

Experimente mit fluoreszierenden Tracern zur Erforschung der Diffusionsverhältnisse im Zürichsee

VON BEAT WERTHEMANN†

Zusammenfassung

Im September 1978 wurden vom Geographischen Institut der Universität Bern in Zusammenarbeit mit der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) im Zürichsee Versuche zur Erforschung der Diffusionsverhältnisse durchgeführt. Ein neues Verfahren mit fluoreszierenden Tracern, welches im Zürichsee erstmals zur Anwendung gelangte, wird kurz erläutert. Nach der Darstellung der Versuchsergebnisse wird auf einige weitere Anwendungsgebiete und Einsatzmöglichkeiten für fluoreszierende Tracer in der Limnologie hingewiesen.

1. Einleitung

Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes «Grundlegende Probleme des Schweizerischen Wasserhaushaltes» wurden im August und September 1978 im Zürichsee intensive Forschungsarbeiten durchgeführt. Untersuchungen der Schichtungs- und Strömungsverhältnisse des Zürichsees in Abhängigkeit meteorologischer Faktoren, wie auch Untersuchungen der Einflüsse von Transportvorgängen auf den Nährstoffhaushalt, bildeten das Schwergewicht der Forschungsarbeiten.

In Zusammenarbeit mit der Projektleitung beteiligte sich das Geographische Institut der Universität Bern mit einem Tracerversuch zur Erforschung der Diffusionsverhältnisse an diesem Projekt. Der Versuch wurde anfangs September parallel zu den Strömungsuntersuchungen der VAW durchgeführt. Er ermöglichte Angaben über räumliche und zeitliche Konzentrationsänderungen eines in den See eingebrachten künstlichen Tracers.

2. Problemstellung und Zielsetzung

Unseres Wissens sind bisher in der Limnologie keine Experimente mit fluoreszierenden Tracern durchgeführt worden, welche Angaben über Vermischungsverhältnisse in Seen liefern konnten. Aus Berechnungen der VAW an Ein- und Mehrschichtmodellen kennen wir jedoch die Grössenordnungen horizontaler und vertikaler Diffusionskoeffizienten. Bei unserem Versuch galt es daher in erster Linie, Diffusionskoeffizienten experimentell zu ermitteln, um Vergleichsmöglichkeiten zu Modellberechnungen zu schaffen.

Die Ziele dieses Versuches lauteten deshalb wie folgt:

- Die Diffusionsverhältnisse im Metalimnion des Zürichsees sollen im Raume Männedorf–Wädenswil untersucht werden. Dieses Gebiet ist von besonderem Interesse, da es sich um die Übergangszone vom oberen flachen Seeteil ins tiefere Seebecken handelt.
- Aus mehreren Abgrenzungen der markierten metalimnischen Wassermassen sollen die Diffusionskoeffizienten ermittelt werden.
- Mit Hilfe experimentell ermittelter Diffusionskoeffizienten sollen mathematische Modelle geeicht bzw. überprüft werden.

3. Methodik der fluoreszierenden Tracer in der Limnologie

Die Arbeiten von LEIBUNDGUT und HIRSIG (1977) haben gezeigt, dass sich fluoreszierende Tracer ausgezeichnet als Markierstoffe in der Limnologie eignen.

Das Grundprinzip der Markierversuche besteht darin, dass ein begrenzter Wasserkörper mit einem Tracer markiert wird. In situ können sowohl die räumlichen als auch die zeitlichen Konzentrationsänderungen dieser markierten Wassermassen beobachtet und registriert werden. Dadurch lassen sich die effektiven Bewegungsabläufe eines begrenzten und somit definierten Wasserkörpers verfolgen.

1978 wurde ein neues Messverfahren in der Anwendung von Tracern zur Strömungsmessung erstmals im Zürichsee angewendet. Zur Beobachtung des Tracers im See verwendeten wir das In-situ-Unterwasserfluorometer VARIOSENS. Es handelt sich hierbei um ein Filterfluorometer in druckfestem und wasserdichtem Gehäuse. Dadurch kann – anstelle einer Wasserprobeentnahme mit anschliessender Auswertung im Labor – der Unterwasserfluorometer direkt in die gewünschte Wassertiefe des Sees gebracht werden. Über ein elektrisches Kabel werden die entsprechenden Tracerkonzentrationen in Form eines Stromstärkesignales an Bord des Forschungsschiffes übermittelt. Dieses Signal wird gleichzeitig mit der jeweiligen Wassertiefe der Sonde auf einem Schreiber registriert.

