

Bericht Nr. 3

**Die Sauerstoffschichtung  
im tiefen Hypolimnion des Bodensee-Obersees  
1963/64  
mit Berücksichtigung einiger  
Untersuchungsergebnisse aus früheren Jahren**

Untersuchungen der Anstalt für Bodenseeforschung der Stadt Konstanz  
Bearbeiter: Richard Muckle



# Einleitung

Für das Geschehen in der Freiwasserregion des Bodensee-Obersees im Jahreszyklus 1963/64<sup>1</sup> war in mancher Hinsicht ein säkulares Ereignis bestimmend, das an seinem Anfang stand, und das zu beobachten und zu verfolgen die Bodenseeforschung erstmals Gelegenheit hatte: die *Seegefrörne* des Winters 1962/63.

Nachdem schon in den letzten Monaten des Jahres 1962 die Lufttemperatur und in ihrem Gefolge auch die Oberflächentemperatur des Wassers merklich unter den lang- bzw. mehrjährigen Mittelwerten<sup>2</sup> gelegen hatten (November 1962:  $T_L = 2.5^\circ\text{C}$ , Abweichung =  $-1.6^\circ\text{C}$ ;  $T_0 = 8.7^\circ\text{C}$ , Abweichung =  $-0.3^\circ\text{C}$ . Dezember 1962:  $T_L = -2.8^\circ\text{C}$ , Abweichung =  $-2.9^\circ\text{C}$ ;  $T_0 = 5.0^\circ\text{C}$ , Abweichung =  $-1.3^\circ\text{C}$ ), waren bereits im Januar 1963 die Voraussetzungen für das Zufrieren größerer Bereiche des Obersees gegeben. Der Monat war mit einem  $T_L$ -Mittel von  $-5.6^\circ\text{C}$  (Abweichung =  $-5.1^\circ\text{C}$ ) einer der kältesten des Jahrhunderts; die Wetterwarte Konstanz registrierte 28 Frosttage mit 21 Eistagen bei relativ klarem Wetter (Sonnenscheindauer = 50.8 h = 121 % der Norm für den Monat) und einer verhältnismäßig hohen mittleren Windstärke von 2.17 m/s bei vorwiegend nördlichen Winden. Ende Januar war die Wyse rund um den See auf unterschiedlicher Breite eisbedeckt; im Überlinger See fand sich schon eine nahezu vollständige Eisdecke von seinem westlichen Ende bis auf die Höhe Nußdorf – Fließhorn, ähnliche Verhältnisse zeigten die Konstanzer Bucht und das SE-Ufer zwischen Bregenz und Rorschach. Der folgende Februar lag mit  $-4.7^\circ\text{C}$  als Mittel der  $T_L$  weiterhin extrem unter der langjährigen Norm (Abweichung =  $-5.5^\circ\text{C}$ ), er brachte noch einmal 26 Frosttage, darunter 12 Eistage, eine erneut überdurchschnittliche Sonnenscheindauer von 84.7 h (= 118 %) und etwas geringere Windtätigkeit (monatliches Stärkemittel = 1.68 m/s, vorwiegend N- und W-Winde). Am 7. Februar war der gesamte Obersee, eine Rinne von wechselnder Breite zwischen Friedrichshafen und Romanshorn ausgenommen, mit Eis bedeckt. In der Zeit der Hochgefrörne war zwar die Sicht über die Seefläche durch stark dieses Wetter, z. T. auch durch Nebel behindert. Eine Umfrage bei verschiedenen Beobachtern sowohl am N- als auch am S-Ufer ergab jedoch, daß der See in diesem Bereich zu keinem Zeitpunkt eine gänzlich geschlossene Eisdecke trug. Die Gefrörne hielt, von gelegentlichen, z. T. stärkeren Aufbrüchen abgesehen, bis 7. März an. Von hier ab lagen die Pentadenwerte der  $T_L$  über dem Gefrierpunkt, das Eis wurde zusehends morscher, und die Aufbrüche nahmen zu. So öffnete sich, nachdem in dem genannten Gebiet des mittleren Obersees schon Tage vorher eine große Fläche eisfrei geworden war, am 12. März die bis dahin noch geschlossene Decke im Ostteil des Überlinger Sees; in den folgenden 14 Tagen drifteten bei der herrschenden Westlage Eisfelder, die anfangs quadratkilometergroß waren, langsam nach Osten, um sich dann im Obersee überraschend schnell aufzulösen. Am 1. April 1963 war der Obersee wieder vollkommen eisfrei.

— — —

<sup>1</sup> Bei der Darstellung des Jahresverlaufs folgen wir im wesentlichen dem Beispiel AUERBACHS (1). Demnach beginnt das Seejahr im Obersee mit dem Einsetzen der Sommerstagnation, einem Zeitpunkt, der im allgemeinen in den April fällt. April bis Juni wären als See Frühling zu bezeichnen, Juli, August und September sind die eigentlichen Seesommermonate. Die drei letzten Monate des Kalenderjahres stellen den Seeherbst dar, an den sich — dem biologischen Geschehensablauf entsprechend — der Seewinter mit den Monaten Januar bis März anschließt.

<sup>2</sup> Sämtliche meteorologischen Daten nach Mitteilung der WETTERWARTE KONSTANZ, die diesbezüglichen langjährigen Vergleichswerte nach dem „Witterungs-Schnellbericht“ des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES, WETTERAMT FREIBURG; die mehrjährigen Vergleichswerte der Wassertemperatur aus dem „Limnologischen Monatsbericht Überlinger See (Bodensee)“ der ANSTALT FÜR BODENSEEFORSCHUNG DER STADT KONSTANZ, Jahrgang 1961/62.  $T_L$  = Lufttemperatur,  $T_0$  = Oberflächentemperatur des Wassers usw.

Die Untersuchungen, über die hier in einer ersten Mitteilung berichtet wird, wurden in der Zeit von April 1963 bis März 1964 im mittleren Bodensee-Obersee auf dem Schnitt Fischbach - Uttwil (Seemitte) über dem sogenannten „Tiefen Schweb“ mit der größten Tiefe von 252 m durchgeführt. Sie bilden einen Teil eines Überwachungsprogramms für die Freiwasserregion des Sees, das im Auftrage der INTERNATIONALEN GEWASSERSCHUTZKOMMISSION FÜR DEN BODENSEE im Frühjahr 1961 begonnen wurde, und das neben physikalischen und chemischen Profilserien vor allem biologische Arbeiten umfaßt. Die Probennahmen wurden ursprünglich in monatlichen Abständen durchgeführt, später ergab sich aus mehreren Gründen die Notwendigkeit, die biologischen sowie die Temperatur- und Sauerstoffuntersuchungen enger aufeinanderfolgen zu lassen und zeitweilig auch die Zahl der Entnahmeorte für die letzteren Arbeiten zu vermehren, so daß, wie weiter unten noch näher ausgeführt wird, den hier dargestellten Ergebnissen bis zu fünf monatliche Serien und mehr zugrunde liegen.

