

Vergleichende Temperatur- und Sauerstoffmessungen in 30 südbayerischen Seen während der Frühjahrsvollzirkulation und der Sommerstagnation im Jahr 1984

Günther Michler

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einleitung und Aufgabenstellung	146
2. Bedeutung von Temperatur und Sauerstoff in stehenden Gewässern	146
3. Einordnung der Meßwerte in die allgemeine Seetypenlehre	148
3.1 Verschiedene Sauerstoffparameter (O_2 -„Defizite“ nach HUTCHINSON)	148
3.2 Deskription von Sauerstoffkurven nach ÅBERG & ROHDE	148
3.3 THIENEMANNs Seentypenlehre nach dem Volumenverhältnis von Epilimnion zu Hypolimnion	149
4. Auswertung der Meßergebnisse	150
4.1 Seen mit großer Tiefe (ca. > 60 m), von Natur oligotroph	150
4.1.1 noch oligotrophe Seen mit β -orthograde Sauerstoffkurve, geringer bis mittlerer Übersättigung und (selten) geringer heterograde Überprägung	
Königssee	150
Tegernsee	151
Walchensee	151
Würmsee (Starnberger See)	153
4.1.2 Seen mit O_2 -Kurve im Übergang von β -orthograd zu klinograd, mittlerer Übersättigung und kräftiger, negativ heterograde Überprägung, in der Regel mesotroph bis schwach eutroph.	
Ammersee	153
Chiemsee	154
4.2 Seen mit geringer Tiefe (ca. < 60 m) mit natürlicher Tendenz zur Eutrophierung	155
4.2.1 Seen mit klinograde O_2 -Kurve und negativ heterograde Überprägung, in der Regel mesotroph bis stark eutroph	
Staffelsee	155
Weißensee	155
4.2.2 Seen mit klinograde O_2 -Kurve und meist positiv heterograde Überprägung, in der Regel bereits eutroph	
Wörthsee	156
Schliersee	156
Großer Ostersee	157
Alpsee (Füssen)	158
Eibsee	158
4.2.3 Seen mit unvollständiger Zirkulation	
Alatsee	158
4.2.4 Seen mit extrem klinograde O_2 -Kurve und O_2 -Schwund bereits in geringer Tiefe, max. Tiefe meist < 30 m, in der Regel eutroph bis polytroph	
Pilsensee	160
Abtsee	161
Fohnsee	161
Hartsee	161
Hopfensee	161
Weßlingersee	161
Alpsee (Immenstadt)	162
Bannwaldsee	162
Niedersonthofener See	163
Riegsee	163
Seeoner See	163
Simssee	164
Waginger See	164

4.3 Seen mit kräftigem Wasserdurchsatz

4.3.1 Natürliche Seen

Kochelsee

165

4.3.2 Stauseen

Seehamer See

165

Forggensee

165

5. Kurzfassung/Summary

166

6. Literaturverzeichnis

166

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Auf bayerischem Gebiet gibt es 25 Seen mit mehr als 1 km² Oberfläche, die insgesamt 270 km² bedecken und einen Gesamtvolumen von rund 9×10^9 m³ darstellen. Daneben existieren noch zahlreiche kleinere, natürliche Seen sowie künstliche Stauseen, Hochwasserrückhaltebecken, Teiche und Baggerseen. WILHELM (1972) zählte 637 stehende Gewässer in den Bayerischen Alpen und im Alpenvorland. Das Seenverzeichnis des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft führt 7644 erfaßte Seen auf mit einer Fläche von 57181,46 ha (etwas mehr als die Gesamtfläche des Bodensees mit 53848 ha) und einem Volumen von 10820,87 hm³. Hinzu kommen noch ca. 7400 nicht erfaßte kleinere Seen. (vgl. Übersicht)

Über eine ganze Reihe der größeren Seen liegen bereits Untersuchungen zum Temperatur- und Sauerstoffhaushalt sowie (allerdings in geringerer Zahl) zum Nährstoffhaushalt vor. Eine Auswahl findet sich im Literaturverzeichnis dieser Arbeit. Die dabei ermittelten Temperatur- und Sauerstoffwerte aus den einzelnen Seen können jedoch wegen der von Jahr zu Jahr schwankenden hydrographischen Verhältnisse, der zunehmenden Eutrophierung bzw. der mittlerweile durchgeführten Abwasserfernhaltemaßnahmen sowie wegen des unterschiedlichen Witterungsablaufes in den einzelnen Jahren nicht miteinander verglichen werden.

Um ein möglichst aktuelles und vergleichbares Bild der Temperatur- und Sauerstoffverhältnisse zumindest einmal im Jahr zu gewinnen, wurden am Institut f. Geographie d. Universität München 1974, 1975, 1976 und 1978 möglichst gleichzeitig (d. h. innerhalb weniger Tage bei möglichst einheitlicher Witterung) an den bedeutendsten 30 bis 35 Seen Südbayerns Temperatur- und Sauerstoffmessungen jeweils während der Sommerstagnation im August durchgeführt.

Da die sommerliche Messung – insbesondere die hypolimnische Sauerstoffzehrung als Indikator für den Eutrophierungsgrad – nur im Vergleich mit dem Sauerstoffgehalt zu Beginn der Vegetationsperiode, also nach der Frühjahrsvollzirkulation, hinreichend aussagekräftig wird, wurde im Jahre 1984 sowohl eine quasi-synoptische Messung im April zur Zeit der Frühjahrsvollzirkulation und eine im August zur Zeit der Sommerstagnation durchgeführt. Anhand der aufgenommenen Temperatur- und Sauerstoffvertikalprofile soll eine Typisierung der 30 ausgewählten Seen nach den im folgenden beschriebenen Kriterien vorgenommen werden.

2. Bedeutung von Temperatur und Sauerstoff in stehenden Gewässern

Nahrungshaushalt, Produktivität und Stoffkreislaufintensität sind in unseren Seen in der Regel kausal und konsekutiv so innig miteinander verbunden, daß der Charakter des einen durch die Natur der anderen weitgehend bestimmt wird bzw. sich dem Limnologen erschließt. So läßt z. B. ein intensiver Stoffkreislauf im allgemeinen den Rückschluß auf Nährstoffreichtum und hohe Produktivität zu. Insofern dient der Sauerstoffhaushalt als wichtiger Parameter der heterotrophen bzw. tropholytischen Prozesse seit Jahrzehnten als wesentliches Kriterium bei der Klassifikation von Seen nach dem Eutrophierungsgrad bzw. nach der Wassergüte.

Daß der vertikale Verlauf der Sauerstoffkonzentration in Seen gemäßigter Breiten bereits viel über deren Stoffwechselcharakter aussagt, haben bereits 1911 BIRGE & JUDAY am Beispiel der nordamerikanischen Seen aufgezeigt. GROTE (1934) formulierte: „Es gibt keinen anderen Faktor, der so das Gesamtgeschehen im See charakterisierte, also einen derartig natürlichen Indikator und Klassifikationsparameter für die gesamte Seetypenlehre darstellte, wie die wechselnden Sauerstoffschichtungsverhältnisse. Wollen wir die Diagnose stellen auf die Typenzugehörigkeit eines Gewässers, kommen wir nicht vorbei an ihrem charakteristischen Symptom, dem Sauerstoffgehalt“

Die Posten der Sauerstoffbilanz in einem Gewässer sind:

1. Zufuhr aus der Atmosphäre und durch Photosynthese
2. Verbrauch durch Atmung bzw. Mineralisation organischer Stoffe (Destruktion) und Verlust an die Atmosphäre.

Sauerstoff gelangt aus der Atmosphäre durch die Oberfläche in das Wasser und wird durch vertikale Wasserbewegung in die Tiefe verfrachtet. Bei jeder Vollzirkulation eines holomiktischen Sees (in unseren dimiktischen Seen im Herbst und im Frühjahr bei Homothermie) gelangt sauerstoffreiches Wasser bis zum Grund. In der gesamten Wassermasse ist dann annähernd gleichviel Sauerstoff pro Volumeneinheit gelöst. Im günstigen Falle wird durchgehend 100%ige Sättigung erreicht.

Im Sommer ist der Sauerstoffaustausch auf die thermisch mehr oder weniger homogene Oberflächenschicht, das Epilimnion, beschränkt. Darunter liegt eine Schicht mit steilem Temperaturgradienten (ebenso Dichtegradienten), das Metalimnion. Durch diese Trennschicht erfolgt keinerlei konvektiver Wasseraustausch mit der Tiefe, so daß im Tiefenwasser unterhalb des Metalimnions, im Hypo-

Übersicht: Die Seen in Südbayern und ihre wichtigsten Kennwerte

Abb.-Nr.	See	Höhe üb. NN in m	Fläche km ²	Nieder- schlags- gebiet km ²	max. Tiefe in m	mittl. Tiefe in m	Volumen 10 ⁶ m ³	Umfang km	Typ
14	Alatsee	868	0,12	0,57	32,1	15,33	1,84	1,4	tekt./glaz.
12	Alpsee Füssen	814	0,88	5,33	62	27,8	24,51	5,0	tekt./glaz.
21	Alpsee Immenstadt	724	2,5	14,0	26	14,1	34,0	8,2	ZBS*
5	Ammersee	533	47,6	988,5	82,5	37,8	1779,0	42,0	ZBS
22	Bannwaldsee	786	2,3	21,4	ca.12	ca. 5	13,4	6,2	ZBS
6	Chiemsee	518	82,2	1388,3	73,4	25,6	2053,0	63,9	ZBS + Kessel
13	Eibsee	973	1,7	3,3	32,5	14,0	26,1	8,1	Bergsturz/glaz.
17	Fohnsee	590	0,21	30,6	23,7	10,8	2,3	1,8	Kessel
30	Forgensee	782	15,8	1319,9	40	8,8	149,0**	30,0	Stausee
—	Freiberger See	930	0,16	1,43	ca.36	ca. 1,85	ca. 1,85	1,4	glaz.
18	Hartsee	530	0,87	ca. 25	39	18,3	15,9	5,1	Kessel
19	Hopfensee	785	2,2	32,4	11,1	4,5	10,0	7,0	ZBS
28	Kochelsee	599	5,9	683,7	66,2	31,3	183,2	14,2	ZBS/tektonisch
1	Königssee	602	5,3	137,6	189	93,1	481,5	19,9	tekt./glaz.
23	Niedersonthofener See	704	1,2	15,0	22,7	10,6	13,8	5,9	ZBS
11	Ostersee	590	1,2	30,6	29,8	11,7	14,0	7,5	Kessel
15	Pilsensee	534	1,9	52,1	16,0	9,3	18,0	6,0	ZBS
24	Riegsee	653	1,7	18,0	14,0	5,6	10,4	7,5	ZBS
10	Schliersee	776	2,2	27,1	40,3	23,9	53,1	7,4	ZBS
29	Seehamer See	652	1,3	9,3	12,0	3,8	5,0	6,0	Kessel/Stausee
25	Seoner See	533	0,47	ca. 8,75	16	5,9	2,76	4,4	Kessel
26	Simssee	470	7,0	83,8	22,5	13,4	87,6	14,8	ZBS
7	Staffelsee	649	7,7	25,7	38,1	9,7	74,9	18,3	ZBS
4	Starnberger See	584	57,2	312	127	54	3100,0	49,2	ZBS
—	Sylvensteinspeicher	764	6,2	1129,7	24	16,9	105,0**	15,5	Flußstausee
—	Tachingener See	442	2,36	ca. 41	16,5	9,15	21,6	9,3	ZBS
2	Tegernsee	725	9,1	210,5	72,2	36,6	324,0	20,0	ZBS
27	Waginger See	441	6,61	123,5	27	13,7	90,4	15,9	ZBS
3	Walchensee	802	16,3	770	192	81,8	1340,1	26,2	tekt./glaz.
8	Weissensee	787	1,4	14,6	25	13,5	17,4	6,5	ZBS
20	Wesslinger See	590	0,16	ca. 3,75	12,5	ca. 3,5	ca. 1,1	1,85	glaz./Toteis
9	Wörthsee	560	4,5	27,2	33	13,5	17,4	8,5	ZBS

* Zungenbeckensee;

** Höchststau

limnion, die Temperatur etwa 4° C kaum übersteigt, die dem Dichtemaximum des Wassers entspricht. Man nennt diesen Zustand der stabilen thermischen Schichtung im See die Sommerstagnation. Perioden der Zirkulation und Stagnation sind in einem See die besonders signifikanten Stationen der dynamischen Vorgänge im Laufe eines Jahres. Es ist für den Stoffhaushalt der Seen von größter Bedeutung, daß während der Zirkulation Oberflächenwasser bis in die Tiefe transportiert wird, aber während der Stagnation das hypolimnische Tiefenwasser von den darüberliegenden Wasserschichten weitgehend isoliert ist.

Während der Sommerstagnation macht sich im thermisch isolierten Hypolimnion der biogene Sauerstoffverbrauch besonders bemerkbar, und es entstehen charakteristische Unterschiede im vertikalen Sauerstoffprofil eines Sees. Im Epilimnion wird auch während der Sommerstagnation aus der Atmosphäre und durch Photosynthese ständig Sauerstoff nachgeliefert; die sauerstoffzehrenden und -liefernden Prozesse gleichen sich etwa aus. Bei starker Phytoplanktonproduktion im nährstoffreichen See treten allerdings tagsüber im Epilimnion Sauerstoffübersättigungen auf, nachts können Sauerstoffdefizite vorkommen. Im Hypolimnion spielen ausschließlich sauerstoffzehrende Vorgänge eine Rolle. Der stärkste O₂-Aufbrauch erfolgt durch mikrobielle Mineralisation organischer Tier- und Pflanzenreste im Profundal. Von nachrangiger Bedeutung sind die Atmungsvorgänge pelagialer und benthaler Organismen.

Die Intensität der Destruktionsvorgänge und des O₂-Schwundes im Hypolimnion ist kennzeichnend für eine ebenso intensiven Stoffkreislauf im See und muß sich auf eine ebenso kräftige Produktion organischer Substanz stützen, die meistens schon an O₂-Übersättigung im Epilimnion erkannt werden kann. Seetypus: eutroph.

Geringe O₂-Abnahme im Hypolimnion weist auf einen schwachen Stoffkreislauf im See hin. Seetypus: oligotroph.

Neben diesen beiden Seetypen extremen Charakters treten zahlreiche Übergangsformen auf. Für sie alle ist das Sauerstoffvertikalprofil ein wichtiges, rasch zu messendes Kriterium der Trophieverhältnisse, wenn man die Ausnahmen beachtet!

So dürfen z. B. aus den oft extrem hohen O₂-Sättigungsdefiziten im Hypolimnion von meromiktischen (nur teil-mischenden) Seen keine Schlüsse auf die Produktionsverhältnisse gezogen werden, wie u. a. FINDENEGG (1936) in seinen klassischen Studien über die meromiktischen Seen Kärntens nachgewiesen hat. Insbesondere bei Seen, deren Oberfläche im Verhältnis zur Tiefe gering ist, die außergewöhnliche morphologische Verhältnisse aufweisen, extrem windgeschützt sind, gegebenfalls salzreiches = schweres Tiefenwasser besitzen und durch schnelles Zufrieren die Dauer des Windeinflusses verkürzen, reicht die Windeinwirkung nicht aus, eine Vollzirkulation einzuleiten, das tiefere Hypolimnion bleibt also im Zustand andauernder Stagnation. Der O₂-Gehalt in den verschiedenen Schichten hängt dann stark vom Umfang der O₂-Aufnahme während des vorangegangenen Winters und Frühjahrs ab. FINDENEGG (1936) hat meromiktische Seen mit extremem O₂-Defizit pseudo-eutroph genannt, eine Bezeichnung, die von vielen

Limnologen als mißverständlich abgelehnt wird. Der Alatsee ist der einzige beständig und total meromiktische See Bayerns.

3. Einordnung der Meßwerte in die allgemeine Seetypenlehre

3.1 Verschiedene Sauerstoffparameter (O₂-„Defizite“ nach HUTCHINSON)

HUTCHINSON (1957) u. a. stellen 4 verschiedene Sauerstoffdefizite von unterschiedlicher Aussagefähigkeit vor:

actual deficit = tatsächliches Defizit gegenüber 100%iger O₂-Sättigung bei jeweils herrschender Temperatur.

relative deficit = relatives Defizit gegenüber der Konzentration zur Zeit der Frühjahrsvollzirkulation bzw. -teilzirkulation; ein geeignetes Maß für den sommerlichen O₂-Aufbrauch in Seen, die während der Zirkulationsperiode eine vollständige Sättigung nicht erreichen.

real deficit = das wirkliche Gesamtdefizit. Es setzt sich aus dem actual deficit und dem Sauerstoff zusammen, der zur Oxidation der noch vorhandenen organischen Substanz benötigt würde.

hypolimnetic areal deficit = flächenbezogenes hypolimnisches Sauerstoffdefizit, d. i. ein aus einer Anzahl von Sauerstoffmessungen in unterschiedlicher Tiefe des Hypolimnions nach Schichtflächen gewichtetes Mittel des Sauerstoffdefizits unterhalb von 1 cm² Oberfläche des Hypolimnions.