Auf diese Weise können beliebige Vertikal- und geschleppte Horizontalprofile aufgenommen werden. Da die Resultate direkt verfügbar sind, kann

der weitere Versuchsablauf ständig den neusten Begebenheiten angepasst werden. Die Bootspositionen der entsprechenden Profilverpunkte werden mit einem Sextanten oder Theodoliten eingemessen. Dadurch ist jeder Profilverpunkt im See nach Raum, Zeit und Konzentration des Tracers definiert.

4. Diffusionsversuch im Zürichsee

4.1. Durchführung des Versuches

Vorbereitungen:

Vor der Einspeisung des Tracers ermittelten wir anhand eines Temperatur- und Blindwertprofils (Abb. 1) sowohl die Lage des Metalimnions als auch die Werte der natürlichen Fluoreszenz des Seewassers. Als Einspeisungstiefe wählten wir die Mitte der Sprungschicht; d. h. eine Wassertiefe von 10 m.

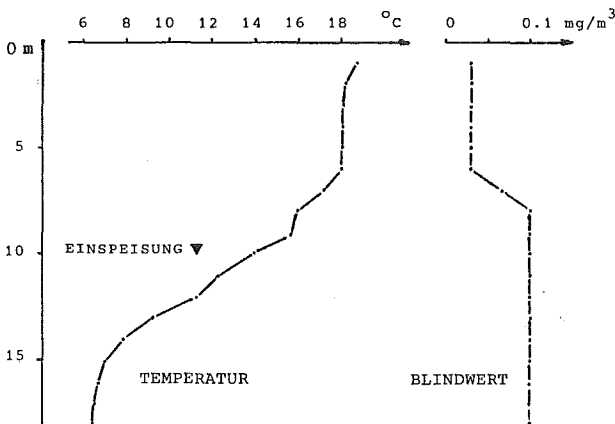


Abb. 1 Temperatur- und Blindwertprofil an der Einspeisestelle (694 000/233 500). Zürichsee, 5. Sept. 1978, 16.30 Uhr.

Einspeisung des Tracers:

Die Einspeisung von 4 kg Fluoresceinum natricum in 10 m Wassertiefe erfolgte am 5.9.1978 um 17 Uhr. In Abb. 3 wird die Einspeisestelle mit der Signatur ▼ gekennzeichnet.

Profilaufnahmen mit dem Unterwasserfluorometer VARIOSENS:

Mit dem Forschungsschiff der Landeshydrologie in Bern, der «Joseph Epper», wurden am 6. und 7.9.1978 zu drei verschiedenen Zeitpunkten zahlreiche Horizontal- und Vertikalprofile aufgenommen. Diese dienten zur Abgrenzung der mit Fluoresceinum natricum markierten Wassermassen. Die Positionsbestimmung der jeweiligen Messpunkte erfolgte mit einem Sextanten.

4.2. Versuchsergebnisse

(Erläuterungen zu den Abb. 3–5).

Erste Abgrenzung vom 6.9. um 10.30 Uhr:

Von der Einspeisung am 5.9. um 17 Uhr bis zur ersten Abgrenzung am 6.9. um 10.30 Uhr hatte sich die «Tracerwolke» nur mässig ausgedehnt. Auch hatte sie sich nicht wesentlich von der Einspeisestelle entfernt.

