

Das Bodensee-Pelagial unter der zunehmenden Nährstoffbelastung

Hubert Lehn

Der Bodensee mit seinen verschiedenen Teilbecken liegt beim Austritt des Rheins aus den Alpen (Abb.1). Der 252 m tiefe Obersee enthält zusammen mit dem Überlinger See 47 km³ Wasser bei einer Fläche von 475 km². Neunzehn Trinkwasserwerke entnahmen ihm 1971 rund 141 Mio. m³ Wasser aus 35 bis 60 m Tiefe.

Drei verschiedene Biotope lassen sich unterscheiden: Das Litoral (= Uferzone), das bis etwa 10 m Wassertiefe reicht, umfaßt gürtelartig sowohl das tiefe Profundal (= Seeboden) als auch das hier behandelte Pelagial (= Freiwasserraum), dem 86 % der Wasserfläche und 99 % des Wasservolumens zukommen.

Der Nähr- und Schadstoffeintrag über Abwasserkanäle und Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet des Bodensees, aber auch aus der Luft, ist in neuerer Zeit ganz erheblich angestiegen (Tab.1). Er belastet zunächst Teile des Litorals, das daher alle Merkmale zwischen sauber und schmutzig aufweist. In das Pelagial, das wasserchemisch gut gepuffert ist, gelangen diese Stoffe erst unter starker Verdünnung.

Tabelle 1: Nährstoff-Belastung des Bodensees in Tonnen/Jahr

(nach IKG-Bodensee 1967 und DFG-Bodenseebericht 1968)

	Gesamt P	Gesamt N	BSB ₅
Untersuchte Zuflüsse (1961)	1350	15200	27400
Statistisch ermittelte Ufereinleitungen (1961)	400	1700	7600
Im Niederschlag und als Staub (1965/66)	30	?	?
insgesamt	1780	16900	35000

Vortrag, gehalten anlässlich der Tagung der "Gesellschaft für Ökologie", Giessen 1972
 Tagungsbericht "Belastung und Belastbarkeit von Ökosystemen"
 Anschrift des Verfassers: Dr.H.Lehn, 775 Konstanz-Staad,
 Schiffstr. 56.

Abb.1:

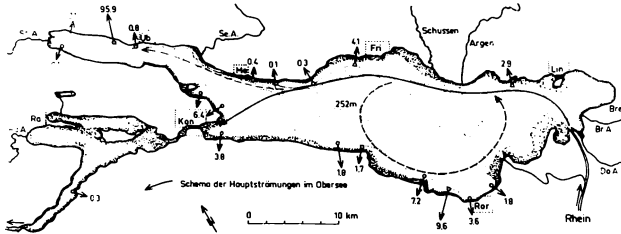


Abb.1: Bodensee mit sommerlichem Strömungsbild und den 19 Trinkwasserwerken (Pfeile): Wasserentnahme 1971 in 10^6 m^3 ; Punktlinien = Isobathen im 50 m-Abstand, punktierte Fläche = 0-10 m -Litoral.

Abb.2: Durchschnittliche Konzentrationen des Nitrat-Stickstoffs und des Phosphat-Phosphors im Bodensee-Obersee jeweils zu Beginn der Stagnationsperiode von 1935-1970 (n.WAGNER 1970).

Abb.3: Schematische Entwicklungslinien einiger Trophiekriterien des Freiwasserraumes des Bodensee-Obersees von 1920-1970: \bullet = Mittelwerte aus Jahresmitteln der gekennzeichneten Zeiträume, Punktiert = ohne Messungen; Phyt-Z (Phyt-RV)=Phytoplanktonzellen (berechnetes Volumen) in der 0-10 m Zone.

$\text{PO}_4\text{-P}$ = Phosphat-Phosphor-Konzentration zu Ende der Winterzirkulation, Sicht = Sichttiefen, Rest- O_2 = Restsauerstoff in Sättigungs-% in der größten Tiefe zu Ende der Sommerstagnation, Crust = Crustaceenplankton unter 1 dm^2 Wasserfläche, Cil = Ciliaten in der 0-10m-Zone, Pisc = Fischereierträge.

