

## VERÄNDERUNGEN IM SAUERSTOFFHAUSHALT DES BODENSEES

H. LEHN\*

### *Abstract*

The maxima of dissolved oxygen in spring and the minima in autumn in various depth of the Lake of Constance (Bodensee-Obersee) have changed from 1952/64 to 1974. The statistical analysis results lines of regression for the maxima in spring in 0 m and 250 m depth and for the minima in autumn in 20 m and 250 m depth. These lines are significant for the intensification of the assimilation and dissimilation of the Lake of Constance during the eutrophic process.

In der Stoffwechselbilanz eines Sees steht der gelöste Sauerstoff an entscheidender Stelle. Photosyntheseprozesse der Planktonalgen setzen in der lichtreichen Wasserschicht Sauerstoff frei, wobei oft Übersättigungen vorkommen. Umgekehrt wird beim Abbau organischer Substanz in den größeren Tiefen Sauerstoff verbraucht. Diese biogene Sauerstoffschichtung während der Sommerstagnation wird durch die Vollzirkulation tiefer Seen im Winter, einem physikalischen Vorgang, in der Vertikalen wieder ausgeglichen. Aus dem wechselnden Gehalt an gelöstem Sauerstoff im Vertikalprofil, im Jahreszyklus und über längere Zeiträume lassen sich Verschiebungen im Seestoffwechsel ablesen.

Im Folgenden werden die Veränderungen des Sauerstoffgehaltes des 252 m tiefen Bodensee-Obersees im Zeitraum von 1952 bis 1974 betrachtet, in einer Zeitspanne, in der seine „Eutrophierung“ an Hand der Phosphatzunahme von 3 auf 70 mg/m<sup>3</sup> gekennzeichnet war (z.B. WAGNER 1970). Aus den umfangreichen Sauerstoffuntersuchungen des Max-Auerbach-Instituts in Konstanz-Staad (z.B. MUCKLE 1964), wird, im Gegensatz zu SCHMITZ (1967), über die statistische Bearbeitung der jährlichen Sauerstoffextreme, der Frühjahrsmaxima zur Zeit der Algenhochproduktion und der Herbstminima, die den Höchststand der Abbauvorgänge kennzeichnen, in 12 Tiefenstufen von 0 m bis 250 m berichtet. Seit 1952 liegen zumeist aus Seemittestationen Messungen der 10 m-Stufen von 0–50 m, seit 1961/65 auch aus weiteren Tiefenstufen vor.

Als Beispiele seien die 0 m- und 250 m-Extreme herausgegriffen (Abb. 1). In 0 m ist ein unregelmäßiger Anstieg der Sauerstoffmaxima von 12 mg/l auf mehr als 20 mg/l unverkennbar, während die Jahresminima wenig verändert im Bereich von 8–10 mg/l liegen. In 250 m gehen Maxima und Minima bis 1974 deutlich zurück, wobei mehrjährige Schwankungen auf extreme Witterungsabläufe hinweisen, die an anderer Stelle behandelt werden.

Hier sollen die langfristigen Sauerstoffveränderungen ohne die Einwirkung von Witterungsextremen herausgearbeitet werden. Dem dient die statistische Regres-

\* Mit Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft.

