Zeitschrift: Mitteilungen der aargauischen Naturforschenden Gesellschaft
Herausgeber: Aargauische Naturforschende Gesellschaft
Band: 22 (1945)

Artikel: Limnologische Untersuchungen im Hallwilersee
Autor: Keller, Rudolf
Kapitel: 2: Sauerstoffverhältnisse
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-172261

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.10.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

2. Sauerstoffverhältnisse

I. Allgemeines

Die Auflösungsfähigkeit des Wassers für Sauerstoff ist zunächst physikalisch bedingt durch die Temperatur und durch den Partialdruck des Sauerstoffes in der über dem Wasser liegenden Atmosphäre, und zwar verläuft die Sättigungsmenge parallel dem hydrostatischen Druck und umgekehrt proportional der Temperatur. In einem See erfolgt der Übergang vom gasförmigen zum gelösten Sauerstoff an der Grenzfläche Luft—Wasser, also an der Oberfläche, sodaß die obersten Grenzschichten zunächst ihrer Temperatur entsprechend sauerstoffgesättigt sind. Von hier aus breitet sich der gelöste Sauerstoff nach der Tiefe aus, und zwar zum geringsten Teil auf dem Wege der Diffusion, der nur sehr langsam zurückgelegt wird, in der Hauptsache durch Strömungen, die den Wasserinhalt des Sees durchmischen. Dabei handelt es sich einesteils um thermische Strömungen, wie sie im vorangegangenen Kapitel beschrieben sind, teils um windbedingte Bewegungen, sowie um durch die Zuflüsse und den Abfluß eines Sees bedingte Strömungen. Demgemäß müßte also die gesamte Wassermasse eines Sees mit Sauerstoff gesättigt sein. Nun ist aber ein See nicht ein Reservoir von reinem Wasser. Jeder See ist gleichzeitig ein Biotop, d. h. dank der in ihm gelösten Stoffe ermöglicht er den Aufenthalt von Lebewesen, die ihrerseits wiederum den Sauerstoffgehalt des Wassers durch ihre Lebenstätigkeit beeinflussen, und zwar sowohl als Konsumenten wie als Produzenten. Der größte Teil der pflanzlichen Organismen, und zwar sowohl des Phytoplanktons wie der Litoralflora, produziert bei seiner Assimilationstätigkeit Sauerstoff unter der Einwirkung des Sonnenlichtes, während das Zooplankton, das Nannoplankton (Bakterien) und die Litoralfauna Sauerstoff konsumieren. Als weiterer Faktor der Sauerstoffkonsumption ist der autolytische Zerfall der abgestorbenen Lebewesen im Wasser in Rechnung zu stellen. Da nun die Lebewesen eines Sees, insbesondere das Plankton, nicht gleichmäßig auf den ganzen Seeinhalt verteilt sind, sondern sich in Abhängigkeit von Temperatur und Licht in be-

stimmten Schichten aufhalten und anreichern, ist die Menge des in den verschiedenen Wasserschichten gelösten Sauerstoffes ihrerseits verschieden. In bezug auf die Besiedelung und den dadurch bedingten Sauerstoffhaushalt verhalten sich Epilimnion, Metalimnion und Hypolimnion durchaus verschieden. Während man im Epilimnion im allgemeinen Sättigung mit Sauerstoff beobachtet, zeichnet sich das Metalimnion als die am dichtesten mit Phytoplankton besiedelte Schicht durch oft sehr ausgesprochene Übersättigung mit Sauerstoff aus, bedingt durch die hier lokalisierte intensive Assimilationsfähigkeit, dagegen wird das Hypolimnion nur zur Zeit der Vollzirkulation von der Oberfläche her mit Sauerstoff versorgt, zur Zeit der Stagnations- und Teilzirkulationsperiode aber von seinem Sauerstoffvorrat an die Sauerstoffzehrer abgeben muß. Dabei läßt sich regelmäßig beobachten, daß auf intensive jahreszeitlich bedingte Vegetationsperioden des Planktons im Epilimnion und Metalimnion ein Absterben der Organismen und ein Absinken nach dem Hypolimnion erfolgt, wobei die autolytische Auflösung der Organismenleichen mit einer sehr starken Sauerstoffkonsumption verbunden ist, sodaß unmittelbar unter der sauerstoffübersättigten Metalimnionschicht das Hypolimnion eine entsprechende Reduktion seines Sauerstoffgehaltes erfährt.

Je eutropher ein See ist, d. h. je günstigere Ernährungs- und damit Vermehrungsbedingungen er dank seines Gehaltes an gelösten Stoffen der Biozoenose bietet, desto deutlicher tritt die beschriebene Schichtung in Erscheinung, desto mehr aber wird der Sauerstoffvorrat des Hypolimnions bis zur völligen Aufzehrung beansprucht. Damit aber besteht die Gefahr, daß der Abbau der abgestorbenen Planktonorganismen nicht mehr auf oxydativem Wege erfolgt, sondern daß Fäulnisvorgänge eintreten und daß Mangel an Sauerstoff oder bereits auftretende Fäulnisprodukte jegliches höhere Leben, insbesondere die Existenz der Fische, verunmöglichen.

Bei der Erforschung und Beurteilung der Sauerstoffverhältnisse in einem See wird zunächst der Sauerstoffgehalt in verschiedenen Tiefen quantitativ bestimmt, d. h. seine absolute Größe festgestellt. Dieser absolute Gehalt wird sodann in Beziehung zur Sättigung gebracht, wobei man untersättigte, ge-

sättigte und übersättigte Zustände bzw. Schichten feststellt. Nun sind aber die Lebensbedingungen der Biozoenose nicht nur von dem Grade der Sauerstoffsättigung abhängig; vielmehr spielen hierbei die Temperatur und eine ganze Reihe anderer Faktoren eine ausschlaggebende Rolle. So intensiviert bekanntlich die Temperatur alle Lebensvorgänge, steigert demgemäß auch den Sauerstoffbedarf der Lebewesen, während mit der Abkühlung die Lebensintensität und mit ihr auch der Sauerstoffbedarf abnehmen. In dem Bestreben, eine Beziehung zwischen biologischem Sauerstoffbedarf der Organismen, Sauerstoffgehalt und Temperatur des Wassers aufzustellen, schufen *Brehm* und *Ruttner*[5] den Begriff des Respirationswertes. Sie gehen von der Annahme aus, daß bei einer Temperatur von 15° C ein Sauerstoffgehalt von 10 mg/l für eine Biozoenose das gerade günstige Atmungsmilieu darstellt, daß aber bei einer Temperatursteigerung um 10° auf 25° C die Atmung verdoppelt wird und somit 20 mg/l Sauerstoff nötig wären. Umgekehrt sinkt bei Temperaturabnahme um 10° auf 5° C die benötigte Sauerstoffmenge auf 5 mg/l. Bei Tiefwassertemperaturen wäre somit der Sauerstoffbedarf meistens reichlich gedeckt; mit steigender Temperatur kommen wir aber zu einem Punkt, wo selbst die theoretische Sättigung dem rasch gewachsenen Bedarf nicht mehr genügt. Man könnte somit von einem physiologischen Sauerstoffsättigungswert sprechen, der nach obigem Beispiel bei 5° C 5 mg/l, bei 15° C 10 mg/l und bei 25° C 20 mg/l beträgt. Diese Werte ergeben die Indexkurve nach *Brehm* und *Ruttner*, welche mit der Indexziffer 100 belegt wird. Mit Respirationswert bezeichnet man jeweilen den Quotienten zwischen absolutem Sauerstoffgehalt des Wassers und dem beschriebenen physiologischen Sauerstoffsättigungswert. Im Moment, wo der Respirationswert von 100 unterschritten wird, beginnt «Atemnot» bzw. Erstickungsgefahr für die Organismen. Ist er größer als 100, so kann die Biozoenose für ihre Atmung aus dem Vollen schöpfen.

II. Probenentnahme und Untersuchungsmethodik

Die Probenahmestellen sind aus dem Kapitel «Thermik» bekannt, ebenfalls die Daten der Fassungen. Das Fassen der Sauer-

stoffproben und das Messen der Temperaturen geschah natürlich gleichzeitig.

Die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegenden Sauerstoffbestimmungen wurden nach der Methode von *Winkler* ausgeführt, wobei Manganochloridtabletten und Kaliumhydroxyd fest in Pillen verwendet wurden. Die Titration erfolgte mit $^1/_{10}$ n Na-Thiosulfat.

Die Sauerstoffwerte wurden in mg/l auf nur eine Dezimale berechnet. Barometerstände und Wassertiefe wurden nicht berücksichtigt. Wir sind uns bewußt, daß wir damit einen kleinen allgemeinen Fehler eingeschlossen haben, glauben aber kaum, daß der Wert unserer Beobachtungen im Rahmen dieser Arbeit dadurch beeinträchtigt werde. Zur Berechnung der Sauerstoffsättigung wurden die Werte von *L. W. Winkler* benutzt.

Über den zeitlichen Verlauf der Sauerstoffwerte an allen drei Probennahmestellen und in allen Meßtiefen geben die Tabellen 4 bis 14 und die graphischen Darstellungen Fig. 2, 3, 4 und 5 ein genaues Bild.

III. Die Sauerstoffverhältnisse in der Seemitte (Stelle 2)

A. Der Sauerstoffgehalt bei Herbstteil- und Wintervollzirkulation

(Tabellen 5, 6, 7)

Die Messungen im Hallwilersee nahmen am 23.9.41 ihren Anfang, weshalb ebenfalls die Beschreibung da beginnen soll. Die Sauerstoffverhältnisse wurden nach drei verschiedenen Gesichtspunkten beurteilt:

1. Die ermittelten Werte in mg/l Sauerstoff wurden als «absoluter Sauerstoffgehalt» beschrieben.
2. Die absoluten Sauerstoffzahlen wurden in Prozente der theoretischen Sättigung umgearbeitet und als «relativer Sauerstoffgehalt» in die Beschreibung eingeführt.
3. Der Begriff des «Respirationswertes» wurde in der Einführung zum Sauerstoffkapitel erklärt und ist die Bezeichnung für einen relativen Sauerstoffwert. Er stellt

das Verhältnis des momentanen chemischen und biologischen Sauerstoffbedarfes zu dem im Wasser zur Verfügung stehenden Sauerstoffvorrat dar.

1. Der absolute Sauerstoffgehalt

Die Herbstteilzirkulation ist der Übergang der Sommerstagnation zur Wintervollzirkulation und ist in den Tabellen 5, 6 und 7 festgehalten.