# Die thermische Schichtung des Obersees 1963/1964

*Methodik:* Die Temperaturen in den oberen Schichten bis in 50 m Tiefe wurden in 1 m-Abständen mit einem Thermistor-Temperaturlot (NTC-Widerstand) gemessen, dessen Meßgenauigkeit  $\pm 0.05$  °C betrug. In den Tiefen von über 50 m arbeiteten wir mit dem Quecksilber-Umkippthermometer, das eine Ablesung von 0.01 °C ermöglicht. Vor der weiteren Verwertung der Daten (Mittelwertbildung usw.) wurde auf Zehntelgrade auf- und abgerundet.

Im letzten Untersuchungsprofil vor Beginn der Seegefrörne am 16. Januar 1963 hatte auf der Station Fischbach-Uttwil (Seemitte) bei einer  $T_0$  von noch 3.6 °C leicht inverse Schichtung geherrscht, d. h. die Temperaturen waren nach der Tiefe zu angestiegen, in 150 m wurden 4.0 °C erreicht, in größter Tiefe (251 m) betrug der an diesem Tag gemessene Wert 4.3 °C. Wie aus Tabelle 2 ersichtlich ist, liegen nach den Mitteilungen anderer Autoren und unseren eigenen Untersuchungen die Über-Grund-Temperaturen<sup>3</sup> im Tiefen Schweb des Obersees überwiegend bei oder über 4.0 °C. Immerhin sei schon hier auf die niederen Werte der Winter 1917/18, 1953/54 und besonders des näher zu behandelnden Winters 1962/63 hingewiesen. Im Februar 1963 konnte infolge der Eisbedeckung die Untersuchungsreihe in Fischbach-Uttwil (Seemitte) nicht durchgeführt werden; zwischen der Serie vom 16. Januar und der ersten Serie nach der Gefrörne am 20. März liegt somit eine Spanne von etwas mehr als acht Wochen, in der wir über keine Temperaturen aus dem tiefen Hypolimnion verfügen. Die ersatzweise im Überlinger See anfangs noch vom Boot, später vom Eis aus gemessenen Vertikalprofile reichten nur bis in 50 m Tiefe. Sie zeigten noch im Januar einen kräftigen Rückgang der  $T_0$ , am 24. Januar wurden auf der Höhe des Wasserwerkes Konstanz an der Oberfläche noch 1.4 °C gemessen. Am 4. Februar sank dann die  $T_0$  weiter auf 0.5 °C ab, zugleich wurde leichte Platteneisbildung festgestellt; am 15. Februar betrug die Wassertemperatur unter einer 22.5 cm starken Eisdecke auf dem Schnitt zwischen Überlingen und Dingelsdorf 0.2 °C. Im weiteren Verlauf der Gefrörne schwankten die Werte des Oberflächenwassers unter Eis zwischen 0.8 und 0.0 °C. – Am 14. März wurde im vorderen Überlinger See die erste Meßreihe nach Aufgang des Eises durchgeführt. Sie erbrachte eine  $T_0$  von 1.5 °C und ein inverses Profil mit  $T_{50} = 3.2$  °C. Die erste Serie in Fischbach-Uttwil (Seemitte) vom 20. März zeigte als Folge einer stärkeren Durchmischung<sup>4</sup> bereits eine  $T_0$  von 2.5 °C, in 100 m Tiefe wurden 3.7 °C gemessen und in 250 m Tiefe noch 3.9 °C. Damit lagen im Freiwasser des mittleren Obersees die Werte des gesamten 250 m-Profiles unter der 4 °C-Grenze.

Noch im frühen Frühjahr 1963 normalisierten sich – entsprechend dem Temperaturgang in der darüberliegenden Atmosphäre – die Temperaturen in der Wasseroberfläche. Schon in der zweiten Aprilhälfte überschritt  $T_0$  wieder 4 °C, vorher, d. h. zwischen 10. und 20. April, herrschte Homothermie bei etwa 3.5 °C. Anfang Mai (2. 5.) war mit einer  $T_0$  von 7.5 °C die direkte Schichtung stabilisiert, die Sommerstagnation begann, immerhin rund drei Wochen später als normal. In den folgenden Monaten erwärmten sich die oberflächlichen Schichten weiter; gelegentlich kam es schon in der ersten Sommerhälfte nach kräftigeren Windbewegungen zur kurzfristigen Ausbildung eines schwachen, homothermen Epilimnions, im allgemeinen aber beobachtete man in den oberen 20 Metern die übliche flache Temperaturkurve. Als Einzelmaximum der  $T_0$  des Jahres wurden am 23. Juli in Station Fischbach-Uttwil (Seemitte) 22.6 °C gemessen, in denselben Monat fällt das höchste  $T_0$ -Monatsmittel mit 20.7 °C. (Zum Vergleich: Das 10jährige Maximum 1952/62 der Oberflächentemperatur im Seeteil Überlinger See betrug 18.9 °C, es fiel ebenfalls in den Juli.) – Bei absinkenden Lufttemperaturen gingen ab August auch die Temperaturen der obersten Wasserschichten schon merkbar zurück, in 5 und 10 m Tiefe dagegen erreichten sie ihren höchsten Jahresstand mit 19.4 bzw. 15.8 °C (10jähriges

<sup>3</sup> Unsere „Über-Grund-Temperaturen“ wurden, wie auch die Wasserproben für die chemischen Untersuchungen, stets in 1 bis 1.5 m Entfernung vom Seeboden gewonnen.

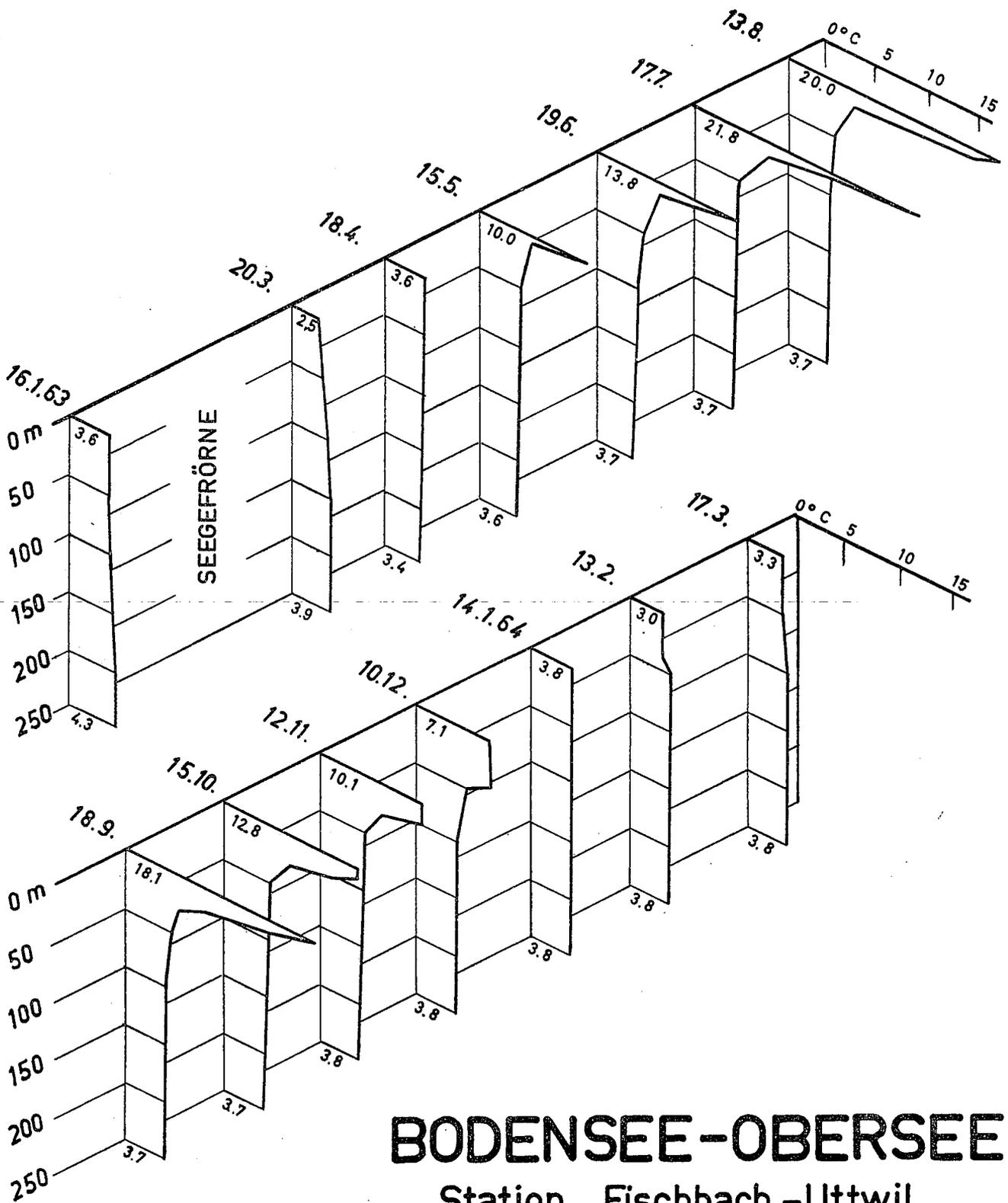
<sup>4</sup> In den vorhergegangenen Tagen hatten z. T. relativ hohe Windgeschwindigkeiten mit Tagesmitteln von über 4 m/s geherrscht.

