

DER WASSERAUSTAUSCH DURCH GRUNDWASSERDURCHFLUSS IM BAGGERSEE UND SEINE BEDEUTUNG FÜR DIE EUTROPHIERUNG

Otto Siebeck

Summary:

Four flooded gravel pits in the Munich area are subject to high P influx. They all show the typical features of eutrophication. There is, however, one important difference: two flooded pits with a brief water renewal time and above-ground drainage exhibit the features of eutrophication only in the benthic region. The pelagic zone exhibits properties of an oligotrophic lake. Two other flooded pits with a longer water renewal time and below-ground drainage exhibit the eutrophic features in both the pelagic and benthic regions. The process of water renewal is discussed in detail. It is argued that the brief water replacement period in conjunction with the above-ground drainage promotes the growth of firmly rooted benthic plants and enhances the efflux of phytoplankton. The pelagic region thus exhibits the properties of an oligotrophic lake and the benthic region those of eutrophic one. If the water renewal time is long and the drainage below ground, the nutritional and respiratory conditions are unfavourable for firmly rooted plants at the bottom of the lake. Since phytoplankton efflux is insignificant, high phytoplankton densities arise accompanied by the typical phenomena of eutrophication in the pelagic and benthic regions.

I. Einleitung

Durch die gegenseitige Beeinflussung der Land- und Gewässerökosysteme einerseits und die landwirtschaftlichen und industriellen Produktionsmethoden andererseits sind in hochzivilisierten Ländern nahezu alle Gewässer erheblichen Nährstoff-Importen ausgesetzt. Die Folgen dieses Sachverhalts sind unter dem Begriff der Gewässereutrophierung (= Zunahme der photoautotrophen Produktionsrate) hinreichend bekannt.

Da es sich nicht vermeiden läßt, daß auch das Grundwasser, zumindest in den oberflächennahen Bereichen, mit den verschiedensten Substanzen darunter auch pflanzenverfügbaren Stoffen beladen wird, sind in der Regel auch Baggerseen im Verlauf des Wasseraustausches durch das Grundwasser anhaltenden Nährstoff-Importen ausgesetzt.

Dies trifft jedenfalls für die 4 im Norden Münchens gelegenen Baggerseen zu, die von unserer Arbeitsgruppe in Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Geologischen Landesamt (Dr. WROBEL: Hydrogeologie und Hydrologie) und den Stadtwerken Münchens (Dr. ALEXANDER: Bakteriologie) von 1975 1977 untersucht worden sind (Tabelle 1). Im Vergleich zu den Grundwassereigenschaften aus dem Raum Großhadern fallen vor allem die beträchtlichen Konzentrationen von $\text{PO}_4\text{-P}$ auf. Erhebliche Konzentrationszunahmen ergeben sich aber auch bei den Ca^{2+} -, Na^+ -, K^+ -, Cl^- -, SO_4^{2-} - und NO_3^- -Ionen. Sie kommen offensichtlich auf dem Weg des Grundwassers unter dem Stadtgebiet Münchens und den sich anschließenden mehr oder weniger ländlichen Gebieten zustande.

Tabelle 1	Leitungswasser München (mg/l)	Grundwasser Großhadern (mg/l)	Grundwasser vor Eintritt in das Seebecken (mg/l)			
			Le	Fa	Fe	Ru
Na ⁺	2,8	9,3	19,5	16,7	14,3	13,1
K ⁺	1,5	1,9	4,2	4,9	5,1	5,9
Ca ²⁺	76,8	96,4	112,3	119,6	117,1	115,8
Mg ²⁺	23,0	21,6	20,4	21,7	21,8	21,9
Cl ⁻	5,1	46,1	59,4	52,0	38,7	33,1
SO ₄ ²⁻	21,0	32,0	46,9	49,2	50,2	56,1
NO ₃ -N	1,15	4,5	4,7	7,5	7,2	9,6
PO ₄ -P(µg/l)			41,6	122,5	8,3	18,9
PO ₄ -P-Import (g m ⁻² Jahr ⁻¹)			0,81±0,1	1,74±0,2	0,46±0,04	0,75±0,07

Natürliche Seen mit einer mittleren Wassertiefe von weniger als 50 m sind im allgemeinen auch ohne anthropogene Nährstoff-Zufuhr eutroph (ODUM 1959). Es ist daher grundsätzlich zu erwarten, daß die Baggerseen, die kaum eine Wassertiefe von 10 - 20 m überschreiten und häufig noch wesentlich flacher sind, mit dieser Eigenschaft zumindest eine Voraussetzung erfüllen, um ebenfalls ohne anthropogene Nährstoff-Zufuhr in relativ kurzer Zeit nach ihrer Entstehung zu eutrophieren.

Zwischen den flachen natürlichen Seen und den Baggerseen entsprechender Tiefe besteht jedoch ein gravierender Unterschied: In den natürlichen Seen sind im Laufe ihrer vieltausendjährigen Entwicklung durch die Ansammlung von Sedimenten und durch die Bildung ausgedehnter Verlandungszonen mit z.T. dichter Vegetation große nährstoffreiche Austauschflächen entstanden. Für die Verteilung des hier vorliegenden Nährstoffvorrats spielen die windbedingten turbulenten Austauschvorgänge eine besondere Rolle.

In den relativ jungen Baggerseen fehlen vergleichbare Nährstoff-Vorräte zumindest im Anfangsstadium ihrer Entwicklung. Sie könnten daher - obgleich sie flache Seen sind - je nach der Art ihres Untergrundes mehr oder weniger lange den Charakter oligotropher Seen behalten, wenn sie nicht einem z.T. sehr erheblichen Nährstoff-Import über den Grundwasserzufluß ausgesetzt wären.

So aber finden wir oft Baggerseen, die schon wenige Jahre nach ihrer Entstehung noch bevor eine nennenswerte Ufervegetation entstanden und noch bevor es zur Ausbildung ausgedehnter biogener Sedimentationsschichten gekommen ist alle Kennzeichen einer "rasanten Eutrophierung" (OHLE 1955) zeigen.

Da Baggerseen im Verlauf ihrer Entwicklung bis zu einem gewissen Grad zunehmend abgedichtet werden, verliert der Wasseraustausch durch das Grundwasser allmählich an Bedeutung. Gleichzeitig nimmt der Einfluß der internen Düngung zu, weil die biogene Sedimentation, die am Ab-

dichtungsprozeß sehr wesentlich beteiligt ist, den hierfür erforderlichen Nährstoff-Vorrat aufbaut, dessen Mobilisation mit sinkendem Redoxpotential beschleunigt wird.

Die 4 Münchner Baggerseen repräsentieren verschiedene Austauschtypen. Sie sind daher geeignet zu prüfen, wie sich die unterschiedlichen Austauschigenschaften auf die Eutrophierung und ihre Folgen auswirken.

2. Eine Charakteristik der 4 Münchner Baggerseen und ihres Trophiegrades

Wichtige morphometrische und hydrologische Eigenschaften sind in Abb. 1 (Lerchenauer See), Abb. 2 (Fasanerie See), Abb. 3 (Feldmochinger See) und Abb. 4 (Olympia-Ruderregatta) zusammengestellt. Über weitere hydrologische Einzelheiten informiert die Abbildung 5, die auch die Lage der Seen, das jeweilige Einzugsgebiet und die Grundwasserhöhengleichen zeigt.

Was den Trophiegrad betrifft, so lassen sich der Fasanerie See und der Lerchenauer See eindeutig dem eutrophen Seetyp zuordnen. Dafür sprechen folgende Eigenschaften, die ihnen gemeinsam sind:

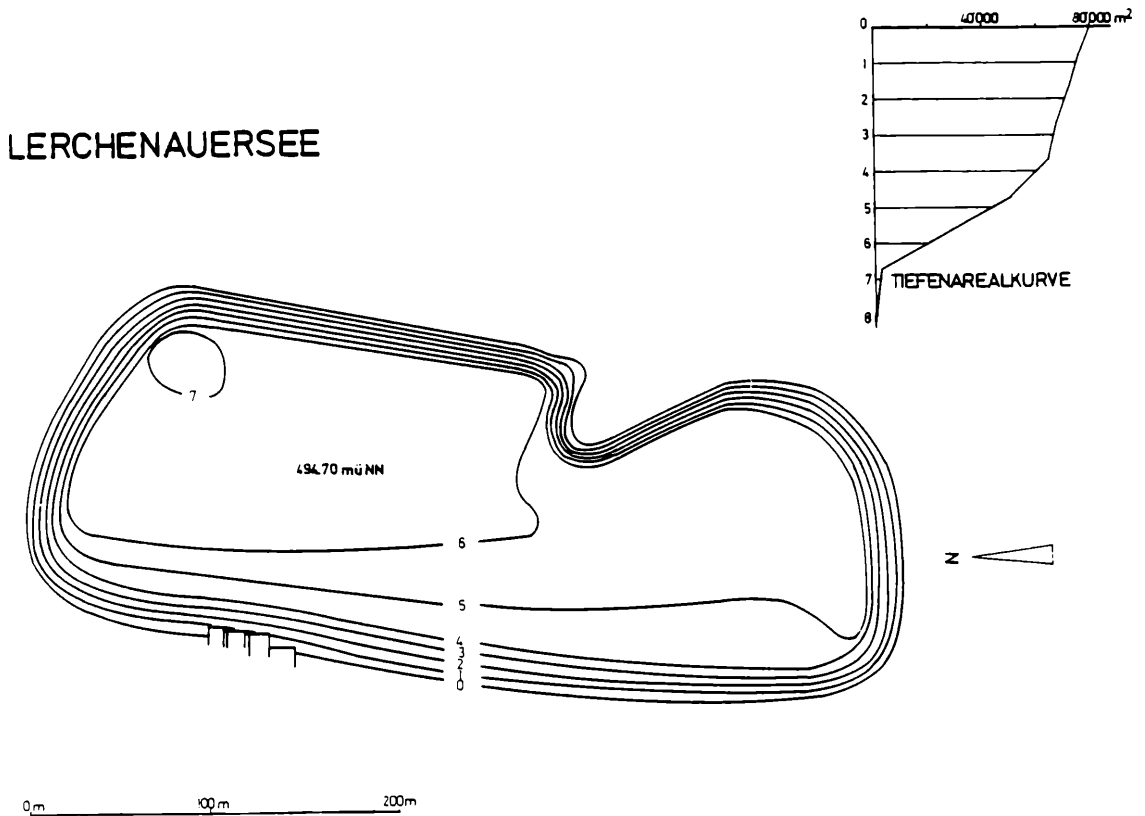
1. Auffallende Vegetationsfärbungen durch Massenentwicklung einiger weniger Phytoplanktonarten (1976 im Lerchenauer See: *Uroglena americana* und *Chlorococcum spec.*, im Fasanerie See: *Oocystis marsonii* und *Chlorella vulgaris*).
2. Absinken der Sichttiefe bei Vegetationsfärbungen bis unter 1 m.
3. Während der Sommerstagnation hohe Sauerstoff-Übersättigungen bis über 180 % im Epilimnion.
4. Spätestens gegen Ende der Sommerstagnation bzw. der Eisbedeckung hohe O₂-Defizite bis zur Anaerobie.
5. Faulschlamm Bildung, wenn auch noch keine ausgedehnten Flächen, sondern inselartig lokalisiert.
6. Gelegentliche Fischsterben, z.B. im Sommer 1976 im Lerchenauer See und hier vor allem Schleien betreffend.

