



Doctoral Thesis

Methode der Temperaturmikrostruktur und deren Anwendung auf die Bodengrenzschicht in geschichteten Wasserkörpern

Author(s):

Gloor, Emanuel Ulrich

Publication Date:

1995

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001512017> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 11336

**Methode der Temperaturmikrostruktur
und deren Anwendung auf die
Bodengrenzschicht in
geschichteten Wasserkörpern**

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

vorgelegt von
Emanuel Ulrich Gloor
Dipl. Phys. ETH
geboren am 19. 1. 1965
in St. Gallen, Schweiz



CaE

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

1995

Zusammenfassung

In natürlichen Wasserkörpern ist der vertikale Stofftransport eine zentrale Grösse. Im Ozean bestimmt er beispielsweise die Aufnahmerate von Kohlendioxid und Fluorkohlenwasserstoffen. In Seen interessiert eher der Transport von Stoffen, welche an Redoxprozessen beteiligt sind. Der vertikale Transport in Wasserkörpern lässt sich aus dem Eindringen von anthropogenen Stoffen wie ^{14}C und durch Messung der Turbulenz mithilfe von hochauflösenden Temperatur- und Schersensoren (Mikrostrukturmethode) bestimmen. Der erste Ansatz kann im Gegensatz zum zweiten die einzelnen Prozesse nicht auflösen und basierend auf diesem ergeben sich im Ozean ungefähr zehnmal grössere vertikale Diffusivitäten. Der Grund für diese Diskrepanz ist unklar.

Temperaturprofile in der Tiefsee über ebenem Grund weisen bezüglich der Temperatur und des Salzgehalts homogenisierte Schichten mit Höhen im Bereich von 100 m auf. Es wurde deshalb von unterschiedlichen Autoren vorgeschlagen, dass Mischung an geneigten Rändern des Ozeans zu einem erhöhten vertikalen Transport im Innern des Ozeans führt. Messungen der Temperatur- und Schermikrostruktur über dem Meeresgrund sind jedoch wegen den technischen Schwierigkeiten rar. Zudem ist es im Ozean schwierig Bilanzen zu erstellen. Als Modellbecken zur Untersuchung der Randmischung bieten sich deshalb kleine Seen wie beispielsweise der Alpnacher- und der Zugersee an.

Diese Arbeit ist der Entwicklung der Methode der Temperaturmikrostruktur und der Untersuchung der Struktur und der Mischung in der Bodengrenzschicht in diesen zwei Seen gewidmet. Sie umfasst einen Überblick des Forschungsstands, eine sorgfältige Darstellung der Theorie und der Methode zur Bestimmung von Dissipationsraten aus Profilen der Temperaturmikrostruktur sowie die Diskussion von vier im Alpnacher- und Zugersee ausgeführten Feldexperimenten.

Das erste Experiment befasst sich mit Beckenschwingungen (Seiches) im Alpnachersee, der Bodenreibung der Strömung aufgrund der Beckenschwingungen und einer Abschätzung der von der Bodenreibung initiierten Resuspension von Partikeln. In Bodennähe über der tiefsten Seestelle finden sich stets bezüglich der Temperatur homogenisierte Schichten mit im Vergleich zum Innern des Sees erhöhter Lichtextinktion und Höhen im Bereich von 5 m. Die Daten zeigen zudem, dass sporadische Ereignisse mit vergleichsweise grossen Geschwindigkeiten von 7 cm/s und von ~ 15 min Dauer auftreten. Die Resuspension von Partikeln mit einer Dichte von organischem Material bei solchen Ereignissen ist möglich, die Resuspension von Partikeln mit der Dichte von anorganischem Material ist jedoch unwahrscheinlich.

Mit dem zweiten Experiment wurde mit der Aufzeichnung von Geschwindigkeitszeitreihen im Zugersee in unterschiedlichem Abstand vom Seegrund versucht, die Struktur der Turbulenz über dem Sediment und den Widerstandskoeffizienten des Bodens auf die Strömung zu bestimmen. Die Profile weisen etwa zur Hälfte Inertialbereiche auf, aus welchen sich Energiedissipationsraten bestimmen lassen. Die Dissipationsraten nehmen gegen den Grund hin deutlich zu. Der Widerstandskoeffizient des Bodens wurde sowohl aus den Dissipationsraten

als auch aus gemittelten Geschwindigkeitsprofilen unter der Annahme eines logarithmischen Geschwindigkeitsprofils bestimmt. Die beiden Werte decken sich innerhalb der Fehlergrenzen und im Mittel ergibt sich $c_{1m} = (5.9 \pm 1.4) \times 10^{-3}$.