Im Rahmen dieser Arbeit kann nur das actual deficit für 30 südbayerische Seen vorgestellt werden.

3.2 Deskription von Sauerstoffkurven nach ÅBERG & RODHE

Deskriptiv werden Sauerstoffkurven nach ÅBERG & RODHE (1942) in drei Haupttypen gegliedert: orthograd – nahezu senkrechter Verlauf bei fast 100%iger Sättigung (α -orthograd), bei geringer O₂-Abnahme im Tiefenwasser spricht man von β -orthograd, in der Regel oligotroph.

klinograd – gleichsinniger Verlauf von hohen Gehalten an der Oberfläche bis zu niedrigen O₂-Gehalten in der Tiefe, in der Regel eutroph.

heterograd – beinhaltet unterschiedliche Richtungen, z. B. ein metalimnisches O₂-Maximum (Photosynthese-Maximum) oder ein metalimnisches O₂-Minimum (tropholytisches Minimum) – je nach Lage der Kompensationsebene zwischen trophogener Zone mit autotropher Produktion und der tropholytischen Schicht ohne photoautotrophe Produktion. Eine heterograde Kurve ist in der Regel kein eigener Typ, sondern lediglich eine überprägte orthograde oder klinograde O₂-Kurve.

Erstaunlich beständig tritt der jeweilige Kurventyp bei den einzelnen Seen in den verschiedenen Jahren immer wieder auf, auch wenn die O₂-Absolutwerte beträchtlich schwanken. So zeigen die Sommermessungen in Chiemsee, Ammersee und Weißensee grundsätzlich jenes metalimnische Minimum (negativ heterograd).

In einem biogen kaum beeinflussten See verläuft die prozentuale Sauerstoffkurve mit fast 100% nahezu senkrecht nach unten, ganz unabhängig von der Temperatur. Die Kurve des absoluten Sauerstoffgehaltes (mg/l) verläuft gemäß dem Henryschen Ge-

setz nach rein physikalischer Gesetzmäßigkeit in- vers zur Temperatur. Der extrem orthograde Typ (α -orthograd), der nur selten und in bayerischen Seen gar nicht vorkommt, wird von der β -orthograden Kurve unterschieden, die bereits eine geringe O_2 -Abnahme im Tiefenwasser anzeigt. Die β -Orthograde gliedert sich in Kurven mit schlagartiger O_2 -Abnahme am Seegrund (konvex) und mit sachter O_2 -Abnahme (konkav), wobei letztere kontinuierlich in klinograde Kurven übergehen können. Eine klinograde Kurve verläuft gleichsinnig von hohen O_2 -gehalten an der Oberfläche bis zu niederen O_2 -gehalten in der Tiefe, im Extremfall bis zu völligem Sauerstoffschwund, und ist meist in % wie auch in mg/l als solche zu erkennen.

Eine heterograde Sauerstoffverteilung kommt in den meisten Fällen durch ein metalimnisches Photosynthesemaximum oder durch intensiven Abbau von organischem Material in der Thermokline zustande (Minimum). Fällt die lichtdurchflutete und photosynthetisch aktive Schicht ziemlich genau mit dem Epilimnion zusammen, so wird das mit O_2 angereicherte, teilweise sogar übersättigte Wasser mit dem Rest des Epilimnions vermischt, das überschüssige Gas an die Oberfläche gebracht und abgegeben.

Liegt die Kompensationsfläche (Übergang von trophogene in tropholytische Schicht) bereits im Metalimnion, tritt ein markantes O_2 -Maximum im Metalimnion auf (positiv heterograde Kurve). Der übersättigte Sauerstoff kann in diesem Bereich aufgrund der extrem stabilen Schichtung mit hohen Temperaturgradienten nur sehr langsam entweichen. Die Kompensationsebene liegt in einem See dann im Metalimnion, wenn die epilimnische Schicht sehr dünn ist (geringe Seefläche und schwache Windeinwirkung) und bzw. oder die Eindringtiefe der Sonnenstrahlung bis ins Metalimnion reicht (d. h. hohe Transparenz aufgrund geringer Fremdverschmutzung und/oder schwache Planktonproduktion wegen geringen Nährstoffangebots).

In sehr stabil geschichteten und unproduktiven Seen glaubt YOSHIMURA (nach HUTCHINSON 1957) positiv heterograde Kurven mit leichten Übersättigungen direkt unter dem Epilimnion vornehmlich auf Sonneneinstrahlung in situ, also rein physikalisch auf Strahlungseinwirkung zurückführen zu können. Selbst in den als oligotroph geltenden südbayerischen Seen (z. B. Königssee) jedoch überschreitet die Übersättigung im Metalimnion das durch Erwärmung rein physikalisch mögliche Maß bei weitem und muß daher vornehmlich biogen bedingt sein.

Liegt die Kompensationsebene noch im Epilimnion, gibt es in vielen Seen die markante Tendenz, daß der O_2 -Aufbrauch im Metalimnion größer ist als im oberen Hypolimnion (negativ heterograde Kurve). Das metalimnische Minimum repräsentiert eine Schicht mit einem Maximum an Bakterien, die totes Plankton abbauen, das aus dem Epilimnion „herausgefallen“ ist und durch den Eintritt in das zunehmend kältere Metalimnion mit höherer Viskosität gebremst wird. Außerdem ist die Stoffwechselintensität (O_2 -Verbrauch) in dem vergleichsweise wärmeren Metalimnion stärker als im Hypolimnion. Die Kompensationsfläche liegt dann im Epilimnion, wenn die epilimnische Schicht sehr dick ist (große Seefläche und/oder kräftige Windeinwirkung) und

bzw. oder die Eindringtiefe der Sonnenstrahlen gering ist (geringe Transparenz aufgrund hoher Fremdverschmutzung und/oder starker Planktonproduktion wegen großen Nährstoffangebotes). Für das Auftreten einer negativ heterograden Kurve ist außerdem wichtig, daß ein ausreichend mächtiges oberes Hypolimnion vorhanden ist, das mit seinem kaum angetasteten, reichlichen Sauerstoffgehalt das metalimnische O_2 -Minimum vom bodennahen Minimum trennt.

Heterograde O_2 -Kurven können also in eutrophen wie oligotrophen Seen auftreten und modifizieren lediglich den orthograden oder klinograden Grundtyp einer O_2 -Kurve. Während positiv heterograde Kurven in allen Seen vorkommen können, sind negativ heterograde Kurven auf tiefere Seen mit mächtigem Hypolimnion beschränkt.

3.3 THIENEMANNs Seentypenlehre nach dem Volumenverhältnis von Epilimnion zu Hypolimnion

Da die O_2 -zehrenden Abbauprozesse vornehmlich am Seegrund bzw. im Metalimnion stattfinden, weisen Seen mit großer Tiefe und mächtigem Hypolimnion naturgemäß auch während der Stagnationsperiode ein mehr oder minder O_2 -reiches oberes und mittleres Hypolimnion auf (z. B. Ammersee), dessen O_2 -Vorräte kaum angetastet werden – im Gegensatz zu Seen geringer Tiefe, deren Sauerstoffvorrat im geringmächtigen Hypolimnion (aber gleichmächtigen, produktiven Epilimnion wie in tiefen Seen!) bald aufgebraucht ist. Daher gliederte schon 1928 THIENEMANN die Seen gemäßigter Klimate nach dem Volumenverhältnis von Epilimnion zu Hypolimnion.

Ein See ist von Natur aus oligotroph, wenn dieses Verhältnis 1 oder unter 1 ist, und eutroph, wenn es größer 1 ist. Geringe Tiefe bedeutet demnach eine Disposition für den eutrophen Typ („morphometrisch eutroph“), was allerdings nicht zwangsläufig Eutrophie im Sinne von Nährstoffreichtum bedeuten muß, doch in Hinblick auf den geringen O_2 -Vorrat im Hypolimnion in der Praxis immer bedeutet, denn das Hypolimnion eines flachen Sees wird mit den Abbauprodukten auch eines weniger produktiven Epilimnions schlechter fertig als das mächtige Hypolimnion eines tiefen Sees mit einem sehr produktiven Epilimnion.

Die nachfolgend nach THIENEMANN (1928) – er legte obigen Schwellenwert (Volumen Epilimnion = Volumen Hypolimnion) unter Annahme üblicher, sich nach der Tiefe verjüngender Seebeckformen in 50 bis 60 m Tiefe – vorgenommene Grobklassifikation zeigt, daß die meisten südbayerischen Seen seinem Schema prinzipiell folgen, wengleich bei Berücksichtigung der trophogenen Komponenten wegen der hohen Nährstoffbefrachtung vieler Seen eine Verschiebung der Einstufung hin zum eutrophen Status erforderlich wird, z. B.

oligotroph → mesotroph (Walchensee)

oligotroph → eutroph (Ammersee)

eutroph → polytroph (Pilsensee)

Es gibt keinen bayerischen See geringer Tiefe, der nur morphometrisch eutroph, sondern nicht auch vom trophogenen Aspekt her eutroph wäre.

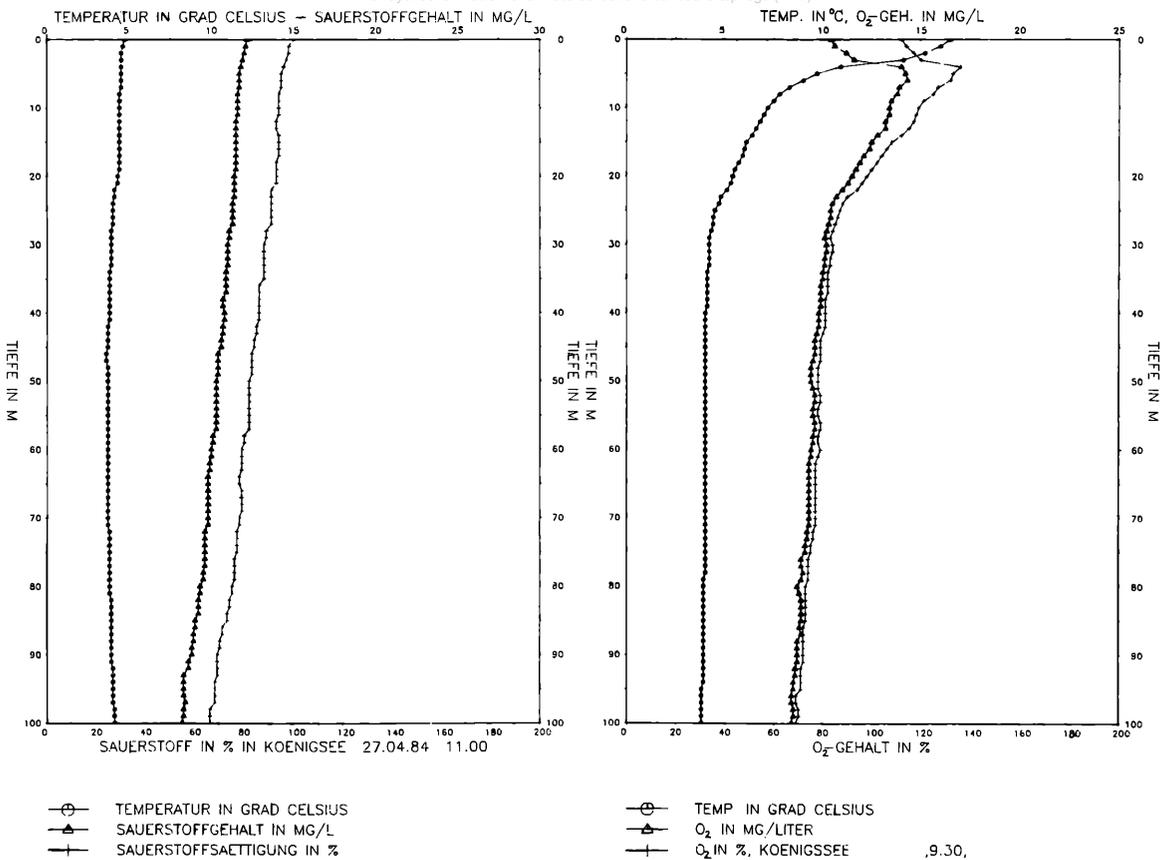


Abbildung 1

4. Auswertung der Meßergebnisse

4.1. Seen mit großer Tiefe (ca. > 60 m), von Natur oligotroph

4.1.1 noch oligotrophe Seen mit β -orthograde Sauerstoffkurve, geringer bis mittlerer Übersättigung und (selten) geringer heterograde Überprägung

Königssee (Abb. 1)

Der Königssee zeigt am 27.4.1884 einen noch vollkommen homothermen Temperaturverlauf. Unter 20 m liegt die Temperatur eher bei 4° C, darüber ist eine geringfügige Erwärmung auf 5° C erkennbar, die jedoch, aufgrund der geringen Dichteunterschiede des Wassers in diesem Temperaturbereich, die noch anhaltende Vollzirkulation nicht behindert. Der Wärmeeintrag kann daher bis in 20 m Tiefe als Temperaturerhöhung um 1° C wirksam werden. Die Frühlingsvollzirkulation ist vermutlich noch in ihrer Anfangsphase, da der Königssee erst sehr spät im Frühling eisfrei wird. An der Oberfläche ist das Wasser zu 100% mit Sauerstoff gesättigt, in 100 m Tiefe (maximale Meßtiefe des Gerätes) liegt nur eine Sättigung von rd. 65 % vor. Dieser für diese Jahreszeit geringe Sättigungsgrad ist zu einem Großteil auf die extremen morphologischen Verhältnisse zurückzuführen: die im Verhältnis zur Tiefe von 189 m bzw. zum hypolimnischen Volumen (besonders groß wegen der im See sich fortsetzenden, nahezu senkrechten Wände) geringe Oberfläche, die gute Windgeschützttheit und die früh einset-

zende und langandauernde Vereisung mit verkürzter Herbst- und Frühjahrsvollzirkulation.

Die Temperatur- und Sauerstoffmessung zur Zeit der Sommerstratifikation im August 1984 zeigt eine nahezu ideale strahlungsbedingte Temperaturkurve mit exponentiellem Verlauf, ebenfalls ein Beweis, daß bis zu diesem Zeitpunkt schichtungsabbauende Winde nicht wirksam waren. Ein winddurchmischtes Epilimnion fehlt. Das Metalimnion mit Temperaturgradienten $> 1^{\circ} \text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ („Sprungschicht“ im Sinne von E. RICHTER) beginnt nach dieser Definition bereits in 1 m Wassertiefe und reicht bis 5 m. Der Sauerstoffgehalt an der Oberfläche liegt bei 110 % und steigt in 4-5 m Tiefe auf knapp 130 % an, um dann in ca. 20 m Tiefe mit 90 % den gleichen Sättigungswert wie zur Zeit der Frühjahrsomothermie anzunehmen. Darunter fallen Frühjahrs- und Sommersauerstoffsättigung in fast identischen Beträgen auf rd. 65 % in 100 m Tiefe ab. Die Abnahme des Sauerstoffgehaltes von der photosynthetisch aktiven Schicht mit Sauerstoffübersättigung bis zu 130 % zur Oberfläche hin kann als deutliches Diffusionsgefälle angesehen werden. Die Übersättigung von 130 % stellt ein kleines metalimnisches O₂-Maximum dar (positiv heterograde Kurve) und kann in diesem letzten noch allgemein anerkannt oligotrophen See als beachtlich bezeichnet werden, zumal noch am Morgen (9.30 Uhr) gemessen wurde und durch Photosynthese im Laufe des Tages noch höhere Werte zu erwarten waren. Betrachtet man jedoch den scharfen Anstieg des Sauerstoffgehaltes in 3-4 m Tiefe, so ist offensichtlich, daß dieser mit dem größten Temperaturgradienten ($3^{\circ} \text{C} \cdot \text{m}^{-1}$) zusammenfällt. Es ist denkbar, daß hier z. T. auch physi-

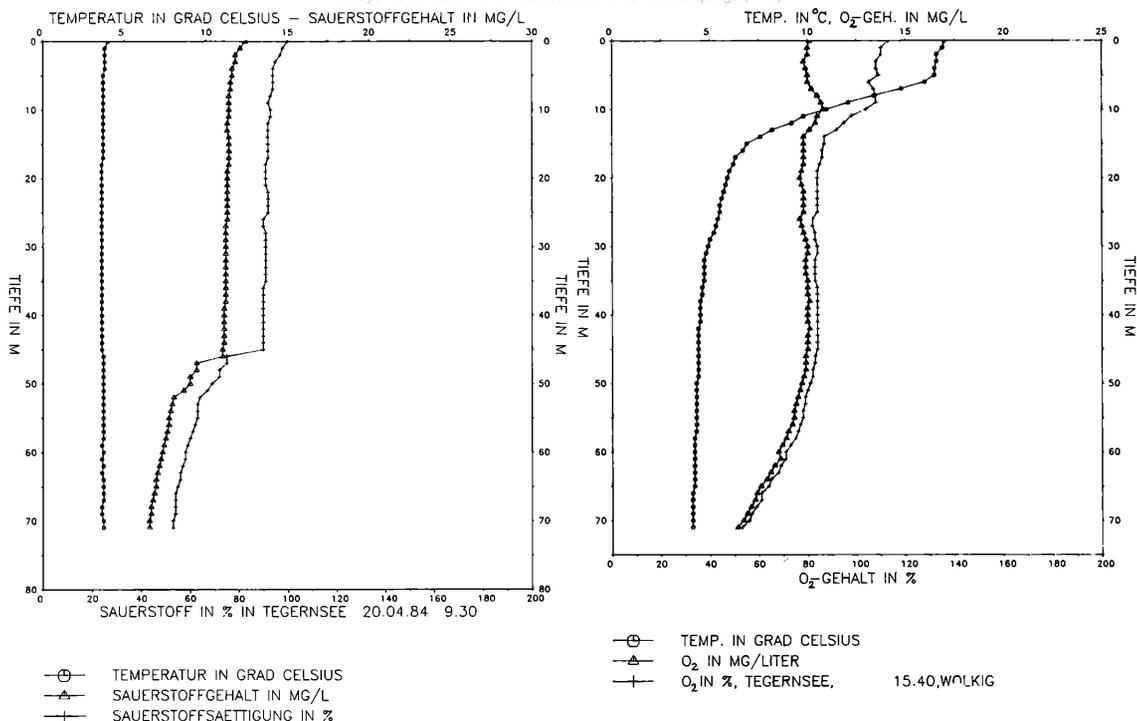


Abbildung 2

kalische Sauerstoffübersättigung durch Strahlungserwärmung vorliegen könnte.