Für die Olympia-Ruderregatta sind folgende Eigenschaften charakteristisch:

1. Keine Vegetationsfärbungen.
2. Die Sichttiefe reicht meistens bis zum Grund (ca. 4 m), andernfalls nicht wesentlich geringer.
3. Während der relativ kurzen Periode sommerlicher Schichtung ausgeglichene vertikale O₂-Verteilung. Maximale Übersättigungen etwa 120 %, geringe O₂-Defizite höchstens um 20 %.
4. Keine Faulschlamm Bildung.

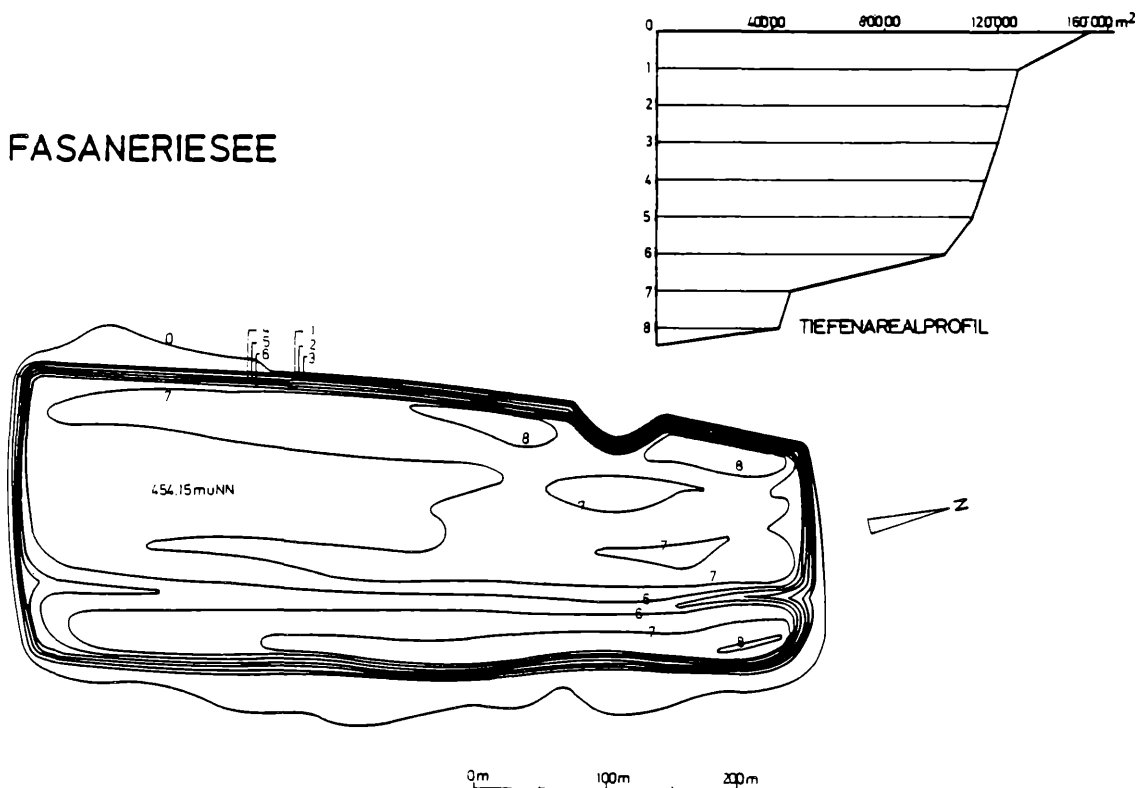
Diese Eigenschaften sprechen für eine Zuordnung zum oligotrophen Seetypus. Im Widerspruch hierzu steht jedoch die Beobachtung, daß das kiesige Material der Seebeckenwandung zumindest zeitweise von einem auffällig dichten Algenaufwuchs vorwiegend Diatomeen bedeckt ist. Es ist daher nicht verwunderlich, daß bei hochsommerlicher Einstrahlung die oben erwähnten O₂-Übersättigungen am Grund bzw. in Grundnähe beobachtet werden.

Abb. 1: Lerchenauer See mit Isobathen und Tiefenarealkurve.
(Nach Angaben des Bayerischen Landesamts für Wasserwirtschaft und des Bayerischen Geologischen Landesamts).



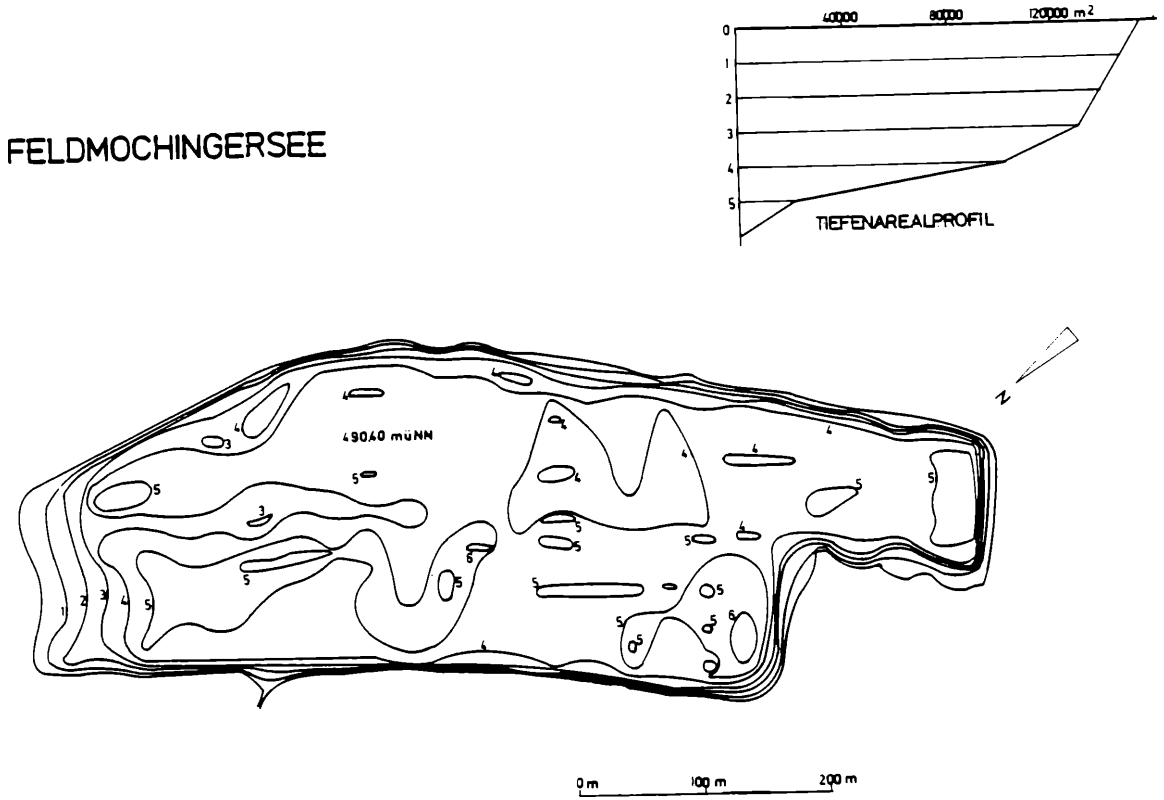
Wasserspiegelhöhe	494,7 m ü.NN.
Entstehungszeit	1939 - 1942 Ausbau 1967/68
Seeareal	7,9 ha
Volumen	$36,96 \cdot 10^4 \text{ m}^3$
Max. Länge	486 m
Max. Breite	226 m
Max. Tiefe	7,9 m
Mittl. Tiefe	4,6 m
Relative Tiefe	2,5 %
Uferlinie	1264 m
Uferentwicklung	1,26
Durchfluß	50 l/s
Wassererneuerungszeit	~ 85,6 Tage

Abb. 2: Fasanerie See mit Isobathen und Tiefenarealkurve.
 (Nach Angaben des Bayerischen Landesamts für Wasserwirtschaft und des Bayerischen Geologischen Landesamts).



