

Beiträge zur Geologie der Schweiz — Hydrologie

Nr. 9

Herausgegeben von der Schweizerischen Geotechnischen Kommission und der
Hydrologischen Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft

**Vergleichende
limnologische Untersuchungen
an sieben Schweizerseen**

von Paul Nydegger

Kommissionsverlag: Geographischer Verlag Kümmerly & Frey, Bern

Bern 1957

Druck: Buchdruckerei Aeschlimann & Cie., Thun

VORWORT DER HYDROLOGISCHEN KOMMISSION

Angeregt durch Herrn Prof. Dr. F. Gyax führte Herr P. Nydegger in den Jahren 1951–1957 vergleichende limnologische Forschungen an sieben Schweizerseen durch, Studien, welche an die als Lieferung 7 unserer Beiträge im Jahre 1952 erschienene Arbeit Hofer «Ueber die Energieverhältnisse des Brienzersees» anschließen. Die Hydrologische Kommission hat in ihrer Sitzung vom 13. Dezember 1956 dem Antrag von Herrn Prof. Gyax zugestimmt, die nun vorliegende Arbeit Nydegger in ihre Publikationsserie «Hydrologie» aufzunehmen und einen Beitrag an die Druckkosten zu gewähren.

Die Arbeit Hofer befaßt sich zur Hauptsache mit der Wärmebilanz und den Stabilitätsverhältnissen eines Nordalpensees. Sie öffnet den Blick für zahlreiche neue Probleme. Es erwies sich als notwendig, die Untersuchungen auf breiterer Basis durchzuführen und auf Seen mit wesentlich anderen Bedingungen bezüglich geographischer Lage, Topographie, Hydrologie und Chemismus auszuweiten. Zugleich wurde der Strahlungshaushalt

dieser Seen studiert. Dazu wurden mehrere limnologische Untersuchungsgeräte neu konstruiert und fortlaufend weiterentwickelt: Elektrothermometer, verschiedene Lichtmeßgeräte, Schöpfflasche, elektrisches Sauerstofflot (erstmalige Anwendung in der Schweiz auf Grund der Angaben in einer Publikation von W. Ohle, Plön). Diese langjährig und streng periodisch betriebenen Messungen ergaben äußerst wertvolle Ergebnisse, so z. B. über die Abhängigkeit des Lichtklimas eines Sees von der Durchflutung und dem biologischen Geschehen, sowie über die dominierende Rolle der Oberflächengröße der Seen für die Durchmischungstiefe und damit für den Umfang des jährlichen Wärmeumsatzes. Der Verfasser beabsichtigt, Untersuchungen in dieser Hinsicht in den nächsten Jahren weiterzuführen.

Die Kommission dankt Herrn Prof. Gyax für seine jahrelangen Bemühungen um das Gelingen der Arbeit.

Für den Inhalt von Text und Figuren ist der Verfasser allein verantwortlich.

Zürich, den 31. Oktober 1957

Für die Hydrologische Kommission der SNG

Der Präsident:

