

Das Phytoplankton während der Eutrophierungs-Phase des Bodensees

Hubert Lehn

During the eutrophication phase of Lake Constance the density of phytoplankton rose in the deep Obersee to more than the double, and in the shallow Gnadensee to the quadruple; the "Sigmoid" increase (with 10-20 mg/m³ dissolved phosphate-phosphorus) was strongest in the sixties. Especially the small phytoplankton forms (Cryptomonads and centric Diatomeae) increased enormously and displaced the larger forms Pennales to a new summer peak. The Pennales and the Chrysophyceae became scarce, while the Chlorophyceae and the Cyanophyceae increased in summer and in autumn. This resulted in a shifting of the annual sequence of phytoplankton groups. The decrease of phosphate, caused by waste water purification, allows to expect an equivalent decrease of the phytoplankton density and an increase of the oxygen content in the deep water - according to the observed consequences of phosphate decrease. For a stabilisation of Lake Constance a phosphate phosphorus content of less than 10 mg/m³ is required.

Lake Constance, phosphate eutrophication, phytoplankton.

1. Einführung

Der jahreszyklische Nährstoffkreislauf ist im Pelagial (= Freiwasserraum) von tiefen Seen an mehreren Stellen faßbar, als mineralisierte Nährstoffe (z.B. Orthophosphat) zu Beginn der Frühjahrsproduktion, als jährlich produzierte Planktonalgen im Epilimnion mit entsprechenden Sauerstoffübersättigungen, als jährliche Zooplanktonbestände, Fischerträge und Bakteriengehalte sowie als meta- und hypolimnische Sauerstoffdefizite während der Sommerstagnation. Eine Erhöhung solcher Werte im Laufe mehrerer Jahre kennzeichnet die zunehmenden Trophiestufen eines Sees. Über derartige Veränderungen des Bodensees haben mehrere Autoren berichtet (z.B. ELSTER 1977; GRIM 1955, 1967; KIEFER 1972; LEHN 1969, 1973, 1975, 1976; MUCKLE 1964; NÜMANN 1964; WAGNER 1970).

Die seit 20 Jahren rund um den Bodensee im Gang befindlichen Abwassersanierungsmaßnahmen, die bislang mehr als 3 Milliarden DM kosteten, haben die bisherige Nährstoffzunahme des Sees gestoppt: So ging im Obersee die Konzentration des gelösten Phosphatphosphors, im Folgenden Phosphat genannt, unterstützt durch das Hochwasserjahr 1975, von 1975 auf 1976 zum ersten Mal zurück (LEHN 1978). Auf einen Zwischenanstieg nach dem Niederwasserjahr 1976 folgte nach zwei Normalwasserjahren ein echter Rückgang um etwa 20 % auf rund 60 mg/m³. Die Eutrophierungsphase des Bodensees endete mit den höchsten Phosphatgehalten in den Jahren 1975 und 1977.

Wie haben sich nun die im jahreszyklischen Nährstoffkreislauf befindlichen Primärproduzenten des freien Wasserraumes, die Planktonalgen, an die Phosphatzunahmen bis zum Jahre 1975 angepaßt? Das Pelagial des 252 m tiefen, einst oligotrophen Obersees wurde seit 1952, das des nur 21 m tiefen, schon früher eutrophen Gnadensees (Untersee) seit 1954 regelmäßig untersucht. Vom Phytoplankton, seinen Gruppen und Arten liegen monatliche und jährliche Dichtezahlen der 0-10 m-Produktionszone vor. Auf diese wurde, wie bei der langfristigen Berechnung des Sauerstoffhaushaltes (LEHN 1976), die Regressionsanalyse angewandt. In der Gleichung $y = a + b_y \cdot x$ ist y die Zielgröße, die durch die Einflußgröße x verändert wird. Letztere ist als Zeit in den Maßeinheiten der Jahre von 1952 bzw. 1954 bis 1975 meßfehlerfrei vorgegeben, da sie mit dem in geometrischer Reihe mit 15 % gleichzeitig zunehmenden Phosphatgehalt, der sich in 5 Jahren jeweils verdoppelte, gleichgesetzt werden kann (Abb. 1). Nur y ist eine Zufallsvariable, die sich in Abhängigkeit vom Nährstoffpegel, vom Witterungsablauf und vom Stichprobenfehler von Jahr zu Jahr ändert. Die polynomialen Regressionsberechnungen wurden in dankenswerter Weise von Mitarbeitern des TR 440-Rechenzentrums der Universität Konstanz durchgeführt.

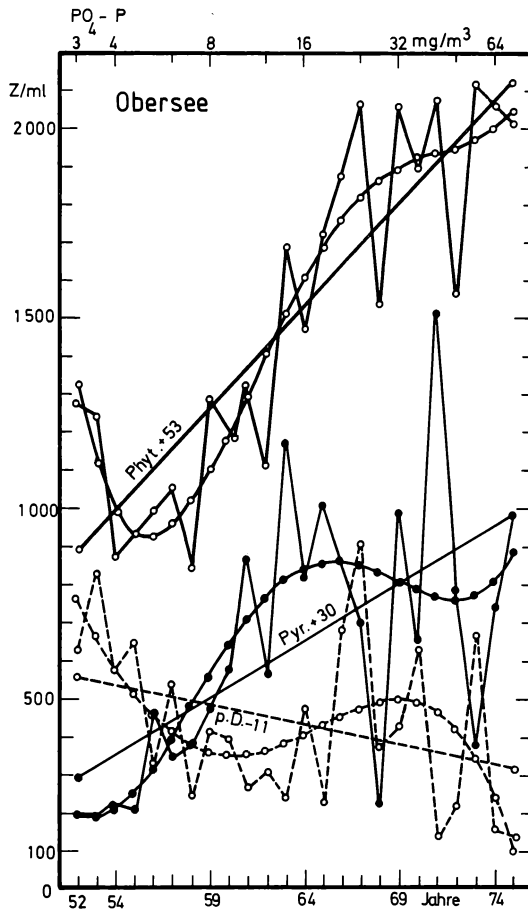


Abb. 1: Vergleich der Jahresmittelwerte der Phytoplanktondichte (= Phyt), der Pyrrophyten (= Pyr) und der pennaten Diatomeen (= p.D.) von 1952 bis 1975 in Zellen/ml mit deren linearer Regression (mit Regressionskoeffizient = RK) und mit der Regression 4. Grades, sowie deren Beziehung zur Phosphatverdoppelung in je 5 Jahren.