Wasserspiegelhöhe	494,15 m ü.NN.
Entstehungszeit	1939 - 1942
Seeareal	14,7 ha
Volumen	$83,7 \cdot 10^4 \text{ m}^3$
Max. Länge	643 m
Max. Breite	268 m
Max. Tiefe	8,5 m
Mittl. Tiefe	5,7 m
Relative Tiefe	1,96 ‰
Uferlinie	1675 m
Uferentwicklung	1,24
Durchfluß	40 l/s
Wassererneuerungszeit	~ 247 Tage

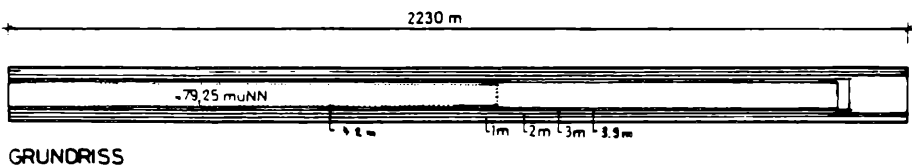
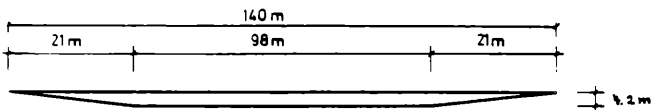
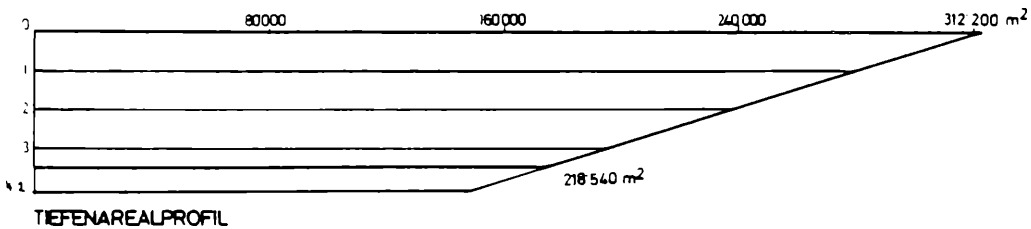
Abb. 3: Feldmochinger See mit Isobathen und Tiefenarealkurve.
 (Nach Angaben des Bayer. Landesamts für Wasserwirtschaft, des Bayer. Geologischen Landesamts und durch eigene Untersuchungen im Rahmen eines Limnologie-Kurses ergänzt).



Wasserspiegelhöhe	490,4 m ü.NN.
Entstehungszeit	1939-1942 Ausbau 1967-1970 1976-1979
Seereal	15,53 ha
Volumen	$61,55 \cdot 10^4 \text{ m}^3$
Max. Länge	775 m
Max. Breite	260 m
Max. Tiefe	6,1 m
Mittl. Tiefe	4,1 m
Relative Tiefe	1,4 ‰
Uferlinie	1930 m
Uferentwicklung	1,38
Durchfluß (ober-/unterirdisch)	250+20 l/s
Wassererneuerungszeit	~ 26,5 Tage

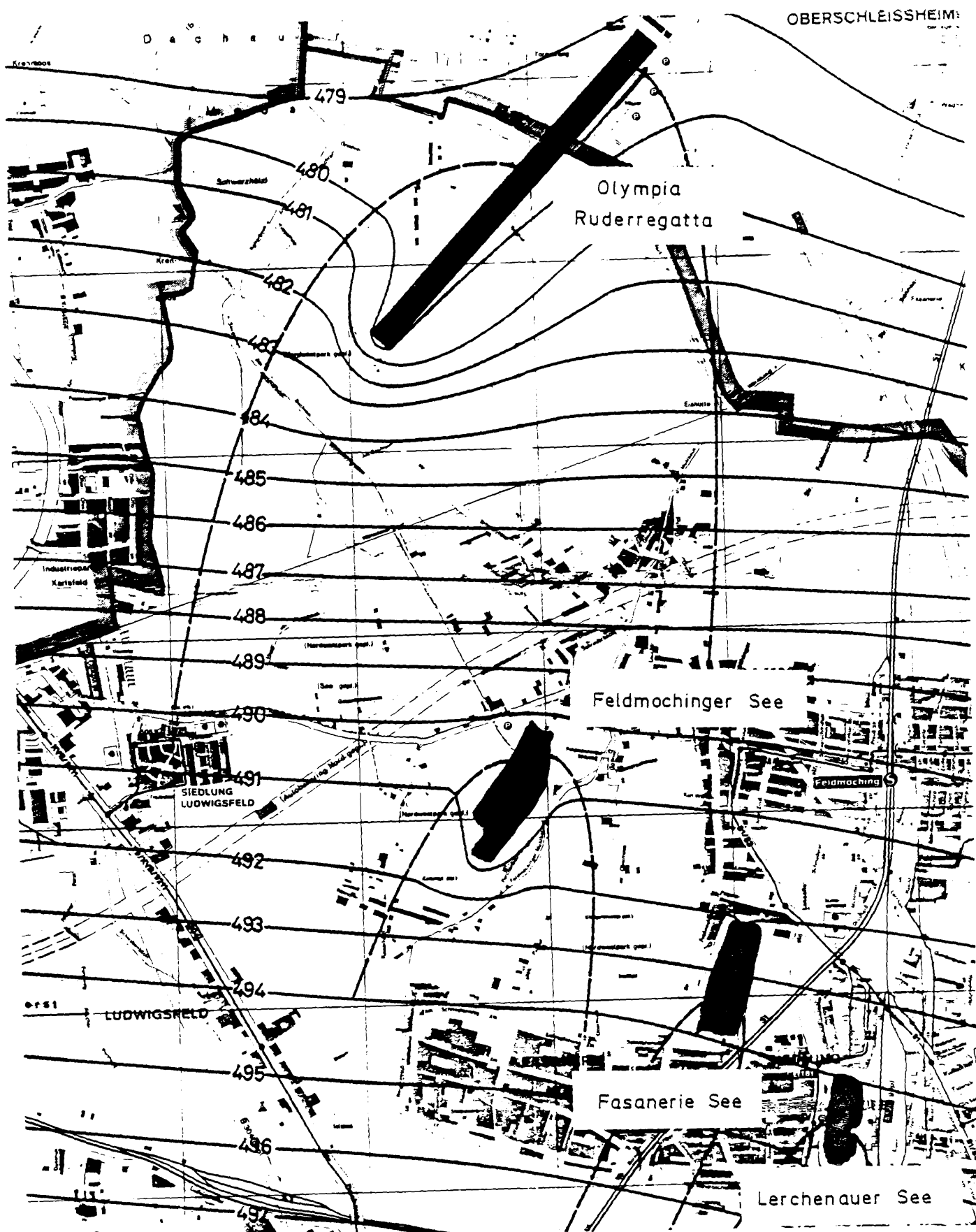
Abb. 4: Olympia Ruderregatta mit Isobathen und Tiefenarealkurve.
(Nach Angaben des Bayer. Landesamts für Wasserwirtschaft
und des Bayer. Geologischen Landesamts).

RUDERREGATTA



Wasserspiegelhöhe	479,25 m ü.NN.
Entstehungszeit	1969 - 1971
Seeareal	31,2 ha
Volumen	$103,4 \cdot 10^4 \text{ m}^3$
Max. Länge	2230 m
Max. Breite	140 m
Max. Tiefe	4,2 m
Mittl. Tiefe	3,3 m
Relative Tiefe	0,6 ‰
Uferlinie	4740 m
Uferentwicklung	2,4
Durchfluß (ober-/unterirdisch)	750 + 50 l/s
Wassererneuerungszeit	~ 12,6 Tage

Abb. 5: Grundwassereinzugsgebiet der Münchner Baggerseen und Grundwasserhöhengleichen nach Angaben des Bayer. Geologischen Landesamts in einen Münchner Stadtplan eingezeichnet



Für den Feldmochinger See sind folgende Eigenschaften charakteristisch:

1. Höchstens mäßige Vegetationsfärbungen, kein regelmäßiges Auftreten; im Untersuchungszeitraum 1975 - 1977 nur ein einziges Mal. Damalige Ursache: Massenentfaltung einer besonders kleinen, nicht näher bestimmten Chrysophyceen-Art.
2. Sichttiefe meist über 3 m, während der genannten Vegetationsfärbung auf 2 m zurückgehend.
3. Im Verlauf der sommerlichen Temperaturschichtung hohe O_2 -Übersättigungen, in 3 m Wassertiefe bis über 190 %, am Grund oft noch darüber. Diese Werte kommen jedoch nicht durch die O_2 -Produktion des Phytoplanktons, sondern durch die O_2 -Produktion der ausgedehnten Bestände von überwiegend *Chara hispida* am Seegrund zustande. Das Ergebnis einer Bestandsaufnahme ist in Abb. 6 zusammengestellt. Es ergibt sich, daß etwa 87 % des Seegrundes mit *Chara* bedeckt sind, davon 66 % besonders dicht. Im Mittel findet man etwa 10 kg Frischgewicht/ m^2 Seegrund.
4. Auffällige O_2 -Defizite gibt es nur im unteren Bereich des abgestorbenen Charabestandes oder in Mulden. Stellenweise hier auch O_2 -Schwund.