Tabelle 1: *Die Wassertemperaturen des Bodensee-Obersees 1963/64 (°C)*

(Station Fischbach-Uttwil [Seemitte], Monatsmittel aus je 3 bis 5 Vertikalprofilserien)

	1963						1964					
Tiefe (m)	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März
0	3.7	11.0	15.7	20.7	19.4	17.4	13.0	10.0	6.7	3.1	2.9	3.3
10	3.3	5.4	8.8	13.8	15.8	15.2	13.0	10.0	6.7	3.1	3.0	3.3
20	3.3	4.0	4.9	6.1	6.5	7.9	9.6	9.9	6.7	3.4	3.0	3.3
30	3.3	3.8	4.2	4.6	4.5	4.7	5.1	7.5	6.7	3.6	3.1	3.3
50	3.5	3.8	4.2	4.2	4.2	4.3	4.2	4.4	5.1	3.7	3.5	3.3
100	3.6	3.8	3.9	3.9	3.9	4.0	3.9	3.9	4.0	3.9	3.9	3.7
200	—	—	—	—	3.8 <sup>1</sup>	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.7
250	3.5	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8

<sup>1</sup> Mittel aus nur 2 Serien.



# BODENSEE-OBERSEE

Station Fischbach-Uttwil

1963/64

## WASSEITEMPERATUR

0-250 m

Tabelle 2: *Tiefentemperaturen des Bodensee-Obersees in 250 m (°C)*

Autor:	April	Mai	Juni	Juli	August	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März
KLEINSCHMIDT <sup>1</sup>												
1913/14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.18	—
1914/15	4.20	4.19	4.24	4.24	—	—	4.24	4.34	—	—	4.27	—
1915/16	4.19	4.24	4.24	4.24	4.25	4.27	4.28	—	4.34	4.34	4.47	—
1916/17	4.47	—	4.47	—	4.52	4.49	4.50	4.53	—	—	4.51	3.78
1917/18	3.96	3.99	4.03	—	—	4.02	—	4.08	4.13	4.10	3.76	3.74
1918/19	3.69	—	3.76	3.77	3.81	3.81	3.86	3.83	(4.48)*	4.06	3.96	3.89
1919/20	4.01	3.98	4.00	4.03	4.03	4.05	4.07	4.12	4.16	4.37	4.36	4.34
1920/21	—	—	4.37	—	4.37	4.38	4.39	4.40	—	—	—	—
AUERBACH <sup>2</sup>												
1920/22	4.38	4.40	4.39	—	4.40	4.37	4.34	4.30	—	4.39	4.22	4.35
MUCKLE <sup>3</sup>												
1954	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.9	3.8**	3.8
1954	3.7	3.8	3.8	3.8	3.9	3.9	4.0	4.0	4.0	—	—	—
1961/62	4.3	4.3	4.3	4.3	4.4	4.4	4.4	4.4	4.3	4.3	4.3	4.1
1962/63	4.1	4.1	4.2	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	—	3.9
1963/64	3.5	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8

<sup>1</sup> KLEINSCHMIDT (5); wo möglich, wurden Mittelwerte gebildet.

<sup>2</sup> AUERBACH, MAERKER UND SCHMALZ (2), als Mittelwerte mitgeteilt.

<sup>3</sup> 1954 und 1961/63 = Einzelwerte, 1963/64 = Mittelwerte.

\* Der Wert von 4.48 im Dezember 1918 ist das Mittel aus zwei von KLEINSCHMIDT mitgeteilten Einzelergebnissen (4,86 °C vom 16. 12. und 4,08 °C vom 27. 12. 1918); man kann mit großer Sicherheit beim ersten der beiden Einzelwerte auf einen Ables- oder Druckfehler schließen, die Temperatur vom 27. 12. ist wahrscheinlich zutreffend.

\*\* Tiefe = 230 m.

Maximum der 10 m-Stufe aus dem Überlinger See =  $13.8^{\circ}\text{C}$  im September). Im Laufe des September trat der See in die typische dreistöckige Spätjahrsschichtung ein. Anfänglich hatte das Epilimnion noch häufig wechselnde, geringe Dicken zwischen 0 und 10 m; ab und zu – wie etwa am 18. September nach einer zweitägigen Periode relativer Windstille und noch einmal ansteigenden Lufttemperaturen – verschwand es wieder, an seine Stelle trat erneut ein stärkeres Temperaturgefälle. In den Mittelwerten für September machte sich hierdurch, wie gewöhnlich in diesem Monat, die dreistöckige Schichtung noch nicht bemerkbar. Der Oktober zeigte bei kräftig fallenden Temperaturen eine im ganzen etwas stärkere Windtätigkeit. In seinem Verlauf sank die Untergrenze des Epilimnions nahe an die 20 m-Isobathe hinab; im Monatsmittel hatte die homotherme Oberschicht ( $T_E = \text{um } 13.0^{\circ}\text{C}$ ) eine Mächtigkeit von 13 m, das anschließende Metalimnion eine solche von etwas über 20 m. In den November fielen die maximalen Monatsmittel in 20 (=  $9.9^{\circ}\text{C}$ ) und 30 m (=  $7.5^{\circ}\text{C}$ ). Bis Anfang Dezember erreichte das Epilimnion eine Dicke von etwa 30 m ( $T_E = 8.2^{\circ}\text{C}$ ); kräftige Windbewegungen und stark zurückgehende Außentemperaturen drückten in den folgenden Wochen seine Untergrenze mächtig nach unten, und im gleichen Maße wurde die Sprungschicht eingengt. Die gesamte Schichtung verlor an Stabilität: Am Monatsende (30. Dezember) war  $T_E$  auf  $4.8^{\circ}\text{C}$  zurückgegangen, bis in über 50 m Tiefe herrschte Temperaturgleichheit, und das Metalimnion war praktisch verschwunden. Mitte Januar 1964 stellten wir wieder eine leichte Temperaturumkehr fest ( $T_O$  am 14. Januar =  $3.8^{\circ}\text{C}$ ), die sich im weiteren Verlauf des Monats noch verstärkte. Am 28. Januar wurde mit  $2.6^{\circ}\text{C}$  die niederste Oberflächentemperatur des Winters 1963/64 gemessen. Zwischen  $2.8$  und  $3.0^{\circ}\text{C}$  pendelte der Om-Wert im Februar, so daß in diesen Monat das niederste  $T_O$ -Mittel (=  $2.9^{\circ}\text{C}$ ) fiel. Im März stiegen die Werte an der Oberfläche schon wieder langsam an, bei Abschluß des Jahreszyklus (31. März 1964) wurden hier  $3.6^{\circ}\text{C}$  erreicht.