2. Ergebnisse

2.1 Phytoplankton

In Abb. 1 sind z.B. vom Gesamtphytoplankton sowie den Pyrrophyten und den pennaten Diatomeen vergleichsweise die Zufallsvariablen als einzelne Jahresmittelwerte, die lineare Regression 1. Grades als Gerade und die Regression 4. Grades als angepaßte Kurve eingezeichnet. Aus den umfangreichen Berechnungen werden jeweils nur die lineare Regression (=LR) und deren positive oder negative Koeffizienten (= RK) verwendet. In diesen Werten sind Stichprobenfehler und Witterungseinflüsse einzelner extremer Jahre weitgehend eliminiert: Die Beziehungen des Phytoplanktons zum steigenden Phosphatspiegel werden erkennbar. Dabei fällt der stärkere Algenanstieg in den Jahren 1961-66 bei einer Phosphat-Konzentration von 10-20 mg/m³ auf.

Er wird durch die RK der drei übergreifenden Dekaden (Abb. 2) von 1952-62, von 1958-68 und von 1964-74 bestätigt. Sie kennzeichnen im Obersee einen "sigmoiden" Dichteanstieg des Phytoplanktons, wobei die RK der 1. und 3. Dekade mit 14 und 25 Algenzellen je Milliliter Wasser (= Z/ml) merklich kleiner sind als die der 2. Dekade mit 89 Z/ml oder des gesamten Zeitraumes 1952-74 mit 54 Z/ml. Unterschiedlich verlaufen die Dichteänderungen der zahlreichen vorkommenden Gruppen des Phytoplanktons.

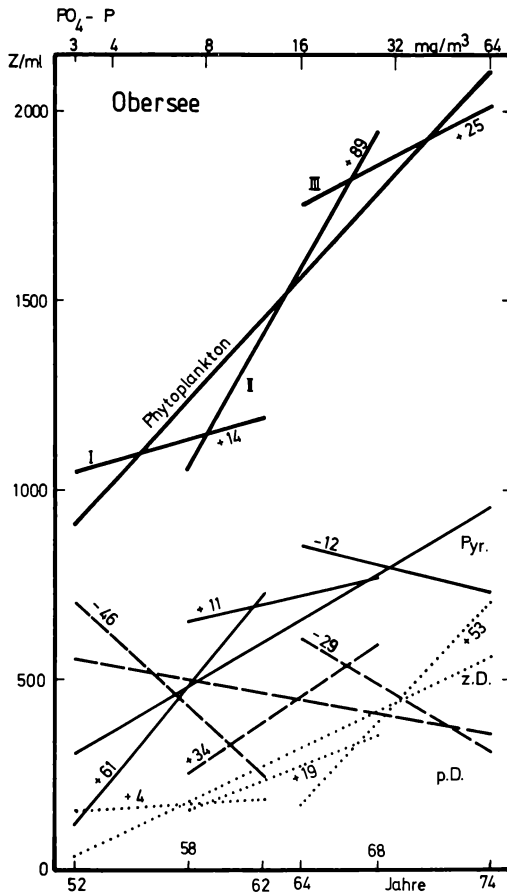


Abb. 2: Lineare Regression 1952-74 sowie deren übergreifende Dekaden 1952-62, 1958-68 und 1964-74 mit RK in Beziehung zum Phosphat im Obersee;
z.D. = zentrische Diatomeen, sonst wie Abb. 1.

Während der RK der zentrischen Diatomeen von der 1. bis zur 3. Dekade von 4 über 19 auf 53 Z/ml laufend größer wird, geht der der Pyrrophyten, mit den vorherrschenden Cryptomonaden, von 61 auf 11 Z/ml zurück und ist in der 3. Dekade mit -12 Z/ml sogar negativ. Im Gegensatz dazu steht eine dritte Algengruppe, die der großen pennaten Diatomeen, deren RK für den Gesamtzeitraum leicht negativ ist. Dabei wird die negative 1. und 3. Dekade (-46 und -29 Z/ml) von einer positiven mittleren Dekade (+34 Z/ml) unterbrochen.

2.2 Algengruppen

Mit der Gesamtverdichtung sind Veränderungen zwischen den einzelnen Algengruppen verbunden. So nimmt im Obersee (Abb. 3) die mittlere Jahresdichte des Phytoplanktons von 900 Z/ml im Jahre 1952 um den jährlichen Regressionskoeffizienten von +53 Z/ml auf 2120 Z/ml im Jahre 1975 zu. An dieser Zunahme sind vor allem die Pyrrophyten mit +30, von 300 auf 980 Z/ml, und die zentrischen Diatomeen mit +25, von 20 auf 600 Z/ml, beteiligt, in geringerem Maße auch die Chlorophyten mit +9, von -26 auf 190 Z/ml. Der statistische Negativwert von 1952 kann in der vereinfachten linearen Regression, die einen sigmoiden Dichteanstieg der Organismen nicht wiedergibt, vorkommen. Sehr geringe Veränderungen weisen mit +1 die Cynophyceen und mit -1 die Chrysophyceen auf. Bei den pennaten Diatomeen jedoch findet sich mit -11 ein merklicher Dichterückgang, der von 560 Z/ml im Jahre 1952 auf 310 Z/ml im Jahre 1975 führt.