Abb. 6: Ergebnis einer Unterwasser-Kartierung im Feldmochinger See, die im Rahmen eines Limnologie-Kurses (1977) durchgeführt worden ist. Die weiteren Analyseergebnisse stammen von RODENKIRCHEN (1977)

Ergebnis der Kartierung

13% des Seegrundes ohne Bewuchs

66% dichter Bewuchs (*Chara*) + 21% schütterer Bewuchs

= 87% \cong 13,5 ha

19 Stichproben ($1 m^2$)

Chara Aufwuchs + Detritus \bar{x} 14,4 $6,8 kg \cdot m^{-2}$

Chara

Frischgewicht $\bar{x} = 9,6$ $2,4 kg \cdot m^{-2}$

Trockengewicht $\bar{x} = 2,0 \pm 1,2$ $kg \cdot m^{-2}$

Aufwuchs + Detritus u.a.

Frischgewicht $\bar{x} = 4,8 \pm 2,3$ $kg \cdot m^{-2}$

Trockengewicht $\bar{x} = 1,3 \pm 0,9$ $kg \cdot m^{-2}$

Wir können nach dieser Beschreibung somit folgendes festhalten: Der Lerchenauer See und der Fasanerie See lassen sich eindeutig dem eutrophen Seetyp zuordnen. Der Feldmochinger See und die Olympia-Ruderregatta zeigen im Pelagial jedoch Eigenschaften, die man auch noch in oligotrophen Seen findet. Im Benthäl hingegen zeigen sie Eigenschaften, die für den flachen, eutrophen See typisch sind.

Die auffallendsten Folgen der Eutrophierung: Akkumulation pflanzlicher Substanz, O₂-Übersättigungen in der trophogenen Zone und hohe O₂-Defizite in der tropholytischen Zone gibt es in der Olympia-Ruderregatta jedoch stark reduziert in allen 4 Baggerseen. Im Fasanerie See und im Lerchenauer See entstehen sie vor allem durch das Phytoplankton bzw. durch den Phytoplanktonabbau. Im Feldmochinger See und in der Olympia-Ruderregatta entstehen sie vor allem durch die benthale Algenvegetation.

Die chemischen Gewässeranalysen der 4 Baggerseen zeigen relativ hohe Konzentrationen an Na⁺, K⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻ (SIEBECK 1978, unveröffentlichter Arbeitsbericht) und höchstens geringste Konzentrationen an Orthophosphat. Wir unterstellen daher die für die meisten Seen unseres Gebietes angenommenen Verhältnisse, d.h. bis auf P sind alle anderen Pflanzennährstoffe überreichlich vorhanden. PO₄-P ist somit der die Primärproduktion begrenzende Nährstoff. Der PO₄-P-Import ist daher für die Eutrophierung von ausschlaggebender Bedeutung. Nach steigenden jährlichen PO₄-P_{tot.}-Importen angeordnet ergibt sich für die untersuchten Baggerseen folgende Reihung: Feldmochinger See ca. 0,5 g/m² Jahr, Olympia-Ruderregatta ca. 0,75 g/m² Jahr, Lerchenauer See ca. 1,4 g/m² Jahr und Fasanerie See 1,75 g/m² Jahr. Das sind recht unterschiedliche Werte, die jedoch alle als auffallend hoch zu bezeichnen sind und nach den bisherigen Erfahrungen auch bei wesentlich tieferen Seen zu einer Eutrophierung geführt haben (vgl. PO₄-P-Importe im "Vollenweider-Diagramm": VOLLENWEIDER 1968).

Für unsere weiteren Betrachtungen sind die unterschiedlichen Phosphor-Importe daher von untergeordneter Bedeutung, zumal wir feststellen konnten, daß alle 4 Baggerseen wesentliche Merkmale eutropher Seen besitzen.

Große Unterschiede bestehen zwischen den 4 Baggerseen jedoch hinsichtlich ihrer Durchflußrate und der sich daraus unter Berücksichtigung des Seevolumens ergebenden sog. errechneten Wassererneuerungszeit. Nach diesen, vom Bayer. Geologischen Landesamt ermittelten Größen lassen sich die 4 Baggerseen wie folgt anordnen: Olympia-Ruderregatta (Durchflußrate 800 l/s, Wassererneuerungszeit 12,6 Tage), Feldmochinger See (Durchflußrate 270 l/s, Wassererneuerungszeit 26,5 Tage), Lerchenauer See (Durchflußrate 50 l/s, Wassererneuerungszeit 85,6 Tage) und Fasanerie See (Durchflußrate 40 l/s, Wassererneuerungszeit 247 Tage).

Unter Berücksichtigung dieser und der zuvor herausgestellten Eigenschaften kommen wir nun zu folgendem Sachverhalt: Die beiden Baggerseen (Fasanerie See und Lerchenauer See), die in allen Merkmalen dem eutrophen Seetyp entsprechen, zeichnen sich durch eine relativ geringe Durchflußrate aus. Die beiden anderen Seen (Feldmochinger See und Olympia-Ruderregatta), die nach ihren Eigenschaften im Pelagial keineswegs, im Benthäl jedoch eindeutig als eutrophe Seen einzustufen sind, zeigen jeweils eine hohe Durchflußrate und eine entsprechend kurze Wassererneuerungszeit.

3. Der Einfluß der Durchflußrate auf die sommerliche Sprungschicht

In Abb. 7 (S. 120) sind die Isothermen ausgewählter Temperaturen jeweils in der Längsachse der 4 Baggerseen dargestellt. In der Olympia-Ruderregatta und im Feldmochinger See ist eine auffällige Schrägstellung der Isothermen mit einer Neigung vom oberstromigen zum unterstromigen Teil des Seebeckens zu erkennen. Sie zeigt an, daß die Temperatur des Wassers gleicher Tiefe vom oberstromigen zum unterstromigen Teil des Seebeckens ansteigt. Ursache dieser besonderen Temperaturverteilung ist das Einströmen des Grundwassers in den oberstromigen Seeabschnitt bei relativ hoher Durchflußrate.

Im Lerchenauer See ist eine ähnliche Temperaturverteilung nur noch schwach angedeutet und im Fasanerie See überhaupt nicht mehr. Hier liegen die Isothermen im wesentlichen jeweils auf gleichbleibender Tiefe und das bedeutet, daß ihre Lage vom Grundwassereinstrom infolge der niedrigen Durchflußrate nicht beeinflußt wird.

Die Schräglage der Isothermen in den beiden Baggerseen mit hoher Durchflußrate ergibt sich aus dem Verhalten des Grundwassers nach seinem Eintritt in das Seebecken: Es strömt von allen Seiten der oberstromigen Seebeckenwandung in das Seebecken und anschließend wegen seiner relativ niedrigen Temperatur zunächst zum Seegrund. Von hier aus bewegt es sich am Seegrund entlang in Richtung des unterstromigen Seebeckens und wird dabei langsam erwärmt.

Wichtig ist, daß das Grundwasser sich zunächst in der Tiefe einschichtet. Die durch diesen Zufluß erfolgende Wassererneuerung bedeutet somit eine Auffüllung des Seebeckens von Grund auf. Dies geschieht anscheinend ohne gleichzeitige Durchmischung mit dem Seewasser. Zu dieser Schlußfolgerung führt der Befund, daß die gezeigte Sprungschicht über viele Monate hinweg erhalten bleibt, obgleich die Wassererneuerung durch das zufließende Grundwasser in der Olympia-Ruderregatta innerhalb von weniger als 14 Tagen und im Feldmochinger See innerhalb von weniger als 1 Monat erfolgt.

4. Eine grundsätzliche Betrachtung zur Wassererneuerung in natürlichen Seen mit oberirdischem Zu- und Abfluß und in Baggerseen

Im thermisch geschichteten See schichtet sich der oberirdische Zufluß in der Regel innerhalb der Sprungschicht ein (Abb. 8, S. 121). In dieser Schicht nimmt er unter fortschreitender Durchmischung mit dem Seewasser auch oft seinen weiteren Weg. Dabei wird das darüber befindliche Seewasser bzw. Mischwasser in den Abfluß gehoben. Das Hypolimnion wird von diesem Geschehen somit nicht unmittelbar berührt, während Teile des Metalimnions und des Epilimnions durchmischt werden. Dies ist ein Beispiel dafür, daß die *e r r e c h n e t e* Wassererneuerungszeit (Volumen/Durchflußrate) erheblich unter der *t a t - s ä c h l i c h e n* Wassererneuerungszeit liegen kann.

In thermisch geschichteten Baggerseen schichtet sich das zufließende erheblich kühlere Grundwasser meist am Seegrund ein, indem es sich hier zunächst horizontal ausbreitet und dann das Seewasser von Grund auf verdrängt. Hypolimnion, Metalimnion und Epilimnion können daher trotz der bestehenden Temperaturschichtung ausgetauscht und dadurch mit neu importierten Nährstoffen versorgt werden.

In welchem Ausmaß der von unten nach oben fortschreitende Wasseraustausch erfolgt, hängt von den Unterschieden in der Durchlässigkeit der

unterstromigen Beckenwandung ab. Zwei Grenzfälle sind denkbar:

1. Liegt die Durchlässigkeit vorwiegend oder sogar ausschließlich im tieferen Beckenabschnitt, d.h. unterhalb oder innerhalb der Sprungschicht, so wird die darüberliegende Wasserschicht für die Dauer der thermischen Schichtung nur zögernd oder überhaupt nicht in den Austausch einbezogen. Der Austausch erfolgt somit nur während der Vollzirkulation. Während der sommerlichen Schichtung ist daher mit einem wesentlichen Unterschied zwischen der errechneten und der tatsächlichen Wassererneuerungszeit zu rechnen. 2. Liegt die Durchlässigkeit bevorzugt im oberen Beckenabschnitt, zumindest knapp über der Sprungschicht, so werden auch die oberen Wasserschichten und damit das gesamte Seewasser trotz bestehender sommerlicher Schichtung in den Austausch einbezogen. Die errechnete Wassererneuerungszeit stimmt nun mit der tatsächlichen Wassererneuerungszeit relativ gut überein.

