

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

**Artikel:** Limnologische Untersuchungen im Hallwilersee  
**Autor:** Keller, Rudolf  
**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:** 16.12.2025

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

# **Limnologische Untersuchungen im Hallwilersee**

**Von Rudolf Keller, Birrwil**



## Inhaltsübersicht

	Seite
<b>Einleitung</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>1. Die Thermik im offenen See</b> . . . . .	<b>8</b>
<b>Einleitung</b> . . . . .	<b>8</b>
I. Die Temperatur des Oberflächenwassers . . . . .	9
II. Die Temperatur in den tieferen Wasserschichten . . . . .	11
III. Die Temperatur in der Seetiefe . . . . .	12
IV. Die jährlichen Temperaturschwankungen . . . . .	14
V. Generelle Beschreibung der beobachteten Thermik des Hallwilersees . . . . .	15
<b>2. Die Sauerstoffverhältnisse</b> . . . . .	<b>17</b>
I. Allgemeines . . . . .	17
II. Probenahme und Untersuchungsmethodik . . . . .	19
III. Die Sauerstoffverhältnisse in der Seemitte (Stelle 2) . . . . .	20
IV. Die Sauerstoffverhältnisse im oberen Seeteil (Stelle 1) . . . . .	29
V. Die Sauerstoffverhältnisse im unteren Seeteil (Stelle 3) . . . . .	31
VI. Zusammenfassung zum Kapitel Sauerstoffverhältnisse . . . . .	38
VII. Diskussion der Sauerstoffverhältnisse und Vergleich mit der Literatur . . . . .	42
<b>3. Der Kohlensäuregehalt und die Karbonathärte</b> . . . . .	<b>48</b>
a) Die Kohlensäureverhältnisse . . . . .	48
b) Die Härte . . . . .	53
c) Diskussion der Kohlensäure- und Härteverhältnisse im Hallwilersee anhand der Literatur . . . . .	56
<b>4. Die Methoden zur Bestimmung der Kohlensäureaggressivität unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse im Hallwilersee</b>	<b>59</b>
<b>5. Kombinierte Temperatur - Sauerstoff - Plankton - Untersuchung während 24 Stunden im Hallwilersee am 18./19. 6. 43</b> . . . . .	<b>62</b>
<b>Einleitung</b> . . . . .	<b>62</b>
I. Die Temperaturverhältnisse . . . . .	63
II. Die Sauerstoffschichtung . . . . .	65
III. Schichtung des Planktons . . . . .	67
IV. Beziehung zwischen Plankton- und Sauerstoffgehalt . . . . .	74
V. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen . . . . .	75
<b>6. Strömungsmessungen</b> . . . . .	<b>76</b>
<b>7. Der Chemismus des Sees</b> . . . . .	<b>87</b>
A. Allgemeines . . . . .	87
B. Resultate und Diskussion der chemischen Seewasseranalysen	89

8. Schlammuntersuchungen . . . . .	111
I. Allgemeines . . . . .	111
II. Resultate und Diskussion der physikalischen und chemischen Schlammuntersuchungen . . . . .	114
III. Generelle Beurteilung des Schlammes . . . . .	120
9. Zusammenfassung . . . . .	121
Literatur . . . . .	125

## Einleitung

Den Anstoß zur Ausführung vorliegender Arbeit gaben die immer eindringlicher werdenden Klagen von Seiten «der Fischerei» über «Verschmutzung» des Hallwilersees. Augenfällige Folgen dieser zum Schlagwort gewordenen Verschmutzung waren der ständig wachsende Rückgang der Fischereierträge. Außerdem war jeweils im Frühling die Seeoberfläche mit sog. Burgunderblut (*Oscillatoria rubescens*) derart unansehnlich bedeckt, daß es von allgemeinem Interesse schien, den Zustand des Sees zu untersuchen. Herr Prof. Dr. W. von Gonzenbach, Direktor des Hygiene-Institutes an der ETH, erklärte sich bereit, mir die Durchführung der Untersuchungen zu ermöglichen. Als Ziel wurde das allgemein limnologische Geschehen, hauptsächlich die Festlegung der physikalischen Faktoren und die Analyse der gelösten Stoffe und ihr Umsatz in den Vordergrund gestellt.

Zur Erklärung der physikalisch-chemischen Befunde waren quantitative Planktonuntersuchungen in Aussicht genommen. Außerdem waren Einzeluntersuchungen am Abwassereinlauf des Dorfbaches Birrwil geplant und auch in Angriff genommen worden, bis sich ergab, daß die angewandten Methoden versagten und die Untersuchungen zu weit führen würden.

Im Verlaufe der Arbeiten wurde zwischen dem Hygiene-Institut und Herrn Prof. Dr. Jaag vom Institut für spezielle Botanik vereinbart, daß Herr Rudolf Braun, stud. rer. nat., der Planktonuntersuchungen im Hallwilersee ausführte, mit mir zusammenarbeiten sollte.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Rudolf Braun für seine Mitarbeit und besonders Herrn Prof. Dr. Jaag für sein Entgegenkommen bestens danken.

Zu besonderer Dankbarkeit bin ich Herrn H. F. Kuisel, Chemiker der Beratungsstelle für Abwasserreinigung und Trinkwasserversorgung, die dem Hygiene-Institut der ETH angegliedert ist, verpflichtet. Unter seiner bewährten Leitung wurden die chemischen Analysen durchgeführt. Herr Kuisel forderte

die Arbeit in jeder Weise und hat wesentlichen Anteil an deren Gelingen.

Es war unser Bestreben, die früher im Hallwilersee ausgeführten Arbeiten von *Dr. A. Brutschy* und *Dr. A. Güntert* zum Vergleich mit unseren Befunden heranzuziehen.

Zur hydrographischen Charakterisierung des Hallwilersees werden hier die wesentlichsten Daten angeführt, die aus der Arbeit von *Dr. A. Güntert* «*Der Hallwilersee, ein verschwindender Glacialsee und seine Tiefenfauna*» entnommen sind:

«Über die geographischen Verhältnisse des Hallwilersees orientieren die Blätter 170 und 172 des Siegfriedatlases. Er liegt zwischen  $47^{\circ} 14'$  und  $47^{\circ} 19'$  n. Br. und  $5^{\circ} 52'$  bis  $5^{\circ} 53'$  ö. L. von Greenwich. Die Höhe des Spiegels beträgt 452,3 m ü. M., die maximale Länge mißt 8,5 km, die maximale Breite 1,65 km, die Oberfläche  $10,29 \text{ km}^2$ , das Volumen  $0,215 \text{ km}^3$ , die maximale Tiefe 47,3 m, die mittlere Tiefe 20,6 m. Das Einzugsgebiet umfaßt  $141,78 \text{ km}^2$ . Der Wasserzufluß der Wag beträgt im Mittel zirka 700 Sekundenliter, der Abfluß im Aabach im Mittel zirka 1400 Sekundenliter. Daraus ergibt sich, daß die übrigen Zuflüsse dem See mindestens ebensoviel Wasser bringen, als der Hauptzufluß.»

Es kann noch beigefügt werden, daß der Gesamtinhalt nach eigener Berechnung  $290 \times 10^6 = 290\,000\,000 \text{ m}^3$  beträgt; daraus ergibt sich, daß die Erneuerung des Seewassers theoretisch nur im Verlaufe von sechs Jahren erfolgt.

Vor Festlegung der Probenahmestellen wurde der See in der Längs- und Querrichtung ausgelotet. Es wurden nirgends starke Erhöhungen oder Vertiefungen festgestellt, die mit der Charakterisierung des Seebeckens als Wannenform im Gegensatz stünden.

Die Probenahmestellen wurden in der Seeaxe, d. h. tiefsten Stellen, eine im südlichen Teile, eine in der Seemitte und eine im nördlichen Teile des Sees gewählt.

Die Probenahmestelle Nr. 1 befindet sich an der tiefsten Stelle auf der Linie Schifflände Beinwil — Kirche Aesch. Die Tiefe beträgt 40 m.

Die Probenahmestelle Nr. 2, als diejenige der Seemitte und

tiefsten Stelle (45 m) des Sees, liegt auf der Linie Birrwil (Roßweid)—Kirche Fahrwangen.

Die Probenahmestelle Nr. 3, im unteren nördlichen Seeteil gelegen, befindet sich auf der Linie Weberei Birrwil—Arbeiterstrandbad Tennwil. Der See ist an dieser Stelle 32 m tief.

Die Untersuchungen nahmen im Herbst 1941 ihren Anfang. Die Proben wurden monatlich gefaßt, sodaß im September 1942 der Jahreszyklus geschlossen war. Die Strömungsmessungen, die Fassung der Schlammproben und die Tag- und Nachtuntersuchung wurden hauptsächlich im Jahre 1943 ausgeführt.

Die Firma A.G. Fehlmann Söhne Schöftland, bei welcher ich in Birrwil seit 1941 angestellt bin, ermöglichte mir, neben meiner Arbeit als Färbereichemiker, die Untersuchungen durchzuführen, wofür ich ihr meinen aufrichtigen Dank ausspreche.

Die vorliegende Arbeit wurde am Hygiene-Institut an der ETH Zürich unter Leitung von

*Herrn Prof. Dr. W. von Gonzenbach*

durchgeführt. Es sei mir an dieser Stelle gestattet, Herrn Prof. Dr. von Gonzenbach für die jederzeit erteilten wertvollen Ratschläge und das Interesse, das er meiner Arbeit entgegen brachte, meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

# 1. Die Thermik im offenen See

## Einleitung

Die direkte Wärmestrahlung der Sonne zur Hauptsache, teilweise auch die Wärmestrahlung der über dem See liegenden Atmosphäre, bedingen die Wärmeaufnahme des Sees von der Oberfläche her, während umgekehrt die Wärmeabgabe hauptsächlich durch nächtliche Ausstrahlung, dann auch durch Abstrahlung an den kühleren Luftkörper und zum nicht geringsten Teil durch Verdunstung erfolgt, die ihrerseits abhängt vom jeweiligen Sättigungsdefizit und von der Bewegung (Wind, Wellen) der überlagernden Luft. Ein letzter Faktor des Wärmeaustausches von Luft und Wasser ist der direkte Übergang, d. h. die Leitung, der aber im Vergleich zu den oben beschriebenen Faktoren angesichts der viel geringeren Wärmekapazität der Luft im Verhältnis zu derjenigen des Wassers und des meist nicht erheblichen Temperaturgefälles vom einen zum anderen Medium, eine geringere Rolle spielt. Das Dichtemaximum des Hallwilerseewassers liegt bei  $4,4^{\circ}\text{C}$ . Kälteres und wärmeres Wasser muß sich auf diesem  $4,4^{\circ}$  warmen Wasser aufschichten. Im Sommer stellt sich direkte Schichtung ein, während diese im Winter durch die inverse Schichtung, kalt oben, warm unten, abgelöst wird. Durch den Einfluß der Jahreszeiten treten die gesetzmäßigen, thermischen Zirkulationsströmungen ein. Im Laufe des Sommers stabilisiert sich die direkte Temperaturschichtung so lange, bis sich bei einem oberflächlichen Temperaturmaximum eine stagnierende Vertikalschichtung eingestellt hat. Die kalten Nächte des Herbstes kühlen die Oberfläche des Sees langsam ab, das Wasser wird schwerer und sinkt bis zu der seiner Temperatur entsprechende Tiefe ab. Es entsteht eine homotherme Schicht. Von dieser Schicht an abwärts beginnt erst die mehr oder weniger rasche Temperaturabnahme bis zum Minimum in der Tiefe. Die Grenzschicht mit dem starken Temperaturabfall heißt die *Sprungsenschicht*. Mit weiterer Abkühlung rückt die

Sprungsicht immer tiefer, bis die Oberflächentemperatur  $4,4^{\circ}\text{C}$  erreicht hat und diese Wassermassen bis zum Grund sinken können. Die Periode der beginnenden Zirkulation bis zur Abkühlung auf  $4,4^{\circ}$  ist die *Herbstteilzirkulation*. Ist die  $4,4^{\circ}$ -Grenze erreicht, so ist die *Herbstvollzirkulation* im Gang. Schreitet die Abkühlung noch weiter fort, so werden die oberflächlichen Schichten dadurch leichter und schichten sich auf dem  $4,4^{\circ}$ igen Wasser auf. Die Zirkulationsströmung macht einer Stagnation — der *Winterstagnation* — Platz. Mit dem Frühjahr werden nun wieder die obersten Wasserschichten erwärmt, bei Eisverschluß zunächst das Eis geschmolzen, wodurch das Wasser etwas schwerer wird und analog der Herbstteilzirkulation auf die entsprechende Tiefe absinkt, bis bei Aufwärmung der Oberfläche auf  $4,4^{\circ}$  diese Wassermassen wieder auf den Grund hinabsinken können, also wieder eine Vollzirkulation — die *Frühlings-Vollzirkulation* — eintritt. Hierauf folgt bei weiterer Erwärmung wieder die direkte thermische Schichtung bis zum Sommermaximum. Das Jahr schließt also sechs Perioden ein: Sommerstagnation, Herbstteilzirkulation, Herbst-Winter-Vollzirkulation, Winterstagnation, Frühlingsteilzirkulation und Frühlingsvollzirkulation.

Die Temperaturmessungen wurden mit dem Tiefseethermometer der Firma Friedinger in Luzern durchgeführt.

### I. Die Temperatur des Oberflächenwassers

Das Oberflächenwasser weist naturgemäß die größten Temperaturschwankungen auf. Im Untersuchungsjahr war der See vom 12. 1. 42 bis 18. 3. 42 zugefroren. Im Hochsommer, am 29. 8. 42, wurde an der Stelle 1 das Temperaturmaximum von  $24,2^{\circ}\text{C}$  (1 m Tiefe) gemessen. Die Schwankung beträgt also mindestens  $24,2^{\circ}$ . In 5 m Tiefe wurde an der gleichen Stelle wie auch an Stelle 3 eine Temperatur von  $21,7^{\circ}$  gemessen, nur die Seemitte (Stelle 2) zeigte  $22,2^{\circ}$  und war mit der Oberfläche praktisch homotherm.

Trotzdem die Oberfläche des Sees nur  $10,3 \text{ km}^2$  beträgt, werden doch an den drei Meßstellen, die in der Seeaxe verteilt an den jeweils tiefsten Punkten des Querprofils des Grundes

liegen, das ganze Jahr hindurch Differenzen von 1—2° C gemessen.

Die Ursachen dafür sind verschiedener Natur. In erster Linie wird wohl der Wind, der die Strömungen und Ausgleichsströmungen erzeugt, beteiligt sein. Er kann stärker erwärmtes oder auch abgekühltes Uferwasser gegen die Seemitte bewegen. Lokale Winde erzeugen Wellen, die eine stärkere Durchmischung verursachen und oberflächliche Temperaturschichtung zerstören. Örtliche kalte Regenschauer oder Hagel kühlen ab. Lokale Trübungen des Wassers, wie sie oft festgestellt werden, können verschiedene Erwärmung des Wassers verursachen. Trübes Wasser ist bekanntlich weniger diatherman als klares, es absorbiert die Wärmestrahlen stärker, d. h. es läßt die Wärmestrahlen weniger tief eindringen. Außer diesen Ursachen spielt auch die Tageszeit eine beträchtliche Rolle. Die Messungen können nicht an allen drei Stellen zugleich mit demselben Instrument vorgenommen werden. Die Temperaturjahreskurve (Fig. 1), die den Verlauf des Temperaturabfalles und Anstieges in 1 m Tiefe veranschaulicht, zeigt außer dem Absinken auf 0° und darauffolgendem totalen Eisverschluß nichts Besonderes. Innerhalb von 9 Tagen sank die Temperatur von 3,6° auf 0°. Während 65 Tagen war der See zugefroren. 2 Tage nach dem Auftauen war das Oberflächenwasser bereits wieder 2,9° bis 3,3° C warm. Der rascheste Temperaturanstieg erfolgte von Mitte April bis Ende Mai. Anfangs Juli war die Sommertemperatur schon auf 21,5° bis 22,2° C angestiegen, um von Anfang September an wieder stetig abzusinken.

Anläßlich der Strömungsversuche vom 25./26. 6. 42 in 10 m Tiefe, auf den Höhen der drei Probenahmestellen, wurden die Temperaturen der Start- und Endstellen der Strömungskreuze verfolgt. Allgemein wurde beobachtet, daß die Temperaturen an den Start- und Endstellen nicht dieselben waren.

Die folgende Tabelle veranschaulicht die Temperaturdifferenzen bei allgemeiner Nord—Süd-Windrichtung.

Diese Beobachtungen lassen darauf schließen, daß die gemessenen Tiefenströmungen nicht durchaus horizontal verlaufen, was ohne weiteres einleuchtend ist. Die Methodik der mit bestimmten Kabellängen versenkten Kreuze erlaubt uns ledig-

*Tabelle 1*

Ort	Temperatur an		Temperatur-Differenz
	Startpunkt	Endpunkt	
Stelle 1	8,1	9,3	+ 1,2
	9,3	9,55	+ 0,25
	7,9	8,5	+ 0,6
	9,7	9,3	- 0,4
Stelle 2	7,4	7,3	- 0,1
Stelle 3	9,7	8,0	- 1,7
	9,75	8,0	- 1,75
	9,3	16,4	+ 7,1 (?)

lich die horizontale Projektion der Bewegungsrichtung der Wassermassen anzuzeigen.

## II. Die Temperatur in den tieferen Wasserschichten

### *Herbstteilzirkulation*

Vom 20.—27.9.41 wurden die ersten Temperaturmessungen ausgeführt. Zu dieser Zeit hatten die kühlen Nächte eingesetzt, eine charakteristische Sprungschicht war aber noch nicht ausgebildet, sie war erst im Entstehen begriffen. Schon anfangs Oktober war die Temperatur bis zu einer Tiefe von 8 m ausglichen, und Ende Oktober war die Sprungschicht bei 10 m Tiefe angelangt. Einen Monat später, Ende November/anfangs Dezember, trafen wir an den Stellen 1, 2 und 3 die Sprungschicht unterhalb 15 m Tiefe. Im Hallwilersee wurde bei 15 m Tiefe ein Temperaturmaximum von  $7,3^{\circ}\text{C}$  im Oktober und ein Minimum von  $3^{\circ}\text{C}$  im März gemessen. Die jährliche Schwankung betrug dort nur  $4,3^{\circ}\text{C}$ . Weil wir in 15 m Tiefe schon auf die ausgesprochene Kaltwasserzone stoßen, ist es leicht verständlich, daß die Sprungschicht im Zeitraum von einem Monat nur 5 m, die Temperatur aber um  $3,9$ — $5,8^{\circ}\text{C}$  abgesunken ist. Bis zur Temperatur des Dichtigkeitsmaximums, für den Hallwilersee  $4,4^{\circ}\text{C}$ , mußte sich das Wasser über der Sprungschicht noch um  $1,5$ — $2,2^{\circ}\text{C}$  abkühlen.

*Die Vollzirkulation* kann nur kurze Zeit dauern. Das weitere Abkühlen verringert das spezifische Gewicht des Wassers, so-

daß das kältere dem wärmeren überlagert und somit die Vollzirkulation einer

*Winterstagnation* Platz macht. Die inverse Temperaturschichtung konnte sich langsam ausbilden, denn unter die Eisdecke, die den See am 12.1.42 verschlossen hatte, wirkten keine Temperaturschwankungen mehr ein. Leider war es nicht möglich, die Temperaturschichtung unter der Eisdecke zu messen. Als am 20. und 21.3.42, zwei Tage nach Eisbruch, die Messungen ausgeführt wurden, war die

*Frühlingsteilzirkulation* schon im Begriff, in *Frühlingsvollzirkulation* überzugehen. Ebenso wie die *Herbst-Winter-Vollzirkulation* hatten auch die *Frühlingsteil- und -Vollzirkulation* nur kurze Dauer. Die Wärmestrahlung der Sonne an Frühlingstagen machte der Frühlingsvollzirkulation ein rasches Ende und bildete die direkte Temperaturschichtung heraus. Bis zum Sommermaximum der Temperatur ergab sich die längste zusammenhängende Periode — *die Sommerstagnation*. Sie hatte am 17.4.42 schon begonnen und dauerte bis zum 23.9.42.

### III. Die Temperatur in der Seetiefe

Trotzdem der See an den ausgewählten drei Probenahmestellen verschieden tief ist, wurden bei der Winterstagnation nur zwei verschiedene Grundtemperaturen gemessen. Die Stellen 1 und 2 wiesen beide  $4,4^{\circ}\text{C}$  auf, während an der wenig tiefen Stelle 3 nur  $4,2^{\circ}\text{C}$  beobachtet wurden. Der Grund für diese Weiterabkühlung unter die Temperatur des Dichtemaximums kann auf verschiedene Weise erklärt werden.

1. Tatsache ist, daß diese Abkühlung während der Zeit des Eisverschlusses stattgefunden hat. Der Abfluß bedingt das Nachströmen neuer Wassermassen aus dem südlicheren Teile des Sees. Diese Wassermassen können Ausgleichsströmungen am unteren Seeteil auslösen, die kaltes Wasser in die Tiefe reißen und dort eine Abkühlung verursachen. Oder aber

2. das Seewasser wurde vor dem Zufrieren durch starke Bise durchwühlt.

Nach dem Auftauen des Sees setzte die Frühlingsteilzirkulation ein, die hier weniger lang gedauert haben mag, hingegen

wirkte sich die Vollzirkulation umso intensiver aus. Die Vollzirkulation setzte ein, als die homogene Schicht  $4,2^{\circ}\text{C}$  aufwies und dauerte fort, bis die Temperatur von  $4,4^{\circ}\text{C}$  erreicht war. Die Sauerstoffwerte bei Beginn der Sommerstagnation sind relativ hoch.

Aus der Tabelle 2 geht hervor, daß sich die Temperatur am Grunde des Sees im Laufe des Sommers 1942 um  $0,3^{\circ}\text{C}$  erhöht hat. Die Stellen 1 und 3 gingen zeitlich voran und zeigten diese Temperaturerhöhung auf dem Grunde schon am 4. 7. 42, während in der Seemitte (Stelle 2) erst Ende Juli eine Erhöhung von  $0,1^{\circ}$  gemessen wurde. Es ist festzuhalten, daß am Ende des Versuchsjahres die Wassertemperaturen in allen Schichten gegenüber dem gleichen Zeitpunkte des Vorjahres höher lagen. Diese *allgemeine* Temperaturerhöhung scheint auf den ersten Blick die Ursache derjenigen der Grundsichten zu sein. Dabei muß aber die Frage, woher bei Sommerstagnation die Wärme für die Temperaturerhöhung des Wassers am Grunde kommt, geprüft werden.

Aus dem Kapitel «Strömungsmessungen» kann entnommen werden, daß die Wassermasse des Sees kein ruhendes Element darstellt. Im Gegenteil, die Wassermassen werden gedrängt und gestoßen durch den Wechsel der Winde. Die Bewegungen sind nicht allein oberflächlich, sondern die Strömungen wirken sich bis auf den Grund hinunter aus. In 30 m Tiefe wurden Strömungen von bis 20 m/Std. gemessen. Diese Geschwindigkeit stellt sicherlich kein Maximum dar. Wo solche Bewegungen auftreten, muß auch eine Durchmischung der Wassermassen, wenn auch vielleicht mehr oder weniger regional beschränkt, stattfinden, wodurch *Temperaturen ausgeglichen* werden. Die Tatsache, daß die Temperaturen in allen Tiefen während des Sommers 1942 gegenüber denjenigen des Vorjahres angestiegen sind, und zwar um  $0,3^{\circ}$  in 45 m und um  $4^{\circ}$  in 1 m Tiefe, und der Nachweis von Strömungen in den verschiedensten Richtungen, läßt diese Temperaturerhöhung am Seegrunde wenigstens teilweise erklären.

Die Wärmemengen, die durch biologische Prozesse und chemische Abbaureaktionen frei werden, sind nach der herrschenden Auffassung (vergl. *G. Alsterberg*<sup>1</sup>) als Wärmespender

der Tiefe ebenso zu vernachlässigen wie die Eigenwärme der Erde. Dagegen können die tiefsten Schichten des Sees durch das Wasser der Zuflüsse erwärmt werden. Führt das Zuflußwasser größere oder geringere Mengen suspendierten Schlammes mit, oder ist das spezifische Gewicht erhöht durch gelöste Salze, Säuren und Hydroxyde, so ist dieses zugeführte Wasser schwerer als das Seewasser gleicher Temperatur. Dieses sinkt infolgedessen nach seiner Einmündung in den See tiefer hinab als es seine Temperatur erfordern würde und gelangt so in Tiefenschichten, die zwar die gleiche Dichte haben wie das Zuflußwasser, aber nach den Gesetzen der thermischen Schichtung kälter sind als dieses. Das schlamm- oder mineralreiche Wasser mischt sich mit dem kalten Tiefenwasser und erwärmt dieses.

*Tabelle 2*

Stelle 2

Daten	23. 9	31. 10.	6. 12.	3. 1.	20. 3.	17. 4.	30. 5.	4. 7.	31. 7.	1. 9.	23. 9.
Tiefen											
1 m	17,0	9,8	5,9	3,3	3,3	7,4	17,4	21,9	21,6	22,3	20,6
5 m	16,3	9,8	5,9	3,5	3,3	7,1	14,2	19,8	20,9	22,2	20,6
10 m	13,4	9,8	5,9	3,9	3,4	4,6	8,0	8,8	10,5	12,2	11,5
15 m	6,0	5,4	5,9	3,8	3,2	5,6	6,2	6,1	6,5	6,7	6,5
20 m	5,0	4,7	4,8	3,9	3,1	4,8	5,4	5,5	5,6	5,7	5,6
25 m	4,6	4,6	4,6	4,1	4,1	4,5	4,8	5,1	5,1	5,3	5,1
30 m	4,5	4,5	4,5	4,4	4,1	4,4	4,4	4,8	4,8	4,9	4,8
35 m	4,4	4,4	4,4	4,4	4,1	4,4	4,4	4,6	4,8	4,7	4,7
40 m	4,4	4,4	4,4	4,4	4,3	4,4	4,4	4,6	4,7	4,7	4,7
45 m	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,5	4,7	4,7

#### IV. Die jährlichen Temperaturschwankungen an Stelle 2

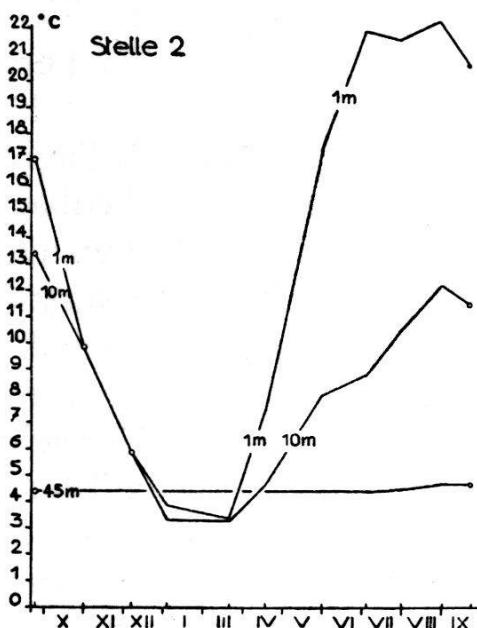
Als Tiefpunkte zur Bestimmung der jährlichen Temperaturschwankungen wurden die Messungen vom 20. 3. 42 verwendet. Die größten Differenzen finden wir zwischen 5 und 10 m und zwischen 10 und 15 m Tiefe. Die 10-m-Schicht weist noch ein Temperaturmaximum von 12,2°C auf, während in 15 m Tiefe nur noch eine Maximaltemperatur von 6,7° gemessen wurde. Diese Tiefe ist als Kaltwasserzone ausgeprägt.

Die jährlichen Temperaturschwankungen an Stelle 2 (Seemitte ergeben sich aus nachstehender Tabelle.

*Tabelle 3*

Bei 1 m Tiefe Schwankung zwischen 3,3°—22,3° C	Differenz 19,0° C
„ 5 m „ „ „ 3,3°—22,2° C „ 18,9° C	
„ 10 m „ „ „ 3,4°—12,2° C „ 8,8° C	
„ 15 m „ „ „ 3,2°— 6,7° C „ 3,5° C	
„ 20 m „ „ „ 3,1°— 5,7° C „ 2,6° C	
„ 25 m „ „ „ 4,1°— 5,3° C „ 1,2° C	
„ 30 m „ „ „ 4,1°— 4,9° C „ 0,8° C	
„ 35 m „ „ „ 4,1°— 4,7° C „ 0,6° C	
„ 40 m „ „ „ 4,3°— 4,7° C „ 0,4° C	
„ 45 m „ „ „ 4,4°— 4,7° C „ 0,3° C	

Fig. 1. Temperaturjahreskurven der Tiefen 1, 10 und 45 m  
vom 23. 9. 41 bis 23. 9. 42



## V. Generelle Beschreibung der beobachteten Thermik des Hallwilersees

Im Untersuchungsjahr konnten die thermisch bedingten bzw. ausgelösten charakteristischen Seeperioden festgestellt werden. Wenn es auch nicht gelang, z. B. die Tage der Winter- und Frühlingsvollzirkulation festzuhalten, so konnte doch anhand der Schichtung die vollzogene Umbildung genau und deutlich ersehen werden. Nach dem thermischen Verhalten muß der Hallwilersee in die Serie der temperierten Seen eingereiht wer-

den. *F. A. Forel*<sup>2</sup> hat drei verschiedene thermische Seetypen mit Übergängen unterschieden: den tropischen, temperierten und polaren Typus.

