Stenborg (1968, 1969, 1970) das innere Abflußsystem zweier Gletscher in Nordschweden (Mikkaglaciären, Storglaciären) nach einer vorangegangenen genauen topographischen Aufnahme des oberflächlichen Abflußsystems (Spalten, Gletschermühlen u. ä.) durch Salzmarkierungen untersucht. Er fand dabei in beiden Gletscherzungen je zwei weitgehend getrennte Abflußsysteme, die beiderseits der Mittellinie der Gletscher verlaufen. Als mittlere Fließgeschwindigkeit in der Luftliniendistanz zwischen Impfstelle und Meßstelle ergab sich etwa 0,5–0,7 m/sec. Auch aus den tageszeitlichen Variationen des Tritiumgehalts in den Gletscherbächen des Kesselwand- und Hintereisferners (Ötztaler Alpen) konnte geschlossen werden, daß der Abfluß des Schmelzwassers aus dem Ablationsgebiet bei starker Ablation schnell vor sich geht (H. Behrens u. a., 1971): Minimalwerte des Tritiumgehalts im Abfluß, bedingt durch hohe Schmelzwasseranteile aus altem Gletschereis treten nur mit geringer Verzögerung gegenüber dem Zeitpunkt maximaler Ablationsrate auf, was auf ein schnelles Abfließen des Eiswassers ohne Reservoirbildung und sonstige Retention hindeutet.

Neuerdings hat sich H. Röthlisberger (1972) aus hydraulischer Sicht mit dem Abflußsystem von Wasser in einem Eiskörper befaßt und mehrere Möglichkeiten der Ausbildung von Abflußsystemen im Eiskörper theoretisch diskutiert. Dabei zeigte sich, daß der Abfluß auch durch Röhren innerhalb des Eises erfolgen kann und somit nicht notwendig lange Strecken am Gletscherbett zurücklegen muß.

Im Sommer 1971 wurden von uns am Hintereisferner (Ötztaler Alpen) Untersuchungen über Fließzeiten und Fließverhalten des Wassers im Gletscher mit Fluoreszenzfarbstoffen begonnen, um aus charakteristischen Unterschieden der Konzentration-Zeit-Verteilung der Tracerwolke und aus den Fließzeiten auf die Struktur des inneren Abflußsystems schließen zu können. Wegen des einfachen Aufbaus des Hintereisferners, eines Talgletschers mit nur einem Ausfluß am Gletschertor, waren übersichtliche Verhältnisse zu erwarten. Bei den Messungen wurde das an der Oberfläche in Gletschermühlen und Spalten eintretende Wasser, sowie Bäche von seitlichen Talhängen mit Fluoreszenzfarbstoffen markiert und der Wiederaustritt am Gletschertor verfolgt. Da aus den bisher vorliegenden Untersuchungen keine unmittelbaren Anhaltspunkte für den zeitlichen Verlauf des Tracerabflusses gegeben waren, wurden zunächst Zuläufe von Gletschermühlen in relativ kurzer Entfernung vom Gletschertor markiert. Nach Auswertung der ersten Proben wurde das Versuchsgebiet am Gletscher ausgedehnt (1. Meßreihe Juli 1971, 2. Meßreihe September 1971).

2. METHODE

Zur Markierung wurden Fluoreszenzfarbstoffe verwendet, weil diese sich wegen ihrer höheren Nachweisempfindlichkeit besser als die sonst häufig verwendeten Salze eignen. Die dadurch relativ geringen notwendigen Tracermengen bringen neben dem kleineren Transportgewicht den Vorteil, daß die natürliche Strömung nicht durch Dichteänderungen infolge der Tracerzugabe gestört wird. Weiterhin ist es bei geeigneter Auswahl von Fluoreszenzfarbstoffen möglich, diese beim Nachweis durch ihre

