

Horizontale Mischung in Seen

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels
eines Doktors der Naturwissenschaften
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN
HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von
FRANK PEETERS
MSc. Physics (FWS), Trent University
geboren am 13. Oktober 1960
in Mönchengladbach, Deutschland

Angenommen auf Antrag von:
Prof. Dr. D. M. Imboden, Referent
Prof. Dr. T. Dracos, Korreferent
Dr. A. Wüest, Korreferent

Zürich 1994

Abstract

Horizontal mixing in the hypolimnion of medium-sized lakes, far from the lake boundaries, was studied by observing the development of the concentration distribution of a tracer subsequent to its point release. The fluorescent dye uranin (sodium fluorescein) served as tracer.

The measuring system comprised a fluorometer, a CTD-sonde and an electronic navigation system. Data acquisition was co-ordinated by a computer program especially developed to allow the rapid survey of three-dimensional tracer distributions. A total of 8 experiments was conducted using this measuring system. The high degree of spatial resolution achieved (both horizontally and vertically), coupled with the large number of surveys (up to 8 per experiment), allowed theoretical models to be tested with greater accuracy than previously possible.

The centre of mass of the tracer clouds was observed to travel with a velocity of up to 2.5 km/day. Since the direction and magnitude of this advective velocity can vary considerably during the course of a day, the location of the point of maximum concentration of a tracer distribution is difficult to predict.

As a result of horizontal mixing, the maximum tracer concentration decreases and the tracer cloud spreads out horizontally. If this spreading is described in Fickian terms, effective horizontal mixing coefficients are found to lie within the range 0.02 - 0.3 m²/s.

Measurements obtained during individual tracer experiments were employed to test theoretical horizontal mixing models. The increase with time in the size of the tracer cloud and in the variance of the tracer concentration distribution along the principal axes were the principal properties of the tracer cloud considered here. None of our experiments supported the hypothesis of a cubic growth in cloud size with time. Thus the measurements obtained in this work disagree with the application of an inertial subrange model, such as that commonly used in the ocean (e.g. Batchelor 1950). The shear-diffusion model of Carter and Okubo (1965), on the other hand, was found not only to provide a good description of the development of cloud size with time, but also to account for the fact that the tracer distributions were not radially symmetric. Published data from individual experiments in Lake Ontario (e.g. Murthy 1976) and in the ocean (e.g. Okubo 1971) support the superiority of the shear-diffusion model over the inertial subrange model.

Kurzfassung

Horizontale Mischung im Hypolimnion mittelgroßer Seen fern der Seeränder wurde mit Hilfe von Tracerexperimenten untersucht. Als Tracer kam der fluoreszierende Stoff Uranin zum Einsatz. Die Einspeisung erfolgte räumlich wie zeitlich möglichst punktuell.

Ein Meßsystem wurde zusammengestellt und ein Programm zur Datenerfassung entwickelt, mit welchem die Konzentrationsverteilung des Tracers sehr schnell dreidimensional vermessen werden kann. Mit diesem Meßsystem wurden insgesamt 8 Experimente durchgeführt. Die räumliche, insbesondere die vertikale Auflösung der Tracerverteilungen und die hohe Anzahl der Vermessungen bei Einzelexperimenten (bis zu 8 innerhalb von 3 Tagen) sind unseres Wissens neuartig.

Die Schwerpunkte der beobachteten Tracerverteilungen bewegten sich mit Geschwindigkeiten bis zu 2.5 km/Tag. Da Richtung und Betrag der Advektionsgeschwindigkeit sehr variabel sind, ist die Vorhersage des Ortes, an dem die Maximalkonzentration einer Tracerverteilung auftritt, schwierig.

Horizontale Mischung führt zu einer Abnahme der Maximalkonzentration und zur Vergrößerung der Tracerverteilungen in der Horizontalen. Beschreibt man die Ausbreitung der Tracerverteilungen analog zur Fick'schen Diffusion, liegen die effektiven horizontalen Diffusionskonstanten zwischen $0.02 \text{ m}^2/\text{s}$ und $0.3 \text{ m}^2/\text{s}$.

Theoretische Modelle für die horizontale Mischung wurden mit Hilfe der in Einzelexperimenten beobachteten Zeitabhängigkeit der Wolkengröße und der Varianzen der Konzentrationsverteilung in Richtung der Hauptachsen getestet.

In keinem der Experimente konnte ein kubisches Wachstum der Wolkengröße mit der Diffusionszeit festgestellt werden. Das Energiedissipationsmodell (Batchelor 1950) steht daher im Widerspruch zu den Meßergebnissen dieser Arbeit. Eine gute Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Wolkengröße und der nicht-radialsymmetrischen Form der Tracerverteilungen liefert hingegen das Scher-Diffusionsmodell von Carter und Okubo (1965). Dieses Modell scheint auch zur Beschreibung von publizierten Tracerexperimenten im Lake Ontario (z.B. Murthy 1976) und im Ozean (z.B. Okubo 1971) dem Energiedissipationsmodell überlegen zu sein.