Die Sommerstagnation hat einen charakteristischen Sauerstoff-Schichtungstypus hinterlassen, der gekennzeichnet ist durch die Messungen vom 23. 9. 41 (Tabelle 4 und 14, Fig. 5) mit einem Epilimnion mit Sauerstoffgehalten von 10—11 mg/l bis 8 m Tiefe und einem Metalimnion in 10 m Tiefe mit einem Sauerstoffmaximalwert von 20,5 resp. 29,4 mg/l. Die Grenze zwischen Meta- und Hypolimnion, Tiefe 15 m, wies ein Sauerstoffminimum von 2,7 mg/l auf. Das Hypolimnion in 20 m und 25 m Tiefe hatte noch Sauerstoffwerte von knapp 6 mg/l zu verzeichnen, während die Zone in 30 m und tiefer bis zum Grunde nur noch Bruchteile von mg/l oder gar keinen Sauerstoff mehr aufwies. An diesen Zustand der Sommerstagnation schließt sich die Herbstteilzirkulation an und es bildet sich nach den Messungen vom 31. 10. 41 folgende Situation heraus:

Der Sauerstoffgehalt der Oberfläche (1 m) war durch die Abkühlung der Wassermassen auf 12,6 mg/l angestiegen, während in der Sprungschicht der Sauerstoffgehalt stark zurückgegangen war und den epilimnischen Mittelwert von 10 mg/l erreichte. An der Grenze zwischen Meta- und Hipolimnion, bei 12,5 m Tiefe, hatte sich die Sauerstofflücke vertieft, und der Sauerstoffwert betrug noch 0,7 mg/l, entsprechend einem Respirationswert von 12,4 % und 5,5 % der theoretischen Sättigung. Die nach unten anschließenden, noch weiter in der Stagnationsphase verharrenden Schichten, hatten ihren Sauerstoffgehalt gegenüber früher kaum verändert.

Die ***Vollzirkulation,*** die zwischen 6. 12. und 3. 1. stattgefunden haben muß, hatte die Situation so geändert, wie aus den Messungen vom 3. 1. 42 entnommen werden kann. Die Vollzirkulation hat den Sauerstoff in die Tiefe befördert, sodaß der

Sauerstoffgehalt bei 20 m Tiefe nun mit 8,8 mg/l nur 1,2 mg/l hinter demjenigen der Oberfläche zurücklag. Die Durchmischung war auch bei Beginn der Winterstagnation nicht bis zum Grunde fortgeschritten, denn unterhalb 25 m Tiefe fiel der Gehalt an Sauerstoff bis zur 35-m-Tiefe von 7,1 mg/l auf 0,2 mg/l ab, und in 40 und 45 m Tiefe war immer noch kein Sauerstoff vorhanden. Damit sind schon die Verhältnisse zu Beginn der Winterstagnation geschildert.

2. Der relative Sauerstoffgehalt

Das Erwachen der Konvektionsströmungen zur Herbstzeit hatte zur Folge, daß die Werte der theoretischen Sättigung, die während der Sommerstagnation über 100 % betrugen, nun unter die 100%-Werte absanken. So konstatierten wir am 31. 10. 41 in 1 m Tiefe 112 % theoretische Sättigung, in 10 m 90 % und in 12,5 m nur noch 5,5 %, dann aber entsprechend dem höheren Sauerstoffgehalt des mittleren Hypolimnions bei 15 bis 25 m wieder 36,7 resp. 43,8 %. Die 30-m-Schicht hatte noch eine Sättigung von 1,7 %, während die tieferen Schichten nur noch Bruchteile von Prozenten gesättigt waren.

Kurz vor der Vollzirkulation am 6. 12. 41 war das Epilimnion, 15 m Tiefe, noch zu 73—74 % theoretisch gesättigt; tiefer, bei 20 m, betrug die Sättigung noch 47,6 %, um unterhalb 30 m, wo sie noch 2,5 % betrug, ganz auszuklingen.

Die Wintervollzirkulation hatte die notwendige Durchmischung bis zum Grunde nicht gebracht.

3. Der Respirationswert

Der Respirationswert hielt sich im Epilimnion während der Herbstteilzirkulation ständig in Höhen von 180—120 %. Im Metalimnion dagegen sank er auf den Wert von 12,4 %.

Am Abschluß der Vollzirkulationsperiode oder zu Beginn der Winterstagnation wiesen die Tiefen 1 und 25 m abgestufte Werte von 219 % bis 149 % auf, während die Werte unterhalb 30 m Tiefe rasch gegen Null fielen.

Wir würden beim alleinigen Betrachten der theoretischen Sättigung die Sauerstoffverhältnisse zu pessimistisch beurtei-

len, zeigten uns nicht die Respirationswerte, daß im Winter während der Teil- und Vollzirkulation die Wassermassen von 1—25 m biologisch reichlich mit Sauerstoff versorgt waren, anderseits führten sie aber auch den ausgesprochenen Sauerstoffmangel der Tiefen unter 25 m drastisch vor Augen.

B. Der Sauerstoffgehalt bei Winterstagnation
(Tabellen 7 und 8)

Während die Herbstteil- und Wintervollzirkulation im Maximum 1 ½ Monate gedauert haben mag, dauerte die Winterstagnation ungefähr drei Monate. Leider war es nicht möglich, mehr als zwei Messungen durchzuführen.

1. Absoluter Sauerstoffgehalt

Wir brauchen den Zustand zu Beginn der Winterstagnation nicht mehr zu wiederholen, da er ja bei der Vollzirkulation besprochen worden ist. Am 20. 3. 42, als das Eis schon zwei Tage gebrochen war, zeigten die Untersuchungen lediglich in den Schichten über Grund ein von den Messungen vom 3. 1. 42 abweichendes Bild und nur insofern, als der Sauerstoff in den Tiefen von 25 und 30 m gegen die Tiefen über Grund verschoben worden war. Wir konnten ein Epilimnion mit Sauerstoffwerten von 9,0 mg/l bei 1 m Tiefe und 7,9 mg/l bei 20 m Tiefe von einem Metalimnion zwischen 20 und 25 m Tiefe unterscheiden. Unterhalb des Metalimnions haben wir in 30 m Tiefe bis zum Grund (45 m) 0,2 mg/l Sauerstoff. Wir hatten also den Fall, daß trotz Eisdecke und damit völliger Ausschaltung der Windeinflüsse der Sauerstoff in erheblich großen Wasserräumen vom Grund bis 20 m Tiefe gleichmäßig verteilt worden war. Was also die Wintervollzirkulation nicht erreicht hatte, haben durch Zu- und Abfluß hervorgerufene Strömungen zum Teil vollbracht.

2. Relativer Sauerstoffgehalt

Während der Stagnation änderten sich die Verhältnisse im Epilimnion kaum und blieben wie bei der Teil- und Vollzirkulation in Höhen von zirka 30 % Untersättigung, dagegen wirkte sich natürlich der Transport von Sauerstoff durch die oben an-

gedeuteten Strömungen bis auf den Grund sofort aus, sodaß von 30 m Tiefe bis hinunter zum Grunde Sättigungen von 1,7 % gemessen wurden.

3. Respirationswert

Der Respirationswert erfuhr einzig in den Tiefen von 35 bis 45 m eine Korrektur, indem er hier im Verlaufe der Stagnationsperiode durchwegs den Wert von zirka 4 % erreichte. Der Respirationswert des Hypolimnions (30—45 m Tiefe) war gänzlich ungenügend, während im Epilimnion (1—20 m Tiefe) die Lage, mit Werten von 195—173 %, weiterhin günstig war.

C. Der Sauerstoffgehalt bei Frühlingsteil- und Vollzirkulation, Stelle 2

Die Frühlingsteil- und Vollzirkulation mußte im kurzen Zeitraum von weniger als einem Monat stattgefunden haben, denn am 20. 3. 42 (Tabelle 2) hatten wir noch inverse thermische Schichtung, allerdings nur noch mit 1,1° C Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Grund, während am 17. 4. 42 die Sommerstagnation schon ihren Anfang genommen hatte. Während dieser Zeit vermochten die Konvektionsströmungen, aber wahrscheinlich auch die durch den Wind verursachten Strömungen, Sauerstoff in die Tiefen zu transportieren, sodaß doch einmal im Jahre eine, wenn auch ganz geringe Durchlüftung stattgefunden hatte. Es war also nicht die Herbstteil- und Vollzirkulation, die die Erneuerung des Wassers über dem Grund brachte, dies geschah erst nach der Winterstagnationsperiode und der anschließenden Frühlingsvollzirkulation. Die Verhältnisse, wie sie im nächsten Kapitel als Ausgangsbasis für die Sommerstagnationsphase beschrieben werden, sind also die Wirkung der Frühlingsteil- und -Vollzirkulation.

D. Der Sauerstoffgehalt bei Sommerstagnation an Stelle 2 (Fig. 2, 3 und 4. Tabellen 9—14)

1. Absoluter Sauerstoffgehalt

Die Sommerstagnation begann nach abgeklungener Frühlingsvollzirkulation mit dem Ansteigen der Seeoberflächentem-

peraturen. Am 17. 4. 42 (Tabelle 9) stellten wir fest, daß an der Oberfläche (1 m) bei 7,4° C 10,9 mg/l Sauerstoff enthalten waren. Die Abnahme erfolgte von 5 m Tiefe abwärts bis zu 35 m, wo nur noch 0,7 mg/l vorhanden waren, um endlich in 45 m Tiefe auf den derzeitigen Tiefstand von 0,1 mg/l herabzusinken. Der Sauerstoffgehalt ob Grund hatte seinen Jahreskulminationspunkt schon wieder überschritten und ging, kaum hatte die Sommerstagnation begonnen, der Erschöpfung entgegen. Die Messungen vom *30. 5. 42* (Tabelle 10), bei fortschreitender Stagnation, zeigten Ansteigen des Sauerstoffgehaltes bis 5 m Tiefe, wo das Maximum von 14,6 mg/l ausgebildet war. Unterhalb 5 m war eine stetige Abnahme zu verzeichnen. In 35 m Tiefe, also 10 m ob Grund, waren noch 0,3 mg/l Sauerstoff vorhanden. Eine Änderung trat bei den Messungen vom 4. 7. 42 (Tabelle 11) zutage, indem das Sauerstoffmaximum von 12,9 mg/l in der 10-m-Schicht lag, bemerkenswerterweise aber nur 111,5 % der theoretischen Sättigung betrug, während ein Monat früher der Maximalwert von 142 % der theoretischen Sättigung erreicht worden war. Dies hängt mit einer Temperaturerhöhung dieser Wasserschichten in der Zwischenzeit zusammen. Außerdem hatte der von unten nach oben zunehmende Sauerstoffschwund die 30-m-Tiefe erreicht, und wir stellten nur noch Werte von Bruchteilen von mg/l fest.