In beiden Fällen erfolgt die Wassererneuerung des Baggerseewassers durch das zufließende Grundwasser von unten nach oben. Da die Sprungschicht dabei erhalten bleibt, ist zu fordern, daß der Austausch innerhalb der Sprungschicht bevorzugt über eine vertikale Strömung zustande kommt: Unter Beibehaltung der bestehenden Dichteschichtung werden die sie aufbauenden Wassermassen jeweils von solchen, die aus der Tiefe nachrücken, ersetzt, indem sie nach oben verdrängt werden (SIEBECK 1979). Die Erhaltung der Sprungschicht ist möglich, weil das nach oben strömende Grundwasser durch Strahlenabsorption erwärmt wird und zwar um so mehr, je geringer sein Abstand zur Wasseroberfläche ist. Oberhalb der Sprungschicht ist eine unbehinderte Durchmischung zwischen dem aus der Sprungschicht aufsteigenden Wasser und dem Wasser des Epilimnions möglich.

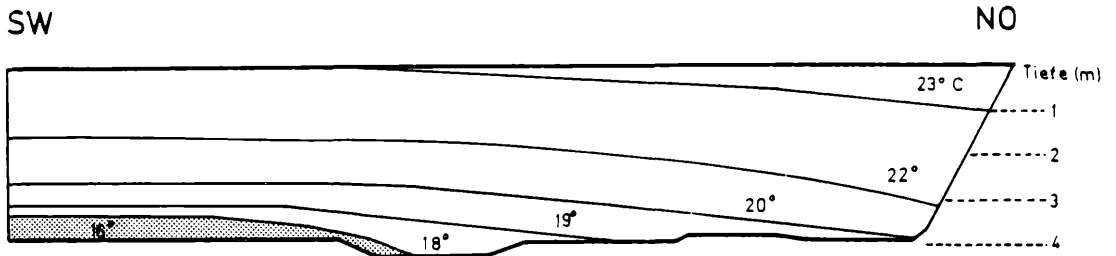
5. Der Wasseraustausch in den untersuchten Seen

Die Olympia-Ruderregatta und der Feldmochinger See besitzen einen oberirdischen Abfluß. Da die Wassererneuerung während der sommerlichen Schichtung von unten nach oben erfolgt und der oberirdische Abfluß über 90 % des Gesamtabflusses auf sich vereint (WROBEL 1980), kann man davon ausgehen, daß die errechnete Wassererneuerungszeit relativ gut mit der tatsächlichen Wassererneuerungszeit übereinstimmt. Da die errechnete Wassererneuerungszeit der kürzesten überhaupt möglichen Wassererneuerungszeit entspricht, bedeutet dies, daß die Wassererneuerung in beiden Baggerseen besonders gründlich und wegen der hohen Durchflußrate besonders häufig erfolgt. In der Olympia-Ruderregatta wird das Wasser während der (1976) 4 Monate lang anhaltenden sommerlichen Schichtung ca. 8mal ausgetauscht und im Feldmochinger See während der 6 1/2 Monate anhaltenden sommerlichen Schichtung etwa 6mal.

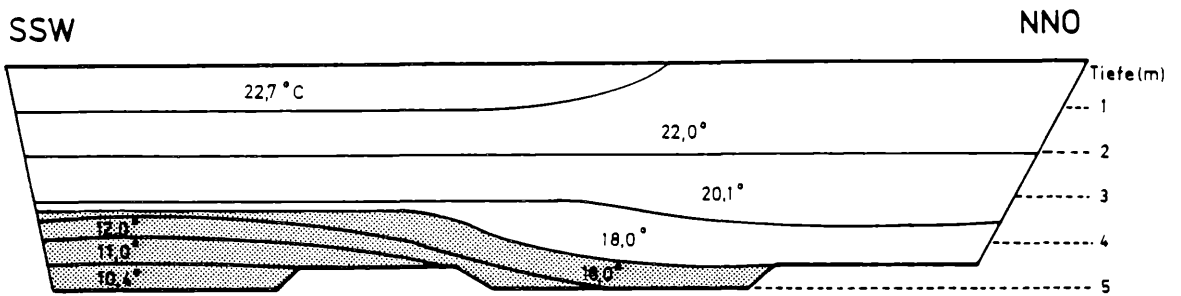
In beiden Seen sichert somit der während der Sommerstagnation erfolgende mehrmalige gründliche Wasseraustausch die Nährstoffversorgung aller Schichten trotz der bestehenden vertikalen Dichteunterschiede.

Im Lerchenauer See wird das Wasser während der etwa 7 Monate andauernden sommerlichen Schichtung höchstens 2mal, im Fasanerie See sogar nur teilweise ausgetauscht, sofern man die errechnete Wassererneuerungszeit zugrunde legt. Da es unwahrscheinlich ist, daß der Hauptabfluß in beiden Seen jeweils oberhalb der Sprungschicht liegt, ist anzunehmen, daß die tatsächliche Wassererneuerung sogar wesentlich mehr Zeit in Anspruch nimmt.

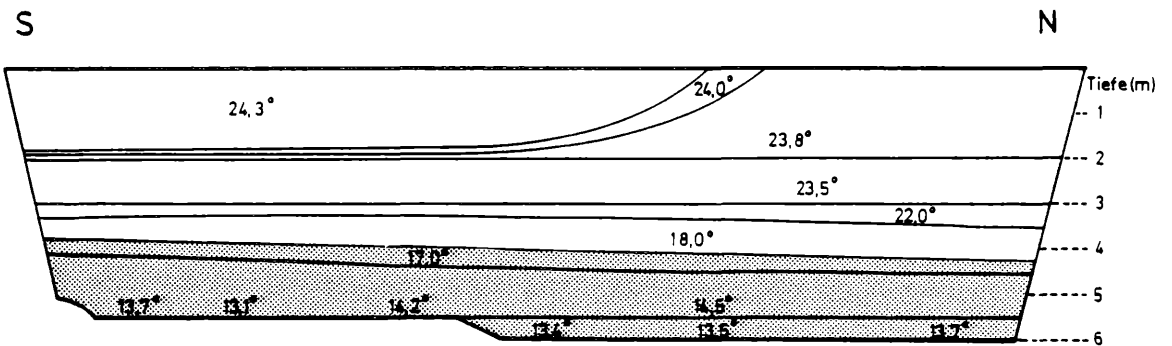
Abb. 7: Isothermenlagen in der Längsachse der Münchner Baggerseen während der hochsommerlichen Schönwetterlage zwischen dem 3.7. - 5.7.1976 aufgenommen



