

Mess-System zur Erfassung dreidimensionaler Tracerverteilungen in Seen

Frank Peeters und Alfred Wüest, Dübendorf

Zusammenfassung

Der fluoreszierende Stoff Uranin ist als Tracer zur Messung von Mischungsprozessen in Oberflächengewässern, insbesondere im Hypolimnion von Seen, gut geeignet. Experimente, in denen Uranin als Tracer und das hier vorgestellte Mess-System verwendet werden, erlauben mit geringem personellem Aufwand die Vermessung dreidimensionaler Tracerverteilungen innerhalb weniger Stunden. Das Mess-System besteht aus einem Fluorometer, einer CTD-Sonde und einem Positionierungssystem. Die Datenerfassung und eine simultane graphische Darstellung erfolgen mit Hilfe eines Computers.

Erste Messungen im Vitznauer Becken (Vierwaldstättersee) belegen den grossen Einfluss advektiver Prozesse auf die räumliche Verteilung von Tracerkonzentrationsmaxima. Es scheint, dass das bisher im Ozean verwendete reine Turbulenzmodell die Ausbreitung von Tracerverteilungen, zumindest im Vitznauer Becken, nicht gut beschreibt. Für praktische Anwendungen konnten die mittleren effektiven horizontalen Diffusionskoeffizienten bestimmt werden. Diese liegen zwischen 0,03 und 0,3 m²/s, in Abhängigkeit der erreichten Wolkengrösse.

Méthode de mesure des distributions à trois dimensions de traceurs dans les lacs - Résumé

La substance fluorescente uranin est particulièrement appropriée comme traceur pour la mesure de processus de mélange dans les eaux de surface, notamment dans l'hypolimnion de lacs. Des essais de traçage avec de l'uranin ainsi que la méthode de mesure présentée ici permettent le mesurage de distributions à trois dimensions de traceurs avec peu de personnel et en l'espace de quelques heures. La méthode de mesure nécessite un fluorimètre, une sonde CTD et un système de position. L'acquisition de données et le calcul graphique simultané sont obtenus par ordinateur.

Les premières mesures dans le bassin de Vitznau (lac des Quatre-Cantons) prouvent la grande influence des processus advectifs sur la distribution spatiale des concentrations maximales de traceurs. Il semble que le modèle purement dynamique utilisé jusqu'ici dans l'océan ne fournit pas une bonne description de la diffusion des distributions des traceurs, du moins pour le bassin de Vitznau. Les coefficients horizontaux de diffusion effectifs moyens furent déterminés pour des usages pratiques. Ceux-ci s'élèvent entre 0,03 et 0,3 m²/s selon l'étendue des nuages.

Measuring system of three-dimensional tracer distributions in lakes - Summary

The fluorescent tracer uranin is suitable for studying mixing processes in natural water bodies, especially in lake hypolimnia. Experiments utilising uranin in conjunction with the measuring system described here allow the measurement of three-dimensional tracer distributions within a few hours with modest manpower requirements. The measuring system comprises a fluorometer, a CTD sonde and an electronic navigation system. On-board computerisation allows data acquisition with real-time graphics.

Initial measurements in the Vitznau basin of Lake Lucerne confirm the importance of advective processes for the spatial distribution of tracer concentration maxima. A purely turbulent model such as that commonly applied in the ocean apparently does not give a good description of the growth of a tracer patch, at least in the Vitznau basin. Mean effective horizontal diffusion coefficients were determined to lie within the range 0.03–0.3 m²/s, depending on the size attained by the tracer patch.

Einleitung

Transportvorgänge bestimmen wesentlich die Verteilung gelöster oder suspendierter Stoffe in natürlichen Gewässern. Detaillierte Untersuchungen von Strömungs- und Mischungsprozessen in Seen können somit entscheidend zum Verständnis ökologischer Prozesse in diesen Gewässern beitragen.

In bisherigen Experimenten in Seen konzentrierte man sich vorwiegend auf die Quantifizierung vertikaler Austauschprozesse (z. B. *Imboden*, 1983; *Wüest*, 1987). Dabei wurden zur Bestimmung vertikaler Diffusionskonstanten die Stoffflüsse sowie der gesamte Wasserkörper als horizontal homogen angenommen. Neuere Forschungsergebnisse lassen aber vermuten, dass die vertikale Mischung in der Seemitte (im Hypolimnion fern des Seerandes) nur von geringer Bedeutung ist (*Van Senden et al.*, 1992). Die Gesamtmischung des Sees in der Vertikalen scheint im wesentlichen durch vertikale Mischung am Seerand gekoppelt mit horizontalen Austauschprozessen zwischen Seerand und Seemitte bestimmt zu sein. Daneben spielen horizontale Austauschprozesse bei praktischen Problemen des Gewässerschutzes eine zentrale Rolle, so z. B. bei der Schadstoffausbreitung nach Unfällen oder bei Abwassereinleitungen, für die Verteilung von Sauerstoff bei Belüftungsanlagen, bei der Eisbildung in Seitenbecken eines Sees (z. B. Häfen) oder auch beim Austausch zwischen verschiedenen Seebecken (z. B. im Vierwaldstättersee, *Schlatter*, 1991). Bisher wurden horizontale Austauschprozesse vorwiegend in sehr grossen Gewässern, z. B. im Ozean (*Edwart und Bendiner*, 1981; *Okubo*, 1971) und im Lake Ontario (*Murthy*, 1976) oder sehr kleinen Seen (*Quay et al.*, 1979) untersucht. Die Messung und Quantifizierung horizontaler Mischung in Seen mittlerer Grösse wurde bisher nur selten durchgeführt und rückt damit in den Vordergrund des Interesses.