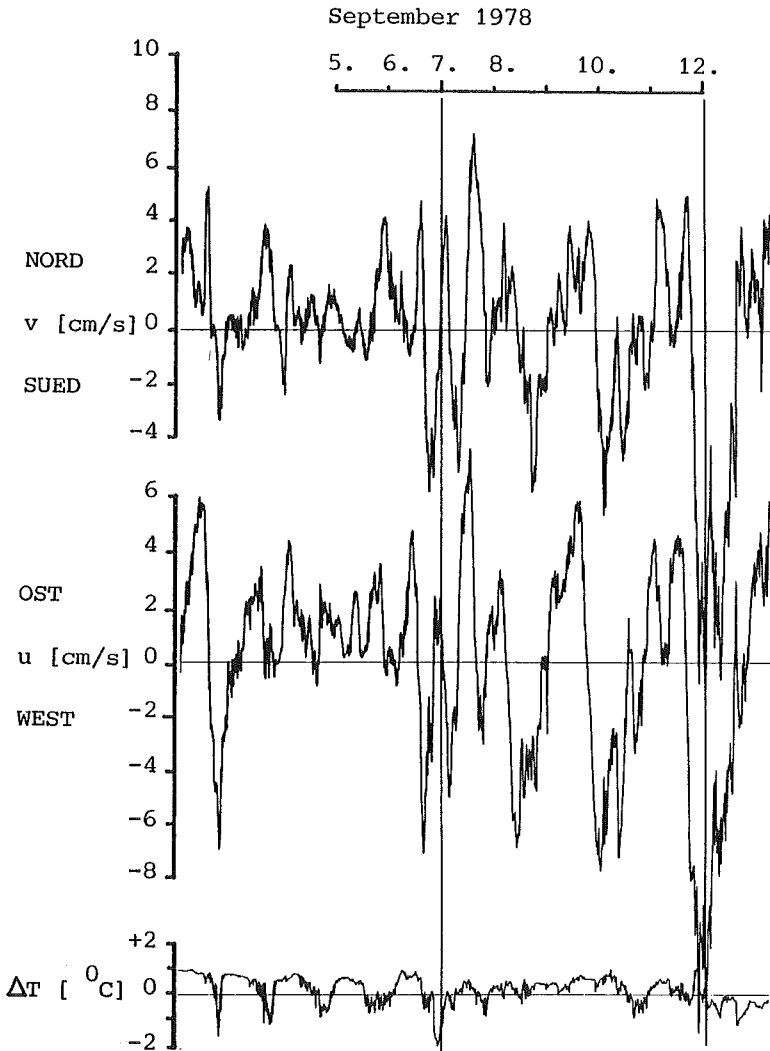


Abb. 2 Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Zürichsee (Aug./Sept. 1978). Ausschnitt aus den Registrierungen der Messkette 9 der VAW; Tiefe 8 m.

Zweite Abgrenzung am 6.9. um 15.00 Uhr:

Zwischen 10.30 und 15.00 Uhr hatte sich die «Wolke» mit relativ grosser Geschwindigkeit seeaufwärts verschoben. Durch die Abgrenzung der Fronten der markierten Wassermassen erhält man eine Geschwindigkeit von rund 130 m/Std. Vergleichen wir dazu die Strömungsaufzeichnungen der Messkette 9 in dieser Zeitspanne (Abb. 2), so stellen wir eine Änderung in der Strömungsgeschwindigkeit und -richtung fest (Spitzenwert ca. 145 m/Std.).

Dritte Abgrenzung am 7.9. von 12–15 Uhr:

Zur Abgrenzung der am 7.9. bereits über 1,5 km langen und mehrere hundert Meter breiten «Tracerwolke» wurden rund drei Stunden benötigt. Abb. 4 stellt deshalb nicht eine Momentaufnahme der Verhältnisse, sondern das über drei Stunden integrierte Bild dar.

Die Fläche hatte seit der letzten Abgrenzung gewaltig zugenommen und die Form sich wesentlich verändert. Über den Strömungsablauf in der Zwischenzeit gibt wiederum Abb. 2 Auskunft. Der Spitzenwert (in nordöstlicher Richtung) um ca. 15 Uhr kommt in der Form der «Tracerwolke» deutlich zum Ausdruck.

Ganz augenfällig und anhand der Form der markierten Wassermassen bestens ersichtlich ist der Einfluss der Seebodentopographie auf das Strömungsgeschehen. Was den südlichen Teil der «Wolke» betrifft, verlaufen die Grenzlinien praktisch parallel zu den Tiefenlinien. Im Norden hatten die markierten Wassermassen die inselförmige Erhöhung des Seegrundes (Punkt 357.9) praktisch umgangen und sich dann über die Tiefenrinne bei Männedorf in Richtung nördliches Seeufer hin bewegt. Dieser gewaltige Einfluss der Seetopographie erstaunt vor allem deshalb, weil die markierten Wassermassen des Metalimnions rund 30–40 m über dem Seegrund lagen.