Der Herbst- und Frühlingstypus der Sprungschicht, wie sie von *L. Minder*<sup>3</sup> unterschieden wurden, war gut ausgebildet. Der Frühjahrstypus hatte seine obere Grenze bei 5 m Tiefe, während die Herbstsprungschicht schon bei 10 m ihren Anfang nahm. *A. Güntert*<sup>4</sup> fand bei seinen Temperaturmessungen im Hallwilersee, daß die Tiefenschicht mit verhältnismäßig konstanter Temperatur bei 20 m beginnt. Er bestimmte für die maximalen jährlichen Schwankungen ganz ähnliche Werte wie ich selbst gemessen habe, doch ist zu erwähnen, daß die Differenzen der 40-m- und 45-m-Tiefe von mir nur mit 0,4 resp. 0,3° C angegeben worden sind, während *A. Güntert* Differenzen von 0,8 resp. 0,7° C beobachtet hatte. Die Minimaltemperatur gibt *A. Güntert* mit 4,0° C an, während ich bei meinen zahlreichen Messungen mit dem Tiefseethermometer von Friedinger Luzern eine Mindesttemperatur bei 45 m von 4,4° C beobachtete.

Über die täglichen Temperaturschwankungen orientiert ein Bericht im Rahmen einer speziellen Untersuchung vom 18./19. 6. 43, die sich über 24 Stunden erstreckte und in dieser Arbeit gesondert aufgeführt wird (s. Kombinierte Temperatur-Sauerstoff-Planktonuntersuchung). Es kann aber hier schon erwähnt werden, daß der Einfluß der kühleren Nacht die Temperatur bis 5 m Tiefe auszugleichen vermag, sodaß innerhalb einer 5-m-Schicht die Tag- und Nachtoscillationen auftreten; allerdings ist deren Umfang und Stärke sicher von den jeweiligen meteorologischen Verhältnissen abhängig. Unter dieser homothermen Schicht befindet sich die eigentliche Sprungschicht, deren Tiefenlage als Folge der oben beschriebenen Oscillationen Schwankungen unterworfen ist.

Von 15 m Tiefe ab bleibt die Temperatur von diesen Tag- und Nachtschwankungen unbeeinflußt.

## 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 einsteils 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*<sup>5</sup> 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  $\frac{1}{10}$  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  $\frac{1}{2}$  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  $1,1^{\circ}\text{C}$  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  $7,4^{\circ}\text{C}$  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) zu Tage, 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 Metallimnion 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 *Metallimnion* 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 *Metallimnion* 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 Sauerstoffvorrat, den die Frühlingsvollzirkulation durch die Konvektionsströmung in alle Tiefen beförderte, zehrte.

Der Vergleich der Sauerstoffmessungen am Ende der Sommerstagnation vom Vorjahr, 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 Teilstirkulation 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, so daß 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 sauerstofffrei.

### **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, so daß 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 weiteren 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 Frühjahrs 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 sauerstofffrei.

**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 <sub>2</sub>	%-Sättg.	Resp.	abs.O <sub>2</sub>	%-Sättg.	Resp.	abs.O <sub>2</sub>	%-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 <sub>2</sub>	%-Sättg.	abs.O <sub>2</sub>	%-Sättg.	abs.O <sub>2</sub>	%-Sättg.
1 m	9,8	75,0	211,0	10,0	75,4	219,2
5 m	9,3	71,6	200,0	9,2	69,9	200,0
10 m	9,0	69,2	192,5	9,1	69,7	193,0
15 m	9,4	72,2	200,0	8,9	67,6	189,0
20 m	3,0	23,1	60,4	8,8	67,2	186,5
25 m	0,2	1,7	4,5	7,1	54,6	149,3
30 m	0,2	1,8	4,7	2,7	20,8	55,3
35 m*	0,2	1,9	5,2	0,2	1,7	4,6
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)		
Tiefe	abs.O <sub>2</sub>	%-Sättg.	resp.	abs.O <sub>2</sub>	%-Sättg.	resp.	abs.O <sub>2</sub>	%-Sättg.	resp.
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)		
Tiefe	abs.O <sub>2</sub>	%-Sättg.	resp.	abs.O <sub>2</sub>	%-Sättg.	resp.	abs.O <sub>2</sub>	%-Sättg.	resp.
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 <sub>2</sub>	%-Sättg.	Resp.	abs.O <sub>2</sub>	%-Sättg.	Resp.	abs.O <sub>2</sub>	%-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 <sub>2</sub>	%- Sättg.	Resp.	abs.O <sub>2</sub>	%- Sättg.	Resp.	abs.O <sub>2</sub>	%- 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 Frühjahrvollzirkulation einen weitgehenden Sauerstoffausgleich bis in die Tiefe von 30 m bewirkte, 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

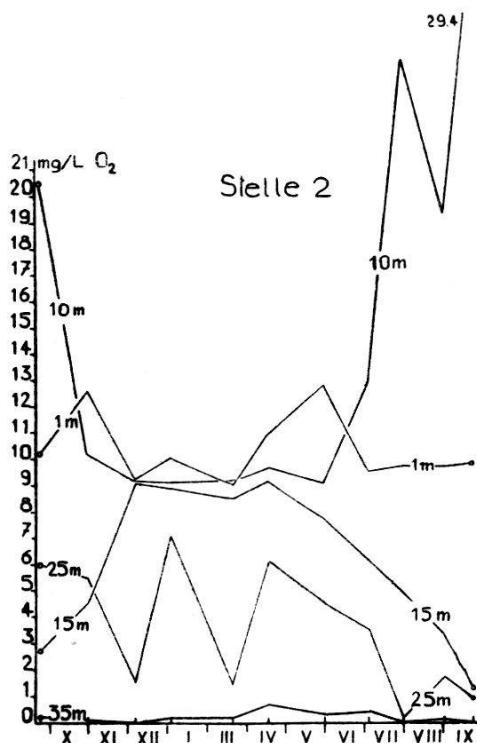


Fig. 2. Sauerstoffjahreskurven der Tiefen 1, 10, 15, 25 und 35 m vom 23.9.41 bis 23.9.42

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-

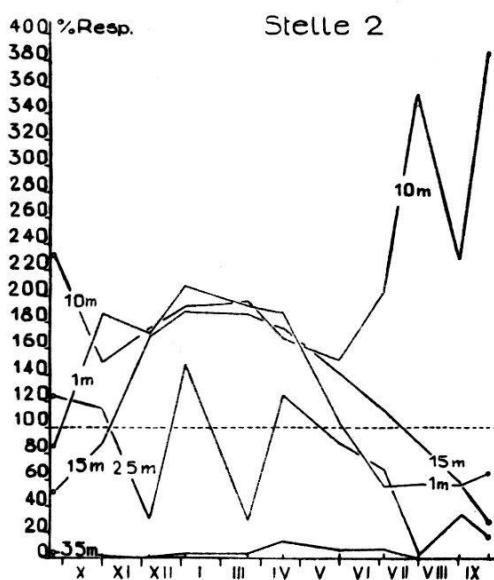


Fig. 3. Respirationsjahreskurven der Tiefen 1, 10, 15, 25 und 25 m vom 23.9.41 bis 23.9.42

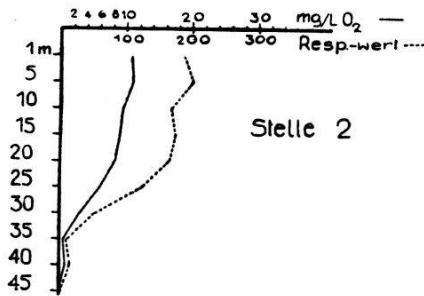


Fig. 4. Sauerstoffschichtung zu Beginn der Sommerstagnation am 17. 4. 42

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 weiterem 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 ab Grund. Erst mit der Wintervollzirkulation und nach Unterbruch durch die kurze Winterstagnation und Teilzirkulation, vervollständigt und vertieft durch die Frühjahrvollzirkulation, 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.

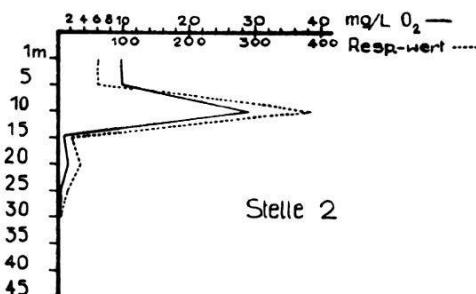


Fig. 5. Sauerstoffschichtung am Ende der Sommerstagnation am 23. 9. 42

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	Über-sättigung 100-300 %	Respira-tionswert 100—400 %	Unter-sättigung 0—100 %	Respira-tionswert 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*<sup>6</sup> 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<sup>3</sup>/l, entsprechend 74 bzw. 79 % der Sättigung, November: 5,7 cm<sup>3</sup>/l, in 50 m; 5,3 cm<sup>3</sup>/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<sup>3</sup>/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<sup>3</sup>/l oder 38 Sättigungsprozente, und in 100 m hält er sich noch auf 0,5 cm<sup>3</sup>/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 sauerstofffreie Zone schon in 100 m an.»

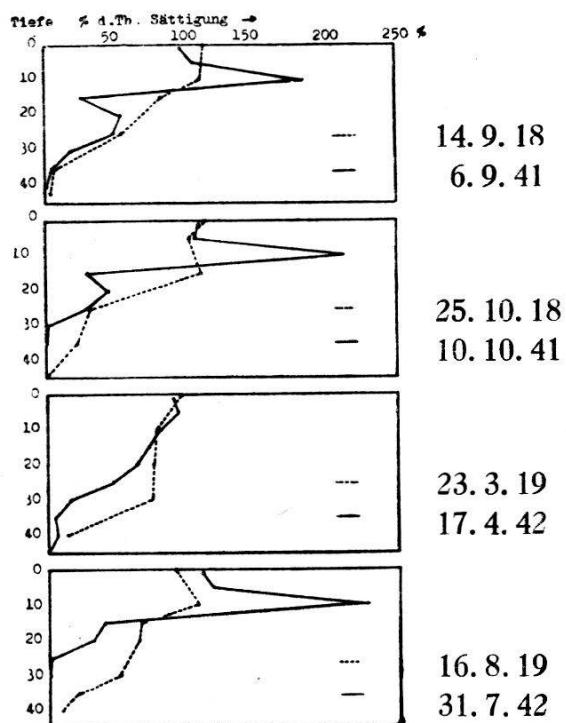
Für den *Bodensee* melden *M. Auerbach*, *L. Maerker* und *J. Schmalz*<sup>7</sup>, daß bis zu einer Tiefe von 100 m das Wasser während des größten Teiles des Jahres einen Sauerstoffsättigungsgrad von wenigstens 90 % aufweise. Nur einmal im tiefsten Gebiete des Sees wurden über dem Grund bloß 78,81 % 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*<sup>8</sup> 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 Sommertaggregation, 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<sup>9</sup> 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  $94,4 \cdot 10^6 m^3$ , während der Rauminhalt des Hypolimnions auf  $196,0 \cdot 10^6 m^3$  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 *Brutschv* und *Güntert* herangezogen. Damit gilt für das *Epilimnion* folgendes:

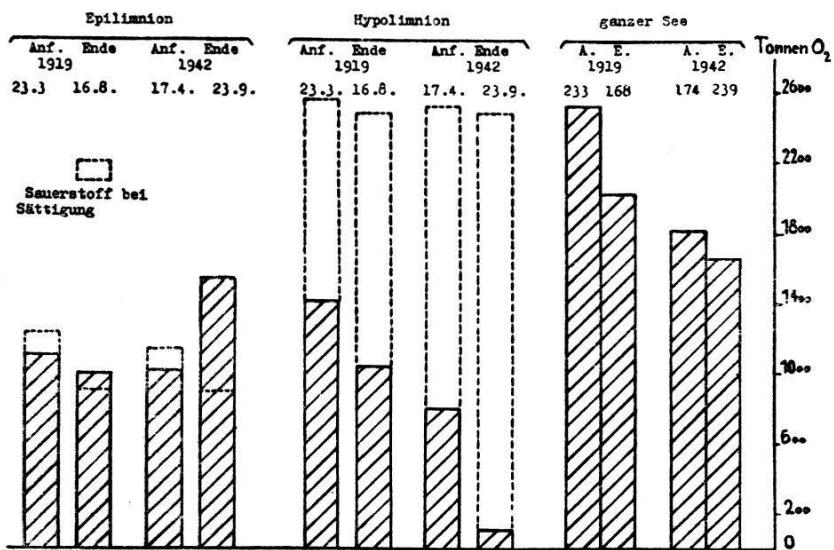


Fig. 7 Sauerstoffhaushalt im Hallwilersee während der Sommerstagnation der Jahre 1919 und 1942

*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 <sub>2</sub> -Abnahme während der Sommerstagnation	absolut	19 %
	O <sub>2</sub> -Abnahme während der Sommerstagnation	bei Sättigung	10 %
1942	O <sub>2</sub> -Abnahme während der Sommerstagnation	absolut	8,5 %
	O <sub>2</sub> -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:

$$\begin{aligned} O_2H/E (17. 4. 42) &= 0,8 \text{ im Frühling} \\ O_2H/E (23. 9. 42) &= 0,075 \text{ im Herbst} \end{aligned}$$

während die entsprechenden Werte des Jahres 1919 folgende sind:

$$\begin{aligned} O_2H/E (23. 3. 19) &= 1,285 \text{ im Frühjahr} \\ O_2H/E (16. 8. 19) &= 1,05 \text{ im Herbst.} \end{aligned}$$

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 Phenolphthalein als Indikator ausgeführt.

In dieser Arbeit wurden die Bestimmungen nach der vereinfachten Titration mit Sodalösung nach *Klut*<sup>10</sup> 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-

phyll- und Pigmentalgen ebenso alle höheren Pflanzen die Kohlensäure und spalten Sauerstoff ab. Diese doppelte Eigenschaft der Kohlensäure, zugleich Abbau- und Aufbaustoff zu sein, macht es unmöglich, sie als einwandfreien Maßstab für eine Verunreinigung anzunehmen. Doch kommt dieser Wechselwirkung, Produktion und Aufzehrung der Kohlensäure, große praktische Bedeutung zu, indem die Konzentrationsschwankungen ihren Einfluß besonders auf die *Härteverhältnisse* des Seewassers ausüben.

Die im Wasser gelöste, jedoch nicht chemisch gebundene Kohlensäure zerfällt in zwei Fraktionen, nämlich in die sogenannte *zugehörige*, welche zum In-Lösungshalten der Erdalkalibikarbonate notwendig ist und in die über jenes Quantum hinausgehende wirklich *freie Kohlensäure*. Die Menge der im Wasser vorhandenen freien Kohlensäure ist durch das im Wasser gelöste Bikarbonat als zugehörige Kohlensäure durch das Gleichgewicht bestimmt. Ist mehr vorhanden, so wird sie überschüssig und zeigt eine Lösungstendenz für weitere ungelöste Erdalkalimonokarbonate und andere Stoffe. Von welcher Menge an die freie Kohlensäure im Wasser überschüssig und damit aggressiv wird, läßt sich aus der Menge des darin gelösten Erdalkalibikarbonates nach dem Gesetz der Massenwirkung berechnen.

In der Tabelle nach *J. Tillmans*<sup>11</sup>, die durch *Gärtner*<sup>12</sup> für die Wasserpraxis erweitert wurde, finden sich die Werte für zugehörige Kohlensäure zu verschiedenen Härtegraden. In einem besonderen Abschnitt dieser Arbeit wird das Aggressivitätsproblem, wie es sich für Seewasser nach den heutigen Erkenntnissen stellt, beschrieben.

Die sogenannte Karbonathärte, d. h. die vorhandenen Karbonate, schwankten nach unseren Messungen im Hallwilersee zwischen 10 und 18 französischen Härtegraden. Die zugehörigen Mengen freier Kohlensäure müßten nach den Tabellen von *Tillmans* 2,4 und 11,5 mg/l betragen. Diesen Schwankungen liegt folgende chemische Reaktionsgleichung zu Grunde:



Sinkt der Gehalt an freier Kohlensäure infolge Assimilation des Phytoplanktons unter die erwähnten Werte, so ver-

mindert sich ebenfalls die Löslichkeit des Kalziumbikarbonates, was zur Folge hat, daß eine entsprechende Menge unlösliches Monokarbonat ausfallen muß. Diesen Vorgang bezeichnet man als «biogene Entkalkung».

Der Vorgang nach der linken Seite der Gleichung tritt aber ein, wenn die Assimilationstätigkeit entweder infolge Abklingen der Vegetationsperiode, oder in den tieferen Schichten Armut an Pflanzenleben, geringer wird. Die Kohlensäurekonzentration kann dann wieder soweit ansteigen, daß sie imstande ist, im Ausfallen und Absinken begriffenes Kalziumkarbonat und sogar schon abgelagerte Seekreide wieder in Lösung zu bringen. Die Karbonathärte steigt an, und wenn kein Monokarbonat mehr zur Rücklösung zur Verfügung steht, reichert sich die Kohlensäure weiter an. Das Seewasser wird aggressiv und kann z. B. Bauwerke angreifen.

Die Rolle des Magnesiumbikarbonates tritt als Härtebildner und damit als Kohlensäure bindender Faktor quantitativ sehr stark zurück, und nach den Arbeiten von *K. Rechenberg*<sup>19</sup> zu schließen, stellt sich für das Magnesium kein analoges Bikarbonat-Kohlensäuregleichgewicht ein, wie dies hier beim Kalzium beschrieben worden ist.

In den verschiedenen Vegetationsphasen des Phytoplanktons können im Verlaufe eines Seejahres in verschiedenen Tiefen starke Schwankungen im Kohlensäuregehalt auftreten. Einmal tritt Kohlensäurekonsumtion bis zum völligen Aufzehren der freien Kohlensäure und damit Hand in Hand gehend biogene Entkalkung auf, dann wieder findet Kohlensäurereproduktion bis zur Erreichung der Aggressivität statt.

Die Kohlensäurebestimmungen im Wasser des Hallwilersees wurden im Rahmen dieser Arbeit gleichzeitig mit den Sauerstoffmessungen ausgeführt und sind in der Tabelle 17 zusammengestellt und in Fig. 8 graphisch aufgezeichnet.

Bei Beginn der Sommerstagnation verschwand in den Tiefen 1—10 m infolge der Assimilationstätigkeit des sich entwickelnden Phytoplanktons die freie Kohlensäure, was sich auch im Absinken der Karbonathärte ausdrückte. Die an den drei verschiedenen Probenahmestellen durchgeführten Messungen stimmten in ihrem Kohlensäuregehalt nach der Tiefe über-

ein. In den Tiefen von 15—25 m dagegen stiegen während der Dauer der Stagnation die Kohlensäurewerte langsam an und erreichten Ende September ein Maximum. Im umgekehrten Sinn waren die Ergebnisse für die Tiefen von 25 m an abwärts bis zum Grund, wo bei Beginn der Sommerstagnation ein Maximum herrschte. Dieses machte einem Minimum im Juli/August Platz, um dann bis zum Oktober wieder rapid anzusteigen. Der Rückgang der Kohlensäure wird vermutlich durch die Rücklösung des während der Stagnation in den oberen Schichten biogen ausgefallten Kalkes und Absorption der oberen Schichten bei mechanischer Durchmischung, zu erklären sein, während das Ansteigen im Juli/August als eine Folge der Zersetzungsvorgänge des Herbstplanktons gelten dürfte.

Allgemein ist festzuhalten, daß die Kohlensäurekonzentration mit der Tiefe zunimmt, sie schwankt von Null in den Oberflächenzonen bis zum Maximalwert von 29 mg/l in 45 m Tiefe, wovon der Wert von ca. 18 mg/l als überschüssig gelten dürfte.

Im Verlaufe der Herbstteil- und -Vollzirkulation und Winterstagnation stieg infolge Durchmischung in den Tiefen von 1 bis 10 m die Kohlensäure rasch an, um in der beginnenden Sommerstagnationsperiode wieder auf Null auszuklingen, bedingt durch erhöhte Assimilationstätigkeit im Epilimnion.

In der Tiefe von 15 m konnte die rasche Abnahme der Kohlensäure, welche am Ende der Sommerstagnation zu einem Maximum angestiegen war (280 % der zugehörigen freien  $\text{CO}_2$ ) auf eine Herbst-Winter-Vegetationsperiode des Phytoplanktons schließen lassen, welche von Mitte September bis anfangs Januar anhielt. Am ausgeglichensten waren die Werte bei 20 und 25 m, während in 30 m Tiefe die Kohlensäurekonzentration im Herbst, vermutlich bedingt durch den Planktonabbau stark anstieg, dann aber anfangs Januar bis Mitte März zurückging.

Ob Grund, das heißt in einer Tiefe von 35 bis 45 m, stieg die Kohlensäurekonzentration während der Herbstteil- und -Vollzirkulation — und ebenfalls während der Winterstagnation — mehr oder weniger an. Der Grund für dieses Verhalten war wahrscheinlich der stets fortgesetzte oxydative und auch anaerobe Abbau der absinkenden und abgesunkenen Orga-

nismenleichen. Auf diese Weise würden die maximalen Werte von 26 und 29 mg/l Kohlensäure im März in 40 und 45 m Tiefe ihre Erklärung finden. Die Kohlensäurekonzentration bewegte sich — wie bereits erwähnt — in den Tiefen von 30 bis 45 m fast durchwegs im Überschuß, d. h. aggressiven Gebiet.

Trotzdem die Tiefenzone ob Grund praktisch sauerstofffrei ist, haben wir eine Kohlensäureanreicherung, wofür neben den anaeroben Abbauvorgängen eventuell auch physikalische Vorgänge (Mischung, Diffusion) verantwortlich zu machen wären.

Bei der Beurteilung der Kohlensäureverhältnisse ist die Erscheinung der Enthärtung und Härtesteigerung des Seewassers in den verschiedenen Tiefen besonders augenfällig. Diese Verhältnisse sind in der Härtetabelle Nr. 18 dargestellt. Der chronische Kohlensäuremangel in den oberen Schichten und das Auftreten von großen Mengen an überschüssiger Kohlensäure in den Tiefen ist ein ebenso sicheres Zeichen für ausgeprägte Vegetationsperioden von Phytoplanktern, wie etwa die Sauerstoffzahlen. Es muß wiederholt werden, daß die Kohlensäure- und Sauerstoffzahlen untrennbar miteinander im Zusammenhang stehen und einen weiteren Gradmesser für den eutrophen Zustand eines stehenden Gewässers darstellen.

Der Vergleich der Härtezahlen mit den entsprechenden Werten für die Kohlensäure während der Sommerstagnation ermöglicht es, auf die biologischen Vorgänge im See und deren Einfluß auf den Chemismus einzugehen. Das *Epilimnion* verliert im Verlaufe der Sommerstagnation die gesamte Kohlensäure, ohne daß sich die gefundene Karbonathärte spontan stark verringerte. Die Wasserpflanzen haben aber nicht nur die Fähigkeit, freie Kohlensäure aufzunehmen, sondern Untersuchungen von *F. Ruttner*<sup>14</sup> haben gezeigt, daß die echten Wasserpflanzen auch die  $\text{HCO}_3$ -Ionen aufzunehmen und durch  $\text{OH}$ -Ionen zu ersetzen vermögen. Es wird also das Bikarbonat von der Pflanze aktiv gespalten und im Assimilationsprozeß verwertet. Das Ergebnis ist das Auftreten von Kalziumhydroxyd, welches die starke Kalkabscheidung, die eigentlich beim vollständigen Aufzehren der gesamten freien Kohlensäure auftreten müßte, verhindert. Die Härte verringert sich nur um 6 französische Härte-

grade (17 bis 11) vom Beginn der Sommerstagnation bis zu deren Ende.

Im oberen *Hypolimnion*, in 15 m Tiefe, fanden wir, daß im Verlauf der Sommerstagnation der Kohlensäuregehalt langsam zu-, die Härte aber abnahm. Dieser Zustand wird mit gleichzeitiger Produktion von Kohlensäure durch Zooplankton und Konsumtion des Phytoplanktons zu erklären sein. In den *Tiefen 20 bis 25 m* war der Zustand stabiler und die Berechnung zeigte, daß ein Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht herrschte. Das *mittlere und untere Hypolimnion* mit den Tiefen 35 bis 45 m wies konstante Härtezahlen auf. Während der Sommerstagnation war starke Abnahme der Aggressivität bis zur Einstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes im Herbst zu konstatieren.

Wir haben also auch für die Kohlensäure-Härteverhältnisse drei charakteristische Tiefenzonen unterscheiden können, welche bei der Sauerstoffschichtung ihren Ursprung im biologischen Seegeschehen hatten. Der Zusammenhang zwischen Sauerstoff, Kohlensäure und Härte ist vermutlich streng gesetzmäßig, erscheint aber durch zeitlich auseinanderliegende Untersuchungen verzerrt.

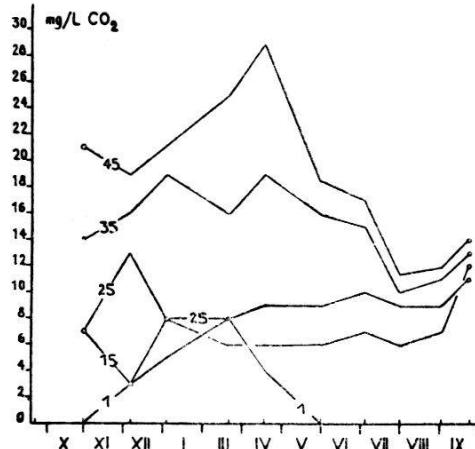


Fig. 8 Kohlensäurejahreskurven an der Stelle 2  
in den Tiefen 1, 15, 25, 35 und 45 m vom 31. 10 41 bis 23. 9. 42

### b) Die Härte (Tabelle Nr. 18)

Die Härte des Wassers wird bedingt durch die Anwesenheit von Kalk und Magnesiumsalzen. Man unterscheidet *Karbonathärte*, welche durch die Anwesenheit des Bikarbonats des Kalziums und Magnesiums bedingt ist, und *permanente oder bleibende Härte*, welche durch die Anwesenheit der übrigen Kalk-

Tabelle 17

Zeitlicher Verlauf der Kohlensäurewerte in mg/L an den 3 Probenahmestellen in allen Tiefen vom September 1941 bis September 1942.

Datum (Stelle 1, 2 u. 3) der Probenahme		26. 10.	30. 11.	30. 12.	21. 3.	17. 4.	30. 5.	4. 7.	31. 7.	29. 8.	23. 9.
Tiefe	Stelle	31. 10. 1941	6. 12.	3. 1.	20. 3.	17. 4.	30. 5.	4. 7.	31. 7.	1. 9.	23. 9.
1 m	1	0	1,5	4,0	4,0	5,0	0	0	0	0	0
	2	0	3,0	5,0	8,0	4,0	0	0	0	0	0
	3	0	3,0	3,0	5,0	6,0	0	0	0	0	0
5 m	1	0	1,5	4,0	5,0	4,0	0	0	0	0	0
	2	0	3,0	5,0	6,0	3,0	0	0	0	0	0
	3	0	3,0	5,0	5,0	5,0	0	0	0	0	0
10 m	1	0	2,5	4,0	5,0	4,0	0	0	7,0	0	0
	2	0	3,0	7,0	6,0	5,0	0	0	0	0	0
	3	0	3,0	5,0	5,0	6,0	0	0	0	0	0
15 m	1	1,0	4,0	6,0	5,0	5,0	5,5	6,0	7,0	8,0	10,0
	2	7,0	3,0	8,0	6,0	6,0	6,3	7,0	6,0	7,0	12,0
	3	11,0	3,0	5,0	4,0	8,0	5,0	0,5	9,0	6,0	9,0
20 m	1	4,0	5,0	12,0	5,0	5,0	6,5	8,0	8,0	8,0	10,0
	2	8,0	10,0	8,0	8,0	7,0	7,0	7,5	6,5	8,0	10,0
	3	11,0	13,0	5,0	7,0	9,0	6,0	8,0	9,5	8,0	10,0
25 m	1	8,0	10,5	15,0	5,0	9,0	7,5	8,0	9,0	9,0	11,0
	2	7,0	13,0	8,0	8,0	9,0	9,0	10,0	9,0	9,0	11,0
	3	10,0	14,0	7,0	10,0	10,0	9,0	11,0	10,5	8,0	11,0
30 m	1	12,0	15,5	15,0	15,0	12,0	9,0	11,0	10,0	10,0	12,0
	2	10,0	15,0	13,0	13,0	14,0	13,0	13,0	10,0	11,0	12,0
	3	12,0	19,0	16,0	13,0	15,0	16,0	13,0	11,0	10,0	12,0
35 m	1	18,0	20,0	16,0	15,0	20,0	16,0	12,5	11,0	11,0	13,0
	2	14,0	16,0	19,0	16,0	19,0	16,0	15,0	10,0	11,0	13,0
32 m	3	18,0	20,0	17,0	18,0	20,0	19,0	—	11,0	11,0	13,0
40 m	1	22,0	19,0	17,0	18,0	27,0	19,0	17,5	11,0	12,0	14,0
	2	17,0	18,0	20,0	18,0	26,0	17,0	16,0	11,0	12,0	14,0
45 m	2	21,0	19,0	21,0	25,0	29,0	18,5	17,0	11,5	12,0	14,0

und Magnesiumsalze ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$  u. a.) bedingt ist. Die *Gesamthärte* stellt die Summe der Karbonathärte und permanenten Härte dar. Man gibt die Härte in Graden an und versteht unter einem französischen Härtegrad die Menge von 1 Teil  $\text{CaCO}_3$  in 100 000 Wasser oder 10 mg  $\text{CaCO}_3$  in 1 Liter Wasser.

