



Doctoral Thesis

Ursprung und Grösse von Mischungsprozessen im Hypolimnion natürlicher Seen

Author(s):

Wüest, Alfred

Publication Date:

1987

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000413795> →

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. 8350

Ursprung und Grösse von Mischungsprozessen im Hypolimnion natürlicher Seen

ABHANDLUNG

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

vorgelegt von
ALFRED WÜEST
dipl. phys.
geboren am 28. August 1956
von Grossdietwil (LU)

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

ADAG Administration & Druck AG

Zürich 1987

11 ZUSAMMENFASSUNG

Vom Frühling bis Herbst 1986 wurde auf dem Urnersee während 8 Monaten eine Messkampagne durchgeführt, welche die Bestimmung und den Vergleich verschiedener wind- und zufluss-induzierter vertikaler Mischungsprozesse im Hypolimnion zum Ziel hatte. Insbesondere interessierte die Wassererneuerung im tiefen Hypolimnion. Daher wurden in den Mündungsbereichen von Reuss und Muota Temperatur- und Strömungs sonden zur quasi-kontinuierlichen Beobachtung der Zuflüsse verankert. Eine Meteoboje und eine Thermistorkette in Seemitte dienten zur Bestimmung der - im Gegensatz zu den Zuflüssen - den ganzen See erfassenden wind-induzierten vertikalen Mischung.

Es konnten - zeitlich getrennt - drei dominante wind-induzierte Mischungsprozesse unterschieden werden: durch heftige Föhnwinde angetriebene grossräumige Zirkulationsströmungen (einige cm/s) im April, dichtebedingter lateraler Wasseraustausch zwischen Gersauer- und Urnersee im Mai und Juni und vertikale Wirbeldiffusion im Sommer und Herbst.

Bezüglich der zufluss-induzierten Mischung im Hypolimnion konnten drei Einschichtungscharakteristiken unterschieden werden: Einmischung über die gesamte Wassersäule bis zirka Mitte Mai und anschliessend Einschichtung an der Oberfläche und in der Sprungschicht bis ungefähr 25m Tiefe. Diesem jahreszeitlichen Verlauf waren gewitterbedingte Trübestrome ins tiefe Hypolimnion überlagert.

Als Folge dieser unterschiedlichen Prozesse wurde die Mischung im Hypolimnion im April direkt und im Mai und Juni indirekt durch den Wind dominiert. Im Sommer und Herbst wurde die Mischung im tiefen Hypolimnion durch Trübestrome, in der Sprungschicht durch einschichtende Zuflüsse und im mittleren Hypolimnion durch wind-induzierte vertikale Diffusion bestimmt. Zur Zeit der maximalen Zuflüsse (Mai-Juli) schichtete sich das Zuflusswasser oberflächlich ein, so dass die Aufenthaltszeit des Epilimnionwassers nur etwas mehr als einen Monat betrug.

Mit einem einfachen Einmischungsmodell, das anhand von Leitfähigkeitsmessungen im Mündungsbereich und der Wärmebilanz im tiefen Hypolimnion geeicht wurde, konnte die Einschichtung der Zuflussstrahlen in der Sprungschicht und der Verlauf der Trübestrome nachgezeichnet werden. Damit wurde der Massen- und Wärmetransport ins tiefe Hypolimnion abgeschätzt.

Aufgrund der verschieden starken wind- und zufluss-induzierten Mischung im Gersauer- und Urnersee liessen sich die unterschiedlichen Entwicklungen der vertikalen Temperaturstrukturen in den beiden benachbarten Seebecken qualitativ gut verstehen.

Ebenfalls mit quasi-kontinuierlichen Temperatur- und Meteoromessungen wurde im Baldegger- (Dez.80 - Feb.82) und im Sem-pachersee (Nov.82 - Feb.84) die wind-induzierte vertikale Wirbeldiffusion bestimmt und der Diffusionskoeffizient K_z in Funktion der Windgeschwindigkeit über der Seeoberfläche W_d , der Stabilität N^2 und der Tiefe z folgendermassen parametrisiert:

$$K_z(z) = B(z) \cdot W_d^3 / N^2(z) \quad (1)$$

Innerhalb der Fehlergrenzen bei der Bestimmung von W_d^3 konnte diese Beziehung anhand einiger Perioden unterschiedlicher Windgeschwindigkeit und Stabilität verifiziert werden. Es zeigte sich, dass K_z entsprechend der Variation der drei in der Gleichung vorkommenden Parameter 5 Größenordnungen umfasst (10^{-2} - 10^3 cm²/s). Wird K_z über längere Zeiträume gemittelt, dominieren somit einzelne Ereignisse.