Die Grössenordnung horizontaler Mischungsraten kann mit Hilfe geeigneter Tracerexperimente bestimmt werden. Allerdings sind solche Versuche experimentell recht aufwendig. Zum einen müssen Konzentrationsverteilungen des Tracers dreidimensional mit einer hohen räumlichen Auflösung erfasst werden. Zum anderen erfordert die Bestimmung horizontaler Austauschraten eine möglichst rasche Vermessung der Tracerverteilungen. Ausserdem sollte, um

solche Experimente mehrmals durchführen zu können, der benötigte personelle Aufwand klein gehalten werden. Im folgenden wird ein *Versuchsaufbau* vorgestellt, welcher die oben genannten Anforderungen erfüllt. Zunächst wird auf die Eigenschaften des von uns verwendeten Tracers Uranin (Natrium Fluorescein) eingegangen. Darauf folgt in einem Abschnitt über das *Mess-System* eine detaillierte Beschreibung der Messinstrumente, der Datenerfassung und der Methode der Einspeisung. Anschliessend wird die *Auswertung der Daten* am Beispiel eines Experimentes im Vitznauerbecken, einem Teil des Vierwaldstättersees, erläutert und erste Ergebnisse zur horizontalen Mischung vorgestellt.

Der Tracer Uranin

Um zeitaufwendige Probenahmen zu vermeiden, wie sie beispielsweise bei Experimenten mit SF₆ (Schlatter et al., 1990) erforderlich sind, sollte der Nachweis des Tracers *in-situ* erfolgen können. Als Tracer bieten sich daher fluoreszierende Farbstoffe an, die mit Hilfe von geeigneten Fluorometern direkt in der Wassersäule gemessen werden können. Für Experimente in Seen eignet sich als optischer Tracer insbesondere Uranin (Leibundgut, 1982), da dieses nicht nur eine hohe Fluoreszenzausbeute und eine geringe Adsorption an partikulärem und organischem Material aufweist, sondern auch für aquatische Organismen und Säugetiere toxikologisch unbedenklich ist (Smart, 1982). Insbesondere wird Uranin, im Gegensatz zu dem häufig verwendeten Tracer Rhodamin B, nicht verdächtig, mutagen bzw. karzinogen zu sein (Smart, 1982).

Die gemessenen Anregungs- und Emissionsspektren von Uraninlösungen (Natrium Fluorescein, Siegfried AG) mit einem pH = 7,5 zeigen Maxima bei Wellenlängen von 492 nm bzw. 515 nm in Übereinstimmung mit früheren Messungen (Behrens, 1971) (Abb. 1).

Die Intensitäten der Anregungs- und Emissionsspektren sind abhängig vom pH der Uraninlösung. Bis zu einem pH = 7 nehmen die Intensitäten mit Erhöhung des pH's stark zu (Abb. 1). Für Uraninlösungen mit pH grösser als 7 ändern sich die Intensitäten der Anregungs- und Emissionsspektren nicht mehr (Smart und Laidlaw, 1977). Da die meisten Schweizer Seen einen pH grösser als 7 aufweisen, kann zumindest für

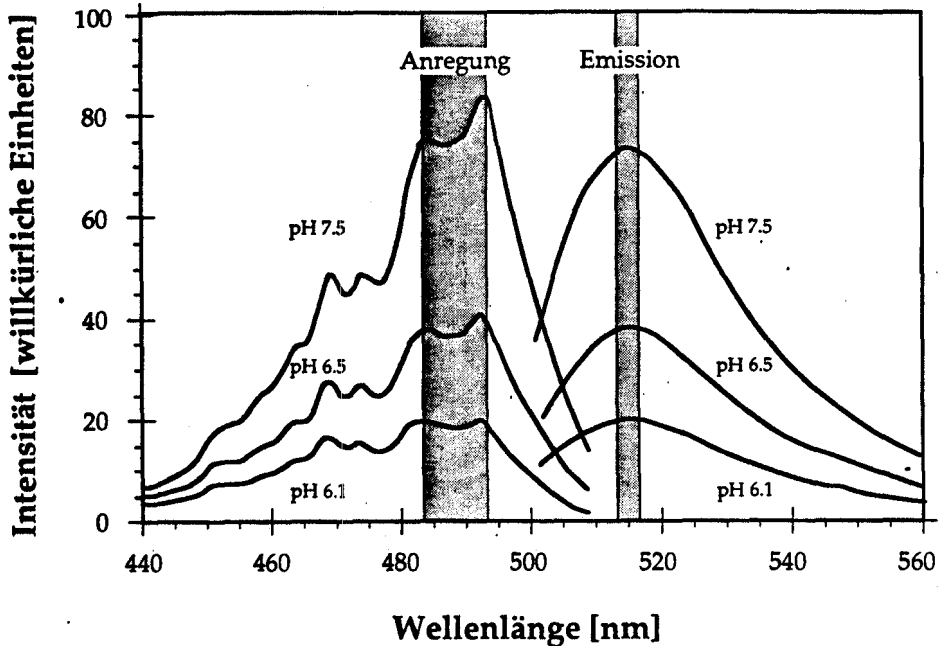


Abb. 1 Anregungs- und Emissionsspektren von gelöstem Uranin bei unterschiedlichem pH. Die schraffierten Felder geben den Transmissionsbereich der Anregungs- und Emissionsfilter an, mit denen der Fluorometer zum Uraninnachweis ausgerüstet wurde. Der gekennzeichnete Wellenlängenbereich entspricht der Halbwertsbreite der Filter.

diese Seen die pH-Abhängigkeit vernachlässigt werden.

