Mitt. d. Vereins f. Naturwiss. u. Mathematik in Ulm e.V., Heft 31, 1980/81

Zur Limnologie des Lichternsees, eines Rückhaltebeckens im Bereich der Wiblinger Donaustaustufe bei Ulm

von

Herbert Göpel, Ute Krull-Savage,
Elsbeth Nusser und Uwe Tessenow

Abteilung Biologie III
Universität Ulm
Oberer Eselsberg
7900 Ulm/Donau

1. Einleitung

Die vorliegende Publikation ist eine Zusammenfassung von bisherigen Forschungsergebnissen, die vom limnologischen Labor der Abteilung Biologie III an der Universität Ulm in den Jahren 1977-80 erarbeitet wurden. Es handelt sich hier im wesentlichen um die Ergebnisse von folgenden Examensarbeiten: Herbert GÖPEL (1978), Ute KRULL (1978) u. Elsbeth NUSSER(1980). Die Lotungen und Auswertungen der Lotungsdaten, sowie Voruntersuchungen und ergänzende Untersuchungen im Winterhalbjahr und im Frühjahr 1979 wurden vom letztgenannten Autor unter Mithilfe der techn. Angestellten, Frau S. Hagemeister und Herrn W. Müller, durchgeführt.

Die wissenschaftliche Problemstellung der Untersuchungen am Lichternsee bestand - neben Erarbeitung erster limnologischer Daten für diesen relativ jungen See - vor allem darin, den Einfluß der Donau auf die Limnologie der einzelnen Becken des Lichternsees zu klären. Diese Problemstellung ergibt sich aus der Tatsache, daß der oberirdisch sonst zuflußlose Lichternsee am äußersten Nordostende eine offene Verbindung zur Donau aufweist, durch welche in Abhängigkeit von Schwankungen des Flußpegels ein ständig wechselnder Wasseraustausch zwischen dem See und der mit Abwässern mäßig belasteten Donau stattfindet. Es wurde von der Arbeitshypothese ausgegangen, daß sich dieser Donaueinfluß in sich abschwächender Intensität in den einzelnen, mehr oder weniger voneinander getrennten Becken bemerkbar machen müßte.

2. Lage, Entstehung und Morphologie

Der Lichternsee erstreckt sich in südwest-nordöstlicher Richtung gegenüber der Gronne entlang des linken Donauufers von Fluß-km 10,9-12,3 (Baden-Württembergische Zählung) bzw. 2590,9-2592,3 (internationale Zählung).

Von Nordwesten wird der See in zunehmendem Maße vom Industriegebiet Donautal bedrängt.

Der See entstand in der Zeit von 1953-1968 durch Kiesbaggerung auf dem Gebiet eines ehemaligen, durch die Donauregulierung 1937 abgeschnürten Altarmes. Die Auskiesung begann im Nordosten, so daß die südwestlichen Teile des Sees (III und IV auf Abb.1) die jüngsten sind.

Der See hat eine Länge von 1,4 km und eine Wasserfläche von 15,7 ha. Abb.1 gibt einen Überblick über die Oberflächengliederung des Sees. Bezüglich unserer späteren Erörterungen wichtigstes Element dieser Oberflächengliederung ist die durch eine langgestreckte Insel verursachte grobe Zweiteilung des Sees.

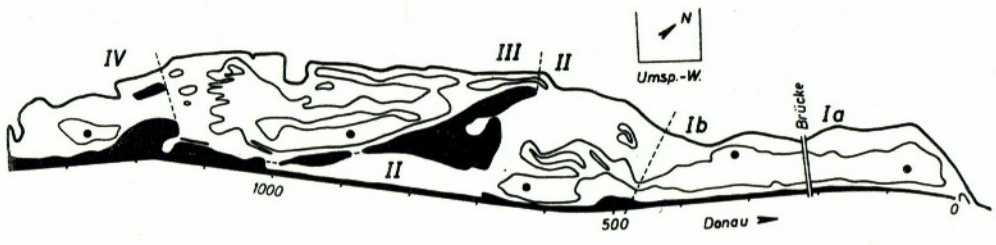

Abb. 1 Lichternsee: Oberflächengliederung, Tiefenbecken > 4 m, Probenentnahmestellen (volle Kreise an den Positionen der maximalen Beckentiefen) und Aufteilung des Sees in Teilbecken (I-IV). Skala an der Donau-Seite des Zwischendammes: Meter von Damm-Ende. Damm zur Donau, Halbinseln auf der Donau-Seite und Inseln schwarz gezeichnet.

Eine detaillierte Beurteilung der Morphologie des Lichternsees erlauben aber erst die Tiefenkarten (Abb.3), die zugleich die Grundlage zur Berechnung der morphologischen Parameter der Tab.1 bilden. Zur Erstellung der Tiefenkarten wurden von eingemessenen Uferpunkten aus im Abstand von 10-25 m parallele Querprofile mit einem Vermessungslot (Echolot der Fa. Fahrentholz,Kiel) entlang von markierten, über den See gespannten Leinen gefahren. Wegen der sehr unregelmäßigen Tiefenstruktur mußte das Meßnetz sehr dicht gehalten werden (vgl. Echogramm, Abb.2). Die Flächen wurden durch Planimetrierung der Einzelkarten der Abb.3 mit einem OTT-Planimeter ermittelt. Als Näherungsverfahren zur Volumenbestimmung wurde die Planimetrierung der hypsographischen Kurven der Abb. 4 gewählt.

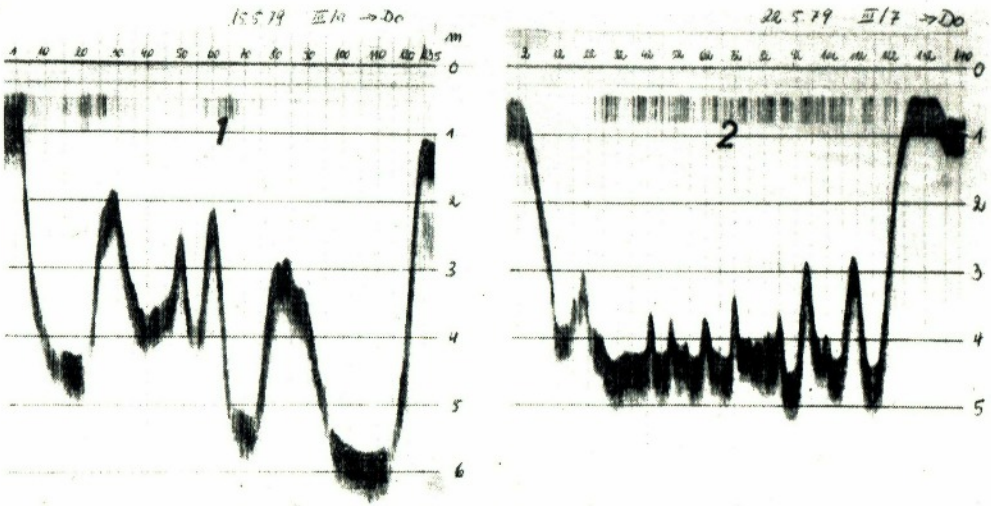

Abb. 2 Echogramme aus dem Seeteil III. Position der Meßprofile vgl. Pfeile in Abb.3c. Richtung der Meßfahrt NW - SO. Senkrechte Markierungsstriche im Abstand von 5 m,horizontale im Abstand von 1 m.

Seeteil	Fläche ($10^4 m^2$=ha)	Volumen ($10^3 m^3$)	mittlere Tiefe (m)	max. Tiefe (m)
I	3,77	127,5	3,38	5,5
II	4,7	100,7	2,14	5,3
III	5,57	189,9	3,41	5,7
IV	1,67	46,5	2,78	5
I-IV	15,71	464,6	2,96	5,7

Tab. 1 Daten zur Morphologie des Lichternsees (bezogen auf den Sollpegel der Wiblinger Donaustaustufe von 472,00 m ü.NN).

Zusätzliche morphologische Daten zum Gesamtsee:

maximale Länge = 1407 m

maximale Breite (senkrecht zur Längsachse): 189 m
mittlere Breite (Fläche/max. Länge) : 107 m

Uferlänge einschl. Inselufer = 4280 m

Uferentwicklung (Umfang des flächengleichen Kreises dividiert durch Uferlänge) = 3.0

Inselfläche = 1,15 ha

Volumen, ermittelt durch Planimetrierung der 0 hypsografischen Kurve des Gesamtsees = $463*10^3$ m^3