Die Bestimmung der Karbonathärte wurde mit  $1/10$  n Salzsäure und Methylorange als Indikator ausgeführt, während die Gesamthärte mit  $1/10$  n Kaliumpalmitat und Phenolphthalein als Indikator bestimmt wurde.

Es ist bekannt, daß ein größeres stehendes Gewässer weniger Härtegrade aufweist als seine Zuflüsse. Für den Hallwilersee mit dem Seeabfluß des Baldeggersees als Hauptzufluß herrschen besondere Verhältnisse. Die weniger bedeutungsvollen Bäche, die teilweise benutzten Quell- und Grundwasser führen dem See verhältnismäßig wenig Härte zu. Einzelne Quellwasser sind hart, das Brauchwasser von Birrwil weist z. B. 30 bis 32 französische Härtegrade auf. Die mittlere Härte des Seewassers beträgt dagegen höchstens 18 französische Härtegrade.

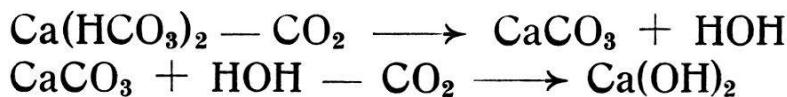
Während der Sommerstagnation des Sees ist eine ständige Abnahme der Härte, bedingt durch die biogene Entkalkung festzustellen.

Die biogene Entkalkung schreitet vom Mai an in den Tiefen 1 bis 10 m stark vorwärts und kann in 10 m Tiefe am Ende der Sommerstagnation die Karbonathärte auf 10 französische Härtegrade herabmindern. Sobald dann aber durch den Abbau des Planktons während der Herbstteil- und -Vollzirkulation der Kohlensäuregehalt ansteigt, steigt auch die Härte wieder an und erreicht im Winter und Frühling wieder ihr Maximum von 18 französischen Härtegraden. Die Schwankungen finden aber nur in den Oberflächenschichten statt, während die Tiefen 20 bis 25 m ziemlich gleichförmige Härtejahreskurven zeigen. Im allgemeinen ist eine Zunahme der Härte nach der Tiefe zu beobachten, vermutlich verursacht durch die Rücklösung von ausgefällter und im Absinken begriffener «Seekreide» durch die dort bestehende erhöhte Kohlensäurekonzentration.

Die *Gesamthärte* erreicht im Hallwilerseewasser kaum mehr als einen französischen Härtegrad höheren Wert als die Karbonathärte. Erstaunlicherweise sinkt aber die Gesamthärte sehr oft unter den Karbonathärtewert. Für diese relativ seltene Erscheinung können folgende Erklärungen angeführt werden:

1. Nach *F. Ruttner*<sup>14</sup> kann durch stark assimilierende Pflanzen (auch Plankton) das Kalziumbikarbonat nicht nur in Mono-

karbonat, sondern sogar in Kalziumhydroxyd übergeführt werden:



2. Es steht fest, daß ein Teil der Abwasser, die in den See hineinfließen, erhebliche Mengen Alkalosalze mitführen, die sich als Bikarbonate und Hydroxyde zusammen mit Salzen und organischen Abfallstoffen ihres größeren spezifischen Gewichtes wegen in den Schichten über dem Seegrund verteilen müssen. Die Hydroxyde werden vollständig in Bikarbonate übergeführt. In diesem Zusammenhang könnte von einer Entkalkung oder vielleicht besser Enthärtung in chemischem Sinne gesprochen werden.

**Die Karbonathärte in den verschiedenen Tiefen vom Oktober 1942 bis September 1942 an Stelle 2**

*Tabelle 18*

Daten Tiefen	31. 10.	6. 12.	3. 1.	20. 3.	17. 4.	30. 5.	4. 7.	31. 7.	1. 9.	23. 9.
1 m	13,0	17,0	16,0	17,0	16,0	15,0	15,0	14,0	12,5	11,0
5 m	14,0	17,0	15,5	16,0	17,0	14,0	15,0	13,0	13,0	11,0
10 m	13,5	16,0	15,5	15,0	18,0	14,0	16,0	13,5	14,0	10,0
15 m	16,0	16,0	15,0	16,0	16,0	16,5	17,0	17,0	16,0	13,0
20 m	15,5	17,0	15,5	16,0	17,0	16,0	17,0	17,0	17,0	17,0
25 m	16,5	18,0	16,5	16,0	16,0	17,0	18,0	17,0	17,0	17,0
30 m	17,0	19,0	16,0	17,0	17,0	18,0	18,5	17,5	17,5	17,0
35 m	18,0	19,0	16,0	18,0	17,0	17,5	18,0	18,0	17,5	17,0
40 m	17,5	19,0	—	18,0	16,5	18,5	18,0	18,0	17,5	18,0
45 m	18,5	19,0	—	20,0	17,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0

*c) Diskussion der Kohlensäure- und Härteverhältnisse im Hallwilersee anhand der Literatur*

Die biogene Entkalkung, die durch die Härte- und Kohlensäureuntersuchungen festgestellt wird, gilt heute als Faktor in der Charakterisierung eines Sees ebenso gut wie die Schichtung des Sauerstoffes und der temperierten Wassermassen. *L. Minder*<sup>15</sup> legt in seinem Vortrag, gehalten an der Gründungsversammlung der internationalen Vereinigung für theoretische und

angwandte Limnologie im Jahre 1922 die Verhältnisse für den Zürichsee klar und beweist mit Hilfe der Kalkbestimmungen von *W. Weith*<sup>16</sup> 1879 im Zürichsee, daß die Härteschwankungen wie sie seine eigenen Versuche zeigen, eine Erscheinung neueren Datums sind. *W. Weith* fand das ganze Jahr hindurch gleichmäßige Jahreskalkgehalte von 117,5 bis 124,5 mg/l.

Die Schlammuntersuchungen von *F. Nipkow*<sup>17</sup> 1919 liefern 23 Jahresschichten. In diesen Ablagerungen sind die sedimentierten Überreste der verschiedenen Algeninvasionen nachweisbar vorhanden. So muß die im Jahre 1896 von *Schröter* gemeldete Invasion der Kieselalge *Tabellaria fenestrata* Kütz. als erste derartige Massenentwicklung einer planktontischen Kieselalge gelten. In den hellen unteren Schichten, die vollständig mineralisiert sind, finden sich keine Tabellariaskellette, sodaß *F. Nipkow* wörtlich folgendes schreibt: «Es fällt demnach der Beginn der Bildung der Faulschlammdecke mit der ersten Algeninvasion zusammen.»

Mit diesen verschiedenen Feststellungen, daß *Weith* 1879 das ganze Jahr hindurch im Zürichsee die gleichen Härtezahlen feststellte, daß *Nipkow* die von *Schröter* gemeldete Algeninvasion im Jahre 1896 als erste Ablagerung mit Planktonskeletten und Faulschlamm im Schlammprofil festhielt, und daß *Minder* in seinen Untersuchungen vom Jahre 1920 fortschreitende Abnahme der Karbonathärte im Verlaufe der Sommerstagnation konstatierte, ist bewiesen, daß die biogene Entkalkung ihre Ursache in einer im Laufe der Zeit eingetretenen Umbildung der Biozoenose liegt.

Die Intensität der Entkalkung hängt von der Quantität des Planktons und der see-eigenen Härte ab und kann als Gradmesser für den eutrophen Zustand des Sees gelten.

Als weiteren Beweis, daß die Entkalkung biogenen Ursprungs ist, nennt *L. Minder*<sup>18</sup> die Feststellung, daß die Kohlensäure und der Sauerstoff bei Sommerstagnation in ihren Bestimmungswerten mit zunehmender Tiefe reziprokes Verhalten zeigen, was auch aus der Assimilationsgleichung entnommen werden kann. Um ein Bild von der Größe der biogenen Entkalkung des Hallwilersees zu erhalten, sollen zwei große Voralpenseen in Vergleich gezogen werden. Untersuchungsergebnisse im Boden-

see von *M. Auerbach*<sup>19</sup> und Mitarbeitern sagen, daß der Kohlensäuregehalt während den Sommermonaten von 4 auf 5 mg/l im Epilimnion auf 1,5 mg/l herabsinkt. Die Karbonathärte, die im Mittel 11,5 französische Härtegrade beträgt, nimmt im Epilimnion ab Juni langsam ab und wird im Mittel um zirka 2,5 Härtegrade vermindert, was ein Absinken um zirka 20 % bedeutet. Für den Zürichsee berichtet *L. Minder*<sup>20</sup>, daß im Epilimnion bei Beginn der Sommerstagnation der Kohlensäuregehalt bald auf den Wert 0 sinkt. Die Entkalkung geht im allgemeinen bis auf 9,5 Härtegrade d. h. die Kalkabnahme im Wasser beträgt alsdann  $12,5 - 9,5 = 3$  Härtegrade oder 30 mg/l Kalziumkarbonat, demzufolge würde die Härte um 24 % gesenkt.

Aus der Tabelle Nr. 18, die die Härteverhältnisse während des Untersuchungsjahres 1941/42 im *Hallwilersee* veranschaulicht, ist zu entnehmen, daß bei völliger Kohlensäurefreiheit des Epilimnions während den Stagnationsmonaten die Härteverminderung im September ihren Höhepunkt erreicht. Die Härte von 18 französischen Härtegraden im Dezember wird im Epilimnion im September auf 10 Härtegrade herabgesetzt, was eine Verminderung um 44 % bedeutet. Die biogene Entkalkung hat in unserem kleinen See ein bedeutendes Ausmaß angenommen. Die aufschießende Planktonentwicklung wird im Hallwilersee jährlich 5000 bis 6000 Tonnen Kalk zur Ausfällung bringen, wie aus folgender Überschlagsrechnung hervorgeht:

Mittlere Härte im Epilimnion am 6. 12. 41 16,5 franz. Härtegrade  
Mittlere Härte im Epilimnion am 23. 9. 42 11,0 franz. Härtegrade

Differenz: 5,5 franz. Härtegrade

5,5 französische Härtegrade entsprechen 55 mg  $\text{CaCO}_3$  pro Liter, was bei einem Inhalt des Epilimnions von  $100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  5500 Tonnen  $\text{CaCO}_3$  ergibt.

Unsere Untersuchungen zeigten, daß während der Zeit in der die Sommerstagnation ihrem Ende entgegengeht und die Entkalkung den Höhepunkt erreicht, der Kohlensäuregehalt im oberen Hypolimnion und Metalimnion d. h. in den Tiefen von 15 bis 20 m ständig ansteigt, um in 15 m Tiefe den maximalen Wert von 280 % der zugehörigen Kohlensäure zu erreichen. Dieser Zustand steht mit dem Sauerstoffminimum in der glei-

chen Tiefe in engem Zusammenhang und deutet auf maximalen Abbau von Phytoplankton hin, da auch sehr zahlreiche Zooplankter kaum imstande wären, eine solche Kohlensäureübersättigung zu erzeugen.

Eine ähnliche Beobachtung beschreibt *L. Minder*<sup>21</sup> und sagt wörtlich: «Ist die Sprungschicht ausgebildet, so bereitet sich frühzeitig schon im Metalimnion eine Kohlensäureanhäufung vor. — Ganz besonders hohe Kohlensäurewerte im Metalimnion, d. h. in 15 bis 20 m Tiefe, hatten wir im Jahre 1924, und zwar Juli und Oktober. Wir hatten dann aber in diesen Tiefen auch bedeutende Zooplanktonmengen, wenn auch nicht verschwiegen bleibe, daß ähnliche oder sogar noch höhere Zooplanktonmengen anderer Jahre nicht die entsprechenden Kohlensäurewerte hervorbrachten.» An anderer Stelle gibt *Minder* die Erklärung für diese Kohlensäureanhäufung und schreibt sie der Tag- und Nachtwanderung des Zooplanktons zu, indem sich die Tag für Tag erfolgenden Kohlensäurezuschüsse in gewissen Tiefen summierten.

#### **4. Die Methoden zur Bestimmung der Kohlensäure-Aggressivität unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse im Wasser des Hallwiler-Sees**

a) *J. Tillmans* und *Heublein*<sup>22</sup> haben zur Ermittlung der überschüssigen d. h. kalkaggressiven Kohlensäure das chemische Gleichgewicht zwischen der Konzentration der gebundenen  $\text{CO}_2$  in Form von kohlensaurem Kalzium und der freien zugehörigen  $\text{CO}_2$ , welche nach dem Verfahren von *Klut*<sup>10</sup> mittels Soda und Phenolphthalein ermittelt wurde, gewählt und graphisch dargestellt. Die Ordinate trägt die freie  $\text{CO}_2$  in mg/l und die Abszisse die gebundene  $\text{CO}_2$ . Die Kurve stellt also die Menge zugehöriger  $\text{CO}_2$  dar, die jedesmal nötig ist, um die entsprechende Menge Kalziumbikarbonat in Lösung zu halten.

*F. Auerbach*<sup>23</sup> hat darauf hingewiesen, daß die zugehörige  $\text{CO}_2$  auf Grund des Versuchsmaterials von *J. Tillmans* und *Heub-*

lein auch aus den Gesetzen des chemischen Gleichgewichtes berechnet werden könne. *J. Tillmans*<sup>24</sup> leitete daraus die Formel ab, mit welcher die zugehörige  $\text{CO}_2$  aus der gebundenen Kohlensäure und dem Gehalt an  $\text{CaCO}_3$ , alles in mg gerechnet, bestimmt werden kann. Die Tillmansche Formel lautet z. B. für  $17^\circ\text{C}$ :

$$\text{zugehörige CO}_2 = (\text{gebundene CO}_2)^2 \cdot \text{CaO} \cdot 2 \cdot 10^{-5}$$

Die Gleichgewichtsverhältnisse bei höheren Temperaturen als  $17^\circ\text{C}$  wurden von *J. Tillmans* mit *Hirsch* und *Heckmann*<sup>25</sup> abgeklärt und für die Temperaturen von  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  und  $80^\circ\text{C}$  entsprechende Konstanten errechnet.

b) *Heyer*<sup>26</sup> geht zur Bestimmung der kalkaggressiven  $\text{CO}_2$  so vor, daß der Wasserprobe mehrere Gramm fein gepulverter und mit ausgekochtem, destilliertem Wasser gut gewaschener Marmor beigegeben wird. Die aggressive  $\text{CO}_2$  löst eine entsprechende Menge Marmor auf, sodaß sich nach mehrmaligem Durchschütteln das neue Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht einstellt. Die Differenz der Werte für gebundene  $\text{CO}_2$  entspricht der aggressiven  $\text{CO}_2$ .

*Rechenberg*<sup>13</sup> überbrückt in seinen praktischen Versuchen das nachteilige langsame Einstellen des Gleichgewichtes bei harten Wässern dadurch, daß er anstelle von Marmor präzipitierten kohlensauren Kalk von Merck verwendet und zu Beginn des Versuches eine Stunde auf der Maschine schüttelt.

Bei sehr weichen Wässern, die nur sehr wenig freie  $\text{CO}_2$  enthalten, gibt der Heyer-Versuch wegen der Eigenlöslichkeit von Kalziumkarbonat für aggressive  $\text{CO}_2$  etwas hohe Werte.

*Strohecker*<sup>27</sup> diskutiert die Methode von *J. Tillmans* und macht auf folgende Fehler aufmerksam: Bei der Titration der freien Kohlensäure geht *Tillmans* von der Annahme aus, daß der Aequivalenzpunkt einer  $\text{Ca}$ - oder  $\text{NaHCO}_3$ -Lösung bei  $\text{pH} = 8,3$  liegt. Nach *Strohecker* trifft dies nicht zu. Bei Anwendung der von *Tillmans* vorgeschriebenen Phenolphthaleinlösung liegt der Aequivalenzpunkt nicht bei 8,3 sondern  $\text{pH} 7,8$ . Außerdem haben Untersuchungen von *R. Strohecker, Schilling* und *Budenbender*<sup>28</sup> ergeben, daß der Aequivalenzpunkt von Natrium einerseits und Bikarbonat andererseits weitgehend abhängig ist von der Konzentration. Während konzentrierte Natriumbikarbonatlösungen

etwa den pH 8,3 aufweisen, sinkt bei weiterer Verdünnung der pH-Wert ständig ab, bis bei ganz dünner Bikarbonatlösung (0,0001 n), wie sie etwa dem Bikarbonatgehalt vieler Trinkwässer entsprechen, der pH-Wert von 6,9 erreicht wird.

Bei Verhältnissen, wie sie in natürlichen Wässern vorkommen, wird also zu weit titriert, nämlich auf Stufe 7,8 (Tillmans 8,3) statt 6,9. Dieser Fehler bewirkt, daß zu viel aggressive  $\text{CO}_2$  gemessen wird gegenüber der Heyer-Methode, bei welcher die aus dem Marmorpulver zusätzlich aufgenommene Härte mit Salzsäure gegen Methylorange einwandfrei und auf  $\text{CO}_2$  bestimmt und umgerechnet wird.

c) *Strohecker*<sup>27</sup> umgeht mit seiner «Aciditätsmethode» die titrimetrischen Fehlermöglichkeiten. Er weist darauf hin, daß der Säuregrad des Wassers in erster Linie für die Aggressivität des Wassers verantwortlich ist. Die Wasserstoffionen-Konzentration ist aber gleichzeitig eine Funktion des mehr oder weniger großen Gehaltes an Bikarbonatkohlensäure, was ja durch die Gleichgewichtskurve von *J. Tillmans* und *Heublein* ange deutet ist, welche zeigt, daß je größer der Bikarbonatgehalt ist, umso größer auch der Gehalt an freier  $\text{CO}_2$  sein muß, damit Angriff erfolgt.

Die Aggressivität wird daher durch den jeweiligen pH-Wert und den Bikarbonatgehalt eines Wassers bestimmt.

Aus dem Massenwirkungsgesetz errechnet *Strohecker* den pH-Wert des Kalk-Kohlensäuregleichgewichtes und kommt zur Formel:

$$\text{pH} = 11,39 - 2 \log (\text{geb. CO}_2) \text{ in mg/l}$$

Mit Hilfe dieser Gleichung können wir also für einen gegebenen Gehalt an gebundener  $\text{CO}_2$  denjenigen pH-Wert berechnen, den das Wasser aufweisen würde, wenn es im Gleichgewicht stände. Umgekehrt können wir sagen, wenn ein Wasser denselben pH-Wert zeigt, wie er sich aus der Gleichung errechnet, so steht das Wasser im Gleichgewicht.

Aggressive Wässer werden also eine stärkere Acidität und deshalb einen tiefen pH-Wert als der aus der gebundenen  $\text{CO}_2$  berechnete aufweisen. Wässer, die weniger  $\text{CO}_2$  enthalten als dem Gleichgewicht entspricht, werden dagegen einen höheren pH-Wert besitzen als es die Gleichung verlangt.

Wird nun der pH-Wert eines Wassers nach der Methode von *Soracreppa*<sup>29</sup> experimentell gleich ermittelt, so kann entschieden werden, ob ein Wasser aggressiv ist oder nicht. Ist die Differenz aus dem errechneten pH und dem bestimmten pH gleich Null, so befindet sich das Wasser im Gleichgewicht. Eine negative Differenz weist auf ein Wasser mit unterschüssiger CO<sub>2</sub> hin. Ist die Differenz groß, so ist die Möglichkeit für Kalkausscheidung vorhanden. Eine deutlich positive Differenz hingegen lässt aggressives Wasser erkennen.

Die Möglichkeit der Berechnung des pH-Wertes für jedes beliebig harte Gleichgewichtswasser führt zur Aufzeichnung einer pH-Gleichgewichtskurve. Die Ordinate trägt die gebundene CO<sub>2</sub> in mg/l und die Abszisse die pH-Werte. Die Tillmans und Heubleinsche Gleichgewichtskurve hat hier eine Analogie gefunden.

*Strohecker*<sup>30</sup> hat die rein qualitative Erkenntnis der Aggressivität der Wässer anhand dieser pH-Gleichgewichtskurve quantitativ nutzbringend umgestaltet. Mit seinem Verfahren ist es möglich, aus der gemessenen gebundenen Kohlensäure und dem gemessenen pH-Wert des Wassers auch die Menge aggressiver Kohlensäure zu errechnen.

## 5. Kombinierte Temperatur-Sauerstoff-Plankton-Untersuchung während 24 Stunden im Hallwiler-See am 18./19. 6. 43

### *Einleitung*

Von verschiedenen Autoren (*L. Minder, H. Müller, H. J. Elster* und *W. Einsele*) wurden bei Untersuchungen in Seen innert 24 Stunden Schwankungen in der Temperatur und im Sauerstoffgehalt an ein und derselben Stelle beobachtet.

Es wurde nun versucht, diese bis anhin noch nicht erklär-

ten Tatsachen näher zu ergründen. Zu diesem Zwecke wurden am 18./19. 6. 43 während 24 Stunden an Stelle 2 in je 2½stündigen Intervallen sowohl Temperatur- und Sauerstoffbestimmungen als auch Planktonzählungen durchgeführt.

Während die Temperatur- und Sauerstoffmessungen innerhalb des gesteckten Ziels in den Rahmen dieser Arbeit gehören, wurden die Planktonmessungen durch Herrn Rudolf Braun, stud. rer. nat., durchgeführt. Durch eine zwischen der Direktion des Hygiene-Institutes und Herrn Prof. Dr. Jaag vom Institut für spezielle Botanik getroffene Vereinbarung war die Zusammenarbeit zwischen Herrn Braun und mir geregelt und wirkte sich sehr günstig aus. Es wäre mir nicht möglich gewesen, die vorgenommenen Planktonuntersuchungen mit der gleichen Gründlichkeit und Sachkenntnis durchzuführen, wie dies nun tatsächlich geschehen ist. Es sei auch an dieser Stelle Herrn Prof. Dr. Jaag, sowie Herrn Braun für ihre wertvolle Unterstützung gedankt.

Nachstehend die erhobenen Befunde:

### I. Die Temperaturverhältnisse

Die Temperaturverhältnisse sind aus der Tabelle 19 und der graphischen Darstellung Fig. 9 der 24stündigen Messungen für die Tiefen 0, 1, 2,5, 5, 7,5, 10, 12,5, 15 und 20 m ersichtlich.

Die thermisch bedingte Schichtung der Wassermassen in das *Epilimnion*, welches die Tiefen bis und mit 5 m erfaßt, das *Metalimnion* mit den Schichten 7,5 und 10 m und das *Hypolimnion* mit den Tiefen unterhalb 10 m, war sehr augenfällig. Die Tag- und Nachttemperaturdifferenzen an der Oberfläche betrugen 3,2 °C. Die homotherme Schicht, die durch den Tag- und Nachttemperaturausgleich gebildet wurde, erreichte eine Dicke von 5 m. Besondere Beachtung verdiente das Metalimnion. Die Messungen in der Tiefe von 7,5 m zeigten ausgesprochenen Sprungschichtcharakter, indem die Höhe der Temperatur (11 bis 14 °C) sich zwischen diejenige des Epilimnions (17 °C) und des Hypolimnions (5 bis 7 °C) stellte und starken Schwankungen unterworfen war. Parallel zur 7,5 m Temperaturkurve ver-

lief die Kurve der Tiefe von 10 m und zeigte Schwankungen zwischen 7,5 und 10,5 °C.

Der Temperaturverlauf in der Tiefe 12,5 m zeigte die Schwingungen, wie sie in der 10-m-Tiefe auftraten, nur noch andeutungsweise. Die Temperaturen betrugen 5,6 bis 6,8 °C. Die Tiefen von 15 m und 20 m waren ziemlich ausgeglichen und wiesen Temperaturen von 5,2 bis 5,9 °C auf.

**Temperaturmessungen an Stelle 2 innerhalb 24 Stunden in den Tiefen  
0 bis 20 m am 18. und 19. 6. 43**

*Tabelle 19*

Zeit Tiefe	2030	2300	0130	0400	0630	0900	1130	1400	1630
0 m	20,0	17,0	16,8	16,8	16,8	16,9	16,9	17,3	17,3
1 m	17,4	17,0	16,8	16,8	16,8	16,9	16,9	17,3	17,3
2,5 m	17,2	17,0	16,8	16,8	16,8	16,9	16,9	17,3	17,3
5,0 m	17,0	17,0	16,8	16,8	16,8	16,9	16,9	16,9	16,9
7,5 m	14,1	11,6	11,5	14,6	12,6	12,1	14,5	13,6	13,0
10,0 m	8,7	7,4	7,8	9,8	8,5	8,4	10,4	8,5	8,5
12,5 m	6,5	5,6	6,2	6,8	6,5	6,7	7,0	6,6	6,4
15,0 m	5,4	5,4	5,7	5,9	5,9	5,8	5,8	6,0	5,7
20,0 m	5,2	5,2	5,2	5,4	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2

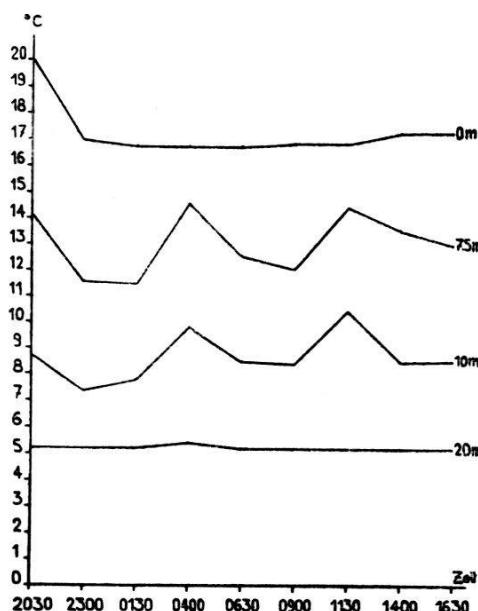


Fig. 9. Temperaturmessungen an Stelle 2 innerhalb 24 Stunden am 18. und 19. 6. 43 nach Tabelle 28 in den Tiefen 0, 7,5, 10 und 20 m graphisch dargestellt

## II. Die Sauerstoffschichtung

(Tabellen 20 und 21, Fig. 10)

Das *Epilimnion* wies Sauerstoffgehalte von 10,5 bis 11,5 mg/l auf, welche 110—120 %iger Sättigung entsprachen. Die Tiefen 0, 1 und 2,5 hatten sehr eng beieinander liegende Werte, während in der Tiefe von 5 m einige Schwankungen auftraten, trotz-

### Sauerstoffmessungen an Stelle 2 innerhalb 24 Stunden am 18. und 19. 6. 43

Sauerstoffgehalt in mg/l in den Tiefen 0 bis 20 m

Tabelle 20

Zeit Tiefe	2030	2300	0130	0400	0630	0900	1130	1400	1630
0 m	10,9	10,9	10,7	11,0	11,1	11,1	10,8	10,9	10,8
1 m	11,2	10,8	11,2	11,0	11,3	12,2	10,8	11,2	11,2
2,5 m	11,2	10,6	10,8	10,9	11,1	11,2	10,8	11,0	11,3
5,0 m	11,6	10,7	11,7	12,6	11,2	11,1	11,2	12,1	11,9
7,5 m	17,3	18,2	18,4	17,8	18,5	18,6	16,9	18,2	18,4
10,0 m	14,2	4,9	8,0	15,8	10,8	7,6	18,4	12,1	7,4
12,5 m	6,9	7,1	7,2	6,5	6,5	7,9	5,8	7,2	6,6
15,0 m	7,6	7,0	7,0	6,6	7,3	7,2	7,6	8,7	7,1
20,0 m	6,7	6,3	6,3	6,3	6,4	6,7	6,4	6,7	6,2

### Sauerstoffmessungen an Stelle 2 innerhalb 24 Stunden am 18. und 19. 6. 43

Sauerstoffgehalt in % der theoretischen Sättigung in den Tiefen 0 bis 20 m

Tabelle 21

Zeit Tiefe	2030	2300	0130	0400	0630	0900	1130	1400	1630
0 m	120,0	113,0	111,0	114,0	115,0	115,0	112,0	114,0	112,5
1 m	116,8	112,0	114,5	114,0	116,5	116,0	112,0	116,2	116,1
2,5 m	116,5	109,5	111,8	112,5	114,5	116,3	111,0	114,8	118,0
5,0 m	120,0	111,2	120,8	129,5	116,0	115,0	115,3	125,0	123,3
7,5 m	169,0	164,3	169,5	175,5	174,5	173,5	166,2	176,0	175,3
10,0 m	122,0	40,6	73,7	140,0	92,7	65,1	165,0	104,0	63,3
12,5 m	56,7	56,5	58,1	53,6	53,2	65,0	48,3	59,3	53,7
15,0 m	60,7	55,5	56,3	53,3	59,0	57,8	61,0	70,0	56,7
20,0 m	52,6	52,5	49,8	49,8	50,6	52,0	50,6	52,7	49,3

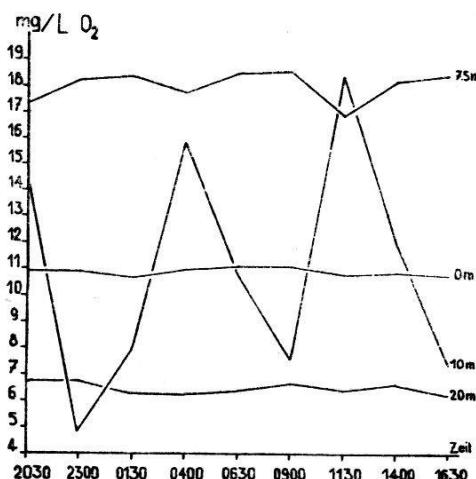


Fig. 10. Sauerstoffmessungen an Stelle 2 innerhalb 24 Stunden am 18. und 19. 6. 43 nach Tabelle 29 in den Tiefen 0, 7,5, 10 und 20 m graphisch dargestellt

dem die Temperatur gleich wie in den andern Tiefen des Epilimnions war. Mit wesentlich höherem Sauerstoffgehalt trat die Tiefe von 7,5 m als ausgesprochene Sprungschicht in Erscheinung. Der Sauerstoffgehalt schwankte innerhalb von 24 Stunden nur zwischen 17 und 18 mg/l, was einer theoretischen Sättigung von 165 resp. 175 % gleichkam. Der Sauerstoffgehalt des Hypolimnions erreichte im Mittel 50 bis 60 % der theoretischen Sättigung, absolut also nur noch Werte von 6,5 und 7,5 mg/l. Den bemerkenswertesten Verlauf nahm die Kurve der Tiefe von 10 m. Der Sauerstoffgehalt bewegte sich von den Werten des Metallimnions zu denen des Hypolimnions. Die Schwingungen wiederholten sich dreimal im Verlaufe von 24 Stunden. Um 20.30 war die Temperatur in 10 m Tiefe im Absinken und erreichte um 23.00 einen ersten Tiefpunkt, gleichzeitig hatte der Sauerstoffgehalt den niedrigsten Wert von 4,8 mg/l erreicht. Nach diesem Zeitpunkt war die Temperatur wieder im Ansteigen begriffen und erreichte um 04.00 den ersten Kulminationspunkt. Auch für die Sauerstoffkurve war dies der erste Kulminationspunkt von 15,8 mg/l. Nach 04.00 strebten Temperatur und Sauerstoffgehalt wieder einem Minimalwert zu und erreichten diesen um 09.00 mit einem Sauerstoffgehalt von 7,6 mg/l, entsprechend dem Gehalt im Hypolimnion. Nach 2½ Stunden, um 11.30, erreichte die 10-m-Tiefe ihren höchsten Sauerstoffwert von 18,4 mg/l und war damit um 1,5 mg/l höher als der Sauerstoff-

wert in 7,5 m Tiefe. In den folgenden fünf Stunden sanken sowohl die Temperatur als auch der Sauerstoffgehalt auf einen dritten Minimalpunkt von 7,4 mg/l Sauerstoff. Diese starken Schwankungen des Sauerstoffgehaltes hatten ihren Ursprung in den Vertikalbewegungen der temperierten Wassermassen. Das Metalimnion war nicht starr zwischen Epi- und Hypolimnion gelagert, sondern bewegte sich, wie unsere Messungen deutlich zeigen, gegen Abend in die Höhe, sodaß die 10-m-Tiefe die Grenze zwischen Meta- und Hypolimnion mit starkem Sauerstoffminimum darstellt. In der Zeit von 23.00 bis 04.00 sank das Metalimnion tiefer, sodaß die 10-m-Tiefe gut ins Metalimnion mit hohem Sauerstoffwert zu liegen kam. Von 04.00 bis 09.00 stieg die Sprungschicht wieder an, sodaß die 10-m-Tiefe, nach dem Sauerstoffgehalt zu schließen, ausgesprochenen Hypolimnioncharakter aufwies. Bemerkenswert war besonders das schnelle und tiefe Absinken des Metalimnions von 09.00 bis 11.30. Bis 16.30 stieg das Metalimnion wieder an, um dann um 20.30 einen dritten Höhepunkt zu erreichen. Diese Schwingungen im Sauerstoffgehalt im Metalimnion waren umso merkwürdiger, als die Wassertemperatur der Oberfläche bis 5 m Tiefe, abgesehen von der Zeit zwischen 20.30 bis 23.00, streng ausgeglichen war. Mit den biologischen quantitativen Planktonuntersuchungen, die gleichzeitig und in denselben Tiefen ausgeführt worden sind, werden die Vorgänge im Metalimnion abzuklären versucht.