Prof. G. Schnitter

Inhaltsübersicht

I. Einleitung	
A. Ziel und Umfang der Untersuchungen	7
B. Die untersuchten Seen	7
C. Die Untersuchungs- und Entnahmestellen	7
II. Optik	
A. Bedeutung und Ziel der Lichtmessungen in Seen	8
B. Ueberblick über die theoretischen Grundlagen	
1. Reflexion der Strahlung an Wasseroberflächen	9
2. Berechnung und Weglänge der eindringenden Strahlen	9
3. Extinktion der Strahlung im Wasser	10
C. Methodik der Tageslichtmessung	
1. Uebersicht	10
2. Die Messvorrichtung	11
a) Der Strahlungsempfänger	11
b) Das Ableseinstrument	12
c) Das Filterproblem	12
d) Montage des Meßgerätes	13
e) Meßvorgang und Auswertung der Meßergebnisse	13
D. Morphometrie, Hydrologie und Trophiegrad der untersuchten Seen	14
E. Meßergebnisse	
1. Die spektrale Lichtdurchlässigkeit	14
2. Unterlicht	19
3. Zeitliche Aenderungen der Lichtdurchlässigkeit, des Unterlichtes und der Sichttiefe	23
4. Sichttiefe und Lichtdurchlässigkeit	29
III. Thermik	
A. Einleitung	31
B. Meßmethodik	31
C. Betrachtungen über den jahreszeitlichen Temperaturverlauf in den einzelnen Seen	
1. Allgemeines	32
2. Vergleich der klimatischen, morphometrischen und hydrologischen Größen in den Gebieten der untersuchten Seen	
a) Klimatische Größen	33
b) Morphometrische Größen	35
c) Hydrologische Größen	35
3. Charakteristische Merkmale des Temperaturverlaufes in den einzelnen Seen	
a) März/April 1953	35
b) Mai/Juni 1953	36
c) August 1953	36
d) Oktober 1953	37
e) Erwärmungshalbjahr 1954	38
f) Grad der winterlichen Abkühlung	38
g) Die Temperaturen und deren Verlauf in den Tiefen der Seen — Seetypen	41
4. Über die thermische Schichtung von Wassermassen	42
5. Kurventypen und Durchmischungstiefe	44
D. Wärmeinhalt — Wärmebilanz	
1. Allgemeines	50
2. Methodisches	51
3. Jahreszeitlicher Verlauf der Mitteltemperatur	51
4. Die Wärmeamplituden	52
5. Abschätzung der einzelnen Wärmebilanzposten	52
IV. Chemismus	
A. Allgemeine Ueberlegungen	57
B. Untersuchungsmethodik	
1. Probeentnahme	58
2. Die Bestimmung von Nitrat und Phosphat	59
3. Sauerstoffbestimmung	59
4. Härtebestimmung	59
C. Nitrate und Phosphate	59
D. Die Sauerstoffverhältnisse	61
E. Karbonathärte	68
F. Chemische und bakteriologische Untersuchungen von Thunerseewasserproben	70
V. Korrelation von thermischer, optischer und chemischer Schichtung	
A. Allgemeines	70
B. Meßgeräte	71
C. Diskussion der Ergebnisse	71
Zusammenfassung	76
Verwendete Literatur	78

I. EINLEITUNG

A. Ziel und Umfang der Untersuchungen

Die vorliegende Arbeit stellt die Fortsetzung einer Serie von Untersuchungen an Schweizerseen dar, die mit einer eingehenden Betrachtung über die Energieverhältnisse des Brienzersees (F. Hofer [29]) vom Geographischen Institut der Universität Bern 1947 begonnen wurde und an Hochgebirgsseen gegenwärtig weitergeführt wird.

Wir verfolgten folgende Ziele:

1. Die optischen und thermischen Verhältnisse mehrerer Seen sollten in ihrer örtlichen und zeitlichen Veränderung beobachtet werden.
2. Durch Wahl geeigneter Gewässer mit einerseits ähnlichen, andererseits sehr unterschiedlichen Eigenschaften morphologischer, hydrologischer und klimatischer Art hofften wir wertvolle Einblicke in die Bedeutung dieser Faktoren für das thermische, optische, chemische und biologische Geschehen in Seen zu gewinnen.
3. Trotzdem unsere Untersuchungen vor allem den physikalischen Milieufaktoren galten, bestimmten wir regelmäßige Härte und Sauerstoffgehalt sowie vereinzelt auch die wichtigsten Nährstoffe. Dieser Einblick in die Produktionsverhältnisse erlaubte uns, jeden See mehr oder weniger als Ganzes, als Lebensraum zu erfassen.

1951—52 führten wir hauptsächlich Temperaturmessungen an Thuner- und Brienzensee durch. Gleichzeitig entwickelten und erprobten wir eine Lichtmeßapparatur. 1953 und 1954 wurden durchschnittlich je sechs Meßserien pro Jahr und 1955 eine Sommer-, 1955/56 eine Winterserie in sieben Schweizerseen aufgenommen.

