

Sonderdruck: Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie, Saarbrücken 1973.

PHYTOPLANKTONÄNDERUNGEN IM BODENSEE UND EINIGE FOLGEPROBLEME

H. LEHN

Abstract

The phytoplankton of the Lake of Constance (Bodensee-Obersee and Gnadensee) has changed from 1953 to 1972 in favour of Central Diatoms, Chlorophyceae and Cyanophyceae. The doubling of the density of phytoplankton is combined with a transition from an annual cycle with two summits to another with three summits, whereby there is a semilogarithmic relation to the tenfold frequent phosphate. The sanitation of the waste-water, which is already in progress and cost about 3 milliards DM, shall stabilize the ecosystem "Bodensee". However the dispenser of drinking-water is exposed to new dangers on the one side at the outflow by the project of a regulating weir and on the other side in the alpin valley of the Rhine by the planning of a nuclear power-station and consequently of the petrochemical industry.

Diese Darlegungen, die an das Thema des Vorjahres über "Das Bodensee-Pelagial unter der zunehmenden Nährstoffbelastung" (LEHN 1972) anschliessen, befassen sich vor allem mit dem Freiwasserraum, dem Pelagial, des 252m tiefen Bodensee-Obersee und zum Vergleich mit dem des nur 21m tiefen Gnadensee der Untersees.

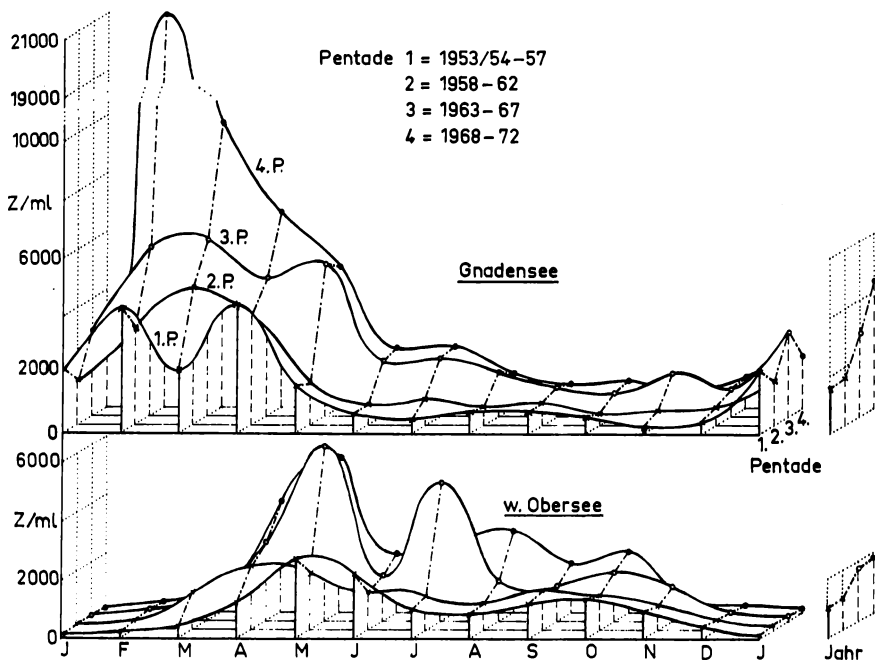


Abb. 1: Mittlere Jahreszyklen und Jahresmittel der Phytoplanktondichte der 0-10m-Produktionszone in Zellen/ml für 4 Pentaden des Gnadensees (1954-72) und des westlichen Obersees (1953-72).

Aus dem Obersee liegen seit 1953 monatlich meist mehrere, aus dem Gnadensee seit 1954 monatlich wenigstens eine Untersuchungsreihe mit im allgemeinen je 3 Phytoplanktonproben aus der 0–10m-Produktionszone vor. Bis heute ergibt dies 20 bzw. 19 Untersuchungsjahre, über die berichtet wird. Um die oft witterungsbedingte Streuung einzelner Jahre zu unterdrücken, wurden Pentaden- und Dekaden-Mittelwerte der Monate und Jahre für einzelnen Algenarten und Algengruppen sowie die Gesamtdichte der Algen gebildet und miteinander verglichen. Im folgenden sollen einige Merkmale der Entwicklung der Phytoplanktonbiozönose herausgestellt werden, woraus einige wasserwirtschaftliche Probleme resultieren.

Die Phytoplanktondichte nahm im Gnadensee von der 1. zur 4. Pentade, insbesondere in den Monaten Februar bis Mai, in der Zeit der Hochproduktion des Sees, sehr zu (Abb. 1). Auch in den Sommermonaten sind die Dichtezahlen merklich grösser geworden und im Jahreszyklus auf mehr als das Doppelte angestiegen.