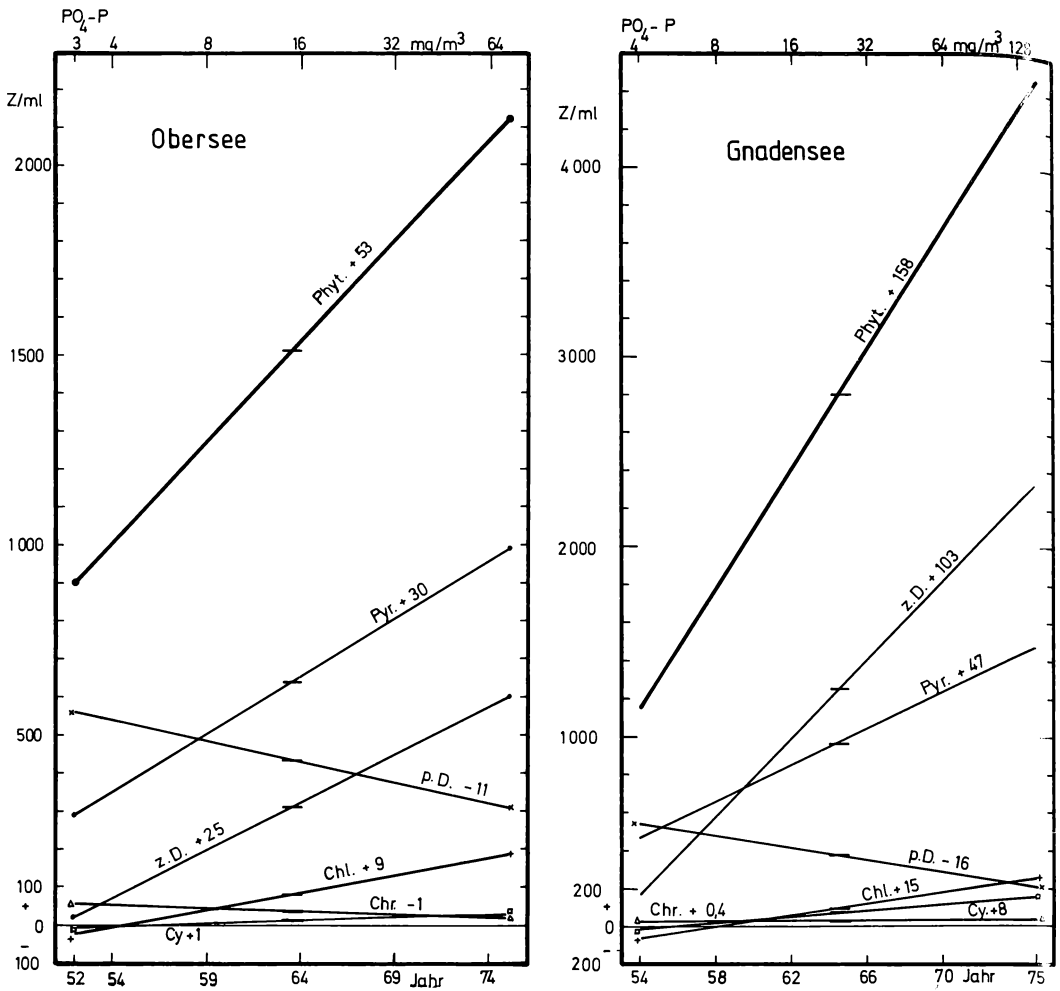


Abb. 3: Lineare Regression mit RK des Phytoplanktons und der häufigsten Algengruppen, sowie deren Beziehung zur Phosphatverdoppelung im Obersee in je 5 Jahren 1952-75 und im Gnadensee in je 4 Jahren 1954-75;
 Chl = Chlorophyta,
 Chr = Chrysophyta,
 Cy = Cyanophyta,
 sonst wie zuvor.

Auch im Gnadensee (Abb. 3) sind von 1954 bis 1975 die pennaten Diatomeen mit einem RK von -16 die Algengruppe mit der stärksten Dichteabnahme, von 540 auf 210 Z/ml. Dagegen nehmen alle anderen Gruppen zu, z.B. die Pyrrophyten um 47, von 470 auf 1270 Z/ml, und die zentrischen Diatomeen um 103, von 170 auf 2340 Z/ml. Insgesamt ist der Dichteanstieg im Gnadensee mit einem RK von 158 dreimal so groß wie im Obersee mit 53. Den 1150 Z/ml im Jahre 1954 stehen 4470 Z/ml im Jahre 1975 gegenüber. Dabei ist der Phosphatspiegel des Gnadensees nur knapp doppelt so hoch wie im Obersee. Über die größere Produktivität des flachen Gnadensees gegenüber dem tiefen Obersee bei gleichem Phosphatgehalt wurde schon berichtet (LEHN 1972).

2.3 Algenarten

Die 32 vom Obersee und 31 vom Gnadensee regressionsstatistisch berechneten Algenarten wurden zusammen mit den 6 Algengruppen in Tab. 1 gemäß dem Regressionskoeffizienten aneinandergereiht. Von den während der Eutrophierungsphase beider Seeteile insgesamt 20 bzw. 17 zunehmenden Algenarten und 12 bzw. 14 abnehmenden Algen-

arten scheint für die Hälfte mit einem RK von weniger als + 0.5 Z/ml die Nährstoffzunahme ohne Bedeutung zu sein. Die andere Hälfte jedoch erfährt teilweise beträchtliche Dichteänderungen, wie auch die obersten und untersten Gruppen der Tab. 1 zeigen.

typisch sind für beide Seeteile die höchsten jährlichen Dichtezunahmen sehr kleiner Algen, z.B. der Kieselalge *Stephanodiscus hantzschii* und der Cryptomonade *Rhodomonas lacustris*, die zwischen 4 und 10 % ihrer mittleren Dichte liegen. Bemerkenswert ist außerdem in beiden Seen der jährliche Rückgang größerer Algen, z.B. der verketteten Kieselalge *Tabellaria fenestrata* mit 11-16 % ihrer mittleren Dichte.

dies führt im Untersuchungszeitraum zu ganz erheblichen Veränderungen der Dichtezahlen und der Prozentanteile einzelner Arten im Phytoplanktonbild beider Seeteile, wie Tab. 2 z.B. für *Stephanodiscus*, *Melosira* und *Mougeotia* im positiven und für *Dinobryon*, *Tabellaria*, *Fragilaria* und *Asterionella* im negativen Sinne zeigt. Geringer sind die Anteilverschiebungen der Rhodomonaden und Cryptomonaden.