Von Oktober 1953 bis Oktober 1954 wurden im Auftrage der Licht- und Wasserwerke Thun und des Wasserrechtsamtes des Kantons Bern an Wasserproben, die wir dem Kantonalen chemischen Laboratorium in Bern zur Verfügung stellten, chemische und bakteriologische Analysen durchgeführt. (Siehe Tabelle 24.)

Im ganzen ergaben sich 162 halb- oder ganztägige Exkursionen.

Es würde zu weit führen, alle diejenigen zu nennen, die durch wertvolle Hinweise, Angaben und Handreichungen am Zustandekommen der vorliegenden Arbeit beteiligt sind. Ihnen allen sei der herzlichste Dank ausgesprochen.

Durch verschiedene Stipendien aus der Hallerstiftung und dem Nationalfonds sowie durch namhafte Beiträge aus dem Kredit des Geographischen Institutes war es mir möglich, die Meßgeräte zu konstruieren und die Auslagen für Reisen und Bootmiete teilweise zu bestreiten. Mein Dank gilt deshalb auch den genannten Institutionen und

vor allem dem Leiter des geographischen Institutes, Herrn Prof. Dr. Gygax, der mich stets tatkräftig unterstützte und auf meinen Exkursionen mehrmals begleitete.

Zum Gelingen der vorliegenden Arbeit trug meine Gattin wesentlich bei. Auf den Exkursionen, wie bei der Auswertung der Meßergebnisse, war sie mir ein unübertrefflicher und sachkundiger Mitarbeiter.

Die Reinzeichnung der Abbildungen besorgte größtenteils Herr M. Niklaus, Assistent am geographischen Institut in Bern.

B. Die untersuchten Seen

Abb. 1 läßt alles Wesentliche der betreffenden Seen über Oberflächengröße, ihre Gliederung und die Lage zur Nordrichtung erkennen. In den Seen, deren Oberflächen in Abb. 1 nur teilweise schraffiert erscheinen, erstreckten sich die Untersuchungen in der Hauptsache nur auf diese Abschnitte (Zürich- und Luganersee).

Abb. 2 zeigt anhand hypsographischer Diagramme die morphometrischen Verhältnisse der einzelnen Seebecken und die ungefähren Größen von Hypolimnion und Epilimnion. Die einzelnen Schichtvolumen wurden mit Hilfe genauer Karten und eines Präzisionsplanimeters auf der Eidg. Landestopographie in Bern ermittelt. Den betreffenden Verwaltungsinstanzen sei an dieser Stelle ihr weitgehendes Entgegenkommen verdankt.

Weitere vergleichende Angaben über die untersuchten Gewässer sind, je nach ihrer Bedeutung für die betreffenden Fragen, den Betrachtungen über Optik, Thermik usw. eingegliedert.

C. Die Untersuchungs- und Entnahmestellen

Nach Möglichkeit wurden die Untersuchungen stets an derselben Stelle eines Sees durchgeführt. Bestand Verdacht auf Sprungschichtneigung (nach windigen Perioden), so wurde von einem zweiten Punkt aus eine weitere Temperaturkurve aufgenommen. Eine Sprungschichtneigung von 8 m auf 12 km Horizontaldistanz konnten wir z. B. im Sommer 1953 im Thunersee feststellen. Die betreffenden Meßergebnisse wurden deshalb, wie auch in einigen weiteren Fällen, nicht verwendet. Soweit im folgenden nichts vermerkt wird, wurden die Untersuchungen an folgenden Stellen durchgeführt:

Thunersee:	1951/52 300 m nordöstlich Säge Leissigen. Ab 1953 600 m südlich Schiffstation Hilterfingen.
Brienzersee:	600 m nordwestlich Säge Erschwanden.
Bieleree:	1 km südöstlich Kirche Twann.
Murtensee:	1 km westlich Schiffstation Murten.
Zürichsee:	Seemitte vor Schiffstation Thalwil.
Rootsee:	Tiefste Stelle.
Luganersee:	1300 m westlich Schiffstation Paradiso.