spektralen Eigenschaften so zu unterscheiden, daß mehrere dieser Tracer nebeneinander ohne gegenseitige Störung in einem Markierungsversuch eingesetzt werden können. Bei der vorliegenden Untersuchung wurden drei Fluoreszenzfarbstoffe (Uranin, Sulforhodamin G extra und Rhodamin WT) zur Markierung verwendet¹. Zum Nachweis wurde ein spezielles Meßverfahren angewandt, bei dem alle eingesetzten Farbstoffe nebeneinander in einer einzigen Probe mit einem Fluoreszenzspektrometer qualitativ und quantitativ bestimmt werden können (H. Behrens, 1971). Die Probennahmestelle war ca. 300 m unterhalb des Gletschertors eingerichtet, damit auf dieser Fließstrecke des Gletscherbachs im offenen Gerinne der Gesamtabfluß durch eine zusätzliche Impfung nach der Tracerverdünnungsmethode ermittelt werden konnte; diese Messung ist zur Bestimmung der am Gletschertor ausgetretenen Tracermenge notwendig. An der Probennahmestelle wurden über definierte Zeitintervalle Sammelproben entnommen (H. Behrens u. a. 1971) und so der Durchgang der Tracerwolke durch eine Stufenfunktion erfaßt. In Einzelfällen wurden zusätzlich in kurzen Zeitabständen momentane Proben entnommen, um einen besseren Einblick in den tatsächlichen Verlauf der Konzentration-Zeit-Kurve zu gewinnen. Die Messung der in Plastikflaschen abgefüllten Proben erfolgte im Labor, die zur Messung notwendige Probenmenge beträgt ca. 5 ml.

3. ERGEBNISSE

Die Tracer traten bei allen Impfungen relativ rasch wieder am Gletschertor aus. Die Durchgangskurven zeigen einen steilen Anstieg ohne Vorläufer und einen zügigen Abfall nach dem Konzentrationsmaximum. Die Zeitdauer des Tracerdurchgangs, gemessen vom ersten Nachweis bis zum Zeitpunkt in dem 90% der nachgewiesenen Tracermenge ausgetreten sind, ergibt sich in allen Fällen zu etwa einem Drittel der Fließzeit von der Eingabestelle bis zur Stelle der Probenahme. Im Anschluß an den Hauptdurchgang treten zumeist über längere Zeit noch Tracerspuren auf, besonders bei den Markierungen von entfernt gelegenen Eingabestellen mit geringem Wasserzufluß. Zum Teil lassen sich in den Kurvenschwänzen noch Nebenmaxima feststellen, die auf Verzweigungen von Abflüssen mit unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten und nachheriger Wiedervereinigung schließen lassen.

Tabelle 1 enthält Angaben über die Art und Menge der verwendeten Tracer, die Fließzeiten und die ausgebrachten Mengen. Aus dem Ergebnis, daß nicht 100% der Tracermenge wieder austritt, können hier noch keine Schlüsse gezogen werden. Die Lage der einzelnen Eingabestellen ist aus Abb. 1 ersichtlich.

Die Tracerkonzentration wurde an Sammelproben gemessen, die für bestimmte Zeitintervalle (meist 10 Minuten) an der ca. 300 m unterhalb des Gletschertores gele-

¹ Daten über die von uns verwendeten Fluoreszenzfarbstoffe:

1. Uranin A extra konz.; wasserlösliches Pulver.
Hersteller: Badische Anilin- & Soda-Fabrik AG
Lieferant: Brauns-Heitmann GmbH & Co. KG, D-8202 Bad Aibling, Postfach 20.
2. Sulforhodamin G extra; in Wasser suspendierbares Pulver, das sich bei höherer Verdünnung vollständig löst.
Hersteller und Lieferant wie unter 1.
3. Rhodamin WT: 20%ige wässrige Lösung.
Hersteller: E. I. Dupont de Nemours & Co. Inc., Wilmington, Del., USA.
Lieferant: Du Pont de Nemours (Belgium), Avenue Louise 95, B-1050 Brussels (Belgien).

Tab. 1: Angaben zu den Tracer-Versuchen am Hintereisferner.