Beim Einsatz von Uranin in Oberflächengewässern muss die schnelle Zersetzung von Uranin durch Licht berücksichtigt werden. Uranin zerfällt unter Einfluss von künstlichem Tageslicht (Intensität 2000 Lux) mit einer Halbwertszeit von etwa 11 Stunden (Behrens und Teichmann, 1982). Unter natürlichen Bedingungen liegen, je nach Bewölkungsgrad, die Halbwertszeiten zwischen 2 und 14 Stunden (Smart und Laidlaw, 1977). Aufgrund der Lichtabsorption im Seewasser, mit einer Abnahme der Lichtintensität auf unter 2% in 20 m Wassertiefe, spielt der Lichtzerfall von Uranin jedoch nur eine geringe Rolle für Experimente in Hypolimnia. Um die Dichte der Einspeiselösung bestimmen zu können, wurde das partielle molare Volumen von in Wasser gelöstem Uranin gemessen. Unter Berücksichtigung der Molmasse $M_U = 376,28$ g/mol ergab sich für Uranin ein partielles molares Volumen $V_U = 0,21$ l/mol. Die Dichte ρ_L einer Uraninlösung lässt sich mit

$$\rho_L(T) = C_U M_U + (1 - C_U V_U) \rho_w(T)$$

berechnen, wobei T die Temperatur, C_U die Uraninkonzentration in mol/l und ρ_w die Dichte des reinen Wassers repräsentiert.

Eine 0,01 molare Uraninlösung mit einer Temperatur von 20 °C besitzt z. B.

eine Dichte von 999,9 g/l, welche der Dichte reinen Wassers bei $T = 8$ °C entspricht.

Das Mess-System

Die Untersuchung einer sich ausbreitenden Tracerverteilung erfordert simultane Messungen der Tracerkonzentration, der Position und Tiefe der Messsonde und, um die Dichte des vom Tracer markierten Wasserkörpers berechnen zu können, der Temperatur und elektrischen Leitfähigkeit des Wassers in der Messtiefe (Abb. 2).

Im folgenden werden die verwendeten Messinstrumente, die Datenerfassung und die Methode der Einspeisung vorgestellt.

Bei unserem Fluorometer (Variosens II, Impulsphysik) wird zur Anregung des optischen Tracers Uranin eine Xenon-Blitzlampe mit einer Frequenz von 10 Hz gezündet. Um die Anregung anderer, sich im Messvolumen befindender fluoreszierender Stoffe zu vermeiden, wird das breite Spektrum der Xenon-Lampe gefiltert. Der zur Fluoreszenz angeregte Tracer emittiert Licht mit einer von der Anregung verschiedenen Wellenlänge (Abb. 1). Der Nachweis des emittierten Lichts erfolgt mit Hilfe einer Photozelle, die mit einem Filter versehen ist, welcher Wellenlän-

gen ausserhalb eines schmalen Wellenlängenbereiches um das Maximum des Emissionsspektrums blockiert (Abb. 1). Die Nachweiselektronik dient der Verstärkung des Photozellensignals und ist mit der Zündung der Xenon-Lampe synchronisiert. Die Konzentration des Tracers ergibt sich schliesslich aus der Spannung am Ausgang des Fluorometers. Beim Variosens ist diese Spannung proportional zum Logarithmus der Konzentration des Tracers (eine detailliertere Darstellung des Fluorometers findet sich bei Frügel und Koch, 1976). Die Nachweisgrenze des Fluorometers wird unter anderem durch das elektroni-

sche Rauschen im Ausgangssignal und die Wahl der Filter bestimmt. Wir verwenden Filter mit folgenden Eigenschaften (Abb. 1):

1. *Anregungsfilter*: Wellenlängenmaximum 488 nm, Halbwertsbreite 10 nm, minimale Transmission 50 %;
2. *Emissionsfilter*: Wellenlängenmaximum 515 nm, Halbwertsbreite 3 nm, minimale Transmission 45 %.

Mit diesen Filtern liegt der Messbereich des Variosens zwischen 0,2 mg/m³ und 200 mg/m³ Uranin. Eine Verbesserung der unteren Nachweisgrenze könnte durch Anpassung der Nachweiselektronik (grössere Verstärkung des Signals

der Photozelle) erzielt werden. Das Hintergrundsignal, welches durch Streulicht oder durch den Einfluss anderer fluoreszierender Stoffe erzeugt wird, liegt mit der obigen Filterbestückung unterhalb des Messbereiches (0 V am Ausgang, d. h. kleiner als 0,2 mg/m³). Dies gilt nicht nur für Messungen im Vierwaldstätter- und Neuenburgersee, sondern auch in der organisch stark belasteten Glatt.

Mit Hilfe einer am Fluorometer befestigten CTD-Sonde können die Parameter Druck (und somit die Tiefe), Temperatur und elektrische Leitfähigkeit (ein Mass für den Ionengehalt) mit 8 Hz und hoher Auflösung (Druck 0,01 dBar, Temperatur 0,001 °C, elektrische Leitfähigkeit 0,1 µS cm⁻¹) gemessen werden. Die Datenübertragung erfolgt im RS232-Format.