Abbildung 1
Oberflächengröße und Gliederung der untersuchten Seen.

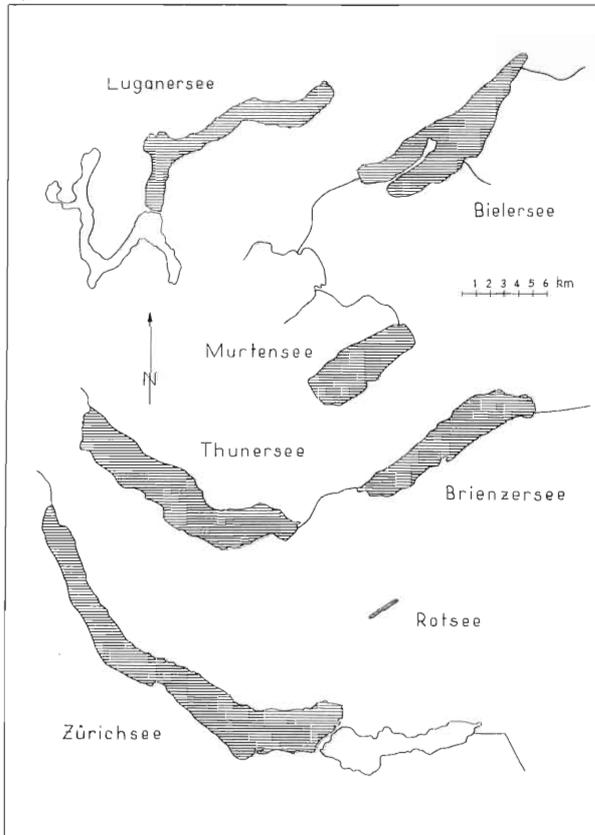
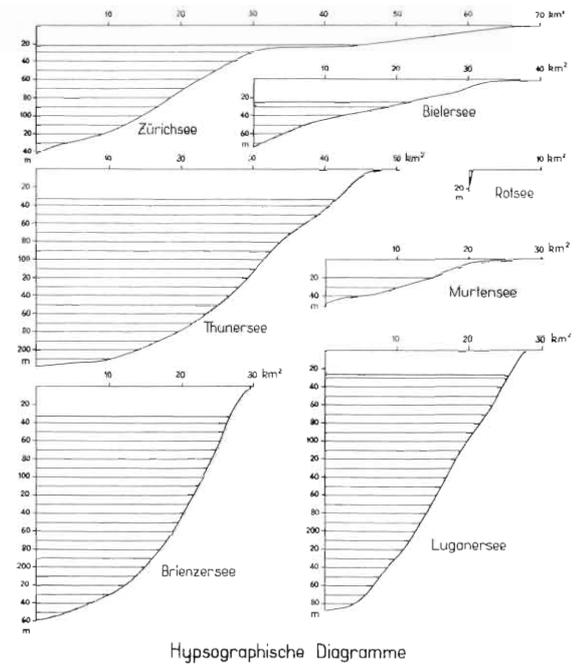


Abbildung 2
Hypsographische Diagramme. Die schraffierten Flächen zeigen die ungefähre Größe des Hypolimnions der untersuchten Seen.



II. OPTIK

A. Bedeutung und Ziel der Lichtmessungen in Seen

Lichtmessungen an stehenden und fließenden Gewässern dienen im allgemeinen der Abklärung folgender Fragen:

1. Der Biologe möchte wissen, welche Lichtintensität ein Organismus in einer bestimmten Tiefe

zu erwarten hat. Ferner interessiert ihn die Strahlungssumme über einen bestimmten Zeitabschnitt, die Tiefenlage des Kompensationspunktes, die Qualität des vorhandenen Lichtes (spektrale Zusammensetzung) und evtl. die Richtungsverteilung. Denn Licht und Wärme sind der eigentliche Motor des biologischen Geschehens.