Der Überschneidungspunkt der mg/l-Kurve mit der Sättigungskurve (100% Sättigung bei jeweiliger Temperatur, nicht eingezeichnet), d. h. der Übergang von übersättigten Schichten in Wasser mit mehr oder weniger großem Sauerstoffdefizit liegt in 19 m bei 5,5° C. Der Sauerstoffvorrat des mächtigen Hypolimnions, wie er zur Zeit der Frühjahrsvollzirkulation — allerdings mit morphologisch bedingter unzureichender Sättigung — existierte, ist nicht angetastet worden, was den tatsächlich noch oligotrophen Trophiezustand des Königssees widerspiegelt. Der Verlauf der O₂-Kurve ist demnach β -orthograd mit leicht positiv heterograder Überprägung.

Tegernsee (Abb. 2)

Das Tegernseer Tal wandelte sich in den letzten Jahrzehnten zu einer intensiv inwertgesetzten Freizeit- und Erholungslandschaft, deren Entstehen und Ausweitung zu „urbanisierten Fremdenverkehrs-siedlungen“ RUPPERT 1962 u. 1968 in seinen sozialgeographischen Studien aufgezeigt hat.

Durch die 1957-65 erstellte, damals beispielgebende Ringkanalisation konnte der zunehmenden Überdüngung des Tegernsees durch die starke Siedlungstätigkeit im Tegernseer Tal Einhalt geboten werden. Über die limnologischen Zustände des Tegernsees (und Schliersees) vor und nach der Abwasserfernhaltung hat HAMM 1971 ausführlich berichtet. So brachte die 1964 in Betrieb genommene Ringkanalisation eine rasche und anhaltende Nährstoffentlastung, die beim Phosphor etwa 95 % ausmacht. Während der See am 23.9.1964 ein kräftiges Sauerstoffminimum von 31 % in 15 m Tiefe aufwies und durch völligen O₂-Schwund im Profundal gekennzeichnet ist, zeichnen die Messungen in den Jahren

1974/75/76/78 und schließlich 1984 (siehe Abb.) ein erfreuliches Bild. Das Epilimnion reicht von 0-5 m Tiefe (rd. 17° C) und erreicht O₂-Werte um 110%. Das Metalimnion erstreckt sich von 5 m bis ca. 15 m und beinhaltet auch den Überschneidungspunkt zwischen (in der Summe) sauerstoffliefernden und sauerstoffzehrenden Prozessen. Das Hypolimnion weist O₂-Werte von 85-90 % auf. Diese entsprechen noch weitgehend den O₂-Werten der Frühjahrsvollzirkulation. Lediglich nahe dem Seegrund ist eine O₂-Zehrung bis 50 % zu beobachten. Auch am Tegernsee liegt somit eine β -orthograde O₂-Kurve mit leicht heterograder Überprägung im Metalimnion vor.

Die Frühjahrsmessung zeichnet sich durch ideale Homothermie bei 4° C im gesamten Wasserkörper aus. Die Zirkulation, d. h. das „Auftanken“ mit Sauerstoff, ist am 20. April 1984 allerdings erst bis in 45 m Tiefe erfolgt. Darunter blieb das herbstliche Defizit des Vorjahres mit rd. 50 % Sauerstoffgehalt erhalten. Daß der Tegernsee in den kommenden Frühjahrswochen noch weiteren Sauerstoff aufgetankt hat, beweist die August-Messung, in der das untere Hypolimnion mehr Sauerstoff aufweist als zum Meßzeitpunkt im April 1984.

Walchensee (Abb. 3)

Das ursprüngliche Niederschlagseinzugsgebiet des Walchensees betrug 74 km² (mittlerer Abfluß 2,3 m³ · s⁻¹). Durch die Isar-Überleitung bei Krünn 1924 (13 m³ · s⁻¹) und die Rißbachzuführung 1949 (8 m³ · s⁻¹) wurde das Einzugsgebiet auf 770 km² erweitert, so daß heute durch die Turbinen des Walchenseekraftwerkes im Mittel 23 m³ · s⁻¹ laufen. Dieser erhöhte Durchsatz von Wasser aus dichter besiedelten Gebieten (Mittenwald!) zeigt sich deutlich im Temperatur- und Sauerstoffprofil. Auf ein Epilimnion von

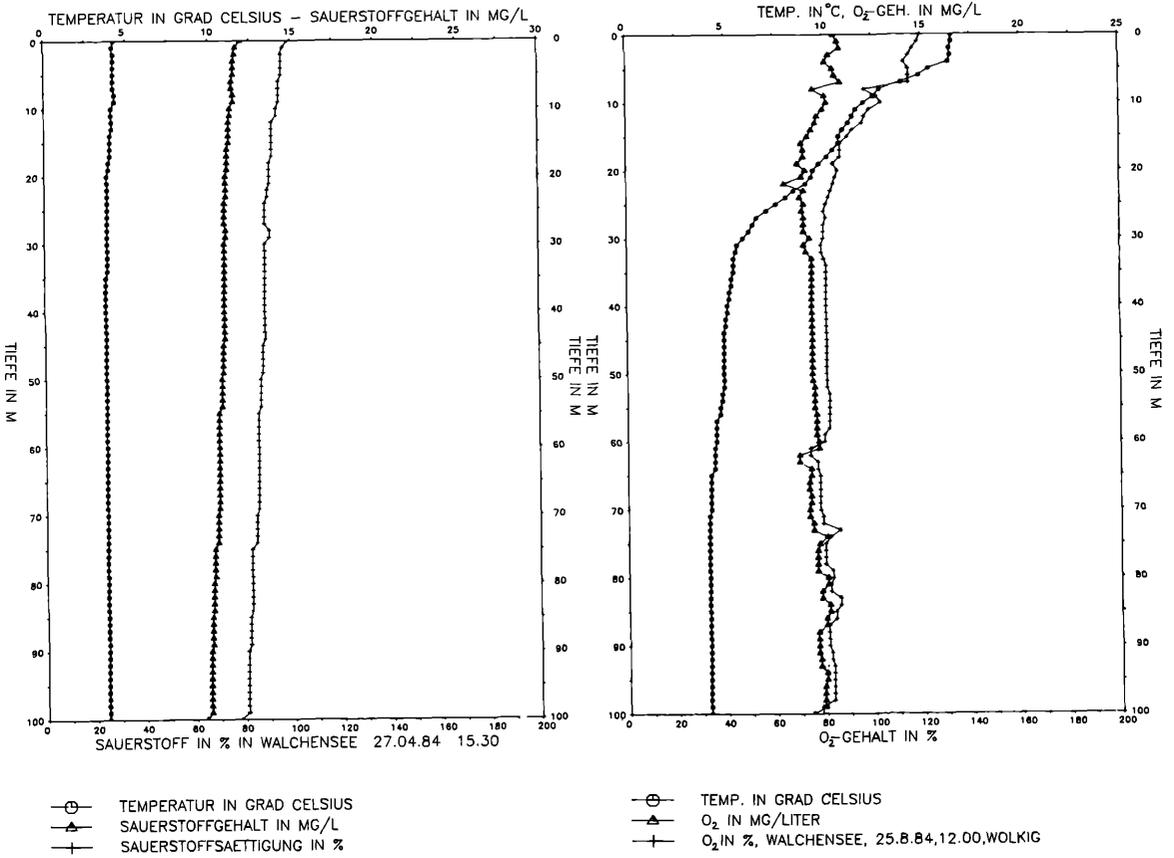


Abbildung 3

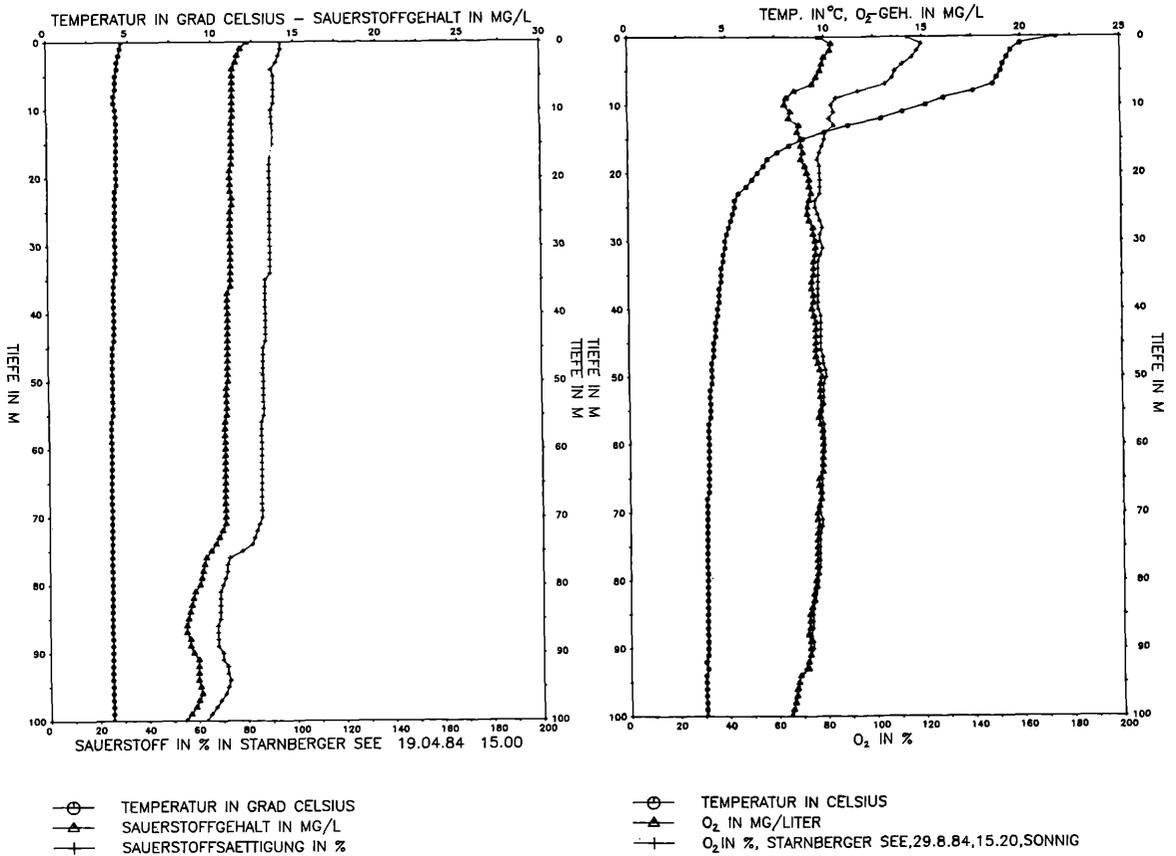


Abbildung 4

0-4 m folgt ein sehr verwaschenes Metalimnion, das bis in 30 m Tiefe reicht und bereits an die Verhältnisse im Kochelsee erinnert. Darunter allerdings scheint der kräftige Wasserdurchsatz von Isar und Reißbach nicht gelangt zu sein, da unter 30 m auch im August der orthograde Temperaturverlauf (4-5° C) des Frühjahrs erhalten bleibt. Die Sauerstoffverhältnisse sind in 0-8 m Tiefe durch leichte Übersättigung gekennzeichnet (an diesem wolkgigen Tag bis 115 %) und erreichen in 20 m Tiefe jene 80%-Sättigung, die zur Zeit der Frühjahrsvollzirkulation aufgenommen wurden. Im oberen Hypolimnion ist demnach keine Sauerstoffzehrung zu erkennen. Über das untere Hypolimnion (der Walchensee reicht bis in 192 m Tiefe) kann wegen unzureichender Kabellänge des Gerätes – ähnlich dem Königssee – keine Aussage gemacht werden. Auffallend ist jedoch der unruhige O₂-Kurvenverlauf in 60-100 m Tiefe, der indirekt eine Folge der starken Durchströmung sein könnte. Der Sauerstoffgehalt von 80% in 100 m Tiefe ist noch erstaunlich hoch (β-orthograde O₂-Kurve) und verschleiern den rasch ablaufenden Übergang zu mesotrophen Verhältnissen durch das abwasserbelastete Isarwasser.

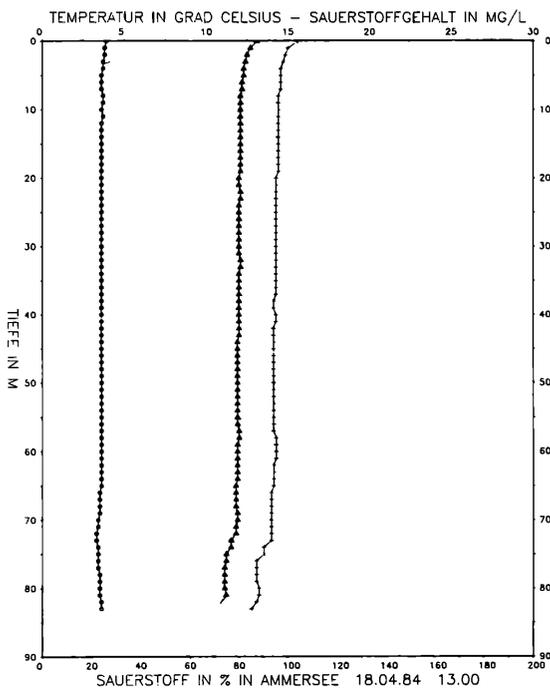
fangreich bebauten Uferbereich konnten die Sauerstoffverhältnisse im Tiefenbereich weitgehend verbessert werden. Wie die beiden anderen tiefen Seen (Walchensee, Königssee) hat auch der Starnberger See zum Meßzeitpunkt im April im Tiefenwasser von 75 bis 100 m Wassertiefe trotz vorherrschender Homothermie noch nicht voll „aufgetankt“: liegt über 75 m eine Sättigung von 90 % vor, erreicht diese darunter nur rd. 65 %. Im Verlauf der noch anhaltenden Vollzirkulation wird allerdings noch Sauerstoff angereichert, so daß die Augustmessung eine O₂-Sättigung um 75 % aufweist, was auch beweist, daß die hypolimnische Zehrung nicht bedeutend sein kann. Anhand der β-orthograden Sauerstoffkurve würde man also den Starnberger See als oligotroph einstufen, der tatsächliche Trophiegrad ist mesotroph. Die O₂-Übersättigung erreicht in 1 m Tiefe 120 % und zeigt zur Oberfläche hin ein Diffusionsgefälle. Die Kompensationsebene liegt in 7 m Tiefe. Die Temperaturkurve im August zeigt eine tagesbedingte Erwärmung von 0-1 m, dann ein nahezu homothermes Epilimnion von 1-7 m, ein Metalimnion („Sprungschicht“) von 7-ca. 20 m Tiefe und ein thermisch ungestörtes Hypolimnion bis 100 m Tiefe (max. Tiefe 127 m).

