

Bericht Nr. 8

# Die Sauerstoffbilanz des Bodensee-Obersees

Bearbeiter: W. Schmitz



## Vorwort

Die Internationale Gewässerschutzkommission hat kurz nach ihrer Gründung vom Jahre 1961 ab eingehende chemische und biologische Untersuchungen in der Freiwasserzone des Bodensees durch ihre Sachverständigen veranlaßt, wobei ein besonderes Augenmerk den Sauerstoffverhältnissen gewidmet wurde. Ergebnisse der Sauerstoffuntersuchungen sind über die Jahre 1961 bis 1964 bereits in den Berichten Nr. 3 und Nr. 5 der Internationalen Gewässerschutzkommission veröffentlicht worden. Hierbei wurde vergleichend auf ältere Untersuchungen am Bodensee eingegangen.

Von den Bearbeitern des Berichtes Nr. 5 war im Rahmen des ihnen erteilten Auftrages beabsichtigt, nicht nur die Sauerstoffkonzentrationsverhältnisse darzustellen, sondern den Sauerstoffhaushalt des Sees auch bilanzmäßig zu betrachten. Denn auf diese Weise läßt sich der Umfang der Veränderungen des Stoffhaushaltes des Sees klarer beurteilen. Eine derartige Auswertung der Untersuchungsergebnisse war bis zur Zeit der Veröffentlichung des Berichtes Nr. 5 noch nicht abgeschlossen; sie wird hiermit zur Vervollständigung der bisherigen Veröffentlichungen von Untersuchungen über die Sauerstoffverhältnisse vorgelegt.

Ein Vergleich der neueren Untersuchungsergebnisse mit älteren Untersuchungsdaten, die in mancher Hinsicht nicht hinreichend vorliegen, ist deshalb mit gewissen Mängeln behaftet. Mit Rücksicht auf die Reinhaltemaßnahmen im Bodenseegebiet, die keinen Aufschub dulden, ist trotzdem eine Veröffentlichung dieser Untersuchungsergebnisse geboten, da sie immerhin die Größenordnung der Eutrophierungserscheinungen und der Steigerung der biologischen Produktion erkennen lassen.

Die regelmäßig fortgesetzten Untersuchungen am Bodensee durch die Sachverständigen der Internationalen Gewässerschutzkommission haben erlaubt, in die Betrachtungen des folgenden Berichtes auch die neuesten Daten mit einzubeziehen.

Die Internationale Gewässerschutzkommission hat den Bericht auf ihrer 12. Tagung vom 31. Mai 1967 in Wildhaus zustimmend zur Kenntnis genommen und seine Veröffentlichung als Bericht Nr. 8 beschlossen.

# 1. Einleitung

THIENEMANN [5] hat in seiner klassischen Arbeit über den „Sauerstoff im oligotrophen und eutrophen See“, in der auch der Bodensee abgehandelt wird, die Beziehungen zwischen dem Sauerstoffgehalt und den biologischen Produktions- und Abbauprozessen in den Seen aufgezeigt, wobei er den Bodensee als den Typus des oligotrophen Sees hingestellt hat. Wie man heute weiß, ist es nicht in allen Fällen möglich, aus den Sauerstoffverhältnissen Rückschlüsse auf den Produktionszustand des Sees zu ziehen, und auch sonst ist dieses Verfahren mit gewissen Ungenauigkeiten verbunden, die vor allem durch die schwer überschaubaren Austauschverhältnisse, die Schwankungen der Lage des Metalimnions, durch den Seedurchfluß sowie durch Strömungen und Schichtschwankungen hervorgerufen werden können. Daher sind inzwischen neue Wege der Produktionsuntersuchung beschritten worden. Soweit man sich bei der Analyse der Produktionsgröße lediglich auf die Sauerstoffverhältnisse stützt, wird eine vorsichtige Interpretation wohl am Platze sein (ELSTER [2]).

Für den Bodensee ist die Verwendung der Sauerstoffbilanz als Indikator für den Produktivitätszustand unerlässlich, wenn man den Zustand aus den Jahren 1920/25, in denen AUERBACH, MAERKER und SCHMALZ [1] den See gründlich untersucht haben, mit den heutigen Verhältnissen vergleichen will, da zur damaligen Zeit die nunmehr zur Verfügung stehenden Methoden der Produktivitätsmessung noch nicht bekannt waren. Die alten Untersuchungen von AUERBACH und Mitarbeitern, die in vieler Hinsicht für die damalige Zeit erstaunlich konsequent durchgeführt worden sind, weisen lediglich in den Messungen in Tiefen unter 100 m Lücken auf, die als Unsicherheitsfaktor in die vergleichende Betrachtung der Sauerstoffbilanz eingehen. Die Messungen in 150 m Tiefe zu verschiedenen Jahreszeiten mit den ganz wenigen in noch größerer Tiefe runden das Bild jedoch soweit ab, — besonders, wenn man die Meßwerte von ELSTER und EINSELE [3] im Tiefenwasser aus den Jahren 1934/35 einbezieht, — daß eine Extrapolation auf größte Tiefe, wie sie schon THIENEMANN durchgeführt hat, möglich ist.

Für unsere Vergleichszwecke wurden die Urdaten von AUERBACH und Mitarbeitern von  $\text{cm}^3 \text{O}_2/\text{l}$  in  $\text{mg}/\text{l}$  umgerechnet, sowie die Sauerstoffsättigungswerte auf der Basis neuerer Tabellen neu berechnet (mittels  $\text{O}_2$ -Calculator nach BURKARD, bezogen auf Normalluftdruck in 400 m Meereshöhe). Alle weiteren Bilanzgrößen wurden aus diesen neu berechneten Werten errechnet. Sie weichen daher zahlenmäßig von den bei THIENEMANN [5] angegebenen Daten ab.

Diese neu berechneten Ergebnisse von AUERBACH und Mitarbeitern lassen sich unmittelbar mit den ausführlichen Untersuchungen vergleichen, die durch die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee in den Jahren 1961/63 und in mancher Hinsicht noch umfangreicher in der Folgezeit veranlaßt worden waren.

Die Probeentnahme und Bestimmungen des Sauerstoffgehaltes wurden bei diesen Untersuchungen von der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EA WAG) und von der Anstalt für Bodenseeforschung der Stadt Konstanz (Max-Auerbach-Institut) durchgeführt, die Auswertung und Datenverarbeitung von der Landesstelle für Gewässerkunde und wasserwirtschaftliche Planung Baden-Württemberg. In den Berichten Nr. 3 und 5 der Internationalen Gewässerschutzkommission sind die Sauerstoffkonzentrationsverhältnisse des Obersees in den Jahren 1961/64 bereits eingehend behandelt worden.