Hatte somit die Seegefrörne im Temperaturgang der Oberflächenschichten des Sees – abgesehen von den Werten der Monate April bis Juni – keine nachhaltigere Wirkung hinterlassen, so verhielten sich die Tiefentemperaturen in dieser Beziehung anders: Wir halten fest, daß der See während der Homothermie im zweiten Aprildrittel 1963 bis in seine größte Tiefe unter die Temperatur der maximalen Dichte des Wassers ausgekühlt war. Schon in der 40 m-Tiefenlinie blieb nun das höchste Monatsmittel des Jahres 1963/64 (Dezember 1963 =  $5.8^{\circ}\text{C}$ ) um  $0.2^{\circ}\text{C}$  unter dem mehrjährigen Monatsmaximum (November =  $6.0^{\circ}\text{C}$ ). Besonders interessant sind jedoch die Werte aus dem tiefen Hypolimnion. Als niederste 100 m-Temperatur (Einzelwert) wurden während der intensiven Durchmischungsphase im Anschluß an die Eisbedeckung am 10. April 1963  $3.3^{\circ}\text{C}$  gemessen. Der Anstieg bis in die Nähe der Temperatur der höchsten Dichte in dieser Tiefe erfolgte überraschend schnell, am 2. Mai zeigte das Umkippthermometer bereits  $3.77^{\circ}\text{C}$ , am 8. Mai war mit  $3.88^{\circ}\text{C}$  die theoretische Temperatur des Dichtemaximums schon geringfügig überschritten. Nun allerdings setzte die Weiterentwicklung aus, zwischen dem 8. Mai und dem 26. Juni schwankten die 100 m-Werte – wohl infolge von Schichtpendelungen – zwischen  $3.79$  und  $3.88^{\circ}\text{C}$ , am letztgenannten Tag wurden  $3.9^{\circ}\text{C}$  erreicht. Bis zum Jahresende lagen dann die Temperaturen unserer Tiefe zwischen  $3.9$  und  $4.0^{\circ}\text{C}$ , höher gelangten sie nicht mehr. AUERBACH (2) nennt als maximales Monatsmittel der Temperatur in 100 m Tiefe aus einer fünfjährigen Untersuchungsserie 1920/24 im westlichen Obersee  $4.81^{\circ}\text{C}$ , dieser Wert fiel in den November. Im Februar 1964 wurden  $3.9^{\circ}\text{C}$  wieder unterschritten, als niederste 100 m-Temperatur des Winters 1963/64 stellten wir im März einige Male  $3.6^{\circ}\text{C}$  fest. In der größten Seetiefe von 251 m betrug das Jahresminimum  $3.4^{\circ}\text{C}$ , es fand sich, gleichfalls als unmittelbare Folge der starken Auskühlung des Sees im Winter 1962/63, am 18. April 1963. Ein erster, leichter Anstieg erfolgte ebenso rasch: Am 25. April ergab die Messung  $3.48^{\circ}\text{C}$ , am 2. Mai  $3.53$  und am 8. Mai  $3.58^{\circ}\text{C}$ . Bis zum 22. Mai änderte sich der Wert nicht, am 29. Mai zeigte das Umkippthermometer  $3.60^{\circ}\text{C}$ , ebenso am 10. Juni. Am 19. Juni war mit  $3.66^{\circ}\text{C}$  hier die Temperatur der maximalen Dichte nahezu erreicht, vom 26. dieses Monats bis zum 18. September, d. h. annähernd drei Monate lang, pendelten die Werte ausnahmslos nahe um  $3.7^{\circ}\text{C}$ . Am 24. September wurden dann zwar erstmals  $3.80^{\circ}\text{C}$  festgestellt, doch schwankten

auch in der Folgezeit bis Ende November die Ablesungen aus bis jetzt nicht einwandfrei geklärten Ursachen (s. unten) weiterhin zwischen 3.74 und 3.84 ° C. Im Dezember und im darauffolgenden Januar 1964 standen die Werte konstant bei 3.80 ° C, um Anfang Februar erneut auf 3.78 ° C abzusinken; bis Ende März verblieb die Temperatur bei 3.78 bis 3.80 ° C. – Der Gang der Tiefentemperatur in diesem Ausnahmejahr läßt erkennen, wie außerordentlich träge die Diffusionsvorgänge im Hypolimnion eines tieferen Sees ablaufen, wenn hier einmal die größte Dichte erreicht ist. Daß es sich dabei tatsächlich um eine Ausnahmeerscheinung handelte, zeigt die Zusammenstellung der 250 m-Temperaturen in Tabelle 2: Während der hier aufgeführten, für die Beurteilung dieser Frage heranziehbaren 13 Jahresverläufe lag in zehn Wintern die Temperatur der größten Tiefe stets mehr oder weniger über dem dem Dichtemaximum zugehörigen Wert. Nur in zwei Jahren, nämlich 1917/18 und 1962/63, wurden die 3.7 ° C mit Sicherheit, in einem weiteren Jahr (1953/54) wahrscheinlich, erreicht oder unterschritten.

## Der Sauerstoff im tiefen Hypolimnion des Sees

*Methodik:* Die Sauerstoffbestimmungen, die der folgenden Darstellung zugrunde liegen, wurden vom CHEMISCHEN UNTERSUCHUNGSAMT DER STADT KONSTANZ nach der nicht modifizierten Methode von WINKLER an 100 ml-Proben vorgenommen, die mit dem NANSEN-Schöpfer entnommen worden waren. Bei der Umrechnung in Sättigungsprozente (O<sub>2</sub>-Calculator n. BURKARD) wurde eine Ortshöhe von 400 m ü. M. angenommen.

In der Literatur sind nur wenige Angaben über die Sauerstoffverhältnisse in größter Tiefe des Obersees aus weiter zurückliegenden Jahren enthalten. Es ist nicht ausgeschlossen, daß in Instituten oder bei einzelnen Bearbeitern noch Werte vorliegen, die bisher nicht bekanntgegeben worden sind; systematische Untersuchungen über längere Zeiträume hinweg scheinen aber tatsächlich nicht durchgeführt worden zu sein.