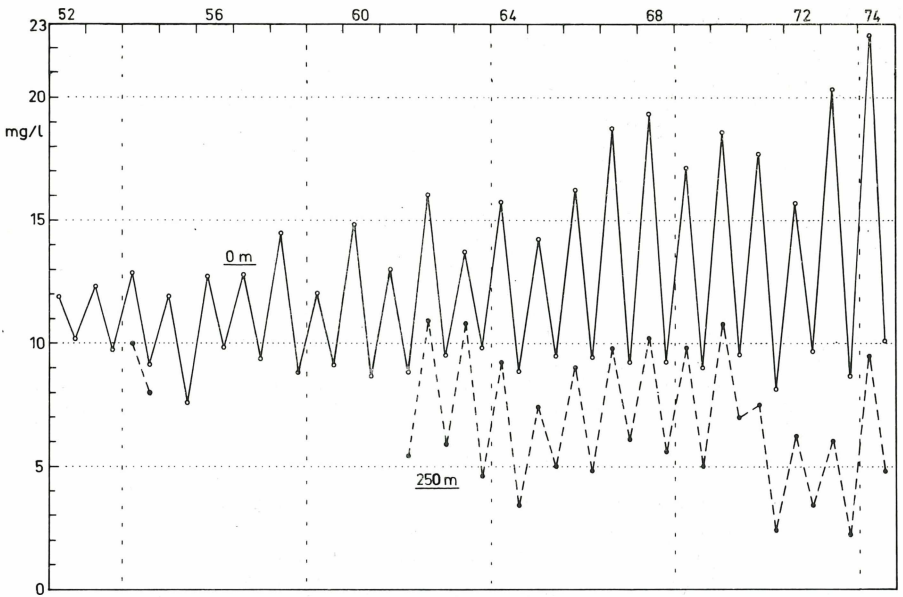


Abb. 1. Jährliche Frühjahrsmaxima und Herbstminima des gelösten Sauerstoffs in mg/l in 0 m und 250 m Tiefe des Bodensees.

sionsanalyse nach der Gleichung  $y = a + b \cdot x$ , wobei  $y$  die Zielgröße ist, die durch die Einflußgröße  $x$  verändert wird. Letztere ist als „Zeit“ meßfehlerfrei vorgegeben: Die Maßeinheiten sind die Jahre von 1952 bis 1974. Nur  $y$  ist eine Zufallsvariable, die in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf stark schwanken kann, wie z.B. die 0 m-, 10 m- und 50 m-Maxima und die 50 m- und 250 m-Minima zeigen (Abb. 2). In die Punktschwärme dieser Tiefenstufen sind jeweils die lineare Regression 1. Grades liniert sowie die Regressionskurve 4. (bzw. 3.) Grades punktiert eingezeichnet. Letztere paßt sich den Meßwerten an und gibt die Ereignisse des Meßzeitraumes in gemilderter Form wieder. Sie wird mit längerem Meßzeitraum stabiler, wie z.B. die 0 m-Maxima-Kurve im Gegensatz zur kürzeren 250 m-Minima-Kurve zeigt. Bei der linearen Regression 1. Grades werden die witterungsbedingten Extreme unterdrückt.

Die polynomialen Regressionsberechnungen wurden in dankenswerter Weise von Mitarbeitern des Rechenzentrums der Universität Konstanz am TR 4-Rechner durchgeführt.

Einen Überblick über diese Regressionsberechnungen vermittelt Abb. 3. Die Frühjahrsmaxima (Abb. 3a,c) fächern sich von 90–130 Sättigungs-% des Jahres 1952 auf 60–210 Sättigungs-% des Jahres 1974 auf. Dabei steigen die Maxima in den oberen 10 m merklich an, während sie in den Tiefen von 20–75 m kaum verändert sind. In den Tiefen von 100–200 m gehen sie wenig, in denen von 230 und 250 m stärker zurück. Eine ideale Auffächerung der Regressionslinien mit zunehmender Tiefe ist auch unterhalb von 50 m bei längeren Meßreihen anzunehmen.

Das Gleiche gilt für die Herbstminima (Abb. 3b,d), die von 1952 bis 1974 insgesamt kleiner werden. Sie ändern sich in 0–10 m Tiefe nur wenig, in größeren

Tiefen zunehmend mehr. Hiervon weicht die 20 m Tiefe deutlich ab: Nach Lage und Rückgang fällt sie in den Bereich der Tiefenstufe 150–200 m, in eine Zone größeren Sauerstoffverbrauchs. Auf letzteres hat schon GRIM (1955) hingewiesen.

Der Regressionskoeffizient gibt die jährliche positive oder negative Steigung der Regressionslinie an. Seine Werte sind in Abb. 4 im Vertikalprofil für die Maxima