Tab. 1: Regressionskoeffizienten (RK) und mittlere Dichte (D) von Phytoplanktonarten und -gruppen des Bodensees in Z/ml (Zellen je ml Wasser)

Obersee 1952 - 74			Gnadensee 1954 - 74		
D	RK		D	RK	
500	+22.6	Rhodomonas lac.	1169	+117.4	Stephanodiscus han.
236	13.8	Stephanodiscus han.	679	29.0	Rhodomonas lac.
43	8.0	Melosira spec.	141	9.4	Rhodomonas lens
60	7.0	Mougeotia vir.	118	9.1	Cryptomonas er. + ov.
71	3.6	Rhodomonas lens	25	2.9	Melosira spec.
54	3.0	Cryptomonas er. + ov.	136	1.9	Asterionella form.
124	3.0	Asterionella form.	8	1.9	Erkenia spec.
12	2.1	Cyclotella spec.	7	0.67	Gymnodinium lan.
7	1.1	Erkenia spec.	5	0.63	Cyclotella spec.
215	0.84	Fragilaria crot.	7	0.62	Mougeotia vir.
5	0.34	Fragilaria cap.	9	0.33	div. pen. Diatomeen
2	0.24	Melosira isl. helv.	3	0.22	Gymnodinium helv.
4	0.20	Gymnodinium lan.	7	0.20	Mallomonas akrok.
4	0.16	div. pen. Diatomeen	2	0.17	Fragilaria cap.
1	0.15	Dinobryon sert.	1	0.12	Mallomonas spec.
1	0.11	Oscillatoria Red.	0.5	0.02	Ceratium hir.
1	0.11	Gymnodinium helv.	6	+0.02	Synedra spec. (kl.)
0.7	0.04	Ceratium hir.			
0.8	0.03	Mallomonas spec.			
0.3	+0.004	Mallomonas akrok.			
0.4	-0.003	Peridinium cinct.	0.3	-0.004	Peridinium cinct.
0.4	0.01	Diatoma vulg.	0.2	0.01	Diatoma vulg.
0.6	0.04	Dinobryon bav.	0.3	0.02	Peridinium pus.
0.5	0.10	Peridinium pus.	0.2	0.03	Rhizosolenia long.
3	0.11	Stephanodiscus astr.	0.7	0.08	Dinobryon bav.
0.7	0.16	Rhizosolenia long.	16	0.42	Stephanodiscus astr.
			7	0.46	Oscillatoria Red.
			8	0.50	Dinobryon div.
11	0.51	Dinobryon div.	27	0.76	Dinobryon soc.
9	0.93	Syndera acus	16	1.0	Syndera acus
26	1.0	Diatoma elong.	34	3.6	Melosira isl. helv.
18	1.9	Dinobryon soc.	35	4.3	Diatoma elong.
13	2.6	Synedra spec. (kl.)	126	5.6	Fragilaria crot.
53	-8.7	Tabellaria fen.	91	-9.8	Tabellaria fen.
631	+29.5	Pyrrophyta	1249	+116.9	zentr. Diatomeen
296	+23.8	zentr. Diatomeen	950	+48.4	Pyrrophyta
79	+9.8	Chlorophyta	76	+10.9	Chlorophyta
9	+1.2	Cyanophyta	77	+8.5	Cyanophyta
39	-1.1	Chrysophyta	34	0.5	Chrysophyta
435	-8.9	penn. Diatomeen	375	-18.3	penn. Diatomeen
1507	+54.3	Phytoplankton	2761	+166.9	Phytoplankton

Tab. 2: Regressionsstatistische Dichtezahlen einiger Phytoplanktonarten des Obersees und des Gnadensees in Zellen/ml Wasser sowie deren Prozentanteile in Klammern

	Obersee		Gnadensee	
	1952	1975	1954	1975
<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	78 (8)	409 (19)	129 (11)	2171 (48)
<i>Melosira spec.</i>	0 (0)	156 (7)	0 (0)	132 (3)
<i>Mougeotia viridis</i>	0 (0)	127 (6)	0 (0)	14 (1)
<i>Rhodomonas lacustris</i>	256 (27)	740 (34)	394 (32)	987 (22)
<i>Rhodomonas lens</i>	18 (2)	138 (6)	45 (4)	251 (5)
<i>Cryptomonas erosa + ovata</i>	18 (2)	93 (4)	29 (2)	213 (5)
<i>Asterionella formosa</i>	95 (10)	147 (6)	116 (10)	158 (3)
<i>Fragilaria crotonensis</i>	219 (24)	191 (8)	183 (15)	64 (1)
<i>Diatoma elongatum</i>	36 (4)	12 (1)	77 (7)	0 (0)
<i>Tabellaria fenestrata</i>	148 (16)	0 (0)	139 (11)	0 (0)
<i>Dinobryon sociale</i>	40 (4)	0 (0)	16 (1)	0 (0)

2.4 Jahreszyklus

Auf die damit verbundenen Wandlungen der Algensukzessionen wurde schon hingewiesen (LEHN 1974). Um die jahreszyklischen Veränderungen quantifizieren zu können, wurden die monatlichen Regressionskoeffizienten errechnet. Im Obersee (Abb. 4) liegen die höchsten Dichteanstiege des Phytoplanktons mit +175 und +205 Z/ml im April/Mai, verursacht durch die Kleinplankter der Pyrrophyten und der zentrischen Diatomeen. Die großen pennaten Diatomeen gehen hier mit -85 und -78 Z/ml am stärksten zurück und werden mit +60 und +30 Z/ml in die Monate Juli/August, in einen seit den 60er Jahren entstehenden Sommergipfel, verdrängt. Sie sind in dieser Zeit offensichtlich durch ihr Phosphatspeichervermögen begünstigt (GRIM 1967). An dieser neuen Sommerspitze des Phytoplanktons mit +90 bis +150 Z/ml sind, neben den Gruppen kleiner Algen, auch die Chlorophyten mit +29 Z/ml beteiligt. Diese nehmen aber auch im Oktober, in der dritten Jahresspitze, mit +30 Z/ml sehr zu. Markant ist mit -27 Z/ml der schon früher beobachtete Dichterückgang des Phytoplanktons im Juni, der mit einer beträchtlichen Zunahme der Sichttiefe von mehr als 0.2 m/Jahr korreliert ist und in der Nahrungskette durch die ausgeprägte Zunahme der herbivoren Zooplankter verursacht wird (LEHN 1968, 1969, 1974).