Am *31. 7. 42* (Tabelle 12) waren die Verhältnisse im Epilimnion noch gleich wie vorstehend beschrieben, während sich das Metalimnion mit einem starken Maximum von 25,2 mg/l Sauerstoff entsprechend 226,3 % theoretischer Sättigung entwickelt hatte. Die Verminderung des Sauerstoffgehaltes an der Grenze zwischen Meta- und Hypolimnion nahm zu und der Sauerstoffgehalt betrug in diesem Zeitpunkt 4,8 mg/l, was 40%iger theoretischer Sättigung entspricht. Die 25-m-Schicht wies noch einen Sauerstoffgehalt von 0,2 mg/l auf, während schon die 35-m-Tiefe gänzlich sauerstofffrei war. Es ist bemerkenswert, daß Ende Juli die Wassermassen von Grund bis halb zur Oberfläche schon praktisch ohne Sauerstoff waren.

Die Verhältnisse änderten sich bis zum *1. 9. 42* (Tabelle 13) nicht stark; erwähnenswert scheint aber doch die Vertiefung der Sauerstofflücke in den Schichten in und unterhalb 15 m Tiefe,

wo wir am Ende der Sommerstagnation (Tabelle 14, Fig. 5) sehr extreme Werte fanden.

Das *Epilimnion* blieb ohne Änderung, während das *Metalimnion* in 10 m Tiefe einen Sauerstoffwert von 29,4 mg/l, entsprechend 271 % theoretischer Sättigung, aufwies. Die Grenze zwischen Meta- und Hypolimnion, welche sich in 15 m Tiefe befand, hatte eine weitere Einbuße an Sauerstoff erfahren, sodaß wir hier nun ein erstes Minimum von 1,3 mg/l zu verzeichnen hatten. In 20 m Tiefe erreichte der Sauerstoffgehalt ein kleines Maximum von 1,9 mg/l, um dann bei 30 m Tiefe auszuklingen.

Das Sauerstoffminimum und Maximum war also praktisch nur durch eine Schicht von 5 m voneinander getrennt.

Der zeitliche Verlauf des Sauerstoffgehaltes ist aus der Fig. 2 sehr gut ersichtlich und zeigt auch, wie der See in bezug auf Sauerstoffgehalt der Tiefe nach gegliedert war. Die Schichten 1 und 5 m, die allgemein gesagt das *Epilimnion* darstellen, verhielten sich verschieden. Die 1-m-Tiefe wies zwei «Sauerstoffberge» auf, deren Kulminationspunkte am 31. 10. 41 und 30. 5. 42 erreicht waren, die 15-m-Tiefe zeigte dagegen nur ein Sauerstoffmaximum am 30. 4. 42. Die fortschreitende Sommerstagnation führte zu einem mittleren Sauerstoffgehalt von 9—10 mg/l. Die 10-m-Tiefe, als *Metalimnion* charakterisiert, wies einen «Sauerstoffberg» mit zwei Kulminationspunkten auf, und zwar am Ende der Stagnationszeit am 31. 7. 42 und 23. 9. 42. Die an die 10-m-Schicht anschließende Zone, das *Hypolimnion*, ist dadurch charakterisiert, daß es seit dem Beginn der Sommerstagnation von seinem Sauerstoffvorrate, den die Frühlingsvollzirkulation durch die Konvektionsströmung in alle Tiefen beförderte, zehrte.

Der Vergleich der Sauerstoffmessungen am Ende der Sommerstagnation vom Vorjahre, also am 23. 9. 41, als die Arbeiten in Angriff genommen wurden, zeigt mit den eben besprochenen vollständige Parallelität. Auffallend ist aber, daß die Einkerbung der Sauerstoffkurve an der Grenze zwischen Meta- und Hypolimnion nicht so tief war. Außerdem waren die Tiefenschichten 20 und 30 m besser mit Sauerstoff angereichert. Die Sauerstoffzehrungsvorgänge waren also im Sommer 41 weniger

groß, sodaß nicht aller Vorrat bis hinauf zum Metalimnion aufgebraucht wurde.

2. *Relativer Sauerstoffgehalt*

Die Werte der theoretischen Sauerstoffsättigung wurden zu Beginn der Sommerstagnation in keiner Schicht erreicht. In 1 und 5 m Tiefe erhoben sich aber die absoluten Sauerstoffwerte bald über die theoretischen Sättigungen und erreichten schon am 30. 5. 42 (Tabelle 10) den maximalen Wert von 142,6 % in 5 m Tiefe. Nach Erreichen des Kulminationspunktes sank der Sättigungswert wieder langsam ab, um von anfangs Juli bis Ende September den konstanten Wert von 110—120 % zu behalten. Wiederum machte die 10-m-Tiefe eine Ausnahme, indem die absoluten Sauerstoffwerte erst anfangs Juli über die der theoretischen Sättigungen stiegen (Fig. 2 und 3), um aber rapid einen ersten Kulminationspunkt von 226,3 % am 31. 7. 42 und einen zweiten am 23. 9. 42 von 271 % theoretischer Sättigung zu erreichen. Die Schichten unterhalb 10 m hatten sowohl in bezug auf Fortschreiten der Stagnationszeit als auch auf zunehmende Tiefe abnehmende Sättigungswerte zu verzeichnen. Maximaler Wert der theoretischen Sättigung unterhalb der 10-m-Schicht war 72,9 % am 17. 4. 42 in 15 m Tiefe. Am Ende der Sommerstagnation betrug dieser nur noch 10,6 %. Als extremer Fall sei die maximale theoretische Sättigung von 1,7 % in 45 m Tiefe am 20. 3. 42 erwähnt.

3. *Respirationswert während der Sommerstagnation*

Auch bei dieser Betrachtung, welche den Sauerstoffhaushalt in biologischer Hinsicht während den Monaten der Sommerstagnation beurteilt, konnte man wieder drei Tiefenzonen unterscheiden, die aber konform mit der Beurteilung der absoluten und relativen Sauerstoffverhältnisse gingen. Die Oberflächenzone, 1 und 5 m, hatte zu Beginn der Sommerstagnation infolge niedriger Wassertemperatur und relativ hohem Sauerstoffgehalt Respirationswerte von 188,5 resp. 201 % (Fig. 3). Diese sanken aber schon Ende Mai bis Mitte Juni infolge starkem Ansteigen der Wassertemperatur und relativ geringem An-

steigen des absoluten Sauerstoffgehaltes unter 100 %. In der 1-m-Tiefe bewegte sich der Respirationswert von anfangs Juli bis Ende Stagnation in der Höhe von 55,4 bis 62,7 %, während in 5 m Tiefe das Absinken des Wertes etwas langsamer erfolgte, trotzdem aber den Minimalwert von 56,8 % erreichte. In der Tiefe von 10 m lagen die Verhältnisse wieder entgegengesetzt. Hier erhoben sich die Respirationswerte nach anfänglichem Absinken bei Beginn der Sommerstagnation von 169,5 % auf 152,2 % auf die extremen Höhen von 355 % am 31. 7. 42 und 386 % am 23. 9. 42. Die theoretische Sättigung des Wassers von 271 % und die relativ niedrige Temperatur sind Erklärung genug. In den Tiefen von 15, 20 und 25 m sanken die Respirationswerte, die zu Beginn der Sommerstagnation 176,5 % resp. 166 % und 125,5 % betragen hatten, im Laufe des Juli (bei 25 m sogar schon im Mai) unter 100 %, um Ende September 23,8 % resp. 37,2 und 17,2 % zu betragen. In der Tiefe von 30 m erreichte der Respirationswert seinen Jahreskulminationswert von 75,2 % zu Beginn der Sommerstagnation, um rapid auf 4,5 % anfangs Juli und noch weiter auf 1,4 % Ende September herabzusinken. Die Respirationswerte der Tiefen 35, 40 und 45 m stachen ganz besonders von allen übrigen ab. In 35 m Tiefe hatten wir einen Maximalwert von 13,5 %, ebenfalls einen solchen von 18,5 % in 40 m Tiefe Mitte April. Der maximale Wert der 45-m-Schicht müßte eigentlich noch zur Vollzirkulationsphase des Frühlings gerechnet werden und betrug 4,4 %.

Solche Respirationswerte haben praktisch keine Bedeutung, sie sind aber in der Lage, die herrschenden Sauerstoffverhältnisse ebenfalls zu charakterisieren. Würden wir diese nach den Verhältnissen der theoretischen Sättigung allein beurteilen, so müßten wir die Zone unterhalb 10 m während der ganzen Sommerstagnation, weil gänzlich ungenügend mit Sauerstoff versorgt, als biologisch gefährdet betrachten. Umgekehrt demonstrierten die Verhältnisse der Oberfläche, daß trotz Übersättigung die biologischen Sauerstoffbedürfnisse nicht oder nur teilweise gedeckt werden können.

IV. Die Sauerstoffverhältnisse im oberen Seeteil (Stelle 1)

A. Der Sauerstoffgehalt bei Herbstteil- und Wintervollzirkulation

(Tabellen 4, 5, 6 und 7)

Bei Ausgang der Sommerstagnation um den 27. 9. 41 (Tabelle 4) fanden wir an dieser Untersuchungsstelle die gleiche Sauerstoffschichtung wie an der Vergleichsstelle 2 in der Seemitte. Es soll aber erwähnt werden, daß an der Grenze zwischen Meta- und Hypolimnion der Abfall von 23,2 mg/l Sauerstoff auf 0,3 mg/l noch ausgeprägter erschien. Wir hatten hier einen Abfall der theoretischen Sättigung von 212 % auf 1,8 % und dies innerhalb einer Schicht von 2,5 m. Der Wiederanstieg der Sauerstoffwerte im Hypolimnion war geringer und erreichte nur noch 3,7 mg/l in der Tiefe 20 m, während in der Seemitte in 25 m Tiefe noch 6 mg/l vorhanden waren. Der Anstieg war innerhalb 5 m Tiefe vollzogen, um dann von 25—40 m Tiefe vollständig auf 0 zu sinken.

Die fortschreitende Teilzirkulation verlief hier parallel. Absolute Vergleiche dürfen nicht gemacht werden, weil in diesen Zeiten der starken Oberflächenabkühlung ein paar Tage Differenz im Untersuchungstermin große Unterschiede entstehen lassen. Das Metalimnion hat die großen Sauerstoffgehalte am 26. 10. 41 eingebüßt.

Am Ende der Herbstteilzirkulation (Tabelle 6) fanden wir an Stelle 1 die gleiche Situation wie in der Seemitte.