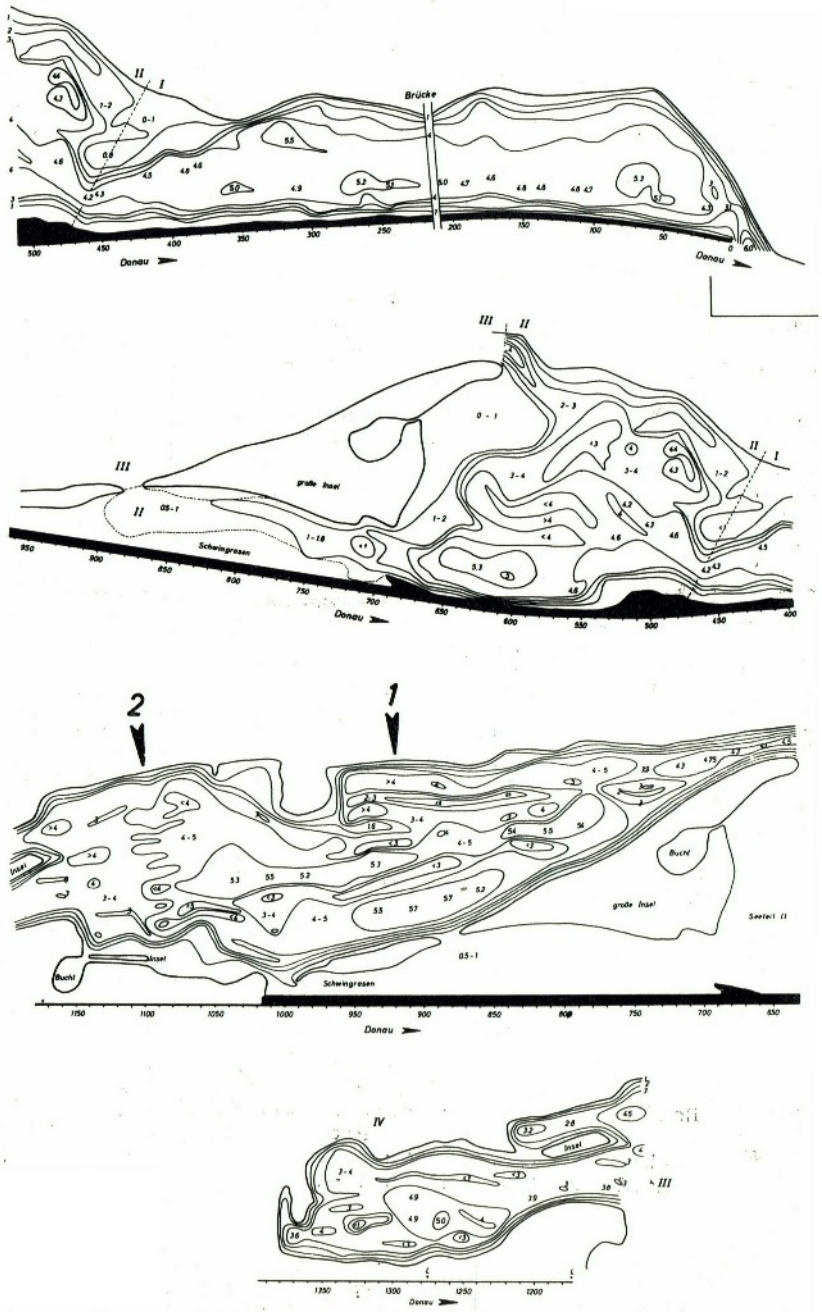

Abb. 3 Tiefenkarten der Seebecken I-IV (von oben nach unten). Distanz der Isobathen = 1 m. Alle eingetragenen Zahlen bedeuten Meter Wassertiefe. Innerhalb der Tiefenbecken > 4 m sind die jeweiligen Maximaltiefen der Querprofile angegeben. Die beiden Pfeile 1 u.2 weisen auf die Echogramme der Abb.2 hin.

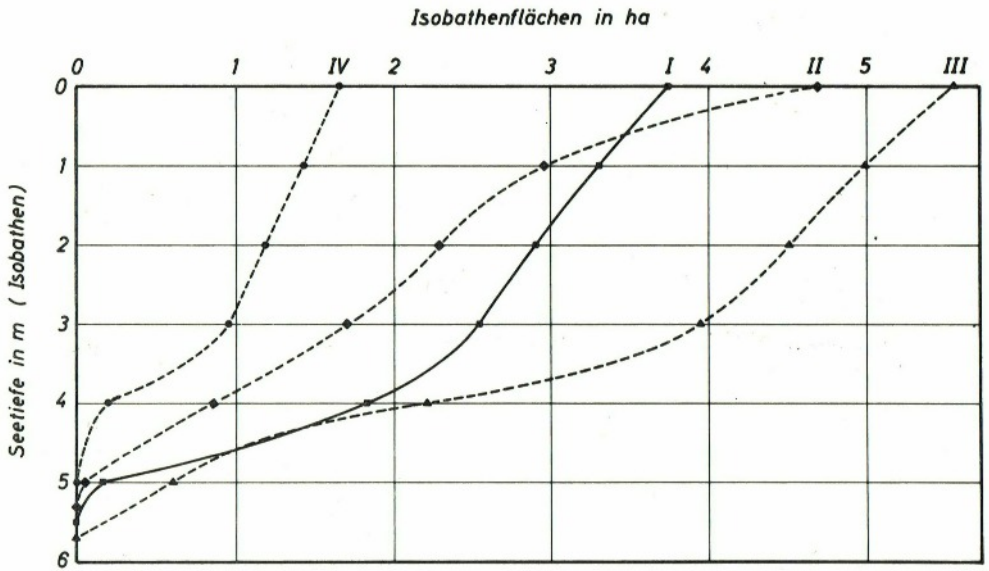

Abb. 4 Flächen - Tiefen - Kurven (hypsographische K.) der Einzelbecken des Lichternsees.

Die für die Limnologie des Lichternsees im allgemeinen und die für unsere Problemstellung im besonderen wichtigen morphologischen Charakteristika des Lichternsees sind folgende:

1. Aufgrund der maximalen Beckentiefen von 5,0-5,7 m und der mittleren Seetiefe von 3 m (Einzelbecken 2,1-3,4 m) handelt es sich beim Lichternsee um einen Flachsee.
2. Die Beckenmorphologie ist mit Ausnahme des vordersten Seeteils sehr unruhig, ein für Baggerseen typisches Merkmal.
3. Bis zur großen Insel (nach unserer Einteilung zwischen den Seeteilen II und III liegend) erstreckt sich parallel zum Donaudamm eine mindestens 4 m tiefe Rinne, die im Seeteil I bis fast 60 m nach Norden reicht, sich aber zwischen den Teilen I und II auf, eine Breite von 10 m verengt.
4. Der 22 m breite Durchstich zur Donau hat eine max. Tiefe von 6 m, die Verbindung zwischen den Seeteilen II und III sowie III und IV solche von etwa 4 m.
5. Die für den Wasseraustausch wichtigen minimalen Wassertiefen (Schwellentiefen) der Verbindungen zwischen der Donau und dem See einerseits sowie den einzelnen Becken des Lichternsees andererseits betragen 3,1 m (Donau-Seeteil I), 4,2 m (I-II), 2,5 m (II-III) bzw. 3,7 m (III-IV).

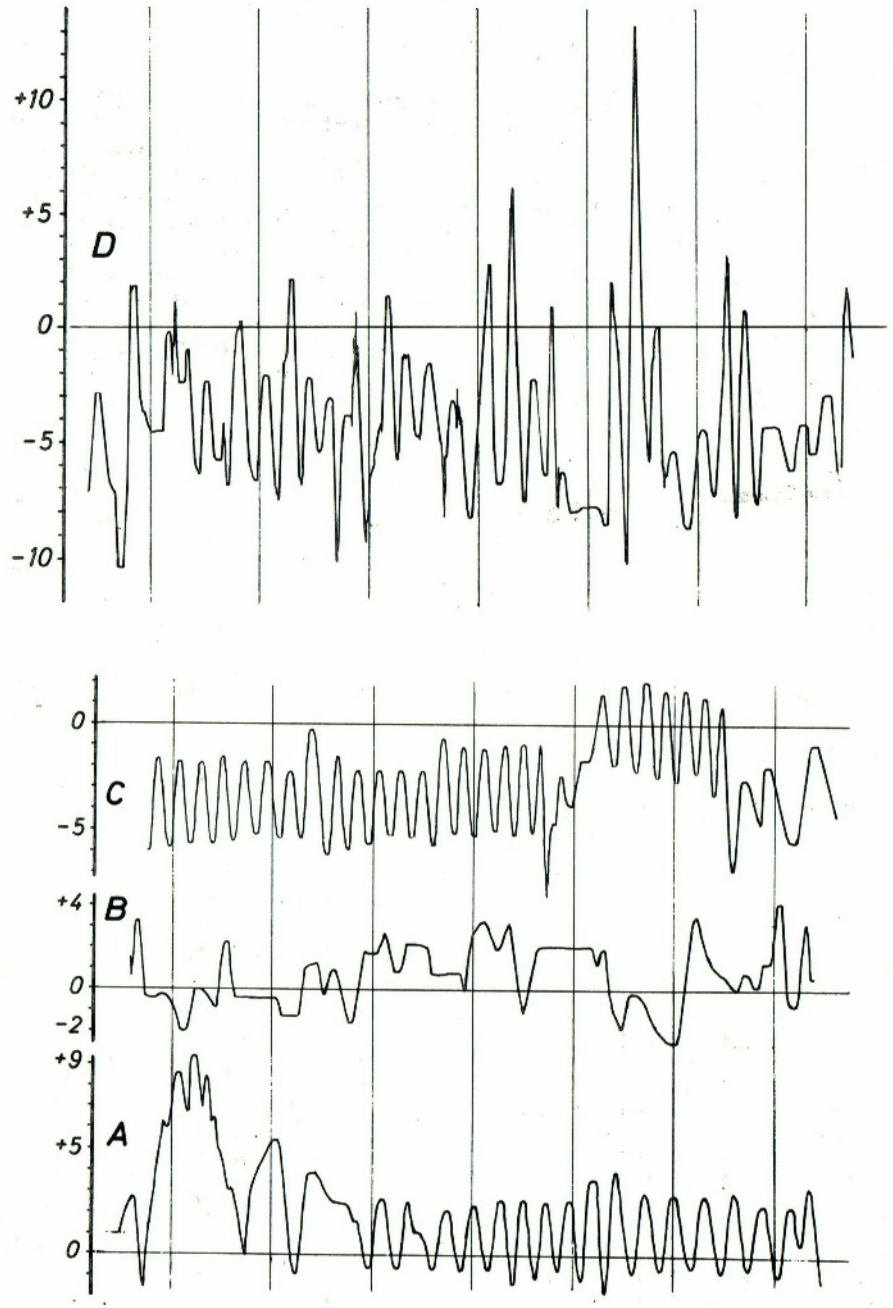

Abb.5 Pegelschwankungen im Lichternsee (I). 4 Beispiele von je einer Woche: A=19.6. - 26.6.78, B= 18.4.-25.4.79, C= 23.5.-30.5.79, D=30.7.-6.8.79. Ordinate = cm zum Pegel-Nullpunkt (472.00 m ü.NN).

6. Die Tiefenbecken mit mehr als 5 m Wassertiefe nehmen eine Gesamtfläche von o,84 ha entsprechend 5t3 % der Seefläche ein. Die f lächenmäßig größten tieferen Becken hat der Seeteil III? im Seeteil IV gibt es nur eine eng begrenzte Stelle mit einer Tiefe von 5 m.
7. Von den Flachwasserbereichen bis zu Tiefen von 2 m sind folgende erwähnenswert :
   a) eine breite vom Nordwestufer weit nach Süden zum Donaudamm vorstoßende Zunge auf der Höhe des nördlich vom See gelegenen Umspannerwerkes (unsere Grenze zwischen den Becken I und II),
   b) ausgedehnte Regionen östlich und südlich der großen Insel und
   c) relativ schmale Zungen, Rücken und Hügel in den Seeteilen III und IV, die z.T. vom Ufer ausgehen, aber auch aus tieferem Wasser aufsteigen.