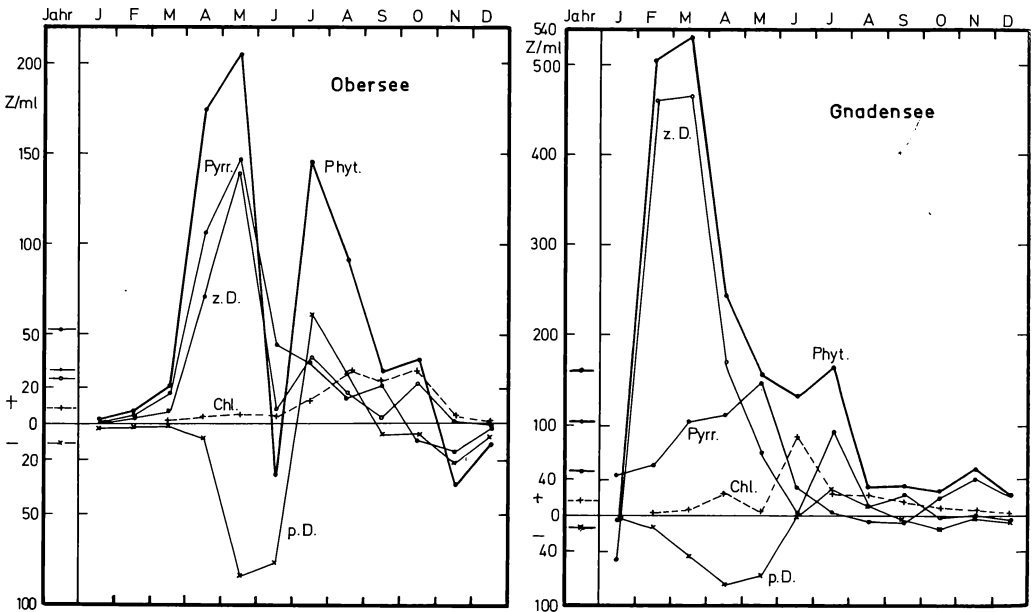


Abb. 4: Jahreszyklen und Jahresmittelwerte der RK vom Phytoplankton und von 4 häufigeren Algengruppen im Obersee 1952-75 und im Gnadensee 1954-75; Chl = Chlorophyta, Chr = Chrysophyta, Cy = Cyanophyta, sonst wie zuvor.

Im Gnadensee (Abb. 4) setzt die Hauptzunahme der Produktion schon im Februar/März mit mehr als 500 Z/ml je Jahr ein, ebenfalls hervorgerufen durch die kleinen zentralen Diatomeen. Die pennaten Diatomeen werden auch hier aus den Monaten März bis Mai mit -46 bis -76 Z/ml in die sich neu entwickelnde Julispitze mit +28 Z/ml verdrängt. Diese tritt allerdings, infolge der schon im Juni mit +87 Z/ml zunehmenden Chlorophyten, kaum hervor. Kurz nach der Herbstzirkulation mit der Remobilisierung der Pflanzennährstoffe bildet sich mit +52 Z/ml eine kleine Novemberspitze, die vor allem von den kleinen beweglichen Cryptonomaden verursacht wird.

2.5 Häufigste Algenarten

Im Obersee sind 5 von 20 oder 1/4 der Arten zu 83 % an der Dichtezunahme und 3 von 12 oder 1/4 der Arten zu 82 % an der Dichteabnahme beteiligt. Die entsprechenden Zahlen des Gnadensees lauten 94 % und 81 %. Wenige Algenarten bestimmen somit die wesentlichen Veränderungen im Phytoplanktonbild beider Seeteile. Als Beispiel wurden in Abb. 5 und Tab. 3 einige Jahreszyklen der Regressionskoeffizienten im Obersee dargestellt, wobei sich drei Verhaltensgruppen unterscheiden. Die erste besteht aus Kleinformen mit hohen Zuwachsraten im April/Mai: Dabei nimmt *Rhodomonas lacustris* auch in den Folgemonaten noch merklich zu und wird erst im Oktober/November seltener, während *Stephanodiscus hantzschii* im August/September, wo sie früher zahlreicher war, den stärksten Rückgang aufweist. Nur *Rhodomonas lens* ist in der zweiten Jahreshälfte kaum verändert.

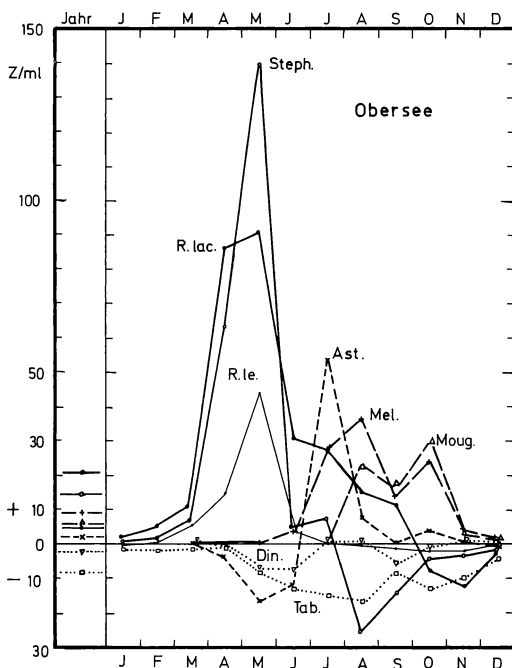


Abb. 5: Jahreszyklen und Jahresmittelwerte der RK einiger Phytoplankter des Obersees;

Steph = *Stephanodiscus hantzschii*, Mel = *Melosira spec.*,
R. lac = *Rhodomonas lacustris*, Moug = *Mougeotia viridis*,
R. le = *Rhodomonas lens*, Din = *Dinobryon sociale*,
Ast = *Asterionella formosa*, Tab = *Tabellaria fenestrata*.