Impfung Nr.	Impfstelle	Zeitpunkt der Impfung	Indikator	Menge g	Fließzeit bis zum ersten Auftreten (min)	Geschwindigkeit m/sec	Geschätzter Zufluß zur Mühle l/sec	Ausgebrachte Menge % ¹
1	Untere Mühle S	24. 7. 71/11 ⁰⁰	Sulforhodamin G extra	20	25—30	ca. 0,55	100	93
2	A	25. 7. 71/ 9 ³⁰	Sulforhodamin G extra	10	25	0,53	100	83
3		26. 7. 71/11 ⁰⁰	Uranin extra	50	25—30	ca. 0,55	100	> 70 ²
4		10. 9. 71/ 9 ⁵⁵	Uranin	50	70—75	0,19	4	ca. 80
5	B	10. 9. 71/10 ⁰⁰	Rhodamin WT	100	70—75	0,21	4	ca. 80
6	Mittlere Mühle	24. 7. 71/11 ⁰⁰	Uranin	50	105	0,26	25	81
7		25. 7. 71/10 ⁰⁰	Uranin	50	70	0,39	25	80
8	C	25. 7. 71/14 ³⁰	Uranin	50	50	0,26	25	80
9		10. 9. 71/10 ³⁵	Rhodamin WT	200	250	< 0,12	1	³
10	Obere Mühle LT	25. 7. 71/10 ³⁰	Sulforhodamin G extra	20	100	0,42	10	74
11	D	25. 7. 71/15 ⁰⁰	Sulforhodamin G extra	20	75	0,53	10	68
12		10. 9. 71/11 ¹⁵	Uranin	100	90	0,44	20	51
13	E	26. 7. 71/11 ⁰⁰	Uranin	200	60—65	0,59	1	76
14		10. 9. 71/12 ⁵⁰	Uranin	150	> 130	—	3	⁴
15	F	26. 7. 71/11 ³⁰	Sulforhodamin G extra	30	50—55	0,76	10	72
16	G	Mühle bei P 42	Uranin	50	100	0,47	50	ca. 70
17	H	Seitenbäche bei P 90	Sulforhodamin G extra	—	105	0,65	50—200	⁵
18	I	Abfluß Stations-gletscher	Sulforhodamin G extra	50	130	0,53	40	ca. 60
19	K	Stationsbach	Rhodamin WT	375	> 235	—	—	⁴

¹ Tracermenge im Hauptdurchgang ohne den Kurven-„schwanz“. ² Tracerdurchgang setzt vor Beginn der Probenahme ein.
³ Probenahme vor Ende des Tracerdurchgangs beendet. ⁴ Tracerdurchgang innerhalb der Probenahmezeit nicht nachgewiesen.
⁵ Tracermenge nicht mehr bekannt.