3. Wasserstände und Wasseraustausch

Da der Lichternsee eine offene Verbindung zur Wiblinger Donaustaustufe hat, folgen die Wasserstände im See denen der Staustufe. Durch die Wehrregulierung sind die Wasserstandsschwankungen gering. Pegelstände von mehr als 20 cm oberhalb bzw. mehr als 15 cm unterhalb des Stauziels der Donaustaustufe Wiblingen von 472,0 m ü.NN sind selten. Von März bis Oktober 1979 lagen 83 % der Schwankungsmaxima im Bereich von — 10 bis +5 cm. Die höchsten Wasserstände wurden im März (bis zu +23 cm), die niedrigsten im Hochsommer (bis -15 cm) registriert. Hohe Pegelstände können aber zu jeder Jahreszeit in Abhängigkeit von den entsprechenden Witterungsbedingungen auftreten. In den einzelnen Seebecken verlaufen die Pegelschwankungen praktisch synchron, da die Verbindungen zwischen den einzelnen Seeteilen nicht enger sind als diejenige zur Donau und es so zu keinem vorübergehenden Stau im See kommen kann. Ein Pegelanstieg in der Donau führt zu einer Druckwelle, die eine quasi simultane Verschiebung der Wasserkörper Richtung See-Ende zur Folge hat.

Sehr charakteristisch für den Lichternsee sind kurzfristige Pegelschwankungen im Bereich von 3-5 cm, die z.T. über mehrere Tage mit einer regelmäßigen Schwingungsdauer von 5-6 Stunden auftreten (vgl. Abb.5). Sie werden vermutlich durch die automatische Pegelregulation am Wiblinger Wehr verursacht.

Wie Abb. 5 zeigt, können aber auch andersartige, z.T. recht kurzfristige und heftige Pegelschwankungen auftreten, die ebenfalls mit der Manipulation des Flusses durch die Wasserkraftwerke Öpfingen, Donaustetten und Wiblingen Zusammenhängen müssen. Natürliche Ursachen für Pegelschwankungen sind witterungsbedingt, es kann sich dabei um niederschlagsabhängige Änderungen des Donau-Abflusses oder um Windstaueffekte im See handeln.

Der Wasseraustausch zwischen See und Donau wird durch die Wasserstandsschwankungen naturgemäß stark gefördert, er ist aber nicht allein von diesen abhängig. Auch bei konstanten Pegelständen herrschen im Bereich des Durchstiches Donau/

See hydrostatische Ungleichgewichte infolge unterschiedlicher Temperatur bzw. Dichte des Wassers. Diese Ungleichgewichte führen zu Einschichtungsvorgängen, und zwar im Sommerhalbjahr meist von kälterem Donauwasser in die ebenfalls kalten tieferen Schichten des Sees und einem Abfließen von im Sommer wärmeren Oberflächenwasser des Sees in die Donau. Diese Wasserverdrängung konnte mit Hilfe von Driftkörpermessungen sowohl bei fallendem als auch bei steigendem Pegel beobachtet werden (GÖPEL 1978).

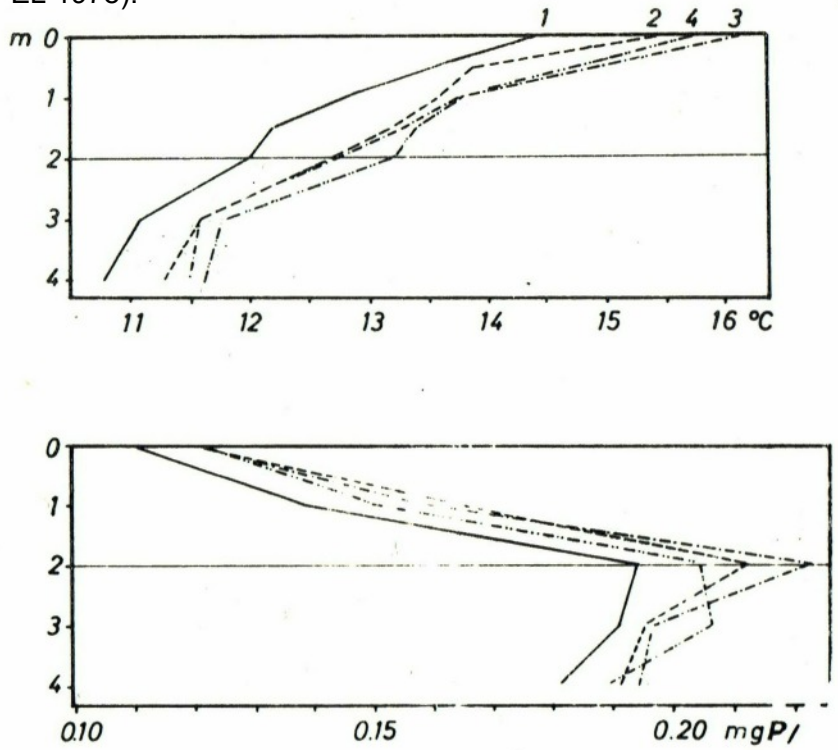

Abb. 6 Einschichtung von phosphatreichem Donauwasser in den thermisch geschichteten See.
Oben: Temperaturschichtung, unten : Phosphatschichtung, Position: Mitte eines Querschnittes ca. 100 m vom Durchstich,
Datum : 14.7.1978, 1-4, Situation im Abstand von 2 Std., 11-17 Uhr.

Die Verteilung des in den See eindringenden Donauwassers erfolgt z.T. ungleichmäßig über den See (Teil I), so daß für donaubürtige, im See niedrig konzentrierte Substanzen nicht nur vertikale sondern auch starke horizontale Konzentrationsunterschiede auftreten. Ein bevorzugtes Eindringen von Donauwasser konnte im Seeteil I vor allem entlang des Nord- bzw. Nordwestufers, einmal aber auch entlang des Dammes zur Donau beobachtet werden. Die durch Eindringen von Donauwasser im See verursachten Konzentrationserhöhungen, z.B. für Phosphat und Silikat, konnten durch die bisherigen Untersuchungen mindestens bis zur Brücke (Teil Ia) meist sehr deutlich direkt verfolgt werden. In stark abgeschwächter Form war der Vorstoß von Donauwasser nur etwa bis Ende Seeteil I nachzuweisen (Abb.7). Durch Vermischungsprozesse, durch den biogenen Verbrauch der donaubürtigen Substanzen sowie durch andere seeinterne Prozesse (z.B. Freisetzung oder Fixierungsprozesse am Sedimentkontakt) kann über den Seeteil I hinaus meist nur noch ein weiterer mittlerer Konzentrationsabfall der entsprechenden Substanz festgestellt werden, ohne daß der Weg des eingedrungenen Wassers weiter direkt verfolgt werden könnte.

4. Das Lichtklima

Die als Lichtklima bezeichnete raumzeitliche Strahlungsverteilung ist im Lichternsee durch die hohen Trübstoffkonzentrationen charakterisiert. Diese Trübstoffe bestehen in erster Linie aus Plankton und dessen Resten (Detritus); darüberhinaus während Perioden intensiver Photosynthese auch aus biogen gefälltem Kalk und während Schlechtwetterperioden z.T. aus Flußtrübstoffen der Donau sowie durch Wellen am Ufer aufgewirbelte Feinsedimente oder Uferausspülungen.

Die mit einer Secchi-Scheibe gemessenen Sichttiefen liegen im Sommerhalbjahr zwischen 0,5 und 0,8 m und erreichen nur im Winter unter der Eisdecke Werte zwischen 1 und 3 m. Die mit einer Photozelle gemessene Lichtverteilung läßt den vertikalen Verlauf der Lichtabsorption und die Unterschiede zwischen den Seeteilen besser erkennen, als die Werte der recht groben Sichttiefemessungen. Einige auf die Oberflächenhelligkeit bezogene prozentuale Lichtverteilungskurven des Sommers 1978 sind in Abb. 8 dargestellt. Die aus der Lichtabsorption der oberen 40 cm der Wassersäule berechneten Tiefen der 50 %- Helligkeiten sowie die graphisch ermittelten Tiefen der 1 %-Helligkeit können der Tabelle 2 entnommen werden. In Tab. 2 sind außerdem noch einige Lichtwerte vom Frühjahr 1979 enthalten.