Anders verhält sich eine zweite Gruppe von großformigen und sperrigen Phytoplanktern, die nur in der zweiten Jahreshälfte zunehmen, wie die zuvor seltenen *Melosira*-Arten oder der Neueinwanderer von 1957, *Mougeotia viridis* (LEHN 1969). Hierzu zählen auch *Asterionella formosa* und *Fragilaria crotonensis*, die aus dem Frühjahr verdrängt werden und im Juli/August sehr ansteigen. Dagegen nimmt eine dritte Gruppe insgesamt ab. Den stärksten Rückgang im ganzen Jahreszyklus, insbesondere aber im Juni bis August, weist die bis 1962 im Obersee dominierende und danach fast völlig fehlende Diatomee *Tabellaria fenestrata* auf (LEHN 1969), einen schwächeren im Mai, Juni und September die Chrysophysee *Dinobryon sociale*.

Tab. 3: Regressionskoeffizient (RK) und mittlere Dichte (D) des Phytoplanktons und einiger Algenarten des Obersees in Z/ml.

	Phytoplankton		Rhod.lac.		Steph.han.		Ast.form.		Frag.crot.		Moug.vir.	
	D	RK	D	RK	D	RK	D	RK	D	RK	D	RK
Jan.	142	0.5	69	0.9	9	-0.2	12	0.1	13	0.4	1	0.1
Febr.	270	6.0	158	4.7	36	1.5	12	-0.1	12	0.3	1	0.1
März	768	21.3	283	10.5	380	5.9	17	0.1	10	-0.1	0	0
April	2637	174.4	1204	85.9	991	63.0	68	-4.2	25	-1.0	0	0
Mai	4400	205.4	1602	90.5	958	139.6	375	-16.9	421	-23.8	0	0
Juni	1688	-27.5	638	30.2	111	5.0	157	-12.1	234	-35.2	0	0
Juli	2375	144.6	453	27.0	93	7.2	572	52.8	661	23.0	10	-0.1
Aug.	1763	91.5	364	14.7	122	-25.6	59	7.2	474	39.0	150	23.6
Sept.	1461	29.5	416	11.2	124	-14.4	69	-1.2	243	0.3	145	15.6
Okt.	1614	35.8	381	-8.5	54	-4.5	54	3.7	263	-7.4	363	28.8
Nov.	771	-33.3	286	-12.6	25	-3.5	41	-0.9	78	-9.8	40	2.5
Dez.	277	-11.5	124	-1.8	20	-1.7	19	-1.5	29	-0.9	2	0.1
Jahr	1512	53.1	498	21.1	244	14.4	121	2.2	205	-1.2	59	5.9

Auch im Gnadensee sind die Kleinformen an der immensen Dichtezunahme im ausgehenden Winter beteiligt (Abb. 6c, Tab. 4): *Stephanodiscus hantzschii* nimmt zu Produktionsbeginn im Februar/März jährlich um ca. 480 Z/ml zu und bleibt in der zweiten Jahreshälfte fast unverändert. *Rhodomonas lacustris* weist eine Hauptzunahme von 37 bis 120 Z/ml von März bis Mai auf und eine geringere von 33 Z/ml im November. Beide Arten, zu denen noch die sich ähnlich verhaltenden *Rhodomonas lens*, *Cryptomonas erosa* und *Cr.ovata* kommen, nehmen im Gnadensee insgesamt mehr als im Obersee zu.

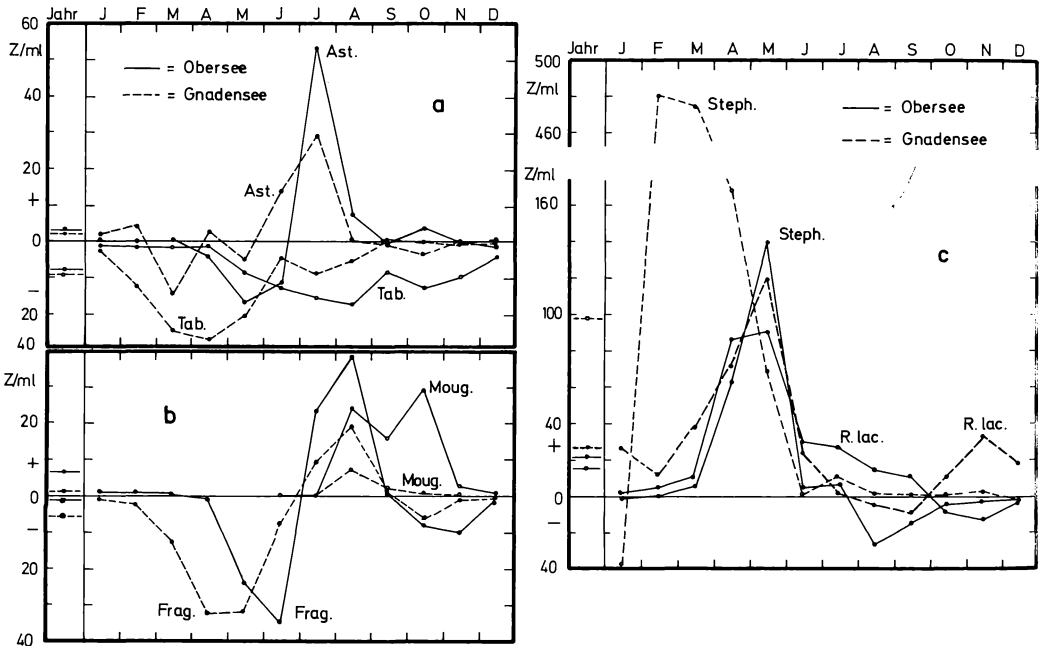


Abb. 6: Vergleich der Jahreszyklen und Jahresmittelwerte der RK einiger Phytoplankter des Obersees und des Gnadensees; Veränderungen etwa gleich (a) oder verschieden groß (b); starke Zunahmen im Gnadensee (c); Frag = *Fragillaria crotonensis*, sonst wie zuvor.