Die zwei letzten Feldexperimente wurden in den Jahren 1993 und 1994 im Alpachersee ausgeführt, um die Bedeutung der Mischung über ebenem Grund bei der tiefsten Seestelle und an einem geneigten Rand für den gesamten vertikalen Transport im Hypolimnion dieses Sees zu klären. Als Diskussionsgrundlage dienen je ungefähr 300 Profile der Temperaturmikrostruktur. Zusätzlich wurden kontinuierlich über der tiefsten Seestelle und an einem Seeende Temperaturprofile sowie die horizontale Geschwindigkeit an der tiefsten Seestelle 3.9 m beziehungsweise 1.4 m über Grund aufgezeichnet.

Die folgenden Resultate wurden gefunden: Die Beckenschwingungen waren während den zwei Messperioden sehr unterschiedlich angeregt, im Herbst 1993 schwach und im Sommer 1993 stark. Während der Messperiode des Jahres 1994 ist die Intensität der Beckenschwingungen gut mit der Windanregung und der Wärmefluss gut mit deren Abklingphase korreliert. Zudem korreliert der Energieverlust der Strömung aufgrund des Widerstands des Seegrundes sehr gut mit dem vertikalen Wärmefluss. Dies erlaubt, den vertikalen Wärmefluss via die Bodenreibung zu parametrisieren. Profile der Energiedissipation zeigen über dem Seegrund viel stärkere Signale, als im Innern des Hypolimnions (Faktor 10 – 100). Die Abnahme der Energie der Seiches nach einer starken Windanregung ist ungefähr gleich gross wie der Energieverlust der Strömung aufgrund des Widerstands der Bodenberandung. Diese Beobachtungen stützen die Hypothese, dass im Alpachersee Randmischung für den vertikalen Wärmetransport im Hypolimnion verantwortlich ist. Das Verhältnis aus dem gesamten Auftriebsfluss unterhalb der Thermokline zum Energieverlust der Strömung aufgrund des Widerstands der Seeberandung, die Mischungseffizienz, ist nur geringfügig kleiner als Laborwerte. Bei starker Schwingungsanregung des Sees findet sich über ebenem Grund bei der tiefsten Seestelle immer eine gemischte Bodenschicht mit einer Höhe von ~ 5 m. Ist keine Anregung vorhanden, so zerfällt die Höhe der gemischten Bodenschicht über eine Zeitskala von 10 – 20 Tagen.

Die Höhe der gemischten Schicht über ebenem Grund an der tiefsten Seestelle folgt gut dem Skalierungsgesetz $h_{mix} = 2^{3/4} u_* / \sqrt{Nf}$ von Pollard et al. [67]. An der geneigten Bodenberandung sind gemischte Schichten deutlich kleiner - die Höhe nimmt ungefähr proportional zur Stabilität ab - und sie treten räumlich viel intermittierender auf. Zwischen Temperaturprofilen über geneigter Bodenberandung und über ebenem Grund an der tiefsten Seestelle besteht eine Asymmetrie. Profile über einer geneigten Bodenberandung weisen Stufen mit homogener Temperatur auf, Profile über ebenem Grund bei der tiefsten Seestelle nicht. Diese Strukturen sind möglicherweise auf druckgetriebene Intrusionen zurückzuführen, welche bei Mischung am geneigten Rand entstehen. Dies würde das intermittierende Auftreten von gemischten Schichten am geneigten Rand erklären und Mischung am geneigten Rand wäre deshalb, im Einklang mit der gefundenen Mischungseffizienz, effizienter als bisher angenommen.

Abstract

In natural water bodies the vertical transport is a quantity of central importance. Whereas in the ocean it determines the absorption rate of carbon dioxide and FCKW's from the atmosphere, in lakes the interest concentrates rather on the transport of reducing and oxidizing substances in the hypolimnion. The vertical transport in natural water bodies may be determined from the penetration in the water body of substances of anthropogenic origin like ^{14}C or by measuring directly the turbulence by sampling temperature or shear profiles with high sampling rates (microstructure method). The first method averages the effect of all processes involved and gives ten times larger vertical diffusivities compared to the second, local method. The reason for this discrepancy is not clear.