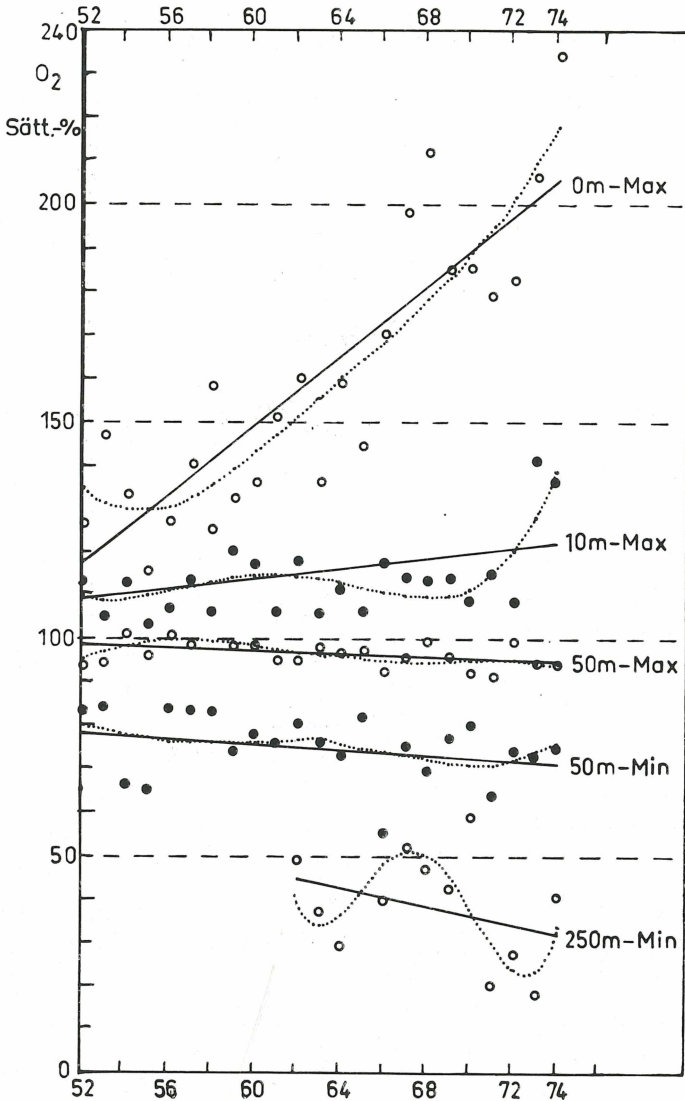


Abb. 2. Vergleich der jährlich gemessenen Frühjahrsmaxima und Herbstminima des gelösten Sauerstoffs (Kreise bzw. Punkte) mit den Regressionslinien 1. Grades (ausgezogene Linie) und 4. Grades (punktierter Kurve) in einigen Tiefenstufen von 1952 (1962) bis 1974 in mg/l; Max = Frühjahrshöchstwerte, Min = Herbstniedertwerte.

und die Minima dargestellt. Je länger die Meßreihe ist, z.B. im 0–50 m-Bereich ab 1952, desto stabiler ist er; unterhalb 50 m scheint er derzeit noch zu streuen. Dennoch ist in 230–250 m Tiefe für die Maxima wie die Minima der größte jährliche Sauerstoffrückgang von 0,2 mg/l oder etwa 2% der Sauerstoffsättigung festzustellen. Dieser Rückgang ist auf eine laufend größer werdende Abbaubelastung des Tiefenwassers zurückzuführen, dessen Sauerstoffgehalt zudem während der Winterzirkulation des Sees immer weniger vollständig regeneriert wird.

In mittleren Tiefen ist der negative Regressionskoeffizient kleiner. Für die Herbstminima zeichnet sich in 20 m Tiefe, im Bereich der Thermokline und des metalimnischen Abbauhorizontes, nochmals eine Vergrößerung des negativen Regressionskoeffizienten ab. Zur Wasseroberfläche geht er auf Null zurück: Das Herbstminimum bleibt hier über Jahrzehnte unverändert.