### III. Schichtung des Planktons

Die Profilfänge wurden von Rudolf Braun ausgeführt und die Proben mit seiner eigens dazu erstellten Apparatur genommen. Über den Gang der Analyse berichtet er folgendes:

«Mit einer Schöpfflasche wird aus einer bestimmten Tiefe Wasser heraufgeholt und in den Filterapparat gegossen. Letzterer besteht zur Hauptsache aus einem trichterförmigen, aus rostfreiem Stahl angefertigtem Gefäß, welches zwei Liter Wasser faßt. Am untern Ende desselben, läßt sich mittels einer mechanischen Einrichtung ein zirka fünflibergroßes Planktonnetzchen mit feinster Maschenweite (Nr. 25) anbringen. Das Netz-

chen läßt sich sehr leicht auswechseln. In großen Tiefen gewonnenes Wasser wird in wenigen Sekunden filtriert sein, Oberflächenwasser braucht sehr viel länger infolge größerer Individuenzahl der Planktonorganismen. Sobald das Wasser durchgeflossen ist, wird der Befestigungsring vorsichtig entfernt und das Netzchen in ein kleines, zur Hälfte mit Wasser gefülltes Pillengläschen verbracht und sofort mit Formol fixiert. Auf diese Art lassen sich in kurzer Zeit viele Proben fassen. Im Labor wird der ganze Inhalt des Gläschens, also auch das Netz, in ein Ugläschen geleert. Das Pillengläschen soll gut ausgespült werden, damit keine Organismen verloren gehen. Mit einer Spritzflasche, die einen scharfen Wasserstrahl erzeugen soll, wird nun das Netzchen von beiden Seiten her ganz gründlich abgespült. Es ist jetzt für weitere Analysen verwendbar. Den Inhalt des Uglases bringen wir nun in einen Meßkolben von  $50 \text{ cm}^3$  Inhalt. Auch hier soll das Uglas wieder ausgespült werden, um Verluste zu vermeiden. Den Meßkolben füllen wir mit Wasser auf bis  $50 \text{ cm}^3$  und haben darin also die Organismen, die in zwei Liter Seewasser (wenn die Schöpfflasche zwei Liter faßte) enthalten sind. Dieses Wasser im Kolben wird nun gut durchgemischt, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Planktonen zu erhalten. Mit einer Pipette fassen wir nun Wasser und füllen damit eine Planktonzählkammer (nach *Kolkwitz*) von  $1 \text{ cm}^3$  Inhalt. Dies muß geschehen, solange das Wasser im Meßkolben noch in Bewegung ist, um eine Sedimentation und eine damit verbundene Ungenauigkeit zu vermeiden. Bevor wir das Deckglas auf die Kammer legen, ist es zweckmäßig, noch einen Tropfen Färbeflüssigkeit in das Wasser zu bringen (z. B. Viktoriablau oder Methylenblau), um die Organismen zu färben und ihr spezifisches Gewicht zu erhöhen, was bei der Auszählung sehr gute Dienste leistet, da es die Augen bei weitem nicht so ermüdet, als wenn die Organismen ungefärbt wären. Sobald die Planktonkammer geschlossen ist, lassen wir sie mindestens zehn Minuten stehen, damit sich die Organismen auf dem Boden der Kammer absetzen, was wiederum eine Erleichterung bei der Auszählung bedeutet, indem man dann nicht immer den Tubus heben und senken muß, weil die Organismen sonst nicht in einer Ebene liegen. Nun wird nach den bekannten Methoden

ausgezählt, indem man, wenn eine Objektträgerführung vorhanden ist, die Kammer systematisch verschiebt und zählt. Ist keine solche Führung vorhanden, so ist diese Auszählung sehr mühsam. Man hilft sich dadurch, daß man auf einem Cellophanblättchen feine Rillen mit kleinem Abstand einritz und dieses dann auf die Unterseite der Planktonkammer aufklebt. Auf diese Weise hat man im Gesichtsfeld ein Netzsysten, in welchem man die Organismen leicht zählen kann. Wenn eine Massenentwicklung auftritt, wie z. B. bei *Oscillatoria*, die in bestimmten Tiefen bis zu zwei Millionen Stück im Liter vorkommt, so empfiehlt es sich, eine etwa tausend- oder zehntausendfache Verdünnung herzustellen.

Durch diese Methode der quantitativen Planktonuntersuchung ist es möglich, innert kurzer Zeit ein gesamtes Tiefenprofil fassen und fixieren zu können. Außerdem beanspruchen die kleinen Pillengläser, welche die einzelnen Proben fassen, sehr wenig Platz, sodaß man auf einer Exkursion mehrere Profilaufnahmen machen kann. Außerdem benötigt man keine Zentrifuge, was ebenfalls die Untersuchung erleichtert und abkürzt.

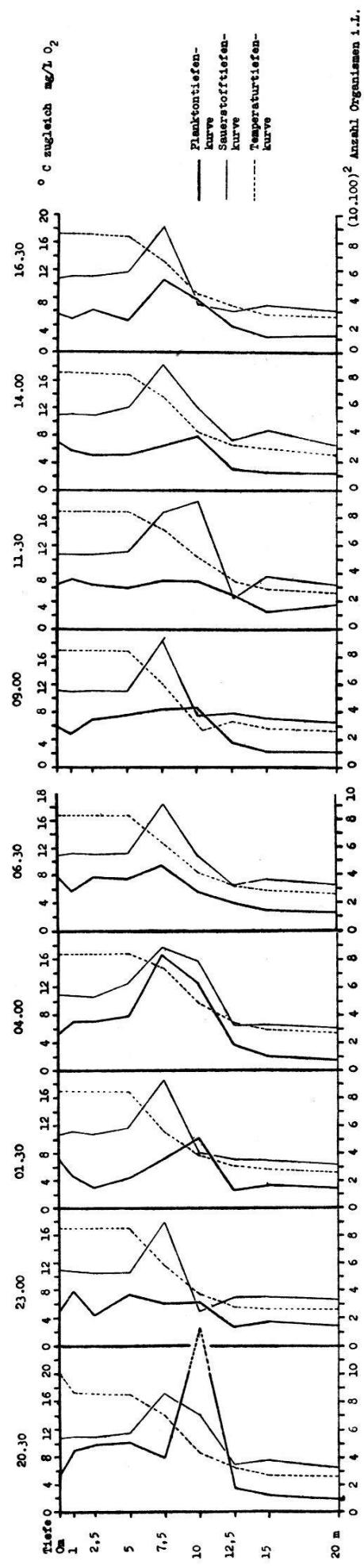
Wir sind uns aber vollauf bewußt, daß diese Methode noch nicht vollkommen ist, indem zahlreiche kleinste Organismen (Nannoplankton) mit dem Planktonfilter nicht erfaßt werden können. Es hat sich aber gezeigt, daß für die praktische Seeuntersuchung diese Methode genügt. Für exakte quantitative Untersuchungen ist die Methode nach *Gimesi* vorzuziehen.»

Über die Schichtung des Planktons orientiert die Zusammensetzung der Planktontiefenkurven zu allen Meßzeiten (Fig. 11). Die Anzahl der Organismen war verschieden nach Zeit und Tiefe der Probenahme. Es ließen sich zwei Schichtungstypen unterscheiden:

a) Mehr oder weniger ausgeglichene Organismenzahl von der Oberfläche bis zur Tiefe von 10 m; deutlicher Abfall in 12,5 oder 15 m Tiefe unter die Oberflächenzahlen, eventuell zu einem ersten Minimum. Unterhalb 12,5 oder 15 m Tiefe langsame, stetige Abnahme der Organismenzahl.

b) Die Organismenzahlen der Oberflächenzone 0 bis 5 m sind schwankend, zu- oder abnehmend. In den Tiefen 7 oder

Fig. 11  
 Profilfänge im Hallwilersee vom 18./19. 6. 43  
 Plankontiefenkurven, graphische Darstellung  
 Den Profilen sind die Temperatur- und Sauerstofftiefenkurven beigegeben



10 m, der Sprungschichtzone, treten Maxima auf. Der Abfall der Organismenzahlen in den Tiefen 12,5 und 15 m tritt wie beim Typus a auf.

Die maximalen Planktonzahlen traten abwechslungsweise in den Tiefen 7,5 und 10 m auf. Es liegt nun nahe, daß zwischen Planktonzahl und Tageszeit eine Beziehung gesucht wird. Wir können prüfen, ob die besprochenen Maxima periodischen Schwankungen nach der Tiefe unterworfen sind, das heißt ob die Masse des Planktons zu bestimmter Zeit der Wasseroberfläche näher rückt oder ob ein Tiefersinken bemerkt wird. Eine andere Methode liegt darin, die mittlere Planktonzahl (Planktonzahlen in allen Tiefen addiert und durch Probenzahl dividiert) mit den verschiedenen Zeiten der Probenahmen zu vergleichen. Wenn solche Vergleiche angestellt werden, so sind wir uns bewußt, daß wir infolge der Unmöglichkeit, zu verschiedenen Zeiten genau an derselben Stelle die Proben zu entnehmen, zu absolut falschen Schlüssen kommen können. Es liegt uns daher ferne, eine Gesetzmäßigkeit konstruieren zu wollen, wir wollen lediglich die einzelnen Proben im Tagesverlauf prüfen.

Die oben erwähnten Schichtungstypen a und b wechselten im Verlaufe des Tages untereinander ab, und zwar mit Übergängen; außerdem schwankten die Planktonmaxima zwischen den Tiefen 7,5 und 10 m. Unsere Untersuchung zeigte insofern einen charakteristischen Verlauf, als ausgehend von Schichtungstypus a bei der Probe von 23.00 zuerst in 10 m ein Maximum ausgebildet war, also um 01.30 in Schichtungstypus b überging. Um 04.00 wurde das Maximum vergrößert und verlagerte sich in die Tiefe 7,5 m. Um 06.30 nahm das Maximum ab, erschien aber immer noch in 7,5 m Tiefe, um später um 09.00 nur noch schwach ausgebildet in 10 m Tiefe aufzutreten. Die Probe um 11.30 zeigte wieder den Typus a; aber schon um 1400 war in 10 m Tiefe ein Maximum in Ausbildung begriffen. Diese Kurve zeigt auffallende Ähnlichkeit mit derjenigen um 01.30, ebenfalls ein Anfangsstadium. Um 16.30 Uhr war der analoge Zustand wie 04.00, mit ausgebildetem Maximum in 7,5 m Tiefe.

Die Durchschnittsplanktonzahlen sind folgende:

20.30	...	385 000	(extrem)
23.00	...	61 000	

01.30	. . .	80 000
04.00	. . .	180 000 (extrem)
06.30	. . .	100 000
09.00	. . .	93 000
11.30	. . .	86 000
14.00	. . .	69 000
16.30	. . .	91 000

Das Durchschnittsminimum fanden wir also um 23.00, welchem um 04.00 ein Maximum folgte. Bis um 14.00 stellten wir stetige Abnahme fest, welcher um 16.30 ein Anstieg folgte.

Die Ausbildung der zwei Planktonsschichtungstypen fand ihre Erklärung in den thermischen Verhältnissen. Die weitgehend ausgeglichenen Planktonzahlen der Tiefen 0 bis 5 m rührten daher, weil der Ausgleich in der homothermen Zone durch turbulente Strömungen gefördert wird. Dieselbe Erklärung gilt auch für die ausgeglichenen Werte des oberen Hypolimnions, wo nur geringe Temperaturdifferenzen gemessen werden.

In der Sprungschicht, in welcher die Tiefen 7,5 und 10 m untersucht wurden, beobachteten wir einen Temperaturabfall von  $10^{\circ}\text{C}$ . Die Temperaturdifferenzen bewirken nach *W. Schmidt*<sup>31</sup> die Stabilität des Metalimnions. Die strenge Schichtung der Wassermasse schließt turbulente Strömung aus. Als Bewegungsrichtung tritt nur die Vertikale in Erscheinung.

Das Metalimnion war gegenüber dem Epi- und Hypolimnion als «ruhende» Zwischenschicht aufzufassen, welcher Organismen, wenn sie einmal eingedrungen sind, ohne eigenes Dazutun oder passives Absinken nicht mehr entrissen werden. Auf diese Weise können die Anhäufungen des Planktons zustande kommen.

Auch das wechselnde Auftreten der Planktonmaxima in 7,5 und 10 m Tiefe wird seinen Ursprung in den thermischen Verhältnissen haben.

Die Schwankungen der Temperatur in der Sprungschicht werden dadurch erklärt, daß die kompakte Sprungschicht, die durch große Temperaturdifferenzen stabilisiert ist, unten und oben von Horizontalströmungen, die kältere oder wärmere Wassermassen bewegen, eingedrückt wird. Solche Stöße kön-

nen in der Sprungschicht eine Welle erzeugen und die kompakte Wassersäule zwingen, vertikale Schwingungen auszuführen. Mit den Wassermassen können natürlich auch die Planktonmassen verlagert werden. Unsere quantitativen Planktonmessungen zeigten, daß das Plankton den Temperaturschwankungen in den Tiefen 7,5 und 10 m nur teilweise folgte.

Um 20.30 fanden wir das Planktonmaximum in 10 m Tiefe. Die Temperatur in dieser Tiefe und auch diejenige in 7,5 m war im Sinken begriffen, was bedeuten will, daß die Sprungschichtmasse einem Druck von unten ausweichen muß. Von 23.00 bis 01.30 verharrte die Sprungschicht in erhöhter Lage, aber das Planktonmaximum fanden wir noch um 01.30 in 10 m Tiefe. Um 04.00 war die Sprungschicht wieder abgesunken, das Planktonmaximum war jetzt in 7,5 m Tiefe.

Wenn die Planktonmasse der Wassermasse gefolgt wäre, so müßte nun das Maximum schon wieder in der Tiefe von 10 m auftreten. Um 06.30 fanden wir das Planktonmaximum der Temperatur «entsprechend» in 7,5 m Tiefe; es hätte inzwischen aber auf Tiefe 10 m sein sollen. Um 09.00 war das Planktonmaximum der Sprungschichtschwankung vorausgeeilt und war schon in 10 m Tiefe aufzufinden, wo es auch um 11.30 verharrte. Den raschen Aufstieg der Wassermasse in die 7,5-m-Tiefe machte das Planktonmaximum um 14.00 nur verspätet mit und erreichte die Höhe erst, als die Wassermasse wieder abzusinken begann. Für dieses Nachhinken kann nur die träge Masse des Planktons verantwortlich gemacht werden.

Wir haben also für alle Eigentümlichkeiten der Tiefenverteilung des Planktons die herrschenden Temperaturverhältnisse in den betreffenden Tiefen verantwortlich gemacht. Die Temperaturschichtung ist die meßbare Folge der verschiedenartigsten Strömungen, die in einem See auftreten können (siehe Strömungsmessungen). In diesem Sinne können unsere Untersuchungen die Ansicht von *Henri Lozeron*<sup>32</sup> unterstützen. *H. Lozeron* erklärt die Schwankungen in der Tiefenverteilung des Planktons seiner quantitativen Jahresuntersuchung im Zürichsee mit Horizontal- und Vertikalströmungen.

#### IV. Beziehung zwischen Plankton- und Sauerstoffgehalt

Wir glaubten, daß bei dieser Tag- und Nachtuntersuchung die quantitativen Planktonergebnisse uns die Schwankungen der Sauerstoffkurve der 10-m-Tiefe verständlich machen würden. Nachdem aber für die Tiefenverteilung des Planktons die Temperaturschichtung maßgebend war, müssen wir ein Heben und Senken des Metalimnions als Tatsache hinnehmen. Die Tiefe von 10 m würde also nach dem früher Gesagten abwechselnd in der trophogenen und tropholytischen Schicht liegen und der Temperatur und Lage entsprechende Sauerstoffwerte aufweisen. Es wäre auch absolut falsch, wenn wir ein starkes Ansteigen des Sauerstoffgehaltes in 10 m Tiefe von 23.00 bis 04.00, als Nachtzeit, auf intensivierte Assimilation zurückzuführen versuchten. Wir müssen daher festhalten, daß die Sauerstoffschwankungen der 10-m-Tiefe *biologisch* nicht erklärt werden können.

Das *Epilimnion* (0 bis 5 m), das zusammen mit dem Metalimnion die trophogene Schicht darstellt, zeigt ausgeglichene Temperatur und zugleich ausgeglichene Sauerstoffwerte in der Höhe von 110 bis 130 % der theoretischen Sättigung. Dementsprechend ist in ihm das Plankton mehr oder weniger gleichmäßig verteilt.

Im *Metalimnion* mit der Tiefe 7,5 m wurden die höchsten Sauerstoffgehalte beobachtet. Wir konstatierten weitgehende Unabhängigkeit der Sauerstoffwerte vom Planktongehalt. Maßgebend war, daß in dieser Schicht das durchschnittliche Planktonmaximum gemessen wurde und daß die Temperatur nur in mäßigem Rahmen schwankte. Die Anreicherung von Sauerstoff sowie auch des Planktons hatte zur Bedingung, daß die Schichtung innerhalb diesem wichtigsten Teil der trophogenen Zone nicht gestört worden war. Dies ist aber gerade das Charakteristikum des Metalimnions und liegt in der Thermik begründet. Es wäre gut denkbar, daß wir auch im Epilimnion maximale Sauerstoffwerte messen könnten, wenn nicht die Turbulenz den sofortigen Ausgleich und die Zerstörung der Schichtung verursachen würde. Wir machten auch hier wieder die Erfahrung, daß die Maxima und Minima der Sauerstoffwerte immer auf der

Grenze zwischen Meta- und Hypolimnion auftraten. Dies mag seinen Grund darin haben, daß die unmittelbare Nähe der trophogenen Zone die Assimilation durch die Nachlieferung von Kohlensäure begünstigt.

*Das Hypolimnion als tropholytische Zone* zeigte verminderte Planktonzahlen und erste Sauerstoffminima. In diesen Tiefen von 12,5 m an abwärts haben wir wohl noch beträchtliche Planktonmengen (10 000 bis 40 000 im Liter), die des geringen Lichtes wegen aber nur wenig Sauerstoff zu produzieren vermögen.

Gleichzeitig wird zum oxydativen Abbau der Planktonleichen und zur Atmung des Zoo- und Phytoplanktons Sauerstoff verbraucht.

Unsere Tag- und Nachtmessungen zeigten auch hier sehr geringe Schwankungen, die sogar bei sehr genauen Messungen innerhalb der Fehlergrenzen liegen könnten.

## V. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Wir versuchen im Nachfolgenden die Unterschiede und Schwankungen in der Temperatur und dem Sauerstoffgehalt, innerhalb eines Tages, an einer bestimmten Stelle, auf folgende Weise zu erklären:

- a) *Die Temperaturschwankungen* können folgendermaßen erklärt werden:
  1. *im Epilimnion*, 0 bis 5 m, durch Tag- und Nachtausgleich;
  2. *im Metalimnion*, 7,5 bis 10 m, durch Heben und Senken der Sprungschicht, wahrscheinlich verursacht durch turbulente Strömungen;
  3. *im oberen Hypolimnion* mehr oder weniger ausgeglichene Temperatur infolge turbulenter Strömungen.
- b) *Die Schwankungen im Sauerstoffgehalt* gehen den Temperaturschwankungen parallel und haben ihren Ursprung in:
  1. der Planktonsschichtung;
  2. der Störung des stabilen Metalimnions durch einfallende turbulente Strömungen, die ein vertikales Schwingen des Metalimnions verursachen;

3. der Sauerstoffkonsumtion durch Zoo- und Phytoplankton, sowie Abbaureaktionen.
- c) Besondere Verhältnisse liegen bei der Tiefe von 10 m vor, wo die Sauerstoffkurve im Verlaufe der Untersuchung drei starke Schwingungen zwischen den Sauerstoffwerten der Tiefen 7,5 m und 12,5 m ausführte und zwischen 40 % bis 165 % der theoretischen Sättigung schwankte.  
Die Tiefe von 10 m liegt an der Grenze zwischen Meta- und Hypolimnion und gehörte einmal der trophogenen, dann wieder der tropholytischen Schicht an.
- d) Für die Zone 0 bis 5 m, dem eigentlichen Epilimnion, gilt folgendes:

- Infolge Tag- und Nachttemperaturausgleich wurde eine homotherme Schicht von 0 bis 5 m gebildet, die entsprechend ausgeglichene Sauerstoffwerte von 110 bis 120 % der theoretischen Sättigung aufwies.
- e) Nach den vorliegenden Befunden liegt am Tage der Untersuchung das Hypolimnion aus folgenden Gründen in der Tiefe von 12,5 m an abwärts:
    1. Die Temperatur entspricht der Kaltwasserschicht, wie sie bei der Thermik konstatiert worden war;
    2. die Sauerstoffwerte sind gegenüber denjenigen der trophogenen Zone stark reduziert;
    3. die Planktonzahlen sind stark in Abnahme begriffen.

## 6. Strömungsmessungen

### *A. Ursachen der Strömungen in einem kleinen See*

#### *1. Dynamische Ursachen:*

Der See kann als Erweiterung des Flüßbettes zum Becken aufgefaßt werden, worin naturgemäß der Zufluß je nach seinem Inhalt an Bewegungsenergie Strömungen hervorrufen kann. Der Abfluß mit seiner Saugwirkung wird in bestimmten Regionen des Sees spürbar sein.

Von diesen Strömungen, welche durch den Zu- und Abfluß bedingt sind, wird nie die ganze Wassermasse des Sees in Bewegung gebracht. In energetischer Hinsicht tritt eine viel mächtigere strömungserzeugende Kraft auf, welche die ganze Masse des Sees in Bewegung zu versetzen vermag, nämlich die Luftbewegungen und der ausgesprochene Wind. Dieser kann mit seinen gerichtet bewegten Luftmassen durch Reibung die Wasseroberfläche in gleicher Grundrichtung in Fluß bringen. Die tieferen Schichten des Seewassers werden ebenfalls durch die Reibung nachgezogen.

## 2. *Hydrostatische Ursachen:*

Die Wirkung der Unterschiede in den spezifischen Gewichten benachbarter Wassermassen bedingt weitere Strömungen im Wasser. Das spezifische Gewicht des Wassers kann durch Temperatur, Salzgehalt und suspendierten Schlamm verändert werden. Die daraus resultierenden Strömungen werden immer die Vertikale als Hauptkomponente aufweisen. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit und die Entwerfung eines Bildes, das diese vertikalen Massenverschiebungen auch nur annähernd darzustellen vermöchte, wäre eine schwierige Arbeit, denn die wirklich vorhandenen Strömungen in einem See sind die Resultierenden aus den erwähnten Wirkungen der dynamischen und hydrostatischen Ursachen.

## *B. Ziel und Zweck der Strömungsmessungen*

Unsere Messungen beschränkten sich hauptsächlich auf die Wirkung der beiden Hauptwindrichtungen — Bise und Föhn (Nord- und Südwind). Die Einwirkung von Zu- und Abfluß wurde außer Acht gelassen.

Die Messungen sollen ein Bild von der Bewegungsgröße und Richtung der Wassermassen geben.

## *C. Meßgerät zur Messung der Strömungen*

Die Strömungsmessungen wurden mit Strömungskreuzen mit Schwimmkörpern ausgeführt, wie sie von *Max Städler*<sup>33</sup> beschrieben und mit Erfolg angewendet worden sind. Die Be-

schreibung der von Herrn Schaltegger, von der Wasserversorgung Zürich, konstruierten Apparatur sei hier wiederholt:

«Die Schwimmapparatur fußt auf dem Prinzip, daß ein Körper, der sich in einem bewegten Medium schwebend erhält, den Bewegungen dieses Mediums in jeder Hinsicht folgt. Wir versenken also einen Körper in die Wassermassen eines Sees, und zwar so, daß er sich in einer bestimmten Tiefe schwebend hält. Die Beobachtung zeigt, daß ein solcher Körper die Bewegungen der ihn umgebenden Wassermassen mitmacht. Es handelte sich also nur darum, einen Körper zu schaffen mit der Eigenschaft, sich in jeder beliebig gewählten Tiefe schwebend erhalten zu können, dessen Bewegung, d. h. Ortsveränderung, registrierbar ist.

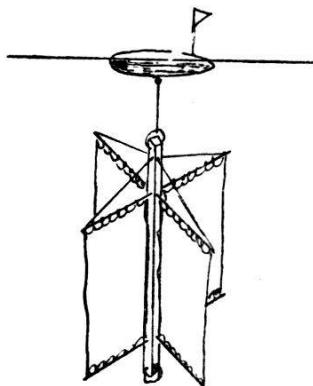


Fig. 12

Zu diesem Zweck wurde ein Gerät hergestellt, dessen spezifisches Gewicht etwas größer ist als das des Wassers, das also sinkt. Dieses Gerät wird mittels eines Drahtes von einer Schwimmboje getragen. Damit ist den beiden gestellten Forderungen Rechnung getragen: Der Körper schwebt dauernd in einer nach Bedarf wählbaren Tiefe, und seine Fortbewegung ist durch die Boje, die als Träger des versenkten Gerätes senkrecht darüber steht, der Beobachtung zugänglich gemacht. Da nun aber der Schwimmkörper seinerseits die Tendenz hat, den Bewegungen der Seeoberfläche zu folgen, mußte, um nicht eine Resultante aus Oberflächen- und Tiefenströmungen zu erhalten, die Boje so beschaffen sein, daß sie, von den Strömungen ihrer eigenen Medien (Wasser und Luft) möglichst unbeeinflußt, den Bewegungen des Gerätes nachkommen kann. Die relativ kleine Schwimmboje darf also den Wasser- und Windströmungen nur

geringe Angriffsflächen bieten. Das Meßgerät dagegen, das die Bewegungen der Wassermassen der bestimmten Tiefe anzeigen und mitmachen muß, verlangt bei großen Dimensionen ein Vielfaches der Angriffsfläche der Bojen. Auf ganz einfache Weise ist es nun gelungen, diesen Voraussetzungen zu entsprechen. Das eigentliche Meßgerät besteht nämlich aus einem Holzbalken von 2 m Länge, der am oberen und untern Ende Durchbohrungen besitzt, in welchen Eisenstangen kreuzweise eingefügt und mit Tüchern von  $1,2 \text{ m}^2$  Fläche bespannt sind. Es zeigt also ganz erhebliche Ausmaße und würde beim Transport sehr viel Platz auf dem Schiff beanspruchen. Deshalb ist es so konstruiert, daß es in wenigen Minuten leicht montiert bzw. demontiert werden kann. Die Tücher sind am oberen und untern Ende mit Metallringen versehen, mittels denen sie bequem an den Eisenstangen befestigt werden können. Die Eisenstangen selbst sind in die Durchbohrungen des Vertikalbalkens leicht einschiebbar und werden durch Drähte, an denen sich Haken zum leichten Fixieren befinden, seitlich noch verstrebt (s. Fig. 12).