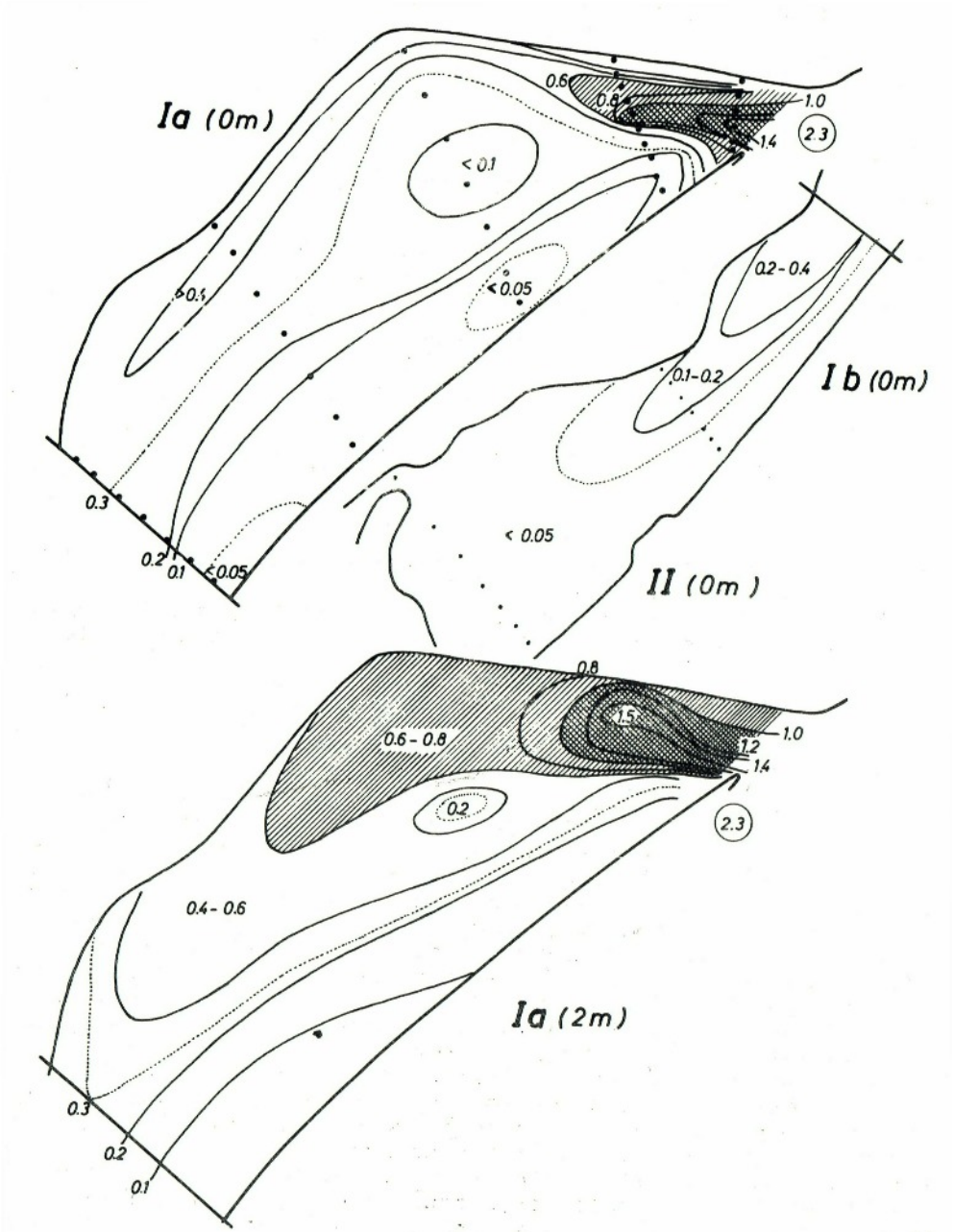

Abb.7 Horizontale Si-Verteilung in 0 u.2 m Tiefe des Seeteils Ia (0 m auch für Teil II, mittl. Skizze in größerem Maßstab) am 8.5.79.
Temperaturen: See = 7° (Tiefe) - 11° (Oberfläche)
Donau = 7° (Minimum der vorhergehenden Nacht) - 11 (Maximum am Untersuchungstag).
Zahlenangaben bedeuten mg Si/1.

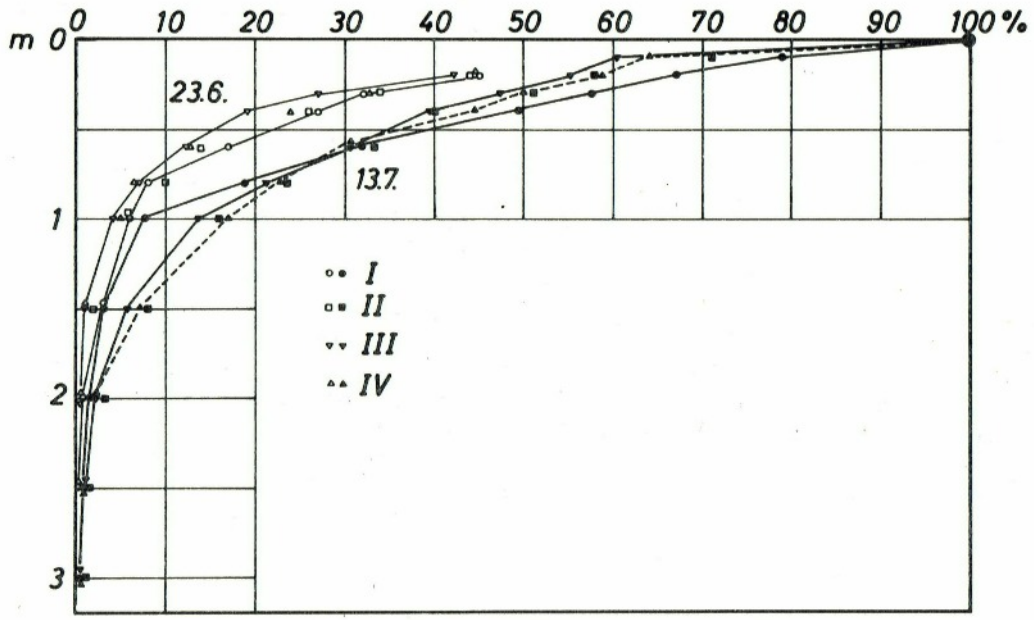

Abb. 8 Vertikale Lichtverteilung im Lichternsee (I-IV) an zwei Tagen des Jahres 1978, etwa der Streubreite des Sommerhalbjahres entsprechend (vgl. Tab.2).

		I		II		III		IV	
Datum		50%	1%	50%	1%	50%	1%	50%	1%
1978	23.6.	0,21	2,0	0,21	2,0	0,17	1,5	0,19	1,50
	13.7	0,39	2,4	0, 30	2,9	0, 30	2,6	0,34	2,40
	25.7	0,35	3,6	0,44	3,6	0,26	1,9	0, 30	1,60
	15.8	0,32	3,2	0,28	1,8	0, 20	1,4	0,23	1,70
	29.8	0,35	2,3	0,35	2,5	0,16	1,3	0,23	2,00
	1.9	0,25	2,5	0,24	2,6	0,25	2,0	0,23	1,80
	5.9	0,27	2,8	0,23	2,6	0,23	1,8	0,24	1,80
	8.9	0,16	2,0	0,23	2,3	0,16	1,7	0,19	1,90
	11.9	0,18	2,6	0,16	2,9	0,23	1,8	0,19	1,90
	19.9	0,18	1,8	0,17	1,9	0,16	1,7	0, 20	1,70
	21.9	0,23	2,2	0,25	2,1	0,21	1,6	0,17	1,40
	Mittel	0,26	2,5	0,26	2,5	0,21	1,8	0,23	1,80
	Max./Min.	2,44	2,00	2,75	2,00	1,88	2,00	2,00	1,71
1979	19.3.	0,26	2,4	0,28	2,4	0,23	1,9	0, 20	1,9
	94	0,16	2,1	0,17	1,6	0,19	1,5	0,21	1,8
	254	0,19	1,8	0, 20	1,8	0,18	1,5	0,20	1,7

Tab. 2 Tiefenlage (m) der 50%- und 1%-Helligkeit bezogen auf die Oberflächenhelligkeit im Sommer 1978 und Frühjahr 1979 in den Seeteilen I-IV.

Aufgrund der in den Abbildungen und Tabellen enthaltenen Daten läßt sich das Lichtklima des Lichternsees zusammenfassend wie folgt charakterisieren: Das auf die Wasseroberfläche auftreffende Licht wird im Frühjahr und Sommer in den oberen 0,16 bis 0,44 m (Mittel über alle Werte = 0,23 m) auf 50%, in den oberen 1,3 bis 3,6 m (Mittel = 2,1 m) auf 1% geschwächt. Die Dicke der trophogenen Schicht, d.h. die Dicke der oberen Wasserschicht mit einer positiven Photosynthesebilanz beträgt aufgrund der Tiefenlage der 1%-Helligkeit im Mittel während des Sommerhalbjahres nur etwa 1,8 bis 2,5 m.

Die vorderen Seeteile I und II zeigen gegenüber den hinteren III und IV deutlich geringere Absorptionswerte, aber wesentlich stärkere Schwankungen derselben. Dies gilt sowohl für die Oberschicht als auch für die gesamte Wassersäule. Der Seeteil I kann jedoch, wie Abb. 8 zeigt, bei einer relativ hohen Transparenz der obersten Schichten (0,5 m) eine auffallend geringe Transparenz der tieferen Schichten (1-2 m) zeigen.

Solche Verhältnisse entstehen vermutlich dadurch, daß mäßig trübes Donauwasser in mittlere bis tiefere Wasserschichten eindringt und planktonreiche und darum sehr trübe Oberflächenschichten aus dem See verdrängt.

5.Temperaturverteilung

Die Temperaturverteilung in der Freiwasserzone (Pelagial) stehender Gewässer ergibt sich aus einer Vielzahl, z.T. gegenläufiger, Reaktionen bzw. Parameter: der Strahlungsabsorption, der Rückstrahlung und der Verdunstungskälte in den obersten Wasserschichten, der durch den Wind über die Wasseroberfläche eingetragenen kinetischen Energie, die zu Strömungen im See führt, aus dem Zu- und Abfluß von Wasser unterschiedlicher Temperatur (Einschichtung, Verdrängung) sowie aus der speziellen Dichteabhängigkeit des Wassers von der Temperatur (Konvektion, Schichtung).

Die sich aus den genannten Faktoren in gemäßigtem Klima ergebende typische thermische Sommerschichtung von Seen in ein warmes Epilimnion, ein kaltes Hypolimnion und ein dazwischen liegendes relativ dünnes Metalimnion mit einem starken Temperaturgradienten (Temperatur-Sprungschicht oder Thermocline) ist im Lichternsee nur andeutungsweise vorhanden.

Die Isothermendiagramme des Seeteils III aus dem Jahre 1978 (U.KRULL) und 1979 (E.NUSSER), die hier in Abb.9 stellvertretend zur Charakterisierung der Verhältnisse des ganzen Sees ausgewählt wurden, zeigen eine für Flachseen typische Dynamik der Temperaturverteilung: kein über die Sommermonate stabiles Dreischichtensystem, sondern nahe der

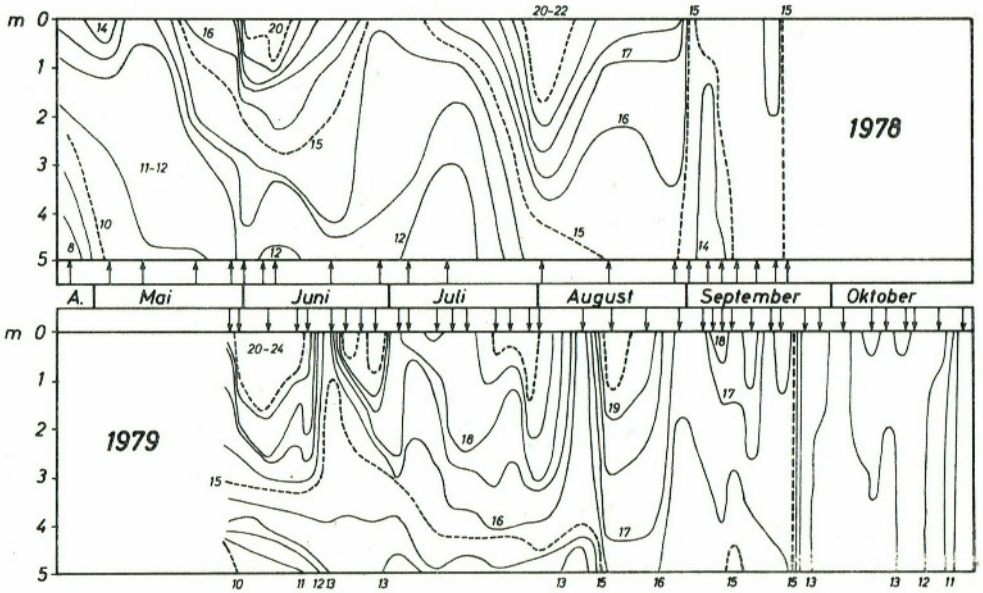

Abb.9 Isothermendiagramme des Seeteils III (Wassersäule über der Maximaltiefe) für 1978 u. 1979. Distanz der Isothermen 1°C, Isoth. für > 20° nicht gezeichnet, da zu stark von der Tageszeit abhängig. Pfeile= zeitliche Meßfrequenz.Messung nach der Tiefe je nach Gradient im Abstand von 0,2-1 m.