Tab. 4: Regressionskoeffizient (RK) und mittlere Dichte (D) des Phytoplanktons und einiger Algenarten des Gnadensee in Z/ml.

	Phytoplankton		Rhod.lac.		Steph.han.		Ast.form.		Frag.crot.		Moug.vir.	
	D	RK	D	RK	D	RK	D	RK	D	RK	D	RK
Jan	2095	-5.4	636	25.7	756	-38.1	100	2.2	19	-1.0	3	-0.2
Febr.	<u>7981</u>	<u>504.1</u>	545	11.5	<u>6193</u>	<u>480.3</u>	233	3.9	43	-2.5	0.3	-0.0
März	<u>6649</u>	<u>530.2</u>	<u>954</u>	<u>37.3</u>	<u>4156</u>	<u>473.9</u>	275	-14.8	100	-13.1	3	-0.2
April	<u>5779</u>	<u>242.9</u>	<u>1530</u>	<u>71.4</u>	<u>1946</u>	<u>168.7</u>	423	2.6	281	-32.2	0	0
Mai	<u>3389</u>	<u>157.0</u>	<u>1900</u>	<u>119.2</u>	486	69.2	42	-5.6	278	-31.9	0	0
Juni	1586	133.8	581	23.7	29	1.0	<u>259</u>	<u>13.5</u>	75	-8.1	0.3	0.0
Juli	<u>1800</u>	<u>164.8</u>	298	1.5	98	11.4	<u>194</u>	<u>28.7</u>	<u>326</u>	<u>9.0</u>	5	-0.2
Aug.	1035	33.1	253	-4.6	17	-0.2	17	-0.1	<u>201</u>	<u>19.1</u>	<u>54</u>	<u>7.1</u>
Sept.	981	34.5	371	-8.8	31	0.2	41	-2.0	54	1.2	18	1.7
Okt.	760	27.8	341	10.5	18	0.2	22	-3.5	62	-6.5	2	0.0
Nov.	<u>886</u>	<u>51.7</u>	<u>456</u>	<u>33.3</u>	21	1.7	12	-0.1	32	-1.1	1	-0.1
Dez.	796	25.7	426	17.7	49	-1.2	27	-0.8	8	-0.8	2	-0.1
Jahr	2811	158.4	1150	97.2	691	28.2	137	2.0	123	-5.7	7	0.7

Einige weitere Algen verändern sich in beiden Seeteilen etwa gleich stark (Abb. 6a). Als Beispiel für eine insgesamt geringe Zunahme bei einer erheblichen Verschiebung des Vorkommens vom Frühjahr in den Juli dient *Asterionella formosa*; *Tabellaria fenestrata* ist ein Beispiel für das völlige Verschwinden.

Andere Schwebealgen nehmen im mesotrophen Obersee mehr als im eutrophen Gnadensee zu oder gehen dort weniger zurück (Abb. 6b). Die seit 1957 aufgetretene *Mougeotia viridis* tritt im Gnadensee kaum in Erscheinung, da ihr ausschließliches Vorkommen in den Spätsommer fällt, wo zwar der Obersee, nicht aber der Gnadensee produktiv ist. Ähnlich ergeht es der abnehmenden *Fragilaria crotonensis*, die in beiden Seeteilen vom Frühjahr in den Juli/August verdrängt wurde.

3. Ausblick

Phosphat war 1975 kaum noch der Minimumstoff der Primärproduktion, kann aber durch eine merkliche Senkung, die sich derzeit schon anbahnt, wieder dazu gemacht werden. Darauf wird der Seestoffwechsel in Form der Phytoplanktondichte und des Restsauerstoffs ebenso reagieren wie zuvor bei der Phosphatzunahme. So gibt Abb. 7 die enge Beziehung der genannten Gütekriterien untereinander im Obersee der Jahre 1952-75 wieder. Danach ist eine Prognose der Phytoplanktondichte und des Restsauerstoffs möglich, wenn der Phosphatgehalt zu Produktionsbeginn bekannt ist oder wenn er vor- ausgesetzt werden kann.

Daher wurden, gemäß dem eingangs genannten Phosphatrückgang nach 1975, fünf Kurven zwischen -3 % und -13.5 % entwickelt, in deren Bereich die tatsächliche weitere Phosphatminderung liegen könnte. Diesen entsprechen je fünf Phytoplankton- und Restsauerstofflinien mit verschiedenen Regressionskoeffizienten, wobei auch hier konkrete Abweichungen gemäß den Abb. 1 und 2 möglich sind.

Um den stärker "sigmoiden" Phytoplanktonanstieg bei 10-20 mg/m³ Phosphat unterlaufen und dem Obersee die Güte zu Ende der 50er Jahre wiedergeben zu können, ist, wie schon früher ausgeführt (LEHN 1973), ein Gehalt an Orthophosphatphosphor von 10-5 mg/m³ vor dem jährlichen Produktionsbeginn zu fordern. Dieser ist in Abb. 7 als punktiertes Band hervorgehoben, das mit den entsprechenden Bändern des Phytoplanktons und des Restsauerstoffs korreliert ist: Wenn Phosphat auf einen Wert von z.B. 7 mg/m³ sinkt, entsprechend dem Stand des Jahres 1958, dann ist, wie damals, eine mittlere Algendichte von 1200 Z/ml, 900 weniger als im Jahre 1975, und ein Restsauerstoff von 5.9 mg/l, 2.2 mehr als 1975, zu erwarten.