Die ANSTALT FÜR BODENSEEFORSCHUNG verfügt über die Ergebnisse einer Serie mit je einmaligen monatlichen Untersuchungen aus dem Jahre 1954 (Kalenderjahr) und nach längerer Unterbrechung wieder aus den Jahren 1961/62 und 1962/63 (Seejahre)<sup>5</sup>, an die sich dann der in Rede stehende Jahresverlauf anschloß. Er umfaßt insgesamt 191 Sauerstoffbestimmungen aus dem tiefen Hypolimnion des mittleren Obersees zwischen 190 und 251 m Tiefe (meist in Form von Doppelbestimmungen), die sich folgendermaßen auf das Jahr und die gewählten Untersuchungspunkte verteilen:

### 1. Hauptstation Fischbach-Uttwil (Seemitte), Gesamttiefe ~ 252 m

Tiefe	1963						1964			Zus.
	Apr.-Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	
200 m	—	2	1	4	4	4	3	4	5	27
230 m	—	1	1	4	4	4	3	4	6	27
240 m	—	1	3	4	4	4	3	4	5	28
~ 251 m	4	4	3	4	4	4	3	4	5	35

<sup>5</sup> Die Bestimmungen hat ebenfalls das CHEMISCHE UNTERSUCHUNGSAMT DER STADT KONSTANZ (DR. H. FAST) durchgeführt.

2. Stationen Friedrichshafen—Romanshorn (Seemitte), Gesamttiefe ~ 248 m  
und Hersberg-Güttingen (näher Hersberg), Gesamttiefe ~ 243 m,  
durchgeführt von August 1963 bis März 1964<sup>6</sup>

<i>Friedrichshafen-Romanshorn</i>		<i>Hersberg-Güttingen</i>	
Tiefe		Tiefe	
200 m	8	190 m	9
230	8	220	8
240	9	230	10
~ 247	11	~ 242	11

Das Ergebnis aus der Hauptstation Fischbach-Uttwil (Seemitte) ist in Tabelle 3 zusammengestellt. Die Übersicht zeigt, daß gegen Ende der Zirkulation im frühen Frühjahr 1963 (18.4.) die Sauerstoffsättigung in 251 m Tiefe 88 ‰, das sind 10.8 mg/l O<sub>2</sub>, betrug, während direkt im Anschluß an die Eisbedeckung des Sees am 20. März hier nur 68 ‰ festgestellt worden waren. Ein mutmaßliches relatives Defizit der vorausgegangenen Stagnation 1962 – es hatte, wie wir unten sehen werden, etwa 40 ‰ erreicht – war somit bei Eintritt in die Stagnationsperiode des Jahres 1963 weitgehend ausgeglichen. Aber schon im Mai begann der neuerliche Rückgang der Über-Grund-Werte, sie sanken zunächst langsam, ab Juli, als sich der Abbau der inzwischen auf den Seeboden gelangten organischen Restsubstanz aus der aktuellen Frühjahrs-Hochproduktion mit auszuwirken begann, rascher auf 60 und im August im einzelnen z. T. schon auf unter 50 ‰ ab. Am 13. August wurden in 251.5 m Tiefe noch 44 ‰ Sättigung festgestellt, die Hälfte des genannten Ausgangswerts vom April. Im Verlauf des Spätsommers und des Herbstes 1963 wurde dieser Wert in Fischbach-Uttwil (Seemitte) mehrfach bestätigt oder nahezu erreicht. Die niedersten O<sub>2</sub>-Sättigungen aus der größten Tiefe der Hauptstation (Mittel aus Doppelbestimmungen) betragen z. B. im restlichen Jahresgang:

am 27. 8. 1963	43 ‰
10. 9. 1963	43 ‰
18. 9. 1963	45 ‰
2. 10. 1963	37 ‰ (= 4.55 mg/l O <sub>2</sub> , bisher niederster Wert)
15. 10. 1963	43 ‰
5. 11. 1963	40 ‰
17. 12. 1963	47 ‰
14. 1. 1964	49 ‰
10. 3. 1964	49 ‰
17. 3. 1964	49 ‰

Im Punkt Friedrichshafen-Romanshorn (Seemitte) lagen die Tiefstwerte in 247 m ebenfalls mehrfach unter der 50 ‰-Grenze (48 ‰ am 22. August 1963, 46 ‰ am 2. Oktober 1963, 49 ‰ am 4. Februar 1964, 47 ‰ am 25. Februar 1964, 49 ‰ am 10. März 1964), die dritte Station Hersberg-Güttingen (näher Hersberg) zeigte nur einmal am 5. November 1963 in der größten Tiefe von 242 m einen Wert von 46 ‰, einige weitere lagen etwas über 50 ‰.

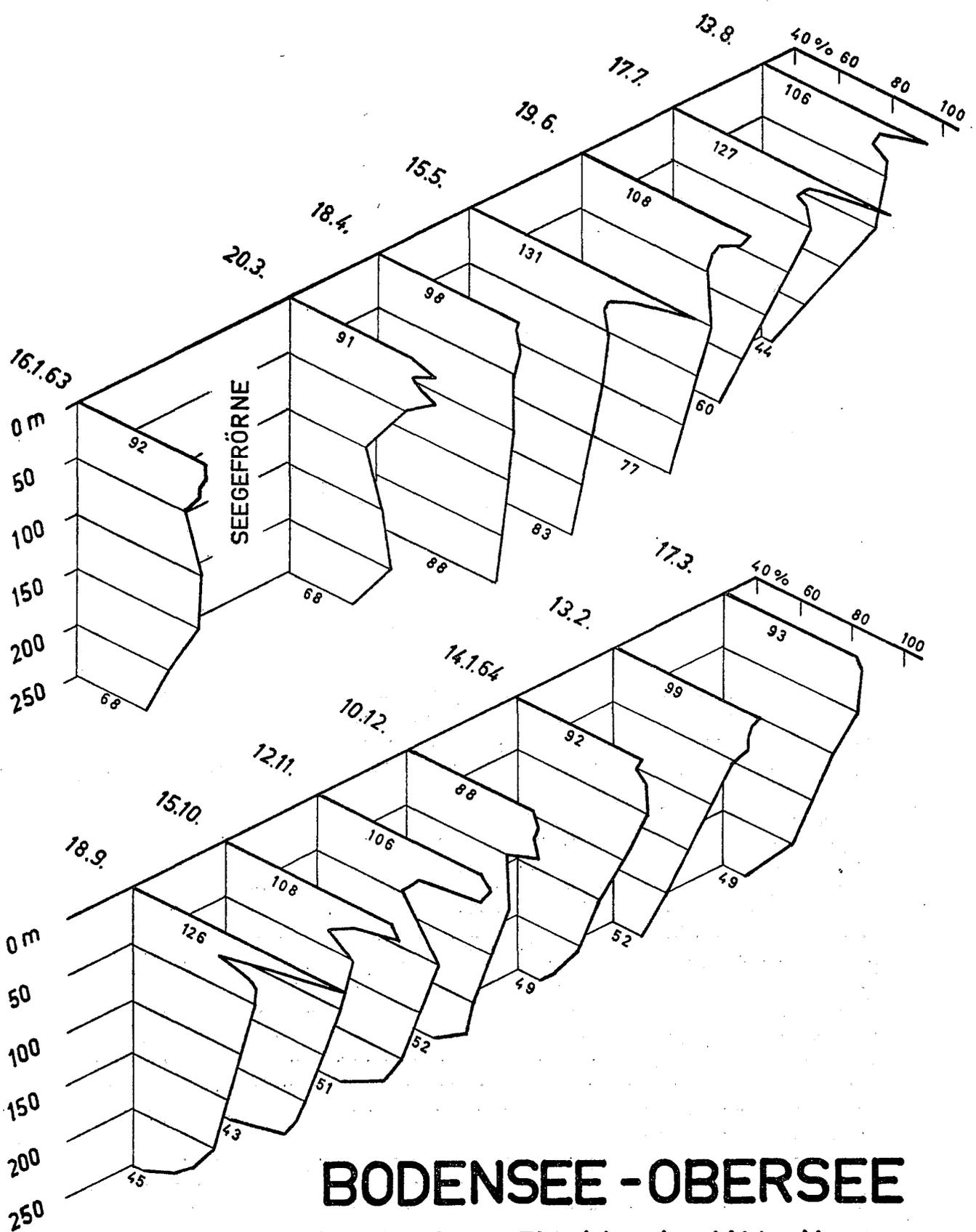
<sup>6</sup> Diese beiden Untersuchungsprofile wurden im Sommer 1963 in das Arbeitsprogramm aufgenommen, um Anhaltspunkte über die horizontale Ausdehnung der in Fischbach-Uttwil (Seemitte) festgestellten O<sub>2</sub>-Defizite zu gewinnen.