## 2. Entwicklung der Sauerstoffkonzentrationen im Obersee in den Jahren 1961/66

Zur Vervollständigung der im Bericht Nr. 5 der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee veröffentlichten Befunde der Jahre 1961/63 wird in den Abbildungen 1 und 2 eine zusammenhängende Übersicht über die Entwicklung der Temperaturen und Sauerstoffkonzentrationen an der Hauptmeßstelle Fischbach-Uttwil in den Jahren 1961/66 in Form von Isoplethendarstellungen gegeben. Aus den Isoplethen der Abbildung 1 ist zu erkennen, daß die chemische Schichtung mit der thermischen Schichtung weitgehend parallel verläuft. Die Isoplethen zeigen ferner, daß es sich im Bodensee um periodisch wechselnde Zehrungserscheinungen und Wiederbelüftungsvorgänge handelt, die sich bis ins Tiefenwasser des Sees erstrecken. Auffällig sind dabei die Frühjahrsmaxima des Sauerstoffgehaltes im Epi- und Metalimnion, denen regelmäßig metalimnische Sauerstoffminima folgen. Auch im Hypolimnion machen sich spätestens im Frühsommer ausgedehnte Zehrungserscheinungen bemerkbar, die erst im folgenden Frühjahr bei Eintreten der Vollzirkulation durch Wiederbelüftung ausgeglichen werden.

Überblickt man nun die Entwicklung in den Jahren 1961/66, so ist zu erkennen, daß die Wiederbelüftung des Tiefenwassers immer unvollkommener wird und zum Beispiel Perioden, in denen im Tiefenwasser mehr als 10 mg Sauerstoff/l beobachtet werden können, immer kürzer werden und am Ende gänzlich verschwinden. Die metalimnischen und hypolimnischen Felder geringerer Sauerstoffkonzentrationen im Isoplethenbild laufen allmählich zusammen. Aus dem Isoplethenbild gewinnt man überdies aus der zeitlichen Verschiebung der Sauerstoffminima den Eindruck, daß die Biomasse der Frühjahrsproduktion, welche durch Sauerstoffübersättigungen im Epi- und Metalimnion zu dieser Jahreszeit angezeigt wird, im Laufe des Sommers und Herbstes im Metalimnion abgebaut wird. Beträchtliche Teile dieser Biomasse werden jedoch im Hypolimnion offenbar erst später, nachdem sie durch herbstliche und winterliche Zirkulationsvorgänge weiter in die Tiefe verfrachtet worden sind, unter gleichzeitiger Sauerstoffzehrung zersetzt.

Auffällig ist auch, daß eine bemerkenswerte Verschlechterung im Sauerstoffgehalt des Hypolimnions im Anschluß an die Seegefrierne des Winters 1962/63 aufgetreten ist. Das Isoplethenbild zeigt, daß das Tiefenwasser eine Temperatur von etwa  $3,7^{\circ}\text{C}$  im Frühjahr 1963 erreicht hat, ein Zustand, der für den Bodensee mit Tiefentemperaturen von sonst etwa  $4,2^{\circ}$  sehr ungewöhnlich ist. Bei den Druckverhältnissen in der Bodenseetiefe liegt das Dichtemaximum des Wassers — allerdings ohne Rücksicht auf gelöste Mineralstoffe — bei  $3,7^{\circ}\text{C}$ , woraus sich eine etwas größere Stabilität gegenüber den Zirkulationskräften, die von der Oberfläche her angreifen, und vielleicht geringere Durchlüftungsmöglichkeiten des Tiefenwassers ergeben. Auch im Frühjahr 1966 waren die Temperaturverhältnisse noch nicht wieder in dem Zustand, der vor der Seegefrierne (geschlossene Eisdecke) im Tiefenwasser herrschte.

## 3. Sauerstoffbilanzberechnung

Der Sauerstoffhaushalt eines Sees läßt sich aus dem Bild der Isoplethen nicht vollständig ablesen, da die Wassermassen in der Tiefe des Sees unter Umständen im Vergleich zur Wassermasse im flacheren Bereich nur gering sind und bilanzmäßig wenig zu Buche schlagen. Des-

halb ist, wie THIENEMANN [5] erstmalig gezeigt hat, zur Aufstellung einer Bilanz die Berücksichtigung der Volumina der einzelnen Schichten des Sees erforderlich. Es wird hier THIENEMANN's Vorgehen befolgt mit kleinen Änderungen im Berechnungsverfahren, die die Genauigkeit verbessern.

Aus den vorliegenden Bodenseedaten wurden, soweit an mehreren Untersuchungsorten gemessen wurde, die Monatsmittel aller Messungen für die Tiefenschichten 0–10, 10–20, 20–30, 40–50, 50–60, 60–100, 100–200, 200–252 m ermittelt. Bei der Auswertung der Daten von AUERBACH mußten im Bereich von 30–100 m die Tiefenschichten 30–50 und 50–100 m herangezogen werden. Für die Untersuchungen 1964/66 beziehen sich die Ergebnisse lediglich auf die Hauptstation Fischbach-Uttwil.

Für die Mittelwertberechnung wurden alle Meßwerte innerhalb einer Schicht, einschließlich der oberen und unteren Begrenzungstiefe, berücksichtigt. Die Meßwerte von 10 m Tiefe wurden also einmal für die Schicht 0–10 m und zum anderen für die Schicht 10–20 m zur Berechnung verwendet.

Aus den Konzentrationsmittelwerten der einzelnen Schichten ergibt sich durch Multiplikation mit deren Wasservolumen der Sauerstoffgehalt der Schicht, durch Summieren dieser Sauerstoffmengen der Sauerstoffgehalt des ganzen Sees ( $O_2$ -[H+E]) oder der Sauerstoffgehalt des Epilimnions ( $O_2$ -E) oder des Hypolimnions ( $O_2$ -H). Die Schichtvolumina wurden den Angaben von PENCK [4] entnommen; sie sind in Tabelle 1 angegeben.

Die umfangreichen Berechnungen wurden mit datenverarbeitenden IBM-Maschinen erledigt. Die Daten der Bodenseeuntersuchungsergebnisse 1961/66 waren zu diesem Zweck in der Landesstelle für Gewässerkunde Baden-Württemberg auf IBM-Lochkarten archiviert worden.

#### 4. Sauerstoffbilanz als Produktionsmaßstab

Der Grundgedanke der Betrachtung THIENEMANN'S [5] über die Sauerstoffbilanz der Seen ist der, daß in unseren temperierten Zonen die Stabilität thermischer Schichtungen der Seen einen Gasaustausch mit der Wasseroberfläche und weitgehend auch zwischen dem Epilimnion und Hypolimnion vom Frühjahr bis zum Herbst hin unterbindet. Das gut durchleuchtete Epilimnion ist weitgehend identisch mit der Zone der pflanzlichen Produktion im See. Im Hypolimnion hat diese nur untergeordnete Bedeutung. Da die im Epilimnion produzierte Biomasse — hauptsächlich kurzlebige Planktonorganismen — abstirbt, ins Hypolimnion absinkt und dort zersetzt wird, kann die dabei auftretende Sauerstoffzehrung als Maß der Produktionsgröße im Epilimnion dienen.