Aus der Darstellung der vertikalen Verhältnisse in Abb. 5 wird ersichtlich, dass die «Tracerwolke» gegenüber dem Vortag etwas tiefer lag und ihre Mächtigkeit auch leicht zugenommen hatte. In der Tiefe von ca. 11,5 m konnte eine 25 cm mächtige Zone beobachtet werden, in welcher praktisch kein Fluoreszenzsignal registriert wurde. Es wird vermutet, dass dieser Effekt auf eine biologische oder biochemische Fluoreszenzlöschung zurückzuführen ist. Erst weitere Untersuchungen in dieser Richtung könnten dafür eine eindeutige Erklärung liefern.

Deutlich kommt im Profilschnitt AB auch eine Wellenbewegung zum Ausdruck. Die «Wellenkämme» der Darstellung im Aufriss (Abb. 5) stimmen mit den Ausbuchtungen nach SW (Darstellung der horizontalen Verhältnisse in Abb. 4) prinzipiell überein.

Berechnung der Diffusionskoeffizienten:

Mit der Berechnung der horizontalen Diffusionskoeffizienten nach der Methode von FICK und JOSEPH + SENDNER kann es sich nur um eine erste Abschätzung der Werte handeln. Weitere Berechnungen seitens der VAW sind jedoch vorgesehen.