Etwas geringer war die Erhöhung der Algdichte im Obersee. Doch machen sich hier einige Veränderungen im Jahresablauf besser bemerkbar. In der ersten Pentade (1953–57) kommen zwei Algenmaxima vor, das grössere Frühjahrsmaximum im Mai/Juni und das kleinere Herbstmaximum im September/Oktober. In der zweiten Pentade (1957–62) rückt das Frühjahrsmaximum auf die Monate April/Mai vor. In dem nachfolgenden Algenmaximum bis September scheint eine neue Produktionsspitze zu entstehen, die in der dritten Pentade (1962–67) im Monat Juli ganz klar durchbricht und das Herbstmaximum auf den Oktober verschiebt. Die letzte Pentade (1968–72) zeichnet sich durch das Frühjahrsmaximum im April/Mai, das kleinere Sommermaximum im Juli/August und die Herbstspitze im Oktober aus. In Abhängigkeit von der Witterung können diese Dichtemaxima in den einzelnen Jahren auch einige Wochen früher oder später auftreten und im Sommer oder Herbst teilweise unterdrückt sein.

Welche Phytoplanktongruppen sind an diesen Veränderungen beteiligt? (Tab. 1).

Tab. 1: Mittlere Dichte von Phytoplanktongruppen der 0–10m-Zone in Zellen/ml; Dekadenwerte des westlichen Obersees und des Gnadensees. (Monate der mittleren Maxima in Klammer)

	<u>westl. Obersee</u>			<u>Gnadensee</u>			<u>westl. Obersee in % des Gnadensees</u>	
	1953-62	1963-72	Änderung	1954-62	1963-72	Änderung	1953-62	1963-72
Algenzellen	1047 (V)	1821 (V)	+ 76%	1584 (IV)	3631 (II)	+ 129%	66%	50%
Pyrroph. (Crypt.)	414 (IV)	878 (V)	+ 112%	533 (IV)	1279 (V)	+ 140%	78%	69%
zentr. Diat.	132 (IV)	315 (IV)	+ 139%	534 (II)	1802 (II)	+ 237%	25%	17%
penn. Diat.	442 (V)	445 (VII)	+ 1%	462 (IV)	276 (VII)	– 40%	96%	161%
Chrysoph.	42 (IX)	37 (IX)	– 12%	29 (VIII)	37 (VII)	+ 28%	145%	100%
Chloroph.	15 (X)	132 (X)	+ 780%	13 (VII)	100 (VIII)	+ 669%	115%	132%
Cyanoph.	2 (IX)	14 (V)	+ 600%	13 (XII)	137 (IV)	+ 954%	15%	10%

Beim Vergleich der beiden Untersuchungsdekaden 1953–62 und 1963–72 nehmen die bisher selteneren Chlorophyceen und Cyanophyceen, die für kleine und nährstoffreiche Seen typisch sind, in beiden Seeteilen um das 7–10fache zu. Wesentlich stärker wirkt jedoch die Vermehrung der bisher schon häufigen Cryptomonaden (bei den Pyrrophyten) und der zentralen Diatomeen um das 2–3fache auf das Phytoplanktonbild ein. Ganz anders verhält sich die Gruppe der zahlreichen, für nährstoffärmere Seen charakteristischen pennaten Diatomeen und der selteneren Chryso-phyceen, die beide nur in geringem Ausmasse zu- oder gar abnehmen.