Zur *Positionsmessung* steht ein Mikrowellensystem zur Verfügung, welches aus den Laufzeiten von Mikrowellen zwischen einer Antenne auf dem Schiff und zwei (oder drei) externen Stationen die Schiffskoordinaten berechnet. Falls die externen Stationen über Vermessungspunkten aufgestellt werden, liegt die absolute Genauigkeit der Schiffskoordinaten bei ±1 m. Die Daten werden vom Positionierungsgerät mit einer Frequenz von 1 Hz im RS232-Format geliefert. Die X-Y-Koordinaten der Messsonde lassen sich aus den Schiffskoordinaten errechnen, wobei das Nachschleppen der Sonde am schrägen Seil (während der Messung variable, unbekannte Seillänge) mit Hilfe der Schiffsgeschwindigkeit korrigiert wird. Der Winkel des Seils (und damit der unbekannt Reibungswiderstand der Sonde im Wasser) wird durch eine Eichung bestimmt, bei der der Fluorometer und die CTD-Sonde an einem Seil bekannter Länge mit verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten geschleppt werden. Der Abstand d zwischen Sonde und Antenne des Positionierungssystems auf dem Schiff beträgt z. B. bei einer Sondentiefe von 20 m und einer Schiffsgeschwindigkeit von 1 m/s $d = 22 \text{ m} \pm 3 \text{ m}$. Um Unsicherheiten bei der Berechnung der Sondenposition klein zu halten, wurde während der Vermessung der Tracerwolken mit einer konstanten Geschwindigkeit von etwa 1 m/s gefahren und das Schiff ausschliesslich ausserhalb der Tracerwolke gewendet.

Zur *Datenerfassung* wird das Ausgangssignal des Fluorometers, nach Zwischenschaltung eines Trennverstärkers, welcher Erdungsprobleme beim Betrieb

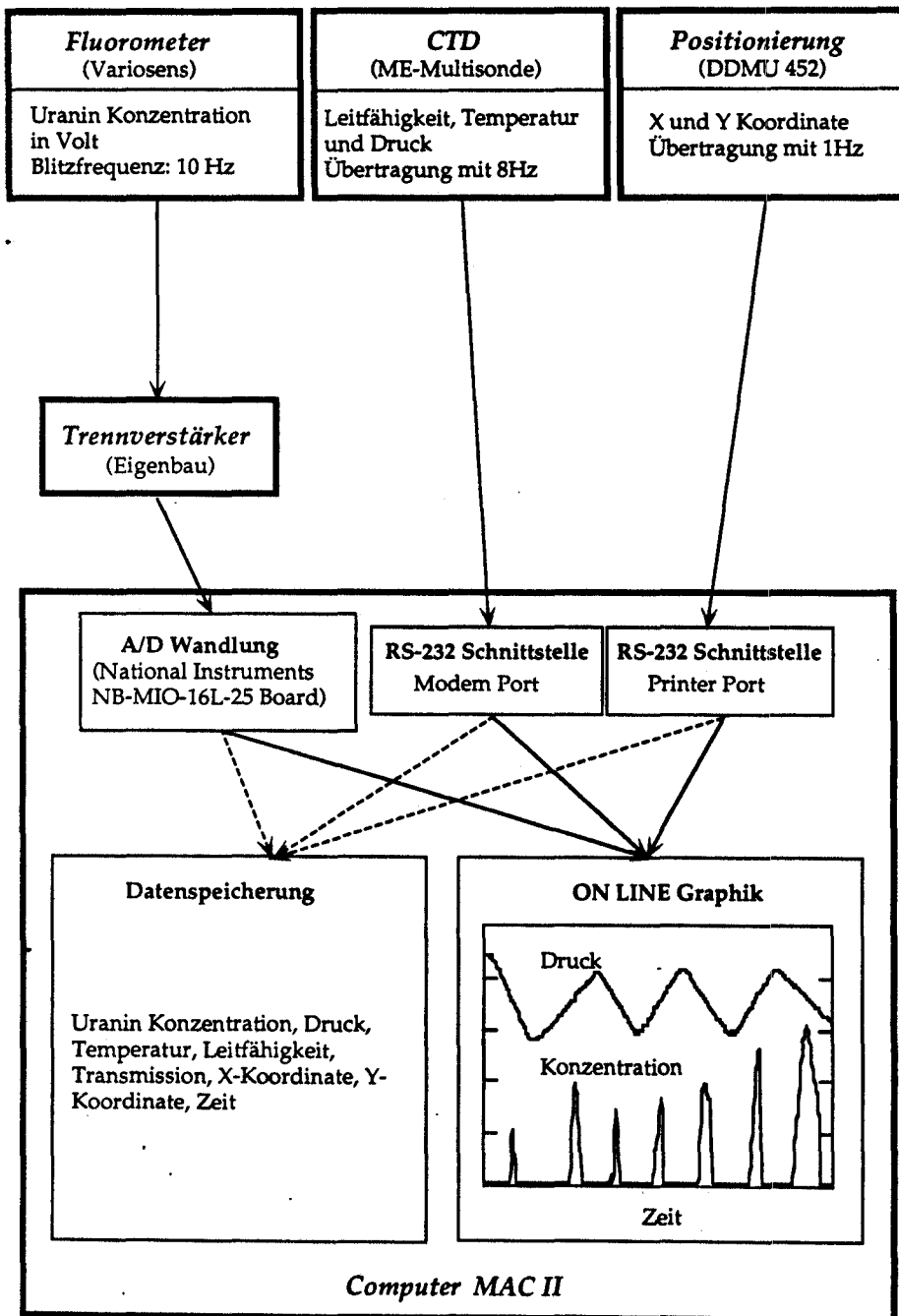


Abb. 2 Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus zur Datenerfassung.

des Variosen beseitigt, mit Hilfe einer A/D-Karte (National Instruments NB-MIO-16L25) mit 1 kHz digitalisiert. Diese hohe A/D-Wandlungsrate ermöglicht eine Datenerfassungsrate von 10 Hz bei gleichzeitiger digitaler Filterung des elektronischen Rauschens im Fluorometersignal durch Mittelung von je 100 Messwerten. Die Steuerung der A/D-Karte, die Kontrolle der RS232-Schnittstellen und die zeitliche Koordination des Datenflusses wie auch die Weiterverarbeitung der Daten zur graphischen Darstellung erfolgt auf einem PC (Abb. 2).