Abb.4: Mehrjährige Isoplethen der Temperatur und der Sauerstoffsättigung in % im 0-40m- und 200-250m-Wasserkörper des Bodensee-Obersees: P = Konzentration des gelösten Phosphates zu Ende der Winterzirkulation,

A = mittlere Schwebealtdichte in der lichtreichen 0-10m-Produktionszone, O = Restsauerstoff in der größten Tiefe zu Ende der thermischen Sommerstagnation.

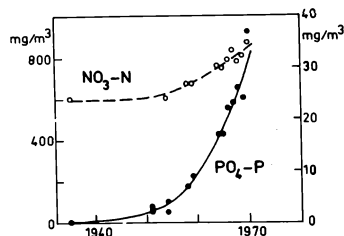


Abb.2

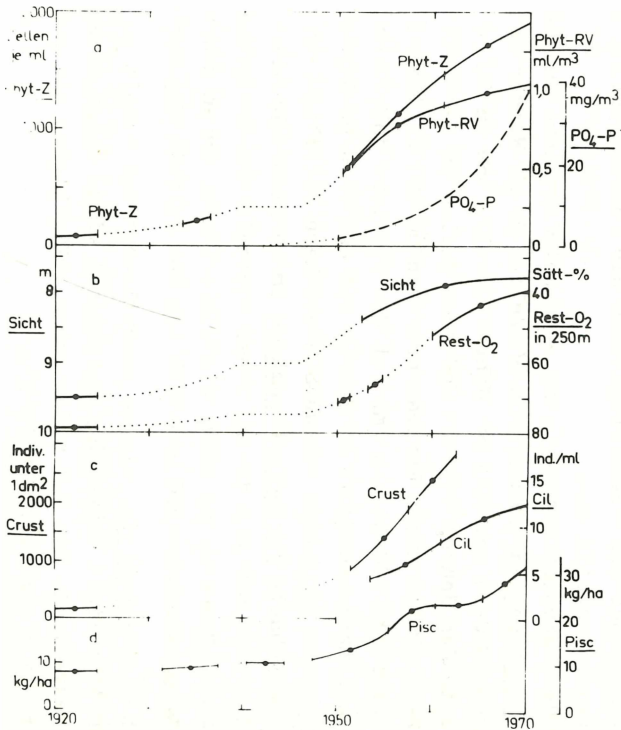


Abb. 3

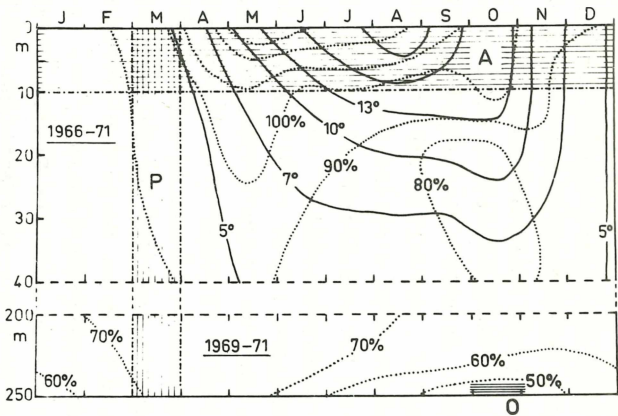


Abb. 4

Dennoch stieg hier der Nährstoffpegel in den letzten Jahren merklich an, wie - nach den zusammenfassenden Feststellungen von WAGNER (1970) - die Konzentrationen von Phosphat und Nitrat zu Beginn der jährlichen Produktionsphasen zeigen (Abb.2). Insbesondere der Phosphat-Phosphor, der Mitte der 30er Jahre noch nicht nachweisbar war und heute um etwa 15 % je Jahr zunimmt, markiert die progressive Nährstoff-Belastung des Pelagials. Er dürfte innerhalb von 50 Jahren eine 100fache Konzentration erreicht haben.