Dieser Zustand kann, je nach der Geschwindigkeit der Phosphatminderung im Obersee, zu sehr verschiedenen Zeitpunkten eintreten: Bei einem jährlichen Rückgang von 10 % und mehr vor dem Jahre 2000, bei einer solchen von 7.5 % und weniger erst danach. Sollte allerdings der Phosphatrückgang z.B. bei 22 anstatt 7 mg/m³ stehen bleiben, dann wäre mit 1650 Z/ml des Phytoplanktons und 4.8 mg/l an Restsauerstoff erst die Hälfte der zu fordernden Verbesserung des Seestoffwechsels erreicht. Wie schnell die Verbesserung tatsächlich abläuft und welchem Gleichgewichtsstand sie zustrebt, wird sicher noch sehr interessant werden.

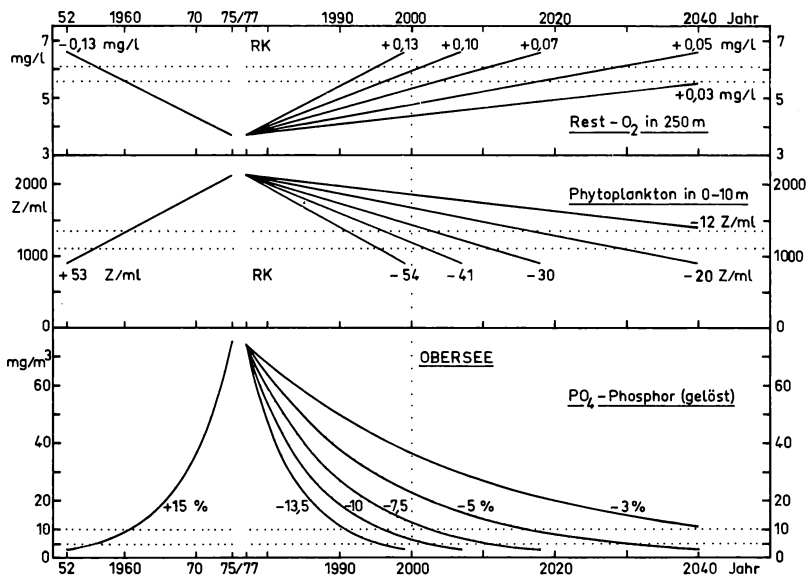


Abb. 7: Entwicklung von Gütekriterien des Bodensee-Obersees (Phytoplanktondichte, Restsauerstoff) in Abhängigkeit von der Phosphatzunahme 1952-75, sowie extrapolierte Prognosen dieser Kriterien in Relation zu fünf angenommenen Phosphat-Rückgangskurven der nächsten Jahrzehnte.

Literatur

- ELSTER H.-J., 1977: Der Bodensee - Bedrohung und Sanierungsmöglichkeiten eines Ökosystems. Naturwiss. 64: 207-215.
- GRIM J., 1955: Die chemischen und planktologischen Veränderungen des Bodensee-Obersees in den letzten 30 Jahren. Arch. Hydrobiol. Suppl. 22: 310-322.
- GRIM J., 1967: Der Phosphor und die pflanzliche Produktion im Bodensee. GWF-Wasser/Abwasser 108: 1261-1271.
- KIEFER F., 1972: Naturkunde des Bodensees, 2. Aufl. Sigmaringen (Thorbecke): 210 S.
- LEHN H., 1968: Sichttiefen im Überlinger See (Bodensee) 1953-1962. Schweiz. Z. Hydrologie 30: 67-74.
- LEHN H., 1969: Die Veränderungen des Phytoplanktonbestandes im Bodensee. I. Fluktuationen von Tabellaria fenestrata 1890-1967. Int. Rev. ges. Hydrobiol. 54: 367-411.
- LEHN H., 1972: Zur Beziehung Phytoplankton - Phosphat im Bodensee. Arch. Hydrobiol. 70: 556-559.
- LEHN H., 1973: Das Bodensee-Pelagial unter der zunehmenden Nährstoffbelastung. Tagungsber. Ges. f. Ökologie Gießen 1972: 77-84.
- LEHN H., 1974: Phytoplanktonänderungen im Bodensee und einige Folgeprobleme. Verh. Ges. f. Ökologie Saarbrücken 1973: 225-235.
- LEHN H., 1975: Entwicklung des Bodensee-Pelagials seit 1920. GWF-Wasser/Abwasser 116: 170-175.
- LEHN H., 1976: Veränderungen im Sauerstoffhaushalt des Bodensees. Verh. Ges. f. Ökologie Wien 1975: 121-128.
- LEHN H., 1978: Vom Abfluß des Bodensee-Obersees. Verh. Ges. f. Ökologie Kiel 1977: 163-172.
- MUCKLE R., 1964: Die Sauerstoffschiebung im tiefen Hypolimnion des Bodensee-Obersees 1963/64 mit Berücksichtigung einiger Untersuchungsergebnisse aus früheren Jahren. Intern. Gewässerschutzkomm. Bodensee Ber. 3: 20 S.
- NÜMANN W., 1964: Die Veränderungen im Blaufelchenbestand (Coregonus Wartmanni) und in der Blaufelchenfischerei als Folge der künstlichen Eutrophierung des Bodensees. Verh. Intern. Ver. Limnol. 15: 514-523.
- WAGNER G., 1970: Die Zunahme der Belastung des Bodensees. GWF-Wasser/Abwasser 111: 485-487.

Adresse

Dr. Hubert Lehn
 Abt. V Seenforschung und Fischereiwesen
 Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
 Schiffstr. 56
 D-7750 Konstanz

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie](#)

Jahr/Year: 1980

Band/Volume: [8_1980](#)

Autor(en)/Author(s): Lehn Hubert

Artikel/Article: [Das Phytoplankton während der Eutrophierungs-Phase des Bodensees 363-372](#)