Simultan zur Datenerfassung werden Druck und Fluoreszenz *On Line* graphisch dargestellt (Abb. 2). Dies ermöglicht eine gezielte Suche nach dem Tracer und eine geeignete Wahl der Schiffsroute zur effizienten Vermessung der Tracerwolke im See. Um auch vertikale Strukturen auflösen und eine Integration der vertikalen Konzentrationsverteilung des Tracers durchführen zu können, wird die Sonde mit Hilfe einer hydraulischen Winde in einem «Auf-Ab-Zyklus» betrieben. Die *On-Line*-Darstellung von Druck und Fluoreszenz gibt eine Entscheidungshilfe, inwieweit die Tracerwolke durchfahren wurde und die Bewegungsrichtung der Sonde («auf» oder «ab») geändert werden muss.

Die Stromversorgung der Messgeräte und des PC's erfolgt mit Hilfe von Batterien bzw. einem Generator und benötigt eine Leistung von total etwa 600 Watt.

Die *Methode der Einspeisung* des Tracers hängt stark von der Fragestellung des jeweiligen Experimentes ab. Zur Messung der horizontalen Mischung sollte der Tracer möglichst rasch als eine punktuelle Anfangsverteilung in die gewünschte Wassertiefe eingebracht werden. Um ein Absinken oder Aufsteigen des Tracers während der Einspeisung zu vermeiden, muss die Dichte der Tracerlösung an die Seewasserdichte in der Einspeisetiefe angeglichen werden. In den Experimenten wird dies durch Lösen des Tracers Uranin in 70 l warmem Oberflächenwasser erreicht (siehe auch Abschnitt 2). Die Tracerlösung wird auf die gewünschte Einspeisetiefe gepumpt und durch eine 1,5 m lange Düse eingetragen. Die gesamte Einspeisung dauert etwa 1 Minute. Die Anfangsverteilung ist annähernd punktuell mit einem Radius in der Horizontalen von etwa 5 m und einer vertikalen Ausbreitung von etwa 1,5 m. Insgesamt wird eine Ver-

mischung der Tracerlösung mit etwa 100 m³ Wasser erreicht. Diese grosse Verdünnung führt zu kleinen Tracerkonzentrationen und damit zu einer guten Annäherung der Dichte an die Umgebung in der Einspeisetiefe. Zum Beispiel sollte bei einer Einspeisemenge von 500 g Uranin und einer Stabilität in der Einspeisetiefe von $N^2 = 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ die Tracerverteilung unmittelbar nach der Einspeisung nicht mehr als 25 cm absinken. Die Stabilität ist definiert als $N^2 = -g\rho^{-1} dp/dz$, wobei ρ der Dichte des Wassers und g der Erdbeschleunigung entsprechen.

Datenauswertung am Beispiel einer Anwendung im Vitznauer Becken

Zur *Bestimmung* der horizontalen Diffusion im Hypolimnion wurde im März 1991 ein Experiment im Vierwaldstättersee (Vitznauer Becken) durchgeführt. Die Einspeisung erfolgte auf 13 m Wassertiefe bei einer Stabilität von $N^2 = 10^{-5} \text{ s}^{-2}$. Um trotz dieser geringen Stabilität (Frühjahr) ein Absinken der Tracerwolke vermeiden zu können, wurde während der Einspeisung mit dem Schiff gefahren. Hierdurch wurde eine

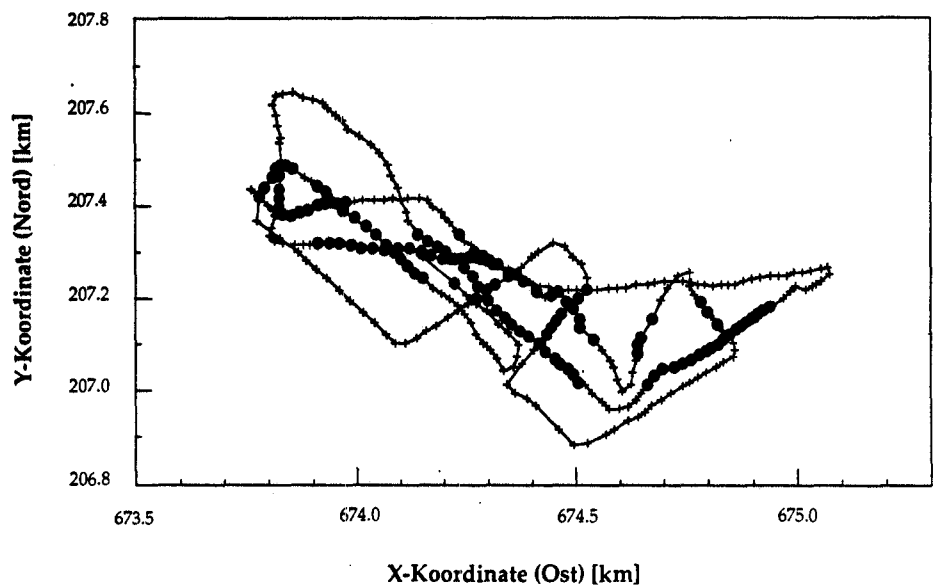


Abb. 3 Horizontale Verteilung von Vertikalprofilen, gemessen im Vitznauer Becken 30 Stunden nach der Einspeisung. Kreise (●) stellen Vertikalprofile dar, bei denen Uranin gefunden wurde, Kreuze (+) stehen für Vertikalprofile ohne Uranin. Die Verbindungslinie zwischen den Symbolen geben die gefahrene Schiffsroute an.