Wie reagieren darauf Kriterien des pelagischen Ökosystems, insbesondere die Primärproduzenten? Untersuchungen aus den Jahren 1920-24 (AUERBACH u.Mit. 1926) und 1934-36 (GRIM 1939) sowie solche ab 1950 (GRIM 1955, LEHN 1962, 1969) lassen, trotz teilweise veränderter Methoden, den Wechsel in diesem Biotop erkennen. Verwendet wurden die gemittelten Jahreswerte der Sichttiefen, der Phytoplankton-Zelldichte und deren berechnete Volumina sowie der Ciliatendichte in der lichtreichen 0-10 m-Produktionszone, der Crustaceenplanktondichte unter 1 dm^2 und der Fischereierträge (Abb.3). Außerdem drückt die Restsauerstoffsättigung in der größten Tiefe zu Ende der Sommerstagnation die Abbaubelastung des Tiefensauerstoffs aus.

Mit dem Nährstoffanstieg ging eine beträchtliche Zunahme der Schwebealgen einher, von 80 Zellen je ml Wasser in den Jahren 1920-24 auf 220 der Jahre 1934-36, 660 im Jahre 1951, 1110 in den Jahren 1952-61 und 1680 Zellen in der Zeit von 1962-70. Dabei kamen Maximalwerte von 60'000 Zellen/ml vor. Bei derzeit 2000 Zellen /ml ist die mittlere jährliche Phytoplanktondichte in 50 Jahren auf das 25fache angestiegen. Daran sind vor allem kleine Schwebealgen beteiligt, so daß die errechnete Phytoplanktonmasse im letzten Jahrzehnt nicht viel größer war als davor. Diese biologischen Kriterien folgen in ihrer Entwicklung einer sigmoiden Kurve, deren stärkster Anstieg zwischen 1950 und 1965 lag und derzeit flacher wird.

Auch die Sichttiefe, die im wesentlichen vom Gehalt an chlorophyllhaltigen Schwebealgen bestimmt wird, folgt diesem Kurvenverlauf. Von 9,5 m der Jahre 1920-24 ging sie auf derzeit 7,9 m zurück (LEHN 1969).

Als Sekundärproduzenten zeigen die Ciliaten und Crustaceen, die erst seit 1954 bzw. nur bis 1963 bearbeitet wurden, einen ähnlichen Anstieg (KIEFER 1972). Gleiches gilt für die Fische, die anhand der Fischereierträge faßbar sind. Auf einen raschen Anstieg seit 1950 folgte allerdings Ende der 50er Jahre eine Überfischungsphase, da insbesondere die schneller wachsenden Blaufelchen mit den inzwischen untermaßigen Netzen oft vor dem ersten Ablachen gefangen wurden. Erst nach Jahren der Konsolidierung der Fischbiozönose stieg der Ertrag weiter an; er ist heute etwa 4mal so groß wie vor 50 Jahren (NÜMANN 1964 u. pers. Mitt.).

In der Stoffwechselbilanz eines Sees kommt dem gelösten Sauerstoff eine entscheidende Bedeutung zu. Je größer die Produktion ist, desto mehr Sauerstoffüberschuß findet sich in der trophogenen Zone und dementsprechend auch vermehrter Sauerstoffschwund in der tropholytischen Tiefenzone. So lag der Restsauerstoffgehalt in 250 m Tiefe zu Ende der Sommerstagnation 1920-24 bei 79 % Sättigung und 1951 bzw. 1954 bei 70 % und 66 % (MUCKLE 1964). Danach trat ein bemerkenswerter Rückgang ein, wobei ab 1961 zumeist Restsauerstoffwerte von 40 bis 50 % vorkamen. Auch hier findet sich ein sigmoider Kurvenverlauf.

Kriterien, die an wichtigen und faßbaren Punkten im Jahreszyklus des limnischen Stoffumsatzes stehen, erlauben eine allgemein gültige Beschreibung der Reaktionen des pelagischen Ökosystems. Dabei wird die Nährstoffbelastung zu Beginn der jährlichen Produktionsphase durch den früheren Minimumstoff Phosphat-Phosphor (Abb.4:P), die biologische Inkorporierung der Nährstoffe durch die mittlere Jahresdichte der Planktophyten in der 0-10 m-Produktionszone (Abb.4:A) gekennzeichnet. Als integrierendes Merkmal für den Abbau der produzierten organischen Substanz dient der noch vorhandene Restsauerstoff in der größten Tiefe zu Ende der Sommerstagnation (Abb.4:O⁺). Die Kriterien Planktonalgen und Restsauerstoff

⁺) Diese Werte entstammen den Überwachungsuntersuchungen für das Innenministerium Baden-Württemberg.

sind in Abbildung 5 auf der Y-Achse links und rechts eingezeichnet und auf das, auf der X-Achse logarithmisch dargestellte Phosphat bezogen.