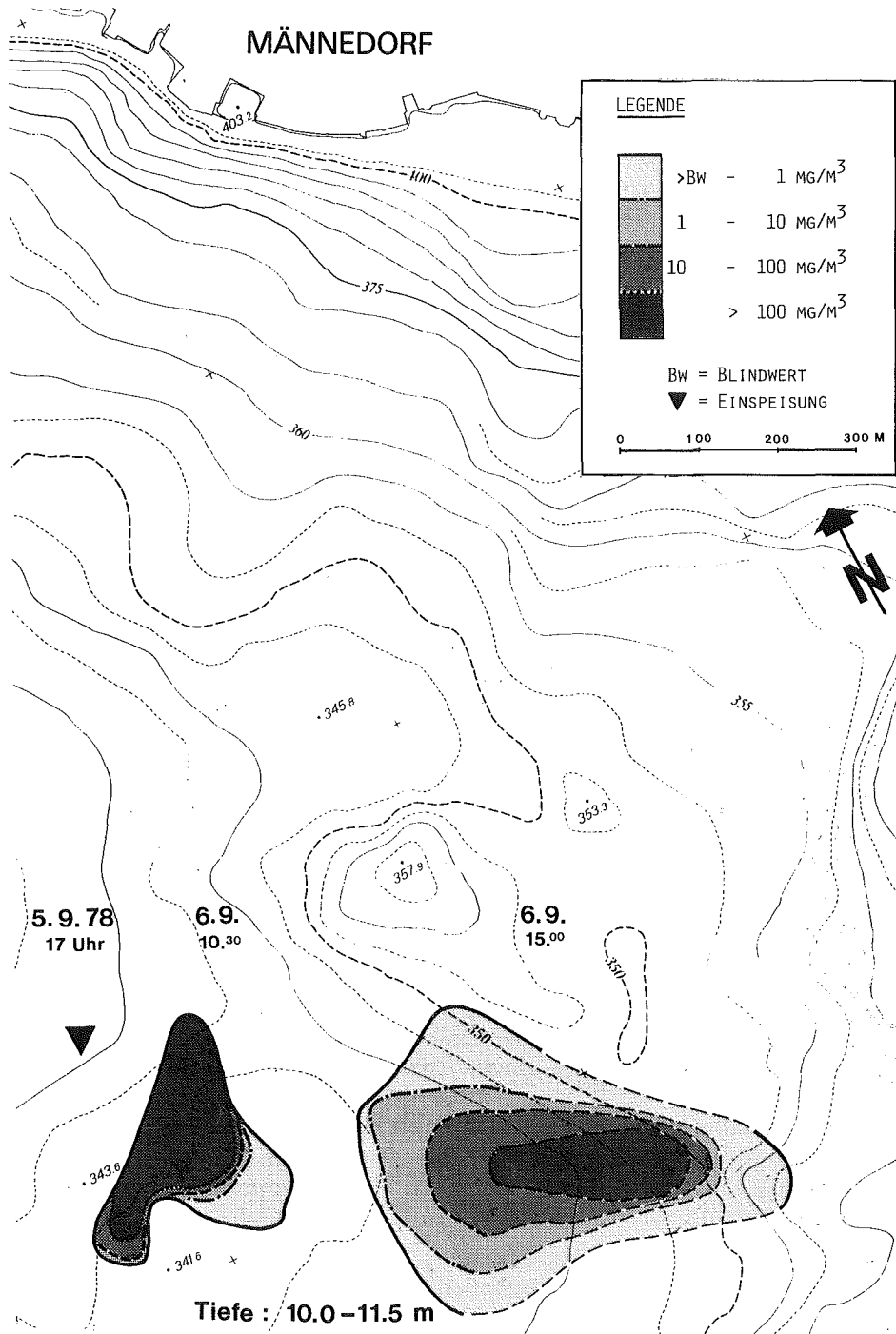


Abb. 3 Zürichsee. Ort der Einspeisung am 5. Sept. 1978 und Abgrenzungen der markierten Wassermassen am 7. Sept. 1978 um 10.30 und 15.00 Uhr.