Die Grenze zwischen Epilimnion und Hypolimnion wird für unsere Berechnungen wie bei THIENEMANN [5] bei 10 m Tiefe gezogen. Dies ist natürlich in gewisser Weise willkürlich, da das Metalimnion im Laufe des Sommers von geringeren zu größeren Tiefen, die im Herbst sehr beträchtlich werden, absinkt. Im Bodensee liegt die durchschnittliche Tiefe des Metalimnions zwischen Frühjahrs- und Herbstzirkulation innerhalb 10 und 20 m. Auch die Zone der pflanzlichen Produktion reicht teilweise tiefer als 10 m. Für die Ermittlung des hypolimnischen sommerlichen Sauerstoffschwundes, der im Gefolge der sauerstoffzehrenden Abbauprozesse eintritt, hat die Einbeziehung der 10–20-m-Schicht in das Hypolimnion zur Folge, daß eher ein zu günstiges Bild des Sauerstoffschwundes erzielt wird, weil der

Sauerstoffeintrag durch Photosynthese und zum Teil auch durch oberflächliche Zirkulationsströme das Sauerstoffdefizit des Hypolimnions mindert.

Neben dieser Schwierigkeit bei der Festsetzung der für die Berechnung zu verwendenden Grenztiefe Epilimnion-Hypolimnion gibt es noch andere Umstände, welche Ungenauigkeiten für solche Berechnungen mit sich bringen. Für den Bodensee spielen dabei vorwiegend die folgenden eine Rolle:

1. Der See wird vom Rhein durchflossen. Es fließt jährlich etwa 25 Prozent seines Inhaltes ab, und zwar vorwiegend aus der Produktionszone.
2. Die Schichtungsschwankungen im Bodensee können sehr lebhaft sein und dadurch die Bedeutung mancher Meßwerte sehr fraglich machen.
3. Die Planktonproduktion im Hypolimnion kann nicht ganz vernachlässigt werden.
4. Die „kurzgeschlossenen Kreisläufe“ Produktion-Abbau sind sowohl im Epilimnion wie im Hypolimnion wirksam.

Es kann daher nicht das Ziel der folgenden Betrachtung sein, aus den Schwankungen der Sauerstoffmengen im See eine zahlenmäßige exakte Berechnung der Produktionsgröße durchzuführen. Jedoch erscheint es möglich, anhand der berechneten Werte das Zustandsbild in den Jahren 1920/25 mit demjenigen der Jahre 1961/66 zu vergleichen. Die erwähnten störenden Faktoren waren damals wie heute wirksam, wenngleich, soweit sie mit der Planktonproduktion zusammenhängen, in unterschiedlichem Maße.

## 5. Parameter der Sauerstoffbilanz

Hinsichtlich der für die Bilanzberechnung im einzelnen heranzuziehenden Größen halten wir uns zunächst an THIENEMANN [5]. Er verwendete u. a. folgende Daten für die Analyse der Sauerstoffbilanz und der Produktionsgröße:

1. Den absoluten Sauerstoffinhalt des Epilimnions,  $O_2-E$ ;
2. Den absoluten Sauerstoffinhalt des Hypolimnions,  $O_2-H$ ;
3. Den absoluten Sauerstoffinhalt des Sees,  $O_2 [E+H]$ ;
4. Das Verhältnis des absoluten Sauerstoffinhaltes im Hypolimnion zum absoluten Sauerstoffinhalt im Epilimnion,  $O_2 [H/E]$ ;
5. Das Sauerstoffdefizit des Hypolimnions,  $\Delta H$ . Dies ist die Differenz zwischen dem absoluten Sauerstoffinhalt des Hypolimnions und demjenigen Sauerstoffinhalt, den dieses bei Sättigung des Wassers mit Sauerstoff, bezogen auf den Luftdruck an der Wasseroberfläche, haben würde. Der Sauerstoffinhalt beim Sättigungswert wird für die einzelnen Schichten aus der mittleren Temperatur der Schicht errechnet. Die ermittelten Sauerstoffinhalte aller Schichten des Hypolimnions werden dann summiert. Das Sauerstoffdefizit wird entweder in t oder mg/l angegeben, wobei der letzte Wert sich aus dem Zahlenwert in t durch Division des hypolimnischen Wasservolumens in  $km^3$  berechnet. Das Defizit in mg/l läßt sich auch aus der mittleren Sauerstoffkonzentration des Hypolimnions (schichtweise berechnet) und der mittleren Sauerstoffkonzentration beim Sättigungszustand des Wassers (ebenfalls schichtweise berechnet) ermitteln;

6. Das Sauerstoffdefizit des Epilimnions,  $\Delta E$ , berechnet nach den gleichen Prinzipien wie  $\Delta H$  in t oder mg/l;

7. Das Sauerstoffdefizit des Sees,  $\Delta [E+H]$ , das sich aus der Summe der berechneten Größen  $\Delta E$  und  $\Delta H$  in t oder mg/l ergibt.

Alle diese Werte sind als Monatsmittel errechnet worden.

Weitere Parameter der Sauerstoffbilanz werden in Abschnitt 6 behandelt.

## 6. Bilanzwerte für den Bodensee 1920/25 und 1961/66

### a) Sauerstoffinhalt des Hypolimnions und Epilimnions

Die Abbildung 3 zeigt die Ganglinie der Monatsmittel der Gesamtmenge des Sauerstoffs im Hypolimnion ( $O_2-H$ ) und im Epilimnion ( $O_2-E$ ) über die Jahre 1961/66. In das Kurvenbild jedes Jahres ist gleichfalls der Jahresgang der entsprechenden Mittelwerte aus den Jahren 1920/25 eingetragen. Der Vergleich beider Kurvenverläufe im Hypolimnion zeigt einen deutlichen Jahresgang mit einem Maximum im März in den Jahren 1920/25 gegenüber April und Mai in den Jahren 1961/66 und einem Minimum im Oktober für 1920/25 gegenüber solchen im Oktober bis Dezember während der neuen Beobachtungsserie. Teilweise treten jetzt im Frühjahr zwei Spitzen des Sauerstoffgehaltes auf. Bezeichnend ist, daß die Minima neuerdings bis 20 Prozent kleiner sind als in den Jahren 1920/25. Die Maxima im Frühjahr lagen in den Jahren 1962 und 1963 ebenso hoch wie in den 20er Jahren, ein Anzeichen dafür, daß die Wiederbelüftung noch in demselben Maße wie früher wirksam war. Die Maxima in den Jahren 1964 und 1965 sowie 1966 liegen jedoch erheblich niedriger, wodurch die nachhaltige Verschlechterung des Sauerstoffzustandes in den letzten Jahren offenkundig wird.