Dabei sind die pennaten Diatomeen und die Chlorophyceen im hochproduktiven

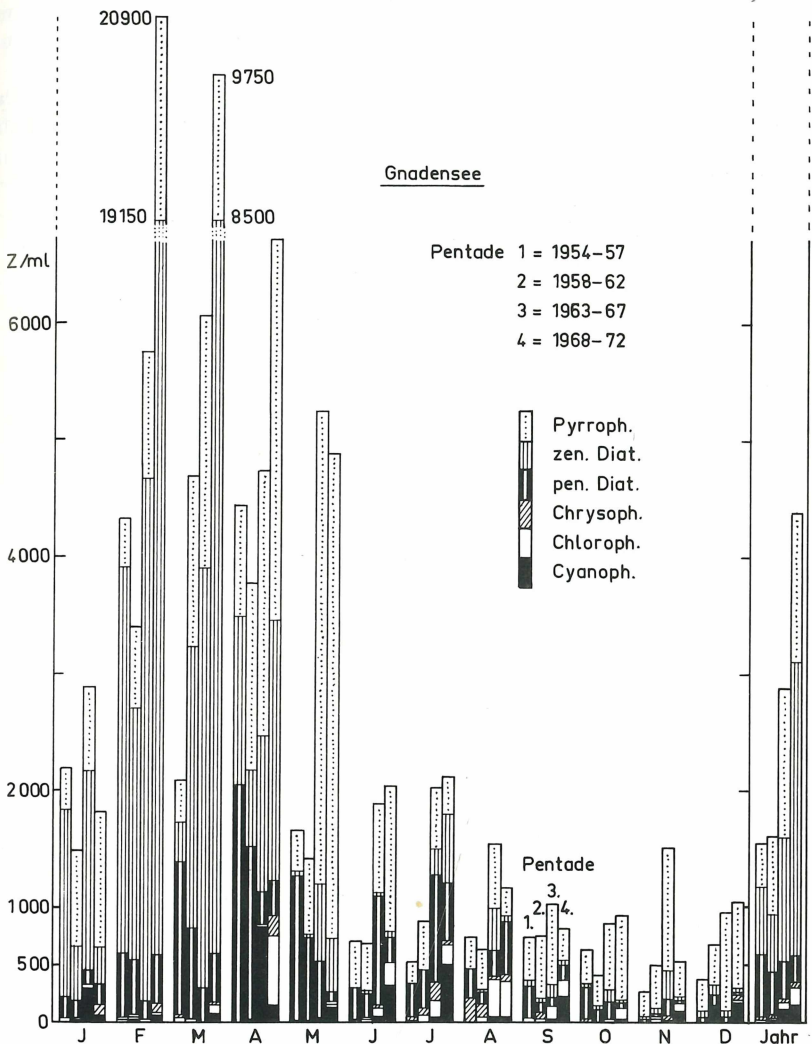


Abb. 2: Mittlere Jahreszyklen und Jahresmittel von Phytoplanktongruppen der 0–10m-Produktionszone des Gnadensees in 4 Pentaden.

Gnadensee seltener als im Obersee. Ihre Hauptentwicklung fällt in den Sommer bis Herbst, in den wenig produktiven Zeitraum des Gnadensees. Aus der Darstellung der monatlichen Pentaden des Gnadensees ist die jahreszeitliche Verschiebung und Verminderung der in den beiden ersten Pentaden im Frühjahr (März bis Mai) zahlreichen pennaten Diatomeen auf die Sommermonate Juni bis August in der dritten und vierten Pentade ersichtlich (Abb. 2). An deren Stelle nehmen die zentralen Diatomeen im Februar/März und die Cryptomonaden im April/Mai überdurchschnittlich zu. Die Chlorophycéen und Cyanophyceen sind nun bevorzugt im April und in den Sommermonaten zu finden.

Die grösste Algendichte des Gnadensees fand sich in den ersten beiden Pentaden nur in der Zeit vom Februar bis April, während sie in den Folgemonaten auffallend niedriger war. In der dritten und vierten Pentade jedoch ist der Zeitraum der grossen Dichtezahlen schon bis in den Mai hinein verlängert, mit Auswirkungen auf die nachfolgenden Monate. Erst im September, zu Ende der Sommerstagnation, treten in allen vier Pentaden ähnlich niedrige Dichtezahlen auf. Offensichtlich sind nun die Nährstoffreserven der Produktionszone weitgehend verbraucht, ein Zustand, der in den ersten beiden Pentaden schon drei Monate früher, im Juli, zu beobachten war. Erst nach Eintreten der vertikalen Vollzirkulation im Oktober drücken sich die remobilisierten, erhöhten Nährstoffmengen der letzten beiden Pentaden wieder in grösseren Phytoplanktondichtezahlen aus.

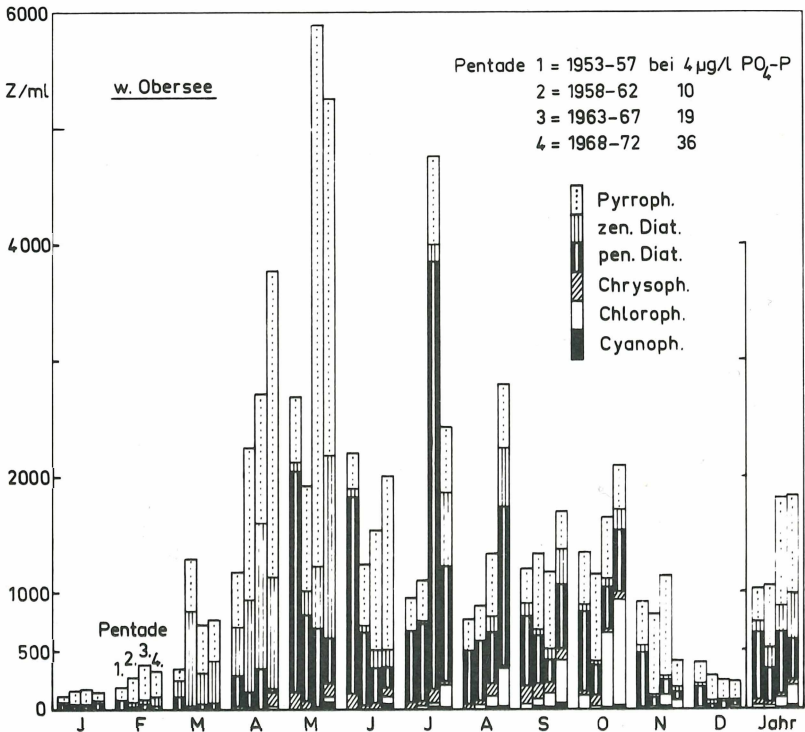


Abb. 3: Mittlere Jahreszyklen und Jahresmittel von Phytoplanktongruppen der 0-10m-Produktionszone des westlichen Obersees in 4 Pentaden. Phosphatwerte S. LEHN 1972.