Die Schwimmboje besteht aus einem massiven Holzstück von zirka 1,2 m Länge und 12 bis 15 cm Durchmesser und besitzt Zigarrenform. Im Schwerpunkt ist eine Ringschraube angebracht, an welcher der das Meßgerät tragende Draht mittels Karabinern befestigt wird. Um die Boje, die zu zwei Dritteln in das Wasser eintaucht, möglichst weit sichtbar zu machen, sitzt an ihrem schmalen Ende ein zweifarbiges Fanion mit Nummernbezeichnung. Die Placierung des Fanions hat den besondern Zweck, die Boje stets in Windrichtung und damit auch in Strömungsrichtung der oberflächlichen Wasserschicht zu halten. Die Querfläche, die der Schwimmkörper den Wasser- und Luftbewegungen als Angriffsfläche bietet, ist so auf maximal  $2 \text{ dm}^2$  eingeschränkt. Den  $10 \text{ m}^2$  Gesamtfläche des Gerätes gegenüber ist dies verschwindend wenig und darf praktisch vernachlässigt werden.»

#### *D. Aussetzen der Meßgeräte*

Die Geräte wurden im Ruderboot an Ort und Stelle montiert und mit der nötigen Länge Draht in den See versenkt und

an der Boje befestigt. Die Boje wurde sofort mit dem Armee-Sitometer auf drei markante Punkte eingemessen und die Bezeichnung der Boje und die Zeit notiert. Die Dauer der Messung richtete sich nach der Strömungsgeschwindigkeit und der zur Verfügung stehenden Zeit.

#### *E. Wahl des Zeitpunktes der Messungen*

Entsprechend der Zielsetzung wurden die Messungen während beständigen Föhn- und Bise-Windperioden vorgenommen, damit die übrigen erwähnten dynamischen und hydrostatischen Strömungsursachen soweit in den Hintergrund rückten, daß ein möglichst eindeutiges «Wind-Strömungsbild» resultierte.

#### *F. Ausführung der Messungen*

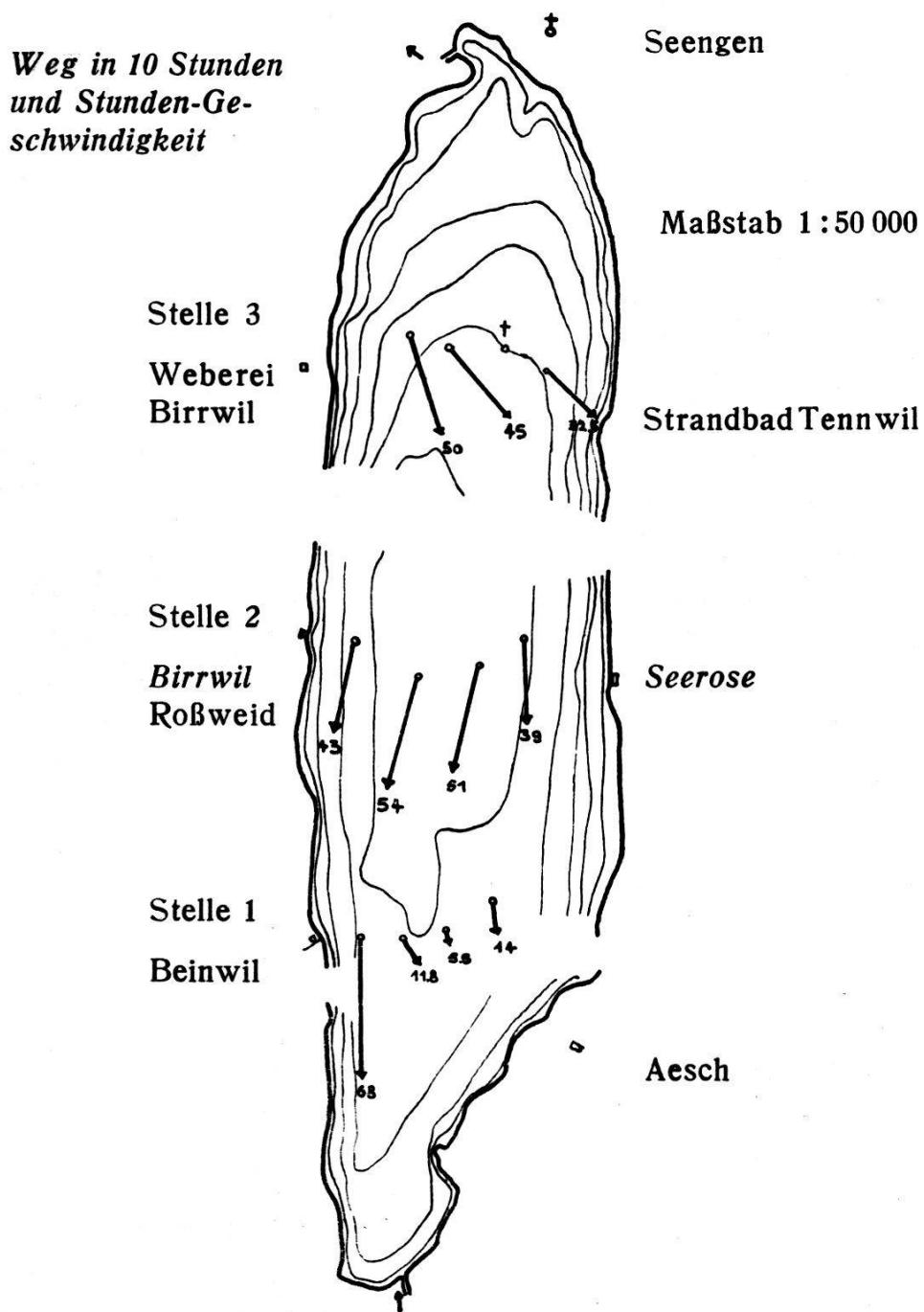
##### *1. Strömungsmessungen an allen drei Stellen (1 bis 3) am 25./26. 6. 42 bei Bise-Lage*

*a) Ziel:* Ermittlung der Strömung in 10 m Tiefe bei konstanter Bise-Lage an drei Stellen des Sees, und zwar in  $\frac{1}{6}$ ,  $\frac{3}{6}$  und  $\frac{5}{6}$  der Seelängsachse.

*b) Ausführung:* An den drei Stellen des Sees wurden nacheinander, angefangen auf der Höhe der Seemitte, Strömungskreuze auf die ganze Seebreite verteilt, in 10 m Tiefe versenkt, Startpunkt und Endpunkt eingemessen und in der Karte Maßstab 1 : 25 000 eingezeichnet. Die genaue Zeit der Start- und Endpunkte der Messungen wurden notiert. Die Verbindung der beiden entsprechenden Punkte ergab die Strömungsrichtung. Auf der nachfolgenden Zeichnung bedeutet der dicke Pfeil den in zehn Stunden zurückgelegten Weg; die angeführte Zahl gibt die Stundengeschwindigkeit an; die Messungen auf den drei verschiedenen Stellen dauerten über 48 aufeinanderfolgende Stunden.

*c) Resultat der Untersuchung:* Aus Fig. 13 ist ersichtlich, daß die Bewegung der Wassermassen in 10 m Tiefe ziemlich genau der momentanen Windrichtung folgt, die während des Tages durch die Kontrolle der Wellenrichtung festgestellt wurde. Die gesamte oberflächliche Wassermasse ist in einheit-

Fig. 13. Strömung in 10 m Tiefe bei konstanter Bise am 25. und 26. 6. 42



licher allgemeiner Richtung in Bewegung und es konnte keine Andeutung einer Horizontalrotationsbewegung bemerkt werden.

*d) Schlußfolgerung:* Das Ergebnis dieser Messung, die nur die 10-m-Tiefenzone erfaßte, führt zwangsläufig zum Schluß, daß der Ausgleich der bewegten Wassermassen nach den tiefen Regionen stattfinden muß.

## 2. Strömungsmessungen am 10. 10. 42 auf Höhe Birrwil—Seerose (Stelle 2) bei Föhn-Lage

a) **Ziel:** Ermittlung der Strömungen in den Tiefen 0, 5, 10, 20 und 30 m auf der Seite Birrwil.

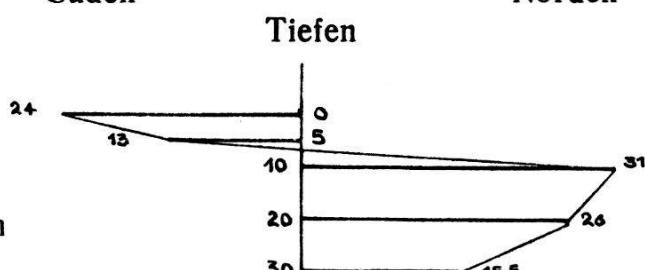
*b) Ausführung:* Während fünf Tagen vor der Messung war mittelstarker Föhn, zur Zeit der Aussetzung der Strömungskreuze setzte leichte Bise ein, welche zirka fünf Stunden lang anhielt und hernach wieder für die restlichen 14 Messungsstunden dem Föhn Platz machte.

Die Kreuze wurden auf einer Linie, parallel zum Seeufer, in verschiedenen Tiefen ausgesetzt, wobei das tiefste zirka 5 m ob Grund schwiebte.

*c) Resultat der Messung:* Weil die Windrichtung während der Versuchszeit um zirka  $180^{\circ}$  gewechselt hatte, war kein eindeutiges Bild der Wassermassenbewegung zu erwarten. Die Messungen zeigten, daß sich die Wassermassen in den verschiedenen Tiefen verschieden schnell und in entgegengesetzter Richtung bewegt hatten.

Fig. 14. Seite Birrwil

Start: 13.00  
Ende: 08.30  
Beobachtungszeit:  
19 Stunden 30 Minuten



Die Zahl am Ende der Treibstrecke, welche im Maßstab 1:20 000 gezeichnet ist, gibt die Stundengeschwindigkeit an.

*d) Schlußfolgerung:* Diese erste Einsicht in die Bewegungen der Tiefen läßt ahnen, daß die Vorgänge im Profil nach der Tiefe mannigfaltiger sind als in Horizontalebene

Die Vermutung, die anhand der Resultate der Strömungsmessungen in 10 m Tiefe an den drei Stellen des Sees geäußert wurde, scheint durch die Beobachtungen dieser Messungen berechtigt gewesen zu sein. Die Ausgleichsströmungen bewegen sich in der geringen Tiefe von zirka 7 m in entgegengesetzter

Richtung zur oberflächlichen Strömungsrichtung. Wenn in Betracht gezogen wird, daß die Strömungskreuze nur die Horizontalkomponente der Strömungsrichtung anzeigen, so kann die beobachtete Strömung mit einer rotierenden Walze verglichen werden.

### 3. Strömungsmessungen am 31. 10. 42 auf Höhe Birrwil—Seerose (Stelle 2) bei Bise-Lage

*a) Ziel:* Ermittlung der Strömungen in den Tiefen 0, 5, 10, 20 und 30 m auf der Birrwiler Seite.

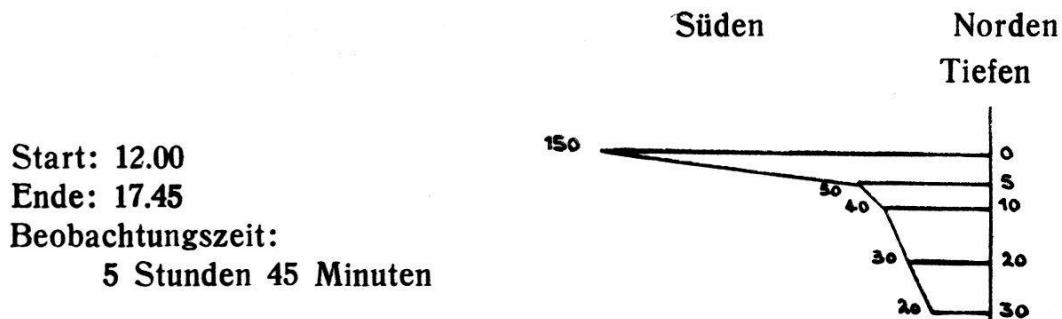
*b) Ausführung:* Diese Messung unterscheidet sich von der vorstehend beschriebenen nur durch die neue Windlage. Während sechs Tagen vor der Messung herrschte mittelstarke Bise. Die Geräte wurden ausgesetzt und während zirka fünf Stunden treiben gelassen.

*c) Resultat der Messung:* Die Geräte bewegten sich alle in gleicher Nord—Süd-Richtung.

An der Oberfläche wurde eine Strömungsgeschwindigkeit von 150 m/h gemessen, die sich in 5 m Tiefe auf  $\frac{1}{3}$  herabsenkte.

Unterhalb 5 m bis 30 m Tiefe stellten wir eine gleichmäßige stetige Abnahme der Geschwindigkeit fest.

Fig. 15. Seite Birrwil



Zahl = Stundengeschwindigkeit. Maßstab = 1 : 20 000

*d) Schlußfolgerung:* Der andauernde Wind vermag die Wassermassen bis auf den Grund in Bewegung zu bringen und es bleibt nur die Frage offen, wo der hydrostatische Ausgleich stattfindet. Die Strömungsmessungen müßten gleichzeitig oder wenigstens bei gleicher Windlage nacheinander auf beiden See-

seiten durchgeführt werden, damit es gelingt, die Ausgleichsströmung zu erfassen.

#### 4. Strömungsmessungen am 7.11.42 auf Höhe Birrwil—Seerose (Stelle 2) bei Föhnlage

a) *Ziel*: Ermittlung der Strömungen in den Tiefen 0, 5, 10, 20 und 30 m auf der Birrwiler- und Seerose-Seite, zur Aufklärung der Ausgleichsströmungen.

b) *Ausführung der Messungen*: Die Strömungsgeräte wurden bei konstantem Föhnwetter auf der Seerose-Seite ausgesetzt, nach zirka vier Stunden Beobachtungszeit eingezogen, auf der Birrwiler-Seite ausgesetzt und hier zirka drei Stunden beobachtet. Während den Messungen setzte für Minuten die Bise ein und vermochte möglicherweise das eindeutige Resultat etwas zu stören.

Fig. 16. Seite Birrwil

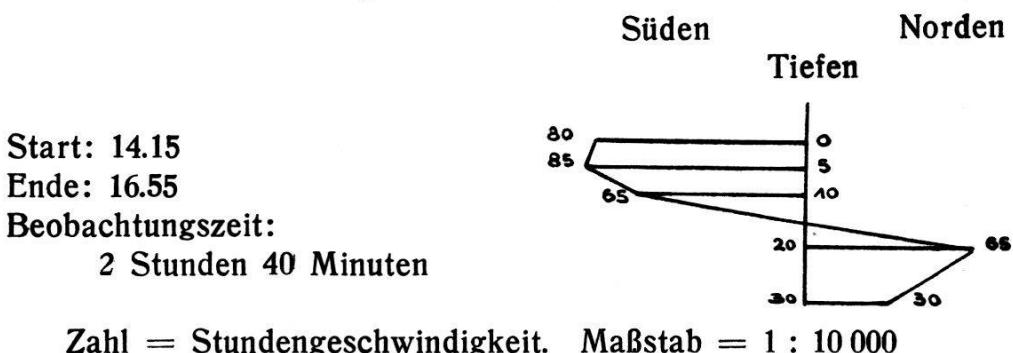
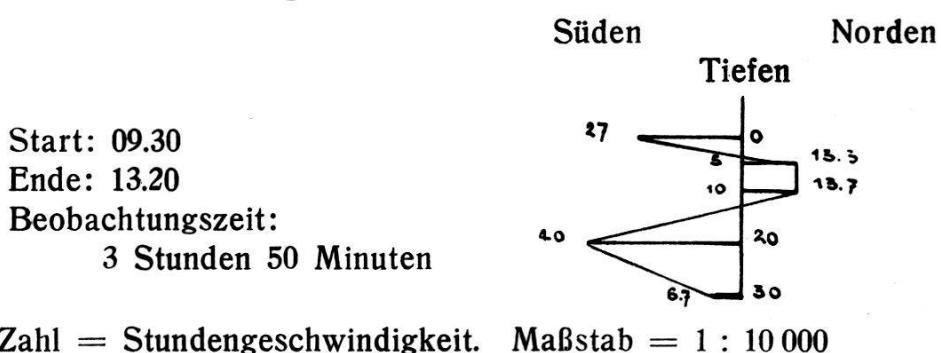


Fig. 17. Seite Seerose



c) *Resultat der Messungen*: Beim Vergleich der beiderseitigen entsprechenden Strömungsrichtungen fällt auf, daß sie einander entgegengesetzt sind. Zwei Rotationsbewegungen sind ein-

ander überlagert, welche die Wassermassen in entgegengesetzter Richtung bewegen. Die Drehebene liegt zwischen 10 m und 20 m Tiefe.

*d) Schlußfolgerung:* Diese Messungen geben einen Anhaltspunkt, wie man sich den hydrostatischen Ausgleich der Wassermassen im See vorzustellen hat. Analoge Messungen bei Bise-Lage sollen das Bild erweitern.

## 5. Strömungsmessungen am 13./14. 11. 42 auf Höhe Birrwil—Seerose (Stelle 2) bei Bise-Lage

a) **Ziel:** Aufklärung des hydrostatischen Ausgleichs durch Messung der Strömungen in den Tiefen 0, 5, 10, 20 und 30 m auf der Birrwiler- und Seerose-Seite bei Bise-Lage.

*b) Ausführung der Messungen:* Wie beim vorangegangenen Versuch 4 mit dem Unterschied, daß die Beobachtungszeit nur  $1\frac{1}{4}$  und  $2\frac{1}{2}$  Stunden dauerte. Die Bise war gleichmäßig stark.

c) *Resultat:* Das Strömungsbild auf der Seite Birrwil ist dasselbe, wie es schon der Versuch 3 bei Bise gezeigt hat; einheitliche Bewegungsrichtung der gesamten Wassermassen mit abgestuften Stundengeschwindigkeiten. Erstaunlicherweise zeigen aber auch hier Seerose-Strömungsbilder auffallende Ähnlichkeit wie bei Föhn-Lage, mit dem Unterschied, daß bei Bise-Lage die Strömungsrichtung nach der Tiefe, von der Oberfläche zum Grund, viermal die Richtung wechselt, statt nur dreimal wie bei Föhn-Lage.

Fig. 18. Seite Birrwil

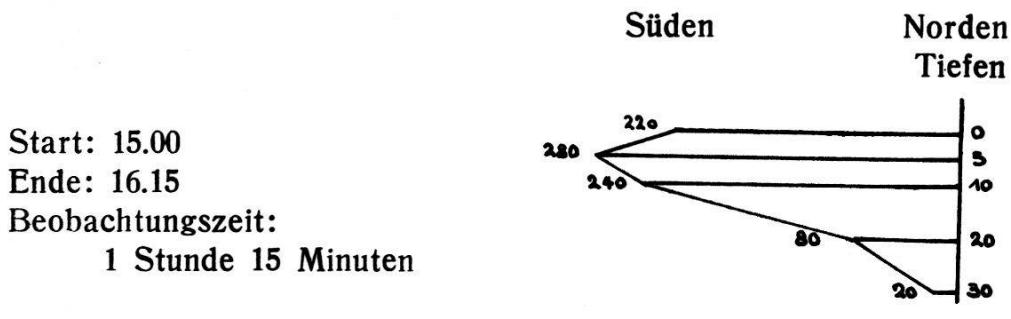
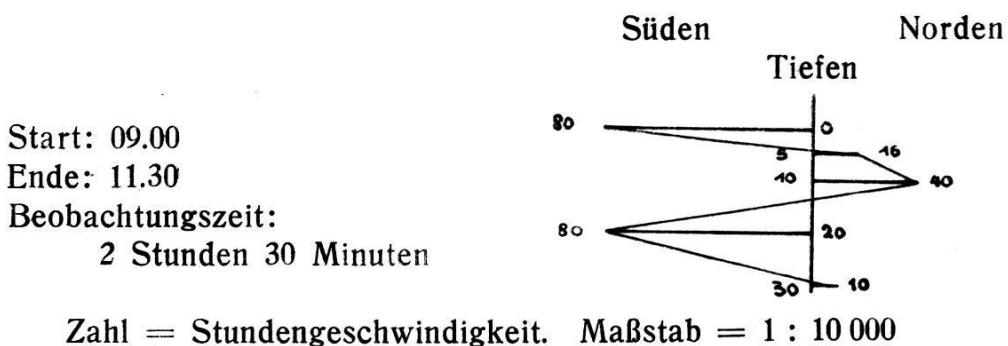


Fig. 19. Seite Seerose



d) *Schlußfolgerung:* Die Strömungsverhältnisse nach der Tiefe liegen bei Bise-Lage nicht so eindeutig, wie sie bei Föhn gemessen werden konnten. Die Bise greift auf der linken Seeseite die Wassermasse so entschieden an, daß hier keine Ausgleichsströmungen aufkommen können. Auf der rechten Seeseite dagegen kämpfen direkte windbedingte Strömungen mit Ausgleichsströmungen um den Vorrang.

### G. Praktisches Ergebnis der Strömungsmessungen

Ganz allgemein ist festzuhalten, daß auch bei nur geringen Windgeschwindigkeiten verhältnismäßig große Kräfte im Spiele sind, welche erhebliche Wassermassen in Bewegung bringen können. Diese Bewegung teilt sich infolge der ausgesprochen wattenförmigen Gestaltung des Seebettens der gesamten Wassermasse des Sees mit. Aus der Messung 1 ist deutlich ersichtlich, daß sich bei irgendeiner Windrichtung die gesamte Seeoberfläche in gleicher allgemeiner Richtung in Bewegung setzt. Unter dieser Oberfläche finden hydrostatisch bedingte Ausgleichsströmungen statt. Die Strömungsmessungen 3 und 4 haben die Existenz dieser Ausgleichsströmungen bewiesen, während natürlich ihr Verlauf bei anderen als den beobachteten Windrichtungen nicht ermittelt werden konnte. Zur einwandfreien Festlegung wären sehr viele Meßgeräte notwendig, die zur gleichen Zeit ausgesetzt und ständig kontrolliert würden. Zweifellos würde eine Sammlung von Strömungsbahnen entstehen, die für die verschiedensten Wetterlagen charakteristisch wären. Es gelang festzustellen, daß sowohl die oberflächlichen als auch die tiefer liegenden Wassermassen von Windströmun-

gen in ganz bestimmt gerichtete Bewegungen gezwungen werden. Es ist unwahrscheinlich, daß der See infolge seiner mit der geographischen Lage verbundenen Empfindlichkeit gegenüber den Winden Eigenströmungen meßbarer Größe, die auf das Gesamtströmungsgeschehen einwirken, aufweist. Die oft von Fischern beobachteten lokalen Strömungen sind vermutlich Ausgleichsströmungen, die zufolge Bodenbeschaffenheit und Winddruck die mannigfältigsten Wege einschlagen können.

## 7. Der Chemismus des Sees

### A. Allgemeines

Es besteht kein Zweifel, daß das Seewasser als Nährlösung und Lebensraum für die Art und Ausdehnung der Biozoenose bestimmend ist. Alle Organismen entziehen dem Wasser Nährstoffe und geben ihre Stoffwechselprodukte wieder ins Wasser ab. Mit Hilfe der exakten chemischen Analyse können Veränderungen im Lebensraum quantitativ ermittelt und als Ursache für Umstellungen in der Planktonwelt gedeutet werden. Es besteht somit eine Wechselbeziehung zwischen Lebewelt und Lebensraum. Die Herkunft der gelösten Stoffe im Seewasser ist mannigfach. Durch die Zuflüsse, aus der Atmosphäre, aus dem Boden oder aus dem Stoffwechsel der Organismen gelangen sie in den See. In den oberen, gut belichteten trophogenen Schichten führen die Lebensvorgänge zu einem Verbrauch an Nährstoffen, während in den lichtlosen Tiefen, den tropholytischen Schichten des Sees ein Gedeihen höherer, insbesondere assimilierender Pflanzen unmöglich ist. Hier finden der autolytische und der bakterielle Abbau der organischen Stoffe statt. Der Gehalt des Wassers an gelösten Nährstoffen erlaubt eine maßgebende Beurteilung eines Gewässers.

Vielfach herrscht ein arges Mißverhältnis zwischen der Zusammensetzung der Nährlösung und den Ansprüchen der Organismenwelt. Einzelne Ionen sind im Überfluß vorhanden, wie

z. B. Kalzium- und Bikarbonat-Ion, während andere, z. B. Phosphat und Nitrat in viel kleineren Mengen und damit als sogenannte Minimumstoffe im Sinne *Liebigs* auftreten können. Die Organismen haben aber vom Überfluß der einen Stoffe keinen Nutzen, wenn sie an andern Mangel leiden. Die Produktion ist also jeweils abhängig von demjenigen Nährstoff, der in der geringsten Menge vorhanden ist. Dieses «Gesetz» vom Minimum wurde von *Justus Liebig* formuliert, und weil es für die Mehrzahl der Lebensfunktionen und Umweltbedingungen Gültigkeit hat, zum «Gesetz der begrenzenden Faktoren» erweitert. Im Seewasser müssen wir die begrenzenden Faktoren unter den Ionen suchen, die als Minimumnährstoffe jeweils in der geringsten Menge vorhanden sind.

Die Organismen entziehen dem Wasser diese Minimumstoffe in der trophogenen Schicht oft bis zur analytischen Nachweisbarkeitsgrenze. Erneute Zufuhr kann durch Zuflüsse erfolgen oder bei der Durchmischung der Wassermassen der tropholytischen Schicht, wohin nach dem Abbau der sedimentierten organischen Substanz die regenerierten Nährstoffe geliefert worden sind. Zwischen dem Ausmaß der Zufuhr des begrenzenden Nährstoffes und dem Wachstum bzw. der Vermehrung der Organismen herrscht ein dynamisches Gleichgewicht. Die Erfassung der Zusammenhänge zwischen dem Chemismus des Lebensraumes, wie ihn der See darstellt, und dem Stoffwechsel seiner Lebensgemeinschaft, waren für uns ebenso wichtig, wie die Verteilung der am Auf- und Abbau beteiligten Stoffe quantitativ zu ermitteln. Diejenigen gelösten Stoffe, die nicht direkt an den biochemischen Vorgängen beteiligt sind, können über primäre Verunreinigung des Sees Aufschluß geben. Wenn auch die zeitliche Verfolgung eines Stoffes kein abschließendes Urteil über den Zustand des Gewässers erlaubt, so gibt sie doch im Rahmen des gesamten Chemismus ein Bild des Eutrophierungszustandes und muß deshalb als entscheidendes Glied in die Kette der Beurteilungsfaktoren eingefügt werden.

Zum Fassen von Wasserproben wurde die Seemitte, Birrwil—Seerose, Stelle 2, mit der größten Tiefe gewählt. Die Proben wurden viermal im Verlaufe des Jahres 1941/42 gefaßt. Die zehn Liter Wasser umfassenden Proben wurden sofort mit

Toluol überschichtet. Die Analysenmethoden werden bei der Detailbeschreibung der hier nur erwähnten Untersuchungen angeführt.

Unsere Untersuchungen erstrecken sich auf folgende Stoffe und Werte:

- |                              |                                 |
|------------------------------|---------------------------------|
| 1. Trockenrückstand          | 10. Nitrat-Ion                  |
| 2. Glühverlust               | 11. Nitrit-Ion                  |
| 3. Elektrische Leitfähigkeit | 12. Ammoniak $\text{NH}_4$ -Ion |
| 4. pH                        | 13. Aminosäuren                 |
| 5. Permanganatverbrauch      | 14. Chlorid-Ion                 |
| 6. Härte                     | 15. Phosphat-Ion                |
| 7. Kalium-Ion                | 16. Sulfat-Ion                  |
| 8. Eisen-Ion                 | 17. Schwefelwasserstoff         |
| 9. Mangan-Ion                | 18. Kieselsäure                 |

Die Analysen wurden entweder vom Originalwasser oder vom eingeengten Seewasser, wobei 5 l Wasser auf 100 cm<sup>3</sup> eingeengt wurden, ausgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der hier verwendeten Analysenmethoden findet sich in der *Helvetica Chimica Acta* Vol. XVIII fasc. I, II und IV 1934/35, welche von *H.F. Kuisel*<sup>34</sup> unter dem Titel «Neue Methoden in der Wasseranalyse» veröffentlicht wurden.