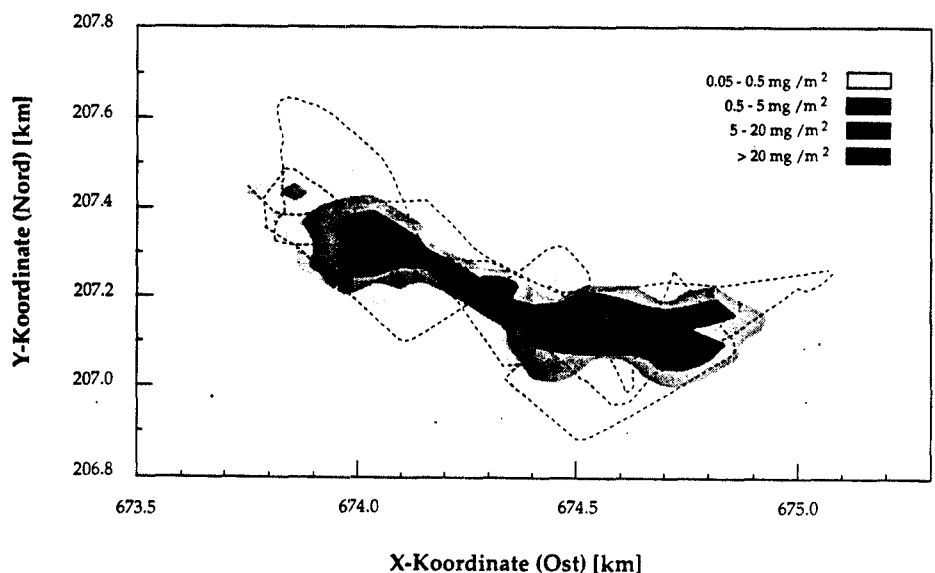


Abb. 4 Struktur einer Tracerwolke 30 Stunden nach der Einspeisung. Die gestrichelte Linie beschreibt den Weg des Schiffes.

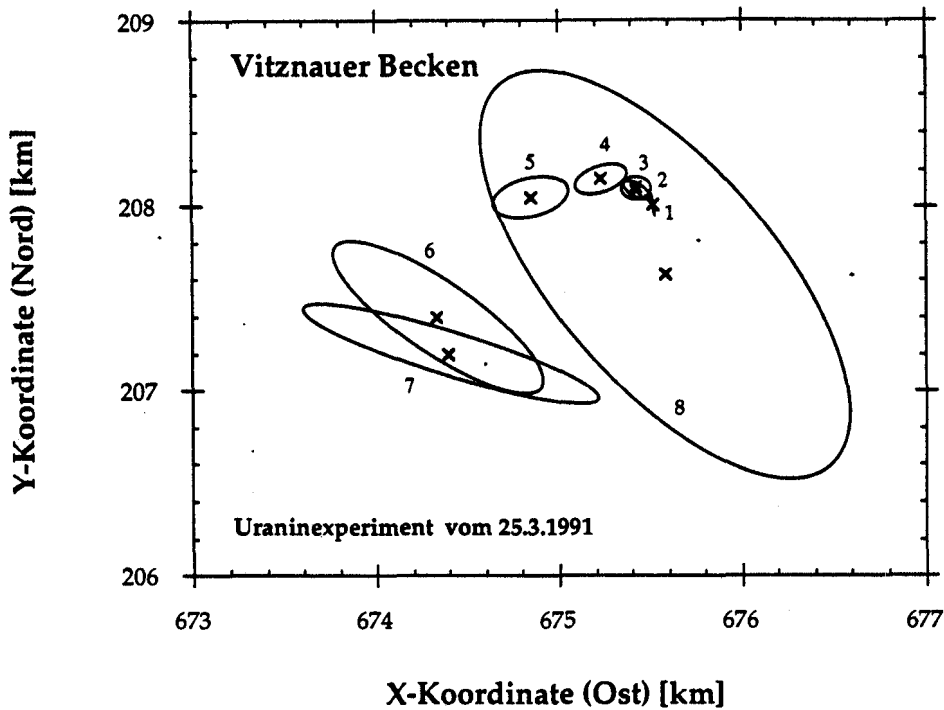


Abb. 5 Zeitliche Entwicklung einer Tracerverteilung im Vitznauer Becken. Die Wolkenumrisse repräsentieren diejenige Isolinie, die 1 % der Maximalkonzentration der jeweiligen Wolke darstellt. Innerhalb der umschlossenen Fläche befinden sich 99 % der Gesamtmasse der jeweiligen Tracerwolke. Hierbei wurde angenommen, dass die Konzentrationen in der Tracerwolke gaussverteilt sind. Das Symbol X kennzeichnet die Wolkenschwerpunkte. Zwischen Einspeisung (Punkt 1) und Wolke 8 liegen 50 Stunden.

Vermischung der Tracerrösung mit mehr als 500 m^3 Wasser erreicht und ein Absinken des Tracers verhindert. Die Tracerverteilung konnte in einem Zeitraum von drei Tagen siebenmal vermessen werden, wobei die erste Messung 2 Stunden nach der Einspeisung erfolgte. Die Datenaufnahme für eine der sieben Tracerwolken dauerte, abhängig von der Wolkengrösse, zwischen 1 und 3 Stunden. Für die Durchführung der Messungen waren drei Personen erforderlich. Zur Berechnung der horizontalen Diffusion kann jeder vertikale Durchgang durch die Tracerverteilung («auf» bzw. «ab» der Sonde) als Vertikalprofil interpretiert werden. Für jede Tracerwolke erhält man so mehrere hundert Vertikalprofile. Durch Integration dieser Profile über die Tiefe berechnet man eine zweidimensionale Verteilung, welche der Projektion der Gesamtverteilung auf die Horizontale (x-y-Ebene) entspricht. Abb. 3 zeigt eine solche zweidimensionale Verteilung integrierter Vertikalprofile 30 Stunden nach der Einspeisung. Nach zweidimensionaler linearer Interpolation können Konzentrationsisolines (Abb. 4) sowie Integral, Schwerpunkte und Varianzen der Tracerwolken berechnet werden. Die zeitliche Entwicklung der Tracerverteilung im Vitznauer Becken ist in Abb. 5 dargestellt.