Auch die Schwankungen des Sauerstoffinhaltes des Epilimnions weichen in neuerer Zeit erheblich von denen der Jahre 1920/25 ab. Die Maxima treten neuerdings anstatt früher im März im April und Mai auf. Auch die Minima sind des öfteren von früher seinerzeit Juli auf nunmehr August oder September verschoben. Die heutigen Ganglinien überschreiten die frühere regelmäßig im Frühjahr und Sommer und unterschreiten sie im Herbst und Winter. Diese Verhältnisse spiegeln deutlich die Zunahme der Produktionsprozesse wie auch der Zehrungsprozesse im Epilimnion wider. Die Jahresmittelwerte des epilimnischen Sauerstoffgehaltes weichen in beiden Zeiträumen nicht wesentlich voneinander ab, was auf Grund der günstigen Gasaustauschverhältnisse der obersten Wasserschichten auch nicht zu erwarten war.

In der folgenden Tabelle 2 sind die Jahresmittel, die maximalen und die minimalen Monatsmittel verschiedener weiterer Kriterien, die THIENEMANN [5] für den Produktionszustand herangezogen hat, zusammengestellt. Es werden dabei verglichen die Jahre 1920/25 mit den Einzeljahren 1961/62, 1962/63, 1963/64, 1964/65, 1965/66 (jeweils das Seejahr April bis März des folgenden Jahres gerechnet).

### b) Sauerstoffinhalt des Sees, $O_2-[E+H]$

In der ersten Gruppe sind die Werte für den Gesamtsauerstoffinhalt des Sees  $O_2-[E+H]$  aufgeführt. Nach THIENEMANN zeigen unter den Seentypen oligotrophe Seen die geringsten Jahresschwankungen dieser Werte. Die hier angegebenen Zahlen lassen deutlich werden, daß der Bodensee auch in der heutigen Zeit immer noch recht kleine Schwankungsbeträge im Vergleich zu echt eutrophen Seen aufweist.



c)  $O_2$  [H/E]

In einer weiteren Zahlengruppe sind die Verhältniszahlen des hypolimnischen zum epilimnischen Sauerstoffinhalt angeführt. Man sieht, daß dieses Verhältnis im Jahresmittel neuerdings ein wenig ungünstiger als in den 20er Jahren liegt, ohne jedoch in der Größenordnung sehr davon abzuweichen. Nach THIENEMANN [5] soll diese Verhältniszahl in den echt eutrophen Seen kleiner als 1 sein. THIENEMANN hat bereits darauf hingewiesen, daß in künstlich eutrophierten Seen, wie z. B. im Zürichsee, das Verhältnis wesentlich höher liegt.

d) *Epilimnisches Sauerstoffdefizit,  $\Delta E$*

Die Zahlen der Tabelle 2 lassen erkennen, daß gewisse Schwankungen um den Sättigungswert auch bereits in den Jahren 1920/25 zu verzeichnen waren, wobei auch Übersättigungen (negative  $\Delta E$ -Werte) im Frühjahr verzeichnet werden konnten. Das heutige Bild weicht davon allerdings durch wesentlich größere Abweichungen des Sauerstoffgehaltes vom Sättigungswert nach oben oder unten ab, was auf eine deutliche Zunahme der Produktions- und Zehrungsprozesse schließen läßt.

e) *Hypolimnisches Sauerstoffdefizit,  $\Delta H$*

Besonders aufschlußreich ist die Betrachtung der Sauerstoffdefizitwerte des Hypolimnions (Tabelle 2, Abb. 4 und 5). Diese liegen neuerdings im Jahresmittel etwa zwei- bis dreimal so hoch wie in den Jahren 1920/25. Das gleiche gilt für die monatlichen Maxima des hypolimnischen Sauerstoffdefizits. Das Jahresmaximum von  $\Delta H$ , das in den 20er Jahren im November konstatiert wurde, wurde jetzt zu recht verschiedenen Zeiten zwischen Oktober und März beobachtet. Ein hypolimnisches Sauerstoffdefizit war auch in den Jahren 1920/25 das ganze Jahr über vorhanden. Die Werte des damaligen Minimums (Monat Mai) wurden auch im Frühjahr der Jahre 1963 und 1964 annähernd erreicht oder unterschritten, ein Anzeichen dafür, daß die physikalische und biologische Wiederbelüftung des Sees auch heute noch gut funktionieren kann. Weniger günstig war das Bild jedoch im Frühjahr 1962 sowie wiederum 1965 und 1966, wo das hypolimnische Sauerstoffdefizit im Minimum des Jahres noch größer war als im Maximum der Jahre 1920/25.

f) *Sauerstoffdefizit des Sees,  $\Delta [E+H]$*

Schließlich sind in Tabelle 2 und in Abbildung 4 und 5 auch noch Werte für das Sauerstoffdefizit des gesamten Sees  $\Delta [E+H]$  angeführt. Bei dem volumenmäßig stark überwiegen- den Hypolimnion des Bodensees zeigen diese Werte nahezu das gleiche Bild wie die Angaben für  $\Delta H$ .

Die Zahlensammenstellungen und Kurven lassen insgesamt erkennen, daß sich in der Sauerstoffbilanz des Bodensees in der Tat gegenüber den 20er Jahren nachhaltige Veränderungen vollzogen haben. Es zeigt sich, daß die absoluten Sauerstoffdefizite des Sees gegenüber früher beachtlich zugenommen haben und besonders in den letzten Jahren im Frühjahr auch nicht mehr annähernd ausgeglichen wurden.

g) *Korrigiertes Sauerstoffdefizit des Hypolimnions,  $\Delta H_{CORR}$*

Um zu beurteilen, in welchem Maße das Ansteigen der Sauerstoffdefizite in Beziehung zur Produktionsgröße des Sees steht, ist allerdings noch eine Korrektur der absoluten Sauerstoffdefizitwerte erforderlich. Zum Teil verbirgt sich nämlich im Jahresgang der Sauerstoffdefizite die Auswirkung des Temperaturganges des Seewassers auf diese Werte. Da bei abnehmender Temperatur der Wert für die Sättigungskonzentration des Sauerstoffs im Wasser steigt, so ergibt sich in solchem Fall eine Zunahme des Sauerstoffdefizits bereits, ohne

daß der Sauerstoffgehalt des Wassers absinkt. Daher wurden für die folgende Darstellung des „korrigierten Sauerstoffdefizits“ im Epilimnion des Bodensee-Obersees alle Werte auf den absoluten Sauerstoffsättigungsgehalt im Monat mit der wärmsten Wassertemperatur (August 1961, September 1920/25) bezogen. Das Ansteigen des Sauerstoffsättigungsdefizits mit fallender Temperatur wird hierdurch ausgeglichen. Die Darstellung Abbildung 6 enthält als Maßstab des Sauerstoffdefizits sowohl die absoluten Sauerstoffwerte in  $10^3$  t, desgleichen in  $\text{mg O}_2/\text{l}$  und schließlich in  $\text{g}/\text{m}^2$  Oberfläche des Hypolimnions des Bodensee-Obersees.