Die grössten Phytoplanktondichtezahlen des Obersees treten während der ersten Pentade in den Monaten Mai/Juni auf und bestehen vor allem aus pennaten Diatomeen (Abb. 3). Trotz des nachfolgenden Rückganges sind sie weiterhin dominierend und im September/Oktober am Herbstgipfel wesentlich beteiligt. Im Frühjahr der zweiten Pentade deutet sich eine bemerkenswerte Veränderung an. Zentrale Diatomeen und Cryptomonaden sind schon im März/April sehr zahlreich, und beherrschen im April/Mai und im Juni der letzten beiden Pentaden das Planktonbild. Die pennaten Diatomeen dagegen werden im Mai/Juni immer seltener und erreichen dafür Massentwicklungen im Juli und August. Sie gestalten massgeblich den neuen Phytoplanktongipfel dieser Monate. Auch am Herbstmaximum, das nun in den Oktober verschoben ist, sind sie neben den hier sehr stark zunehmenden Chlorophyceen beteiligt.

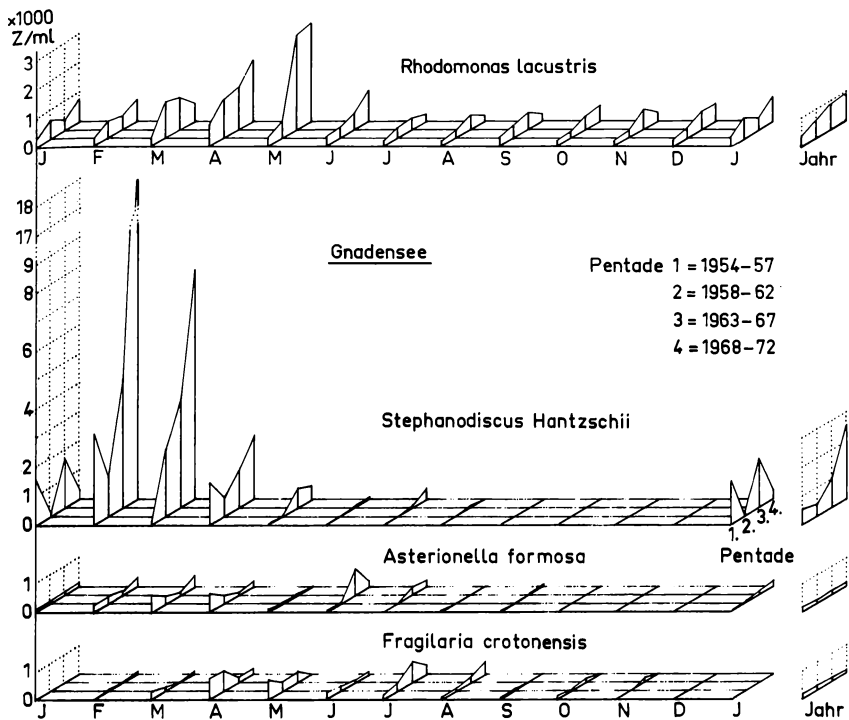


Abb. 4: Mittlere Jahreszyklen und Jahresmittel von 4 Phytoplanktern der 0-10m-Produktionszone des Gnadensees in 4 Pentaden.

Die Verschiebungen der Phytoplanktongruppen im Laufe von 20 Jahren kann an Hand der häufigsten Arten noch näher beleuchtet werden (Abb. 4). Im Gnadensee ist *Stephanodiscus hantzschii* die vorherrschende Art innerhalb der zentralen Diatomeen. Im Februar/März dominierend und im April gleichwertig neben der Cryptomonade *Rhodomonas lacustris* wird sie erst im Mai von letzterer überflügelt. Gegenüber diesen Kleinformen befinden sich die grossen pennaten Diatomeen

Asterionella formosa und *Fragilaria crotonensis* in diesen Monaten von der ersten bis zur vierten Pentade im Rückgang. Dafür nehmen sie in den nachfolgenden Monaten Juni/Juli bzw. Juli/August zu, in denen die kleinen Plankter seltener sind.