Wolke 7 entspricht darin der in den Abb. 3 und 4 dargestellten Verteilung.

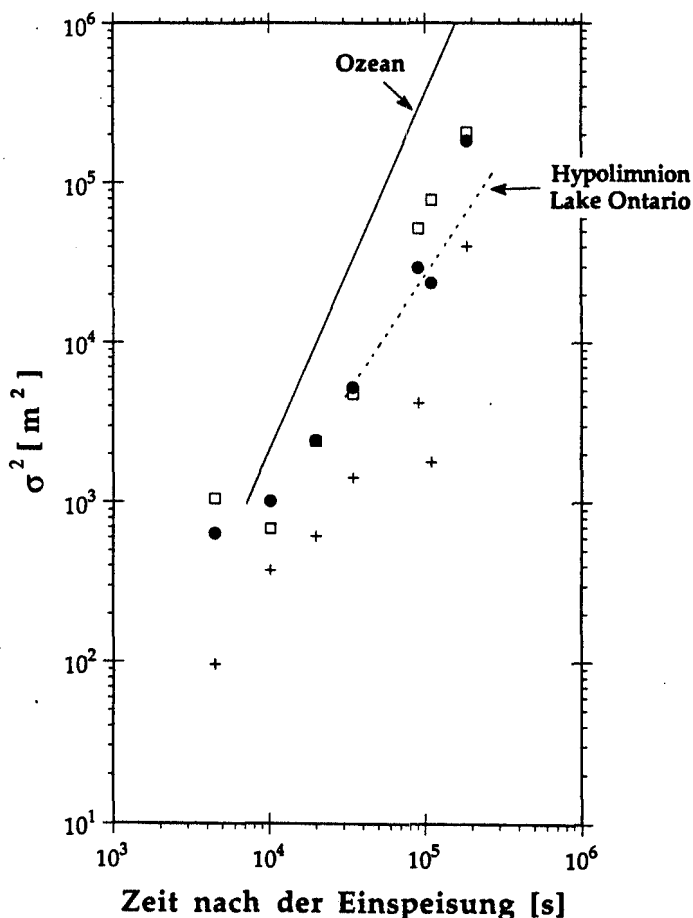


Abb. 6 Wolkengrösse und Varianzen in Richtung der Hauptachsen als Funktion der Zeit nach der Einspeisung im Vitznauer Becken. Die Kreise (●) geben das Mass für die Wolkengrösse, σ^2 , an. Die Symbole \square und $+$ stehen für die Varianzen in Richtung der grossen bzw. kleinen Hauptachse der Tracerwolke. Die durchgezogene bzw. gestrichelte Linie repräsentiert einen Fit der Wolkengrössen als Funktion der Zeit für ein Ensemble von Experimenten im Ozean (Okubo, 1971) bzw. im Hypolimnion des Lake Ontario (Murthy, 1976).

Die dreidimensionalen Integrale der Uraninkonzentrationen für die einzelnen Tracerwolken zeigen, dass im Mittel jeweils $93\% \pm 23\%$ der Gesamtmasse des eingespeisten Uranins wiedergefunden wird.

Die Schwerpunkte der Tracerwolken erreichen Geschwindigkeiten bis zu 2 km/Tag . Noch wenige Tage nach der Einspeisung können demnach in Entfernungen von einigen Kilometern vom Einspeiseort sehr hohe Konzentrationen auftreten (Abb. 5). Die Tracerwolken sind gewöhnlich nicht radialsymmetrisch, sondern langgestreckt. Diese Asymmetrien werden wahrscheinlich durch eine Geschwindigkeitsscherung in Richtung der grossen Hauptachse hervorgerufen.

Um quantitative Aussagen und Vergleiche mit anderen Seen oder dem Ozean durchführen zu können, wird als Mass für die Wolkengrösse $\sigma^2 = 2 \sigma_a \sigma_b$ definiert, wobei σ_a und σ_b die Varianzen der Tracerverteilung in Richtung der kleinen bzw. grossen Hauptachse darstellen. Zu gleichen Zeiten t , wobei t die Zeit nach der Einspeisung bedeutet, sind die Wolkengrössen im Vitznauer Becken kleiner als im Ozean (Ozeandaten nach Okubo, 1971) zeigen aber sehr gute Übereinstimmung mit Messungen

im Hypolimnion des Lake Ontario (Murthy, 1976) (Abb. 6). Im Vitznauer Becken liegt, ähnlich wie im Hypolimnion des Lake Ontario, das mittlere zeitliche Wachstum der Wolkengrösse bei $\sigma^2 \sim t^{1.5}$. Dieses Ergebnis lässt sich nicht mit einem reinen *Turbulenz-Modell* für die horizontale Diffusion, welches z. B. im Ozean verwendet wird (Okubo, 1971), in Einklang bringen, da dieses aufgrund eines angenommenen Turbulenzspektrums ein Wachstum von $\sigma^2 \sim t^3$ voraussagt. Um eine sicherere experimentelle Grundlage für die Modellierung der horizontalen Mischung im Hypolimnion von Seen zu schaffen, werden weitere Experimente im Vierwaldstättersee durchgeführt. Mittlere effektive horizontale Diffusionskonstanten K_{eff} lassen sich aus den Wolkengrössen mit $K_{\text{eff}} = 0,25 \sigma^2 t^{-1}$ berechnen. Die Messungen vom Vitznauer Becken liefern für K_{eff} Werte zwischen 0,03 und 0,3 m²/s, in Abhängigkeit von der erreichten Wolkengrösse. Damit liegen die mittleren effektiven horizontalen Diffusionskoeffizienten etwa 4 bis 5 Grössenordnungen über den vertikalen Diffusivitäten.