Wasseroberfläche um 0-1 m ein ständiger witterungsabhängiger Wechsel der Wassertemperaturen zwischen den Extremen 14 und 22°C, sowie im tieferen Wasser um 4-5 m vom Frühjahr bis zum August eine relativ rasche, dann verzögerte Erwärmung bis auf max. 15° (1978) bzw. 17° (1979). Der Temperaturunterschied zwischen der obersten Wasserschicht und dem Wasser über Grund in 5 m Tiefe schwankt während der Sommermonate zwischen 2° und 12°, woraus sich ein Gradient von 0,4-2,4°/m ergibt. Während Schönwetterperioden besteht somit eine relativ stabile Schichtung.

Während Kaltwetterperioden kann diese jedoch durch die Abkühlung des Oberflächenwassers auf die Temperatur des Tiefenwassers rasch aufgehoben werden, so daß auch im Hochsommer Vollzirkulationsperioden auftreten können, wie z.B. Ende Juni 1978 und um den 10. August 1979. Die herbstliche Vollzirkulation tritt etga ab Anfang September bei einer Wassertemperatur von 15-17° ein.

Obwohl die beiden Temperaturdiagramme infolge ihres unterschiedlichen Zeitrasters nicht voll vergleichbar sind, zeigen sie dennoch, daß zwischen den einzelnen Jahren starke Unterschiede im Temperaturgang Vorkommen (vgl. z.B. Verlauf der 15°-Isotherme). Durch die starke Witterungsabhängigkeit der Thermik von Flachseen ist dies auch nicht anders zu erwarten.

Die Unterschiede zwischen den Seebecken sind relativ gering, sie. betreffen nicht das Grundmuster der zeitlich-räumlichen Verteilung. Bei stärkerem Einstrom von kühlerem Donauwasser kommt es in den Seeteilen I und II zu einer Abkühlung der tieferen Wasserschichten während Schichtungsperioden bzw. der gesamten Wassermasse während Perioden der Vollzirkulation (vgl. Abb.10). Die Seeteile I und II sind infolge ihrer starken Beeinflussung durch die Donau insgesamt um 1-2° kälter als die Teile III und IV.

Gelegentlich, so im August 1979, kann es aber auch zu einer Umkehrung des Temperaturgefälles zwischen den einzelnen Seeteilen kommen.

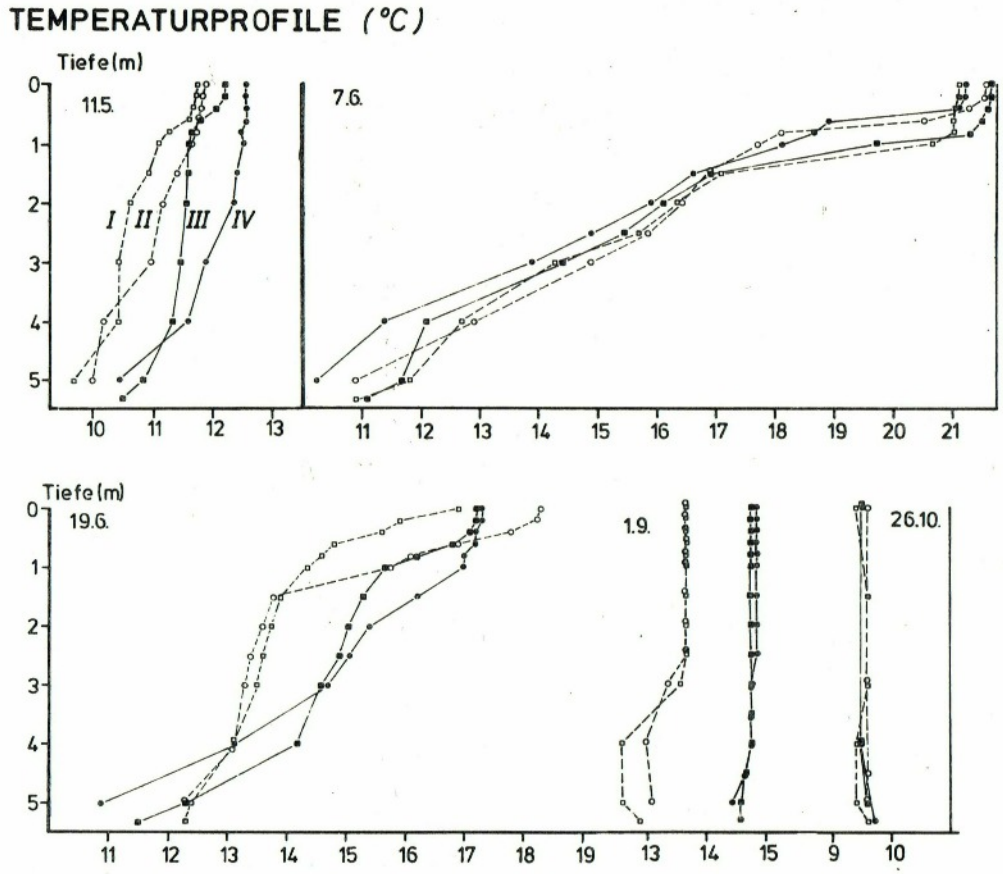

Abb. 10 Beispiele für unterschiedliche Temperaturgradienten in den 4 Teilen des Lichternsees im Sommerhalbjahr 1978

6. Chemismus

Die Komponenten des Kalk-Kohlensäure-Systems , Kalzium, Hydrogenkarbonat bzw. Karbonat (als Alkalinität bzw. Säurebindungsvermögen = SBV) und pH weisen den Lichternsee entsprechend der Geochemie der Umgebung und des Haupteinzugsgebietes der Donau als ein kalkreiches neutrales bis alkalisches Gewässer aus. Die Gesamthärten (Ca + Mg), an denen das Kalzium zu 80-90% beteiligt ist, liegen im See zwischen 3 und 6 mval/1, in der Donau zwischen 5,5 und 6,1 (meist um 5,8) mval/1. Die entsprechenden Werte für die Alkalinität lauten 2,5-5 mval/1 für den See und 4-5 (meist um 4,6-4,9) mval/1 für die Donau (vgl. Abb.11).

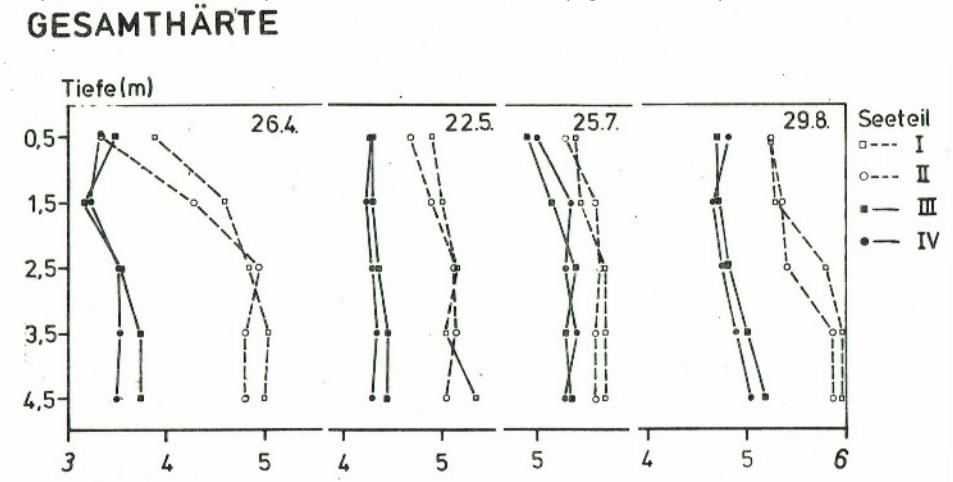

Abb.11 Verteilung der Gesamthärte (Ca + Mg) in mval/1 an 4 ausgesuchten Tagen des Jahres 1978.

Die pH-Werte im See mit den gemessenen Extremen 6,9 im tieferen Wasser und 9,2 nahe der Oberfläche sind in ihren zeitlichen Schwankungen und ihrer räumlichen Verteilung in erster Linie abhängig von den biologischen Prozessen der Photosynthese der Planktonalgen und der Atmung der Bakterien und des Zooplanktons. Die pH-Schwankungen werden durch den relativ hohen Kalkgehalt stark abgepuffert.

Hohe Kalkgehalte durch ständige Zufuhr kalkreichen Wassers aus der Donau und hohe pH-Werte durch photosynthetischen $C0_2$-Entzug führen zur sog. biogenen Entkalkung, die sich im Lichternsee besonders im Frühjahr in den hinteren Seeteilen bemerkbar macht. Aufgrund dieser biogenen Entkalkung im See einerseits und der einseitigen Zufuhr aus der Donau andererseits sind die Konzentrationen für Kalzium und Hydrogenkarbonat in den Seeteilen III und IV meist deutlich niedriger als in den Teilen I und II. Es kommt aber immer wieder, sowohl im Sommer als vor allem im Winter, zu einem Konzentrationsausgleich der einzelnen Seebecken. Daran sind interne Lösungsprozesse als auch der zwischen den Seebecken auftretende Wasseraustausch beteiligt.

Die für die Algenproduktion und damit für die gesamte Bioaktivität eines Sees wichtigste Substanz ist das gelöste bzw. leicht lösliche Phosphat. Das Phosphat bestimmt i.d.R. die Trophie eines Gewässers.

Die Donau weist eine mittlere Konzentration an gelöstem Orthophosphat von 236 µg P/l auf (29 Analysen vom 15.3.78 - 25.4.79 Maximum 400, Minimum 137 µg P/l, und sie ist damit die Haupt-P-Quelle des Lichternsees und für dessen hohe Algenproduktion verantwortlich. Die vorderen Seeteile werden so laufend, die hinteren zumindest im Winterhalbjahr, vor allem aber im Herbst bis zur Bildung einer geschlossenen Eisdecke durch die Donau gedüngt. Dadurch liegen die P-Konzentrationen in den vorderen Seeteilen I und II fast immer, z.T. um ein vielfaches, über denen der hinteren (Abb.12, Tab. 3).