HINTEREISFERNER 1967

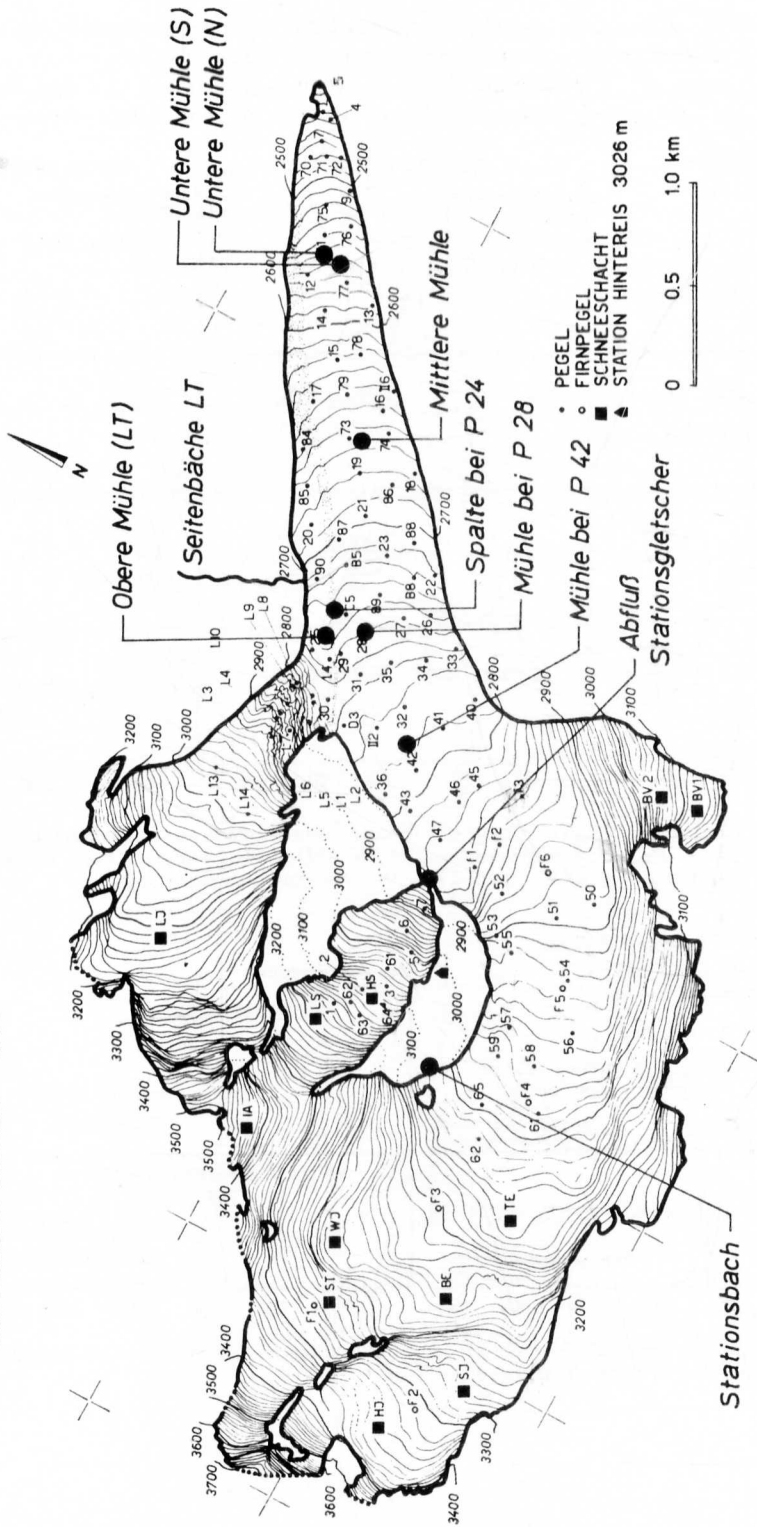


Abb. 1: Lageplan der Impfstellen am Hintereisferner (Ötztaler Alpen). Pegelplan aus H. Hoinkes, 1970.

genen Meßstelle entnommen wurden. Die Messungen ergaben die in Abb. 2a und 2b dargestellten stufenförmigen Konzentration-Zeit-Kurven.

Zur Überprüfung, ob der Verlauf dieser Kurven allein durch die longitudinale Dispersion des Tracers erklärt werden kann, wurden diese mit dem theoretisch zu