Starnberger See (Würmsee) (Abb. 4)

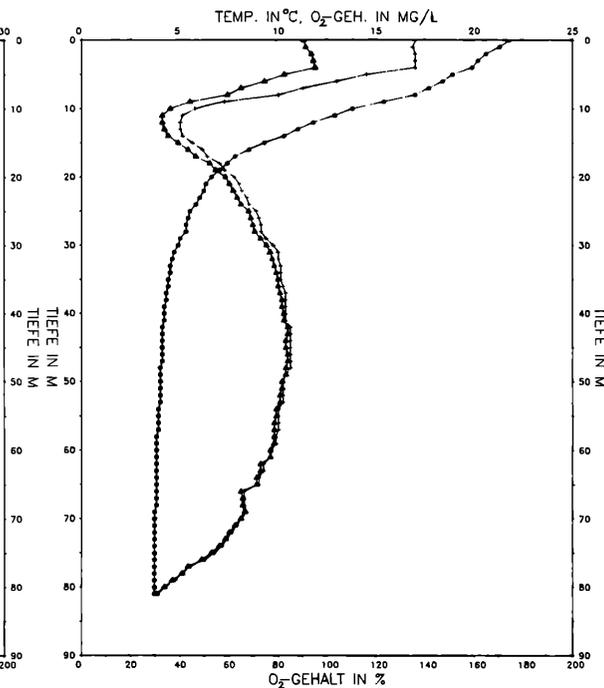
Wegen der geringen Zuflüsse aus dem kleinen Niederschlagseinzugsgebiet (aber nennenswerter Grundwasserspeisung von den Osterseen her) wird der Wasserkörper dieses volumenreichsten Sees in Bayern (3100 · 10⁹ m³) nur alle 21 Jahre theoretisch einmal ausgetauscht. Durch die Ende 1976 fertiggestellte, 40 km lange Ringkanalisation im recht um-

4.1.2 Seen mit O₂-Kurve im Übergang von β-orthograd zu klinograd, mittlerer Übersättigung und kräftiger, negativ heterograder Überprägung, in der Regel mesotroph bis schwach eutroph.

Ammersee (Abb. 5)



○— TEMPERATUR IN GRAD CELSIUS
 ▲— SAUERSTOFFGEHALT IN MG/L
 +— SAUERSTOFFSAETTIGUNG IN %



○— TEMP. IN GRAD CELSIUS
 ▲— O₂ GEHALT IN MG/L
 +— O₂ IN %, AMMERSEE, 23.8.84, 14.00, HEITER

Abbildung 5

Der Ammersee (keltisch „Wasser“) hat mit rund 1000 km² ein besonders großes Niederschlagsgebietsgebiet, und die Ammer führt dem See beträchtliche Nährstoffmengen zu.

Dennoch kann der Ammersee wegen der guten Durchströmung zu den mesotrophen Seen gerechnet werden, da sich der Wasserkörper innerhalb von 2,5 Jahren theoretisch einmal erneuert. Im Gegensatz zum tieferen und wenig durchströmten Würmsee hat der Ammersee zum Frühjahrszeitpunkt sich nahezu vollständig mit Sauerstoff gesättigt (über 95 %). Typisch für diese Seengruppe ist der charakteristische Verlauf der sommerlichen Sauerstoffkurve: Bis 4 m Tiefe herrscht eine Übersättigung bis 145 %, die sich aufgrund der Temperaturzunahme zur Oberfläche hin mit einem Diffusionsgradienten zur Oberfläche manifestiert. Im Bereich des Metalimnions liegt ein ausgeprägtes Sauerstoffminimum vor mit Minimalkonzentrationen um knapp 40 %. Dagegen ist der Sauerstoffvorrat des Hypolimnions mit bis zu 85 % durch sommerliche O₂-Zehrvorgänge kaum angetastet. Erst ab 70 m wird die bodennahe O₂-Zehrung spürbar, der O₂-Gehalt geht von 70 % in 70 m Tiefe auf 30 % in 80 m zurück. Im algen- und schwebstoffreichen und daher wenig lichtdurchlässigen Ammerseewasser liegt die Kompensationsebene zwischen trophogener Zone mit überwiegender photoautotropher Produktion und der tropholytischen Zone (Überwiegen der organische Substanz abbauenden und damit sauerstoffzehrenden Vorgänge) bereits in 7 m Tiefe (Königssee 19 m!). Durch die zunehmende Dichte im Metalimnion werden absinkende Organismen hier länger aufgehalten und zu einem beträchtlichen Teil bereits abgebaut. Die gegenüber dem Hypolimnion vergleichsweise noch hohe Temperatur wirkt dabei abbaubeschleunigend. Hohe Übersättigungen sowie die beträchtliche Sauerstoffzehrung im Metalimnion und unteren Hypolimnion sind Ausdruck des großen Stoffumsatzes im Ammersee: Gesamttrophiegrad fast eutroph.

Chiemsee (Abb. 6)

Am Chiemsee, dem mit 80 km² flächengrößten bayerischen See (und nach dem internationalen Bodensee das größte stehende Gewässer der BR Deutschland), ist eine wirksame Abwasserfernhaltung erst in Planung. Mit 73,4 m maximaler Tiefe und ausgedehnten Flächen mit geringer Wassertiefe rückt der Chiemsee bereits nahe an die Gruppe von Seen heran, die nach THIENEMANN (1928) in Ermangelung eines ausreichend mächtigen Hypolimnions rascher altern und eutrophieren. Im nur andeutungsweise vorhandenen Epilimnion ist – mit leichtem Diffusionsgefälle zur Oberfläche hin – eine Übersättigung bis 120 % festzustellen. Ein metalimnische Minimum geht bis auf eine Minimalsättigung von 55 % zurück, um darunter wieder auf rund 70 % anzusteigen. Die Kompensationsebene liegt mit 8 m Tiefe ähnlich hoch wie im Ammersee. Deutlich ist zu erkennen, daß zum Frühjahrsmeßzeitpunkt die Sauerstoffanreicherung unter 40 m Tiefe noch nicht beendet ist. Eine wie jedes Jahr bereits früh ausgebildete warme Oberflächenschicht läßt befürchten, daß bei anhaltend schönem Wetter die Frühjahrsvollzirkulation bald beendet und eine weitere Anreicherung des Tiefenwassers nicht mehr möglich sein wird. Die Temperatur des homothermen Wasserkörpers im Frühjahr liegt mit fast 5° C um 1 Grad höher als in anderen Seen, wohl eine Folge des kräftigen Wasserzustroms durch die Tiroler Ache.

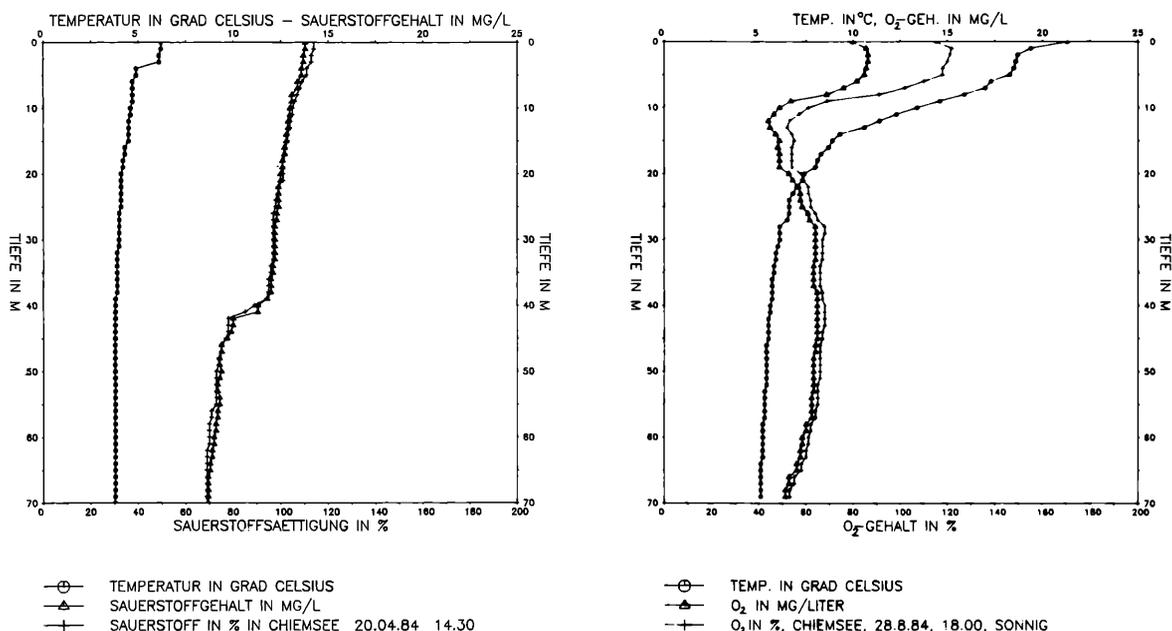


Abbildung 6

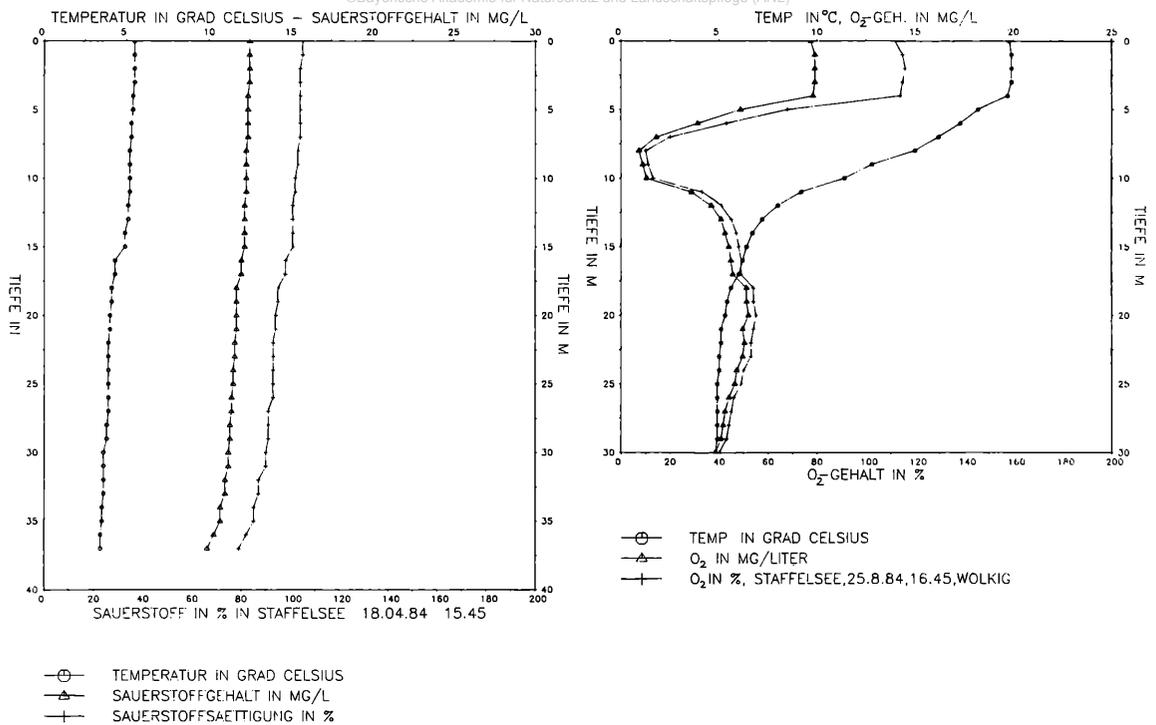


Abbildung 7

4.2 Seen geringer Tiefe (ca. < 60 m) mit natürlicher Tendenz zur Eutrophierung

4.2.1 Seen mit klinograde O₂-Kurve und negativ heterograde Überprägung, in der Regel mesotroph bis stark eutroph

Staffelsee (Abb. 7)

Der Staffelsee neigt wegen seiner geringen Tiefe – nur im Nordbecken werden 35 m erreicht – und der vielen Buchten von Natur aus zur Eutrophierung. Das Epilimnion mit 20, C reicht bis 4 m Tiefe, ebenso die Zone der Übersättigung (rd. 120 %) mit leichtem Diffusionsgefälle. Daran schließt sich ein meta-

limnisches Sauerstoffminimum an, das in diesem eutrophen See auf O₂-Minimalkonzentrationen von 10 % zurückgeht. Der hypolimnische Sauerstoffgehalt des Frühjahrs von 80-90 % ist im August bis auf 40-45 % aufgebraucht – bei diesem nur maximal 38 m tiefen See eine Folge des gegenüber tiefen Seen ungünstigeren Verhältnisses von trophogener zu tropholytischer Schicht („morphometrisch eutroph“).

Weissensee (Abb. 8)

Seine stark klinograde O₂-Kurve ist Ausdruck eines großen Stoffumsatzes mit massiver Sauerstoffzehrung ab 10 m (eutroph). Ein metalimnisches Sauerstoffdefizit von 14 % ist noch zu erkennen, geht aber

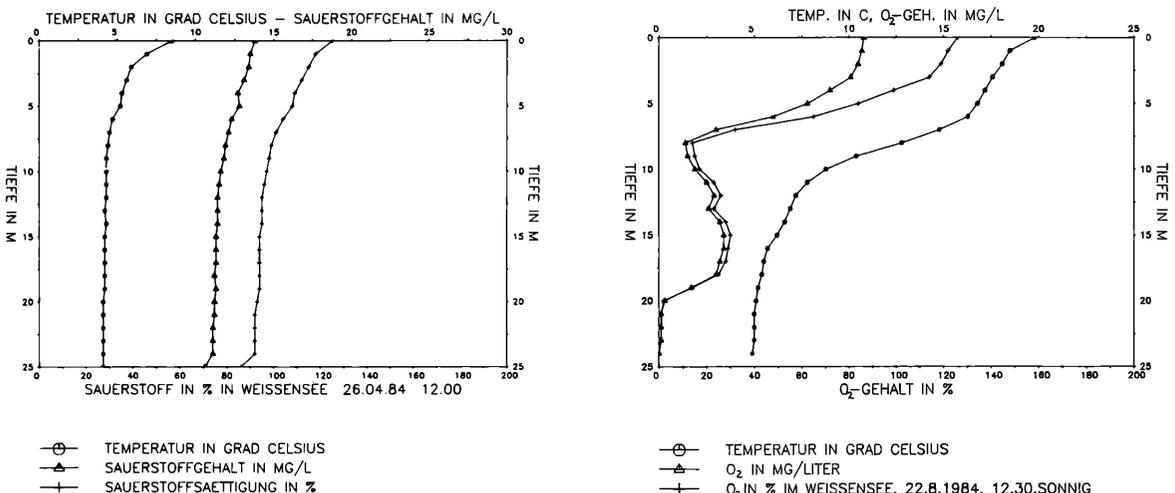


Abbildung 8

wegen des geringmächtigen Hypolimnions von 30 % rasch in das profundale O₂-Minimum über (0 %). Auf dem kleinen windgeschützten See treten zum Zeitpunkt der Frühjahrsmessung bereits erste oberflächennahe Erwärmungen auf. Die vorausgehende Erwärmung konnte – trotz Homothermie – in die Tiefe verfrachtet werden, weshalb die homotherme Temperatur bei fast 5° C liegt.