Tabelle 3: *Die Sauerstoffsättigung im tiefen Hypolimnion des mittleren Bodensee-Obersees 1963/64*

(Hauptstation Fischbach-Uttwil [Seemitte]; % Sättigung auf 400 m ü. M. berechnet)

Tiefe	1963						1964					
	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März
200 m	—	—	—	—	73	73 <sup>1</sup>	71	76	70	70	63	70
230 m	—	—	—	—	69 <sup>1</sup>	65 <sup>1</sup>	69	65	66	63	58	63
240 m	—	—	—	—	65 <sup>1</sup>	57	59	55	61	58	57	64
251 m	88 <sup>1</sup>	83 <sup>1</sup>	77 <sup>1</sup>	60 <sup>1</sup>	50	46	45	47	52	55	53	50

<sup>1</sup> Einzelwerte, alle übrigen sind Mittelwerte aus 2 bis 6 Bestimmungen/Monat (ab Mai jeweils Doppelbestimmungen).



# BODENSEE - OBERSEE

Station Fischbach-Uttwil

1963/64

## % SAUERSTOFFSÄTTIGUNG 0 - 250 m

Neben diesen Minimalwerten fanden sich jedoch im Laufe der Stagnationsperiode gelegentlich auch immer wieder höhere Konzentrationen, die das Sättigungsbild der Über-Grund-Schicht zunächst etwas stören. So erhielten wir z. B. in Fischbach-Uttwil (Seemitte) in der oben umrissenen Zeit folgende Höchstwerte:

am	20.	8.	1963	58	%
	22.	8.	1963	55	%
	29.	10.	1963	51	%
	12.	11.	1963	51	%
	10.	12.	1963	52	%

gegen den Seewinter stiegen die Zahlen teilweise weiter an:

	30.	12.	1963	60	%
	21.	1.	1964	60	%
	28.	1.	1964	57	%
	19.	2.	1964	56	%

oder blieben jedenfalls über 50 %:

	25.	2.	1964	51	%
	3.	3.	1964	52	%
	24.	3.	1964	51	%
	31.	3.	1964	51	%

Ganz selten traten einige noch höhere Werte auf, die aber wahrscheinlich auf technischen Unzulänglichkeiten bei der Probennahme beruhten. Es ist uns im Augenblick noch nicht möglich, eine in jeder Hinsicht befriedigende Deutung dieser Beobachtungen zu geben. Zum Teil fällt sicher die Tatsache ins Gewicht, daß es — etwa bei kräftigerem Seegang — nicht immer gelingt, genau die gleiche Entfernung der Entnahmetiefe vom Grund einzuhalten, und es scheint, daß der flachere Abfall<sup>7</sup> der O<sub>2</sub>-Kurve tatsächlich weitgehend in die 1–2 m-Schicht über Grund zu liegen kommt. Daneben glauben wir allerdings, Hinweise dafür erhalten zu haben, daß auch mit dem Auftreten vertikal-horizontaler Über-Grund-Ströme im Zusammenhang mit Schichtpendelungen in dem das Hypolimnion überlagernden, temperaturgeschichteten Wasserkörper gerechnet werden muß, durch die ursprünglich höher gelegene Teile des homothermen hypolimnischen Raumes mit in Bewegung geraten, die ihrerseits höhere O<sub>2</sub>-Gehalte in die bodennahen Schichten einbringen können. Schließlich erscheint es nicht ausgeschlossen, daß sich unter bestimmten Voraussetzungen auch Zuflußwasser aus dem östlichen Teil des Sees in mehr oder weniger geschlossenem Strom über den Seegrund bewegt und auf die Höhe des Schnittes Fischbach-Uttwil gelangt. Solche Umstände könnten die unregelmäßigen Differenzen in der Sauerstoffsättigung unserer Tiefenproben erklären. Es ist beabsichtigt, die O<sub>2</sub>-Untersuchungen im Rahmen der Arbeiten der folgenden Jahre weiterhin nicht ausschließlich im Schema der reinen Überwachungstätigkeit zu halten, sondern sie situationsgemäß zu gestalten, um Besonderheiten dieser Art nachgehen zu können.

Fassen wir den Gang der O<sub>2</sub>-Verhältnisse des letzten Jahres im tiefen Hypolimnion noch einmal kurz zusammen, so stellen wir fest, daß die Über-Grund-Proben eine eindeutige Entwicklung vom relativ gut abgesättigten Ausgangspunkt nach der Frühjahrszirkulation über einen anfangs langsamen, dann schnelleren Rückgang in den Frühjahrs- und Sommermonaten zum Minimum zeigen, das mit rund 45 Prozent Sättigung in der ersten Herbsthälfte erreicht wurde. Der Winter 1963/64 brachte bis Ende März nur einen geringen Anstieg der Werte, die im Februar und März des Vorjahres bereits 18 bis 20 % über den entsprechenden diesjährigen

<sup>7</sup> Er ist nicht zu verwechseln mit dem Abfall in der Mikroschichtung der Kontaktzone Wasser/Boden, die bei unseren Untersuchungen nicht berücksichtigt werden konnte.