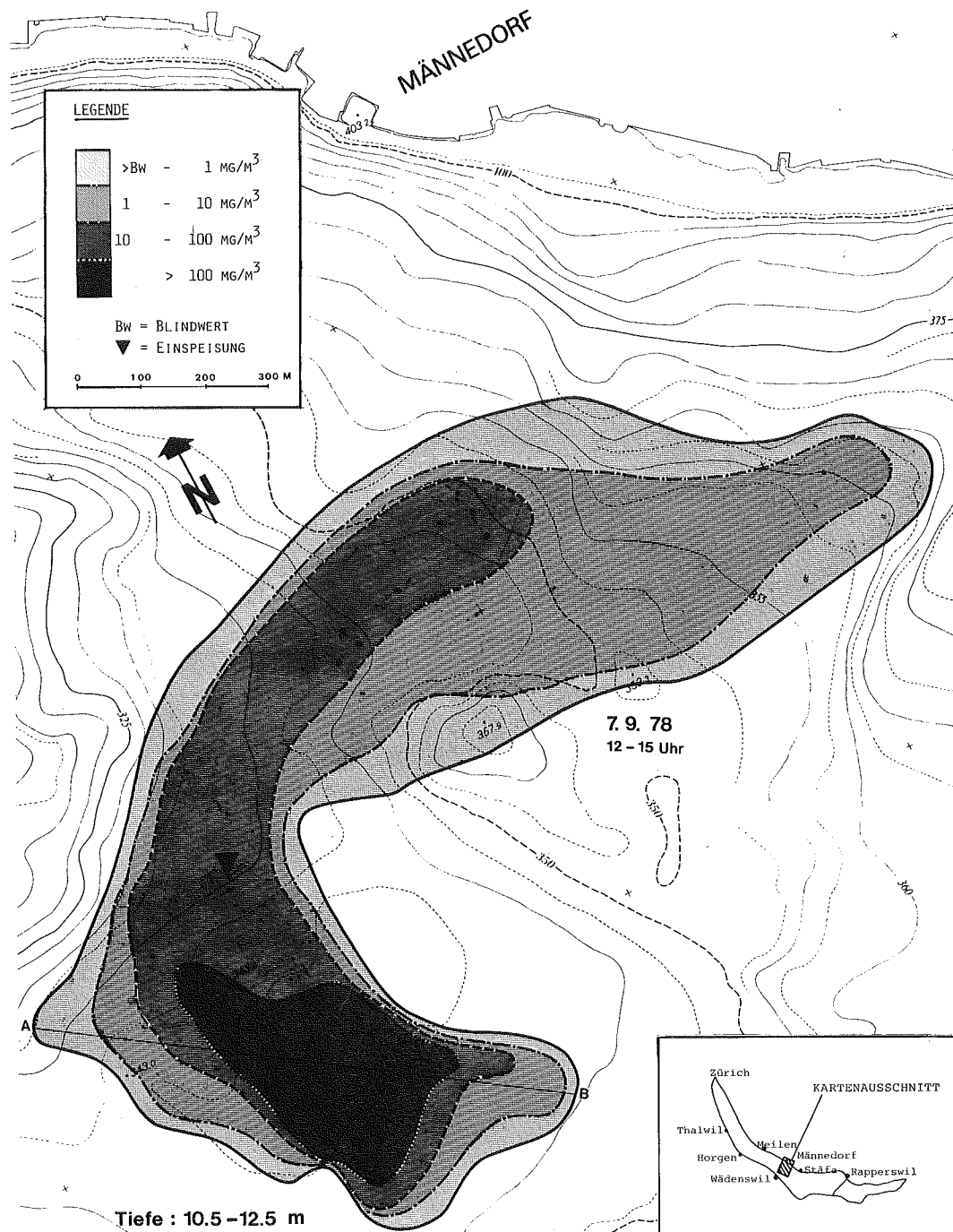


Abb. 4 Zürichsee. Abgrenzung der markierten Wassermassen am 7. Sept. 1978 von 12-15 Uhr.

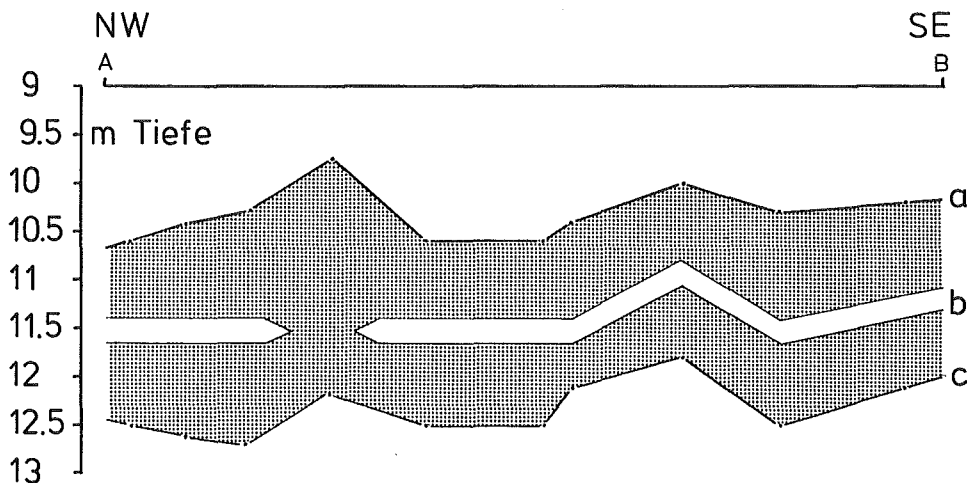


Abb. 5 Vertikale Verteilung des Farbstoffes; Zürichsee bei Wädenswil/Stäfa, 7. Sept. 1978. Linie A-B vgl. Abb. 4.

a = Obergrenze der Farbwolke,

b = Zone mit starkem Rückgang bis Auslöschung der Fluoreszenz,

c = Untergrenze der Farbwolke.

Die Formeln zur Berechnung des Diffusionskoeffizienten K [cm^2/sec] nach FICK und der Diffusionsgeschwindigkeit P [cm/sec] nach JOSEPH + SENDNER lauten:

$$\text{für } K: c = \frac{M/D}{4\pi Kt} e^{-\frac{r^2}{4Kt}} \quad \text{für } P: c = \frac{M/D}{2\pi P^2 t^2} e^{-\frac{r}{Pt}}$$

dabei bedeuten: c = Konzentration des Tracers

M = eingespiessene Tracermenge

D = Schichtdicke der markierten Wassermassen

t = Zeitpunkt nach der Einspeisung

r = Radius des Kreises gleicher Fläche, wie sie durch die Linien gleicher Konzentration des Farbstoffes gebildet werden

Mit bekannten c/r -Wertepaaren und den entsprechenden, ebenfalls bekannten Zeiten lassen sich die Gleichungen nach K bzw. P auflösen.

Tab. 1 gibt eine Zusammenstellung der Werte der horizontalen Diffusionskoeffizienten an. Im Vergleich dazu sind ebenfalls die Resultate aus einem Diffusionsversuch im Murtensee vom Juni 1979 dargestellt.