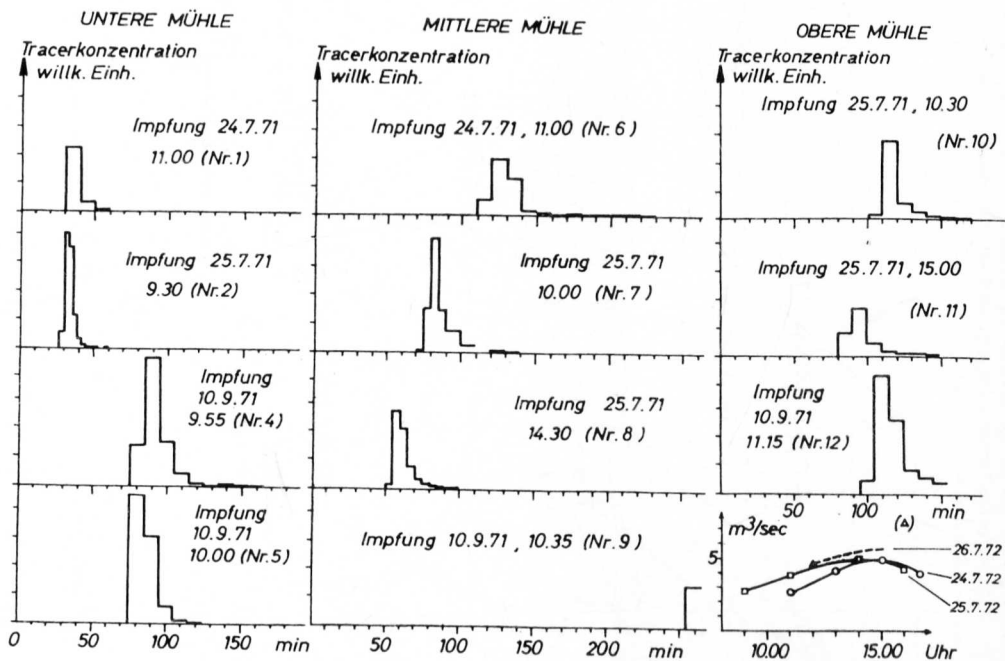


Abb. 2a: Konzentration-Zeit-Verteilung der Tracer beim Austritt am Gletschertor. Zeit nach Tracereingabe. Das Diagramm rechts unten gibt die Abflußwerte (m^3/sec) beim Gletschertor, die richtigen Meßdaten sind: 24.–26. 7. 1971. Weitere Angaben siehe Tab. 1.

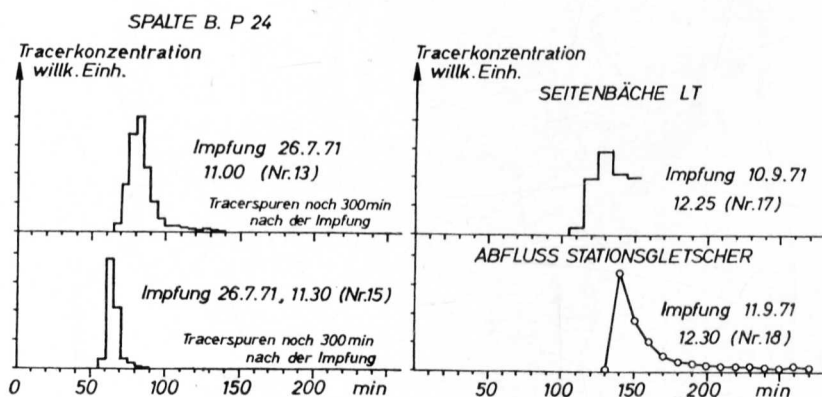


Abb. 2b: Konzentration-Zeit-Verteilung der Tracer beim Austritt am Gletschertor. Zeit nach Tracereingabe. Weitere Angaben siehe Tab. 1.

erwartenden Konzentrationsverlauf verglichen: Dieser ergibt sich bei momentaner Impfung einer bestimmten Tracermenge im Abstand x_0 der Meßstelle von der Impfstelle zu

$$c = \frac{A}{\sqrt{4 \pi D t}} \exp \left[\frac{-(x_0 - vt)^2}{4 D t} \right]$$

wobei A ein der Tracermenge proportionaler Faktor, c die Tracerkonzentration, t die Fließzeit längs der Strecke x_0 , v die mittlere Fließgeschwindigkeit und D der longitudinale Dispersionskoeffizient bedeuten (s. z. B. G. I. Taylor, 1953). Nach dieser Gleichung ergibt sich für die Konzentration-Zeit-Kurve an der Meßstelle ein unsymmetrischer Verlauf: Bei Zunahme der Konzentration steigt die Kurve steiler an als sie bei Konzentrationsabnahme abfällt. Alle gemessenen Kurven weisen ebenfalls einen unsymmetrischen Verlauf auf und stimmen so mit den aus obiger Gleichung theoretisch ermittelten Kurven qualitativ überein. Die gemessenen Kurven sind jedoch nicht differenziert genug, um systematische Abweichungen vom theoretischen Kurvenverlauf eindeutig erkennbar zu machen. Die Auswertung einer am gleichen Gletscherbach gemessenen Konzentration-Zeit-Kurve (H. Behrens u. a. 1972) hat