Beide Parameter, Planktonalgen und Restsauerstoff, reagieren auf variable Witterungsabläufe sehr verschieden, wie z.B. die Restsauerstoffsättigungen zweier Extremjahre, des windreichen Regenjahres 1970 mit 59 % und des warmen Trockenjahres 1971 mit 20 %, zeigen. Dennoch lassen sich in die beiden Punktschwärme, die aus mehreren Relationen von 1920 bis 1971 bestehen, zwei Gerade legen.

Gemäß diesen Kennlinien ist eine Verdoppelung des Phosphat-Phosphors von 2 auf 4 wie auch von 20 auf 40 mg/m³ jeweils mit einer Phytoplanktonzunahme von rd. 360 Zellen /ml und einem Rückgang des Restsauerstoffs von 7 Sättigungs-% verbunden. Danach wird Phosphat mit zunehmender Konzentration im Seestoffwechsel laufend uneffektiver und ist derzeit nur noch selten Minimumstoff (LEHN 1972).

Umgekehrt wird eine Phosphatentlastung des Pelagials, z.B. durch den weiteren Ausbau der Kläranlagen, eine entsprechende Phytoplanktonminderung und Restsauerstofferrhöhung nach sich ziehen. Jedoch erfordert eine echte Qualitätsverbesserung des Bodensees eine beträchtliche Senkung des Phosphat-spiegels. Zu erstreben ist eine Phytoplankton-Jahresdichte von 1100 bis 1300 Zellen/ml und ein Restsauerstoffgehalt von 55-60 %, die bei einem Phosphatgehalt von 5-10 mg/m³ zu erwarten sind (Abb.5). Diese Daten würden dem noch oligotrophen Zustand des Bodensees der Jahre 1956-60 entsprechen.

Die dargelegten Phänomene lassen sich theoretisch begründen: Im einst harmonischen oligotrophen Ökosystem Bodensee-Pelagial wurde, wie in vielen anderen Seen, die chemische Komponente Nährstoffe inzwischen eindeutig eutroph, während die physikalische Komponente Beckenform, die jedem See über Jahrtausende eigen ist, unverändert oligotroph blieb. Das Ökosystem wurde unharmonisch, es wurde anatroph. In einem limnischen Parallelogramm bilden die verschiedenen Stoffumsatzkriterien Planktondichte, Sauerstoffgehalt usw. die Resultante, die einerseits von der variablen Koordinate Nährstoffe, andererseits von der konstanten Koordinate

Beckenform beeinflusst wird (LEHN 1972).

Letztere ermöglicht im tiefen und windesponierten Bodensee beachtliche horizontale und vertikale Wasserbewegungen, die die Bildung und den Bestand der lichtabhängigen Produktionshorizonte der Planktophyten stören. Anstelle der Nährstoffe wird immer mehr die Lichtexposition zum Minimumfaktor. Zudem ist eine merkliche Phosphatfällung durch die minerogenen Trübstoffe der Sommerhochwässer anzunehmen sowie, nach GRIM (1967), auch durch absinkende Kieselalgen.

Damit ist das Problem der Belastung und Belastbarkeit von Ökosystemen angeschnitten. Die Belastung ist an Hand einiger gebräuchlicher Kriterien meßbar. Die Belastbarkeit jedoch basiert auf Werteskalen mit zeitlich und interessemäßig wechselnden Bezugsgrößen, die für Abwasservorfluter oder Schiffahrtsträger völlig anders liegen als für Trinkwasser, Fischerei oder Wassersport. Immerhin wurde hier versucht, für das Bodensee-Pelagial Zielwerte der nährstoffbedingten Belastbarkeit zu nennen, die auch in klimatisch ungünstigen Jahren eine gute Wasserqualität sichern.