Im Obersee ist diese Beziehung noch besser erkennbar (Abb. 5). Von der ersten zur vierten Pentade steigen *Stephanodiscus hantzschii* im April/Mai und *Rhodomonas lacustris* im April bis Juni ganz erheblich an. In dieser Zeit gehen die grossen Formen *Fragilaria crotonensis* und *Asterionella formosa* zurück und erreichen dafür ihre Jahresmaxima erst zwei Monate später, *Asterionella formosa* im Juli und *Fragilaria crotonensis* im Juli/August. Die Verschiebung gleicht der im Gnadensee, fällt aber im Obersee in eine produktivere Phase des Phytoplanktons.

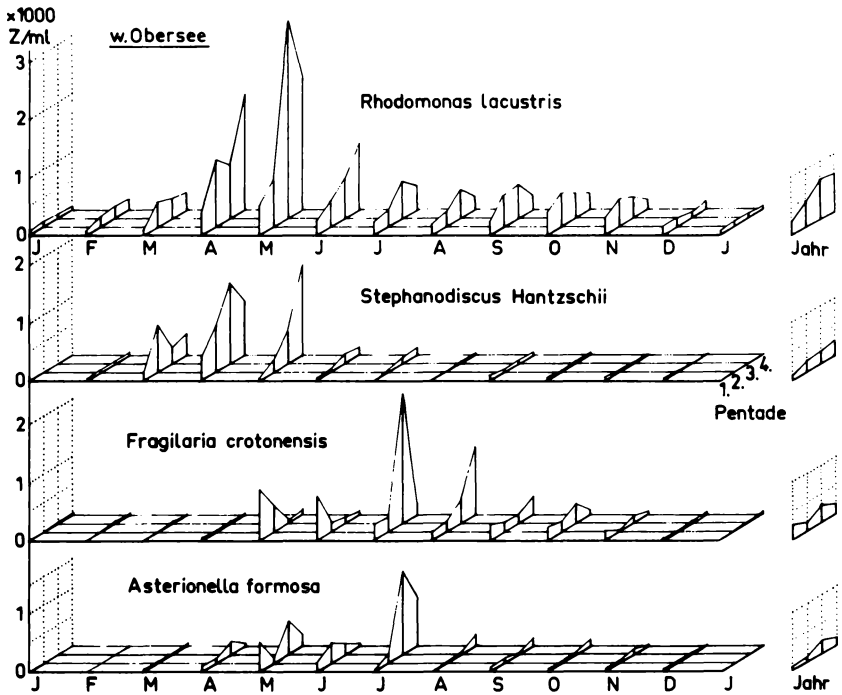


Abb. 5: Mittlere Jahreszyklen und Jahresmittel von 4 Phytoplanktern der 0–10m-Produktionszone des westlichen Obersees in 4 Pentaden.

Diese Erscheinungen lassen sich wie folgt deuten: Die Kleinformen sind beim derzeit hohen Nährstoffpegel im Frühjahr durch die höheren Vermehrungsraten gegenüber den Grossformen offensichtlich bevorzugt. Deren Vermögen zur Phosphat-speicherung (GRIM 1967) ist erst bei zurückgehendem Nährstoffgehalt von Vorteil, so dass sie in erster Linie das neue sommerliche Planktonmaximum bilden.

Zusammenfassend kann über die Phytoplankton-Entwicklung der letzten 20 Jahre gesagt werden:

1. Die Nährstoffbasis zu Beginn der Frühjahrsproduktion in Form von Phosphat-phosphor stieg von Pentade zu Pentade etwa in geometrischer Reihe auf das 10fache an, während sich die mittlere Algendichte nur etwa verdoppelt hat (Abb. 3). Auf

diese halblogarithmische Beziehung wurde schon hingewiesen (LEHN 1972).

2. Verschiebungen in der Phytoplankton-Biozönose zugunsten der zentralen Diatomeen, Chlorophyteen und Cyanophyteen, wodurch ein gewisser "Litoralisierungseffekt" erkennbar wird, die Entstehung eines 3gipfligen Jahreszyklus durch Neubildung eines Sommermaximums, das zunehmende Vorkommen von explosionsartigen Algenentwicklungen bei günstiger Witterung (GRIM 1967), sowie stärkere Sauerstoffzehrungen im Hypolimnion, deren Spannweite insbesondere in Jahren extremer Witterung erkennbar wird, wobei z.B. die Minimumwerte des gelösten Sauerstoffs zu Ende der Sommerstagnation in der grössten Tiefe 1962/63 von 58 auf 37 Sättigungs-% (MUCKLE 1964) und 1970/71 von 59 auf 20 Sättigungs-% zurückgehen konnten (Abb. 6), weisen auf die inzwischen vergrösserte Instabilität des Ökosystems Bodensee-Pelagial hin.