Die Abnahme des Sauerstoffs im Hypolimnion ist stetig, sodaß wir 15 m unter der Sprungschicht, in Tiefe 30 m, nur noch 0,2 mg/l Sauerstoff messen. In der Tiefe von 35 m, d. h. 5 m über Grund ist kein Sauerstoff mehr vorhanden. ***Nach der Wintervollzirkulation,*** die zur selben Zeit wie in der Seemitte stattgefunden haben muß, sind die Sauerstoffverhältnisse des Hypolimnions eher noch verschlechtert, indem durch Seeströmungen im unteren Hypolimnion der vorhandene vorrätige Sauerstoff auf Kosten des oberen bis ob Grund verteilt worden ist. So treffen wir in den Tiefen 25 m bis 35 m zirka 0,2 mg/l Sauerstoff an, über Grund aber wie an Stelle 2 keinen mehr. Die Wintervollzirkulation hatte auch hier den Sauerstoffmangel nicht auf-

zuheben vermocht. Der Übergang von Vollzirkulation zu Winterstagnation vollzog sich offenbar sehr rasch.

Die *Respirationswerte* ändern sich ordnungsgemäß bei diesen kleinen Änderungen, die gegenüber der Seemitte hervorgerufen wurden, nicht wesentlich, sodaß ihre Beschreibung nicht nochmals wiederholt zu werden braucht.

B. Der Sauerstoffgehalt bei Winterstagnation

Während der Winterstagnation ist in der Sauerstoffverteilung in den verschiedenen Tiefen nur in der 25-m-Tiefe eine wesentliche Erhöhung von 0,2 mg/l auf 8,4 mg/l am 21. 3. 42 (Tabelle 8) eingetreten, sodaß die mehr oder weniger gleichmäßig durchmischte Schicht bis zur genannten Tiefe hinunter reichte. Die Tiefe 40 m ist auch am Ende der Winterstagnation noch sauerstoffrei.

C. Der Sauerstoffgehalt bei Frühlingsteil- und -Vollzirkulation

Wie schon bei der Beschreibung der Seemitte (Stelle 2) erklärt worden ist, konnte der Verlauf der Frühlingsteil- und -Vollzirkulation nicht verfolgt werden, weil keine Messungen in diese Zeit fielen. Dies soll aber nicht hindern, die Auswirkungen dieser Phase festzuhalten.

In gleicher Weise wie bei Stelle 2 hatte hier die Frühlingsvollzirkulation die Durchlüftung bis zum Grunde vollzogen, sodaß von der Oberfläche, wo etwas mehr als 11 mg/l Sauerstoff gemessen wurden, bis zum Grund, wo noch 0,2 mg/l Sauerstoff vorhanden war, eine ständige Abnahme festgestellt wurde. Der Respirationswert war bis in die Tiefe von 30 m über 100 %, die biologischen Sauerstoffverhältnisse wären demnach an dieser Stelle etwas günstiger.

D. Der Sauerstoffgehalt bei Sommerstagnation

Die erste Messung in der Sommerstagnationsperiode war diejenige vom 17. 4. 42 (Tabelle 9). Die Vegetation war noch kaum erwacht, sodaß die Schichtung in verschiedene Tiefenzonen noch nicht vorhanden war.

Schon am 30. 5. 42 (Tabelle 10) stellte sich in der 5-m-Tiefe das Jahres-Sauerstoffmaximum von 20,7 mg/l ein, mit einem

Respirationswert von 260 %; dieser steht zirka um 110 % höher als an Stelle 2 in der gleichen Tiefe. Das Epilimnion, welches für den ganzen Sommer die Tiefen 0 bis 10 m umfaßte, zeigte im weitern keine Abweichungen. Im Metalimnion fiel das kleine und frühe erste Maximum auf, welches gegenüber der Stelle 2 (Seemitte) um zirka einen Monat vorverschoben war. Es wurde am 31. 7. 42 (Tabelle 12) an Stelle 1 ein Jahresminimum von 4 mg/l Sauerstoff und am gleichen Tage an Stelle 2 ein erstes Maximum von 25 mg/l gemessen, sodaß also, bildlich gesprochen, das Tal zwischen den beiden Sauerstoffbergen der Stelle 1 mit dem ersten Sauerstoffberg der Stelle 2 zeitlich aufeinander fielen. Die Schwankungen waren somit an Stelle 1 viel ausgeprägter. Die Grenze zwischen Metalimnion und Hypolimnion fiel auch an dieser Meßstelle in die 15-m-Tiefe. Der Sauerstoffgehalt dieser Tiefe war genau gleich.

Das Hypolimnion verhielt sich mit Ausnahme einer Tiefenzone über Grund, die zirka 15 m betrug, gleich. Es ist festzuhalten, daß an *Stelle 1* ab 4. 7. 42 bis zum Ende der Stagnation und weiter bis wieder Ende März am Grunde kein Sauerstoff vorhanden war. 5 m ob Grund fehlte der Sauerstoff eigentlich vom Monat August an praktisch, wogegen in der *Seemitte* der bei der Frühlingsvollzirkulation in diese Tiefe gelangte Sauerstoff schon Ende Mai wieder aufgezehrt war. Die Sauerstoffverhältnisse der 35-m-Schicht der Stelle 1 entsprachen denjenigen der gleichen Tiefe der Stelle 2. Der Vergleich der Sauerstoffwerte im Jahresverlauf (Tabellen 4 bis 14) muß zur Überzeugung führen, daß der Seegrund auf die darüber liegenden Wassermassen keinen Einfluß haben kann, sonst müßte deren Sauerstoffgehalt in 35-m-Tiefe dem Sauerstoffgehalt an Stelle 1 der 40-m-Tiefe der Stelle 2 entsprechen.

V. Die Sauerstoffverhältnisse im untern Seeteil (Stelle 3)

A. Der Sauerstoffgehalt bei Herbstteil- und Wintervollzirkulation

(Tabellen 5, 6 und 7)

Die Stelle 3 befindet sich im untern Drittel des Sees, wo dieser eine Tiefe von nur noch 32 m aufweist. Quantitativ stellte

sich diese etwas in Gegensatz hauptsächlich zur Stelle 1 im oberen Teil des Sees. An dieser Stelle, die zeitlich vor allen andern untersucht wurde, fanden wir die Sprungschicht am 20. 9. 41 (Tabelle 4) schon in 10 m Tiefe und hatten nur noch eine schwache Sauerstoffspitze von 14,9 mg/l gemessen, was zirka 150 % theoretischer Sättigung und zirka 140 % Respirationswert entsprach, während an Stelle 1 die theoretische Sättigung 212 % und der Respirationswert 311 % betrugen.

Das Sauerstoffminimum an der Grenze zwischen Meta- und Hypolimnion war mit 2,2 mg/l ungefähr gleich groß wie an Stelle 2. Das Epilimnion hielt sich mit einem Sauerstoffgehalt von 10—11 mg/l, zirka 110 % theoretischer Sättigung und 96 bis 98 % Respirationswert, in gleicher Höhe wie die andern Stellen. Der Wiederanstieg des Sauerstoffgehaltes im Hypolimnion auf 5,1 mg/l in 20 m Tiefe war etwas geringer als in der Seemitte. Von diesem Hypolimnionmaximum sanken die Werte rasch ab, sodaß in 30 m Tiefe, 2 m über Grund, noch 0,9 mg/l und über Grund noch 0,6 mg/l Sauerstoff vorhanden waren. Erstmals fanden wir zu Beginn der Herbstteilzirkulation an einer Meßstelle direkt ob Grund noch Sauerstoff.

Der Sauerstoffvorrat des Frühjahres 1941 war also während der Sommerstagnation nicht aufgezehrt worden.

Die Entwicklung der Teilzirkulation war genau gleich wie an den Stellen 1 und 2, sogar dieselben Sauerstoffwerte wurden in den entsprechenden Tiefen gemessen.

Am 31. 10. 41 befand sich die Grenze zwischen Meta- und Hypolimnion in 12,5 m und die Sauerstoff-Minimumausbildung in 15 m Tiefe, während am 6. 12. 41 das Epilimnion von der Oberfläche bis 15 m Tiefe reichte. Ob Grund in 32 m Tiefe war noch 0,23 mg/l Sauerstoff (1,8 % theoretische Sättigung und 4,8 % Respirationswert) vorhanden.

Die Herbstteil- und -Vollzirkulation (Tabelle 9) war imstande, die Wassermasse von der Oberfläche bis zirka 5 m ob Grund so zu durchlüften, daß durchwegs 65 % theoretischer Sättigung und Respirationswerte von 195 % festgestellt werden konnten. Allerdings konnten diese Werte auch an Stelle 1 und 2 konstatiert werden, mit dem Unterschiede, daß dort unterhalb diesen

Schichten (25 m) mit guten Sauerstoffverhältnissen die ausgesprochen sauerstoffarmen Schichten folgen.

B. Der Sauerstoffgehalt bei Winterstagnation

Die Winterstagnationsperiode war eine ausgesprochen stille Zeit für den unteren Teil des Sees. Die Verhältnisse haben sich in den Tiefen 20 und 25 m leicht verschlechtert. Aber immer ist der Respirationswert in 25 m Tiefe noch 123 %. Der Sauerstoff ob Grund war von 0,3 auf 0,2 mg/l zurückgegangen.

C. Der Sauerstoff bei Frühlingsteil- und -Vollzirkulation

Nach vollzogener Frühlingsvollzirkulation, die am 17. 4. 42 (Tabelle 9), bei Beginn der Sommerstagnation, konstatiert werden konnte, fiel vor allem der hohe Sauerstoffgehalt ob Grund in 32 m Tiefe auf. Hier wurden 3,4 mg/l (26,5 % theoretischer Sättigung und 70,4 % Respirationswert) gemessen. Die Frühlingsvollzirkulation hatte also an dieser Stelle bis zum Grunde durchgewirkt. Die Verhältnisse über 25 m Tiefe waren dieselben geblieben. Die Durchmischung bis auf die Tiefe von 32 m ist keine Ausnahme, denn auch an den andern beiden Stellen vermochte die Frühlingsvollzirkulation in 30 m Tiefe ebenbürtige Verhältnisse zu schaffen. Diese Tiefe befand sich aber dort noch 10 bis 15 m über Grund, sodaß dieser selbst die günstigen Bedingungen nicht zu spüren bekam.

D. Der Sauerstoffgehalt bei Sommerstagnation

Die Ausgangssituation ist im Vorangegangenen erörtert worden, sodaß nur der Verlauf der Sommerstagnation in den verschiedenen Seeschichten beschrieben wird.

Das Epilimnion, also die Tiefen 1 und 5 m, wies von allen Stellen die stabilsten Sauerstoffverhältnisse auf. In der Tiefe 1 m bildet sich am 30. 5. 42 (Tabelle 10) ein kleines Sauerstoffmaximum von 12 mg/l aus.