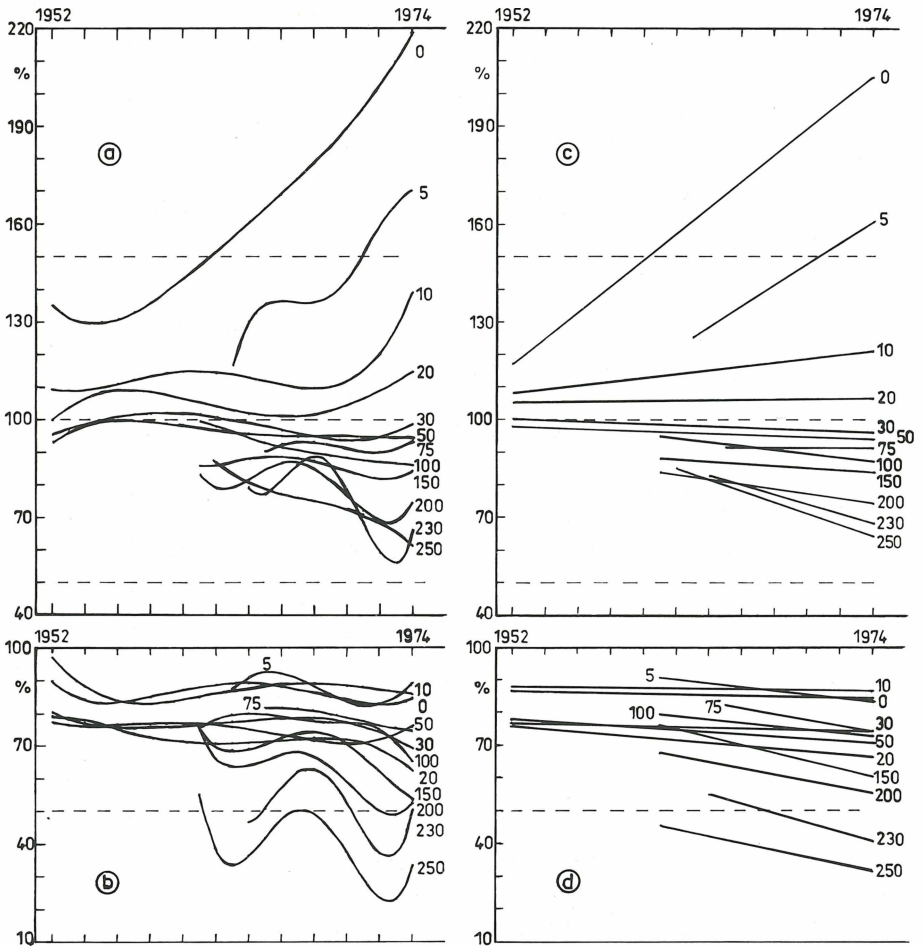


Abb. 3. Regressionslinien 4. Grades (a, b) und 1. Grades (c, d) von 12 Tiefenstufen für die Frühjahrsmaxima (a, c) und Herbstminima (b, d) des Sauerstoffs in Sättigungs-%.

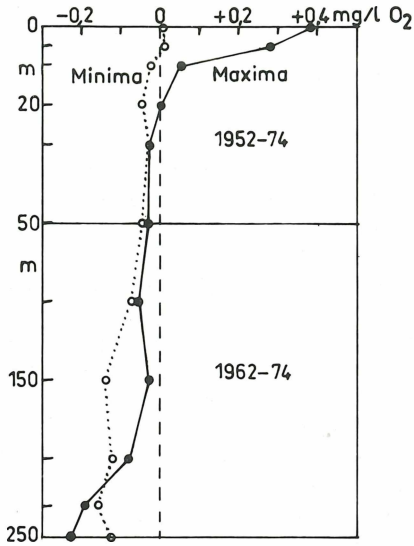


Abb. 4. Vertikalprofile des Regressionskoeffizienten der jährlichen Sauerstoff-Maxima und -Minima in mg/l.

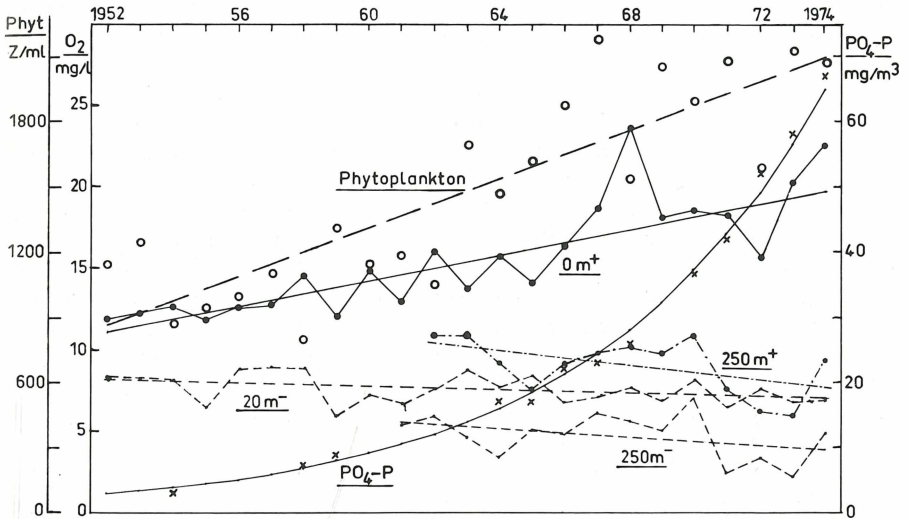


Abb. 5. Jahreswerte und Regressionslinien der Sauerstoffmaxima (+) in 0 m und 250 m sowie der Sauerstoffminima (-) in 20 m und 250 m Tiefe; Phyt = Phytoplanktondichte in Zellen/ml als Jahreswerte (Kreise) und als Regressionslinie in der 0-10 m-Produktionszone;  $PO_4-P$  = Phosphat Spiegel in  $mg/m^3$  zu Frühjahrsbeginn in Einzelwerten (Kreuze; z.T. nach verschiedenen Bearbeitern aus WAGNER 1970) sowie in geometrischer Reihe (jährlich + 15%).