Auch die Konzentrationsschwankungen sind entsprechend unterschiedlich. Die tieferen Wasserschichten verhalten sich z.T. entgegengesetzt, da sich hier in den geschützten hinteren Seeteilen, besonders in IV, aus dem Sediment zurückgelöstes Phosphat weit über die Konzentration der Donau anreichern kann (Abb.12). In der Zeit vom 26.4.78 bis zum 25.4.79 wurden im ganzen See folgende Extreme gemessen: 0,5 m-Schicht: 4 bzw. 282 µg P/l, 4,5 m-Schicht: 5 bzw. 657 µg P/l.

Die Minimalwerte traten 1978 und 1979 im März/April z.Z. der Diatomeen-Frühjahrsentwicklung, die Maximalwerte in der Oberschicht im Herbst und Winter, in der Unterschicht im August auf Der Konzentrationsabfall im Frühjahr durch die biogene Zehrung beginnt bereits unter der geschlossenen Eisdecke, wie die Werte der Tabelle 3 vom 5.2.-19.3.1979 zeigen. Die Eisdecke taute zwischen dem 5. und dem 13.3.ab.

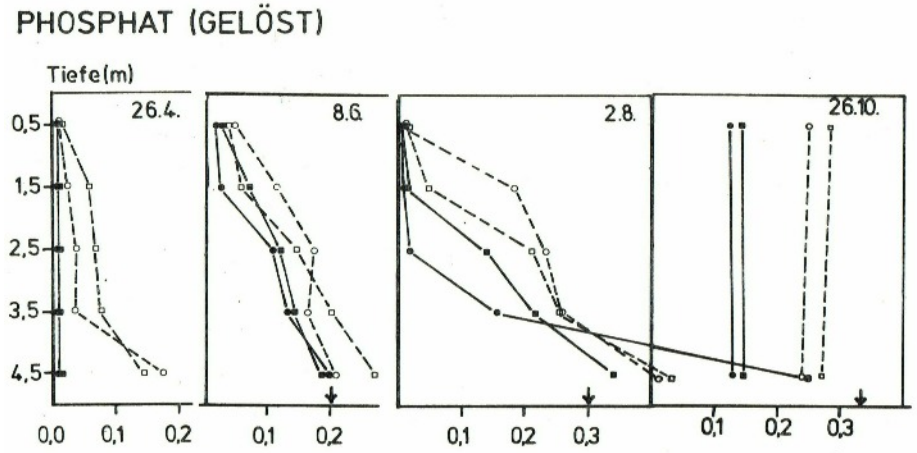

Abb.12 Verteilung des gelösten o-Phosphats in mg P/l. Sonst entspr. Abb. 10 u. 11. Pfeile: Konzentrationen in der Donau

Nach dem Schmelzen des Eises erfolgt eine explosionsartige Entwicklung von Plankton-Diatomeen, vor allem von Stephanodiscus hantzschii und eine rapide P-Zehrung im ganzen See. Nur zu dieser Zeit ist mit einer Begrenzung der planktischen Primärproduktion durch Phosphat zu rechnen und dies auch nur in den hinteren Seeteilen II-IV, da die Konzentrationen in den vorderen Teilen durch P-Zufuhr aus der Donau nur selten und kurzfristig 10 µg P/l unterschreiten.

Seetiefe	I			II			III			IV		
(m)	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
0,5	234	114	78	242	120	59	165	34	7	139	6	8
2,0	311	158	90	272	151	64	249	116	6	187	81	9
3,0	341	172	--	294	159	--	261	120	--	197	98	--
4,0	338	162	--	327	162	--	235	127	--	187	108	--
4,5	341	167	104	319	174	61	243	134	5	183	122	5

Tab.3 Konzentrationen an gelöstem o-Phosphat in µg P/l im Winter und Frühjahr 1979.
I-IV = Seeteile, a,b,c entspr. 5.2, 2.3 bzw. 19.3

Für das Nitrat , einem weiteren wichtigen Nährstoff, gilt im Prinzip das gleiche wie für das Phosphat: Die Hauptnitratquelle ist die Donau mit durchschnittlich 3,3 mg Nitrat-Stickstoff /l (2,2-4,4).

Sie liegt ständig über den Konzentrationen des Sees von 0,2-4,0 mgN/1. Die Nitratkonzentrationen in den vorderen Seeteilen liegen fast immer über denen der hinteren. Produktionsbegrenzende Minimalkonzentrationen treten beim Nitrat noch weniger auf als beim Phosphat: die niedrigste gemessene Konzentration im Oberflächenwasser betrug im See 0,62 (22.5.78) bzw. 0,70 mg NO3-N/l (19.3.79).

Abweichend vom Phosphat werden die höchsten Konzentrationen meist nicht in der Tiefe über dem Sediment, sondern in der Mittelschicht von 2,5-3,5 m Seetiefe gefunden, wie dies für hocheutrophe Seen mit anaeroben Bedingungen am Sedimentkontakt typisch ist. Diese vertikale Nitratverteilung beruht darauf, daß hier in der Tiefe eine mikrobielle Nitratreduktion zum Stickstoff bzw. über Nitrit zum Ammonium erfolgt. Die niedrigsten Nitrat-Werte des Lichternsees überhaupt wurden mit 0,16 mg NO_2-N/l darum auch im tiefen Wasser des Teils IV gefunden, also dort, wo zugleich die höchsten Phosphatwerte , aber die niedrigsten 0_2-Werte auftraten.

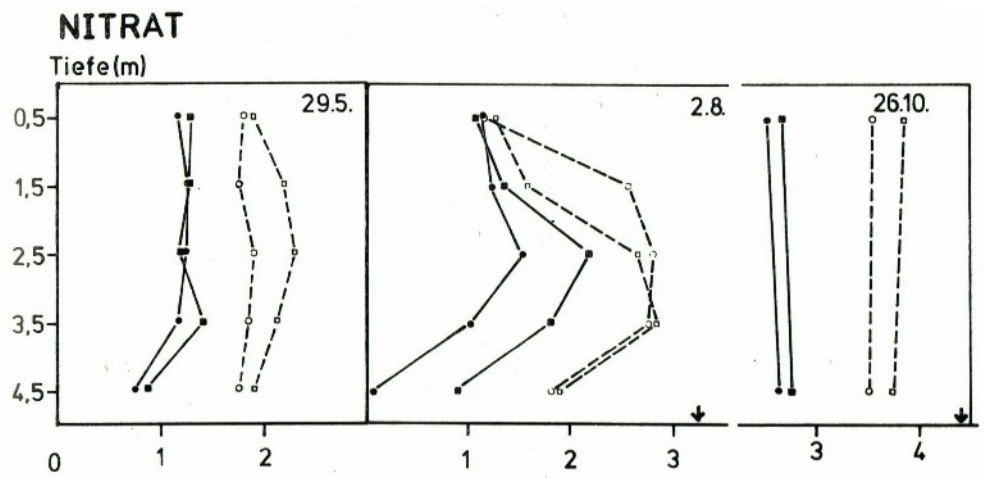

Abb.13 Nitrat in NO_3-N/l , sonst entspr.Abb.10-12

Eine durch Phytoplankton im See ebenfalls stark gezehrte Substanz ist die Kieselsäure, die im Lichternsee vor allem während der Frühjahrs-Massenentfaltung von Diatomeen Minimalwerte von 10-20 µg/1 erreicht, während die maximalen Werte im See bei 3500 µg/1 und die Konzentrationen der Donau zwischen 2000 und 3500 µq/1 liegen. Für die Diatomeen, besonders die stärker verkieselten, wird Kieselsäure, vor allem in den Teilen III und IV, häufiger zum Minimumfaktor als dies für das Phosphat und Nitrat zutrifft. Dies ist - neben der gehemmten Zufuhr von außen - auch eine Folge der relativ geringen Rücklösungsgeschwindigkeit der Kieselschalen im See selbst (vgl. Abb.7 u. 14).

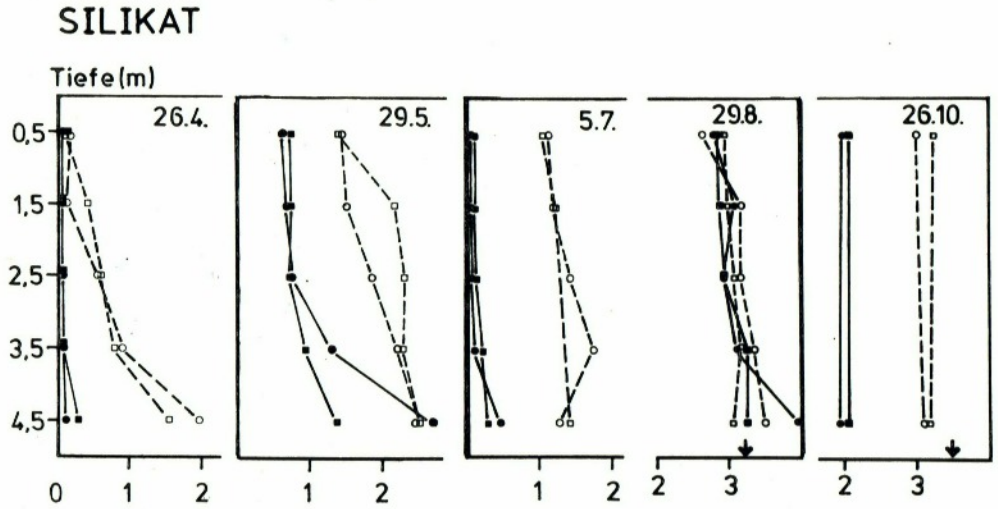

Abb.14 Silikat in mg Si/l, sonst entspr. Abb. 10-13

Der im Wasser gelöste Sauerstoff ist neben der Temperatur, dem Licht und dem Phosphat einer der Schlüsselfaktoren im Ökosystem See. Der Sauerstoff wird in seiner Konzentrationsverteilung außer vom Gasaustausch mit der Atmosphäre vor allem von der Photosynthese des Phytoplanktons (O_2-Freisetzung) einerseits und der Atmung der Bakterien, des Zooplanktons, der Bodentiere und Fische (O2-Verbrauch) andererseits bestimmt. Im Lichternsee greift zumindest im Seeteil I zusätzlich noch der Wasseraustausc[1] mit der Donau in den O_2-Haushalt ein, was sich in erster Linie in einer Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse im tieferen Wasser auswirkt.