2. Der Geograph interessiert sich vor allem um die zugestrahlte Wärmemenge und die Tiefe ihres Eindringens. Außerdem können spektrale Messungen des Lichtanteiles, der durch Streuung und Reflexion nach oben geworfen wird, des sogenannten Unterlichtes, unter Umständen mithilfe, den Fragenkomplex nach Entstehung der mannigfaltigen Farben unserer Seen und Flüsse zu klären.
3. Grundlegend neue Möglichkeiten werden sich aber für die limnologische Forschung ergeben, wenn die Strahlungsmessung einen entsprechenden Stand erreicht haben wird. Ist es doch heute schon möglich, aus Messungen der spektralen Lichtdurchlässigkeit sowie der spektralen Verteilung des Unterlichtes weitgehende Schlüsse auf Zusammensetzung und Zustand eines Gewässers zu ziehen. Laboratoriumsmessungen, die in dieser Hinsicht einen bedeutenden Ausbau erfahren haben, sind sehr zeitraubend und zur Untersuchung von Seewasser selten geeignet. Denn in Seen zeigen sich meist nur sehr geringe Qualitätsunterschiede bei Wasserproben verschiedener Tiefen, so daß bedeutende Wassermengen geschöpft werden müßten, um eine genügend lange Extinktionsstrecke im Kolorimeter zu ermöglichen. Zudem verändern sich Wasserproben nach Entnahme aus ihrer natürlichen Umgebung sehr rasch. Methodik und Geräte für die Lichtmessung an Ort und Stelle sollten deshalb weiter entwickelt werden. Es gilt, dem Limnologen ein handliches und zuverlässiges Exkursionsgerät zur Verfügung zu stellen.

Während aus Nordamerika, Schweden, Oesterreich und andern Ländern schon recht umfangreiche Ergebnisse aus Lichtmessungen in Seen vorliegen, wurde in der Schweiz auf diesem Gebiet bis heute nur sehr wenig gearbeitet. Versuche mit Schwarzkugelthermometern wurden 1934 von Suchland und Schmaßmann in den Davoserseen durchgeführt. Einige Ergebnisse liegen auch aus dem Vierwaldstättersee vor. Diese Messungen fanden 1949 unter Leitung von Dr. Wolff durch O. Graber, Luzern, statt. Leider wurde unterlassen, zugleich das Unterlicht zu messen. Gleichzeitig mit unseren Untersuchungen wurden durch R. Vollenweider von Pallanza aus Lichtmessungen im Langensee durchgeführt. Unsere Untersuchungen sollen also mithilfe, eine empfindliche Lücke in der Seenkunde der Schweiz zu schließen.

Durch gleichzeitige Verwendung der Secchi-Scheibe versuchten wir, den Zuverlässigkeitsgrad dieser bisherigen Standardmethode der Durchsichtigkeitsmessung abzuschätzen.

Wir glauben, daß regelmäßige Lichtmessungen über das ganze Jahr zum Ausbau der Strahlungsmessungen als Analysenmethode wertvolle Anhaltspunkte liefern können. Denn das biologische Geschehen sowie Wasserführung, Turbulenz und

thermische und chemische Schichtungen müssen in der spektralen Absorption und Streuung ihren Ausdruck finden. Zudem ist, wie die Ergebnisse zeigen werden, die Bestimmung des Lichtcharakters eines Sees aus vereinzelt Messungen mehr oder weniger zufällig und zum mindesten gewagt.