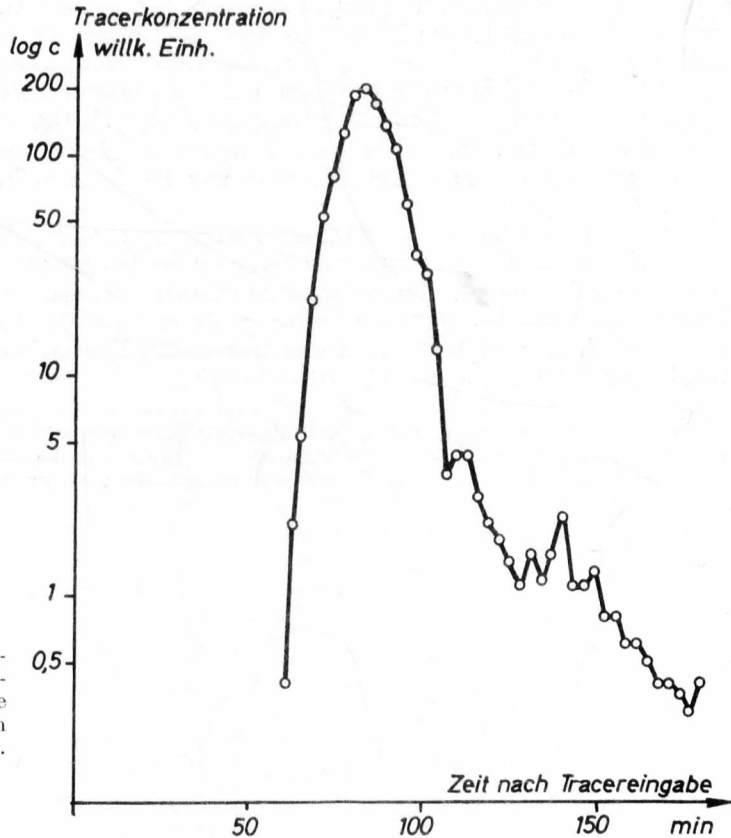


Abb. 3: Konzentration-Zeit-Verteilung bei momentaner Probenahme im logarithmischen Maßstab; Impfung Nr. 4, vgl. Abb. 2a.

ergeben, daß die Konzentration-Zeit-Funktion der obigen Gleichung auch in offenen Gerinnen den tatsächlich auftretenden unsymmetrischen Kurvenverlauf nicht zur Gänze zu erfassen vermag. Es findet nämlich zwischen der Strömung und den Ablösungszonen der durchflossenen Gerinne ein Traceraustausch statt, der eine Veränderung des theoretischen Kurvenverlaufes, vor allem eine verzögerte Konzentrationsabnahme (längere Kurvenschwänze) bewirkt.

Abb. 3 zeigt eine durch Entnahme von Einzelproben gemessene Konzentration-Zeit-Kurve, die das Abflußsystem des Gletschers passiert hat. Diese Kurve weist zwar für den Hauptdurchgang des Tracers ein eindeutiges Maximum auf, weicht jedoch an mehreren Stellen deutlich vom einfachen Verlauf der theoretischen Kurve ab. Die in den Abb. 2 und 3 erkennbaren Nebenmaxima liegen weit über der Nachweisgrenze die i. a. noch etwa 0,2% der Tracerkonzentration im Maximum der Durchgangskurve erfaßt. Es kann daher angenommen werden, daß sich die gemessene Kurve aus mehreren einfachen Teilfunktionen zusammensetzt, die auf eine Gliederung der Fließwege innerhalb des Gletschers schließen lassen.