Tab. 1 Zusammenstellung der horizontalen Diffusionskoeffizienten sowie Angaben über den Zeitpunkt der Untersuchungen und die Ausmasse des Farbflecks

	ZÜRICHSEE 1978			MURTENSEE
	6.9. 10.30	6.9. 15.00	7.9. 13.30	
P (cm/s)	$0,51 \times 10^{-2}$	$1,25 \times 10^{-2}$	$3,12 \times 10^{-2}$	$1,98 \times 10^{-1}$
K (cm ² /s)	$0,25 \times 10^2$	$1,02 \times 10^2$	$5,6 \times 10^2$	$3,33 \times 10^3$
ZEIT (Std.) nach ▼	17,5	22	44,5	22
FLÄCHE (m ²)	36600	122000	766000	980000
VERTIKALE MÄCHTIGKEIT (m)	1,5	1,5	2,1	1,5

Im Vergleich dazu

Die Angaben über die vertikale Mächtigkeit der «Tracerwolke» (Tab. 1) zeigen auch sehr deutlich, dass im geschichteten See die vertikale Diffusion im Vergleich zur horizontalen Diffusion verschwindend klein ist (cf. THOMAS, 1969).

Die mit dem Tracerversuch im Zürichsee ermittelten Werte sind relativ gering, was auf ziemlich ruhige Verhältnisse (Wind, Strömung) während der Beobachtungszeit zurückzuführen ist (vgl. dazu Abb. 2). Stürmische Winde aus wechselnder Richtung am Murtensee erzeugten im Metalimnion grosse Turbulenzen. Aus diesem Grunde resultieren aus dem Versuch Murtensee Werte, die rund eine Zehnerpotenz höher liegen.

Die Ergebnisse aus dem Zürichseerversuch stimmen mit der Theorie überein, dass die Koeffizienten mit zunehmender Grösse des Untersuchungsgebietes ebenfalls zunehmen müssen (siehe dazu unter anderen OBUKHOV, 1959, und JOSEPH et al. 1964).

5. Ausblick auf weitere Einsatzmöglichkeiten fluoreszierender Tracer in der Limnologie

Nebst *Diffusionsversuchen*, welche uns Aufschluss über die Vermischungsvorgänge im Seeinnern oder an der Seeoberfläche geben, sind am Geographischen Institut der Universität Bern 1979 verschiedene Tracerversuche durchgeführt worden, welche den *Einschichtungsverhältnissen* von Zuflüssen in Seen gewidmet waren (WERTHEMANN, 1980). Unter verschiedenen Umweltbedingungen wie Jahreszeit (Schichtung des Sees), Geschwindigkeit des Zuflusses oder meteorologische Einflüsse (z. B. Wind) konnten die Einschichtungsverhältnisse und die Strömungsbahnen des Zuflusswassers im nahen Mündungsbereich beobachtet werden.

Mit Tab. 2 sollen abschliessend einige Stichworte zu weiteren Anwendungsgebieten und Einsatzmöglichkeiten für fluoreszierende Tracer in der Limnologie gegeben werden.

Tab. 2 Einige Anwendungsgebiete und Einsatzmöglichkeiten für fluoreszierende Tracer in der Limnologie

Diffusionsversuche
 Einschichtungsversuche von Zuflüssen
 Verfolgen von Abwassereinleitungen in Seen
 Verfolgen von Kühlwassereinleitungen
 Abklärungen bei Standortwahl von ARAs und Seewasserwerken
 Eichung und Überprüfung von mathematischen Modellen
 Simulation von Unfällen durch schädliche Stoffe
 Austauschverhältnisse von Grund- und Seewasser (Infiltration/Exfiltration)
 Abflussverhältnisse der Seen
 Verfolgen von hochwasserbedingten Trübeströmen

6. Literatur

- JOSEPH J., SENDNER H. und WEIDEMANN H.: Untersuchungen über die horizontale Diffusion in der Nordsee. Deutsche Hydrogr. Z. Nr. 17, 1964.
 LEIBUNDGUT CH. und HIRSIG P.: Zur Anwendung fluoreszierender Tracer in der Limnologie. Gas, Wasser, Abwasser Nr. 12, 1977.
 OBUKHOV A.M.: Descriptions of turbulence in terms of Lagrangian variables. Advances in Geophysics 6, 1959.
 THOMAS E.A.: Untersuchungen über Auswirkungen und Folgen der Einschichtung von Abwässern in Seen. Verh. Int. Ver. Limnol. 17, 517–528, 1969.
 WERTHEMANN B.: Physikalisch-limnologische Untersuchungen mittels fluoreszierender Tracer. Lizentiatsarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern, 1980.

Adresse für Auskünfte:

P. HIRSIG, Geographisches Institut der Universität Bern, Abt. Gewässerkunde, Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern.