B. Überblick über die theoretischen Grundlagen

1. *Reflexion der Strahlung an Wasseroberflächen*
Nach Lauscher [39] beträgt die Reflexion der Sonnenstrahlung an Wasseroberflächen je nach dem Einfallswinkel 89,2 bis 2 %. Da aber der Anteil der Himmelsstrahlung an der Totalstrahlung berücksichtigt werden muß und dieser Anteil bei abnehmender Sonnenhöhe prozentual wächst, wird der Wert von 89,2 % praktisch nie erreicht. Die Angaben über den durchschnittlichen Reflexionsbetrag der Totalstrahlung gehen bei verschiedenen Autoren weit auseinander. So fanden Kimball und Hand bei Beobachtung aus 1000 m Höhe eine durchschnittliche Reflexion von 5—9 % an der Meeresoberfläche. Poole und Atkins (1926) sowie Whitney (1938) fanden 7 % für diffuses Tageslicht. Um die Reflexion bei unseren Messungen nicht berücksichtigen zu müssen, wurde der Strahlungsempfänger an der Seeoberfläche stets einige mm untergetaucht, so daß schon in «0 m Tiefe» nur die effektiv eindringende Strahlungsintensität gemessen wurde.

2. *Brechung und Weglänge der eindringenden Strahlen*

Die Brechung des Lichtes beim Eintritt in Wasser ist für die Tageslichtmessung von großer Bedeutung, da sie die effektive Weglänge eines Lichtstrahls im Wasser, gegenüber der Weglänge in Luft, bei gleicher Schichtdicke, wesentlich verkürzt. So beträgt z. B. die Weglänge bei 1 m Schichtdicke und einer Sonnenhöhe von 15° in Luft 3,85 m, im Wasser aber nur 1,45 m.

Bei einem Einfallswinkel von 45° ergibt sich in der 1 m mächtigen Wasserschicht ein effektiver Lichtweg von 1,18 m. Diese Strecke wurde von uns als Mittelwert angenommen. Um untereinander vergleichbare Angaben zu erhalten, reduzierten wir jeweils die Sonnenstrahlung ebenfalls auf einen Einfallswinkel von 45°.¹ Diese Reduktion geschah anhand von Tabellen, die

¹ Während bis heute normalerweise auf Zenitsonnenstand reduziert wurde (Shelifford und Gall 1922, Birge und Juday 1932, Eckel 1935), wählten wir 45°, weil dieser Sonnenstand den tatsächlichen Verhältnissen besser entspricht. (Siehe auch Sauberer und Ruttner [62], S. 75.)

von Whitney (1938) ausgearbeitet wurden und die die Abhängigkeit der mittleren Weglänge von Sonnenhöhe und Prozentsatz der Himmelsstrahlung zeigen. (Siehe Sauberer und Ruttner [62], S. 74.)

3. Extinktion der Strahlung im Wasser.

Ein paralleles und monochromatisches Lichtbündel erfährt im Wasser folgende Veränderung (Gesetz von Lambert):

$$J_x = J_0 \cdot e^{-\epsilon x}$$

J_x = Intensität des Lichtbündels nach Durchdringen einer Schicht von der Dicke x

J_0 = Intensität des einfallenden Lichtbündels

ϵ = Extinktionskoeffizient

(pro m wenn x in m angegeben wird)

Bei natürlichem, also nichtmonochromatischem Licht, wird ϵ eine Funktion der Schichtdicke, weil Komponenten mit großem ϵ_λ eine kleinere Halbwertstrecke besitzen als solche mit kleinem ϵ_λ . ϵ nimmt deshalb mit der Tiefe ab. Der Fehler wird um so kleiner, je schmaler der zur Messung ausfiltrierte Spektralbereich gewählt wird. (Siehe Abschnitt «Das Filterproblem» S. 12.)

Eine weitere Erschwerung bringt die Tatsache, daß wir es bei unserer Messung nicht nur mit parallel einfallendem Licht, sondern auch mit diffuser Strahlung zu tun haben. Um diesen komplizierten Verhältnissen gerecht zu werden, wurde der Begriff des «vertikalen Extinktionskoeffizienten» in die Limnologie eingeführt. (Siehe hierüber Sauberer und Ruttner [62] S. 62.) Der «vertikale Extinktionskoeffizient» ist stets größer als der «physikalische». Für Himmelsstrahlung z. B., für die wir einen mittleren Lichtweg von 1,18 m in der Meterschicht annehmen, entspricht die vertikale Extinktion in dieser Meterschicht einer physikalischen Extinktion auf 1,18 m Lichtweg.