In der Tiefe 5 m bewegten sich die Sauerstoffwerte im Verlaufe der Sommerstagnation in den gleichen Werten wie in 1 m Tiefe, aber ohne Ausbildung eines Sauerstoffmaximums wie an

Stelle 1. Am Interessantesten verhielt sich die 10-m-Tiefe, indem die Sauerstoffwerte von Anbeginn der Sommerstagnation stetig anstiegen, um am 29. 8. 42 mit 28,8 mg/l Sauerstoff (274 % theoretischer Sättigung, 339 % Respirationswert) das Jahresmaximum zu erreichen.

Es ist hier zu wiederholen, daß die Stellen 1 und 2 je zwei Maxima kurz hintereinander ausbildeten, und zwar Stelle 1: erstes Maximum am 4. 7. 42, Stelle 2: erstes Maximum am 31. 7. 42, und nun kommt Stelle 3 mit einem einmaligen Maximum am 29. 8. 42. Diese zeitlich verschobenen Sauerstoffhöchstwerte können nur meteorologisch bedingt sein.

Das obere Hypolimnion, die Tiefen 15 bis 20 m, verhielt sich wie die entsprechenden Tiefen der Stelle 2, zeigte also stetigen Rückgang des Sauerstoffes, vom 17. 4. 42 bis 31. 10. 42, wobei die Respirationswerte ab Juni/Juli unter die 100%-Werte, bis 50 % sanken. Die Tiefe 25 m verhielt sich ähnlich wie dieselbe Tiefe an Stelle 1 und 2. Zu Beginn der Sommerstagnation betrug der Sauerstoffgehalt 5,7 mg/l (43,9 % theoretischer Sättigung und 115,9 % Respirationswert) um bis zum 31. 7. 42 auf 0,9 mg/l Sauerstoff (7,2 % theoretischer Sättigung und 18,2 % Respirationswert) abzusinken. Nachdem am 29. 8. 42 ein kleines Ansteigen auf 1,9 mg/l verzeichnet wurde, sank der Sauerstoffwert auf das Jahresminimum von 0,5 mg/l in dieser Tiefe. Die Tiefe von 30 m unterschied sich von den entsprechenden Tiefen der beiden andern Meßstellen nur ganz unwesentlich. An allen Stellen war das Jahresmaximum am 17. 4. 42 beobachtet worden, wo an Stelle 3 4,3 mg/l (theoretische Sättigung 33,5 %, Respirationswert 89,1 %), Ende Mai aber schon nur noch 0,9 mg/l gemessen wurden. Nachdem der Minimalsauerstoffwert von 0,2 mg/l am 31. 7. 42 erreicht war, traten keine wesentlichen Schwankungen mehr auf. Der Respirationswert sank am Anfang der Stagnation (30. 5. 42) von 89,1 % auf 18,7 % ab, um fortan unter 10 % zu bleiben.

Der Sauerstoffgehalt über dem Grunde war nur ganz wenig geringer als in 30 m Tiefe, also 2 m über Grund.

An dieser dritten Meßstelle war das Wasser über Grund niemals sauerstoffrei.

Sauerstoffwerte an den drei Probenahmestellen in den verschiedenen Tiefen

Die Tabellen 6—16 zeigen die Werte für den *absoluten Sauerstoff (mg/l),* den *%-Wert der theor. Sättigung* und den *Respirationswert* für jede Probenahme vom 20. 9. 41—23. 9. 42. (* Die Tiefe an Stelle 3 beträgt 32 m)

Tabelle 4 Probenahme im September 1941

Tiefe	Stelle 1 (27. 9. 41)			Stelle 2 (23. 9. 41)			Stelle 3 (20. 9. 41)		
	abs. O_2	%-Sättg.	Resp.	abs. O_2	%-Sättg.	Resp.	abs. O_2	%-Sättg.	Resp.
1 m	11,4	118,2	94,2	10,2	105,0	86,0	10,9	110,5	97,8
5 m	10,5	108,9	88,8	10,5	107,5	93,0	10,7	109,5	96,9
10 m	23,2	212,0	311,0	20,5	196,8	232,0	14,9	149,6	141,5
15 m	3,3	26,7	63,0	2,7	21,7	50,7	2,2	18,4	41,0
20 m	3,7	28,9	73,6	6,0	46,8	119,2	5,1	40,2	101,0
25 m	0,6	4,4	11,5	6,0	46,5	124,3	3,4	26,5	69,7
30 m	0,3	2,6	6,7	0,4	3,5	9,3	0,9	6,9	18,3
35 m*	0,1	0,8	2,3	0,2	1,7	4,6	0,7	5,2	13,8
40 m	0	0	0	0	0	0			
45 m				0	0	0			

Tabelle 5 Probenahme im Oktober 1941

	Stelle 1 (26. 10. 41)			Stelle 2 (31. 10. 41)			Stelle 3 (31. 10. 41)		
1 m	10,7	99,2	141,0	12,6	111,9	187,0	10,0	89,1	149,0
5 m	10,7	98,7	140,0	9,9	87,6	146,0	10,2	90,4	151,0
10 m	10,7	99,2	141,0	10,2	90,0	150,0	10,3	90,8	152,0
12,5 m	0,9	7,1	15,6	0,7	5,5	12,4	10,1	89,5	149,5
15 m	2,2	17,3	42,0	4,6	36,7	88,2	0,3	2,9	6,0
20 m	3,8	30,0	77,3	5,6	43,8	114,0	2,7	21,5	54,8
25 m	2,2	17,2	45,1	5,5	43,0	115,0	1,7	13,0	34,2
30 m	0,7	5,2	13,7	0,2	1,7	4,3	0,3	2,5	6,7
35 m*	0,1	1,1	3,0	0,1	0,8	2,3	0,2	1,7	4,5
40 m	0	0	0	0	0	0			
45 m				0	0	0			

Tabelle 6 Probenahme im November-Dezember 1941

	Stelle 1 (30. 11. 41)			Stelle 2 (6. 12. 41)			Stelle 3 (6. 12. 41)		
1 m	9,3	76,0	169,0	9,2	74,0	174,0	9,2	74,3	174,6
5 m	9,4	77,0	171,5	9,3	74,6	176,0	9,1	73,2	172,3
10 m	9,3	76,0	169,0	9,2	74,3	174,6	9,2	73,9	173,6
15 m	9,2	75,0	167,1	9,1	73.3	172,2	9,0	72,7	171,0
20 m	7,1	57,8	129,2	5,9	47,6	120,0	2,6	20,8	52,2
25 m	3,1	24,5	62,4	1,5	12,5	30,2	0,8	6,1	16,0
30 m	0,2	1,7	4,7	0,3	2.5	6,6	0,2	1,7	4,6
35 m*	0	0	0	0	0	0	0,2	1,8	4,8
40 m	0	0	0	0	0	0			
45 m				0	0	0			

Tabelle 7 Probenahme im Dezember-Januar 1941/42

Tiefe	Stelle 1 (30. 12. 41)			Stelle 2 (3. 1. 42)			Stelle 3 (3. 1. 42)		
	abs.O_2	%-Sättg.	Resp.	abs.O_2	%-Sättg.	Resp.	abs.O_2	%-Sättg.	Resp.
1 m	9,8	75,0	211,0	10,0	75,4	219,2	9,4	70,2	205,0
5 m	9,3	71,6	200,0	9,2	69,9	200,0	9,6	72,4	207,0
10 m	9,0	69,2	192,5	9,1	69,7	193,0	9,2	69,6	198,0
15 m	9,4	72,2	200,0	8,9	67,6	189,0	9,2	69,8	196,0
20 m	3,0	23,1	60,4	8,8	67,2	186,5	8,7	66,1	185,0
25 m	0,2	1,7	4,5	7,1	54,6	149,3	8,3	63,6	176,0
30 m	0,2	1,8	4,7	2,7	20,8	55,3	0,5	4,0	10,5
35 m*	0,2	1,9	5,2	0,2	1,7	4,6	0,3	2,7	7,1
40 m	0	0	0	0	0	0			
45 m				0	0	0			

Tabelle 8 Probenahme im März 1942

	Stelle 1 (21. 3. 42)			Stelle 2 (20. 3. 42)			Stelle 3 (21. 3. 42)		
1 m	9,9	73,4	220,0	9,0	67,5	194,0	9,6	72,0	210,0
5 m	10,0	74,5	223,0	9,3	69,8	203,0	9,7	72,8	214,0
10 m	9,2	68,1	206,0	9,1	68,7	197,7	9,4	70,2	209,0
15 m	8,6	64,0	189,0	8,5	64,1	187,2	9,2	69,0	196,0
20 m	10,0	75,1	220,0	7,9	58,9	173,5	7,7	57,7	170,0
25 m	8,4	62,5	185,0	1,4	10,5	28,6	5,7	43,0	123,5
30 m	0,3	2,6	7,3	0,2	1,7	4,6	0,3	2,6	7,2
35 m*	0,2	1,8	4,9	0,2	1,7	4,6	0,2	1,3	3,9
40 m	0	0	0	0,2	1,7	4,5			
45 m				0,2	1,7	4,4			

Tabelle 9 Probenahme im April 1942

	Stelle 1 (17. 4. 42)			Stelle 2 (17. 4. 42)			Stelle 3 (17. 4. 42)		
1 m	11,1	93,6	187,0	10,9	91,0	188,5	9,8	80,0	178,0
5 m	11,3	94,1	197,0	11,3	93,0	201,0	9,3	74,2	179,5
10 m	10,9	88,6	202,0	9,7	79,2	169,5	8,6	69,0	168,5
15 m	9,8	78,7	187,0	9,1	72,9	176,5	8,8	69,9	175,0
20 m	9,3	73,2	187,5	8,2	64,3	166,0	8,2	64,5	164,0
25 m	6,5	50,5	133,0	6,1	47,3	125,5	5,7	43,9	115,9
30 m	5,2	40,6	105,8	3,6	28,1	57,2	4,3	33,5	89,1
35 m*	0,7	5,3	14,1	0,7	5,2	13,5	3,4	26,5	70,4
40 m	0,2	1,8	4,8	0,9	7,0	18,8			
45 m				0,1	0,7	2,3			

Tabelle 10 Probenahme im Mai 1942

Tiefe	Stelle 1 (30. 5. 42)			Stelle 2 (30. 5. 42)			Stelle 3 (30. 5. 42)		
	abs. O_2	% Sättg.	Resp.	abs. O_2	% Sättg.	Resp.	abs. O_2	% Sättg.	Resp.
1 m	11.8	125,2	91,0	12,8	133,9	105,0	12,0	126,5	93,5
5 m	20,7	192,5	261,0	14,6	142,6	150,1	10,0	105,0	78,7
10 m	9,0	80,0	157,0	9,1	77,2	152,2	11,4	97,5	189,0
15 m	7,9	63,9	150,0	7,7	62,1	142,5	8,4	68,3	154,3
20 m	7,0	51,1	141,0	6,7	53,0	130,0	6,3	50,0	121,0
25 m	6,6	51,5	134,0	4,5	35,1	89,6	4,9	38,9	100,5
30 m	3,0	23,3	60,1	2,1	16,0	42,4	0,9	7,0	18,7
35 m*	0,5	3,7	10,0	0,3	2,6	7,0	0,5	3,5	9,4
40 m	0,3	2,5	6,6	0	0	0			
45 m				0	0	0			