*Tabelle 4: Sauerstoffsättigungswerte (‰) in 250 m Tiefe des mittleren Bodensee-Obersees 1892/1964*

(Schnitt Fischbach-Uttwil; Über-Grund-Werte, alle auf 400 m über Meereshöhe berechnet)

Jahr	Autor	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März
1892	HOPPE-SEYLER	—	—	—	—	—	79 <sup>1</sup>	—	—	—	—	—	—
1921	SCHMALZ	—	—	—	79	—	—	—	—	—	—	—	—
1953	GRIM	—	—	—	—	—	81	76	—	70	—	—	—
1954	FAST	—	—	—	—	—	—	—	—	—	75	81 <sup>2</sup>	79
1954	FAST	82	80	81	73	70	66	66	72	67	—	—	—
1961/62	FAST	—	59	57	55	69	50	74	45	75	56	57	83
1962/63	FAST	91	88	84	75	66	64	49	57	84	68	—	68
1963/64	MUCKLE <sup>3</sup>	88	83	77	60	50	46	45	47	52	55	53	50

<sup>1</sup> Entnahmetiefe 245 m.

<sup>2</sup> Entnahmetiefe 230 m.

<sup>3</sup> ab Mai Doppelbestimmungen, ab August Mittelwerte aus 3–5 Doppelbestimmungen/Monat.

Zahlen gelegen hatten. Die ersten Untersuchungen des neuen Jahreszyklus im April 1964 ließen dann zwar die Wirkung der Frühjahrszirkulation 1964 erkennen, die Werte in 251 m Tiefe lagen aber mit einem Monatsmittel von 68 % weiterhin um etwa 20 % unter dem Aprilergebnis 1963.

Vergleichen wir die geschilderte Situation in größter Tiefe des Obersees im Jahre 1963/64 mit den Ergebnissen der Untersuchungen früherer Jahre: Leider geben, wie erwähnt, die älteren Arbeiten hierzu nur unzureichende Gelegenheit. HOPPE-SEYLER (4) und SCHMALZ (1 und 2) teilen nur je einen Einzelwert mit. Der erstere berichtet über eine Probe aus 245 m direkt über Grund auf der Höhe Fischbach-Uttwil vom 15. September 1892, die, umgerechnet auf 400 m ü. M., eine Sättigung von 79 % zeigte; SCHMALZ nennt als Wert aus 251 m desselben Schnittes vom 25. Juli 1921 ebenfalls 79 % (auf 400 m ü. M. bezogen). Aus der Zeit zwischen 1921 und 1953 liegen keine weiteren Werte aus dem Über-Grund-Bereich des Tiefen Schwebs vor. Mit dem letzteren Jahr ist der Anschluß an die neueren Untersuchungen gegeben. GRIM<sup>8</sup> fand im Spätsommer/Herbst des Jahres 1953 in 250 m Tiefe auf der Höhe Fischbach-Uttwil

am 2. September	81 %
am 13. Oktober	76 %
am 22. Oktober	75 %
und am 11. Dezember	70 % Sättigung.

Die ANSTALT FÜR BODENSEEFORSCHUNG DER STADT KONSTANZ führte die ersten Messungen in Form einer vollständigen Jahresreihe in diesem Seebereich auf Veranlassung des INNENMINISTERIUMS BADEN-WÜRTTEMBERG im darauffolgenden Jahr 1954 durch, wir fanden dabei im Frühjahr Sättigungen um 80 %, im Sommer fielen die Werte dann ebenfalls ab und erreichten mit 66 % im September und Oktober ihren tiefsten Stand.

Bei Wiederaufnahme der Untersuchungsreihe im Jahre 1961 lag die Sättigung in 250 m schon vom Frühjahr an beträchtlich unter den bis dahin bekanntgewordenen Werten (s. Tabelle 4). Soweit wir heute die Lage von damals überblicken, müssen wir annehmen, daß auch am Ende des Winters 1960/61 die O<sub>2</sub>-Restauration in unserer Tiefe unvollkommen war. Dafür sprechen in erster Linie die niederen Werte der Sauerstoffsättigung in den nachfolgenden Frühjahrs- und Sommermonaten Mai bis Juli 1961 selbst, daneben aber auch schon die meteorologischen Verhältnisse der zweiten Winterhälfte 1960/61 und die in enger Abhängigkeit hiervon sich entwickelnde Temperaturschichtung des Wassers im April 1961 (am 17. April betrug die Temperatur in 100 bis 250 m 4.5 bis 4.3 °C). Im Herbst dieses Jahres wurden als Jahresminimum 45 % Sättigung ermittelt, und bis in den Februar 1962 hinein lagen die Prozentzahlen zum größten Teil unter 60. Die Frühjahrszirkulation 1962 brachte dann aber offensichtlich eine weitgehende Auffüllung des O<sub>2</sub>-Defizits in der Tiefe mit einem Aprilwert von 91 % in 250 m. Selbst um die Jahresmitte lagen diesmal die Werte noch verhältnismäßig hoch, sie näherten sich aber trotzdem im Spätjahr dann wieder dem Minimum des Vorjahres (49 % im Oktober). Im darauffolgenden Frühjahr wurden, wie wir sahen, die gezehrten Sauerstoffmengen erneut ersetzt, mit nahezu 90 % Sättigung traten wir in den aktuellen Zyklus ein.

Es bleibt noch ein Blick auf die grundferneren Schichten des tiefen Hypolimnions zu werfen; dies ist uns allerdings nur für die zweite Hälfte des Jahres 1963/64 möglich, da in den vorangegangenen Serien diese Zone noch nicht in die Untersuchungen einbezogen war. Die niedersten Einzelwerte der drei Profile betragen:

<sup>8</sup> mündliche Mitteilung des Autors zu der unter (3) genannten Literatur; Berechnung ebenfalls auf 400 m ü. M.

Station	Friedrichshafen- Romanshorn	Fischbach-Uttwil	Hersberg-Güttingen
---------	--------------------------------	------------------	--------------------

*in 10 m Entfernung vom Grund:*

Entnahmetiefe	240 m	240 m	230 m
Beobachtungs- zeitraum	Sept. 63—März 64	Aug. 63—März 64	Sept. 63—März 64
Datum	10. 3. 64	5. u. 26. 11. 63	4. 2. 64
Sättigung	51 ‰	53 ‰	57 ‰

*in 20 m Entfernung vom Grund:*

Entnahmetiefe	230 m	230 m	220 m
Beobachtungs- zeitraum	Okt. 63—März 64	Aug. 63—März 64	Okt. 63—März 64
Datum	4. 2. 64	13. 2. 64	10. 3. 64
Sättigung	53 ‰	56 ‰	60 ‰

*in 50 m Entfernung vom Grund:*

Entnahmetiefe	200 m	200 m	190 m
Beobachtungs- zeitraum	Okt. 63—März 64	Aug. 63—März 64	Okt. 63—März 64
Datum	4. 2. 64	4. 2. 64	25. 2. 64
Sättigung	59 ‰	61 ‰	67 ‰

Das relative Defizit erreichte somit während des Beobachtungszeitraums im Extrem in 10 m über dem Grund des Tiefen Schwebs 35 ‰ oder sogar noch etwas mehr, in 20 m Entfernung vom Seeboden praktisch noch nahezu ebenso viel und in 50 m Abstand immerhin noch zwischen 20 und 30 ‰. Eine Erörterung der Höchstwerte aus den uns vorliegenden Zahlen erübrigt sich, da in der genannten Zeit echte Maxima nicht aufgetreten sein konnten. Abschließend sei — zunächst nur andeutend — darauf hingewiesen, daß die minimalen Sättigungswerte von E nach W kontinuierlich zunehmen. Für eine endgültige Aussage reicht das zur Zeit zur Verfügung stehende Material noch nicht aus.