Die Analysen wurden im chemischen Laboratorium der Beratungsstelle für Abwasserreinigung und Trinkwasserversorgung, welches dem Hygiene-Institut der ETH angegliedert ist, unter Leitung von *H.F. Kuisel* durchgeführt. Bei diesen, sowie weiteren Arbeiten hat Laborant *Rolf Brunner* mitgewirkt.

Bei dieser Gelegenheit sei den beiden Herren für ihre wertvolle Mithilfe bestens gedankt.

## B. Resultate und Diskussion der chemischen Seewasseranalysen

### 1. Trockenrückstand

Bestimmungsmethode: 300 cm<sup>3</sup> durch D<sub>1</sub>-Tiegel der Berliner Porzellanmanufaktur (Porengröße zirka 0,6  $\mu$ ) filtriertes Seewasser werden auf dem Wasserbad eingedampft. Die Plattschale wird bei 105 °C eine Stunde im Trockenschrank ge-

lassen. Nach Abkühlen erfolgt das Wägen und Umrechnen des Resultates auf einen Liter.

Im Trockenrückstand sind alle im Wasser echt gelösten Substanzen enthalten. Die Filtration verhindert die Einbeziehung der beim Stoffwechsel inkarnierten anorganischen und organischen Stoffe bis hinunter zur Bakteriengröße. Der Großteil der mineralischen Stoffe ist aber mit dem biozoenotischen Stoffwechsel nicht unmittelbar im Zusammenhang, weshalb keine ausgesprochene Beeinflussung zu erwarten ist.

Tabelle 22

Tiefe	Trockenrückstand mg/l										m
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
11. 10. 41	164	—	127	199	205	—	—	210	—	—	—
10. 1. 42	—	182	—	—	182	—	189	—	—	—	205
20. 3. 42	190	—	180	—	—	185	—	—	—	—	235
24. 9. 42	140	—	135	—	—	195	—	—	—	—	205

Unsere Untersuchungsresultate zeigen allgemein Zunahme des Trockenrückstandes gegen den Grund, wo 205—235 mg/l gewogen wurden, während an der Oberfläche 140—190 mg/l festgestellt wurden.

Soweit Schlüsse zu ziehen berechtigt ist, kann eine gewisse Periodizität konstatiert werden, indem die maximalen Werte zu Beginn, geringere Werte am Ende der Sommerstagnation in allen Meßtiefen beobachtet werden.

Für den Zürichsee wurden nach der Publikation des *Hygiene-Institutes der ETH*<sup>35</sup> Schwankungen von 140—240 mg/l festgestellt. Der höchste Wert von 247 mg/l wurde im Mai 1931 gemessen. Allerdings sind die Werte über 200 mg/l selten.

## 2. Der Glühverlust

**Bestimmung:** Die Platinschale wird nach dem Wägen des Trockenrückstandes mit Hilfe des Pilzaufsatzen über der Heintzbrennerflamme während zirka fünf Minuten bis zur schwachen Rotglut erhitzt und nach dem Abkühlen 30 cm<sup>3</sup> kohlensäuregesättigtes Wasser zugegeben und dieses auf dem Wasserbad wieder eingedampft. Diese Prozedur, die die Regenerierung der Karbonate bezieht, wird noch zweimal wiederholt, dann 20

Minuten bei  $105^{\circ}\text{C}$  und eine halbe Stunde bei  $150^{\circ}$  getrocknet. Abkühlen, Wägen und Berechnen wie beim Trockenrückstand.

Der Glühverlust eines Seewassers stellt in der Hauptsache die organischen Stoffe dar. Natürlich wird nicht nur der verbrannte organische Kohlenstoff angezeigt, sondern auch die Zersetzung und Verflüchtigung von anorganischen Verbindungen wie Nitrate und Chloride (Eisenchlorid) verursacht namhafte Verluste.

Tabelle 23

Tiefe	Glühverlust mg/l									
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45 m
11. 10. 41	45	—	39	38	46	—	—	43	—	—
10. 1. 42	—	42	—	—	—	—	46	—	—	41
20. 3. 42	51	—	45	—	—	44	—	—	—	74
24. 9. 42	15	—	40	—	—	45	—	—	—	50

Die ermittelten Glühverluste schwankten im großen und ganzen zwischen 40—50 mg/l, doch traten beträchtliche Extreme auf. Den Minimalwert von 15 mg/l konnten wir in 1 m Tiefe beobachten, während der Maximalwert von 74 mg/l in der Tiefe von 45 m direkt über dem Grund festgestellt wurde.

Bei Beginn der Sommerstagnation stellten wir in 1 m Tiefe 51 mg/l Glühverlust fest; dieser Wert verringerte sich auf 44 mg/l in 25 m Tiefe, um über Grund den maximal gemessenen Wert von 74 mg/l zu erreichen. Am Ende der Sommerstagnation, am 24. 9. 42 haben wir in 1 m Tiefe den minimalen Wert von 15 mg/l gemessen, der in 10 m schon 40 mg/l erreicht hatte und bis zum Grunde weiter anstieg bis 50 mg/l.

Zu besonderen Schlüssen geben diese Werte keinen Anlaß, denn es ist natürlich, daß nach der Herbst- und Frühlingsvollzirkulation die Wassermassen maximal durchmischt und für die Vegetation die optimalen Bedingungen geschaffen sind.

Die mittleren Werte von 40—50 mg/l Glühverlust allerdings sind es, die zu beachten sind, wenn Werte aus dem Zürichsee der Jahre 1929/33, die mit 8 und 10 mg/l angegeben sind, den unsrigen gegenübergestellt werden. Der organische Anteil der gelösten Stoffe muß demnach im Hallwilersee wesentlich höher sein als im Zürichsee.

### 3. Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit kann nur Hinweise geben auf den Ionengehalt eines Gewässers und erlangt als Kontrollmethode bei Wasseruntersuchungen seine Bedeutung. Sie stellt eine gute und rasch auszuführende Ergänzung der Werte für Trockenrückstände für Seewasser dar.

Tabelle 24

#### Elektrische Leitfähigkeit $\text{m}^{-1} \text{cm}^{-1} \cdot 10^{-6}$

Tiefe	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	m
10. 1. 42	—	344	—	—	334	—	334	—	—	—	356
20. 3. 42	253	—	256	—	—	247	—	—	—	—	310
24. 9. 42	253	—	241	—	—	329	—	—	—	—	366

Allgemein nahm die Leitfähigkeit gegen den Grund hin zu, was bei der gleichzeitigen Zunahme des Trockenrückstandes leicht erklärlich ist.

### 4. Die Wasserstoffionenkonzentration (pH)

Bestimmung mit Hilfe des Komparators nach Hellige mit den zugehörigen Indikatoren wie Phenolphthalein, Phenolrot und Bromthymolblau.

Die Reaktion des Wassers wird, wie schon bei der Besprechung der Kohlensäureaggressivität erwähnt, durch die bei der Dissoziation von  $\text{H}_2\text{CO}_3$  entstandenen H-Ionen und der von der Hydrolyse des Bikarbonates stammenden OH-Ionen bedingt. Aciditätsschwankungen in dem vorhandenen Karbonat-Kohlensäuregemisch sind der Pufferwirkung wegen gering. Saure und alkalische Verunreinigungen haben auf die Acidität geringen Einfluß. Der Pufferungsgrad entscheidet über das Ausmaß und den Bereich der in den Gewässern vorkommenden pH-Schwankungen. Da der Neutralpunkt innerhalb der Lebewelt eine scharfe Scheidung bewirkt, in dem Sinne, daß viele Arten entweder nur im alkalischen oder nur im sauren Bereich gedeihen, wird die Acidität zu einem maßgebenden Faktor für die Zusammensetzung der Biozönose.

Die mit der Assimilation verknüpften Vorgänge,  $\text{CO}_2$ -Verbrauch, eventuell Bikarbonatverbrauch und Abspaltung von

OH-Ionen, und die entgegengesetzten Vorgänge der pflanzlichen und tierischen Atmung beeinflussen die Acidität, sodaß wir in deren Bestimmung einen Anhaltspunkt für biologische Vorgänge erhalten.

Tiefe	Wasserstoffionenkonzentration (pH)									
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45 m
20. 3. 42	7,75	—	7,75	—	—	7,6	—	—	—	7,1 mg
24. 9. 42	8,2	—	8,2	—	—	7,4	—	—	—	7,35

Im Hallwilersee stellten wir im März zu Beginn der Sommerstagnation im Epilimnion einen pH-Wert von 7,75 und im oberen Hypolimnion in der Tiefe 25 m 7,6 und über dem Grunde noch 7,1 mg/l fest. Im Verlaufe der Sommerstagnation war in der trophogenen Zone infolge der intensiven Assimilationstätigkeit, die dem Wasser alle freie Kohlensäure und eventuell zusätzlich Bikarbonationen entzog, der pH auf 8,2 angestiegen. Im Hypolimnion in der Tiefe 25 m war er auf 7,4 gesunken und über dem Grunde auf 7,35 angestiegen.

Für den Bodensee haben *J. Elster* und *W. Einsele*<sup>36</sup> folgendes zu melden: «Kurz vor der Vollzirkulation bewegte sich der pH-Wert auf dem ganzen Vertikalprofil zwischen 8,0 und 8,1. Im Verlaufe des Sommers stieg er in 0 bis 5 m bis auf 8,4 an, in 15 m und 20 m waren die Änderungen gering. In den Schichten unterhalb 30 m lagen die Werte im Sommer unerheblich niedriger als die Werte des ganzen Vertikalprofils nach der Vollzirkulation. In 20 bis 30 m wurden mehrfach pH-Minima gefunden.»

##### 5. Permanganatverbrauch

Bestimmung nach der Methode von *Kubel-Tiemann*:<sup>37</sup>

Der Gehalt des Wassers an organischer Substanz wird indirekt durch die Oxydierbarkeit mit Kaliumpermanganat ermittelt. Vorausgesetzt, daß die Analysen unter den gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt wurden, können die Resultate wertvolle Anhaltspunkte über den Zustand des untersuchten Wassers liefern, andernfalls läßt die Oxydierbarkeit der verschiedenenartigen, vielfach unbekannten Stoffe keinen eindeutigen Schluß zu. Auch anorganische Stoffe, z. B. Ferroverbindungen und Schwefelwasserstoff, werden oxydiert.

Tabelle 26

Permanganatverbrauch mg/l

Tiefe	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	m
11. 10. 41	11,7	—	10,4	9,2	8,2	—	—	7,6	—	—	—
10. 1. 42	—	10,7	—	—	10,1	—	10,7	—	—	—	10,7
20. 3. 42	9,8	—	9,5	—	—	9,6	—	—	—	—	10,1
24. 9. 42	10,7	—	11,7	—	—	11,0	—	—	—	—	12,3

Zu Beginn der Sommerstagnation fanden wir im Epilimnion Werte von 9,5—9,8 mg/l, ebenfalls im oberen Hypolimnion, während über dem Grunde mit 10,1 mg/l ein leichter Anstieg konstatiert wurde. Die Werte können füglich als ausgeglichen taxiert werden. Am Ende der Sommerstagnation war der Permanganatverbrauch um 1—2 mg/l höher. Im Epilimnion stellten wir 10,7 und 11,7 mg/l in der Tiefe 25 m, und über dem Grunde den maximalen Wert von 12,3 mg/l fest. Eine frühere Messung vom 11. 10. 41 lieferte höhere Werte im Epilimnion (11,7, 10,4 und 9,2 mg/l) und niedrigere (8,2 und 7,6 mg/l) im Hypolimnion.

Vollständig ausgeglichen waren die Resultate der Analysen vom 10. Januar 1941 mit 10,1—10,7 mg/l. Wir halten fest, daß während der Sommerstagnation beträchtliche Mengen organischer Stoffe ins Wasser gelangen, die den Nährgehalt erhöhen und einer erhöhten Produktion rufen.

Aus dem Gutachten von *A. Brutschy* und *A. Güntert*<sup>8</sup> über den Rückgang des Fischbestandes im Hallwilersee, entnehmen wir Werte für die ermittelte organische Substanz aus den Jahren 1917 und 1918. Die Werte für organische Substanz wurden früher durch Multiplikation des Permanganatverbrauches mit 5 errechnet. Diese Werte sind vorsichtig zu deuten, da der Permanganatverbrauch je nach Versuchsbedingungen variiert.

Wir haben die Werte für organische Substanz des erwähnten Gutachtens durch 5 dividiert und erhalten so den Permanganatverbrauch in mg/l. Die Werte für den Permanganatverbrauch, welche die Oxydierbarkeit des Wassers darstellen, bewegen sich mit einigen Ausnahmen zwischen 5,5 und 10 mg/l. Auffällig ist, daß im März 1919 in allen Tiefen 7,9 mg/l gemessen wurden. Im Gegensatz dazu trat im August des selben Jahres eine deutliche Schichtung auf. In 0 m Tiefe wurden 5,5 mg/l, in

20 m 10 mg/l und in der Tiefe 44 m 8,5 mg/l Permanganatverbrauch gemessen. Im August des Vorjahres (1918) wurde ebenfalls in 20 m Tiefe ein bemerkenswertes Maximum von 14 mg/l Permanganat gefunden, welches auf die Anwesenheit von *Oscillatoria rubescens* zurückgeführt wird. Die heutigen Verhältnisse sind im Vergleich zu diesem Gutachten insofern verschieden, als in den Jahren 1918/19 im Verlaufe der Sommerstagnation hauptsächlich ein großer Wert in 20 m Tiefe ausgebildet wurde, der Durchschnittswert aber eher geringer war als derjenige zu Beginn der Sommerstagnation. Unsere Messungen zeigten aber, daß im Verlaufe der Sommerstagnation die Oxydierbarkeit des Wassers um zirka 5 % anstieg und sich im Herbst um zirka 25 % höher stellte als vor 23 Jahren. Wenn die Werte des Gutachtens *Brutschy* und *Güntert* überhaupt mit unseren eigenen Werten verglichen werden dürfen, so haben wir in der «Oxydierbarkeit» ein brauchbares Mittel, um die seitherige Anreicherung des Sees mit organischen Stoffen zum Ausdruck zu bringen.

#### 6. Härte

a) Die Karbonathärte wurde mit  $1/10$  n HCL gegen Methylorange titriert.

Die Unterschiede und Schwankungen der Karbonathärte wurden eingehend im Kapitel «Kohlensäure und Karbonathärte» beschrieben.

b) Die Gesamthärte wurde nach der Methode von Blacher mit  $1/10$  n Palmitat bestimmt. Die Werte der Gesamthärte weichen nie mehr als  $1/2$  französisches Härtegrad von den Werten für die Karbonathärte ab, worüber ebenfalls im Kapitel «Kohlensäure und Karbonathärte» eingehend berichtet wird.

Tabelle 27

Gesamthärte in frz. H°

Tiefe	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	m
11. 10. 41	13,5	—	13,75	17,25	17,25	—	—	18,0	—	—	
10. 1. 42	—	16,0	—	—	16,0	—	16,0	—	—	17,75	
20. 3. 42	16,75	—	16,0	—	—	16,5	—	—	—	19,80	
24. 9. 42	11,0	—	10,5	—	—	16,5	—	—	—	18,50	

Der Vergleich dieser Werte mit Tabelle 18 für die Karbonathärte zeigt deutlich, daß die beiden Härten nach der Tiefe und nach der Seezeit konform verlaufen.

*c) Die Bedeutung der Härte.*

Die Karbonathärte bedingt die kohlensäurebindende Substanz und ermöglicht damit dem Phytoplankton die Assimilation der Kohlensäure.

Die zur permanenten Härte gehörenden Sulfate dagegen sind in ihrer Bedeutung für das Seegeschehen noch nicht erforscht. Über ihr mengenmäßiges Auftreten wird später berichtet. Die Rolle des Kalziumions, welches 90 % der Härte ausmacht, also von 40—75 mg/l schwankt, ist ebenfalls in seiner biologischen Bedeutung noch nicht bekannt.

Die neben der Härtebestimmung durchgeführte Kalziumbestimmung wurde aus diesem Grunde hier nicht angeführt, sie dient lediglich als Kontrolle.

Dem Magnesiumion kommt als Bestandteil des Chlorophylls im Seegeschehen eine erhebliche Bedeutung zu. Im Anschluß an die oben erwähnten Ca-Bestimmungen führen wir diejenigen des Magnesiums durch, über welche wir generell folgendes berichten:

*Tabelle 28*

Tiefe	Magnesium mg/l									
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45 m
10. 1. 42	—	6,38	—	—	4,2	—	4,26	—	—	6,48
20. 3. 42	8,57	—	3,65	—	—	8,3	—	—	—	6,88

Unsere Resultate zeigen, daß Magnesium in Mengen von 3,65—8,57 mg/l im Seewasser vorhanden war. Der Magnesiumschwund der Probe vom 20. 3. 42 in der Sprungschicht ist wahrscheinlich biologisch bedingt. Merkwürdigerweise finden wir auch an der Oberfläche, 1—5 m Tiefe, maximale Werte oder doch Werte wie sie auch über dem Grund gefunden werden. Zu dem gelösten und biogen gebundenen Magnesium im Seewasser kommen ständig Zuschüsse durch den Detritus der Landpflanzen, durch die Abfallstoffe der Pflanzenfresser.

Die Magnesiumbefunde im *Zürichsee*<sup>35</sup> schwanken zwischen einem Minimum von 3,5 mg/l Magnesium im Obersee

(24. 10. 30) an der Oberfläche und einem Maximum von 10,7 mg/l (24. 7. 31) ob Grund.

### 7. Kalium

Bestimmung: Das Kaliumion wird mit Natriumkobaltihexanitrit als Komplexsalz gefällt und der Niederschlag mit Kaliumpermanganat titriert. Dazu werden 20 cm<sup>3</sup> eingeengtes Seewasser gebraucht.

Tabelle 29

Tiefe	Kalium mg/l										m
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
11. 10. 41	3,65	—	—	4,22	3,94	—	—	3,54	—	—	—
10. 1. 42	—	2,96	—	—	2,5	—	2,66	—	—	—	2,55
20. 3. 42	3,19	—	3,54	—	—	3,0	—	—	—	—	4,2

Das Kalium gilt als Aufbaustoff für das Protoplasma und sollte für die Produktion begrenzenden Charakter haben. Unsere Untersuchungen lieferten uns Kaliumwerte von 2,55 bis 4,22 mg/l. Die Schwankungen zwischen Frühlings- und Herbstwerten als biologisch gesetzmäßiges Verhalten zu deuten, wäre zu gewagt. Eine eindeutige Beziehung zwischen den Kaliumwerten und den biologischen Vorgängen ist nicht feststellbar.

Kuisel<sup>34</sup> fand im Zürichsee in den Jahren 1930—1932 Kaliumwerte von 0,7 bis 2,7 mg/l. Der Mittelwert würde sich um 1,0 mg/l bewegen. Die Umsetzungen an Kaliumion sind auch im Zürichsee gering, sodaß die Funktionen dieses wichtigen Aufbaustoffes zurzeit nicht klar liegen. Offenbar genügen sehr geringe Mengen dieses Stoffes, um der gestellten Aufgabe zu genügen.

### 8. Eisen

Bestimmung: Das Eisenion wird als Ferrirhodanat im Essigesterauszug gegen Standardlösung kolorimetriert.

Analysensubstanz: 5 cm<sup>3</sup> eingeengtes Seewasser.

Das Eisen ist ein lebensnotwendiger Aufbaustoff und muß infolgedessen als Stoffwechsellement vorhanden sein. Es hat auch besondere Bedeutung für eine gewisse Organismengruppe, welche in sauerstoffarmen Tiefen lebt.

Das Eisen ist bei Sauerstofffreiheit des Wassers als Ferrobikarbonat gelöst und geht in alkalischer Lösung bei Gegenwart von Sauerstoff unter  $\text{CO}_2$ -Abgabe in dreiwertiges Ferrihydroxyd über, das ausfällt, aber im sauerstoffärmeren Wasser wieder reduziert und bei Anwesenheit von Kohlensäure in Ferrobikarbonat übergeführt wird.

Die Höhe der vorhandenen Kohlensäure reguliert die Konzentration der Schwermetallionen, wobei festzuhalten ist, daß der Kalkgehalt, der Kohlensäuregehalt und die Assimilationsintensität dabei die ausschlaggebende Rolle spielt.

Ist in kalkreichem und sauerstofffreiem Wasser Schwefelwasserstoff vorhanden, was meistens der Fall ist, so wird das Ferroion als Sulfid ausgefällt und gelangt, solange die Acidität nicht unter den Neutralpunkt sinkt, nicht mehr in Lösung. Eine Verarmung an Eisen müßte die Folge davon sein. Diese Verhältnisse hat *W. Ohle*<sup>38</sup> in Versuchen mit kalkreichem und kalkfreiem Wasser und Schlamm durchgeführt und weist auf das hohe Adsorptionsvermögen des Ferrihydroxydes im Stadium der Fällung für Phosphat, Nitrat und Ammoniak hin. Unsere Bestimmungen lieferten die in nachstehender Tabelle aufgeführten Werte:

Tabelle 30

Tiefe	Eisen mg/l									
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45 m
10. 1. 42	—	0,002	—	—	0,0035	—	0,0035	—	—	0,003
20. 3. 42	0,002	—	0,02	—	—	0,03	—	—	—	0,04

Es bliebe weitern Untersuchungen vorbehalten, abzuklären, ob dieses Element nicht als Minimumstoff auftreten könnte.

Zu *Beginn* der Sommerstagnation fanden wir in 1 m Tiefe den geringsten Wert von 0,002 mg/l und in der Tiefe 45 m den höchsten Wert von 0,04 mg/l, während wir am *Ende* der Sommerstagnation ungefähr zehnmal geringere Werte vorfanden, wiederum das Minimum an der Oberfläche, dann aber ziemlich ausgeglichene Werte bis zum Grunde.

### 9. Mangan

Bestimmung: Mit Perjodat und Tetramethyldiaminodiphenylmethan nach *J. Tillmans* und *Mildner*<sup>39</sup>.

Das Mangan wird mit Perjodat in Braunstein übergeführt, welches in essigsaurer Lösung mit Tetramethyldiaminodiphenylmethan einen blauen Farbstoff liefert, der kolorimetriert wird.

Das Mangan gleicht in bezug auf Vorkommen und chemische Eigenschaften dem besprochenen Eisen. Wie dieses, steht es in engster Beziehung mit Kohlensäure- und Sauerstoffhaushalt. Hinsichtlich Ausfällung als Sulfid in sauerstofffreiem, alkalischem Wasser stellt es sich in Gegensatz zum Eisen, indem wiederum *W. Ohle's* Lösungsversuche zeigten, daß der Mangangehalt konstant bleibt und kein Mangansulfid ausgefällt wird. Ein Aciditätsumschwung würde aber die Umkehrung der Verhältnisse zur Folge haben, wenn nicht Humuskolloide das Mangan auch bei einem pH wenig unter 7 in Lösung halten würden. *W. Ohle* verallgemeinert, indem er aussagt, daß der Quotient  $\frac{\text{Fe}}{\text{Mn}}$  unter anaeroben Verhältnissen in kalkreichem Wasser  $< 1$  und in kalkarmen Gewässern  $> 1$  sein müßte.

Bei fortschreitender Eutrophierung würde der Eisengehalt des Sees ständig abnehmen, und der Schlamm würde nach Ausscheiden des Eisens aus dem Stoffkreislauf nicht mehr schwarz, sondern bräunlich werden.

Die durchgeföhrten Analysen zeigten Werte von 0 bis 1,0 mg/l.

Tabelle 31

Tiefe	Mangan mg/l									
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45 m
11. 10. 41	0	0	0	0	0	—	—	0,1	—	—
10. 1. 42	—	0	—	—	0	—	0,2	—	—	0,04
20. 3. 42	0	—	0	—	—	Spur	—	—	—	1,0

Allgemein kann nur eine Zunahme gegen den Grund des Sees hin konstatiert werden. An der Oberfläche konnte durchgehend kein Mangan gefunden werden, während wir z. B. zu Beginn der Sommerstagnation in der Tiefe 45 m den Wert 1,0 mg/l gemessen haben.

#### 10. Nitrat

Bestimmung des Nitrations mit Phenoldisulfosäure in Anlehnung an die Methode von *Grandval* und *Lajoux*.

Dazu wurden 75 cm<sup>3</sup> Originalseewasser durch D<sub>1</sub>-Tiegel der Berliner Porzellanmanufaktur filtriert und in die Analyse genommen.

Das Nitrat im Seewasser entsteht bei Gegenwart von Sauerstoff durch nitrifizierende Bakterien aus dem bei Verwesung von pflanzlichen und tierischen Eiweißstoffen und Harnstoff entstandenen Ammoniak. Im Boden werden erhebliche Mengen von elementarem Stickstoff durch die Tätigkeit der Stickstoffassimilierenden Bakterien gebunden und dem pflanzlichen Stoffwechsel nutzbar gemacht. Der Stickstoff ist bekanntlich der wichtigste Baustein zum Aufbau von Protoplasma. Im Seewasser ist der gelöste anorganisch gebundene Stickstoff hauptsächlich als Nitrat vorhanden, weil sämtliche andern Stickstoffformen in dieses übergeführt werden. Das Nitrat ist begrenzender Faktor, der hauptsächlich die Produktion des Phytoplanktons regulieren wird. Das Nitrat ist in streng oligotrophen Gewässern von der Oberfläche bis zum Grunde ungefähr gleichmäßig verteilt vorhanden, kann aber in eutrophen Gewässern während der Sommerstagnation, wie *L. Minder*<sup>40</sup> im Zürichsee nachwies, im Epilimnion vollständig verbraucht werden. Minder weist auf die enge Beziehung von Kohlensäure- und Nitratgehalt und auf entgegengesetzten Verlauf der O<sub>2</sub>-Kurve hin. Zunehmender Planktongehalt bewirkt Ansteigen der Sauerstoffwerte, in der Regel aber Abnahme der Kohlensäure- und Nitratwerte.

Die Produktion wird soweit getrieben, daß sowohl Kohlensäure als auch Nitrat aufgezehrt werden. Die Nachlieferung von Nitrat geschieht, des langsamem Abbaues der Pflanzenkörper wegen, erst wieder bei einsetzender Herbstteilzirkulation und Wintervollzirkulation. Eine spontane Anreicherung an Nitrat wird kaum eintreten.

«Im extrem eutrophen See, so schreibt *F. Ruttner*<sup>41</sup>, sind die Verhältnisse im Epilimnion ähnlich wie im oligotrophen Typus. Die Produktionsintensität des Phytoplanktons beeinflußt den Gehalt an Nitrat-Stickstoff. An der unteren Grenze der O<sub>2</sub>-haltigen Zone im Hypolimnion muß auch der Nitratgehalt Null werden. Mit steigenden Tiefen nimmt dann der Ammoniakgehalt zu.»

Diese Ausführungen stellen sich in Gegensatz zu den Fest-

stellungen von *F. Gessner*<sup>42</sup>. Dieser berichtet, daß Nitrat im eutrophen See das ganze Jahr in geringen Mengen vorhanden ist und nur unter bestimmten Bedingungen oder zu bestimmten Zeiten ins Minimum gerät, wie z. B. bei der Produktion der Kieselalgen. Allgemein ist eine Vermehrung des Nitrates gegen die Tiefe festzustellen. Trotzdem die nitrifizierenden Bakterien gegen Sauerstoffmangel sehr empfindlich sind, läßt dies keinen Schluß zu, daß der eutrophe See nitratarm sein muß. Das Gegen- teil ist der Fall. Zum Vergleiche lassen wir unsere Befunde folgen:

Tabelle 32

Tiefe	Nitrate mg/l										m
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
11. 10. 41	0	—	0	0,2	0,4	—	—	0	—	—	—
10. 1. 42	—	0,4	—	—	0,76	—	0,2	—	—	—	0,08
20. 3. 42	1	—	1,4	—	—	0,6	—	—	—	—	0,8
24. 9. 42	0,9	—	0,32	—	—	0,8	—	—	—	—	0,48

Unsere Untersuchungen zeigten Nitratwerte von 0 bis 1,4 mg/l. Am eindeutigsten zeigten die Werte von Beginn und Ende der Sommerstagnation 1942 die durchgehende Verbreitung des Nitrations von der Oberfläche bis zur Tiefe. Zu Beginn der Sommerstagnation fanden wir im Epilimnion Werte von 1 bis 1,4 mg/l Nitrat, während das Hypolimnion 0,6 bis 0,8 mg/l aufwies. Am Ende der Sommerstagnation wurden in 1 m Tiefe 0,9 mg/l und am Grunde 0,48 mg/l Nitrat gemessen. Die allgemeine Abnahme gegen die Tiefe ist ebenso augenfällig, wie die Verminderung des Nitratgehaltes im Epilimnion im Verlaufe der Sommerstagnation. Während dieser Periode war dieser wichtige Aufbaustoff des Phytoplanktons in den verfolgten Tiefen im Jahre 1942 nicht ins Minimum getreten, trotzdem die 30-m-Tiefe im Juli nur Bruchteile von mg/l Sauerstoff enthält. Die Resultate der Analysen vom 11. 10. 41 zeigten uns aber, daß das Epilimnion und das untere Hypolimnion frei von Nitraten waren. Die alsdann eintretenden Wasserverschiebungen während der Herbstvollzirkulation bewirkten, daß wieder Nitrat sowohl im Epilimnion als auch im Hypolimnion vorhanden war. Aus unsr wenigen Messungen, sowie aus den angeführten Berichten von *F. Ruttner* und *F. Gessner* ergibt sich also keine eindeutige Charakterisierung des Nitrathaushaltes.

### 11. Nitrit

Bestimmung nach Bujwid<sup>43</sup>.