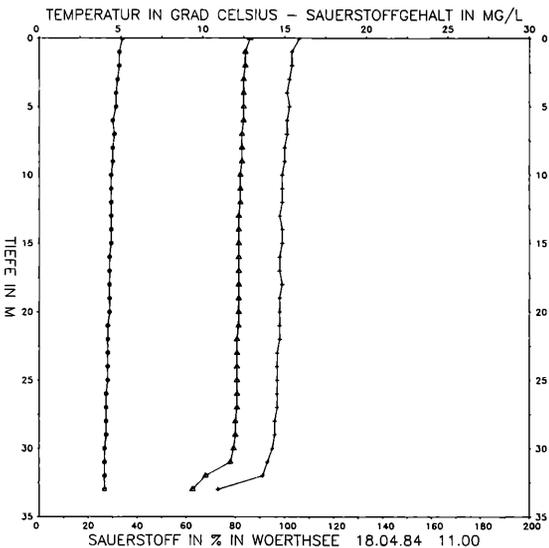
Schliersee (Abb. 10)

4.2.2 Seen mit klinograde O₂-Kurve und meist positiv heterograde Überprägung, in der Regel bereits eutroph

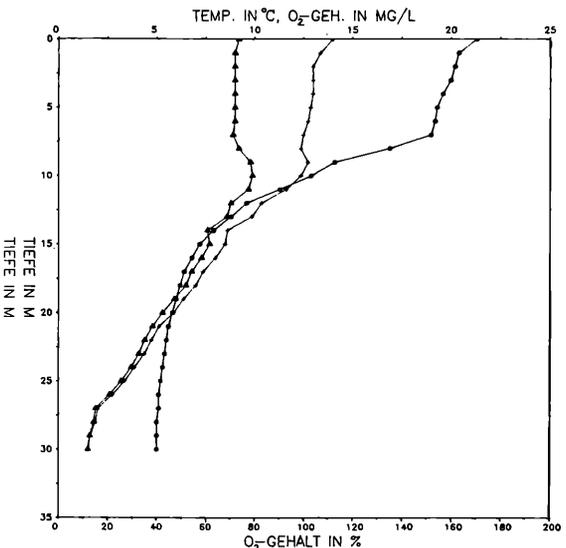
Wörthsee (Abb. 9)

Das Epilimnion reicht mit 20° bis in 7 m Tiefe, sein Sauerstoffgehalt liegt bei 110 %. Es geht über ein ungestörtes Metalimnion in das geringmächtige Hypolimnion über. Die Sauerstoffkurve nimmt nach einer geringen positiven Ausbuchtung klinograd bis auf 10 % ab. Wegen seines kleinen Einzugsgebietes entspricht die Nährstoffbelastung vergleichsweise der des Starnberger Sees, doch der O₂-Vorrat im (geringmächtigen Hypolimnion) wird zwangsweise in diesem See geringer Tiefe wegen der ungünstigen Volumenrelation von trophogener zu tropholytischer Schicht weitaus stärker aufgebraucht: Trophiezustand noch mesotroph, morphometrisch jedoch eutroph, was auch in der O₂-Kurve zum Ausdruck kommt. Die kräftige Sauerstoffzehrung erfolgte auch sicher im Sommer 1984, da die Frühjahrsmessung eine vorbildliche Sauerstoffanreicherung bis knapp 100 % offenbart.

Nach Errichtung der Abwasserfernhaltung durch Ringkanalisation 1964 verringerte sich der Trophiegrad in diesem stark eutrophierten See zunächst beträchtlich, doch ab 1967 verschlechterten sich die hypolimnischen O₂-Verhältnisse, bis die alte Situation mit völlig O₂-leerem Hypolimnion und H₂S Bildung wieder erreicht war. Die windgeschützte Lage des Schliersees, seine lange Eisbedeckung und geringe Durchströmung (im Gegensatz zum ebenfalls ringkanalisierten, tieferen Tegernsee) verhindern in manchen Jahren eine vollständige O₂-Sättigung während der Vollzirkulation, weshalb das O₂-Defizit am Ende der Sommerstagnation allein keinen eindeutigen Rückschluß auf die Intensität des Stoffwechsels zuläßt. Am 20. April 1984 hat der Schliersee bis 35 m Tiefe sein Wasser bis 90 % angereichert, nur in 35-41 m Tiefe ist die Sauerstoffanreicherung noch unvollständig. Die sommerliche O₂-Kurve der Stratifikationsperiode ist durch eine Übersättigung von 130 % im Epilimnion gekennzeichnet, ferner durch eine Übersättigung von knapp über 200 % im Bereich der nicht sonderlich scharf ausgeprägten Sprungschicht (positiv heterograd), einem Rückgang auf 50 % im oberen Hypolimnion und einer O₂-Zehrung auf 0 im bodennahen Bereich ab 35 m Tiefe. Die extreme Übersättigung und das hohe Defizit in der Tiefe unterstreichen den auch nach der Abwasserfernhaltung noch hohen Eutrophierungsgrad des Schliersees, den HAMM (1971) mit interner Düngung aus den Seesedimenten erklärt. Das sommerliche bodennahe O₂-Defizit kann jedoch auch eine Folge mangelnder vollständiger Sättigung zur Frühjahrszirkulation sein, da die windgeschützte Lage des Schliersees, seine lange Eisbedeckung und geringe Durchströmung (im Gegensatz zum ebenfalls ringkanalisierten, tieferen Tegernsee) in manchen Jahren eine vollständige O₂-Sättigung während der Vollzirkulation (= Meromixis) verhindern. Dies könnte auch 1984 der Fall gewesen sein, wie die Frühjahrsmessung zeigt.



○— TEMPERATUR IN GRAD CELSIUS
 ▲— SAUERSTOFFGEHALT IN MG/L
 +— SAUERSTOFFSAETTIGUNG IN %



○— TEMP. IN GRAD CELSIUS
 ▲— O₂ IN MG/LITER
 +— O₂ IN %, WOERTHSEE, 11.15

Abbildung 9

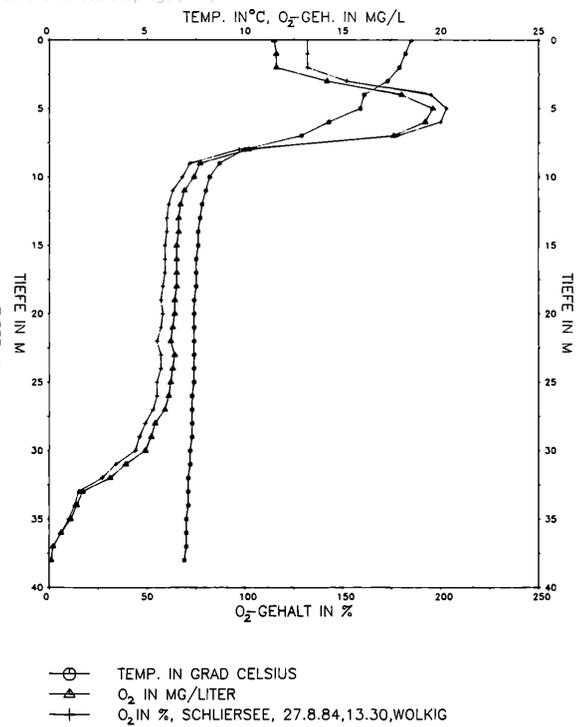
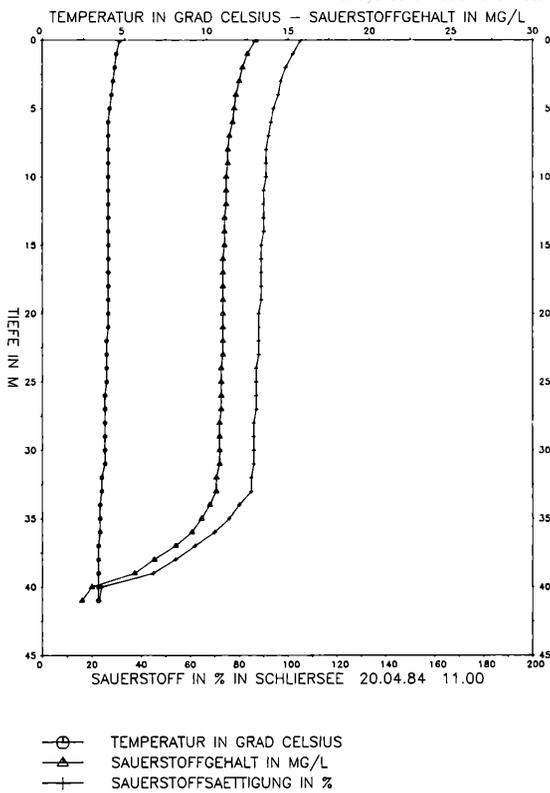


Abbildung 10

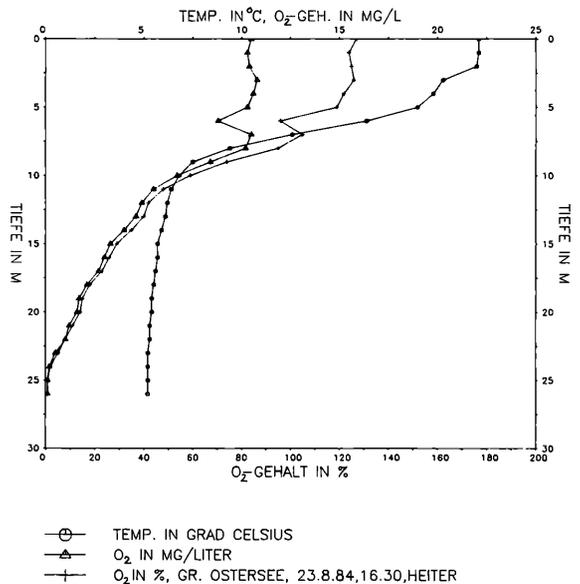
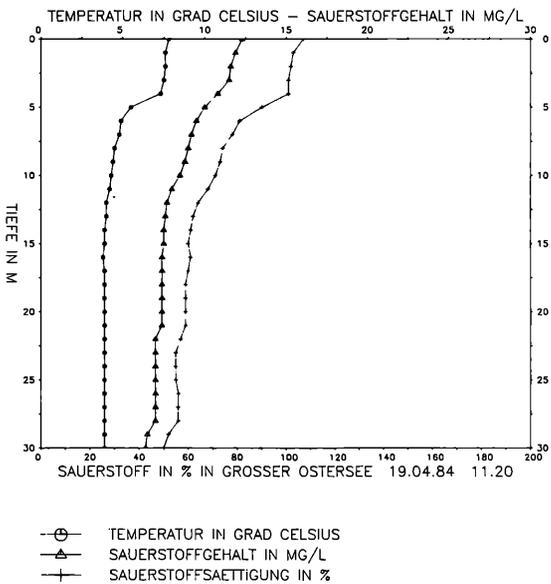


Abbildung 11

Großer Ostersee (Abb. 11)

Die Osterseen südlich des Würmsee (Starnberger Sees) sind aus einer Eiszerfallslandschaft heraus entstanden und besitzen ein unruhiges Relief mit zahlreichen Kesseln. Die Frühjahrsmessung fällt bereits in die Zeit des Aufbaus einer ersten Sprungschicht. Die O₂-Werte liegen in diesem ersten Epilimnion bei knapp über 100 %, im Hypolimnion jedoch wird deutlich, daß der See mit rd. 50 % O₂ sich nur unzureichend mit Sauerstoff angereichert hat. Zwei Ursachen hierfür sind denkbar: Bei 29 m maximaler Tiefe weist der Ostersee nur eine kleine Ober-

fläche auf, d. h. die durchmischende Kraft des Windes bleibt gering und kann deshalb keine vollständige Anreicherung mit Sauerstoff erzielen. Da die Wasserzufuhr zu einem großen Teil unterirdisch erfolgt, könnte auch der Fall vorliegen, daß dieses Wasser nicht voll mit Sauerstoff angereichert ist und im Frühjahr durch unzureichende Vollzirkulation nicht voll O₂-gesättigt wird.

Die sommerliche Messung zeigt deutlich die besonders scharf ausgeprägte, vom Wind nur wenig gestörte Sprungschicht (> 10° C von 5-8 m Tiefe!). Einer O₂-Übersättigung von 120 % an der Oberfläche folgt – klinograd – eine Abnahme bis auf 0 % in 25 m Tiefe. Während bis 1975 an schönen Wochenen-

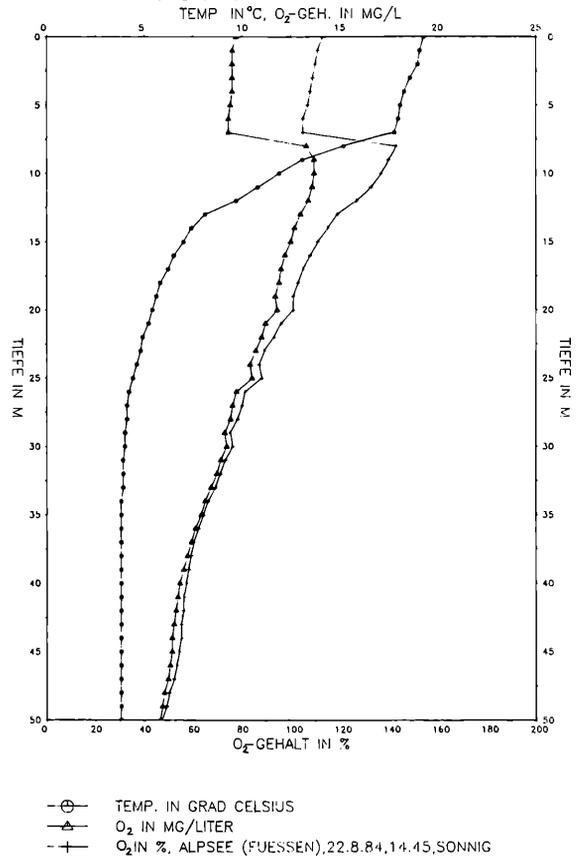
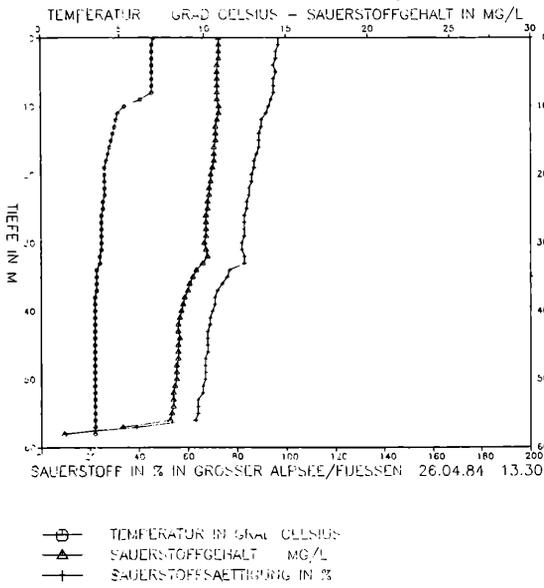


Abbildung 12

den bis zu 10.000 Erholungssuchende die einzigartige Naturlandschaft der Osterseen bevölkerten (→ Fohnsee), haben strenge Schutzbestimmungen seither zu einer wesentlich verminderten Belastung geführt.

Alpsee (Füssen) (Abb. 12)

Auch der Alpsee bei Füssen weist zum Zeitpunkt der Frühjahrsmessung den Aufbau einer Sprungschicht auf. Die Sauerstoffanreicherung im Frühjahr erreicht Konzentrationen zwischen 90 % und etwas über 60 % (unten). Die sommerliche Messung weist ein gut durchmisches Epilimnion, eine kaum gestörte Sprungschicht bis 13 m und ein thermisch unbeeinflusstes Hypolimnion aus. Die Sauerstoffkurve zeigt eine leichte Übersättigung von 110 % im Epilimnion, eine kräftige – positiv heterograde – Zunahme im Metalimnion auf über 140 %, der zur Tiefe hin eine nahezu kontinuierliche Abnahme auf knapp unter 50 % folgt. Bemerkenswert sind drei kleine Unregelmäßigkeiten in 20, 25 und 30 m Wassertiefe, die im Frühjahr in 30 m Tiefe vereinzelt auch auftritt und möglicherweise auf Quellen zurückgeführt werden könnte.

Eibsee (Abb. 13)

Der Eibsee bei Grainau, Deutschlands größter Bergsturzsee (973,28 m ü. NN) am Fuße der Zugspitze, besitzt ein unruhiges Relief und als oberirdisch geschlossener Endsee keinen oberirdischen Abfluß. Durch langjährige Einleitung von Abwäs-

sern aus dem Eibseehotel wurde der Eutrophierungsprozeß gefördert. Trotz Frühjahrsvollzirkulation ist zum Zeitpunkt der Messung (26.4.1984) die O₂-Anreicherung nur unvollständig: rd. 80 % im oberen, 50 % im unteren Teil. Da der Eibsee aufgrund seiner Höhenlage (973 m ü. NN) erst spät eisfrei wird, ist mit einer weiteren O₂-Anreicherung in der Tiefe zu rechnen. Dies zeigt auch das Sommerprofil, das im Hypolimnion mit rd. 60 % immer noch höhere Sättigungswerte aufweist als das Frühjahrsprofil. Die Sommerstratifikation am 29.8.1984 zeichnet sich durch ein gut durchmisches Epilimnion bis 7 m, eine scharfe, ungestörte Sprungschicht und ein 10 m mächtiges Hypolimnion (20-30 m) aus. Da nur kaltes Tiefenwasser abziehen kann, während kein warmes Oberflächenwasser entweichen kann, ist der Eibsee trotz seiner Höhenlage relativ warm. Das Sauerstoffprofil ist klinograd mit positiv heterograde Überprägung im Bereich des Metalimnions und Sättigungswerten von 40-30 % am Seegrund, was eine Einstufung des Sees als mesotroph bis schwach eutroph rechtfertigen würde. Vom Nährstoffhaushalt her müßte der Eibsee mit O₂-Konzentrationen von 8 µg/l eher als oligotroph bezeichnet werden.