Profiles of temperature directly over the bottom in the abyssal zone exhibit homogenized layers with respect to temperature and salinity of $\sim 100\text{ m}$ height. That is why several authors suggested that mixing at the boundaries of the ocean might be responsible for the discrepancy mentioned. Nevertheless profiles of microstructure in the ocean are rare due to technical difficulties. Furthermore in the ocean it is difficult to balance quantities such as heat. For the study of boundary mixing hence small lakes are ideal.

This work is devoted to the development of the temperature microstructure method and the study of the structure and mixing in the bottom boundary layer of two small lakes. It contains an overview of the research in this field, a careful representation of the theory and the method to determine dissipation rates from profiles of temperature microstructure as well as the discussion of four field experiments which have been performed in Lake Alpnach and Lake Zug.

The first experiment deals with internal basin-scale oscillations (Seiches) of Lake Alpnach, the bottom friction of the current due to the oscillations and an estimate of the resuspension due to bottom friction. Near the sediment at the deepest site of the lake a layer which is homogenized with respect to temperature and in which the extinction of light is larger compared to the lake interior is always found. Furthermore the data show that sporadic events with comparably high velocities of 7 cm/s and $\sim 15\text{ min}$ duration occur. Resuspension of particles of organic origin during such events is possible whereas for particles with density of inorganic particles it is not.

The aim of the second experiment was to get insight in the structure of turbulence at a sloping boundary in Lake Zug and to determine the friction coefficient of the bottom with help of current measurements with increasing distance from the bottom. About half of the velocity time series exhibit an inertial range and from these it is possible to determine dissipation rates. Dissipation rates increase with decreasing distance from bottom. The friction coefficient was determined from profiles of the mean velocity as well as from dissipation rates assuming a logarithmic velocity profile. Both values agree within the error range with mean value $c_{1m} = (5.9 \pm 1.4) \times 10^{-3}$.

The last two field experiments have been performed in the years 1993 and 1994 in Lake Alpnach. During the first period of measurement the lake was only

slightly excited whereas during the second period it was much more excited. During the experiment in the year 1994 the oscillations of the lake correlate well with the wind excitation and the vertical heat flux is well correlated with the phase of decay of the seiches. Furthermore the energy loss of the flow due to bottom friction correlates well with the vertical heat flux. These findings allow to parameterize the vertical heat flux by the energy loss due to bottom friction. Profiles of energy dissipation show a much larger signal over bottom compared to the interior of the hypolimnion (factor 10 – 100). The energy loss of seiches after a strong wind excitation agrees well with the energy loss of the current due to friction at the bottom boundary of the lake. These findings support the hypothesis that the vertical transport in the hypolimnion is mainly due to boundary mixing. The ratio of the entire buoyancy flux below 4.55 m depth to the energy loss due to bottom friction (0.07 – 0.14) is only slightly smaller than values usually found in the laboratory. When the seiching motion of the lake is strongly excited over an even bottom at the deepest site of the lake there are always homogeneous layers with respect to temperature of ~ 5 m height. If there is no wind excitation these layers decay over a time scale of 10 – 20 d.

The height of bottom mixed layers over an even bottom at the deepest site of the lake follow a scaling law $h_{mix} = 2^{3/4} u_* / \sqrt{Nf}$ which has been deduced by Pollard et al. [67] for the wind driven mixed surface layer of the ocean. At a sloping boundary mixed layers are much smaller - their height decreases approximately proportionally to the stability - and their appearance is much more intermittent. There is an asymmetry between profiles of temperature measured at a sloping or an even bottom over the deepest site. Profiles over a sloping bottom exhibit a steplike structure over the whole water column whereas temperature profiles over the deepest site of the lake do not. These structures are possibly due to intrusions driven by the pressure gradient relative to the lake interior of boundary mixed water. This hypothesis would explain the intermittent appearance of mixed layers at a sloping boundary and if this hypothesis is true mixing at a sloping boundary, in accord with the value of the mixing efficiency determined from the data, is possibly more efficient than believed until now.