Abschliessende Bemerkungen

Im letzten Abschnitt wurde demonstriert, wie mit Hilfe eines Tracereperimentes und dem oben beschriebenen Mess-System horizontale Diffusionskonstanten in Seen bestimmt werden können. Das Mess-System eignet sich aber ganz allgemein zur Vermessung dreidimensionaler Tracerverteilungen und kann daher z. B. auch zur Untersuchung von Stoffverteilungen und Plumes bei künstlichen Einleitungen (z. B. von Abwässern) eingesetzt werden. Bei solchen Fragestellungen muss die Einspeisemethode an das Problem angepasst werden, indem der Tracer nicht mehr punktuell, sondern kontinuierlich durch das Einleitungssystem eingetragen wird.

Abschliessend wird darauf hingewiesen, dass zur Untersuchung von Umweltsystemen sich häufig natürliche Tracer anbieten und auf den Einsatz von künstli-

chen Tracern verzichtet werden kann. Zum Beispiel bieten sich bei Fragestellungen, die die Einschichtung von Flüssen oder Trübeströmen in Seen betreffend, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und Trübung (Partikelkonzentration) als natürliche Tracer an. Mit Hilfe des oben vorgestellten Mess-Systems können diese natürlichen Tracer *in-situ* gemessen und deren räumliche Verteilung erfasst werden.

Verdankungen

An dieser Stelle möchten wir den Mitarbeitern der Abteilung Umweltphysik an der EAWAG, insbesondere G. Piepke, D.M. Imboden, M. Schurter, D.M. Livingstone und P. Perrisset für die tatkräftige Unterstützung danken. Der Fluorometer wurde uns von der Abteilung Limnologie (EAWAG) zur Verfügung gestellt. Diese Arbeit wurde vom Schweizerischen Nationalfonds (20-27751.89) finanziell unterstützt.

Literaturverzeichnis

- Behrens, H. (1971) - Untersuchungen zum quantitativen Nachweis von Fluoreszenzfarbstoffen bei ihrer Anwendung als hydrologische Markierungstoffe. *Geologica Bavaria*. 64: 120-131.
- Behrens, H. und Teichmann, G. (1982) - Neue Ergebnisse über den Lichteinfluss auf Fluoreszenztracer. *Beiträge zur Geologie der Schweiz-Hydrologie*. 28: 69-77.
- Ewart, T.E. und Bendiner, W.P. (1981) - An observation of the horizontal and vertical diffusion of a passive tracer in the deep ocean. *Journal of Geophysical Research*. 86: 10974-10982.
- Imboden, D.M., Lemmin, U., Joller, T. und Schurter, M. (1983) - Mixing processes in lakes: mechanisms and ecological relevance. *Schweiz. Z. Hydrol.* 45: 11-44.
- Leibundgut, Ch. (1982) - Stand und Entwicklung der Tracerhydrologie. *Beiträge zur Geologie der Schweiz-Hydrologie*. 28: 23-35.
- Murthy, C.R. (1976) - Horizontal Diffusion Characteristics in Lake Ontario. *Journal of Physical Oceanography*. 6: 76-84.
- Okubo, A. (1971) - Oceanic diffusion diagrams. *Deep-Sea Research*. 18: 789-802.

Quay, P.D., Broecker, W.S., Hesslein, E.H., Fee, E.J., Schindler, D.W. (1979) - Whole lake tritium spikes to measure horizontal and vertical mixing rates. *Isotopes in Lake Studies*, pp. 175-194, IAEH, Vienna.

Schlatter, J., Hofer, M., Imboden, D.M. (1990) - Die Verwendung von Schwefelhexafluorid zum Studium von Transportprozessen in Seen. *Gas-Wasser-Abwasser*. 70: 36-42.

Schlatter, J. (1991) - Schwefelhexafluorid als Tracer zum Studium von Mischungsprozessen in Seen. *Dissertation Nr. 9596*, ETH Zürich.

Smart, P.L. und Laidlaw, I.M.S. (1977) - An evaluation of some fluorescent dyes for water tracing. *Water Resources Research*. 13: 15-33.

Smart, P.L. (1982) - A review of the toxicity of 12 fluorescent dyes used for water tracing. *Beiträge zur Geologie der Schweiz. Hydrologie*. 28: 101-112.

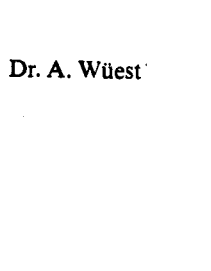
Van Sanden, D.C., Wüest, A., Imberger, J. and Piepke, G. (1992) - Diapycnal diffusion in a small lake: A comparison between microstructure and tracer estimates. In Vorbereitung.

Wüest, A. (1987) - Ursprung und Grösse von Mischungsprozessen im Hypolimnion natürlicher Seen. *Dissertation Nr. 8350*, ETH Zürich.

Adresse der Autoren :



Dipl. phys. F. Peeters



Dr. A. Wüest

Umweltphysik
Institut für Gewässerschutz und
Wassertechnologie, ETH Zürich
c/o EAWAG AG
8600 Dübendorf