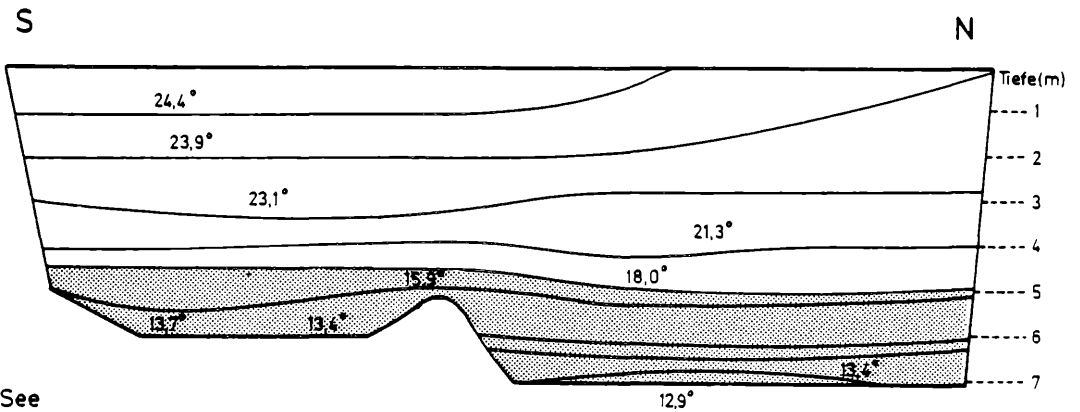
Ruderregatta



Feldmochinger See

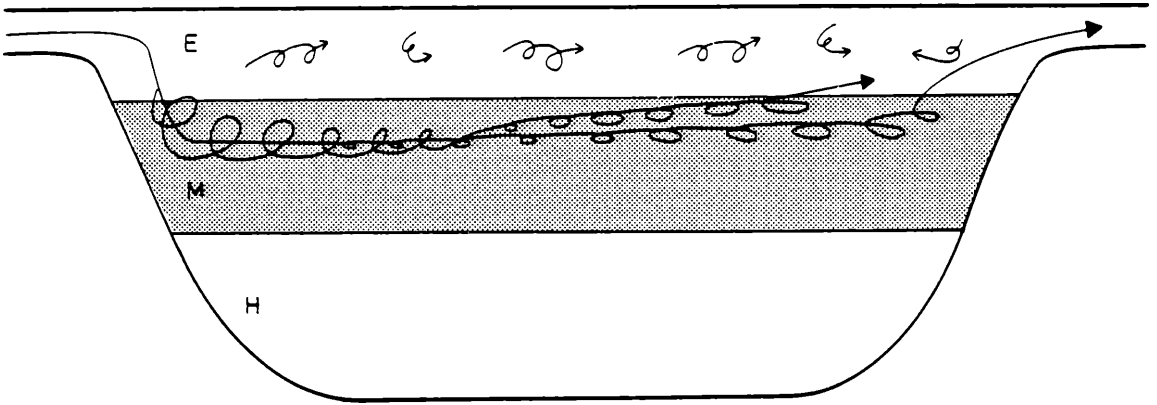


Lerchenauer See

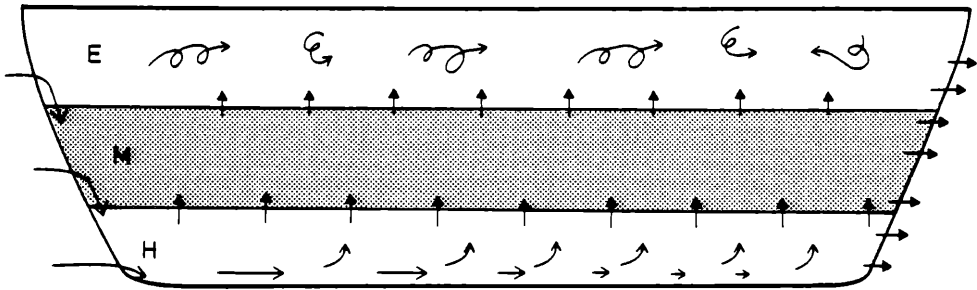


Fasanerie See

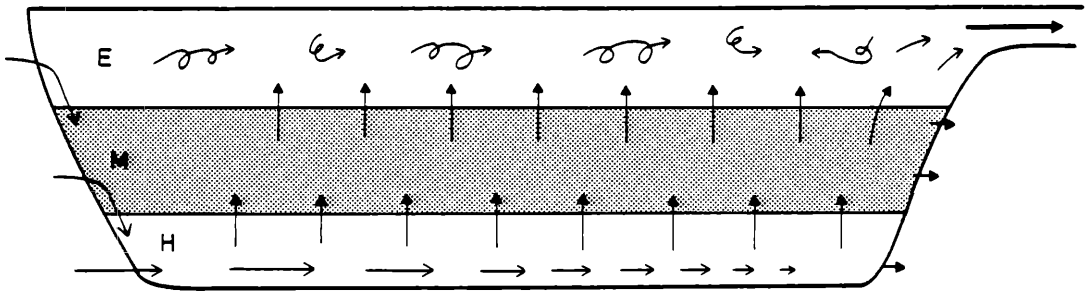
Abb. 8: Vorgang der Wassererneuerung in einem natürlichen See mit oberirdischem Zu- und Abfluß. Darunter in einem Baggersee mit unterirdischem Zu- und Abfluß bzw. mit unterirdischem Zu- und oberirdischem Abfluß



Oberirdischer Zu- und Abfluß



Unterirdischer Zu- und Abfluß



Unterirdischer Zu- und oberirdischer Abfluß

Obgleich genauere Angaben über den Wasseraustausch derzeit nicht möglich sind, reichen sie dennoch aus um festzuhalten, daß in den beiden Baggerseen mit hoher Durchflußrate und oberirdischem Abfluß während der sommerlichen Schichtung ein wesentlich gründlicherer (errechnete Wassererneuerungszeit \sim tatsächliche Wassererneuerungszeit) Wasseraustausch aller Wasserschichten möglich ist als in den beiden anderen Baggerseen mit geringer Durchflußrate und unterirdischem Abfluß (errechnete Wassererneuerungszeit $<$ tatsächliche Wassererneuerungszeit).

6. Ökologische Folgen des unterschiedlichen Wasseraustausches

Es wurde davon ausgegangen, daß die P-Importe obgleich unterschiedlich in jedem Falle ausreichen, um in den 4 Baggerseen eine Eutrophierung zu bewirken. Aus der Aufzählung von verschiedenen Kriterien ergab sich in der Tat, daß alle 4 Baggerseen charakteristische Merkmale zeigen, die für eine Zuordnung zum eutrophen Seetyp sprechen. Auffallend ist jedoch, daß sowohl in der Olympia-Ruderregatta als auch im Feldmochinger See den beiden Baggerseen, die sich durch einen gründlichen Wasseraustausch auszeichnen - die markanten Eutrophierungsmerkmale auf das Benthos beschränkt sind.

Wie ist es zu verstehen, daß das Pelagial dieser beiden Seen eher die Merkmale eines oligotrophen, das Benthos jedoch die Merkmale eines eutrophen Sees zeigt?

Da das zufließende Grundwasser am Seegrund entlangfließt und mit Nährstoffen beladen ist, sichert es auch während der Sommerstagnation durch seine **Bewegung** günstige Ernährungs- und Atmungsbedingungen gerade auch für die festsitzende Vegetation, weil sie fortwährend durchströmt wird. Da die Strahlungsverhältnisse auch am Seegrund offensichtlich noch sehr günstig sind, ist es nicht verwunderlich, daß sich hier eine üppige Vegetation entfalten kann. Weshalb sie im Feldmochinger See durch *Chara hispida* und in der Olympia-Ruderregatta durch Algen repräsentiert wird, könnte bestenfalls diskutiert, aber nicht mit Sicherheit entschieden werden. Es gibt keinen Grund, an dieser Stelle darauf einzugehen.

Wichtig ist, daß es in früheren Jahren auch im Fasanerie See und im Lerchenauer See wie sich aus Sedimentproben ergibt - eine ausgedehnte *Chara*-Vegetation gegeben hat. Sie ist im Lerchenauer See in inselartigen, relativ schütterten Beständen auch heute noch erhalten. Daraus folgt, daß es nicht die größere Seetiefe ist, die im Fasanerie See das Aufkommen und den Erhalt der *Chara*-Vegetation verhindert, sondern daß das Aussterben bzw. Zurückdrängen der *Chara*-Vegetation andere Ursachen haben muß. Es ist denkbar, daß diese Entwicklung nicht allein, aber zumindest zusätzlich auch auf die abnehmende Durchflußrate zurückzuführen ist, wodurch die Atmungs- und Ernährungsbedingungen in der Tiefe erheblich beeinträchtigt werden.

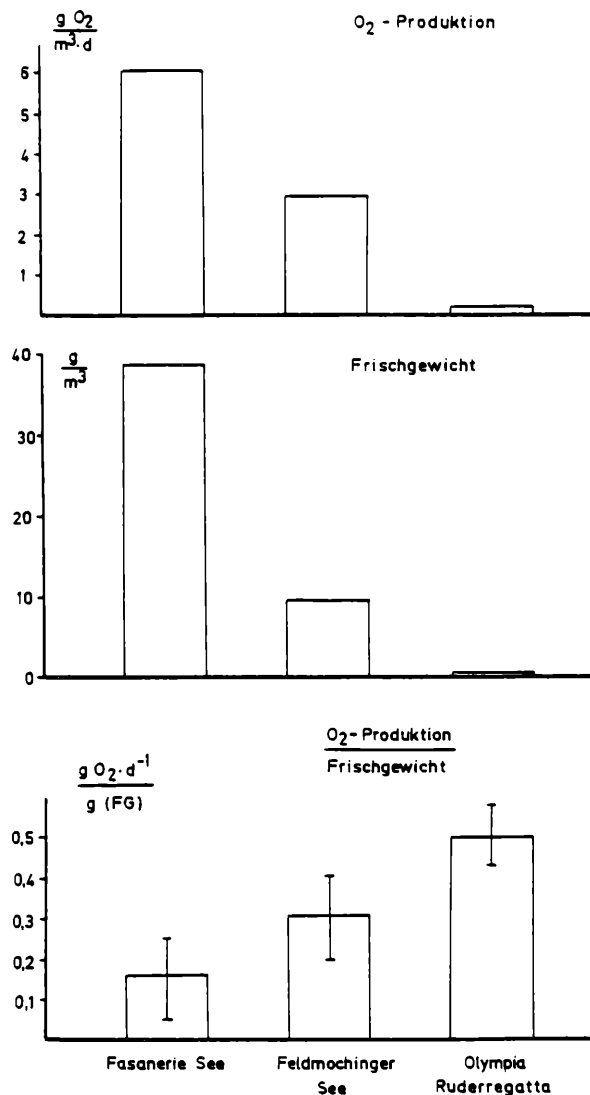
Wie ist es zu verstehen, daß die Phytoplanktondichten im Feldmochinger See und in der Olympia-Ruderregatta trotz der geschilderten günstigen Austauschbedingungen und der durch sie geförderten Nährstoffverteilung meist so gering sind, daß das Pelagial Eigenschaften besitzt, die an oligotrophe Seen erinnern?

Im Falle des Feldmochinger Sees wäre es denkbar, daß das während der sommerlichen Schichtung zufließende Grundwasser auf seinem Weg aus der Tiefe durch den dichten *Chara*-bestand an Nährstoffen verarmt und so für das Phytoplankton nur noch wenig zur Verfügung steht. Der niedrige,

wenn auch dichte Aufwuchs auf dem festen Substrat der Olympia-Ruderregatta könnte eine entsprechende Funktion jedoch keinesfalls erfüllen. Dennoch zeigt das Pelagial gerade in diesem Baggersee besonders auffällig die Kennzeichen oligotropher Seen.

Aufschlußreich ist in diesem Zusammenhang eine produktionsbiologische Untersuchung, die unter hochsommerlichen Bedingungen zwischen dem 2. bis 4.7.1976 simultan im Fasanerie See, Feldmochinger See und Olympia-Ruderregatta durchgeführt worden ist (Abb. 9). Zu diesem Zweck wurden Wasserproben in den Tiefen 1 m, 2 m und 3 m entnommen und für die Zeit zwischen 10 - 18 Uhr in den entsprechenden Tiefen (unter Anwendung des ^{14}C - bzw. O_2 -Verfahrens der Produktionsbestimmung) exponiert. Die Primärproduktion ist hier durch die Sauerstoffproduktion repräsentiert. Die Ergebnisse zeigen, daß die Produktion des Phytoplanktons im Fasanerie See mit ca. $6 \text{ g O}_2/\text{m}^3$ Tag an der Spitze liegt, gefolgt von dem Produktionswert im Feldmochinger See mit $2,9 \text{ g O}_2/\text{m}^3$ Tag und dem Produktionswert in der Olympia-Ruderregatta mit nur $0,1 \text{ g O}_2/\text{m}^3$ Tag.