4.2.3. Seen mit unvollständiger Zirkulation (Meromixis)

Alatsee (Abb. 14)

Der kleine windgeschützte Alatsee ohne oberirdischen Zufluß ist der einzige seit Jahrhunderten meromiktische (d. h. nur teilmischende) See Bayerns. Nur oberhalb des Monimolimnions verhält er sich

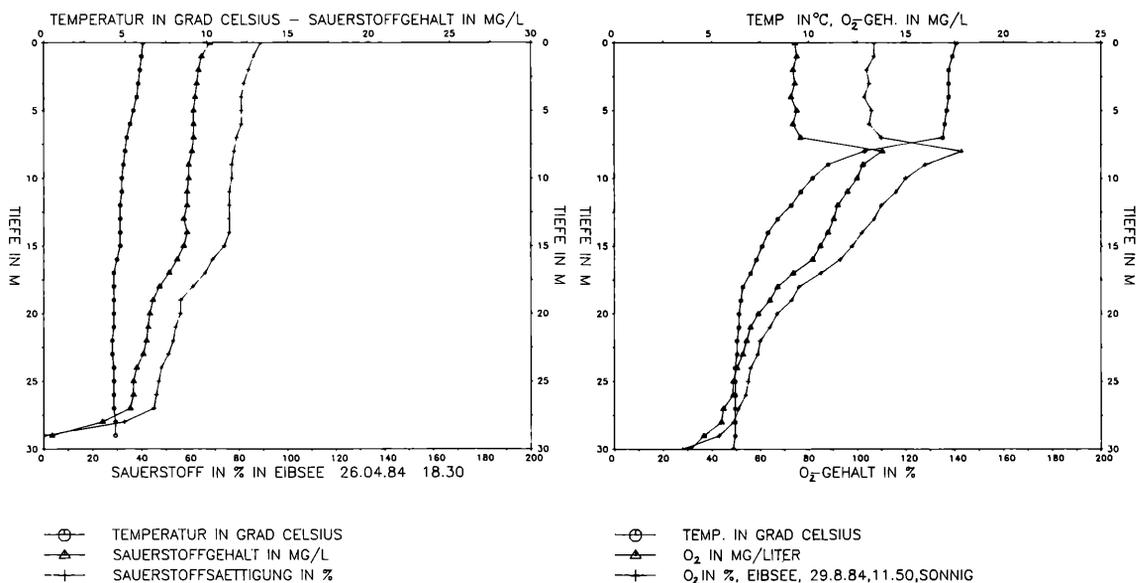


Abbildung 13

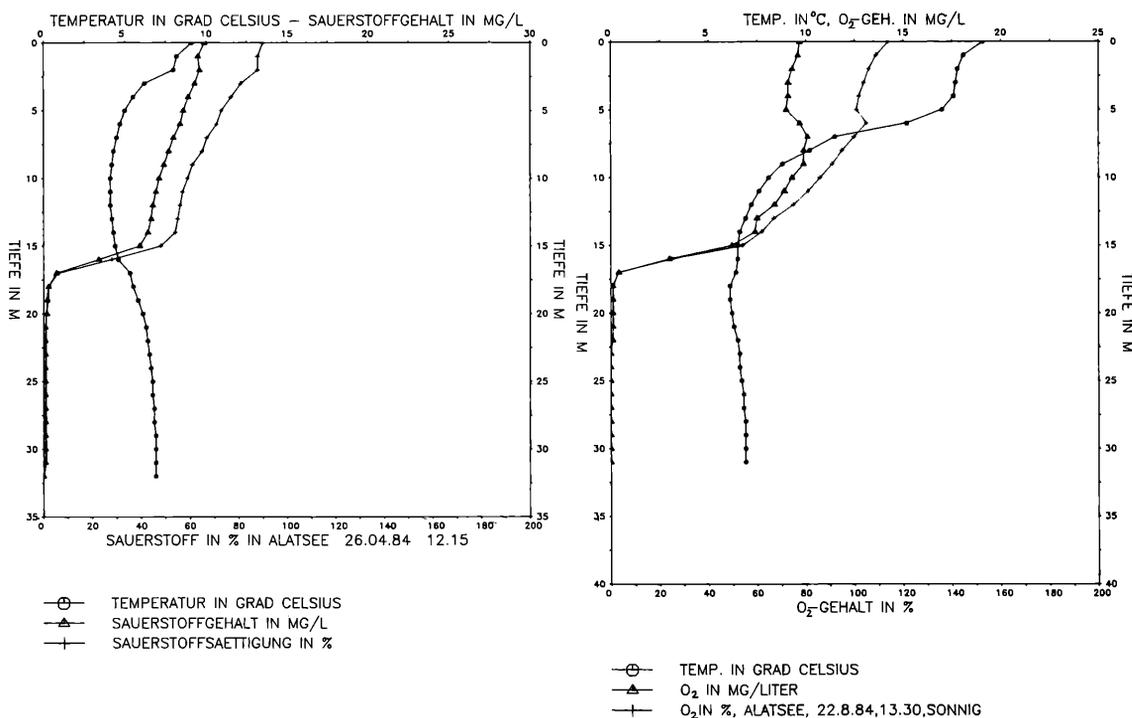


Abbildung 14

wie ein dimiktischer See. Auch im Frühjahr reicht die durchmischende Zone nur bis 15 m Tiefe, darunter herrscht Sauerstofffreiheit und Schwefelwasserstoffüberschuß. Die Temperatur des Monimolimnions nimmt von 15 m mit 4° C auf 7,5° C in 32 m (ca. Jahresdurchschnittstemperatur) zu. Im August gliedert sich der Wasserkörper in ein ca. 5 m mächtiges Epilimnion mit etwa 100 % Sauerstoffgehalt, gefolgt von einem 10 m mächtigen Metalimnion, darunter das nicht mischende, sauerstofffreie Hypolimnion (Monimolimnion), dessen Temperatur der des Frühjahrs entspricht. Der hohe H₂S-Gehalt (max. 70 bis 117 mg/l in etwa 25 m Tiefe, nach FÖBRICH et al.) ist der zweithöchste bisher bekannte in Mitteleuropa nach dem Himmelsdorfer See bei Lü-

beck. Der Schwefelnachschub erfolgt aus dem hohen Sulfatgehalt des Seewassers (40 mg/l), im Monimolimnion rechnerisch sogar 1020 mg/l in 31 m Tiefe.

4.2.4. Seen mit extrem klinograde O₂-Kurve und O₂-Schwund bereits in geringer Tiefe, max. Tiefe meist < 30 m, in der Regel eutroph bis polytroph

Zu diesen morphometrisch eutrophen Seen, die aufgrund ihrer geringen Tiefe nahezu kein Hypolimnion ausbilden, gehören Pilsensee, Riegsee, Fohnsee (aus der Gruppe der Osterseen), Alpsee (Immenstadt), Freiburger See, Hopfensee, Bannwaldsee, Simssee, Hartsee, Seoner See (Klostersee),

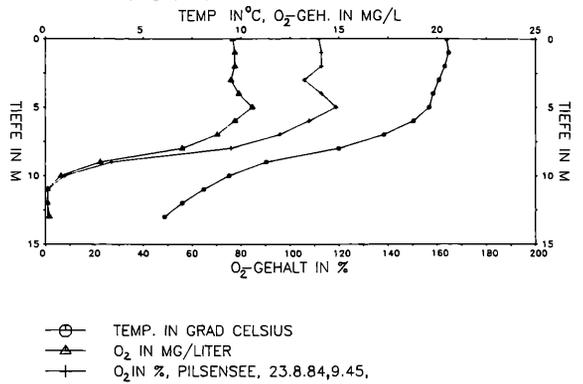
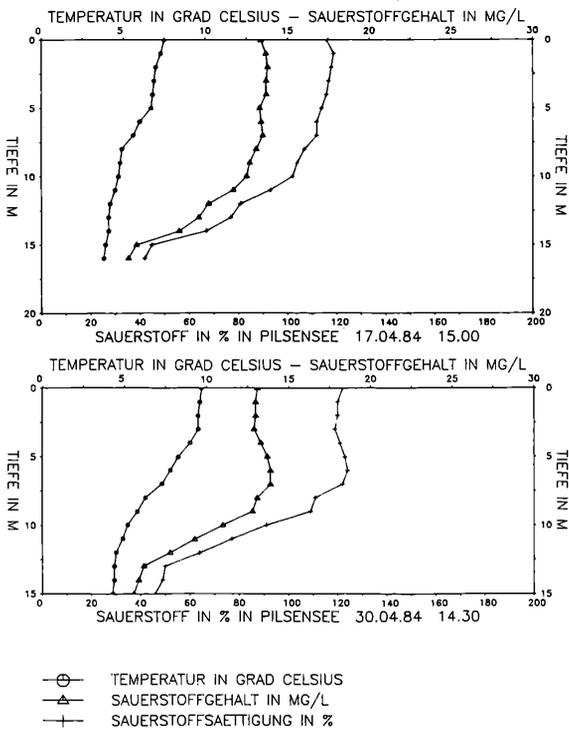


Abbildung 15

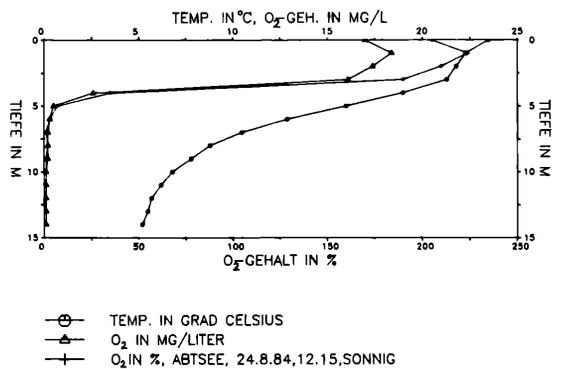
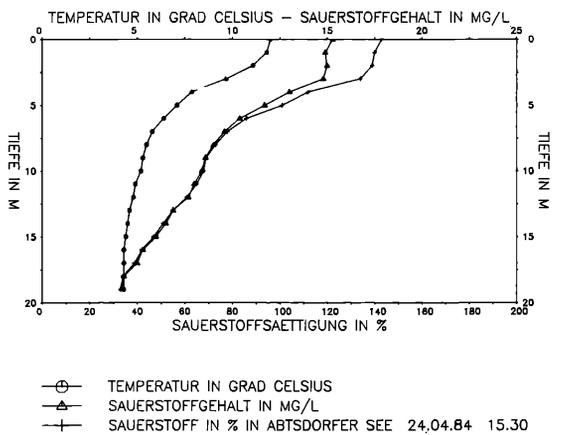


Abbildung 16

Wager und Tachinger See sowie Weßlinger See. Ihr Wasserumsatz ist in der Regel gering, beim Riegsee fehlt sogar ein oberirdischer Abfluß (Blindsee).

Pilsensee (Abb. 15)

Der polytrophe Pilsensee ist im Hochsommer unterhalb 9 m praktisch sauerstofffrei. Neben der üblichen Nährstoffzufuhr aus Siedlungen und landwirtschaftlichem Umland gilt ein Campingplatz mit über 900 Wohnwagenstellplätzen als „Hauptverursacher“. Eine Besserung der Situation wird seit Fertigstellung der Ammersee-Ringkanalisation 1975 erwartet. Die Frühjahrsmessung am 17.4.1985 (links oben) zeigt bereits die Ausbildung eines leichten Epilimnions von 0-5 m Tiefe, in dem auch eine O₂-Sättigung bis 115 % auftritt. Von 10-15 m Tiefe ist trotz vorangegangener Vollzirkulation bereits ein

O₂-Defizit festzustellen. Nahe dem Grund sind nur noch 40 % O₂ vorhanden. Eine weitere Messung erfolgte am Ende der gesamten Frühjahrsmeßkampagne am 30.4.1984. Die Oberflächenerwärmung ist fortgeschritten, verbunden mit einer stärkeren Übersättigung (etwas über 120 %), das O₂-Defizit in der Tiefe ist unverändert. Diese zweite Messung gibt einen allgemeinen Eindruck, wie stark die einzelnen Messungen, die sich demnach über einen Zeitraum von 13 Tagen verteilen, „driften“, d. h. von einer (technisch nicht realisierbaren) simultanen Messung unterscheiden.

Die sommerliche Messung zeigt deutlich eine extrem klinograde Sauerstoffkurve mit anaeroben Verhältnissen ab 10 m Tiefe – mit einer leichten positiv heterograden Überprägung. Dem Rückgang der Polytriephie im allgemeinen oder dem für Seen günstigen Witterungsverlauf 1984 ist es zu verdanken, daß anaerobe Zustände nicht bereits ab 5 m Tiefe (MICHLER 1975), sondern erst ab 10 m Tiefe auftreten.

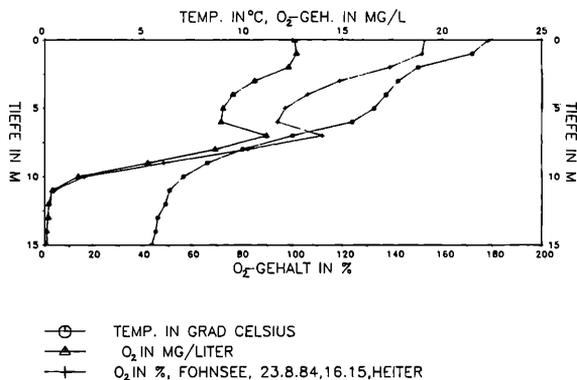
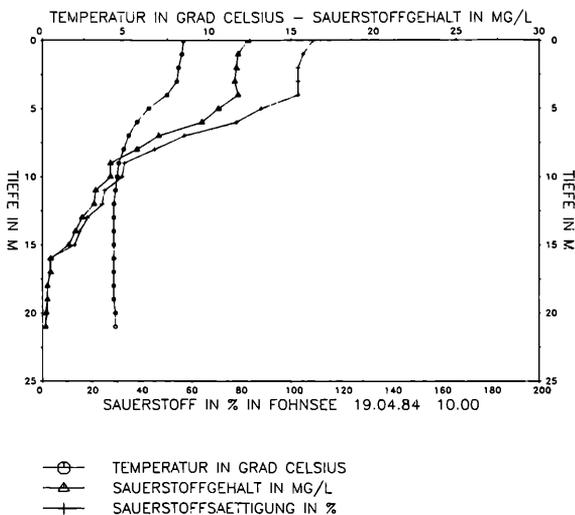


Abbildung 17

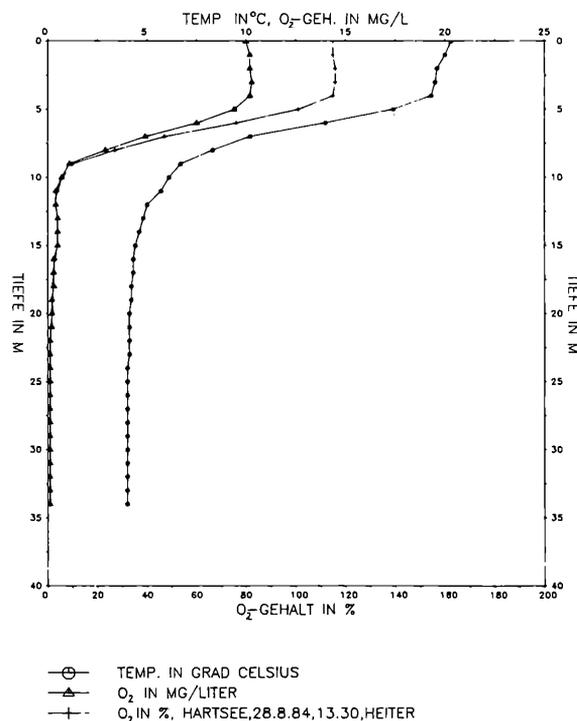
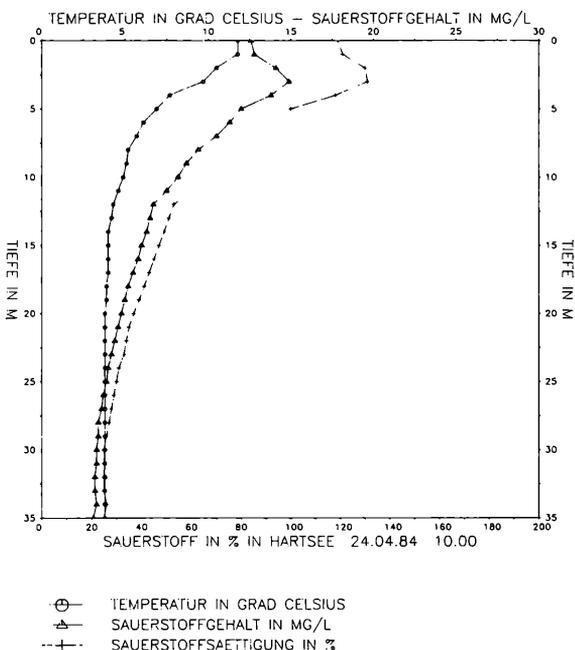