Da der Sauerstoffeintrag überwiegend in den durchleuchteten Oberschichten, der 0_2-Verbrauch in den dunklen Tiefen erfolgt, ist die O_2-Verteilung eng mit der thermischen Schichtung und den windinduzierten Austauschprozessen im See verbunden, sie ist also stark witterungsabhängig. Die sich aus den genannten, z.T. gegeneinander wirksamen Faktoren ergebende Dynamik im Sauerstoff" haushalt ist darüberhinaus in Flachseen, wie dem Lichternsee, besonders stark ausgeprägt. Eine Vorstellung von dieser zeitlich" räumlichen Dynamik des gelösten Sauerstoffs im Lichternsee vermitteln die Isopleten-Darstellungen der Abb.15. Da die Unterschiede zwischen den vorderen und hinteren Seeteilen gerade beim Sauerstoff deutlich sind, wurden im Gegensatz zu den Isothermen der Abb.9 hier nicht die Jahre 1978 und 79 für einen repräsentativen Teil verglichen, sondern für das Sommerhalbjahr 1979 die beiden Seeteile Ia und IV. Ergänzt werden diese Darstellungen durch Untersuchungsergebnisse von 1978 (Abb.16) sowie vom Winter und Frühjahr 1979 (Tab.4).

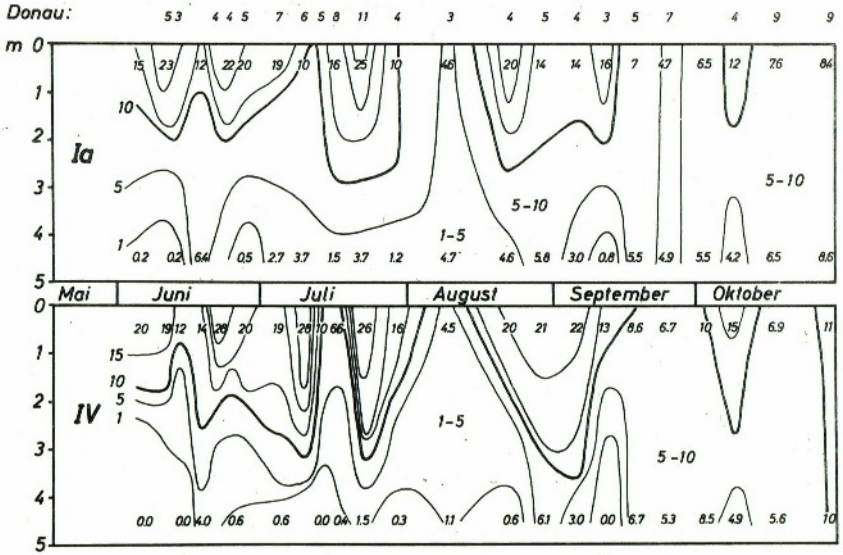

Abb.15 Verteilung des gelösten Sauerstoffs im Sommerhalbjahr 1979, vergleichend für die Seeteile Ia u. IV. Angaben in mg O_2/l.

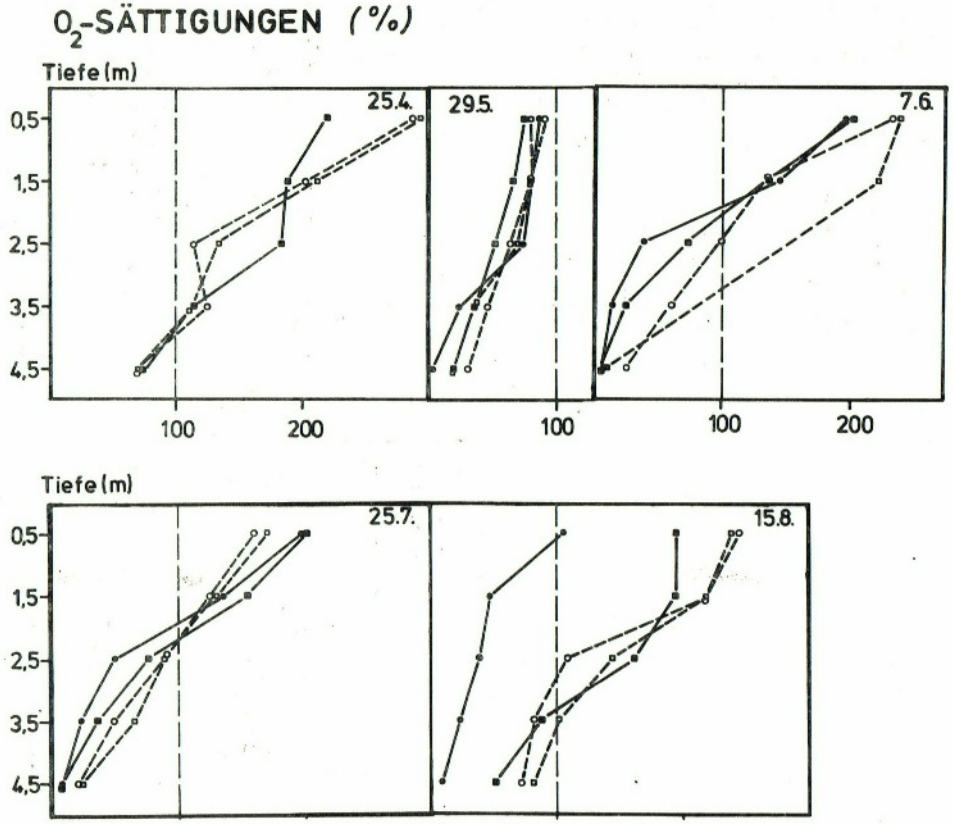

Abb.16 Gelöster Sauerstoff in % der Sättigung, einige Beispiele aus 1978 entspr. Abb. 10-14.

Die wesentlichen Charakteristika des Sauerstoffhaushaltes im Lichternsee können wie folgt zusammengefaßt werden:

1. In Abhängigkeit von der Witterung, insbesondere von den Faktoren Sonneneinstrahlung und Wind, kommt es im Lichternsee zu sehr starken Konzentrationsschwankungen des gelösten Sauerstoffes: bei ruhigem, sonnigem Wetter starke Übersättigung in der Oberschicht (0_2-Konzentration > 20 mg/1 bzw. > 200% der Sättigung) bei gleichzeitig sehr niedrigen Konzentrationen in den tiefen Schichten (häufig < 1 mg CU/l, gelegentlich auch völliges Fehlen von Sauerstoff und Anwesenheit von Schwefelwasserstoff). Diese Perioden fallen mit den Zeiten thermischer Schichtung zusammen (vgl.Abb.15 u. 9, bzw. 16 u. 10).

   Wie Tab. 4 für den 2.3.79 zeigt, können solche Verhältnisse bereits unter der geschlossenen Eisdecke eintreten.

Gewässer	Wassertiefe (m)	Datum 5.2	2.3	19.3	9.4	25.4
Donau	0	10,8	9,8	10,10	9,6	9,3
I	0,5	9,5	12,2	15,1	16,4	15,7
	2	8,4	9,8	13,4	0	15,9
	3	7,5	9,2	0	0	0
	4,5	6,1	9	11,8	I0,6	15,6
II	0,5	9,1	9,2	15,6	21,1	14,5
	2	8,3	7,9	14,6	0	14,2
	3	6,8	8	0	0	0
	4,5	4,8	5,9	13,3	16,7	13,9
III	0,5	10,8	23,0(!)	18	17,7	12,9
	2	8,1	7,8	16,9	0	12,9
	3	6,5	4,3	0	0	0
	4,5	5,3	1,5(1)	15,8	16	12,5
IV	0,5	11,3	24,9(!)	17,4	18,9	11,9
	2	9,3	8,7	16,4	0	11,9
	3	8,1	2,2	0	0	0
	4,5	4,2	1,0(0	15,4	14,6	11,9

Tab.4 Sauerstoffkonzentrationen (mg 0_2/l) im Lichternsee (I-IV) und in der Donau während des Winters und Frühjahrs 1979. Bis zum 10.3. See mit geschlossener Eisdecke.

2. Bei Schlechtwetter im Sommer kommt es im Zusammenhang mit der stark gedrosselten Photosynthese und mit der durch Abkühlung und Wind verursachten Umschichtung des Wassers gelegentlich zu einem Sauerstoffmangel in allen Wasserschichten (vgl. Abb. 15 u.16).
   Die niedrigste 0_2-Konzentrationen im Oberflächenwasser wurde während einer Kälteperiode am 10.8.79 in Teil II mit nur 2,6 mg 0_2/l entsprechend 29% der Sättigung gefunden.
3. Die 0_2-Mangelperioden nehmen mit der Seetiefe an Ausdehnung und Intensität zu, so daß in Bodennähe fast das ganze Sommerhalbjahr sehr niedrige Sauerstoffkonzentrationen herrschen.
4. Die Konzentrationsschwankungen im Oberflächenwasser sowie die Sauerstoffverarmung im tiefen Wasser nehmen von Seeteil I-IV zu.

Die Grenzzone zwischen sauerstoffgesättigtem und ungesättigtem Wasser, die in Abb. 15 etwa mit der 10 mg-Isoplethe zusammenfällt, ist im Teil I gegenüber den anderen Seeteilen deutlich angehoben. Ebenso reichen in Teil I die Bereiche starker Übersättigung (> 200 %) nicht so weit in die Tiefe wie in Teil IV.

Insgesamt erscheint der 0_2-Haushalt der hinteren Seeteile wesentlich labiler und darum für die Tierwelt ungünstiger als im vorderen. Die Donau übt so auf den vorderen Seeteil eine gewisse Pufferung bezüglich des Sauerstoffs aus: verstärkter Einstrom von sauerstoffreicherem Donauwasser in die tieferen Wasserschichten und Verdrängung von stark sauerstoffgesättigtem Seewasser aus dem See in die Donau.

7.Biomasse

Es wurde bereits im Zusammenhang mit dem Lichtklima und dem Chemismus wiederholt auf den Planktonreichtum des Lichternsees hingewiesen. Die Dichte des Planktons wurde bei unseren Untersuchungen - außer durch Lichtmessungen - durch folgende Biomassenparameter erfaßt: Seston durch Filtration über Membranfilter (Porengröße 0,45 µ) und Planktongaze (Maschenweite 50 µ) als Trockengewicht, Chlorophyll-Gehalt des Sestons durch Acetonextraktion der Membranfilterrückstände, chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) durch Chromatoxydation im Naßaufschluß (vgl. NUSSER 1979), partikulärer Phosphor (vgl. KRULL 1978) sowie Zooplanktonzählungen (vgl. MAIER et al. im gleichen Heft).