Der Regressionskoeffizient der Frühjahrsmaxima durchschreitet die Null-Linie in 20 m Tiefe und wird nach oben positiv. Die Zunahme der Algenproduktion im Frühjahr läßt ihn in der 0–5 m-Wasserzone um jährlich 0,3–0,4 mg/l Sauerstoff ansteigen, ebenfalls ein Hinweis auf eine beträchtliche Intensivierung des Seestoffwechsels.

Nach dem bisher Dargelegten eignen sich die Sauerstoff-Regressionslinien der 0 m-Maxima, der 250 m-Maxima, der 250 m-Minima aber auch der 20 m-Minima zur Kennzeichnung von langfristigen Stoffwechseleränderungen im Bodensee. Sie sind zusammen mit der Phytoplankton-Regressionslinie, für die ein positiver Regressionskoeffizient von rund +50 Z/ml (= Zellen je Milliliter Wasser der 0–10 m-Produktionszone) für den Zeitraum von 1952 bis 1974 gilt, und dem logarithmisch ansteigenden Phosphatgehalt mit einer jährlichen Steigungszunahme von 15% in Abb. 5 eingetragen, ergänzt durch die einzelnen Meßwerte. Diese werden vor allem von extremen Witterungseinwirkungen sowie vom Stichprobenfehler beeinflusst und weisen eine nur geringe Übereinstimmung zur Einflußgröße „Zeit“ auf. Dagegen sind die errechneten Phytoplankton- und Sauerstoff-Regressionslinien untereinander und mit der „Zeit“ korrelierbar.

Werden in einem Koordinatensystem die vorgegebenen Größen „Zeit“ von 1952 bis 1974 linear und „Phosphat“ logarithmisch auf der X-Achse aufgetragen und die beeinflussten Größen des Seestoffwechsels „Sauerstoffextreme“ und „Phytoplankton“ linear auf der Y-Achse, dann ergeben die hineingelegten Regressionslinien mehrere geeignete „Kennlinien“ der Veränderung der Produktivität und des Stoffwechsels im Epi-, Meta- und Hypolimnion des Bodensees (Abb. 6). Danach ist eine Phosphatverdoppelung in jeweils 5 Jahren von z.B. 3 auf 6 wie von 30 auf 60 mg/l mit einem gleichgroßen Sauerstoff-Anstieg oder -Rückgang und einer gleichgroßen Phytoplankton-Zunahme verbunden: Phosphat wird, relativ gesehen, laufend uneffektiver.

Hier geht es nun einerseits darum, mögliche „Kennlinien“ zur Einordnung des Ökosystems Bodensee in ein für Seen allgemein gültiges System zu gewinnen, das die heute unharmonisch gewordene Beziehung der Seetypenlehre von THIENEMANN (1925) zwischen der z.B. oligotrophen Beckenform und dem heute eutrophen Nährstoffniveau des Bodensees überwinden hilft (LEHN 1972a).

Andererseits sollen die „Kennlinien“ zeigen, wohin und vor allem wie schnell sich der Stoffwechsel eines See-Ökosystems bei weiter zunehmender Abwasserbelastung und Erhöhung der Phosphatmengen oder auch bei erfolgreicher Abwasseranierung und Reduzierung des Phosphatspiegels verändert. Im Falle des Bodensees ist die Entwicklung bei weiterer Erhöhung des Phosphatspiegels sehr bedenklich, da in ungünstigen Jahren schon jetzt oberflächlich unangenehm große Phytoplanktonmengen vorkommen, indem sie „Wasserblüten“ bilden, und in großen Tiefen Sauerstoffmangel eintritt.

Des Weiteren kann aus diesen „Kennlinien“ ein ganz konkretes Sanierungsziel für den Bodensee postuliert werden, wobei der Phosphatspiegel zu Ende der Winterzirkulation auf weniger als 10 mg/m<sup>3</sup> Wasser zu senken ist (LEHN 1972b, 1975). Das würde einem Seezustand zu Ende der 50er Jahre mit etwa 60% der heutigen Phytoplanktonmenge und einem um die Hälfte höheren Sauerstoffgehalt der Frühjahrsmaxima und Herbstminima in der größten Tiefe entsprechen. Dazu kommt die witterungsbedingte Streuung der Werte.