Abbildung 18

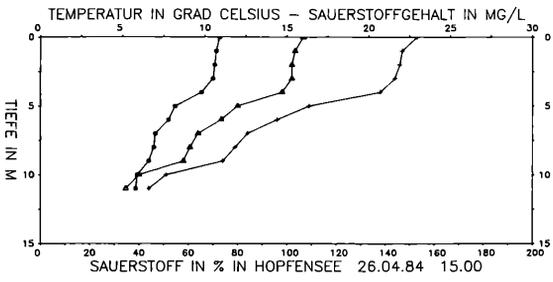
Abtsee (Abb. 16), Fohnsee (Abb. 17), Hartsee (Abb. 18), Hopfensee (Abb. 19) und Wesslinger See (Abb. 20)

Charakteristisch für diese Seen ist das beträchtliche O₂-Defizit bereits kurz nach der Frühjahrsvollzirkulation. Es beträgt nahe dem Grund im Abtsee 35 %, Fohnsee fast 0 %, Hartsee 25 %, Hopfensee 40 % und Wesslinger See 5-30 %. Ein bereits ausgebildetes Epi- und Metalimnion zeigt, daß diese Seen ihre Frühjahrsvollzirkulation bereits beendet haben. Die Situation in der sommerlichen Stratifikationsperiode ist durch stark klinograde Sauerstoffkurven mit O₂-Freiheit im Hypolimnion (Fohnsee, Hartsee u. Wesslinger See) und teilweise sogar im Metalimnion (Abtsee und Hopfensee) gekennzeichnet. Die Übersättigung in Epi- und Metalimnion erreicht im Abtsee 230 %, Fohnsee 140 %, Hartsee 120 %, Hopfensee 165 % und Wesslinger See 110 %. Der

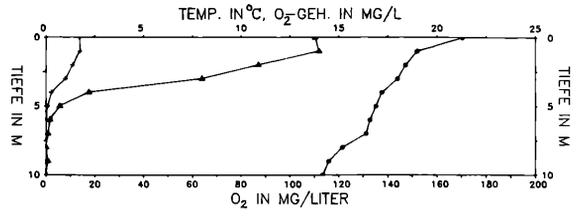
Fohnsee weist ein leichtes metalimnisches Maximum auf (positiv heterograd).

Alpsee, Bannwaldsee, Niedersonthofener See, Riegsee, Seeoner See, Simssee, Waginger See

Im Gegensatz zur obigen Seengruppe „verlassen“ diese Seen die Phase der Vollzirkulation mit einem geringeren Sauerstoffdefizit. Nahe dem Seegrund wurden folgende O₂-Konzentrationen gemessen: Alpsee (Imm.) 80-90 %, Bannwaldsee 50-60 %, Niedersonthofener See 80-90 %, Riegsee 70-80 %, Seeoner See (Klostersee) 55-70 %, Simssee 20-80 % und Waginger See 70-80 %. Bannwaldsee, Niedersonthofener See, Seeoner See, Simssee und Waginger See haben bereits ein so kräftiges Epilimnion und Metalimnion aufgebaut, daß sie vermutlich durch Wind im weiteren Verlauf des Frühjahrs nicht

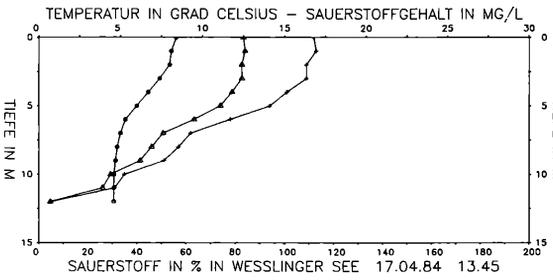


- ⊕ TEMPERATUR IN GRAD CELSIUS
- ▲ SAUERSTOFFGEHALT IN MG/L
- ⊕ SAUERSTOFFSAETTIGUNG IN %

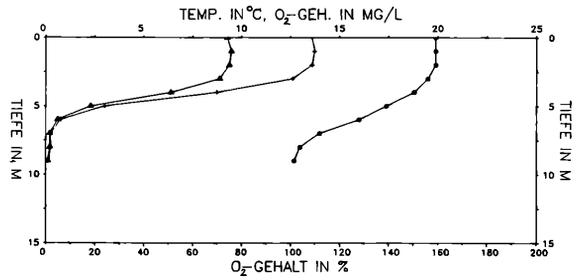


- ⊕ TEMPERATUR IN GRAD CELSIUS
- ▲ SAUERSTOFFGEHALT IN MG/L
- ⊕ O₂ IN %, HOPFENSEE, 22.8.84, 16.00, SONNIG

Abbildung 19

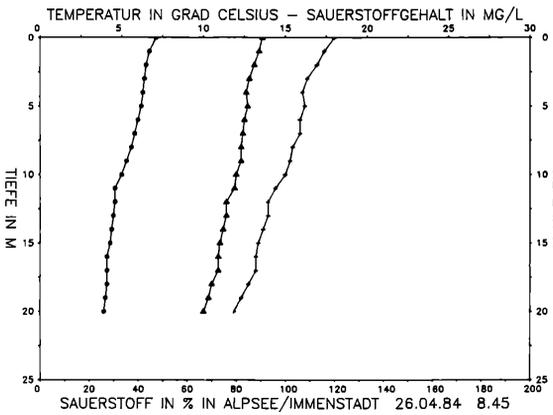


- ⊕ TEMPERATUR IN GRAD CELSIUS
- ▲ SAUERSTOFFGEHALT IN MG/L
- ⊕ SAUERSTOFFSAETTIGUNG IN %

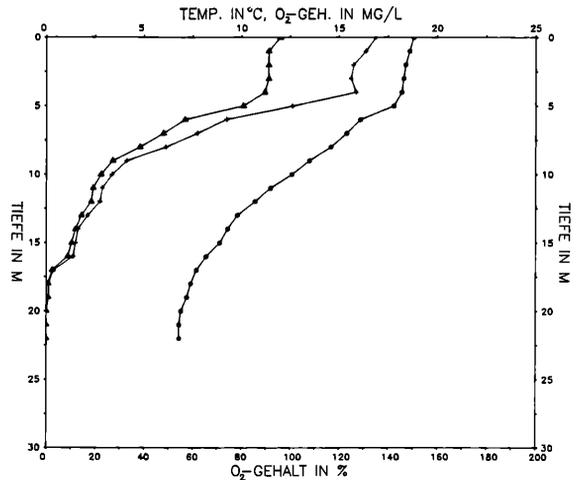


- ⊕ TEMPERATUR IN GRAD CELSIUS
- ▲ O₂ IN MG/LITER
- ⊕ O₂ IN %, WESSLINGER SEE, 23.8.84, 8.45, SONNIG

Abbildung 20

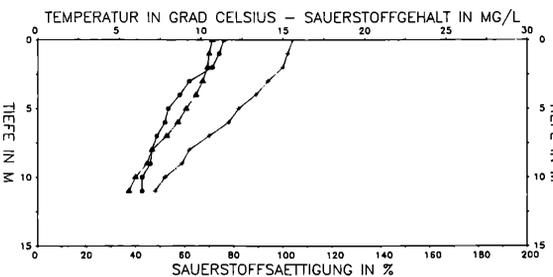


- ⊕ TEMPERATUR IN GRAD CELSIUS
- ▲ SAUERSTOFFGEHALT IN MG/L
- ⊕ SAUERSTOFFSAETTIGUNG IN %

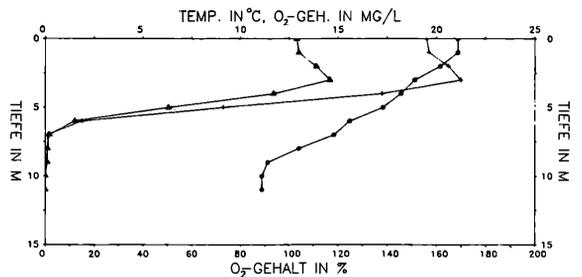


- ⊕ TEMP. IN GRAD CELSIUS
- ▲ O₂-GEHALT IN MG/LITER
- ⊕ O₂ IN %, ALPSEE (IMM.), 22.8.84, 9.20, SONNIG

Abbildung 21



- ⊕ TEMPERATUR IN GRAD CELSIUS
- ▲ SAUERSTOFFGEHALT IN MG/L
- ⊕ SAUERSTOFF IN % IN BANNWALDSEE 26.04.84 16.15



- ⊕ TEMP IN GRAD CELSIUS
- ▲ O₂ IN MG/LITER
- ⊕ O₂ IN %, BANNWALDSEE, 22.8.84, 18.00, SONNIG

Abbildung 22

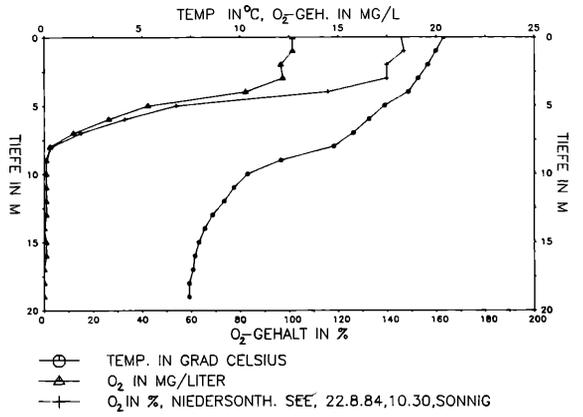
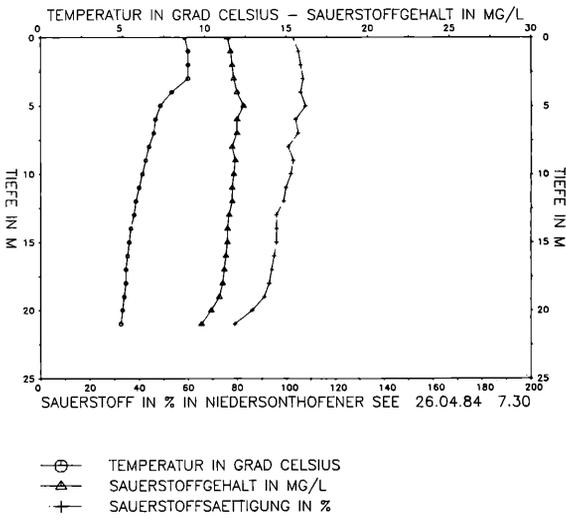


Abbildung 23

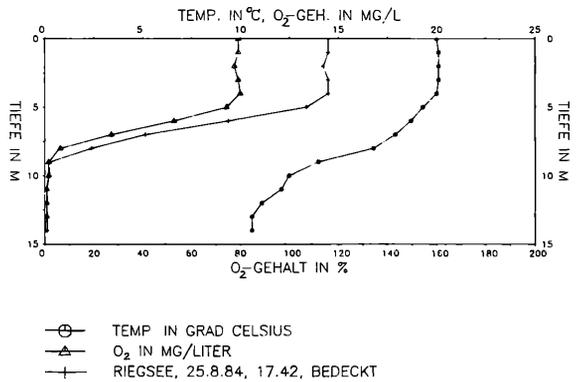
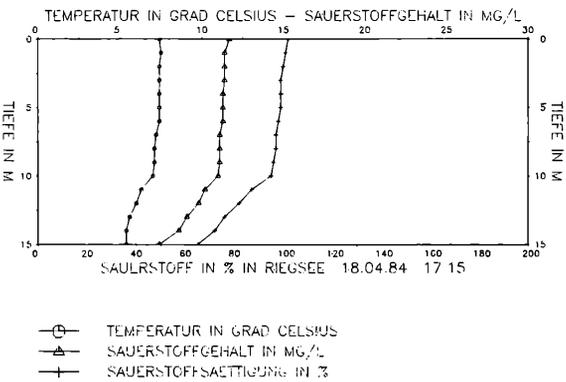


Abbildung 24

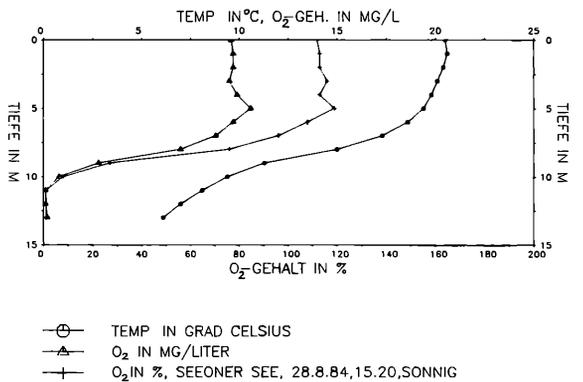
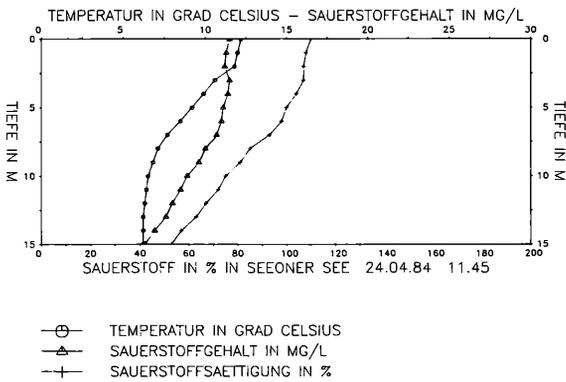


Abbildung 25

mehr durchmischt werden konnten. Beim Alpsee (Imm.) und Riegsee ist die thermische Stratifizierung erst schwach ausgebildet und kann durchaus von kräftigen Winden noch umgewälzt und zerstört werden. In allen genannten Seen treten während der sommerlichen Stratifikationsperiode im Tiefenbereich anaerobe Zustände auf:
 Alpsee (Imm.) 17-22 m, Bannwaldsee 7-11 m, Niedersonthofener See 8-19 m, Riegsee 9-14 m, Seoner See 11-13 m, Simssee 11-20 m und Wager See

11-21 m. Bereits 1974 und 1975 liefen im Wager See erste Versuche, das extreme O₂-Defizit durch Belüftung des Hypolimnions zu vermindern. Sie wurden jedoch wegen des ungünstigen Kosten-Nutzen-Verhältnisses wieder eingestellt. Neuerdings versucht man im Weßlinger See ebenfalls durch Belüftung (neuer Technik), die anaeroben Zustände (und damit die Re-Eutrophierung durch Rücklösung von Nährstoffen aus dem Sediment) zu beseitigen.