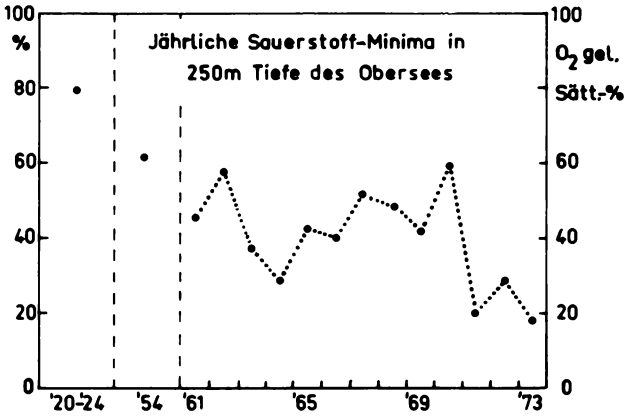


Abb. 6: Jährliche Sauerstoff-Minima in der grössten Tiefe des Obersees zu Ende der Sommerstagnation (aus Überwachungsuntersuchungen des Instituts für das Land Baden-Württemberg und MUCKLE 1964).

3. Limnologische Aussagen und Prognosen zu wasserwirtschaftlichen Grossprojekten sind bei einem solchen Ökosystem mit mehr Unsicherheit behaftet als bei einem stabilen.

Die aufgeführten Veränderungen beeinträchtigen die bestehende Wassernutzung und führen bei neuen wasserwirtschaftlichen Projekten zu fast unlösbaren Problemen. Es soll hier nicht näher auf die Schwierigkeiten eingegangen werden, die z.B.

- durch die erhöhte Produktion an Algen und höheren Wasserpflanzen im Litoral für den Wassersport,
- durch den vermehrten Planktongehalt im Tiefenwasser für die Filtertechnik der 19 Trinkwasserwerke,
- durch den durch erhöhte Abbaubelastung stark verminderten Sauerstoffgehalt des Tiefenwassers am Seeboden für die Entwicklung z.B. der Felcheneier,
- und durch den möglicherweise kurzzeitig völlig fehlenden Sauerstoff im Tiefensediment für die Rücklösung von schon ausgeschiedenen Nährstoffen entstehen.

Vielmehr sei hier das seit einigen Jahren aktuelle Projekt des "Bodensee-Regulier-

wehres", das neuerdings durch das Projekt des "Bodensee-Neckarstollens" (SCHMIDT 1971) sehr in die Öffentlichkeit gerückt wurde, kurz angesprochen. Von dem unterhalb des Unterseeausflusses bei Stein a.Rhein geplanten Regulierwehr liegen inzwischen viele Varianten vor, wobei zu den 1969/70 geltenden erste negative Untersuchungsergebnisse für den Freiwasserraum des Obersees publiziert wurden (LEHN 1971).

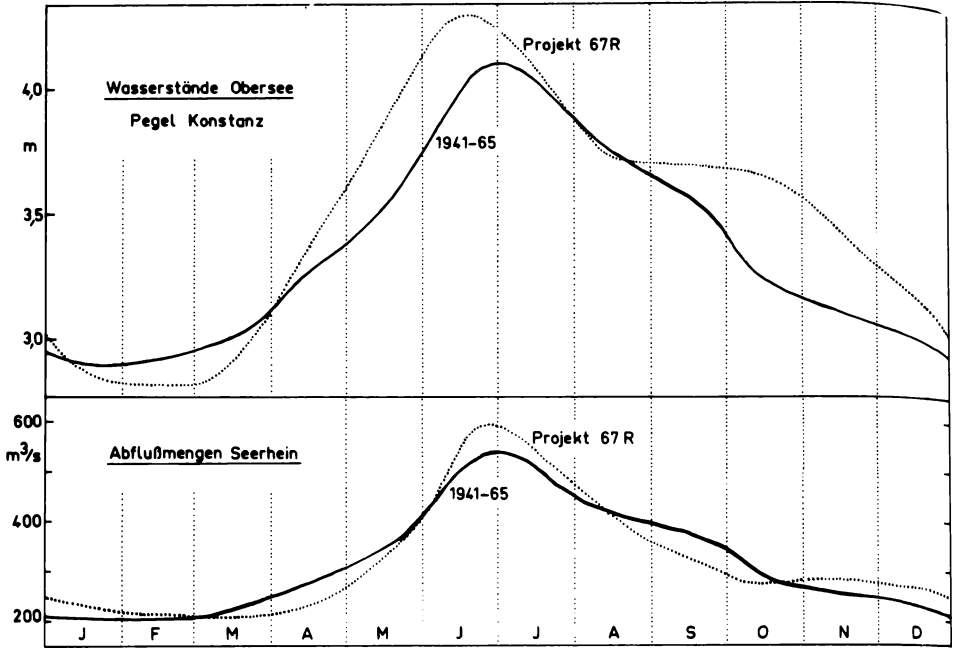


Abb. 7: Wasserstände des Obersees und Abflüßmengen des Seerheins: Mittellinie für 1941-65 (unreguliert) und das Regulierprojekt 67R (aus EAW 1970).