Das Auftreten von Nitrit an der Sauerstoffgrenze oder in jener Tiefe, in der das Ende des stärksten Sauerstoffschwundes liegt, wird von *H. Müller*<sup>44</sup> mit der Tätigkeit der denitrifizierenden und nitrifizierenden Bakterien erklärt. Unsere Analysen ergeben Spuren von Nitrit im Epilimnion und im unteren Hypolimnion.

Tabelle 33

Tiefe		Nitrit mg/l									
		1	5	10	15	20	25	30	35	40	45
11. 10. 41	Spur	—	0	0	0	0	—	0,3	—	—	—
10. 1. 42	—	0	—	—	0	—	0	—	—	—	Spur
20. 3. 42	0	—	0	—	—	0	—	—	—	—	0
24. 9. 42	Spur	—	Spur	—	Spur	0	—	—	—	—	Spur

Zu Beginn der Sommerstagnation wurde kein Nitrit festgestellt, erst am Ende und zu Beginn der Teilzirkulation, auch zur Zeit der Winterstagnation am 10. 11. 42 fanden wir nur über dem Grund Spuren von Nitrit.

Im *Bodensee* liegen die Verhältnisse ähnlich. Das Nitrit wurde erst im Verlaufe der Sommerstagnation ausschließlich im Epilimnion und oberen Hypolimnion, oberhalb 30 m Tiefe, festgestellt. Es traten Konzentrationen von 0,5 bis 3,5 mg/l auf. Eine Erklärung für diese Erscheinung wird nicht gegeben.

Im *Zürichsee* wurden keine Nitrite gefunden.

Es ist noch nicht abgeklärt, ob das Nitrit aus dem Nitrat oder Ammoniak reduziert respektive oxydiert wird; vermutlich ist beides möglich.

### 12. Ammoniak

Bestimmung: Das freie und gebundene Ammoniak wird mit einem Puffergemisch im Vacuum bei mäßig erhöhter Temperatur ausgetrieben und titrimetrisch bestimmt.

In die Analyse wurden 5 cm<sup>3</sup> eingeengtes Seewasser genommen.

Der Ammoniak ist als Stoffwechsel- und Zerfallprodukt der biozoenotischen Fauna und Flora als Indikator der sekun-

dären Verunreinigung und somit Eutrophierung bedeutungsvoll. Direkt oder auch auf dem Umwege wird Ammoniak inkarniert und hat somit auch Aufbaufunktionen.

Es ist zu erwarten, daß in Zeiten vermehrten Absterbens des Planktons, besonders in den Tiefen über dem Grunde, Ammoniak angereichert wird. In Vegetationsperioden wird der Stoffwechselammoniak dem zum Aufbau nötigen Ammoniak die Waage halten können, sodaß ein Gleichgewicht bestehen würde.

Tabelle 34

Ammoniak mg/l

Tiefe	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	m
11. 10. 41	0,04	—	0,1	0,14	0,12	—	—	0,5	—	—	—
10. 1. 42	—	Spur	—	—	Spur	—	0,05	—	—	—	0,7
20. 3. 42	0	0	0	—	—	0	—	—	—	—	3,0
24. 9. 42	0,02	—	0,02	—	—	0,04	—	—	—	—	3,2

Unsere Analysen zeigten Werte von 0 bis 3,2 mg/l Ammoniak. Zu Beginn der Sommerstagnation 1942 fanden wir allein über dem Grunde eine Konzentration von 3,0 mg/l Ammoniak. Am Ende der Sommerstagnation wurden im Epilimnion 0,02 mg/l, im Hypolimnion (25 m Tiefe) 0,04 mg/l und in der Tiefe 45 m 3,2 mg/l Ammoniak festgestellt. Die Analysen, die im Oktober des Vorjahres gemacht wurden, zeigen noch größere Ammoniakwerte. Im Epilimnion fanden wir 0,04 und 0,1 mg/l, im Hypolimnion 0,12, 1,4 und 0,5 mg/l; leider fehlt uns eine Analyse der Tiefe über dem Grunde. Zur Zeit der Wintervollzirkulation wurden im Epilimnion nur Spuren und im Hypolimnion 0,05 und 0,7 mg/l Ammoniak gefunden. Im Verlaufe der Sommerstagnation und noch während der Teilzirkulation fand sich in allen Schichten und besonders über dem Grunde Ammoniak.

Für den *Bodensee* (Obersee) melden *Elster* und *Einsele*<sup>36</sup> Konzentrationen von 0,015 bis 0,02 mg NH<sub>4</sub>—N im Liter, und zwar für das ganze Vertikalprofil. Eine Schichtung konnte nie festgestellt werden. Für den Untersee (Bodensee) wurden je nach Beeinflussung der Probenahmestelle durch den Seerhein bis 0,085 mg/l, ausnahmsweise über dem Grunde 0,5 mg/l N (NH<sub>4</sub>) nachgewiesen. Die Konzentrationsunterschiede zwischen Epilimnion und Hypolimnion sind nie groß.

Wesentlich andere Werte sind im mäßig eutrophen Schlein-

see von *W. Einsele* und *H. Vetter*<sup>45</sup> festgestellt worden. Während der Sommerstagnation blieb die Ammoniakkonzentration dauernd unter 0,1 mg/l N—NH<sub>4</sub>. Im Frühjahr, während den Zirkulationen wurden auf dem ganzen Vertikalprofil 0,3 mg/l festgestellt. Im Gegensatz dazu stehen die Konzentrationen in den sedimentnahen Schichten des Hypolimnions. Die Konzentration des Ammoniaks nimmt mit dem Fortschreiten der Stagnation rapid zu. Gegen Ende der Sommerstagnation erreicht sie ihren maximalen Wert mit 4,3 mg/l N—NH<sub>4</sub>.

Im Zürichsee wurden in 10 m Tiefe 0,2 mg/l als Maximalwert gemessen. Der Mittelwert wurde mit 0,06 mg/l angegeben. Diese Vergleiche zeigen, daß mit fortschreitender Eutrophierung die Ammoniakkonzentration im Hypolimnion zunimmt und mit dem fortschreitenden Sauerstoffmangel parallel verläuft. Die Regeneration der Nährstoffe für Pflanze und Tier verschiebt sich nach der reduktiven Seite.

### *13. Folinwert, Aminosäuren und ähnliche Stoffe*

*Die Bestimmung* erfolgt mit dem Folin-Ciocalteu-Reagens. Eine Lösung von Phosphormolybdänwolframsäure wird von den im Seewasser vorhandenen Stoffen wie Aminosäuren, Harnsäuren usw. zu Molybdänblau reduziert. Dieses wird im Kolorimeter gegen ein Gemisch dieser Stoffe von bekanntem Gehalt verglichen.

Das Hygiene-Institut der ETH hatte in seinem Bericht über den Zürichsee vom Jahre 1936 die aminosäureähnlichen Stoffe bestimmt, die nach der Methode von *Folin* und *Ciocalteu* titriert werden. Diese wurden als Ersatz für den bisher üblichen «albuminoiden» Ammoniak als Beurteilungsfaktor aufgenommen. Der Folinwert Stickstoff wird als der eigentliche biologische Stickstoff hingestellt und gibt ein gutes Bild über den Eiweißaufbau und -Abbau im Seewasser.

Unsere Analysen zeigten Folinwerte von 0 bis 0,4 mg/l. Allgemein wurde am Ende der Sommerstagnation eine Vermehrung des Folinstickstoffes festgestellt. Die Schichtung war nicht besonders ausgeprägt, sodaß aus unseren Resultaten nur mit Vorsicht Schlüsse gezogen werden dürfen.

Tabelle 35 Folin-Wert (Aminosäuren und ähnliche Stoffe) mg/l

Tiefe	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	m
11. 10. 41	0	—	Spur	0,04	0,16	—	—	0,16	—	—	—
10. 1. 42	—	0,2	—	—	0,24	—	0,24	—	—	—	0,08
20. 3. 42	0,12	—	0,12	—	—	0,12	—	—	—	—	0,28
24. 9. 42	0,2	—	0,3	—	—	0,3	—	—	—	—	0,40

Zu Beginn der Sommerstagnation fanden wir in allen verfolgten Tiefen bis zu 25 m 0,12 mg/l und über dem Grund 0,28 mg/l Folin-Stickstoff.

Am Ende der Sommerstagnation fanden wir in denselben Tiefen etwas erhöhte Werte. In 1 m Tiefe 0,2 mg/l, in 10 und 25 m 0,3 mg/l und über dem Grunde 0,4 mg/l.

Eine frühere Messung vom Oktober 1941 zeigte Spuren an der Oberfläche und Werte von 0,16 mg/l im Hypolimnion. Eine andere Messung vom Januar 1942 zeigte im Epilimnion und Hypolimnion, mit Ausnahme der Tiefe über dem Grunde, ähnliche Werte, wie unsere letzten Messungen am Ende der Sommerstagnation 1942 gezeigt hatten. Dieser Wert von 0,08 mg/l konnte ohne weiteres nicht gedeutet werden. Die Steigerung des Folinwertes muß mit dem vermehrten Abbau von organischer Substanz erklärt werden, der mit der intensivierten Produktion der Biozönose parallel verlief. Parallel und mit ähnlicher Gleichmäßigkeit wie die Folinwerte verliefen auch die Phosphatwerte während der Sommerstagnation. Im Gegensatz dazu stellten sich die Nitratwerte, die reziproken Verlauf nahmen.

Im *Zürichsee* wurden im Gegensatz zu unseren Resultaten große Schwankungen des Folinwertes gemessen. Der Minimalbefund wurde im Oktober 1931 mit 0,04 mg/l ob Grund und der Maximalwert am 17. 7. 31, in der Tiefe 20 m, mit 2,8 mg/l angegeben. Der Mittelwert von 0,25 mg/l würde ungefähr unserem Mittelwert entsprechen.

Die Folinwerte im *Hallwilersee*, als Ausdruck für den Gehalt an organischer Substanz, sind nicht zu unterschätzen.

#### 14. Die Chloride

Bestimmung: Das Chlorion wird im konzentrierten Seewasser als Chlorsilber mit eingestellter Silbernitratlösung ge-

fällt und der Endpunkt der Titration mit Arsenatlösung festgestellt.

Das Chlorion fehlt bei der großen Verbreitung der Chloride kaum irgendwo. Der Chloridgehalt wird im Bericht über die «Wissenschaftliche Erforschung des Zürichsees 1929—1933» als Maßstab für die allgemeine Verunreinigung durch Abwasser aufgefaßt. Die Steigerung des Chloridgehaltes im Laufe der Zeit läßt auf eine Zunahme der Abwassermenge schließen. Minimal- und Maximalwert werden mit 0,7 bzw. 4,5 mg/l angegeben.

Tabelle 36

Tiefe	Chlorid mg/l									m
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	
11. 10. 41	8,0	—	7,5	7,0	7,0	—	—	6,5	—	—
10. 1. 42	—	8,0	—	—	7,5	—	7,0	—	—	7,0
20. 3. 42	7,0	—	6,5	—	—	7,0	—	—	—	6,5

Unsere Analysen zeigten mit Werten von 6,5 bis 8 mg/l eine auffallende Konstanz. Allgemein waren die Werte in der Tiefe etwas geringer.

Für den *Bodensee* fanden *H. J. Elster* und *W. Einsele*<sup>36</sup> in ihren Untersuchungen in den Jahren 1932—1936 Chloridgehalte nach nephelometrischer Schätzung von 0,8 mg/l. Diese Vergleichswerte des Bodensees und des Zürichsees veranschaulichen besonders eindringlich den hohen Chloridgehalt des Hallwilersees, der in unserem Falle mit Recht als Verunreinigungsindikator gewertet werden kann.

### 15. Phosphat

Bestimmung des Phosphations nach der «Molybdänblau»-Methode. Das Phosphation gibt mit Molybdänsäure und einem Reduktionsmittel unter Einhaltung bestimmter Bedingungen eine blau gefärbte Komplexverbindung, welche kolorimetriert wird.

Es wurde in die Analyse genommen: 10 cm<sup>3</sup> eingeengtes = 500 cm<sup>3</sup> Originalwasser.

Der Phosphor ist wie der Stickstoff ein lebensnotwendiger Aufbaustoff des Protoplasmas und befindet sich in jedem Gewässer, wenn auch nur in geringsten, kaum meßbaren Quantitäten.

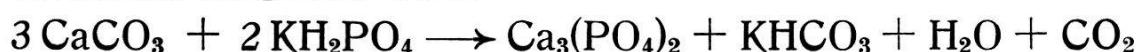
Selbst die geringsten Mengen können dem Plankton die Fortpflanzung sichern.

Die Herkunft des Phosphors als Phosphat ist weniger vielseitig als beim Stickstoff.

Außer durch die Vermittlung phosphathaltiger Gesteine kann Phosphat nur direkt oder indirekt von Organismen, entweder als Exkrement oder Abbauprodukt entstehen und in Lösung gehen. *F. Geßner*<sup>46</sup> berichtet, daß im oligotrophen Gewässer, wie Vättern-, Boden- und Hallstättersee, das Phosphation nur in geringen Spuren (weniger als 1 mg/m<sup>3</sup>) enthalten ist. Eine Zunahme wird erst über dem Grunde festgestellt.

Im eutrophen See fehlt das Phosphat während des größten Teiles des Jahres und steigt nur im Frühling für kurze Zeit an. Allgemein gilt nach *F. Geßner*, daß im eutrophen Seetyp im Epilimnion während der Hauptvegetationsperiode das Phosphat vollständig verschwunden ist. Diesen Feststellungen zufolge, mit Einbeziehung der Beobachtung am Nitrathaushalt, wird erklärt, daß das Phosphat in erster Linie die Produktion der Organismen begrenzt.

*F. Geßner* findet einen weiteren Grund für die Phosphorverarmung im Epilimnion; seine Untersuchungen auf der Donau zeigten, daß hinter Großstädten der Phosphatgehalt nicht, wie vermutet wird, ansteigt. Er nimmt an, daß das regenerierte Phosphat durch CaCO<sub>3</sub> als Trikalziumphosphat nach folgender Gleichung ausgefällt wird:



Es wird durch diese Erkenntnis darauf hingewiesen, daß durch die biogene Entkalkung im Epilimnion Phosphat ausgefällt werden kann.

Nach *W. Ohle*<sup>38</sup> und *Einsele*<sup>47</sup> können Phosphate durch Ferrihydroxyde adsorbiert oder als Ferriphosphat ausgefällt werden.

Für *L. Minder*<sup>40</sup> ist der hohe Phosphatgehalt des Zürichsees von 0,02 bis 0,7 mg/l an der Oberfläche hygienisch bedeutungsvoll. Der Phosphatreichtum wird nach Minder durch die Abwasser bedingt, denn reine Wasser enthalten praktisch keine Phosphate.

Tabelle 37

Tiefe	Phosphate mg/l										m
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
11. 10. 41	—	—	0,2	0,6	0,8	—	—	0,7	—	—	—
10. 1. 42	—	0,6	—	—	0,6	—	0,6	—	—	—	0,7
20. 3. 42	0,2	—	0,19	—	—	0,6	—	—	—	—	0,8
24. 9. 42	0,25	—	0,25	—	—	0,5	—	—	—	—	1,0

Nun zeigten unsere Analysen Phosphatwerte von 0,2 bis 1,0 mg/l  $\text{PO}_4$ . Zur Zeit der Wintervollzirkulation fanden wir eine gleichmäßige Verteilung von 0,6 mg/l, außer über Grund, wo 0,7 mg/l gefunden wurden.

Zu Beginn der Sommerstagnation war der Phosphatgehalt im Epilimnion auf 0,19 bis 0,2 mg gesunken und im Hypolimnion auf 0,6 bis 0,8 mg/l angestiegen.

Am Ende der Sommerstagnation war mit 0,25 mg/l im Epilimnion der Gehalt etwas angestiegen, ebenfalls über dem Grund, wo das Maximum von 1,0 mg/l festgestellt wurde.

Diese Resultate lassen eine gewisse Schichtung des Phosphates erkennen. Wohl war im Epilimnion, wahrscheinlich durch Konsumtion, der Gehalt gesunken, doch wurde die Organismenmenge durch diesen Nährstoff in ihrer Entwicklung nicht begrenzt.

Die Untersuchungen im *Bodensee*, wo praktisch niemals Phosphat nachgewiesen wurde, scheinen *L. Minders* Ansichten, daß Phosphat als Eutrophierungsindikator aufgefaßt werden soll, voll und ganz zu rechtfertigen.

Der Phosphatgehalt des Hallwilersees ist als reichliche Düngung aufzufassen und demzufolge als Produktionsfaktor nicht zu unterschätzen.

### 16. Sulfat

Bestimmung: Das Sulfation wird als Benzidinsulfat gefällt. Der auf Glasfiltertiegeln gesammelte Niederschlag wird mit 0,02 n Kalilauge titriert.

Der Verbrauch der Pflanze an Sulfat dürfte im Verhältnis zur vorhandenen Menge klein sein. Eine biogene Schichtung ist demzufolge nicht zu erwarten. In anderer Weise ist der Sulfatgehalt eines Sees bedeutungsvoll. Es wurde nämlich festgestellt, daß im allgemeinen nur jene eutrophen Seen im Hypolimnion

beträchtliche Mengen Schwefelwasserstoff enthalten, die reich an Sulfaten sind. Die im Eiweiß enthaltene Menge Schwefel wäre zu gering, um bei der Fäulnis eine Anreicherung an Schwefelwasserstoff zu verursachen, besonders dann, wenn keine Abnahme an Sulfaten in der Produktionsschicht festzustellen ist.

Der größte Teil des Schwefelwasserstoffes, der im unteren Hypolimnion gemessen wird, stammt vermutlich von der durch Bakterien verursachten Sulfatreduktion her.

Tabelle 38

Tiefe	Sulfat mg/l										m
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
10. 1. 42	—	5,3	—	—	6,9	—	7,3	—	—	—	6,7
20. 3. 42	7,8	—	6,9	—	5,3	6,8	—	—	—	—	5,0
24. 9. 42	7,2	—	6,9	—	—	6,2	—	—	—	—	4,2

Unsere Analysen zeigten Werte von 4,2 bis 7,8 mg/l. Das Epilimnion und das obere Hypolimnion sind ziemlich ausgeglichen, einen starken Abfall um zirka 1 mg/l zeigte die Tiefe 45 m (über Grund). Diese Erscheinung könnte gut mit der oben erwähnten Sulfatreduktion erklärt werden, insofern uns die Schwefelwasserstoffanalysen das Recht dazu geben.

### 17. Schwefelwasserstoff

Bestimmung: Für die Überprüfung an Ort und Stelle wurde das kolorimetrische Verfahren von *W. Winkler*<sup>48</sup> mit Kaliumantimonyltartrat angewendet.

Die Proben mit starkem Schwefelwasserstoffgehalt wurden mit der Methode von *Dupasquier-Frescenius*<sup>49</sup> analysiert und mit  $1/100$  n Jodlösung titriert.

Der Schwefelwasserstoff kann nicht als Nährstoff im eigentlichen Sinne aufgefaßt werden. Er entsteht entweder beim reduktiven Abbau der toten Substanz durch anaerobe Bakterien im sauerstofffreien Wasser, oder durch Sulfatreduktion, wie schon beschrieben wurde. Ebenfalls von Bakterien wird Schwefelwasserstoff zu Sulfat oxydiert und der Biozönose nutzbar gemacht. In sauerstoffhaltigem Wasser ist Schwefelwasserstoff, der leichten Oxydierbarkeit wegen, nicht beständig. In den bodennahen Schichten unterliegt das Eisenion bei günstigen Bedingungen der Ausfällung als Eisensulfid. *W. Einsele*<sup>47</sup> findet,

daß die FeS-Bildung um so eher erfolgt, je höher der pH ist. Bei einem pH nahe oder unterhalb 7 kann bei auch noch so großem Schwefelwasserstoffgehalt kein Eisensulfid ausgefällt werden.

Leider erfolgten unsere Schwefelwasserstoffbestimmungen nur sporadisch, sodaß wir keine Zusammenhänge herstellen können.

Tabelle 39

Tiefe	Schwefelwasserstoff mg/l										m
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
70. 3. 42	0	—	0	0	0	0	Spur	Spur	1,2	3,0	
24. 9. 42	0	—	0	—	—	0	—	—	—	1,7	

Wir erwähnen lediglich, daß wir zu Beginn der Sommerstagnation noch Spuren bis in die Tiefe von 30 m feststellten, während über dem Grund die erhebliche Konzentration von 3 mg/l Schwefelwasserstoff beobachtet werden konnte. Am Ende der Sommerstagnation fanden wir lediglich über dem Grund den Wert von 1,7 mg/l Schwefelwasserstoff.

Im *Bodensee* wurde Schwefelwasserstoff nicht gefunden. Dagegen tritt er im *Zürichsee* zeitweilig auf, insbesondere nach der Sommerstagnation. Im mäßig eutrophen *Schleinsee* wurden von *W. Einsele* und *H. Vetter*<sup>45</sup> gegen Ende der Sommerstagnation maximal 0,9 mg/l Schwefelwasserstoff in 10 m Tiefe festgestellt. Im Jahre 1918 wurden von *A. Güntert* und *A. Brutschy*<sup>8</sup> im *Hallwilersee* am Ende der Sommerstagnation in den bodennahen Schichten 0,3 bis 0,77 mg/l Schwefelwasserstoff gefunden. Die Bestimmungsmethode war im Prinzip dieselbe. Im weitern wird auf eine Analyse vom 14. 9. 18 hingewiesen, die 2,045 mg/l Schwefelwasserstoff feststellte. Wenn damals auf die Gefährlichkeit dieses Fischgiftes hingewiesen wurde, so müssen wir es heute umso eindringlicher tun, da sich der Schwefelwasserstoffgehalt um ein Vielfaches vergrößert hat.

### 18. Die Kieselsäure

Bestimmung: Kolorimetrisch nach Methode von *Urbach*<sup>50</sup>.

Die Kieselsäure ist der Baustoff für das Gerüst und die Schalen der Diatomeen und Heliozoen. Damit wäre entsprechend den Vegetationsperioden der erwähnten Organismen eine ausgesprochene Schichtung zu vermuten.

Tabelle 40

Tiefe	Kieselsäure mg/l									
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45 m
11. 10. 41	2,4	—	1,6	5,0	4,8	—	—	7,0	—	—
10. 1. 42	—	0,5	—	—	0,4	—	0,6	—	—	1,2
20. 3. 42	2,2	—	2,2	—	—	2,4	—	—	—	12,0
24. 9. 42	0,2	—	0,5	—	—	0,8	—	—	—	1,4

Unsere Messungen zeigten ganz verschiedene Resultate. Es waren Übergänge von 0,2 auf 12,0 mg/l Kieselsäure vorhanden. Allgemein wurde festgestellt, daß zu Beginn der Sommerstagnation bis in die Tiefe von 25 m ausgeglichene Werte von 2,2 bis 2,4 mg pro Liter vorhanden waren, während die Tiefe 45 m 12 mg/l Kieselsäure enthielt.

Unseren Messungen vom 10. 1. 42 zufolge hätte um diese Zeit abermals eine Kieselalgenproduktion einsetzen müssen.

Am Ende der Sommerstagnation zeigten die gleichen Tiefen 0,2 bis 0,8 resp. 1,4 mg/l Kieselsäure.

Für den *Bodensee* (Obersee) werden zu Beginn der Sommerstagnation im Mittel zirka 1,5 mg/l Kieselsäure gemeldet. Die Abnahme während der Sommerstagnation betrug in den Tiefen 0 bis 5 m 1,2 mg/l, in 10 m Tiefe 0,5 mg/l und in 15 m Tiefe 0,2 mg/l.

*L. Minder*<sup>40</sup> stellte in seinen Messungen, die er innerhalb 30 Jahren ausführte, rund 2 bis 5 mg/l SiO<sub>2</sub> fest. Den niedrigsten Kieselsäurewert von 1,9 mg/l fand er vier Jahre nach der Invasion der *Tabellaria fenestrata*.

Im *Hallwilersee* ist der Gehalt an Silikat um zirka 50 % höher als im oben erwähnten Boden- und Zürichsee.

## 8. Schlammuntersuchungen

### I. Allgemeines

Das Wasser ist der Lebensraum der Biozoenose. Neben dieses vom Leben beherrschte «Element» stellt sich das scheinbar durch wesenlosen Tod charakterisierte Sediment. Seitdem es *F. Nipkow*<sup>17</sup> durch Hebung seiner Schlammprofile gelungen

ist, den Zeitbegriff auch in die Schlammbeurteilung zu bringen, hat auch der Schlamm «Leben» bekommen und kann als Registrator der Lebensvorgänge im darüber liegenden Wasser aufgefaßt werden.

Die Ablagerungen sind teils anorganischer, teils organischer Zusammensetzung und der Entstehung nach entweder im See selbst durch Prozesse des Lebens oder durch physikalisch-chemische Vorgänge aus dem Wasser ausgefällt, autochthon, oder durch die Zuflüsse in den See eingeführt, allochthon.

Die Menge und Zusammensetzung der allochthonen Sedimente ist abhängig vom Einzugsgebiet des Sees in bezug auf Größe, morphologische und geologische Beschaffenheit, Klima und Pflanzendecke.

Für das Seegeschehen besonders aufschlußreich sind die autochthonen Ablagerungen, die als Fällungen durch chemisch-physikalische Reaktionen im Wasser stattfinden und meist durch Lebensvorgänge verursacht werden, oder durch die langsamere Sedimentierung der tierischen und pflanzlichen Leichen mit ihren organischen und anorganischen Inhaltssubstanzen.

Unter den biologisch bedingten Ausfällungen nimmt der Kalk den ersten Platz ein. Die ausgeschiedenen Kalkteilchen sinken direkt oder im Strömungsschatten ab und bilden die Seekreide von grauweißer Färbung.

Die Sedimentierung des Eisens erfolgt als Hydroxyd, welches beim Transport von Sauerstoff in sauerstofffreie Tiefen ausgefällt wird, oder als Eisensulfid bei Anwesenheit von  $H_2S$  in den schlammnahen Schichten, oder im Schlamm selbst.

Auch durch die Eisenbakterien und Algen, die die Fähigkeit besitzen, Eisenverbindungen in ihren Hüllen zu speichern, wird Eisen im Schlamm abgelagert.

Als geformtes Sediment erscheint die Kieselsäure aus dem Wasser als Kieselpanzer der oft zahlreich vorhandenen Diatomeen.

Für die Beurteilung des Sees ist der organische, noch zerstzungsfähige und mineralisierbare Anteil des Schlammes ausschlaggebend.

Phosphorsäure kann als Eisenphosphat, möglicherweise auch als Kalziumphosphat deponiert werden. Im oligotrophen

See wird es kaum zur Bildung von organischem Schlamm kommen, denn die geringen Mengen absinkender organischer Substanzen werden schon vorher oxydiert und mineralisiert werden. Wenn aber eine starke Biozoenose entwickelt ist, ist der Anfall an zerfallenden organischen Substanzen groß und der Bedarf an oxydierendem und mineralisierendem Sauerstoff wächst ständig an. Die Zersetzungsvorgänge sind nur solange in oxydativem Sinne möglich, als der vorhandene Sauerstoff ausreicht und eventuell bei Vollzirkulation in die Tiefe befördert wird. Werden die Sauerstoffverhältnisse ungünstig, so tritt die Mineralisierung in reduktivem Sinne als Fäulnis an die Stelle der Oxydation. Beim aeroben Abbau handelt es sich um relativ rasch ablaufende Vorgänge unter Beteiligung einer artenreichen Bakterienflora. Demgegenüber verläuft der anaerobe Vorgang, die Fäulnis, sehr langsam. Die Zersetzungsvorgänge sind abhängig von der Temperatur, weshalb in den Tiefen, wo meist nur  $4^{\circ}\text{C}$  herrscht, mit extrem langer Abbauphase zu rechnen ist. Es besteht die Möglichkeit, daß der Faulschlamm vom Ende der Herbstvollzirkulation bis zum Beginn der Sommerstagnation nicht ausmineralisiert werden kann, sodaß das neu anfallende organische Sediment einfach angehäuft wird.

Es liegt nun nahe anzunehmen, daß die Fäulnisprodukte des Seegrundes an das darüber stehende Wasser abgegeben werden, sodaß die unmittelbar ob Grund liegenden Wasserschichten als Exponent der chemisch-biologischen Umsetzungsvorgänge im Schlamm aufgefaßt werden können.

Diese Austauschvorgänge sind von verschiedenen Forschern wie *Birge* und *Juday*, *Naumann* und *Alsterberg* studiert worden.

*G. Alsterberg*<sup>1</sup> hat den Begriff der Mikroschichtung geprägt und weist auf folgende Prozesse hin, die bei einer Auseinandersetzung über Gasaustausch zwischen Schlamm und Wasser in Betracht zu ziehen sind:

1. Die  $\text{O}_2$ -Absorption des Schlammes.
2. Die  $\text{O}_2$ -Diffusion.
3. Die Exhalation des Schlammes von oxydablen Substanzen.

4. Die Aufwärtsbewegung von Organismen vom Schlamm hinauf in die Wasserschichten mit sinkender O<sub>2</sub>-Spannung.

Die Untersuchungen in verschiedenen gelegenen Seen ließen *G. Alsterberg* zum Schluß kommen, daß die Austauschvorgänge noch durch einen andern sehr wichtigen Faktor beeinflußt werden, nämlich durch die Strömungen, die durch die Winde erzeugt werden. Diese Wirkung der Winde in der Horizontal-ebene ist es ebenfalls, die der durch die Bodenkonfiguration bestimmten Mikroschichtung makroschichtenden Charakter erteilt. Die vertikal wirkenden Konvektionsströmungen sind für die Austauschvorgänge von primärer Wichtigkeit. Ohne sie müßten sich im unbelichteten Hypolimnion die Fäulnis- und Abbaustoffe in noch viel stärkerem Maße anreichern.