Tabelle 11 Probenahme im Juli 1942

	Stelle 1 (4. 7. 42)			Stelle 2 (4. 7. 42)			Stelle 3 (4. 7. 42)		
1 m	10,5	121,3	60,0	9,5	109,2	55,4	10,0	113,5	60,0
5 m	9,6	108,6	62,3	11,8	129,4	80,3	10,9	120,0	73,0
10 m	16,4	146,1	240,0	12,9	111,5	204,0	14,9	129,3	232,0
15 m	6,2	51,1	103,5	6,1	49,6	114,5	6,2	50,0	114,0
20 m	5,2	41,9	99,0	4,6	36,9	89,8	5,2	41,5	99,5
25 m	4,6	36,4	92,5	3,5	27,7	69,8	3,0	23,5	60,6
30 m	1,8	14,3	36,8	0,2	1,7	4,5	0,3	2,7	7,1
35 m*	0,2	1,7	4,9	0,4	2,8	7,2	0,2	1,8	4,7
40 m	0	0	0	0,2	1,7	4,6			
45 m				0	0	0			

Tabelle 12 Probenahme Ende Juli 1942

	Stelle 1 (31. 7. 42)			Stelle 2 (31. 7. 42)			Stelle 3 (31. 7. 42)		
1 m	9,1	105,3	51,0	9,7	110,9	57,5	9,7	109,4	59,2
5 m	9,3	105,6	55,0	10,5	117,5	64,7	10,1	113,0	65,0
10 m	4,1	36,8	55,6	25,2	226,3	355,0	22,0	199,0	306,0
15 m	4,5	36,9	81,0	4,9	40,0	89,4	4,9	40,2	90,7
20 m	4,6	36,6	89,0	3,7	31,5	71,6	4,3	34,0	82,2
25 m	2,3	17,4	45,6	0,2	1,4	3,7	0,9	7,2	18,2
30 m	0,1	0,9	2,4	0,1	0,9	2,2	0,2	1,4	3,6
35 m*	0	0	0	0	0	0	0,2	1,5	3,9
40 m	0	0	0	0	0	0			
45 m				0	0	0			

Tabelle 13 Probenahme im August 1942

Tiefe	Stelle 1 (29. 8. 42)			Stelle 2 (1. 9. 42)			Stelle 3 (29. 8. 42)		
	abs. O_2	%-Sättg.	Resp.	abs. O_2	%-Sättg.	Resp.	abs. O_2	%-Sättg.	Resp.
1 m	9,3	111,5	47,7	9,7	112,1	56,5	9,5	109,5	53,2
5 m	9,9	112,6	58,4	10,0	114,5	56,8	10,9	124,1	64,3
10 m	24,4	238,2	258,0	19,3	180,5	229,0	28,8	274,0	339,0
15 m	3,0	24,3	53,3	3,3	26,9	59,5	4,3	35,1	77,5
20 m	2,1	16,7	39,3	2,6	21,2	50,8	2,2	17,6	41,8
25 m	3,6	28,8	72,6	1,7	13,9	34,4	1,9	14,7	36,6
30 m	0,5	2,9	9,5	0,1	1,0	2,6	0,5	4,2	10,6
35 m*	0	0	0	0,1	0,5	0,1	0,3	2,4	6,3
40 m	0	0	0	0	0	0			
45 m				0	0	0			

Tabelle 14 Probenahme im September 1942

	Stelle 1 (23. 9. 42)			Stelle 2 (23. 9. 42)			Stelle 3 (23. 9. 42)		
1 m	9,3	103,6	59,5	9,8	109,0	62,7	9,6	106,0	62,3
5 m	9,7	107,5	62,8	10,0	111,0	62,8	9,6	106,4	62,5
10 m	28,5	275,2	317,0	29,4	271,0	386,0	21,0	192,5	276,0
15 m	1,2	10,2	23,0	1,3	10,6	23,8	2,9	24,2	52,0
20 m	1,7	13,3	32,2	1,9	15,4	37,2	2,0	15,6	37,6
25 m	0,7	5,3	13,4	0,9	6,8	17,2	0,5	3,6	8,9
30 m	0,2	1,8	4,8	0,1	0,5	1.4	0,2	1,9	4,8
35 m*	0,7	5,3	13,8	0	0	0	0,1	0,5	1,3
40 m	0	0	0	0	0	0			
45 m				0	0	0			

VI. Zusammenfassung zum Kapitel Sauerstoffverhältnisse

Fassen wir das Resultat unserer Beobachtungen ganz allgemein zusammen, so ergibt sich, daß die Frühjahrsvollzirkulation einen weitgehenden Sauerstoffausgleich bis in die Tiefe von 30 m bewirkt hatte, sodaß wir an Stelle 1 zu Beginn der Sommerstagnation wenigstens 40 % Sauerstoffsättigung konstatierten und die Respirationswerte in dieser Tiefe an den drei Beobachtungsstellen zwischen 75 und 115 % variierten. Weiter reichte die Konvektionsströmung nicht. Wenn wir trotzdem noch bis zum Grunde ganz geringe Quantitäten Sauerstoff feststellen konnten, so läßt sich dies nur durch eine Vermischung

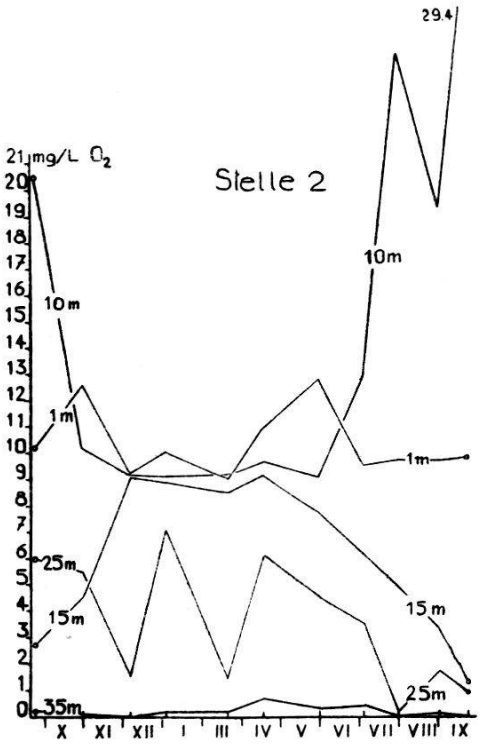


Fig. 2. Sauerstoffjahreskurven der Tiefen 1, 10, 15, 25 und 35 m vom 23. 9. 41 bis 23. 9. 42

des Wassers am Grunde mit geringen Mengen sauerstoffhaltigen Wassers durch wind- oder anders bedingte Strömungen erklären.

Im Laufe der Sommerstagnationsperiode setzte im Epilimnion und namentlich im Metalimnion eine intensive, assimilato-

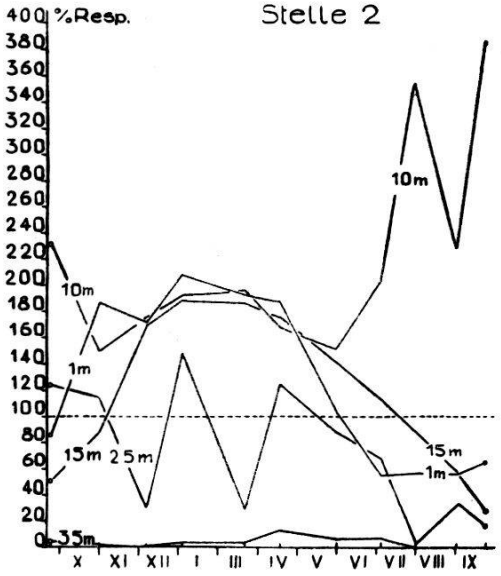


Fig. 3. Respirationsjahreskurven der Tiefen 1, 10, 15, 25 und 25 m vom 23. 9. 41 bis 23. 9. 42

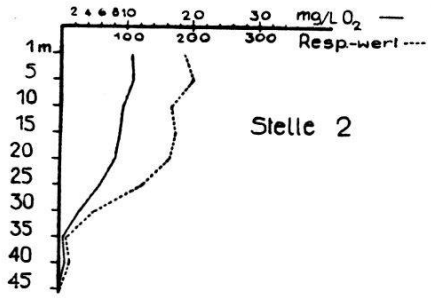


Fig. 4. Sauerstoffschichtung zu Beginn der Sommerstagnation am 17. 4. 42

risch bedingte Sauerstoffsättigung ein (bis 271 % der theoretischen Sättigung und einem Respirationswert von 386 %). Die sehr üppige Vegetationsphase im Metalimnion geht einher mit einem ebenso starken Absterben der Organismen, deren Leichen ins Hypolimnion absinken und im Prozeß ihrer Autolyse sehr intensiv Sauerstoff konsumieren. Das hat zur Folge, daß auf das Sauerstoffmaximum im Metalimnion unmittelbar ein Sauerstoffminimum an der Grenze zwischen Meta- und Hypolimnion anzutreffen ist (Fig. 5). Die Sauerstoffzehrung der autolytisch zerfallenden, abgestorbenen Planktonorganismen setzt sich bei deren weiterm Absinken durch das ganze tiefere Hypolimnion fort und zehrt im Verlaufe der Sommerstagnation und Herbstteilzirkulation von der von der Frühjahrszirkulation her angesammelten Sauerstoffreserve und verbraucht auch die letzten Reste von Sauerstoff ob Grund. Erst mit der Wintervollzirkulation und nach Unterbruch durch die kurze Winterstagnation und Teilzirkulation, vervollständigt und vertieft durch die Frühjahrsvollzirkulation, wird der Sauerstoffgehalt des Hypolimnions wieder ausgefüllt. Man könnte von einem tiefen Atemzug, einmal im Jahre, des Sees sprechen.

In Tabelle 15 sind die Sättigungs- und Respirationswerte an den drei Beobachtungsstellen für die verschiedenen Tiefen, bzw.