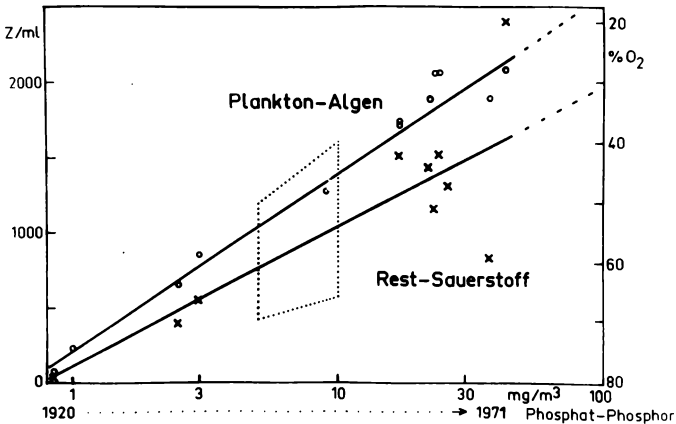


Abb.5: Phosphat-Phosphor-Konzentrationen zu Ende einiger Winterzirkulationen von 1920-1971 in Relation zur mittleren Phyto-Plankton-Jahresdichte der 0-10m-Produktionszone und zur Restsauerstoffsättigung zu Ende der Sommerstagnation in 250 m Tiefe; Trapez = erstrebter Oberseezustand.

Literatur: AUERBACH, M., W. MAERKER u. J. SCHMALZ: Hydrographisch-biologische Bodensee-Untersuchungen II. - Verhandl. Naturwiss. Ver. Karlsruhe 30, 1-128 (1926). DFG - Bodenseebericht 1968: Bodensee-Projekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft, 2. Bericht, 166 S. - Bearbeitet von H.-J. ELSTER; M. KNORR, H. LEHN, R. MÜHLEISEN u. W. J. MÜSSER: - Franz Steiner Verlg. Wiesbaden. GRIM, J.: Beobachtungen am Phytoplankton des Bodensees (Obersee) sowie deren rechnerische 'Auswertung. - Int. Revue ges. Hydrobiol. u. Hydrograph. 39, 193-315 (1939). -- : Die chemischen und planktologischen Veränderungen des Bodensee-Obersees in den letzten 30 Jahren. - Arch. Hydrobiol. /Suppl. 22, 310-322 (1955). -- : Der Phosphor und die pflanzliche Produktion im Bodensee. - GWF-Wasser/Abwasser 108, (1967) 1261-1271. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee 1967: Untersuchungen zur Feststellung der Ursachen für die Verschmutzung des Bodensees. - Internat. Gewässerschutzkomm. f. d. Bodensee, Bericht 6, 8 S. + Tab.. KIEFER, F.: Naturkunde des Bodensees, 2. Aufl. 210 S., Jan Thorbecke Verlg., Sigmaringen (1972). LEHN, H.: Zur Sichttiefenminderung im Bodensee seit 1920. - Internat. Revue ges. Hydrobiol. 47, 523-532 (1962). -- : Veränderungen des Phytoplanktonbestandes im Bodensee: I. Fluktuationen von *Tabellaria fenestrata* 1890-1967. - Int. Revue ges. Hydrobiol. 54, 367-411 (1969). -- : Zur Trophie im Bodensee. - Verhandl. Internat. Ver. Limnol. 18 (1972) (im Druck). MUCKLE, R.: Die Sauerstoffschichtung im tiefen Hypolimnion des Bodensee-Obersees 1963/64 mit Berücksichtigung einiger Untersuchungsergebnisse aus früheren Jahren. - Internat. Gewässerschutzkomm. f. d. Bodensee, Bericht 3, 18 S. (1964). NÜMANN, W.: Die Veränderungen im Blaufelchenbestand (*Coregonus wartmanni*) und in der Blaufelchenfischerei als Folge der künstlichen Eutrophierung des Bodensees. - Verhandl. Internat. Ver. Limnol. 15, 514-523 (1964). WAGNER, G.: Die Zunahme der Belastung des Bodensees. - GWF-Wasser/Abwasser 111, 485-487 (1970).