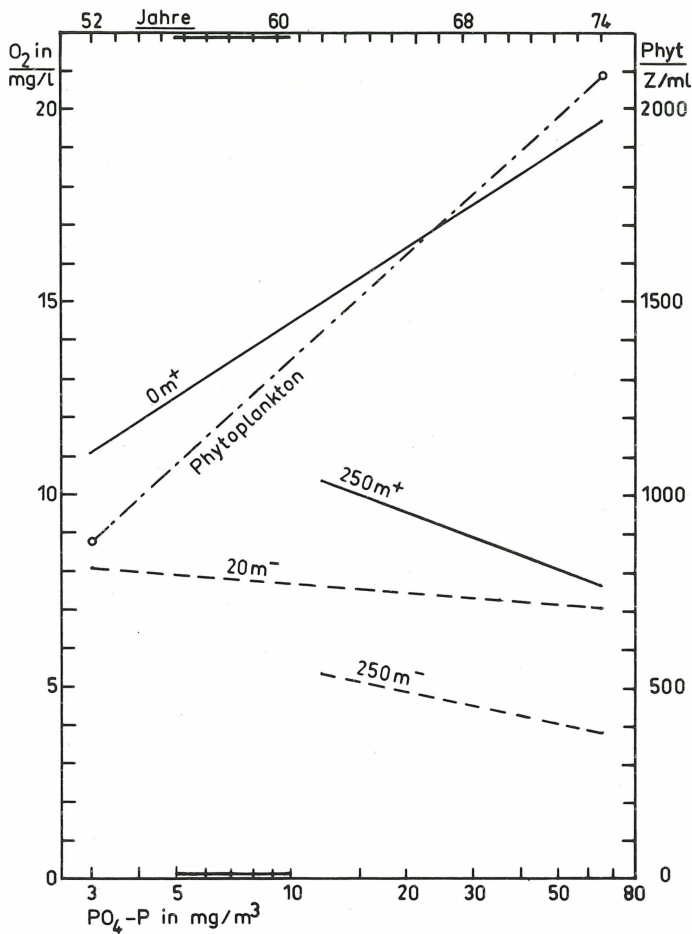


Abb. 6. Beziehung der Jahre (linear) und des Phosphat-Phosphors (logarithmisch) zu den Regressionslinien stark veränderter Sauerstoffextreme (+ = Maxima, - = Minima) und des Phytoplanktons; Markierung des erstrebten Phosphatspiegels.

## LITERATUR

- GRIM, J. (1955): Die chemischen und planktologischen Veränderungen des Bodensee-Obersees in den letzten 30 Jahren. *Arch. Hydrobiol./Suppl.* 22: 310–322.
- LEHN, H. (1972a): Zur Trophie im Bodensee, *Verb. Internat. Verein. Limnol.* 18: 467–474.
- LEHN, H. (1972b): Das Bodensee-Pelagial unter der zunehmenden Nährstoffbelastung. Tagungsbericht d. Ges. f. Ökologie, Gießen 1: 77–84.
- LEHN, H. (1975): Entwicklung des Bodensee-Pelagials seit 1920. *GWF – Wasser/Abwasser* 116: 170–175.
- MUCKLE, R. (1964): Die Sauerstoffschichtung im tiefen Hypolimnion des Bodensee-Obersees 1963/64 mit Berücksichtigung einiger Untersuchungsergebnisse aus früheren Jahren. *Int. Gewässerschutzkommission f. d. Bodensee, Bericht* 3: 1–18.

- SCHMITZ, W. (1967): Die Sauerstoffbilanz des Bodensee-Obersees. Int. Gewässerschutzkommission f.d. Bodensee, Bericht 8: 1–19.
- THIENEMANN, A. (1925): Die Binnengewässer Mitteleuropas. Bd.1: Eine limnologische Einführung. 255 S. Schweitzerbarth, Stuttgart.
- WAGNER, G. (1970): Die Zunahme der Belastung des Bodensees. *GWF – Wasser/Abwasser* 111: 485–487.

Anschrift des Verfassers:

Dr. H. LEHN, Landesanstalt für Umweltschutz: Abt. V, Institut für Seenforschung und Fischereiwesen, D-775 Konstanz-Staad, Schiffstr. 56.