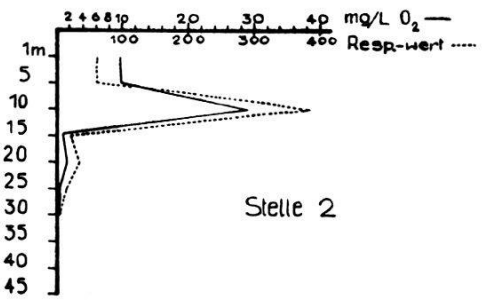


Fig. 5. Sauerstoffschichtung am Ende der Sommerstagnation am 23. 9. 42

für Epi-, Meta- und Hypolimnion in der Weise dargestellt, daß daraus ersichtlich ist, in welchen Jahreszeiten wir in den verschiedenen Schichten Sättigungen bzw. Respirationswerte über 100 % antreffen und in welchen Jahreszeiten in den betreffenden Schichten Untersättigung bzw. Sauerstoffmangel, also Respirationswerte unter 100 % zu beobachten waren. Der Vergleich von Untersättigung und Respirationswert zeigt deutlich, daß die Respirationswerte für die Biozoenose des Sees von größerer Bedeutung sind, haben wir doch im Hypolimnion während des ganzen Jahres Untersättigung, während wenigstens für die kühlere Jahreszeit vom Oktober bis Mai die Sauerstoffkonzentration in den Tiefen bis zu 20 m biologisch ausreicht.

Sättigungsverhältnisse und Respirationswerte an Stelle 2 vom September 1941 bis September 1942

Tabelle 15

Seezone	Tiefe	Übersättigung 100-300 %	Respirationswert 100—400 %	Untersättigung 0—100 %	Respirationswert 0—100 %
Epilimnion	0—5 m	Mai-Okt.	Okt.-Juni	Nov.-April	Juni-Sept.
Metalimnion	10 m	Juli-Okt.	ganzes Jahr	Nov.-Juni	—
Hypolimnion	15 m	—	Nov.-Juni	ganzes Jahr	Juli-Okt.
	20 m	—	Okt.-Juni	ganzes Jahr	Juli-Sept.
	25 m	—	Jan., April, Mai und Okt.	ganzes Jahr	Juni-Sept., Nov.-Dez., Febr.-März
	30—45 m	—	—	ganzes Jahr	ganzes Jahr

Aus den graphischen Darstellungen, Fig. 4 und 5, sind die Sauerstoff- und Respirationswerte zu Beginn und am Ende der Sommerstagnation in ihrer extremen Ausbildung ersichtlich. Das Ende der Sommerstagnation ist gewissermaßen der Wendepunkt im Jahreszyklus und ist maßgebend bei Vergleichen mit andern Seen. Die Sauerstoffverhältnisse in diesem Zeitpunkt sind maßgebend bei der Einteilung eines Sees in das System der Typen, wie sie *A. Thienemann* geschaffen hat.

VII. Diskussion der Sauerstoffverhältnisse und Vergleich mit der Literatur

Zur Veranschaulichung der Sauerstoffverhältnisse im Hallwilersee sollen nur der Zürichsee und der Bodensee zur Vergleichung herangezogen werden.

L. Minder[6] schrieb, daß im Zürichsee zu Beginn der Sommerstagnation 1920 das Wasser in allen Tiefen bis 50 m sauerstoffgesättigt, in der Sprungschicht 15 bis 20 m Tiefe sogar übersättigt sei. «Die Sauerstoffwerte in 50 m und 100 m betragen im Juni 6,4 bzw. 6,1 cm^3/l, entsprechend 74 bzw. 79 % der Sättigung, November: 5,7 cm^3/l, in 50 m; 5,3 cm^3/l in 100 m mit Sättigungen von 63 und 60 %. Also vom Frühjahr bis zum Herbst deutliche aber nicht sehr große Sauerstoffzehrungen, wenn wir sie mit denjenigen der obersten Lagen vergleichen. Ab 100 m geht der Sauerstoffgehalt in steiler Folge zurück, mit Sauerstoffwerten über dem Grund von unter 1 cm^3/l.» Minder fährt fort: «Wesentlich anderes ergeben die Untersuchungen zehn Jahre später 1930. Hier beträgt der Sauerstoffgehalt (Juni) in 80 m Tiefe nur noch 3,4 cm^3/l oder 38 Sättigungsprozente, und in 100 m hält er sich noch auf 0,5 cm^3/l bzw. 5 % der theoretischen Sättigung. Noch tiefer haben wir Spuren oder gar keinen Sauerstoff mehr. Im Dezember 1930 erkennen wir denselben Zustand, nur in verstärktem Maße. Hier setzt die fast oder ganz sauerstoffreie Zone schon in 100 m an.»

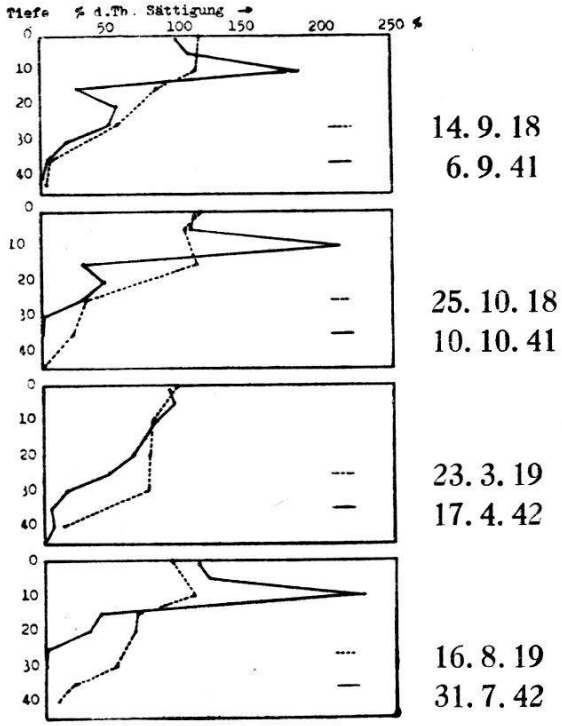
Für den *Bodensee* melden *M. Auerbach, L. Maerker* und *J. Schmalz*[7], daß bis zu einer Tiefe von 100 m das Wasser während des größten Teiles des Jahres einen Sauerstoffsättigungsgrad von wenigstens 90 % aufweise. Nur einmal im tiefsten Gebiete des Sees wurden über dem Grund bloß 78,81 % der Sättigung gemessen. Anhand dieser beiden Beispiele, die an und für sich erwiesenermaßen zwei verschiedenen Seetypen angehören, kann ermessen werden, in welch extremes Stadium unser Hallwilersee eingetreten ist.

Das Gutachten von *A. Brutschy* und *A. Güntert* über den Rückgang des Fischbestandes *im Hallwilersee*[8] vom Jahre 1918 gibt uns ein sehr wertvolles Bild über die damaligen Sauerstoffverhältnisse. Die beiden Forscher arbeiteten vor 23 Jahren mit

der Theiler-Friedinger'schen Schöpfflasche und bestimmten den Sauerstoff nach der Methode von *Winkler*.

In der nachstehenden graphischen Darstellung (Fig. 6) werden die erwähnten Sauerstoffwerte in %-Gehalt der theoretischen Sättigung unseren Messungen in den entsprechenden Jahreszeiten gegenübergestellt. Auf den ersten Blick fallen die metalimnischen maximalen Sauerstoffwerte unserer Messungen auf. Als charakteristisches Merkmal ist die Überschneidung der beiden Vergleichskurven zwischen 10 und 15 m Tiefe zu wer-

Fig. 6. Sauerstofftiefenkurven
Sauerstoffgehalte in typischen Seeperioden in den Jahren 1918/19 und 1941/42



Bei der Auswahl unserer Vergleichswerte wurde besonders auf gleiche Temperaturschichtung geachtet

ten. Dies bedeutet nichts anderes, als daß sich die Sauerstoffverhältnisse im Hypolimnion eindeutig ungünstig entwickelt haben. Allgemein kann für den heutigen Stand gegenüber 1918/1919 festgestellt werden, daß der Sauerstoffgehalt schon nach Frühlingsvollzirkulation, vor allem aber am Ende der Sommerstagnation, im Hypolimnion stark reduziert ist. Man muß sich vor der Meinung hüten, mit der starken Übersättigung im Meta-

limnion, die der Ausdruck für intensivste Assimilation ist, die Untersättigung im Hypolimnion kompensieren zu können. Die beschriebenen Sauerstoffverhältnisse zeigen deutlich, daß die Konvektionsströmungen nicht einmal bei Herbstvollzirkulation eine wesentliche Besserung der hypolimnischen Sauerstoffverhältnisse herbeizuführen vermögen. Erst die Frühlingsvollzirkulation, die nur wenige Tage dauert, vermag geringe Mengen Sauerstoff bis zum Grunde zu befördern.

Als Ursache für diese veränderten Zustände muß unfehlbar starke Eutrophierung, von uns als erhebliche Intensivierung der Phytoplanktonproduktion festgestellt, angenommen werden. Diese aber war nur möglich durch Zunahme an gelösten Nährstoffen organischer und anorganischer Natur, zugeführt durch direkte Abwassereinläufe oder durch die ihrerseits verunreinigten natürlichen Zuflüsse.

Der *Hallwilersee* ist ein typischer *eutropher See* im Sinne Thienemann.

A. Thienemann[9] macht allein die Morphologie des Seebeckens für das gesamte Lebensgetriebe, Reifung und Untergang des Sees, verantwortlich. Er findet im Verhältnis des Sauerstoffes vom Hypolimnion H zum Epilimnion E (O_2H/E) einen eindeutigen Zahlenwert zur Charakterisierung eines Sees. Ein scharfer Umkehrpunkt, O_2H/E größer oder kleiner als 1, scheidet Oligotrophie und Eutrophie der Seen. Der Quotient aus O_2H/E sagt aus, ob die trophogene Zone (produzierende Schicht) des Sees, die durch hohen Sauerstoffgehalt reiches Plankton verrät, die tropholytische Zone (konsumierende Schicht) an Sauerstoffgehalt übertrifft oder umgekehrt.