Im Jahre 1971 wurde das Projekt 67R des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft in Bern (EAW 1970) mehreren Fachleuten zur limnologischen Beurteilung vorgelegt (Abb. 7). Wesentliche Merkmale der Oberseeregulierung sind ein veränderter Jahreszyklus der Wasserstände und der Abflüßmengen, um einen Wasserstau für Spätherbst und Winter zu erreichen, der fast ausschliesslich den Interessen der Unterlieger dient, z.B. der Oberrheinschiffahrt, den Rheinkraftwerken auf Wasser- und Atomkernbasis und den Grosseinleitern an Abwässern. Um die Problematik zu beleuchten, sollen einige Überlegungen aus der Sicht der Pelagialforschung angestellt werden, wobei hier die weit komplizierteren Probleme der engeren Uferzone und die des gesamten Untersees ausgespart bleiben.

Merklich höhere Wasserstände als im Mittel der Jahre 1941-65 sind nach dem Reglement in den Monaten April bis Juli und September bis Dezember zu erwarten (EAW 1970). In der Hauptproduktionszeit von April bis Oktober würden sie im Mittel 18 cm betragen und dadurch die bis 10m Seetiefe gerechnete Litoralfläche,

deren Phytoplanktondichte etwa doppelt so gross wie im Freiwasserraum ist, um $2,6 \text{ km}^2$ oder 4% vergrössern (Tab. 2). Hier hinein würden auch die Perioden der Maxima im April/Mai und im Oktober fallen und im Verein mit dem litoralen "Kinderstübeneffekt" auf das Pelagial (LEHN 1971) zu einer Erhöhung der mittleren Phytoplanktondichte um rund 4% oder 80 Zellen je ml Wasser im Jahre führen.

Tab. 2: Seeflächenänderung "Reguliert gegen Unreguliert" nach Projekt 67R während der Hauptproduktionszeit:

Obersee:		Änderung:			
		Seestand in cm	Seefläche in qkm	% der Gesamtfl.	% der Litoralfl.
April – Oktober	Normaljahr (aus 1941–1965)	+ 18	+ 2,6	+ 0,5	+ 4
	Trockenjahr (1949)	+ 37	+ 5,3	+ 1,1	+ 9

Weit gravierender wäre der Eingriff jedoch in einem sonnenscheinreichen Trockenjahr, wie das Beispiel 1949 zeigt. Im Zeitraum April–Oktober würden die Wasserstände im Mittel um 37 cm höher sein, wodurch die Litoralfläche um $5,3 \text{ km}^2$ oder 9%, die Gesamtfläche um 1,1% grösser wäre, das Doppelte eines Normaljahres. Die entsprechend kalkulierte Vermehrung der mittleren Phytoplanktondichte könnte 8% oder 160 Zellen/ml betragen und die Abbaubelastung des Tiefenwassers während der Sommerstagnation unter Verbrauch des gelösten Sauerstoffs noch mehr als im Normaljahr gegenüber dem bisher unregulierten Zustande erhöhen.

Die natürlichen Planktonverluste des Obersees durch den Seerheinabfluss sind nicht unbeträchtlich. Sie lagen im Mittel der Jahre 1960–66 bei $480 \cdot 10^9$ Algenzellen/sec und würden derzeit etwa $1/3$ grösser sein. Durch das Reglement 67R würden die Wasserabflussmengen in den Monaten März–Mai und August–Oktober vermindert sein (Abb. 7). Die sehr hohen Phytoplanktonbestände im April/Mai würden in die Zeiten kleinerer Abflussmengen und damit auch geringerer Transportkraft am Abflusstrichter fallen, während sich die Veränderungen der übrigen Monate etwa die Waage halten würden. Dadurch würden die Abflussverluste des Obersees insgesamt um 3–4% geringer und die Sedimentationsgewinne um den gleichen Betrag grösser sein als im unregulierten Zustand.

Beide Regulierungseffekte, die Erhöhung der Phytoplanktonproduktion und die Verminderung der Abflussverluste, würden die Abbaubelastung des Obersees im Normaljahr um 7–8% und im Trockenjahr um 11–12% erhöhen. Dies würde rein rechnerisch einer Vermehrung der mittleren Phytoplanktondichte von derzeit rund 2000 Zellen/ml um 150 bzw. 230 Zellen/ml gleichkommen, was heute durch eine Erhöhung des Frühjahrs-Phosphatspiegels um rund 15 bzw. $25 \mu\text{g/l PO}_4\text{-P}$ bewirkt werden könnte (LEHN 1972). Dabei würde der gelöste Sauerstoff in der grössten Tiefe zu Ende der Sommerstagnation im Mittel um 3–4% bzw. 5–6% zurückgehen. Das Regulierprojekt 67R hätte damit für den hier betrachteten grossen Freiwasserraum des Obersees eindeutig eutrophierende oder seerverschlechternde Eigenschaften.