Die aus der Luftliniendistanz zwischen Impf- und Meßstelle berechneten Fließgeschwindigkeiten erreichen Werte bis 0,7 m/sec in Übereinstimmung mit Ergebnissen auf skandinavischen Gletschern (Th. Stenborg, 1969), wobei eine starke Abhängigkeit von der Wasserführung des Zuflusses auftritt. So ergeben sich bei der „Unteren Mühle“ und „Mittleren Mühle“ im September wegen des wesentlich geringeren Zuflusses gegenüber Juli (etwa $\frac{1}{25}$) auch kleinere Fließgeschwindigkeiten (Abb. 2a). Die „Obere Mühle“ hingegen zeigte im Juli und September vergleichbare Wasserführung und damit auch ähnliche Fließzeiten (Abb. 2a). Die Zunahme der Wasserführung vom 24. zum 25. Juli 1971 zum Zeitpunkt der Tracereingabe in die „Mittlere Mühle“ ergibt eine systematische Verschiebung der Tracerwolke zu kürzeren Fließzeiten (Abb. 2a).

Zusammenfassend haben die Markierungsversuche ergeben, daß ein Großteil des Farbstoffes in verhältnismäßig kurzer Zeit nach der Impfung wieder am Gletschertor zum Vorschein kommt. Daraus kann geschlossen werden, daß am Fließweg des Tracers innerhalb des Gletschers keine größeren wassergefüllten Hohlräume vorhanden sind. Der Verlauf der Konzentration-Zeit-Kurven weist jedoch auf eine Gliederung des Abflußsystems im Gletscher hin.

Die Autoren danken der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, für die finanzielle Unterstützung und dem Bundesministerium für Inneres für die Übernahme von Materialtransporten. Allen Helfern bei den Feldarbeiten sei ebenfalls der wärmste Dank ausgesprochen.

LITERATUR

- Behrens, H., 1971: Untersuchungen zum quantitativen Nachweis von Fluoreszenzfarbstoffen bei ihrer Anwendung als hydrologische Markierungsstoffe. — *Geol. Bav.* Bd. 64, 120–131.
- 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. Gletscherkunde u. Glazialgeologie*, VII (1–2), 79–102.
- Behrens, H., H. Moser, W. Rauert, W. Ambach, 1972: Abflußmessungen in einem vergletscherten Einzugsgebiet mit Hilfe der Indikatorverdünnungsmethode. — Zur Veröffentlichung vorbereitet.
- Hoinkes, H., 1970: Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. Ergebnisse der Meßreihe Hintereisferner (Öztaler Alpen) 1953–1968; *Z. Gletscherkunde u. Glazialgeologie*, VI, 37–90.
- Lang, H., 1966: Hydrometeorologische Ergebnisse aus Abflußmessungen im Bereich des Hintereisferners (Öztaler Alpen) in den Jahren 1957–59. — *Arch. Meteorologie, Geophysik, Bioklimatologie*, Ser. B, 14, 280–302.
- Röthlisberger, H., 1972: Water pressure in intra- and subglacial channels. — *J. Glaciology*, 11, 177–203.
- Stenborg, Th., 1968: Glacier drainage connected with ice structures. — *Geografiska Annaler* 50 A, 1, 25–53.
- Stenborg, Th., 1969: Studies of the internal drainage of glaciers. — *Geografiska Annaler* 51 A, 1–2, 13–41.
- Stenborg, Th., 1970: Studies of the hydrological characteristics of glaciers. — *Meddelanden från Uppsala Universitets Geografiska Institutioner Ser. A*, Nr. 245, Uppsala 1970.
- Taylor, G. L., 1953: Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube. — *Proc. Roy. Soc.* A 219, 186–203.

Manuskript eingegangen am 3. August 1972.

Anschriften der Verfasser:

Univ.-Prof. Dr. Walter Ambach, Physikalisches Institut der Universität Innsbruck, Schöpfstraße 41, A-6020 Innsbruck

Dipl.-Ing. Horst Behrens, Dr. Heinz Bergmann, Prof. Dr. Heribert Moser, Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, Luisenstraße 37, D-8000 München 2