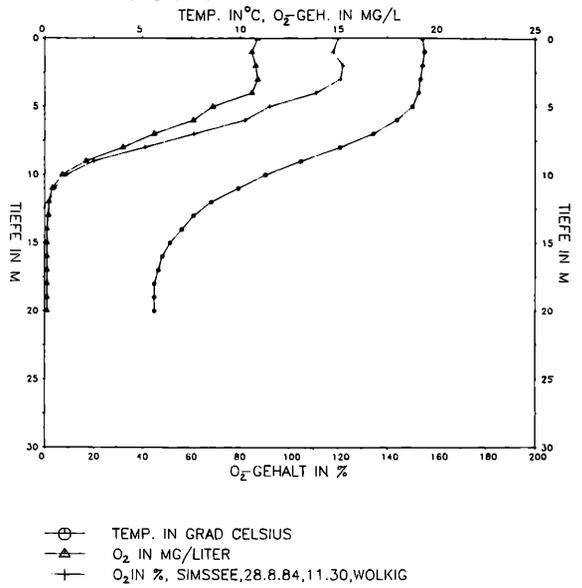
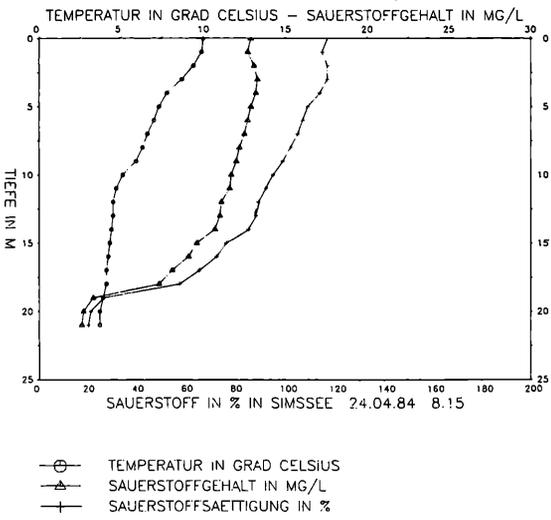


Abbildung 26

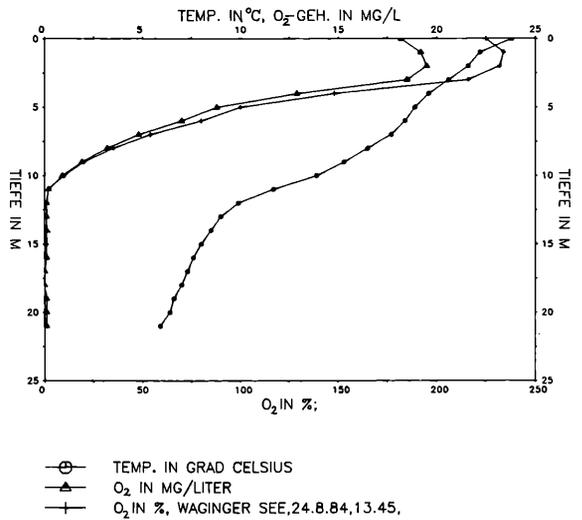
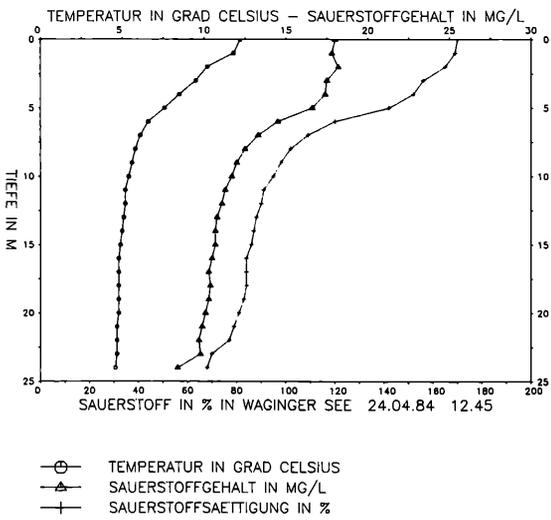


Abbildung 27

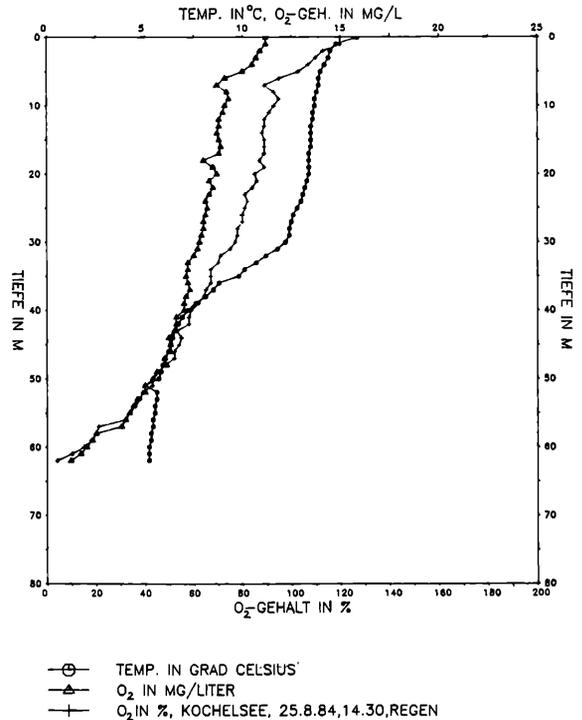
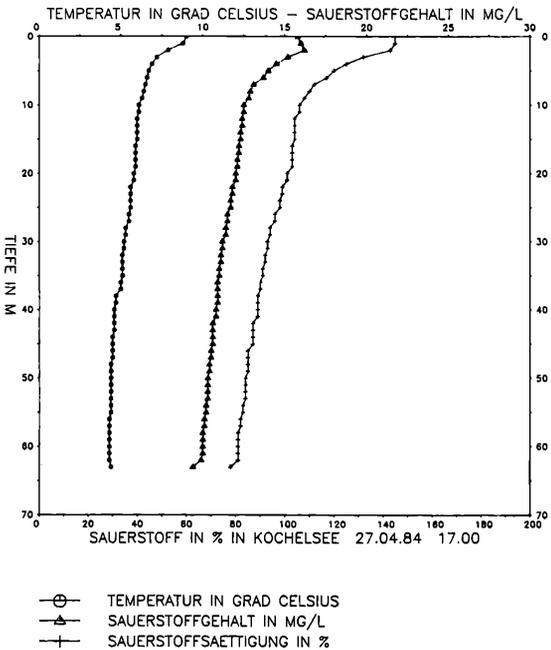


Abbildung 28

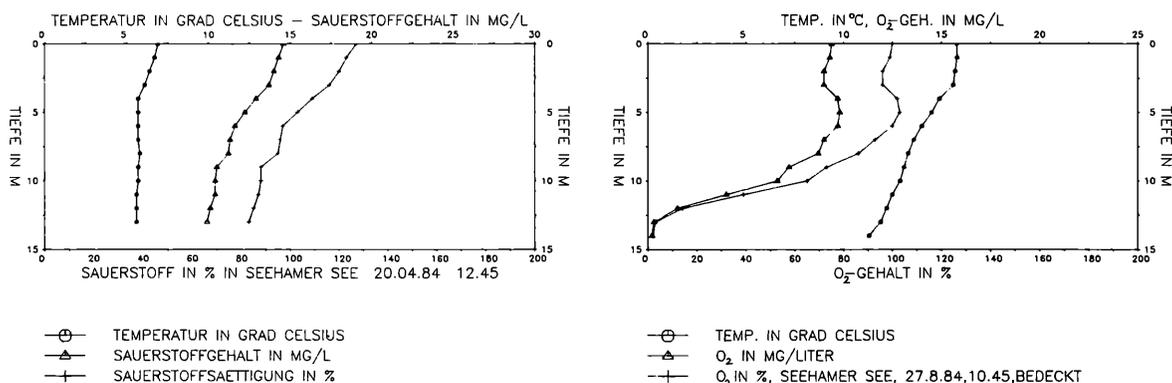


Abbildung 29

4.3. Seen mit kräftigem Wasserdurchsatz

4.3.1. Natürliche Seen

Kochelsee (Abb. 28)

Den Kochelsee durchfließen die aus dem Wettersteingebirge kommende, abwasserbelastete Loisach ($23 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) und das Triebwasser des Walchenseekraftwerkes ($23 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Der Kochelsee hat damit den schnellsten Wasseraustausch aller natürlichen Seen Südbayerns (1,5 Monate!). Besonders durch das nur $3\text{--}6^\circ \text{C}$ warme Triebwasser des Walchensees wird der Wasserkörper kräftig durchmischt, was – wie schon ZORELL (1956) nachgewiesen hat – im Temperaturverhalten und im O_2 -Gehalt seinen Niederschlag findet. So ist die Oberfläche des Kochelsees (stets einer der kältesten Badeseen Bayerns) bis in den September hinein sogar kälter als der 203 m höher gelegene Walchensee. Andererseits transportiert das turbulente Walchensee-Triebwasser beträchtliche Wärmemengen in die Tiefe, weshalb der Kochelsee in der Tiefe die höchsten Temperaturen von allen Seen in Bayern aufweist. Schon die Frühjahrstemperaturen des Hypolimnions liegen mit knapp 5°C um fast 1°C höher als in weniger durchmischten Seen. Im August zur Stratifikationsperiode erstreckt sich ein kühles, doch gleichmäßig temperiertes Epilimnion bis in 30 m Tiefe! Die Sauerstoffgehalte entsprechen der kräftigen Durchmischung. Im Frühjahr liegen 80–90 % Sättigung vor, im Sommer nimmt die Kurve von 120 % Übersättigung an der Oberfläche klinograd bis auf nahezu 0 % in Bodennähe ab. Ein Sauerstoffeintrag durch die kräftige Durchmischung ist anzunehmen, weshalb die O_2 -Kurve wohl eine geringere Sauerstoffzehrung angibt als tatsächlich durch Abbau verbraucht wird („eutroph“).

4.3.2. Stauseen

Seehamer See (Abb. 29)

Dieser ursprünglich nur noch $0,57 \text{ km}^2$ große (natürliche) Zungenbeckensee wurde 1914 (etwa bis zum heutigen Wasserstand) aufgestaut und dient seit 1957 als Speicherbecken für den Pumpspeicherbetrieb des Leitzachkraftwerkes. Außerdem nimmt er

die geklärten Abwässer aus dem Tegernseer-Schlierachtal auf. Im Frühjahr zeigt das 5°C warme, homotherme Wasser den kräftigen Zufluß an, im Sommer die relativ geringen Temperaturen des Oberflächenwassers (um 15°C) und die – vergleichsweise – hohen Temperaturen des Tiefenwassers. Der Eutrophierungsstatus muß beachtlich hoch sein, zeigt doch die Sauerstoffkurve im Frühjahr bereits eine beachtliche oberflächennahe Übersättigung an und im Sommer eine kräftige klinograde Abnahme nach unten bis auf 0 % in 12–13 m Tiefe. Gleichwohl lassen sich im Seehamer See wegen der hohen Durchflußmengen aus den O_2 -Vertikalprofilen keine hinreichend zuverlässige Aussagen über den Stoffwechsel ableiten.

Forgensee (Abb. 30)

Der 1954 aufgestaute Forgensee (Bayerns größter künstlicher See) ist – ähnlich dem Sylvensteinspeicher südlich Lenggries – ein typischer Flußstausee (Jahresspeicher), dessen Temperatur- und Sauerstoffjahresgang fast schon denen eines Flusses vergleichbar ist (rechnerischer Wasseraustausch alle 3,5 Wochen). Zur Zeit der Frühjahrsvollzirkulation

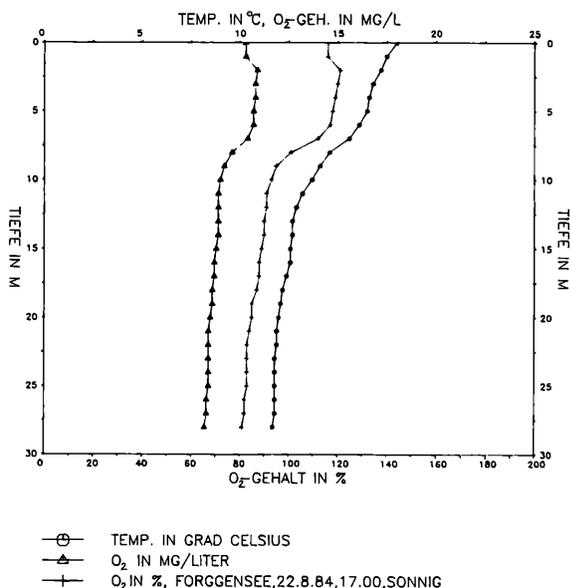


Abbildung 30

erübrigte sich eine Messung, da der Speicher leer war. Die Sommermessung macht schon in ihrem Temperaturvertikalprofil den fluviolen Charakter des Forggensees deutlich: eine Temperaturschichtung ist nur ganz schwach ausgeprägt. Die Oberflächentemperatur ist verhältnismäßig niedrig, die Temperaturen in der Tiefe vergleichsweise hoch (→ Kochelsee), was u. a. auf den Abzug des kalten Tiefenwassers durch das Kraftwerk zurückzuführen ist. Das frisch zugeführte Lechwasser ist sauerstoffreich und relativ wenig belastet, so daß sich angesichts der kräftigen Durchmischung ein nahezu orthogrades O₂-Profil mit Konzentrationen zwischen 80 und 115 % einstellt.

5. Kurzfassung

Während der Frühjahrsvollzirkulation im April 1984 und der Sommerstagnation im August 1984 wurden innerhalb weniger Tage – also fast synoptisch – Temperatur – und Sauerstoffvertikalprofile in 30 südbayerischen Seen aufgenommen, nach den Klassifikationen von ABERG & ROHDE sowie von THIENEMANN gegliedert und hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit über die Stoffwechselaktivität bzw. den Trophiegrad überprüft.

Summary

At homoiothermal conditions in spring and during summer stagnation in 1984 almost synoptic temperature and oxygen profiles have been measured in 30 lakes of southern Bavaria. These oxygen profiles was compared with each other, systematized by the classification systems of ABERG & RODHE and THIENEMANN. The reliability of the interpretation of these profiles with regard to metabolic activity and the trophic status of the lakes was checked.

6. Literaturverzeichnis

- BAYER. LANDESAMT F. WASSERWIRTSCHAFT, (HRSG.) (1983):
Verzeichnis der Seen in Bayern.
- BIRGE E. A. & JUDAY, C. (1911):
zitiert aus HUTCHINSON, G. E. 1957: A Treatise on Limnology. Vol. I, New York.
- ELSTNER, H. J. (1955):
Limnologische Untersuchungen im Hypolimnion verschiedener Seentypen.-Mem. Instituto Ital. Idrobiol., Suppl. 8, S. 83-119.
- FINDENEGG, I. (1936):
Über den Sauerstoffgehalt tiefer Seen und seine indikatorische Bedeutung für ihren Trophiezustand. – Archiv f. Hydrobiologie 30:337-344.
- FÖBRICH, G. & MANGELSDORF, I. (1973):
Beiträge zur Limnologie der Niedersonthofener Seen im Allgäu. – Schriften d. Bay. Landesstelle f. Gewässerkunde, H. 8:1-37.

- FÖBRICH, G. et al. (1977):
Gewässerkundliche Studie über sechs Seen bei Füssen im Allgäu. – Schriftenreihe d. Bay. Landesamtes f. Wasserwirtschaft, H. 3, München.
- FRITSCH, W. (1971):
Über den gegenwärtigen Gütezustand der Gewässer im deutschen Alpen- und Voralpengebiet. – Wasserwirtschaft (1):5-12.
- GROTE, A. (1934):
Der Sauerstoffhaushalt der Seen. = Die Binnengewässer, Bd. XIV, Stuttgart 1934.
- HAMM, A. (1971):
Limnologische Untersuchungen am Tegernsee und Schliersee nach der Abwasserfernhaltung (Stand 1970). – Wasser- u. Abw.-Forschung (5).
- HUTCHINSON, G. E. (1957):
A Treatise on Limnology. Bd. 1, 1015 S.; New York u. London.
- LIEBMANN, H & HAMM, A. (1972):
Eutrophierung und Eutrophierungsminderung an bayerischen Seen. – Gas- u. Wasserfach 113:404-409.
- MICHLER, G. (1976):
Synoptische Temperatur- und Sauerstoffmessungen in 33 südbayerischen Seen während der Sommerstagnation im August 1975. – Mitt. d. Geogr. Ges. München 61:137-167.
- MICHLER, G. & SCHMIDT, H. (1979):
Vergleichende Temperatur- und Sauerstoffmessungen in 32 südbayerischen Seen während der Sommerstagnation im August 1978. – Wasserwirtschaft 69(6):191-196.
- NÄHER, W., MANGELSDORF, J. & SCHEUERMANN, K. (1974):
Der Waginger-Tachingener See. – Schriftenreihe d. Bay. Landesstelle f. Gewässerkunde, H. 9, München.
- RUPPERT, K. (1962):
Das Tegernseer Tal. Sozialgeographische Studien im oberbayerischen Fremdenverkehrsgebiet. = Münchner Geogr. Hefte, 23, Kallmünz.
- THIENEMANN, A. (1928):
Der Sauerstoff im eutrophen und oligotrophen See. – Die Binnengewässer, Bd. 4; Stuttgart.
- WILHELM, F. (1958):
Vorläufiger Bericht über die Temperatur- und Sauerstoffaufnahmen im Schliersee 1956. – Gewässer und Abwässer, H. 19, S. 40-65.
- WILHELM, F. (1972):
Verbreitung und Entstehung von Seen in den Bayerischen Alpen und im Alpenvorland. – Gas und Wasserfach 113(9):393-444.
- ZORELL, F. (1956):
Temperatur- und Sauerstoffbestimmungen im Kochelsee. – Gewässer und Abwässer, H. 14, S. 7-30.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Günther Michler
Institut für Geographie
(Lehrstuhl Prof. Dr. F. Wilhelm)
Luisenstr. 37
8000 München 2

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der Bayerischen Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege \(ANL\)](#)

Jahr/Year: 1987

Band/Volume: [Beiheft_6](#)

Autor(en)/Author(s): Michler Günther

Artikel/Article: [Vergleichende Temperatur- und Sauerstoffmessungen in 30 südbayerischen Seen während der FrühjahrsVollzirkulation und der Sommerstagnation im Jahr 1984 145-166](#)