Abb. 9: Ergebnis einer vergleichenden produktionsbiologischen Messung



Diese Unterschiede sind, wie die Angaben zur Phytoplanktonbiomasse (volumetrische Bestimmung des Frischgewichts nach erfolgter Auszählung des Phytoplanktons aus einer Teilprobe der für die Produktionsbestimmung vorgesehenen Wasserprobe) zeigen, zumindest zu einem guten Teil auf die verschiedenen Phytoplanktondichten zurückzuführen. Unterschiede in der Produktionsrate, die nicht auf Unterschieden in der Phytoplanktondichte beruhen, sondern auf den Produktionsbedingungen, lassen sich erkennen, wenn man die Produktionsrate auf die jeweils produzierende Biomasse bezieht. In diesem Fall findet man in der Olympia-Ruderregatta die höchste Produktionsrate, gefolgt von der Produktionsrate im Feldmochinger See und im Fasanerie See. Obgleich diese Untersuchung trotz der relativ hohen Zahl von 6 Parallelproben/Expositionstiefe kein endgültiges Bild über die Produktionsverhältnisse in den drei Baggerseen liefert (hierzu wären entsprechende Untersuchungen über einen längeren Zeitraum erforderlich), zeigt sie, daß die Produktionsrate/Biomasse im Fasanerie See nicht größer, sondern eher kleiner ist als in den beiden anderen Baggerseen.

Wie kommt es dann aber zu den gegenläufigen Unterschieden in der Phytoplanktondichte? Entweder waren die Produktionsbedingungen vor dem Untersuchungszeitraum im Fasanerie See günstiger als im Feldmochinger See und in der Olympia-Ruderregatta oder die Phytoplanktondichteunterschiede sind im wesentlichen das Ergebnis eines unterschiedlichen Phytoplanktonexports.

Die zuletzt genannte Möglichkeit läßt sich verhältnismäßig leicht prüfen, wenn wir die Ergebnisse einiger Untersuchungen zum P-Import bzw. P-Export heranziehen (Abb. 10). Der Zusammenhang zwischen Phytoplanktonbiomasse und Phosphor ist insofern gegeben, als zwischen der Konzentration des partikulären $\text{PO}_4\text{-P}$ und der Phytoplanktondichte eine enge Beziehung vorliegt.

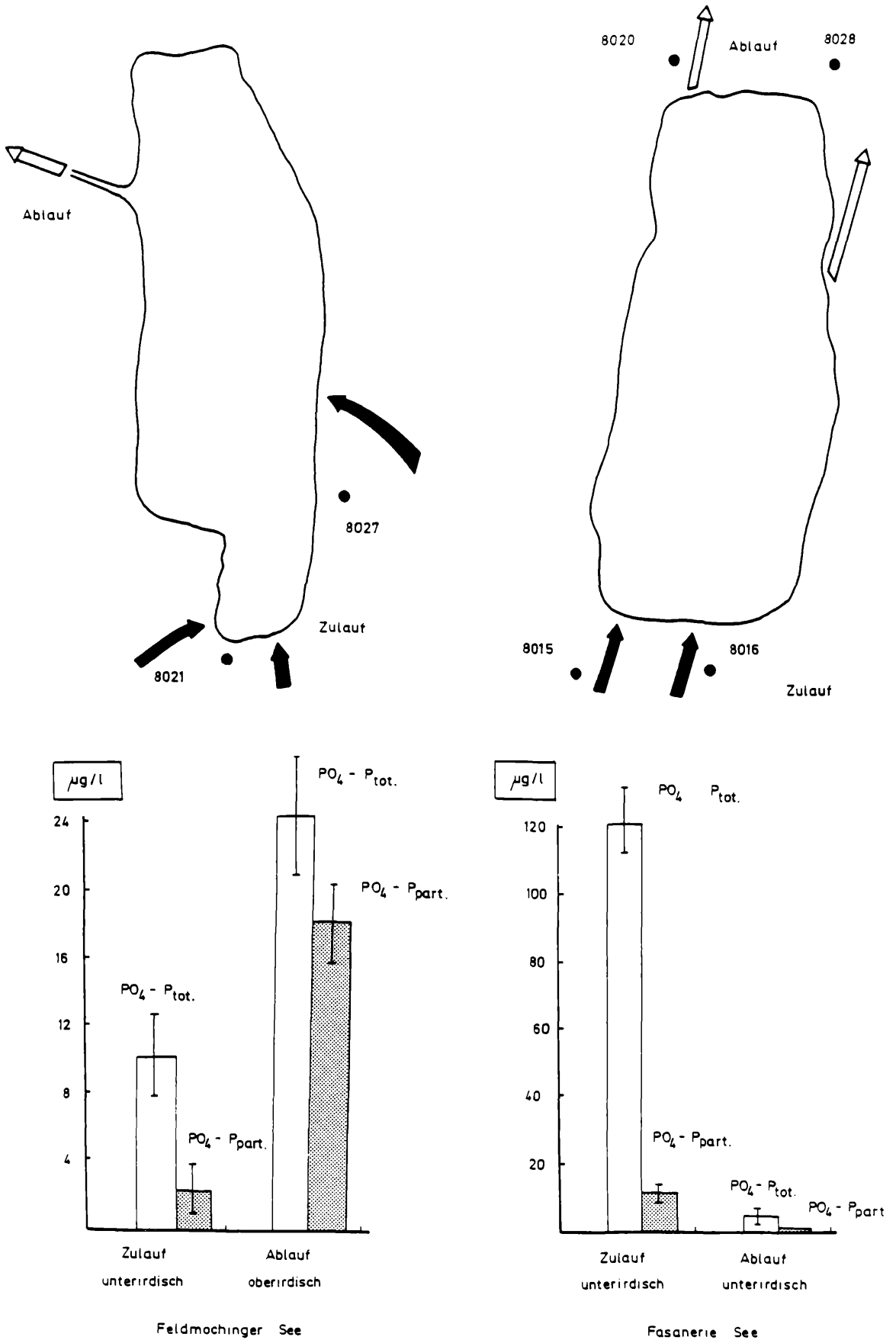
Im Feldmochinger See lag die mittlere Konzentration des $\text{PO}_4\text{-P}_{\text{tot}}$. (= Gesamt-Phosphat-Phosphor) im zufließenden Grundwasser in den vorausgehenden Monaten im Mittel bei $10 \mu\text{g/l}$. Im oberirdischen Abfluß wurden im Hochsommer (5.7.1976) $24 \mu\text{g/l}$ nachgewiesen. Der Anteil des $\text{PO}_4\text{-P}_{\text{part}}$. (= partikulärer-Phosphat-Phosphor) lag im Zufluß bei $2 \mu\text{g/l}$, im Abfluß bei $18 \mu\text{g/l}$.

Dieses Ergebnis legt den Schluß nahe, daß der P-Export im Feldmochinger See vor allem durch den Export von intaktem Phytoplankton erfolgt, das bekanntlich in der Lage ist, Phosphor in beträchtlicher Menge zu speichern.

Die Bedeutung des oberirdischen Abflusses für den Phytoplanktonexport wird noch mehr herausgestellt, wenn wir die vorgelegten Daten mit jenen vergleichen, die durch entsprechende Untersuchungen am Fasanerie See gewonnen worden sind. Die Konzentration des $\text{PO}_4\text{-P}_{\text{tot}}$. des Zuflusses liegt im Mittel bei $122 \mu\text{g/l}$ (Anteil des $\text{PO}_4\text{-P}_{\text{part}}$.: $10 \mu\text{g/l}$) im Abfluß bei $20 \mu\text{g/l}$ (Anteil des $\text{PO}_4\text{-P}_{\text{part}}$.: $14 \mu\text{g/l}$). Damit erweist sich der Fasanerie See in viel stärkerem Maße als Phosphor-Falle wie der Feldmochinger See, der durch den hohen Phytoplanktonexport zeitweise mehr P exportiert als er im gleichen Zeitraum importiert.

Diese Befunde unterstützen das Argument, daß die oligotrophen Kennzeichen des Pelagials im Feldmochinger See und in der Olympia-Ruderregatta nicht zuletzt auf den erheblichen Export an Phytoplankton zurückzuführen sind. Ohne Phytoplanktonexport würde es auch in diesen beiden Baggerseen zu einer Phytoplanktonakkumulation mit all ihren Folgen kommen.

Abb. 10: Ergebnis einer vergleichenden Untersuchung über den PO_4 -P-Import und PO_4 -P-Export im Fasanerie See und Feldmochinger See



Festsitzende Pflanzen sind derartigen Verlusten nicht ausgesetzt. Das reichliche Nährstoffangebot und die bei hoher Durchflußrate vorhandene Wasserbewegung liefern die Grundlage für günstige Ernährungsbedingungen, die in einer entsprechend hohen Pflanzenbiomasse zum Ausdruck kommt, sofern die Umsatzzeit der betreffenden Vegetation nicht verhältnismäßig kurz ist wie beim Algenaufwuchs in der Olympia-Ruderregatta.

Im Fasanerie See und im Lerchenauer See ist ein Phytoplanktonexport anscheinend weitgehend ausgeschlossen. Die günstigen Produktionsbedingungen führen daher zu einer hohen Phytoplanktondichte mit all ihren Folgen, die sich sowohl im Pelagial als auch im Benthos auswirken. Trotz reichlicher Nährstoffzufuhr fehlen in der Tiefe dieser beiden Seen die bei höherer Durchflußrate gegebenen günstigen Ernährungs- und Atmungsbedingungen. Hinzu kommt eine Herabsetzung der photosynthetisch nutzbaren Strahlung durch die Entwicklung hoher Phytoplanktondichten. Die Existenzbedingungen für eine Tiefenvegetation werden daher immer weniger erfüllt, so daß der Bestand schließlich ganz ausgelöscht wird.