Hier sollen nur die Daten für das Seston auf Membranfiltern sowie für Chlorophyll a mitgeteilt werden. Für die übrigen Auswertungen sei auf die zitierten Originalarbeiten verwiesen.

Durch eine Filtration über Membranfilter der Porengröße 0,45 µ. werden praktisch sämtliche Bakterien, Algen, Zooplankter sowie deren partikuläre Abbauprodukte (Detritus) erfaßt. Darüber- hinaus sind in den Filterrückständen aber auch anorganische Trübstoffe, wie am Ufer aufgewirbeltes Sediment oder durch biogenen $C0_2$-Entzug gefällter Kalk enthalten.

Mit Ausnahme der eingeschwemmten Trübstoffe handelt es sich bei den erfaßten partikulären Substanzen um Partikel, die mit der Biomasse und Bioaktivität in Gewässern Zusammenhängen, und sie sind von daher geeignet, die planktische Bioproduktion, insbesondere die der Algen, zu charakterisieren.

Die uns zur Verfügung stehenden, in Tab. 5 zusammengefaßten Werte zeigen, daß der Sestongehalt der Seeteile I und II mit einer Ausnahme deutlich unter dem der Seeteile III und IV liegt.

Als Mittel des Sommers und Herbstes 1979 ergibt sich für die Seetiefe 0,5 m die Reihe I: II: III: IV = 1 : 1,3 : 2,4 : 2,2 ; für die Seetiefe 3,5 m eine solche von 1: 1,4 : 1,7 : 1,6. Zur

Zeit der herbstlichen Vollzirkulation des Jahres 1978 (September/ Oktober) betrug das Verhältnis 1 : 1,3 : 2,2 : 2.0.

m		30.7	22.8	8.9	14.9	28.9	16.10	29.10	X
I	0,5	9,5	17	22,2	12,3	6,5	8,2	0,3	10,9
	3,5	3,9	9,9	0	5,8	4,9	4,7	0,2	4,9
II	0,5	9,3	17,2	34,6	18	6	4,6	8,1	14
	3,5	4,6	5,7	0	12,8	4,5	6,2	6,3	6,7
III	0,5	49,3	33,3	30,7	25,8	13	14	15,5	25,9
	3,5	5,4	6,4	0	8,4	10,5	11,1	8,5	8,4
IV	0,5	42,2	37,9	26,9	20,2	13,1	12,8	14,7	24
	3,5	5,7	19,6	0	19,8	12	9,3	9,3	12,6

Tab. 5 Seston auf Membranfilter (mg/1) von Säumer und Herbst 1979.

Die Konzentration an Chlorophyll a ist trotz aller zu machender Einschränkungen und Vorbehalte ein brauchbarer Biomassenparameter für das Phytoplankton und damit auch eine Kennziffer für die Dichte der Primärproduzenten. Chlorophyllmessungen wurden in verschiedenen Becken und Wassertiefen des Lichternsees im September/Oktober 1978 (KRULL 1978), im März/April 1979 (vgl. Tab. 5) sowie Juni - Oktober 1979 (vgl. Abb.17) durchqeführt.

		19.3	28.3	9.4	25.4
Donau		4	3	4	17
I -	0,5 m	74	105	128	185
	2,0 m	71	--	84	169
	4,5m	51	--	64	160
II -	0,5 m	103	125	163	157
	2,0 m	108	--	168	161
	4,5 m	101	--	149	152
III -	0,5 m	1 6o	128	154	152
	2,0 m	165	--	137	155
	4,5m	166	--	145	145
IV -	0,5 m	161	108	132	137
	2,0 m	162	--	128	129
	4,5m	167	--	127	123

Tab.5 Chlorophyll-a-Konzentrationen im Frühjahr 1979 in µg/l.

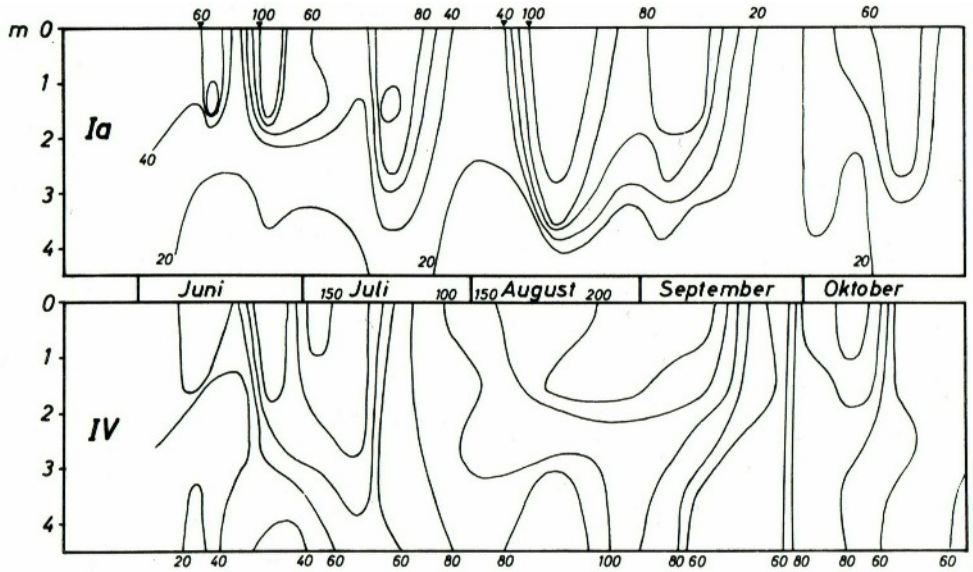

Abb.17 Verteilung von Chlorophyll a (µg/1) in den Seeteilen I u. IV im Sommer u. Herbst 1979. Gezeichnete Isoplethen: 20-40-6080100-150-200 ug Chl.a/l.

Während die Donau durch das Fehlen eines autochthonen Planktons fast durchweg niedrige Chlorophyllkonzentrationen aufweist, erreichen diese im Lichternsee bereits im zeitigen Frühjahr Werte von über 150 /µg/l, im Hochsommer schließlich sogar über 200 /µg/1. Damit gehört der Lichternsee zu den Gewässern mit sehr hoher Phytoplanktondichte. Naturgemäß sind die Konzentrationen in den oberen Schichten (0-2m) i.d.R. wesentlich höher als in den unteren. Dies gilt z.T. auch für Zeiten geringer Schichtungsstabilität.

Die Chlorophyllkonzentrationen nehmen im Lichternsee meist von Teil I nach Teil IV zu. In Teil I fallen besonders die während des ganzen Sommers niedrigen Konzentrationen in den tieferen Schichten und die im Verhältnis zum Teil IV kurzen Perioden hoher Chlorophyllkonzentrationen auf (Abb.17).

Dies ist vermutlich als Folge des Eindringens von Donauwasser in die Tiefen des Sees und die dadurch bedingte Verdrängung planktonreicher Oberschichten aus dem See zu interpretieren. Diese Einflüsse machen sich im Teil II noch abgeschwächt, ab Teil III aber nicht mehr bemerkbar.

So werden die vorderen Seeteile zwar ständig mit nährstoffreichem Donauwasser gedüngt, das sich entwickelnde Plankton wird aber gleichzeitig in die Donau ausgewaschen, so daß die Dichten geringer bleiben als in den hinteren, im Sommer weitgehend von der Donau unbeeinflußten Teilen.

8. Zusammenfassung

Der Lichternsee ist ein mit der Donau in Verbindung stehender, 13-28 Jahre alter Baggersee. Die wichtigsten Rahmenparameter für das Ökosystem des Sees sind seine geringe Tiefe (Abb. 3,4, Tab.1) und der Wasseraustausch mit der an Nährstoffen, vor allem Phosphat, reichen Donau (Abb.6, Tab.3). Daraus ergeben sich folgende Eigenschaften des Sees:

1. Geringe Schichtungsstabilität im Sommer (Abb.9,10).
2. Relativ konstanter, meist nur im cm-Bereich schwankender Seespiegel (Abb.5).
3. Starke horizontale Unterschiede im Chemismus (Abb.7,11-16, Tab. 3).
4. Hohe Trophie durch laufende Düngung.
5. Starke Wassertrübung durch dichtes Phytoplankton (Abb.8, Tab. 2).
6. Starke Sauerstoffübersättigungen in den Oberschichten, bis gegen Null gehende Untersättigungen im tiefen Wasser (Abb.15,16).
7. Durch Verdrängung von Oberflächenwasser ständige partielle Auswaschung des Planktons aus dem See (Teil I) in die Donau. Dadurch trotz des höheren Nährstoffangebotes meist geringere Planktondichten in den vorderen Seeteilen.

Düngung und Wasserverdrängung, beide durch die Verbindung zur Donau bedingt, zeigen entgegengesetzte Wirkungen, in erster Linie auf das Phytoplankton, aber z.T. auch auf den Chemismus (0_2-Haushalt), wobei in den hinteren Teilen (III u. IV) die Düngung überwiegt, in den vorderen (I) aber die Verdrängung von Oberflächenwasser stärker ins Gewicht fällt.

S c h r i f t t u m :

GÖPEL, H.: Limnologische Untersuchungen zum Wasseraustausch zwischen der gestauten Donau (Wiblinger Staustufe bei Ulm) und dem Ausgleichsbecken Lichternsee in Abhängigkeit von natürlichen und künstlichen Wasserstandsschwankungen. Staatsex.-Arbeit Ulm 1978.

KOCH, H.: Verteilung und Populationsdynamik planktischer Rotatorien im Lichternsee. Staatsex.-Arbeit Ulm 1980.

KRULL, U.: Untersuchungen zur Limnologie des Lichternsees, eines Ausgleichbeckens der Wiblinger Donaustaustufe bei Ulm mit besonderer Berücksichtigung der Schichtungsphänomene und Austauschprozesse im Sommerhalbjahr. Diplom-Arbeit Ulm 1979.

MAIER, G.: Verteilung und Populationsdynamik planktischer Cladoceren im Lichternsee. Diplom-Arbeit Ulm 1980.

NUSSER, E.: Milieubedingungen, Biomasse und Bioaktivität des Planktons im Lichternsee. Diplom-Arbeit Ulm 1980.