Es erscheint beim augenblicklichen Stand der Untersuchungen auch nicht ratsam, weiterreichende Schlüsse, etwa in der Art einer Bilanzrechnung, schon jetzt zu ziehen. Dies soll einem späteren Zeitpunkt vorbehalten bleiben. Die hier mitgeteilten Werte sind jedoch soweit gesichert, daß sie zur Charakterisierung des derzeitigen Zustandes der Freiwasserregion des Bodensee-Obersees herangezogen werden können.

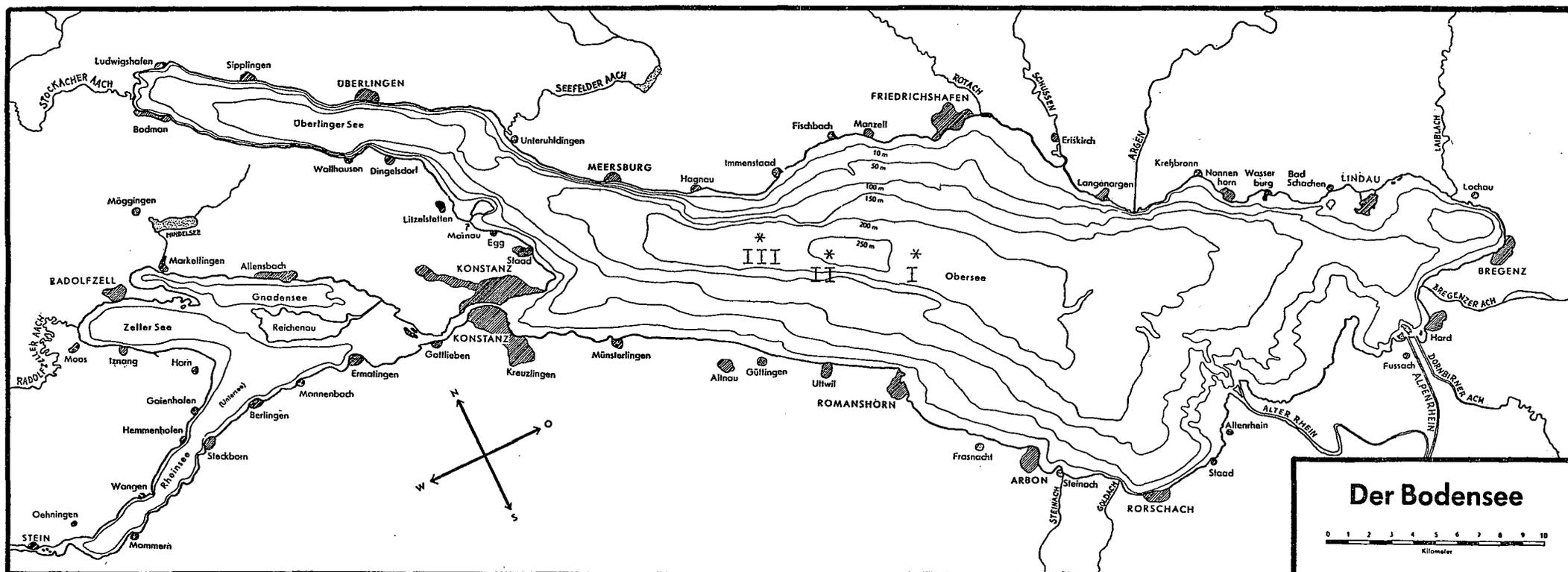
## Zusammenfassung

1. Der Vergleich der Ergebnisse der bisher bekanntgewordenen Sauerstoffuntersuchungen im tiefen Hypolimnion des mittleren Bodensee-Obersees zeigt, daß die neuerdings beobachteten, verhältnismäßig niederen Sättigungswerte in der zweiten Hälfte der Stagnationsperioden im großen und ganzen wohl das Resultat der Entwicklung des Sees in den Jahren nach dem zweiten Weltkrieg sind. Die Werte in 1 bis 1,5 m über dem Grund der größten Seetiefe liegen 1961 bis 1964 um rund 20 bis 25 ‰ unter den Zahlen der Jahre 1953 und 1954.

2. Das im Verlauf einer Stagnationsperiode auftretende relative Gesamtdefizit in dieser Schicht beträgt heute mehr als 40 % gegenüber etwa 20 % im Jahre 1954. Selbst in der 200 m-Tiefenlinie traten 1963/64 Verluste von über 25 % auf.
3. Unter günstigen Umständen (in der neuesten Untersuchungsperiode traten sie zweimal in drei Jahren ein) ist die O<sub>2</sub>-Restauration im tiefen Hypolimnion auch bei dem stärkeren Defizit, wie es heute beobachtet wird, in der Zirkulationsphase noch möglich (die im April 1962 und 1963 festgestellten Sättigungen selbst in 250 m Tiefe betragen über 85 %).
4. Es darf andererseits jedoch als sicher angenommen werden, daß unter bestimmten meteorologischen, also extern bedingten Voraussetzungen die Austauschvorgänge die Tiefenschichten des Hypolimnions im Obersee nicht oder jedenfalls nicht vollständig erreichen. In diesem Fall kann es zu einer teilweisen, vielleicht auch zu einer mehr oder weniger vollständigen Summation der Defizite zweier Jahre kommen. Eine solche Summation könnte bereits unter heutigen Verhältnissen für das biotische Geschehen am Seegrund des Tiefen Schwebes ernsthafte Folgen haben.

## Literatur

- (1) AUERBACH, M., MAERKER, W. und SCHMALZ, J.: Hydrographisch-biologische Bodensee-Untersuchungen I. Arch. f. Hydrobiol./Suppl. III, 1924.
- (2) AUERBACH, M., MAERKER, W. und SCHMALZ, J.: Hydrographisch-biologische Bodensee-Untersuchungen II. Verh. Natw. Ver. Karlsruhe, 30, 1926.
- (3) GRIM, J.: Die chemischen und planktologischen Veränderungen des Bodensee-Obersees in den letzten 30 Jahren. Arch. f. Hydrobiol./Suppl. XXII, 1955.
- (4) HOPPE-SEYLER, F.: Über die Verteilung der absorbierten Gase im Wasser des Bodensees und ihre Beziehungen zu den in ihnen lebenden Tieren und Pflanzen. Schrift. Ver. f. Gesch. d. Bodensees u. s. Umgebung, 24, 1895.
- (5) KLEINSCHMIDT, E.: Beiträge zur Limnologie des Bodensees. Schrift. Ver. f. Gesch. d. Bodensees u. s. Umgebung, 49, 1921.



*Lage der Untersuchungsprofile:*

- I. Friedrichshafen – Romanshorn (Seemitte)
- II. Hauptstation Fischbach – Uttwil (Seemitte)
- III. Hersberg – Güttingen (näher Hersberg)

# Inhalt

Einleitung . . . . .	3
Die thermische Schichtung des Obersees 1963/64 . . . . .	5
Der Sauerstoff im tiefen Hypolimnion des Sees . . . . .	10
Zusammenfassung . . . . .	17
Literatur . . . . .	18