Der zu $B(z)$ proportionale Auftriebsfluss fällt im Hypolimnion mit der Tiefe meist exponentiell ab. Die Eindringtiefe scheint von der Geometrie des Sees abhängig zu sein. Daraus wird verständlich, dass der Exponent im Ansatz

$$K_z = a \cdot N^{-2q}, \quad (2)$$

der in der Literatur häufig zu finden ist, von See zu See variiert.

Der Anteil der eingetragenen turbulenten kinetischen Energie, der in potentielle Energie im Hypolimnion umgewandelt wird, beträgt um 20% und stimmt mit Laborergebnissen recht gut überein.

Die Parametrisierung der Wirbeldiffusion wurde in ein einfaches vertikales Sprungschichtmodell integriert, das auf der Wärmebilanz an der Oberfläche und der Sprungschichtabsenkung durch konvektive und winderzeugte Turbulenz basiert. Die Temperaturentwicklung im Sempacher- und Baldeggersee konnte trotz des nur ungenauen turbulenten kinetischen Energieinputs durch den Wind gut beschrieben werden. Es zeigte sich, dass die genaue Kenntnis der thermischen Energieflüsse an der Seeoberfläche die wichtigste Voraussetzung für ein gutes Modell bildet. Sie ist allerdings nicht leicht zu erfüllen wegen der variablen Emissivität der Atmosphäre.

12 SUMMARY

In 1986, for a period of seven months, physical parameters were measured in Urnersee, the southern basin of Lake Lucerne (Switzerland) in order to compare mixing induced by wind and river inlets respectively. Water renewal by underflow events was monitored by temperature and current meters moored closely to the mouths of the two major rivers (Reuss and Muota) flowing into Urnersee. Vertical mixing due to wind was observed by a meteorological buoy and a thermistor chain moored in the center of Urnersee.

According to our observations wind induced mixing can be classified into the following categories: (1) deep circulation driven by the stormy southerly wind called Föhn (occurrence in April when lake stratification is still weak), (2) horizontal density currents from the adjacent basin (Gersauersee) due to dissimilar wind mixing in the two basins, and (3) wind induced vertical eddy diffusion during the period of well established stratification.

Mixing due to rivers can be subdivided into three categories: (1) inflow into the whole water column (April to May), (2) inflow into the surface mixed layer or intrusion into the thermocline (above 25m), and (3) underflows into the deep hypolimnion during flooding.

As a result of the three mechanisms, in spring and early summer, mixing in the hypolimnion was dominated by wind induced processes, either by direct energy input as in April or due to the indirect effect of horizontal density currents as in May and June. Later, in summer and fall, mixing in the deep hypolimnion was driven by river water underflow. Input of heat and water mass into the hypolimnion were quantified with a simple jet model. Entrainment was calibrated with in situ measurements of conductivity and temperature.

The effect of the wind on vertical eddy diffusion, a process of less importance in Urnersee, was studied in two small lakes, Sempachersee and Baldeggersee, where mixing by river is not as important. Vertical eddy diffusivity K_z can be related to the third power of the wind speed above the lake surface, W_d^3 , and the stability frequency N by the equation (z : depth in the water column)

$$K_z(z) = B(z) \cdot W_d^3 / N^2(z) \quad (1)$$

Evaluation of K_z from temperature measurements (Baldeggersee: Dec. 1980 to Feb. 1982; Sempachersee: Nov. 1982 to May 1984) show equation (1) to be valid over the five orders of magnitude (10^{-2} to 10^3 cm²/s) resulting from the natural variation of W_d^3 and N^2 respectively.

The buoyancy flux (proportional to $B(z)$) mostly drops exponentially with the depth z in the hypolimnion. The length scale z_0 increases with the surface area of the lake (Baldeggersee: $A=5.2$ km², $z_0 \approx 4$ m; Sempachersee: $A=14$ km², $z_0 \approx 8$ m; Urnersee: $A=23$ km², $z_0 \approx 25$ m). Therefore, the exponent q of the frequently used simplified relation

$$K_z = a \cdot N^{-2q} \quad (2)$$

must vary between lakes. Yet, in all lakes the fraction of turbulent kinetic energy converted to potential energy, the Flux-Richardson-Number, is about 0.2.

Parametrization of vertical eddy diffusivity by equation (1) was employed in a simple one-dimensional model describing the dynamics of the vertical temperature distribution in lakes resulting from heat exchange and wind forcing at the water surface.

Application of the model to Baldeggersee and Sempachersee shows an accurate correspondence between computed and measured temperatures. Major uncertainties regarding the model applications are related to the measurements of long-wave radiation from the sky and to the turbulent kinetic energy input by the wind.