## II. Resultate und Diskussion der physikalischen und chemischen Schlammuntersuchungen

(s. Tabelle 42)

Es war von besonderem Interesse, den pelagischen Schlamm im Hallwilersee auf seinen chemischen Charakter und besonders auf seinen Mineralisierungsgrad zu untersuchen. Bei der Hebung der Wasserproben für die Sauerstoffuntersuchungen kamen wir oft mit dem Schlamm in Kontakt, der besonders im Herbst und Winter stinkig war und grauschwarze Farbe aufwies. Die Schlammproben zur vorliegenden Untersuchung wurden an den drei üblichen Probenahmestellen am 27.5.43 entnommen.

Die Analysenbefunde sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt und anschließend beschrieben. Die zur Analyse benutzten Methoden sind teilweise in den Veröffentlichungen von *H. F. Kuisel* («Neue Methoden in der Wasseranalyse», I., II. und III. Mitteilung in der Helvetica Chimica Acta, Vol. XVIII fasc. I und II) beschrieben.

Daneben leisteten uns die Veröffentlichungen von *Jordan Manthey-Hom, Meinck, Sander* und *Schmidt* in den «Kleinen Mitteilungen der preußischen Landesanstalt für Wasser-, Boden- und Lufthygiene (Berlin 1941) wertvolle Dienste. Zur Beurtei-

lung des Schlammes zogen wir die Arbeit von *Benade* (Moore, Schlamme, Erden, Dresden 1938) zu Rate. Unsere Untersuchungsergebnisse wurden hauptsächlich mit denjenigen des Zürichsee-Tiefenschlammes, wie sie im Bericht über die «Wissenschaftliche Erforschung des Zürichsees in den Jahren 1929 bis 1933» dargelegt sind, verglichen.

In der Beschreibung wurde der Begriff «Feuchtschlamm» mit F.S. abgekürzt, was hauptsächlich die Tabellen übersichtlicher erscheinen ließ.

### *1. Allgemeiner Charakter des Schlammes*

Der Schlamm ist zähflüssig, mehlig, grauschwarz, schwach faulig riechend. Die unter der grauschwarzen Schicht liegende Masse erscheint heller. Eine gewisse Schichtung ist unverkennbar. Leider war es uns nicht möglich, eigentliche Schlammprofile im Sinne Nipkows zu erheben.

### *2. Die Reaktion des Schlammes*

Die drei untersuchten Schlammproben reagierten alle schwach alkalisch, entsprechend pH-Werten von pH 7,4 bis 7,8, was für die geruchlos verlaufende Methangärung erste Bedingung ist.

### *3. Wassergehalt und Trockenrückstand*

Dem Wassergehalt des Schlammes von 61,5 bis 65,7 % entsprechen Trockenrückstände von 38,5 resp. 34,3 %. Diese Werte zeigen an und für sich keine Abnormität. Im Zürichsee wurden bei Tiefenschlamm Wassergehalte von 65 bis 70 % festgestellt.

### *4. Asche und Glühverlust*

Der Aschengehalt unserer Schlammproben schwankte zwischen 30,8 und 35,2 % des Feuchtschlammes; der Glühverlust betrug 2,9 bis 3,5 % des Feuchtschlammes, wobei der maximale Wert von 3,5 % auf die Probe der tiefsten Stelle 2 fällt. Es wäre nicht angängig, diese relativ kleinen Differenzen als wichtige Unterschiede im Gehalt an organischen Stoffen zu interpretieren.

Der Glühverlust wird normalerweise als der Gehalt an or-

ganischen Stoffen gewertet. Diese Bezeichnung wäre im vorliegenden Fall jedoch nicht ganz richtig, weil sich auch mineralesche Stoffe beim Glühen verflüchtigen, so besonders Eisenchlorid, Sulfide und Ammoniumsalze.

### *5. Das Salzsäureunlösliche*

stellt neben Resten von mit Salzsäure nicht hydrolysierbaren organischen Stoffen hauptsächlich Sand und Ton d. h. Silikate dar und betrug in den untersuchten Schlammen 6,2 bis 8 % des Feuchtschlammes. Der Hauptanteil wird die aus dem Diatomeen-Detritus stammende Kieselsäure darstellen.

### *6. Die Reduktionsfähigkeit*

zeigt an, welche Mengen an reduzierenden, d. h. bei der Fäulnis sauerstoffverbrauchenden Anteilen vorhanden sind. Am Hygiene-Institut der ETH wurde eine Bestimmungsmethode ausgearbeitet, welche darin besteht, daß dem Schlamm Nitroanthrachinon zugesetzt wird. Dieses wird durch den vorhandenen Wasserstoffdruck in stabiles rotgefärbtes Aminoanthrachinon übergeführt, welches kolorimetrisch gemessen wird.

Unsere Bestimmungen zeigten folgende Werte:

Die Werte für den chemischen Nitro-Effekt d. h. für den Verbrauch von Nitroanthrachinonsulfosäure während eines Tages, schwanken von 0,7 bis 1,75 mg/g Feuchtschlamm. Nach 7 Tagen wurden Werte von 2,8 bis 5,6 mg/g F.S. gemessen. Nach 20 Tagen waren hauptsächlich die Werte der Stellen 2 und 3 weiter angestiegen, während an Stelle 1 die Zunahme geringer war. Die Werte des totalen Nitro-Effektes nach 20 Tagen schwanken zwischen 4,2 bis 7,0 mg/g F.S. Schlamme mit einer Reduktionsfähigkeit von weniger als 1 mg/g Feuchtschlamm verlieren dieselbe beim Liegen an der Luft meist ziemlich rasch. Im Zürichsee wurden für den Tiefenschlamm wesentlich größere Werte gefunden, und zwar ein solcher von maximal 167 mg. Die Reduktionsfähigkeit unserer Schlammproben kann als gering bezeichnet werden.

### *7. Die Sulfide*

sind im Schlamm als Eisensulfid vorhanden und bedingen dessen schwarze Farbe. Sulfide werden aber an der Luft ziemlich rasch

oxydiert, während andere oxydierbare Stoffe erst später oxydiert werden.

Unsere Schlammproben lieferten Werte für Sulfide von 0,24 bis 0,45 mg H<sub>2</sub>S/g F.S. Der geringste Wert von 0,24 mg/g F.S. wurde an der Stelle 3, wo der See nur 32 m tief ist, gemessen. Hier fanden wir auch während des ganzen Jahres sauerstoffhaltiges Wasser am Grunde.

Im Zürichsee wurden im Tiefenschlamm H<sub>2</sub>S-Werte von 1,6 ‰ oder 1,6 mg pro g Feuchtschlamm gefunden.

### 8. Der Gesamtstickstoff

Durch die Bestimmung des Gesamtstickstoffes nach der Methode von *Kjeldahl* werden sowohl Stickstoffkörper der höchsten Oxydations- als auch Reduktionsstufen organischer und anorganischer Natur erfaßt. Unsere Schlammproben zeigten Werte von 0,8 bis 1,1 mg/g Feuchtschlamm. Wiederum ist der Maximalwert 1,1 mg/g N an der tiefsten Stelle des Sees, wo auch der größte Wert für den Sulfidschwefel und den Glühverlust gefunden wurde.

Im Zürichsee-Tiefenschlamm wurde dagegen nur ein Wert von 0,75 mg pro g Feuchtschlamm ermittelt.

### 9. Der Gehalt an Kalzium

im Schlamm betrug 106,00 bis 113,50 mg pro g Feuchtschlamm. Demzufolge ist der Schlamm als kalkreich zu taxieren. Im Zürichsee wurden Kalziumwerte von 150 mg/g F.S. gefunden. Dieser Wert entspricht 375 mg CaCO<sub>3</sub> pro g Feuchtschlamm.

Wir rechneten das gefundene Kalzium und Magnesium in CaCO<sub>3</sub> um, da angenommen werden kann, daß der Hauptteil als Kreide vorliegt; wir verweisen auf die Zusammenstellung in Tabelle Nr. 43.

### 10. Die Magnesiumbestimmung

lieferte Werte von 3,66 bis 4,88 mg Magnesiumion pro g Feuchtschlamm. Diese Werte sind eher als gering zu bezeichnen, denn der Zürichsee-Tiefenschlamm wies Werte von 3,0 bis 18,0 mg/g Feuchtschlamm auf.

### 11. Das Aluminium

ist als Bestandteil des Schlammes mit 0,022 bis 0,03 mg/g Feuchtschlamm nur in geringen Mengen vorhanden. Über die Bewertung des Aluminiums im Schlamm liegen keine Literaturangaben vor.

### 12. Die Gasungsfähigkeit

Bestimmung: 500 g Feuchtschlamm wurden in einen Stehkolben eingefüllt, welcher mit einem Eudiometer gasdicht verbunden wird. Das Eudiometer enthält als Sperrflüssigkeit gesättigte Kochsalzlösung. Durch tägliches Ablesen wird die jeweilig produzierte Gasmenge, der bei 20 °C aufbewahrten Probe notiert und die nach 60 (oder weniger) Tagen produzierte totale Gasmenge als Gasungsfähigkeit in cm³ Gas/kg Feuchtschlamm angegeben.

Unsere Schlammproben wurden nach obiger Methode während 20 Tagen auf Gasungsfähigkeit geprüft, ohne daß eine Gasentwicklung festgestellt werden konnte.

### 13. Der Sauerstoffbedarf

Methode: Nach *Sierp* und *Fränsemeyer*.<sup>51</sup>

Das Verfahren besteht darin, daß in einem in Gemeinschaft mit *Fränsemeyer* hergestellten Apparat gasförmiger Sauerstoff auf das unverdünnte Wasser oder Schlamm zur Einwirkung gebracht wird. Der von der Flüssigkeit innerhalb einer bestimmten Zeit bei gleichbleibender Temperatur (20 °C) aufgenommene Sauerstoff wird an der Volumabnahme im Eudiometer gemessen.

Die Werte für den Sauerstoffbedarf sind in nachstehender Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 41

	Schlammproben an den Stellen								
	1	2	3	ccm/g	mg/g	ccm/g	mg/g	ccm/g	mg/g
O <sub>2</sub> -Bedarf nach 5 Tagen	1,1	1,53	0,95	1,32	1,1	1,53			
O <sub>2</sub> -Bedarf nach 20 Tagen	2,16	3,0	2,18	3,0	2,17	3,0			

Die Werte sind als gering zu bezeichnen, wenn in Betracht gezogen wird, daß die Oxydation der gemessenen Sulfide zirka 3 bis 5 mg/g O<sub>2</sub> verbrauchen würden.

Im Tiefenschlamm des Zürichsees wurden bis 30 mg/g Feuchtschlamm Sauerstoff verbraucht, was ungefähr dem zehnfachen Wert unserer eigenen Messungen gleichkommt.

**Resultate der Schlammanalysen**

Die Schlammproben wurden am 27.5.43 an den drei Probenahmestellen in den Tiefen 40, 45 und 32 m genommen

*Tabelle 42*

	Stelle 1 40 m	Stelle 2 45 m	Stelle 3 32 m
Beschaffenheit			
Farbe	grauschw.	grauschw.	grau
Geruch	schw. faul	schw. faul	faul n. H <sub>2</sub> S
pH	7,8	7,6	7,4
Haftwasser n. 24 Std. % F.S.	12,6	12,0	9,4
Wassergehalt in % F.S.	61,5	65,7	62,6
Trockenrückstand % F.S.	38,5	34,3	37,4
Asche % F.S.	35,2	30,8	34,3
Asche % Trockensubstanz	91,0	90,0	93,0
Glühverlust % F.S.	3,3	3,5	2,9
Glühverlust % Tr.S.	9,0	10,0	7,0
HCl (unlösliches) % F.S.	8,0	6,15	6,2
HCl (unlösliches) % Asche	23,0	20,0	18,0
Sulfide in mg H <sub>2</sub> S/g F.S.	0,42	0,45	0,241
Gesamt-N mg/g F.S.	0,8	1,1	1,0
Kalzium mg/g F.S.	113,5	96,5	106,0
mg CaCO <sub>3</sub> /g F.S.	284,0	241,0	265,0
Magnesium mg/g F.S.	3,66	4,88	4,88
mg MgCO <sub>3</sub> mg F.S.	4,50	5,80	5,80
Aluminium mg/g F.S.	0,022	0,024	0,030
Eisen mg/g F.S.	10,5	11,1	9,5
mg FeS <sub>2</sub> /g	22,4	23,7	20,3
Nitroeffekt mg/g F.S. oder Reduktionsfähigkeit			
mg/g F.S. nach 1 Tag	1,75	1,75	0,70
mg/g F.S. nach 7 Tagen	5,6	4,9	2,8
mg/g F.S. nach 20 Tagen	6,3	7,0	4,2
Gasungsfähigkeit cm <sup>3</sup> /kg F.S.	0	0	0
Sauerstoffbedarf cm <sup>3</sup> /g F.S.			
nach 5 Tagen	1,1	0,95	1,1
nach 20 Tagen	2,16	2,18	2,17

### III. Generelle Beurteilung des Schlammes

1. Über die Zusammensetzung des Schlammes orientiert die folgende Zusammenstellung. In der Tabelle Nr. 43 sind die Angaben als %-Gehalt des Feuchtschlammes (F.S.) angegeben.

#### Zusammenstellung über Zusammensetzung des Schlammes in %

*Tabelle 43*

Probenahmestellen	1	2	3
Tiefe des Grundes	40 m	45 m	32 m
Wassergehalt des Schlammes	61,5	65,7	62,6
davon Haftwasser	(12,5)	(12,0)	(9,4)
Trockenrückstand	38,5	34,3	37,4
<b>Zusammensetzung des Trockenrückstandes</b>			
Kalziumkarbonat	27,4	24,1	27,5
Magnesiumkarbonat	0,9	1,7	1,7
HCl (unlösliches)	8,0	6,1	6,2
Eisensulfid	2,2	2,4	2,0
Trockenrückstand	38,5	34,3	37,4

Der Trockenrückstand besteht zu 70 % aus Kalzium- und Magnesiumkarbonat. In zweiter Linie fällt das HCl-Unlösliche, welches zum größten Teil Silikate sind, mit zirka 20 % ins Gewicht.

2. Der negative Verlauf der Prüfung auf Gasungsfähigkeit lässt auf geringe Mengen organischer Substanz schließen, was auch durch die geringe Sauerstoffaufnahme und den kleinen Nitro-Effekt bestätigt wurde.

3. Der Gehalt des Schlammes an reduzierenden anorganischen Verbindungen, wie Sulfiden, ist nicht außerordentlich. Die Sauerstoffaufnahme zeigte Werte, wie sie zur Oxydation der Sulfide (als  $H_2S$ ) nötig waren.

4. Den erwähnten Eigenschaften nach zu schließen, ist der Hallwilerseeschlamm eher als Schlick, denn als Halbfaulschlamm zu taxieren.

## 9. Zusammenfassung

### 1. Die Thermik im offenen See

- a) Alle sechs Seezeiten sind im Untersuchungsjahr ausgebildet worden.
- b) Im Verlaufe der Sommerstagnation wird der See in Epilimnion, Metalimnion und Hypolimnion scharf gegliedert.
- c) Die 15-m-Tiefe ist mit nur  $3,5^{\circ}\text{C}$  jährlicher Schwankung als Kaltwasserzone ausgeprägt.
- d) Die Temperatur der 10-m-Tiefe schwankt innerhalb weniger Stunden zwischen  $0,2$  bis  $1^{\circ}\text{C}$ .

### 2. Die Sauerstoffverhältnisse

- a) Der Sauerstoffausgleich während der Herbstvollzirkulation geht *nicht* konform mit dem Temperaturausgleich.
- b) Die Herbstvollzirkulation bringt Sauerstoff bis maximal 25 m Tiefe, während die Frühlingsvollzirkulation den Sauerstoff bis in die Tiefe von 30 m befördert.
- c) Die Sauerstoffwerte im Jahresverlauf in den verschiedenen Tiefen des Hypolimnions an den drei Probenahmestellen sind konform, d. h. der Sauerstoffgehalt wird nicht direkt durch die Bodenkonfiguration des Seebeckens beeinflußt. Die 30-m-Tiefe hat, obwohl sie in ganz verschieden großer Entfernung vom Schlamm verläuft (2 bis 15 m), an allen drei Probenahmestellen ähnlichen Kurvenverlauf.
- d) Am Ende der Sommerstagnation finden wir im Metalimnion ganz extreme Sauerstoffwerte. In einer 2,5 m tiefen Wasserschicht sind der Maximalwert von 270 % und der Minimalwert von 10 % der theoretischen Sättigung nebeneinander gemessen worden.
- e) Am Ende der Sommerstagnation ist praktisch der gesamte Sauerstoff unterhalb der Sprungschicht (10 m) verbraucht.
- f) Der Thienemann'sche Quotient  $O_2 \text{ H/E}$  ist für das Ende der Sommerstagnation 1942 mit 0,075 errechnet. Er deutet auf sehr weitgehende Eutrophierung des Hallwilersees hin.

### 3. Der Kohlensäuregehalt und die Karbonathärte

- a) Wir können speziell während der Sommerstagnation drei charakteristische Tiefenzonen unterscheiden:
  1. Tiefen 1—10 m CO<sub>2</sub>-Abnahme bis 0.
  2. „ 15—25 m CO<sub>2</sub>-Zunahme bis 100 % der Zugehörigkeit in 15 m sogar Maximum von 280 % Zugehörigkeit.
  3. „ 25—45 m CO<sub>2</sub>-Abnahme von hohen Werten der theoretischen Zugehörigkeit (150 bis 300 %) auf 100 % der Zugehörigkeit.
- b) In der Tiefe 15 m finden wir am Ende der Sommerstagnation einen maximalen Wert von 280 % der Zugehörigkeit, und gleichzeitig werden in dieser Tiefe minimale Sauerstoffwerte beobachtet.
- c) Die starke Kohlensäureabnahme im unteren Hypolimnion während der Sommerstagnation ist unseres Erachtens durch das Wiederlösen von bereits ausgefallter Seekreide während des Absinkens vom Epilimnion und Metalimnion zu erklären.
- d) Die biogene Entkalkung hat im Epilimnion Härteschwankungen von 40 % zur Folge. Die Abnahme der Härte ist nicht sprunghaft, sondern erfolgt langsam im Verlaufe der Sommerstagnation.

### 4. Methoden zur Bestimmung der Kohlensäureaggressivität

- a) Die Bestimmung der Aggressivität nach der Methode von R. Strohecker beruht auf der pH-Berechnung aus der gebundenen Kohlensäure und der pH-Messung in dem zu untersuchenden Wasser.
- b) Die Einflüsse von Fremdionen werden von Strohecker als gering bezeichnet; er schlägt aber vor, die Berechnungen mit Heyer-Versuchen zu kontrollieren.
- c) Die Methode verlangt pH-Bestimmungen, die auf 0,1 genau sind, was experimentell oft schwer zu erreichen ist.

### 5. Kombinierte Messung während 24 Stunden

- a) Wir stellen ein Metalimnion fest, das vertikale Schwingungen ausführt, möglicherweise verursacht durch turbulente Strömungen, die die stabile Schichtung stören.
- b) Die Grenze zwischen Meta- und Hypolimnion liegt in 10 m Tiefe. Infolge der erwähnten eigenartigen Schwingungen fällt diese Tiefe bald in die trophogene, bald in die tropholytische Zone. Hand in Hand mit den Temperaturschwankungen in dieser Tiefe wechselt auch die theoretische Sauerstoffsättigung.
- c) Die Planktonmessungen zeigen, daß das durchschnittliche Individuenmaximum im Metalimnion liegt.

Im Epilimnion werden mehr oder weniger ausgeglichene Mengen beobachtet. Die Planktonzahlen im oberen Hypolimnion treten gegenüber denjenigen im Metalimnion stark zurück.

### 6. Strömungsmessungen

- a) Der Hallwilersee ist allen Winden vollständig ausgesetzt.
- b) Bei konstanter Windrichtung bewegt sich die ganze oberflächliche Wassermasse (0 bis 10 m) in derselben Richtung. Der Strömungsausgleich erfolgt in der Tiefe.
- c) Auf der Birrwiler Seeseite ist festgestellt worden, daß sich die Wassermasse von 0 bis 30 m, mit abnehmender Geschwindigkeit nach der Tiefe, in derselben Richtung bewegt.
- d) Zu einem späteren Zeitpunkt wird konstatiert, daß in der Tiefe 15 m die Strömungsrichtung um  $180^{\circ}$  ändert und noch in 20 m eine Stundengeschwindigkeit von 30 m gemessen werden kann, während an der Oberfläche die Stundengeschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung 80 m beträgt.
- e) An der Oberfläche werden maximale Stundengeschwindigkeiten von 220 m und in der Tiefe 30 m noch solche von 30 m gemessen.

### 7. Der Chemismus des Sees

- a) Da keine umfassenden quantitativen Planktonmessungen durchgeführt wurden und weil die wenigen Analysen keine vollständige Charakterisierung erlauben, können die Befunde nur generell beurteilt werden.
- b) Wir haben im Hallwilersee keinen Minimumstoff im Sinne Liebigs gefunden. Die Nitratwerte sind in ihrer biologischen Bedeutung für den Hallwilersee nicht eindeutig, sodaß diese Frage noch offen bleiben muß.
- c) Das Phosphat erscheint im Hallwilersee als Eutrophierungsfaktor und ist deutlich geschichtet.
- d) Die Kieselsäure ist deutlich geschichtet, was beim Diatomeenreichtum des Sees zu erwarten war.
- e) Ammoniak und Schwefelwasserstoff treten im unteren Hypolimnion mit Werten von 0 bis 3,2 mg/l auf. Während Ammoniak am Ende der Sommerstagnation im ganzen Profil festgestellt wird, erscheint Schwefelwasserstoff nur bis zur Tiefe von 30 m.
- f) Die Werte der Oxydierbarkeit sind am Ende der Sommerstagnation zirka 25 % höher als 1919.

### 8. Schlammuntersuchungen

- a) Der Trockenrückstand besteht zu 70 % aus Kalzium- und Magnesiumkarbonat.
- b) Der negative Verlauf der Prüfung auf Gasungsfähigkeit lässt auf geringe Mengen organischer Substanz schließen und wurde durch die geringe Sauerstoffaufnahme und den kleinen Nitro-Effekt bestätigt.
- c) Der Gehalt des Schlammes an reduzierenden anorganischen Verbindungen, wie Sulfide, ist nicht außerordentlich. Die Sauerstoffaufnahme zeigte Werte, wie sie zur Oxydation der Sulfide (als  $H_2S$ ) nötig waren.
- d) Den erwähnten Eigenschaften nach zu schließen, ist der Hallwilerseeschlamm eher als Schlick, denn als Halbfaulschlamm zu taxieren.

## Literatur

1. *G. Alsterberg*, «Neue Beiträge zur Sauerstoffschichtung der Seen».
2. *F. A. Forel*, Handbuch der Seenkunde, «Allgemeine Limnologie», 1901.
3. *L. Minder*, «Zur Hydrophysik des Zürich- und Wallensees», Archiv für Hydrobiologie, Bd. XII, 1918.
4. *A. Güntert*, «Der Hallwilersee, ein verschwindender Glacialsee und seine Fauna», Inaugural-Diss. 1921.
5. *Brehm* und *Ruttner*, Revue für Hydrobiologie, 16, S. 290.
6. *L. Minder*, «Die Sauerstoffverhältnisse des Zürichsees im Wandel der letzten Jahrzehnte», 1934.
7. *M. Auerbach*, *W. Maerker* und *J. Schmalz*, «Hydrographisch-biologische Bodenseeuntersuchungen I», Archiv für Hydrobiologie, Suppl.-Bd. III, 1924.
8. *A. Brutschy* und *A. Güntert*, Gutachten über den Rückgang des Fischbestandes im Hallwilersee. 1918. Archiv für Hydrobiologie, Bd. XIV, 1923.
9. *A. Thienemann*, «Die Binnengewässer», Bd. IV: «Der Sauerstoff im eutrophen und oligotrophen See».
10. *H. Klut*, «Untersuchung des Wassers an Ort und Stelle», 7. Auflage.
11. *J. Tillmans*, «Die chemische Untersuchung von Wasser und Abwasser», 1932.
12. *Gärtner*, «Hygiene des Wassers», 1915, S. 882.
13. *K. Rechenberg*, Inaugural-Diss. der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Frankfurt a. M.
14. *F. Ruttner*, «Grundriß der Limnologie», S. 54, Berlin 1940.
15. *L. Minder*, «Über biogene Entkalkung im Zürichsee».
16. *W. Weith*, «Chemische Untersuchungen schweizerischer Gewässer mit Rücksicht auf deren Fauna». 1880.
17. *F. Nipkow*, «Vorläufige Mitteilungen über Untersuchungen des Schlammabsatzes im Zürichsee». Hydrologie 1920.
18. *L. Minder*, «Der Wäggitalersee», Hydrologie, Bd. VIII 3/4.
19. *M. Auerbach*, *W. Maerker* und *J. Schmalz*, «Hydrographisch-biologische Bodensee-Untersuchungen I», Ergebnisse der Jahre 1920/22, Archiv für Hydrobiologie, Suppl.-Bd. III, 1924.
20. *L. Minder*, «Der Zürichsee im Lichte der Seetypenlehre», 1943.
21. *L. Minder*, «Biologisch-chemische Untersuchungen im Zürichsee», Hydrologie, 3. Jahrgang, Heft 3/4, 1926.
22. *J. Tillmans* und *Heublein*, Gesundheits-Ingenieur 35, 669, 1912.
23. *F. Auerbach*, Gesundheits-Ingenieur 35, 869, 1912.
24. *J. Tillmans*, Zeitschrift für Untersuchung der Lebensmittel 58, 33, 1929.

25. *J. Tillmans, Hirsch und Heckmann*, Das Gas- und Wasserfach 1931, S. 74, 1.
26. *Heyer*, Gesundheits-Ingenieur 34, 1, 1912.
27. *R. Strohecker*, Zeitschrift für analytische Chemie 107, 321, 1936.
28. *R. Strohecker, K. Schilling und E. Budenbender*, Zeitschrift für Untersuchung der Lebensmittel 72, 299, 1936.
29. *Soracreppa*, «Die biologisch bedingten Korrosionseigenschaften des Zürichseewassers», Diss. ETH Zürich.
30. *R. Strohecker*, Das Gas- und Wasserfach 80, 524, 1937.
31. *W. Schmidt*, «Über den Energiengehalt der Seen», Revue 6, Suppl. 1915.
32. *H. Lozeron*, «La Répartition verticale du plancton dans le Lac de Zurich», Diss. der Universität Zürich.
33. *Max Städler*, «Untersuchungen über die hygienisch bedeutungsvollen Strömungsvorgänge im Zürichsee, besonders im untern Seebecken», Diss. ETH 1934.
34. *H. F. Kuisel*, «Neue Methoden in der Wasseranalyse», Helv. Chimica Acta Vol. XVIII, fasc. I, II und IV, 1934/35.
35. *W. von Gonzenbach*, «Wissenschaftliche Erforschung des Zürichsees in den Jahren 1929—1933».
36. *Elster und Einsele*, «Beiträge zur Hydrographie des Bodensees» (Obersee), Intern. Revue d. Ges. f. Hydro. u. Hydr. 1937, Bd. 35, Heft 4/6.
37. *Kubel-Tiemann*, «Tiemann-Gärtner's Handbuch der Untersuchung und Beurteilung der Wässer», 4. Aufl. 1895, S. 255.
38. *W. Ohle*, «Die Bedeutung der Austauschvorgänge zwischen Schlamm und Wasser für den Stoffwechselkreislauf der Gewässer», «Vom Wasser», Bd. XIII, 1938, S. 87.
39. *Tillmans und Mildner*, Journal f. Gasbel. m. Wasservers. 1914, 57, 496, 523, 544.
40. *L. Minder*, «Biologisch-chemische Untersuchungen im Zürichsee», Zeitschrift für Hydrologie 3, 1926.
41. *F. Ruttner*, Grundriß der Limnologie, Berlin 1940.
42. *F. Geßner*, «Phosphat und Nitrat als Produktionsfaktoren der Gewässer», Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie, Bd. VII, 1935.
43. *Bujwid*, Ver. Wasser-, Boden-, Lufthygiene 1932, 8, 37.
44. *H. Müller*, «Über das Auftreten von Nitrit in einigen Seen der österreichischen Alpen», Intern. Revue d. Ges. f. Hydro. u. Hydr. 1934, 30.
45. *W. Einsele und H. Vetter*, «Untersuchungen über die Entwicklung der physikalischen und chemischen Verhältnisse im Jahreszyklus in einem mäßig eutrophen See».
46. *F. Geßner*, «Die Phosphatarmut der Gewässer und ihre Beziehung zum Kalkgehalt», Revue der Hydrobiologie 1938/39.

47. *W. Einsele*. «Über die Beziehung des Eisenkreislaufes zum Phosphorkreislauf im eutrophen See», Archiv 29, 1936.
48. *L. W. Winkler*, Zeitschrift für analytische Chemie, 1901, S. 772.
49. *Fresenius*, Quant. Chem. Analyse, 6. Aufl., 1, 502.
50. *Urbach*, Mikrochemie 1934, 14, 189.
51. *Sierp und Fränsemeyer*, Techn. Gemeindeblatt, 1927, 30, 179.