Unsere Sauerstoffmessungen sind in dieser Richtung ausgewertet worden, und als Grundlage zur Vornahme der einfachen Berechnungen wurden die Rauminhalte des Epilimnions und des Hypolimnions mit Hilfe der Flächeninhalte der verschiedenen Höhenlinien, die das aargauische Vermessungs- und Meliorationsamt in verdankenswerter Weise zur Verfügung stellte, berechnet. Das Epilimnion wurde 10 m tief angenommen und erhielt einen Inhalt von $94{,}4 \cdot 10^6$ m³, während der Rauminhalt des Hypolimnions auf $196{,}0 \cdot 10^6$ m³ berechnet wurde. Aus dem mittleren Sauerstoffgehalt wurden die Werte für den Sauerstoff-

gehalt im Epilimnion und Hypolimnion ermittelt. In der graphischen Darstellung (Fig. 7) wurden die Verhältnisse anschaulich dargestellt. Die Zusammenstellung gibt Einblick in den Sauerstoffhaushalt zu Beginn und am Ende der Sommerstagnation. Zum Vergleiche unserer Sauerstoffmessungen des Jahres 1942 wurden Sauerstoffmessungen aus dem Jahre 1919 von *Brutschy* und *Güntert* herangezogen. Damit gilt für das *Epilimnion* folgendes:

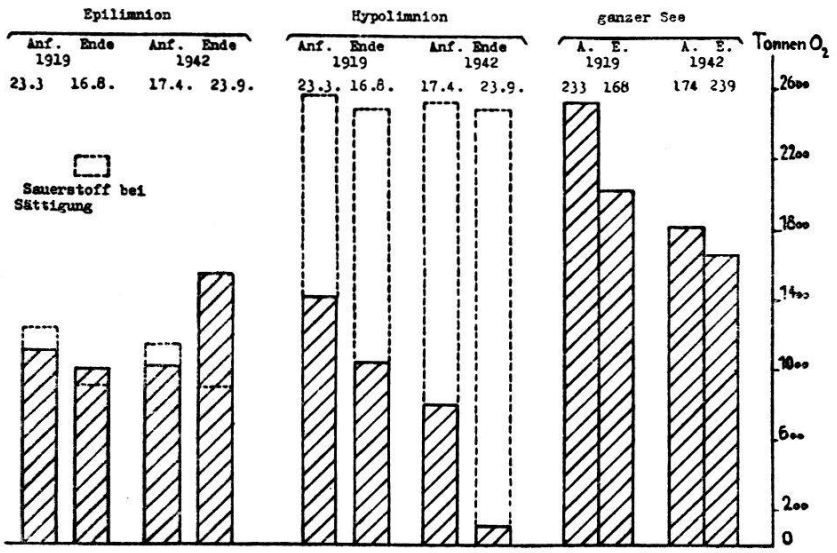


Fig. 7 Sauerstoffhaushalt im Hallwilersee während der Sommerstagnation der Jahre 1919 und 1942

Tabelle 16. **Ergänzung zur graphischen Darstellung Fig. 7**

Sauerstoffhaushalt im Hallwilersee während den Sommerstagnationen der Jahre 1919 und 1942

1919	23. 3.	O_2H/E = 1,285	bei	theoretischer	Sättigung = 2,1
	16. 8.	O_2H/E = 1,05	„	„	„ = 2,7
1942	17. 4.	O_2H/E = 0,80	„	„	„ = 2,2
	23. 9.	O_2H/E = 0,075	„	„	„ = 2,8

Epilimnion:

1919	O_2-Abnahme während der Sommerstagnation	absolut	10 %
	O_2-Abnahme während der Sommerstagnation	bei Sättigung	25 %
1942	O_2-Zunahme während der Sommerstagnation	absolut	53 %
	O_2-Abnahme während der Sommerstagnation	bei Sättigung	22 %

Hypolimnion:

1919	O_2-Abnahme während der Sommerstagnation	absolut	26 %
	O_2-Abnahme während der Sommerstagnation	bei Sättigung	3,5 %
1942	O_2-Abnahme während der Sommerstagnation	absolut	85 %
	O_2-Abnahme während der Sommerstagnation	bei Sättigung	1,2 %

Ganzer See:

1919	O_2-Abnahme während der Sommerstagnation	absolut	19 %
	O_2-Abnahme während der Sommerstagnation	bei Sättigung	10 %
1942	O_2-Abnahme während der Sommerstagnation	absolut	8,5 %
	O_2-Abnahme während der Sommerstagnation	bei Sättigung	7,5 %

Epilimnion:

Sättigungswerte am Anfang und Ende der Sommerstagnation

1919	Frühjahr	23. 3.	90 %	1942	Frühjahr	17. 4.	88 %
	Herbst	16. 8.	108 %		Herbst	23. 9.	172 %

Hypolimnion:

Sättigungswerte am Anfang und Ende der Sommerstagnation

1919	Frühjahr	23. 3.	55 %	1942	Frühjahr	17. 4.	32 %
	Herbst	16. 8.	42 %		Herbst	23. 9.	4,7 %

Ganzer See:

Sättigungswerte am Anfang und Ende der Sommerstagnation

1919	Frühjahr	23. 3.	66 %	1942	Frühjahr	17. 4.	50 %
	Herbst	16. 8.	60 %		Herbst	23. 9.	49 %

Seit dem Jahre 1919 ist eine fundamentale Änderung eingetreten, indem bei gleichbleibendem Volumen des Epilimnions (Annahme) im Jahre 1942 der absolute Sauerstoffgehalt vom Frühling (17. 4.) bis Herbst (23. 9.) um 53 % zugenommen hat, während im Jahre 1919 vom Frühling (23. 3.) bis Herbst (16. 8.) eine Abnahme des absoluten Sauerstoffgehaltes um 10 % zu verzeichnen war. Hätten wir es nur mit der von der Temperatur abhängigen Sauerstoffsättigungsmenge zu tun, so hätte die Menge des gelösten Sauerstoffs im Epilimnion vom kühlen Frühjahr bis zum Sommerende um 22—25 % abnehmen müssen. Da wir es aber gleichzeitig mit einer assimilationsbedingten Sauerstoffproduktion und damit Übersättigung zu tun haben, so erklärt sich diese starke Zunahme im Jahre 1942. Im Jahre 1919 war ebenfalls eine Zunahme festzustellen. Da aber die Eutrophierung damals noch nicht so weit fortgeschritten war, hielt sich auch die Assimilationstätigkeit und damit die Übersättigung in mäßigen Grenzen. Das geht deutlich daraus hervor, daß im Jahre 1942 die Sättigung im Verlaufe der Sommerstagnation von 88 % auf 172 % anstieg, im Jahre 1919 aber nur von 90 % auf 108 %.

Als charakteristische Eigenschaft für 1942 sind für die Verhältnisse im Epilimnion festzuhalten:

Der niedrige Sauerstoffgehalt im Frühling und der hohe Sauerstoffgehalt im Herbst. Die Umkehrung des Verhältnisses vom Jahre 1919 deutet auf fundamentale Änderung oder Ausweitung der Lebensvorgänge im *Epilimnion* im Verlaufe von 23 Jahren. Für das *Hypolimnion* gelten folgende Ausführungen:

Im Verlaufe der Sommerstagnation hat der absolute Sauerstoffgehalt im Jahre 1942 um 85 % abgenommen, während die Abnahme im Jahre 1919 nur 26 % betrug. Bei Sättigung des Wassers mit Sauerstoff hätte die Abnahme 1,2 resp. 3,5 % betragen müssen (Bedingung: Wasser ohne jegliches Leben). Die Sättigungswerte zeigen erst recht wie ungünstig die Sauerstoffverhältnisse im Herbst 1942 standen. Die Abnahme im Verlaufe der Sommerstagnation von 32 % der Sättigung auf 4,7 % ist unverhältnismäßig einschneidender als die Abnahme im Jahre 1919 von 55 % auf 42 % der Sättigung es war.

Als charakteristische Eigenart für die Sauerstoffverhältnisse im *Hypolimnion* für 1942 ist festzuhalten, daß der Frühlingssauerstoffgehalt von 32 % der Sättigung um ganze 10 % niedriger war als der Herbstsauerstoffgehalt des Jahres 1919.

Das Hypolimnion des Jahres 1942 begann die Sommerstagnationsperiode mit einem Sauerstoffgehalt, der nur 57 % desjenigen vom Jahre 1919 betrug. Der Sauerstoffvorrat wurde im Verlaufe der Sommerstagnation praktisch aufgebraucht. Für den See als Ganzes sind die folgenden Verhältnisse bezeichnend:

Das Verhältnis des Sauerstoffgehaltes des Hypolimnions zum Sauerstoffgehalt des Epilimnions beträgt:

$$O_2H/E\ (17.4.42) = 0{,}8 \quad \text{im Frühling}$$
$$O_2H/E\ (23.9.42) = 0{,}075 \quad \text{im Herbst}$$

während die entsprechenden Werte des Jahres 1919 folgende sind:

$$O_2H/E\ (23.3.19) = 1{,}285 \quad \text{im Frühjahr}$$
$$O_2H/E\ (16.8.19) = 1{,}05 \quad \text{im Herbst.}$$

Daraus ersehen wir rein zahlenmäßig, daß das Verhältnis ein ausgesprochen mißliches geworden ist, denn als ausschlag-

gebender Faktor hat nur der Herbstwert, also der Zustand am Ende der Sommerstagnation, volles Gewicht. Wenn der Quotient aus O_2H/E im Jahre 1919 noch 1,05 betrug, so war der See nach *A. Thienemann* bereits in das Umbildungsstadium getreten.

In den 23 Jahren, die seither verflossen sind, ist, wie der Quotient von 0,075 im Jahre 1942 zeigt, eine außerordentliche Verschlechterung eingetreten. Der Hallwilersee hat einen starken Eutrophierungsgrad erreicht, der durch den Verlauf der Sauerstoffkurven während des Jahres und durch den O_2H/E-Quotienten eindeutig als Auswirkung starker Nährstoffanreicherung erscheint.

3. Der Kohlensäuregehalt und die Karbonathärte

a) Die Kohlensäureverhältnisse

Die im Wasser gelöste freie Kohlensäure ist zum größten Teil (zirka 99 %) als Gas (CO_2) vorhanden. Als eigentliche Säure (H_2CO_3) ist also nur ein geringer Teil hydrolysiert und gelöst. Ein Großteil der im Wasser gelösten Kohlensäure kann infolgedessen nicht als Säure wirksam sein. Die geringe Dissoziation ($K = 3{,}0 \times 10^{-7}$) verleiht der Kohlensäure nur schwachen Säurecharakter. Die Bestimmung wird in der Wasserchemie mit Sodalösung gegen Phenolphthalëin als Indikator ausgeführt.

In dieser Areit wurden die Bestimmungen nach der vereinfachten Titration mit Sodalösung nach *Klut*[10] angewandt.

Die Kohlensäure entsteht bei der aeroben Atmung aller Organismen und kann als Beweis von Lebenstätigkeit gewertet werden. Auch das Leben in einem See verrät sich — unter diesem Gesichtspunkt betrachtet — durch die Kohlensäure, sie könnte als Indikator für Verunreinigung angesprochen werden. Nun spielt sie aber nicht nur als End-Abbauprodukt der organischen Stoffe in der Biozoenose eine Rolle, sondern sie ist bekanntlich auch bei der gesamten Pflanzenwelt zugleich wichtigster Aufbaustoff. Im See assimilieren bei Sonnenlicht Chloro-