7. Einige allgemeine Konsequenzen für die Praxis

Die vorliegenden Befunde zeigen, daß die Eigenschaften des Wasseraustausches (Durchflußrate, Lage des Zu- und des Ablaufes, Anteil des unterirdischen und des oberirdischen Seeabflusses) für die Zusammensetzung (z.B. Anteil der festgewachsenen und der freischwebenden Organismen) und für die Entwicklung der Vegetation - damit aber auch für die trophischen Wechselbeziehungen des gesamten Ökosystems - von herausragender Bedeutung sind. Die Sonderrolle des Wasseraustausches erhält noch mehr Gewicht, wenn man bedenkt, daß die Nährstoff-Versorgung der in den verschiedenen Wassertiefen befindlichen Primärproduzenten nicht allein durch die Größe des Nährstoffimports in das Seebecken festgelegt ist, sondern auch von der Verteilung des Nährstoff-Imports abhängt, die ausschließlich im Zuge des Wasseraustausches erfolgt.

Diesem Sachverhalt muß daher auch im Hinblick auf die verschiedenartigen Folgenutzungen besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Wie sich aus den Beiträgen von WROBEL ("Beeinflussung des Grundwassers durch Baggerseen") und KOHM ("Hydraulische und hydrologische Auswirkungen von Baggerseen auf das Grundwasser") direkt und indirekt ergibt, besteht grundsätzlich die Möglichkeit, wichtige Größen des Wasseraustausches bereits vor dem Bau von Baggerseen zu ermitteln. Es sind dies z.B. das Grundwassergefälle und die Durchlässigkeit des Grundwasserträgers. Darüber hinaus eröffnen sie die Möglichkeit, die Voraussetzungen für unterschiedliche Austauschverhältnisse zu schaffen, nicht nur durch die zu erwägende Größe des zukünftigen Seebeckens, sondern auch durch seine Tiefe (wobei es wichtig ist, ob der Seegrund innerhalb des Grundwasserträgers liegt oder bis zur wassertragenden Tiefenschicht reicht), seine Lage im Grundwasserströmungsfeld (Seeachse parallel oder quer zur Strömungsrichtung) und durch seine Gestalt. Vom fertiggestellten Baggersee sollte man wissen, an welchen Stellen der Grundwassereintritt bzw. der Abfluß bevorzugt erfolgt, ob und wie man ihn verändern kann (z.B. je nach Notwendigkeit Abfluß des Tiefen- oder Oberflächenwassers). Es besteht kein Zweifel, daß wesentliche Unterschiede der hier aufgeführten Größen und Eigenschaften für die Entwicklung des Ökosystems von erheblicher Bedeutung sind. Differenzierte Aussagen sind beim derzeitigen Stand unseres Wissens aber leider nur sehr begrenzt möglich.

Immerhin zeigen die geschilderten Ergebnisse, daß die bei hohen Nährstoff-Importen unvermeidbare Eutrophierung und ihre Folgen in Gegenwart eines oberirdischen Seeabflusses im Bereich des Pelagials so stark reduzierbar sind, daß hier Eigenschaften vorherrschen, die man sonst nur in oligotrophen Seen beobachtet. Reicht die trophogene Zone bis zum Seegrund, so kommt der Eutrophierungseffekt bei festsitzender Vegetation voll zur Geltung, was aber nicht unbedingt unerwünscht sein muß. Es ist denkbar, daß eine dichte Benthalvegetation durch den Eigenbedarf an Nährstoffen zumindest zeitweilig zu einer Nährstoff-Entlastung des Pelagials führt, vor allem wenn das zufließende nährstoffreiche Grundwasser auf seinem Weg durch den See zuerst das Pflanzendickicht passiert.

Da die Durchlässigkeit der Seebeckenwandung im Laufe der Zeit durch die anwachsende Sedimentschicht abnimmt und damit auch die Durchflußrate, erhalten die biogenen Veränderungen des Chemismus im Seebecken ein immer stärkeres Gewicht. So kommt es durch die Phytoplanktonakkumulation in der Tiefe zu Sauerstoff-Defiziten, schließlich zu Anaerobie und damit wieder zur Freisetzung von Nährstoffen aus dem Sediment, wodurch die Eutrophierung in einem positiven Rückkoppelungseffekt immer mehr verstärkt wird.

Obgleich die Durchflußrate durch eine Entfernung der Sedimente wieder erhöht werden kann, müssen in jedem Fall 2 Effekte beachtet werden. Der erste Effekt ist durchaus positiv: Der verstärkte Wasseraustausch wird die Akkumulation der Endprodukte des Abbaus behindern, u.U. sogar verhindern. Der zweite Effekt besteht u.U. in einer Erhöhung des Nährstoff-Imports. Beide Wirkungen müssen gegeneinander abgewogen werden. Wie an einem Beispiel gezeigt wurde, sichert ein oberirdischer Abfluß in jedem Fall den Export von intaktem, d.h. u.a. mit PO_4 -P angereichertem Phytoplankton. Durch diesen Speichereffekt des Phytoplanktons (VALLENTYNE 1974) und nur durch ihn - kann der P-Export zeitweise über dem P-Import liegen und damit zu einer spürbaren Nährstoff-Entlastung des betreffenden Baggersees führen.

Diese Überlegungen dürfen aber nicht als Rezepte verstanden werden, sondern als Hinweise auf Zusammenhänge, die weiterer Untersuchungen bedürfen, bei der Planung von Baggerseen aber vom Grundsätzlichen her heute schon Berücksichtigung finden können.

8. Zusammenfassung

1. Es wird von 4 im Norden Münchens gelegenen Baggerseen berichtet, die einem verhältnismäßig hohen jährlichen P-Import ausgesetzt sind.
2. Von diesen 4 Baggerseen zeichnen sich 2 durch eine relativ lange Wassererneuerungszeit aus (ca. 3 bzw. ca. 8 Monate). Sie zeigen die typischen Kennzeichen der Seeneutrophierung. Die beiden anderen mit einer kurzen Wassererneuerungszeit (ca. 14 bzw. ca. 26 Tage) und mit oberirdischem Abfluß zeigen typische Kennzeichen der Seeneutrophierung im wesentlichen nur im Benthos (Biomasseakkumulation durch festsitzende Vegetation mit all ihren Folgen). Nach ihren Eigenschaften im Pelagial bewertet ähneln diese Baggerseen dem eutrophen Seentyp.
3. Aus einer allgemeinen Betrachtung des Wasseraustausches in Baggerseen durch das zufließende Grundwasser folgt, daß (im Gegensatz zu Seen mit oberirdischem Zu- und Abfluß)

- auch während der sommerlichen Schichtung ein durchgreifender Wasseraustausch mit anhaltender Nährstoff-Versorgung aller Schichten möglich ist,
die errechnete Wassererneuerungszeit während der sommerlichen Schichtung der tatsächlichen Wassererneuerungszeit um so mehr entspricht, je größer der Anteil des oberirdisch abfließenden Seewassers ist.
- 4. Untersuchungen über die Primärproduktion des Phytoplanktons und über den P-Import und P-Export legen den Schluß nahe, daß die Erhaltung oligotropher Kennzeichen im Pelagial auf den bei oberirdischem Abfluß besonders hohen Phytoplanktonexport zurückzuführen ist, der wegen der PO_4 -Speicherfähigkeit der Phytoplankter eine erhebliche PO_4 -Entlastung für den See bedeutet. Bei feststehenden Pflanzen wirkt sich der hohe Nährstoff-Import jedoch durch eine Biomasse-Akkumulation aus, so daß das Benthos alle Kennzeichen des eutrophen Sees zeigt.
- 5. Es werden einige Konsequenzen für die Praxis diskutiert, wobei der Wasseraustausch als ein besonderer Faktor hervorgehoben wird, der z.B. im Hinblick auf die erwünschten Folgenutzungen bereits bei der Planung von Baggerseen besondere Beachtung verdient.

Literatur

ODUM, E.P. (1959):

Fundamentals of ecology. W.B. Saunders Comp. Philadelphia and London, 2. Auflage

OHLE, W. (1955):

Die Ursachen der rasanten Seen-Eutrophierung. Verh. Internat. Ver. angew. Limnol. 12, 373-382

RODENKIRCHEN, H. (1977):

Untersuchungen zum Einfluß der Characeen und des Phytoplanktons auf die O_2 -Verhältnisse des Feldmochinger Sees. Dipl. Arbeit (unveröff.)

SIEBECK, O. (1979):

Der Einfluß von Seetiefe und Grundwasserzufluß auf die Stabilität der Dichteschichtung in Baggerseen. Naturw. 66, 361

VOLLENWEIDER, R. (1968):

Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. OECD Paris, Tech. Rep. DAS/CSI 68.27, 41

WROBEL, J.-P. (1980):

Wechselbeziehungen zwischen Baggerseen und Grundwasser in gut durchlässigen Schottern. GWF 121, 165-173

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Otto Siebeck
Zoologisches Institut der
Universität München
Abteilung Limnologie
Seidlstraße 25
8000 München 2

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Laufener Spezialbeiträge und Laufener Seminarbeiträge \(LSB\)](#)

Jahr/Year: 1980

Band/Volume: [6_1980](#)

Autor(en)/Author(s): Siebeck Otto

Artikel/Article: [Der Wasseraustausch durch Grundwasserdurchfluss im Baggersee und seine Bedeutung für die Eutrophierung 108-128](#)