Die Angabe der Daten, bezogen auf die Oberfläche des Hypolimnions, vermittelt eine unmittelbare Beurteilung des Sauerstoffeintrags durch die Oberfläche, der zum Ausgleich des Defizits jährlich erforderlich wird und bringt auch die Relationen des Sauerstoffdefizits zur Produktionsgröße, die man zweckmäßiger auf die Seeoberfläche bezieht, besser zum Ausdruck.

Aus der Abbildung 6 ist ersichtlich, daß das von Temperatureinflüssen bereinigte Sauerstoffdefizit vom Frühjahr an zunimmt und im Herbst seinen höchsten Wert erzielt. Das Maximum des Defizits erreichte im Herbst 1965 den dreifachen Betrag gegenüber den Jahren 1920/25. Im Minimum lag es 1964 und 1965 immer noch so hoch wie im Maximum der Jahre 1920/25. In den Jahren 1962 und 1963 war das Defizit zur Zeit der Frühjahrszirkulation ausgeglichen, wozu zum Teil die Sauerstoffproduktion des Phytoplanktons beigetragen hat. Dies war z. B. im Mai 1962 der Fall. Im Isoplethenbild (Abbildung 2) ist an dieser Stelle ein Übersättigungsmaximum in 40 m Tiefe zu erkennen. Weiterhin ist ersichtlich, daß unter der Wirkung der Seegefrörne das Defizit im März 1963 wieder beträchtlich zugenommen hat. Das Isoplethenbild (Abbildung 2) verzeichnet hier ein Zehrungsfeld in 100 bis 150 m Tiefe.

#### *h) Weitere Kriterien der Sauerstoffbilanz*

Eine Zusammenstellung weiterer Daten der Sauerstoffbilanz des Bodensees befindet sich in Tabelle 3. Sie enthält zunächst die maximalen Sauerstoffdefizite des Hypolimnions der einzelnen untersuchten Jahre, und zwar einmal als aktuelle Defizite, d. h. bezogen auf den Sauerstoffsättigungsgehalt für die jeweilige Wassertemperatur, und zum anderen als temperaturkorrigierte Defizite, die wie oben beschrieben berechnet wurden.

In die Tabelle aufgenommen wurden ferner die relativen Defizite der einzelnen Jahre, d. h. die Differenzen des Sauerstoffgehaltes des Hypolimnions zwischen Anfang und Ende der Stagnationsperiode, also zwischen Maximum des Sauerstoffinhalts im Frühjahr und Minimum im Herbst, und die durchschnittliche Zehrung je Tag in dieser Periode.

Die genannten Werte sind in der Tabelle sowohl als aktuelle Defizite wie als temperaturkorrigierte Defizite angeführt.

Betrachten wir zunächst die aktuellen Defizite, für welche auch Zahlenwerte von ELSTER und EINSELE [3] vorliegen, die ebenfalls in Tabelle 3 angeführt sind, so wird die kontinuierliche Zunahme des Sauerstoffdefizites und der Sauerstoffzehrungserscheinungen im gesamten Zeitraum, über den Beobachtungen vorliegen, deutlich. Die Zahlenwerte von ELSTER und EINSELE liegen ausnahmslos zwischen denen der Jahre 1920/25 und den 60er Jahren.

Eine Betrachtung der korrigierten Defizite zeigt, daß die in den einzelnen Jahren auftretenden Maxima in den sechziger Jahren um etwa 1,5- bis 3mal höher liegen als 1920/25. In der Periode 1961/66 treten dabei erhebliche Schwankungen auf, welche durch die ungleiche Ausgangslage des Defizits im Frühjahr in den einzelnen Jahren bedingt sind. Deutlich wird hier die laufende Zunahme des Defizits vom Zeitpunkt der Seegefrörne an. Die Wiederbelüftung hat offensichtlich der Zunahme der Zehrungserscheinungen in verschiedenen Jahren nicht Schritt halten können.

Betrachtet man die relativen korrigierten Defizite, bei denen die jeweilige Ausgangslage im Frühjahr nicht ins Gewicht fällt, so ergibt sich auch hier eine Zunahme auf das 1,5fache im Anfang der sechziger Jahre gegenüber dem Zeitraum 1920/25. Die Steigerung des Defizits nach dem Zeitraum der Seegefrörne bis in die neueste Zeit auf das 2,5fache von 1920/25 wird ebenfalls deutlich. Die Progression ist ebenfalls in den errechneten durchschnittlichen täglichen Sauerstoffzehrungswerten zu erkennen.

## 7. Sauerstoffbilanz des Bodensees, biologische Produktion und Zufuhr sauerstoffzehrender Stoffe

Abschließend seien noch einige Betrachtungen über das Verhältnis der im Bodensee festgestellten Sauerstoffdefizite zur Menge der im Bodensee produzierten Biomasse und der durch Zuflüsse und Abwasser zugeführten sauerstoffzehrenden Substanzen angestellt. Aus den obengenannten Gründen ist ersichtlich, daß es sich hierbei nur um größenordnungsmäßige Abschätzungen handeln kann und nicht um exakte Produktionszahlen.

Wie die Untersuchungen der Internationalen Gewässerschutzkommission seit dem Jahre 1961 gezeigt haben, müssen wir am Bodensee mit einer Jahresfracht von etwa 36 000 t BSB<sub>5</sub> rechnen, die sich aus der Grundbelastung der Zuflüsse sowie aus den Abwasserlasten der Ufergemeinden und der Zuflüsse zusammensetzt. Unter Berücksichtigung des Umstandes, daß die zugeführten Stoffe auch über einen Zeitraum von fünf Tagen hinaus noch abgebaut werden, errechnet sich eine jährliche Gesamtsauerstoffzehrung aus dieser Stoffzufuhr von etwa 45 000 t ( $BSB_{\infty} = BSB_5 \cdot 1,25$ ). Unter der weiteren Annahme gleichmäßiger Sauerstoffzehrungsgeschwindigkeit gelangt man zu einem Anteil der Sauerstoffzehrung durch zugeführte Stoffe von 0,30 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>d. Zieht man diese Zahl von den temperaturkorrigierten Zehrungswerten (Tabelle 3, letzte Spalte) ab, so ergeben sich die Restzehrungen, die aus der im See produzierten Biomasse herrühren müssen. Diese Werte sind in Tabelle 4 angeführt. In einer weiteren Spalte der Tabelle finden sich die Zahlen für die entsprechenden Kohlenstoffmengen, wenn man davon ausgeht, daß der Sauerstoffverbrauch hauptsächlich durch die Oxydation von in Organismen inkorporiertem Kohlenstoff zustandekommt. Diese Zahlenwerte passen gut in unsere Vorstellungen von der Produktionsgröße des Bodensees.