Vom Wasserbau werden daher neustens umweltfreundliche Reglements mit seeverbessernden Effekten unter Mithilfe von Limnologen erwogen. Dies wäre auf der

Basis des derzeitigen Planktonjahreszyklus durchaus möglich (Abb. 1, 3), wenn auch infolge der heutigen Instabilität des Sees mit einigen Risiken behaftet. Die weitere Entwicklung des Bodensees wird jedoch weitgehend von den seit 15 Jahren im Gang befindlichen Sanierungsmassnahmen im gesamten Einzugsgebiet bestimmt werden, die bisher schon 1 Mia.DM kosteten und in den nächsten 10 Jahren noch weitere 1,5 bis 2,0 Mia.DM erfordern werden (IGK-Bodensee 1973). Mit der nun beginnenden Einführung der Phosphatfällung in den Kläranlagen wächst die Aussicht auf eine Senkung des Phosphatgehaltes im See. Dadurch würde nicht nur die Phytoplanktonproduktion gesenkt, sondern wohl auch deren Jahreszyklus wieder in Richtung des früheren zweigipfligen verändert und mehr stabilisiert werden (Abb. 1, 3).

Entsprechend dem Erfolg der Sanierungsmassnahmen müssten in einem Jahrzehnt möglicherweise ein oder zwei andere Regulierreglements empfohlen werden, die dann für den See einigermaßen optimal wären. Hinzu kommt, dass ein für den Untersee günstiges Reglement, entsprechend seinen eigenen Jahreszyklen (Abb. 1, 2), wieder anders verlaufen müsste und dass sich die wasserwirtschaftlichen Interessen solchen Wünschen kaum beugen würden. Das Gebot der Stunde ist daher vorerst nur die Fortführung der Sanierungsmassnahmen einschliesslich Phosphatentzug bis zur Stabilisierung des Sees bei einem Phosphatspiegel von 5–10 $\mu\text{g/l}$ Phosphatphosphor zu Beginn der Frühjahrsproduktion. Hierbei finden Regulierprojekte keinen Platz.

Dieser Hoffnungsschimmer für eine Rettung des Bodensees wird nun neuerdings durch andere Grossprojekte wieder getrübt. Etliche Kilometer oberhalb der Alpenrheinmündung in den Bodensee sind ein Atomkraftwerk und ein bis zwei Öldestillieranlagen an der ENI-Erdölleitung geplant. Von der sicher folgenden petrochemischen Grossindustrie und anderen wassergefährdenden Produktionsstätten wird noch nicht gesprochen. Standorte ausserhalb des hydrologischen Einzugsgebietes des Bodensees wurden bisher abgelehnt. Jedermann muss sich daher ernsthaft fragen, ob die vor allem von der Bevölkerung rund um den Bodensee zu tragenden Milliarden-Kosten der laufenden Sanierungsmassnahmen für das Ökosystem Bodensee noch sinnvoll sind, wenn derartige Gefahren, die den Trinkwasserspender für Millionen von Menschen ernsthaft bedrohen, von den heute Verantwortlichen neu heraufbeschworen werden.

LITERATUR

- EAW (1970): Bodenseeregulierung. Bericht 9 S. u. 2 Pläne. Eidgenöss. Amt für Wasserwirtschaft, Bern 1970.
- GRIM, J. (1967): Der Phosphor und die pflanzliche Produktion im Bodensee. *GWf-Wasser/Abwasser* 108: 1261–1271.
- IGK-Bodensee (1973): Bau- und Investitionsprogramm. Stand der Abwassereinleitungen (mit 8 Tab., 6 Diagr., 1 Abb.). Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Bern 1973.
- LEHN, H. (1971): Die Schwebelagen im Frühjahr und das geplante Regulierwehr. *Schrr. VG Bodensee* 89: 105–115.
- LEHN, H. (1972): Das Bodensee-Pelagial unter der zunehmenden Nährstoffbelastung. Tagungsbericht der Ges.f. Ökologie, 77–84; Giessen, 1972.
- MUCKLE, R. (1964): Die Sauerstoffschichtung im tiefen Hypolimnion des Bodensee-Obersees 1963/64 mit Berücksichtigung einiger Untersuchungsergebnisse aus früheren Jahren. 18 S., Bericht Nr. 3 der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee 1964.

SCHMIDT, F. (1971): Wasserwirtschaftliche Aspekte für den Umweltschutz in Baden-Württemberg. 63 S. (Vortrag) Hrsg. Verband d. Gas- u. Wasserwerke Baden-Württemberg.

Anschrift des Verfassers:

Dr. HUBERT LEHN, Staatliches Institut für Seenforschung und Seenbewirtsch.,
Abteilung Max-Auerbach-Institut, 775 Konstanz.