Schließlich ist in der letzten Spalte der Tabelle das Verhältnis der Sauerstoffzehrung, die mutmaßlich aus dem Abbau im See selbst produzierten Substanzen herrührt, zur Sauerstoffzehrung aus dem Abbau zugeführter Fremdstoffen aufgeführt. Danach macht in neuester Zeit der Anteil der biologischen Produktion an der Zehrung mehr als das Dreifache gegenüber dem Anteil aus Fremdstoffen aus.

## 8. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

a) Die Entwicklung des Bodensees weist in den Jahren 1961/66 besonders im Anschluß an die Seegefrörne eine deutliche Verschlechterung des Sauerstoffzustandes im Hypolimnion auf (Abbildung 1 und 2).

- b) Anhand von Untersuchungsdaten von AUERBACH und Mitarbeitern aus den Jahren 1920/25 und der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee aus den Jahren 1960/66 wurde die jährliche Bilanz der Veränderungen des Sauerstoffinhalts im Epilimnion und Hypolimnion des Sees ermittelt.
- c) Als Maßstab der Veränderungen im Sauerstoffhaushalt wurden vor allem die Defizite gegenüber dem jeweiligen Sättigungszustand herangezogen. Dabei wurde sowohl die absolute Größe des Defizits in Betracht gezogen, wie auch die Veränderung des Defizitbetrages innerhalb eines Sommers (relatives Defizit). Die Defizite wurden als absolute Werte für den Bodensee und außerdem in den Einheiten mg/l und g/m<sup>2</sup> berechnet. Die Einflüsse von Temperaturschwankungen im See auf das Defizit durch Änderung des Sauerstoffsättigungs-Bezugswertes wurden durch Korrektur eliminiert.
- d) Die Bilanzwerte zeigen (Abbildungen 3 bis 6, Tabellen 2 und 3), daß die Auswirkung der sauerstoffzehrenden Vorgänge auf den Sauerstoffhaushalt sich seit 1961 gegenüber dem Zustand 1920/25 verdoppelt bis verdreifacht hat.
- e) Seit dem Jahre 1963 hält die Wiederbelüftung bisweilen mit den Zehrungsvorgängen nicht mehr Schritt, so daß bei ungünstiger Ausgangslage des Sauerstoffgehaltes im Frühjahr besonders hohe Defizite im Herbst entstehen. Die Zehrungsvorgänge und die Wiederbelüftung liegen zur Zeit in der Größenordnung von 200 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> während eines Halbjahres. Im Winter 1963/64 war der Wiederbelüftungseffekt wesentlich geringer und hatte eine Aufstockung der Defizite in den letzten Jahren zur Folge.
- f) Ein Vergleich mit Angaben von ELSTER und EINSELE aus dem Jahre 1935 zeigt, daß die damaligen Defizite bereits höher als 1920/25 lagen, jedoch bei weitem nicht die heutige Höhe erreichten.
- g) Eine größenordnungsmäßige Abschätzung auf der Basis der zufließenden Jahresfracht sauerstoffzehrender Fremdstoffe (BSB<sub>5</sub>-Untersuchungen 1961/62) läßt darauf schließen, daß zur Zeit die dem See zugetragenen organischen Stoffe nur zu etwa 25–30% gegenüber den im See durch Photosynthese produzierten Stoffen an der Sauerstoffzehrung beteiligt sind.

## Literatur

- [1] AUERBACH M., MAERKER W. und SCHMALZ J.: Hydrographisch-biologische Bodensee-Untersuchungen. II. Ergebnisse der Jahre 1923—24 und Zusammenfassung 1920—24. Verh. Naturw. Ver. Karlsruhe 30, 1 bis 128, 1924/26
- [2] ELSTER H. J.: Limnologische Untersuchungen im Hypolimnion verschiedener Seentypen. Mem. Ist. Ital. Idrobiol., supp. 8: 83—119, 1955
- [3] ELSTER H. J., EINSELE W.: Beiträge zur Hydrographie des Bodensees (Obersee). Int. Rev. Hydrobiol. 35, 520 bis 585, 1937
- [4] PENCK A.: Morphologie der Erdoberfläche. Stuttgart, Engelhorn, 1894
- [5] THIENEMANN A.: Der Sauerstoff im eutrophen und oligotrophen See. Die Binnengewässer 4, 1928

*Tabelle 1*

## Volumen und Fläche des Bodensees

(nach A. Penck [4] S. 152/53)

<i>Schicht</i>	<i>Obersee</i>
0— 10 m	4302 Mio m <sup>3</sup>
10— 20	4032
20— 30	3828
30— 40	3636
40— 50	3401
50—100	13822
100—150	8854
150—200	4264
200—252	1457
<hr/>	
<i>Fläche des Obersees:</i>	476 km <sup>2</sup>
<i>Fläche des Obersees unterhalb 10 m:</i>	408 km <sup>2</sup>

*Tabelle 4*

## Sauerstoffzehrung und Produktion im Bodensee-Obersee

	Zehrg. g/m <sup>2</sup> d korr.	Restzehrung aus Produktion g/m <sup>2</sup> d	Verhältnis Zehrg. aus Fremdstoffen zu Zehrg. aus Produktion	Berechnete Menge produz. C g/m <sup>2</sup> d
1920/25	0,57			0,21 <sup>*)</sup>
1961	0,82	0,52	1 : 1,7	0,20
1962	1,23	0,93	1 : 3,1	0,35
1963	1,17	0,87	1 : 2,9	0,35
1964	1,31	1,01	1 : 3,3	0,38
1965	1,36	1,06	1 : 3,5	0,40

<sup>\*)</sup> bezogen auf Zehrung 0,57 g/m<sup>2</sup> d

Tabelle 2

## Hauptdaten zum Sauerstoffhaushalt des Bodensee-Obersees

	1920/25	1961/66	1961/62	1962/63	1963/64	1964/65	1965/66
<b>O<sub>2</sub> [H+E] in 10<sup>3</sup> to</b>							
Jahresmittel	514	480	463	500	512	457	469
Max	552 = +7% (III)	+10%	509 (III)	555 (IV)	545 (V)	505 (IV)	503 (V)
Min	487 = -5% (X)	-10%	118 (X)	460 (IX)	475 (IX)	417 (IX)	394 (XI)
<b>O<sub>2</sub>H/O<sub>2</sub>E</b>							
Jahresmittel	10,4	9,8	9,5	9,9	9,7	10,3	9,5
<b>Δ E in mg/l</b>							
Jahresmittel	-0,16	0,12	0	0,71	-0,24	0,09	0,06
Max	0,85 (I)	1,6	1,59 (II)	2,58 (II)	1,52 (XII)	1,60 (II, III)	1,20 (II)
Min	-0,81 (V)	-1,9	-1,74 (VII)	-1,51 (VI)	-2,29 (V)	-2,60 (V)	-1,50 (VI)
<b>Δ H in mg/l</b>							
Jahresmittel	0,86	1,75	2,00	1,36	1,59	2,37	1,93
Max	1,17 (XI)	2,6	2,77 (X)	2,11 (III)	2,14 (II)	3,08 (XII)	3,08 (XI)
Min	0,42 (V)	1,0	1,35 (III)	0,30 (IV)	0,64 (V)	1,48 (IV)	1,35 (V)
<b>Δ [E+H] in mg/l</b>							
Jahresmittel	0,77	1,68	1,81	1,24	1,42	2,17	1,76
Max	1,09 (XI)	2,5	2,57 (X)	1,97 (III)	2,01 (XII)	2,93 (XII)	2,86 (XI)
Min	0,31 (V)	0,9	1,30 (IV)	0,19 (IV)	0,43 (V)	1,39 (IV)	1,14 (V)

Römische Ziffern = Monat des Auftretens der Maxima und Minima

Tabelle 3

Hauptdaten zum Sauerstoffhaushalt des Bodensee-Obersees

	Max. aktuelles Defizit g/m <sup>2</sup>	Relatives aktuelles Defizit g/m <sup>2</sup>	Zehrg. g/m <sup>2</sup> d aktuell	Max. korr. Defizit g/m <sup>2</sup>	Relatives korr. Defizit g/m <sup>2</sup>	Zehrg. g/m <sup>2</sup> d korr.
1920/25	137	79	0,43	113	103	0,57
1935*)	155	100	0,63			
1961/62	294	135	0,75	282	147	0,82
1962/63	197 (IX)	149	0,99	172	147	1,23
1963/64	218 (XII)	144	0,69	157	140	1,17
1964/65	327	170	0,71	289	196	1,31
1965/66	327	184	1,02	346	245	1,36

\*) nach ELSTER [2]  
Römische Ziffern = Monat des Auftretens der Maxima und Minima



Abb. 1

Temperatur °C

Bodensee - Obersee  
Vertikalprofil Fischbach - Uttwil

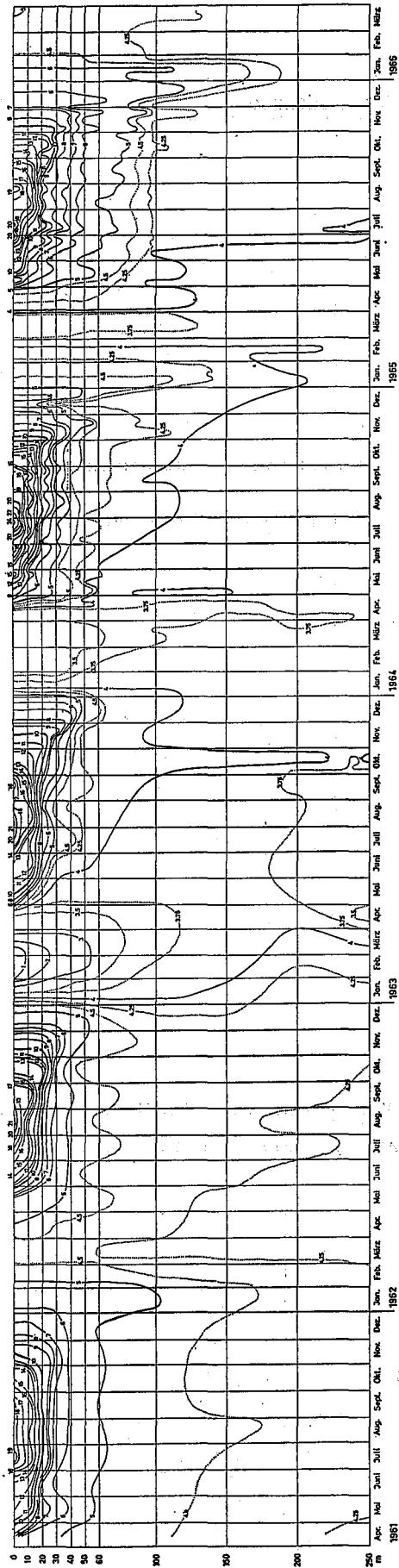


Abb. 2

Sauerstoffgehalt mg/l O<sub>2</sub>

Bodensee - Obersee  
Vertikalprofil Fischbach - Uttwil

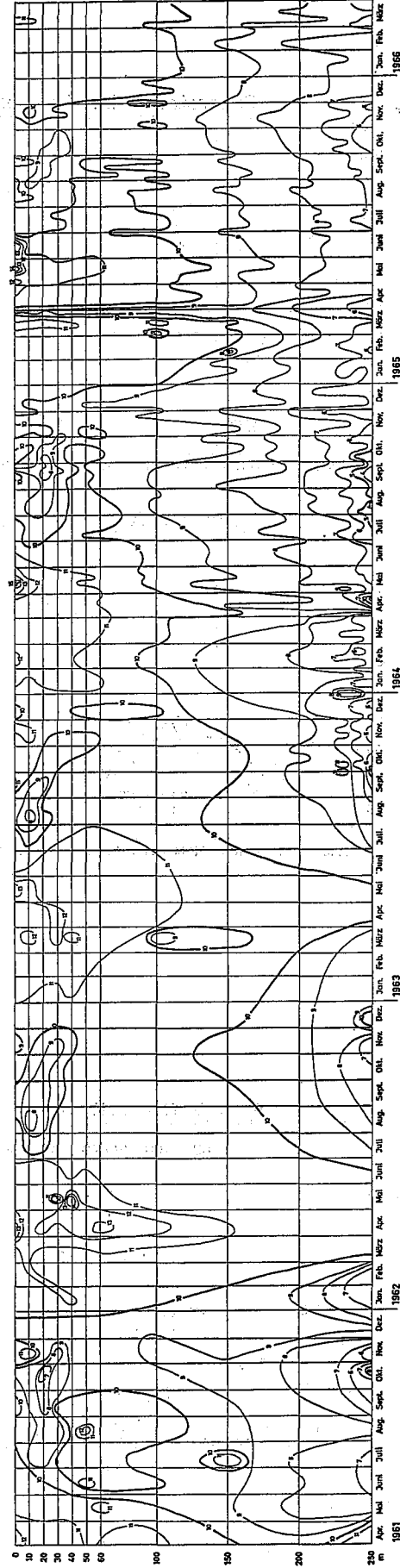


Abb. 3

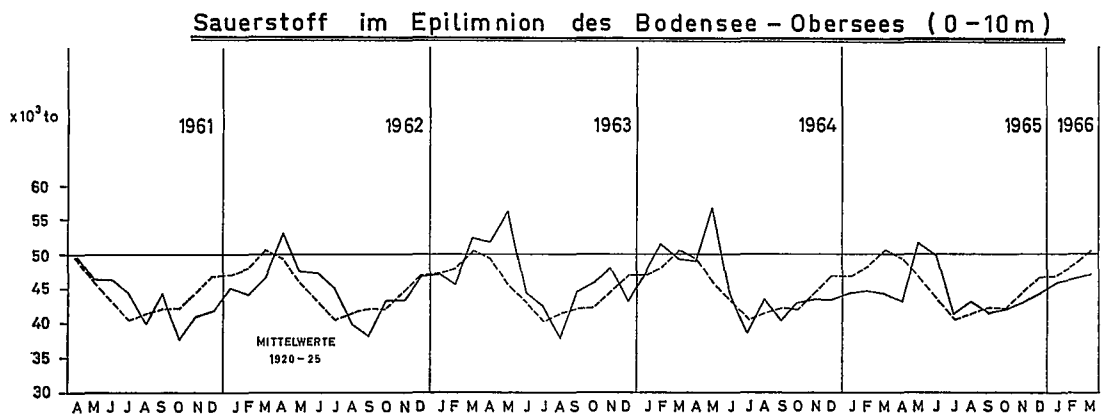
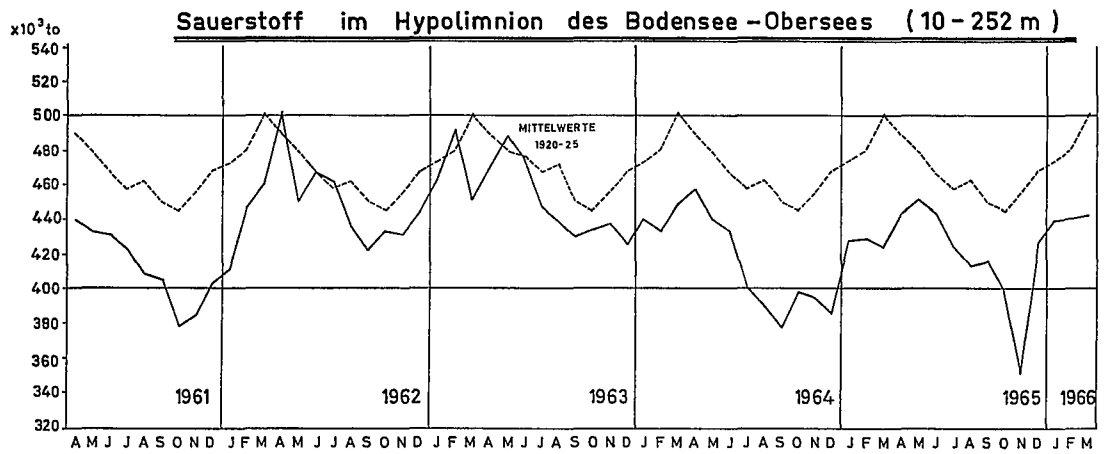


Abb. 4

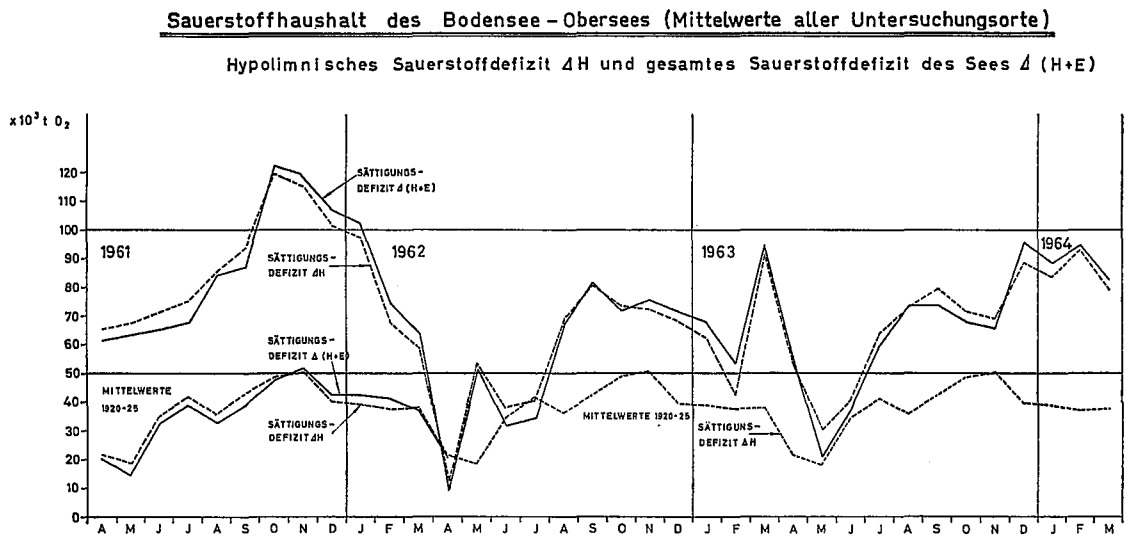


Abb. 5

Sauerstoffhaushalt des Bodensee - Obersees (Mittelwerte aller Untersuchungsorte)

Hypolimnisches Sauerstoffdefizit  $\Delta H$  und gesamtes Sauerstoffdefizit des Sees  $\Delta(H+E)$

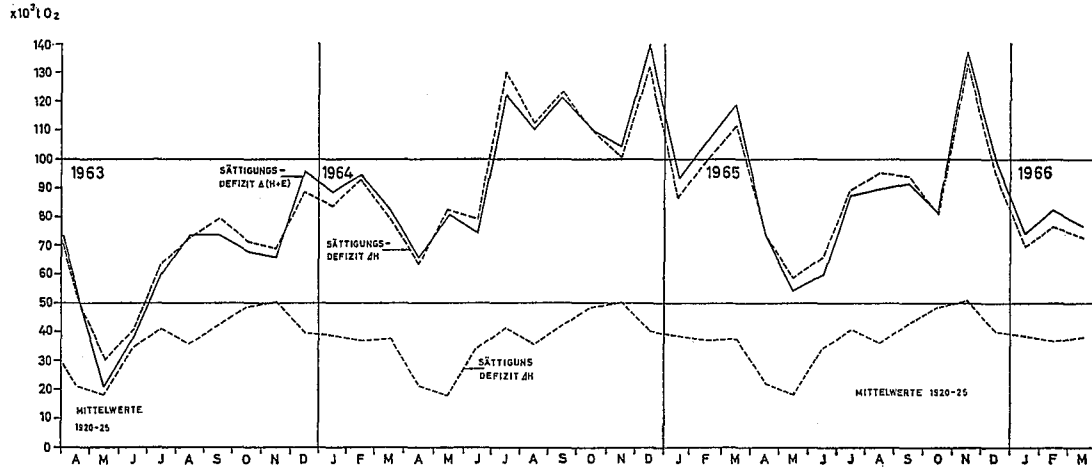


Abb. 6

Bodensee - Obersee: Korrigiertes Sauerstoffdefizit Hypolimnion ( $\Delta H+E$ )