Ein weiterer Grund für die Abnahme des vertikalen Extinktionskoeffizienten mit der Tiefe liegt nun darin, daß der Lichtweg für die Strahlen bei einer bestimmten Vertikaldistanz um so größer ist, die Extinktion also auf einer um so längeren Strecke wirkt, je schräger die Strahlen einfallen. Dadurch nimmt der prozentuale Anteil der steiler einfallenden Strahlen an der Gesamtstrahlung mit der Tiefe zu, und die mittlere Länge des Lichtweges nimmt entsprechend ab. Mit zunehmender Streuung wird aber dieser Fehler kleiner und muß in natürlichen Gewässern, beim heutigen Stand der Meßgenauigkeit, wohl noch vernachlässigt werden. Er wird zu berücksichtigen sein, wenn einmal sehr schmale Lichtfilter verwendet werden können, so daß das durchtretende Lichtbündel praktisch als monochromatisch betrachtet werden darf.

Folgende Faktoren bewirken Extinktion:

- Absorption in reinem Wasser;
- Absorption durch die im Wasser gelösten und suspendierten Stoffe;
- Molekulare Streuung in reinem Wasser;
- Streuung und Reflexion durch die wasserfremden Substanzen.

Zerlegen wir ϵ_T in ϵ_W , ϵ_M , ϵ_G und ϵ_S so gilt:

$$J_x = J_0 \cdot e^{-x(\epsilon_W + \epsilon_M + \epsilon_G + \epsilon_S)}$$

ϵ_T = totaler Extinktionskoeffizient;

ϵ_W = Extinktionskoeffizient für Absorption im reinen Wasser;

ϵ_M = Extinktionskoeffizient für molekulare Streuung;

ϵ_G = Extinktionskoeffizient für Absorption durch gelöste Stoffe;

ϵ_S = Extinktionskoeffizient für Streuung an wasserfremden Substanzen.

Der Extinktionskoeffizient kann also in additive Komponenten zerlegt werden, was von großem Vorteil ist. Trotzdem wird in der Limnologie die Lichtdurchlässigkeit eines Gewässers gewöhnlich in Prozenten angegeben. T_k wird als Transmissionskoeffizient der Meterschicht bezeichnet, und wir schreiben:

$$T_k(x) = 100 \cdot \frac{J_x}{J_0} \text{ und } T_k(x) = 100 \cdot e^{-\epsilon x}$$

C. Methodik der Tageslichtmessung

1. Übersicht.

Indem wir auf die ausführliche Darstellung bei Sauberer und Ruttner [62] S. 174—213 verweisen, können wir uns hier kurz fassen.

Zu den Schwierigkeiten der atmosphärischen Strahlungsmessung gesellen sich folgende Probleme:

- Wasserdichter und drucksicherer Einschluß des Strahlungsempfängers.
- Da das Gerät versenkt werden muß, ist entweder eine Vorrichtung zum Ab- und Zudecken des lichtempfindlichen Teiles in der gewünschten Tiefe oder, bei elektrischen Geräten, ein Stromleiter (Kabel) notwendig. (Isolation!)
- Die Möglichkeit der Beschattung durch Boot und Kabel muß beachtet werden.
- Gleichgewichtsschwankungen des Bootes setzen der Empfindlichkeit der elektrischen Meßinstrumente, die möglichst groß sein sollte, sehr bald eine Grenze.
- Die maximale Empfindlichkeit der Ablesinstrumente begrenzt aber die Breite des ausgefilterten Spektralbereiches. Dieser soll möglichst schmal sein, um die Forderung nach mono-

chromatischer Strahlung weitgehend zu erfüllen, muß aber andererseits so breit gehalten werden, daß die durchtretende Strahlungsenergie noch einen genügenden Photostrom und somit einen vernünftigen Ausschlag am Ablesinstrument ergibt.

Wohl zufolge der genannten Schwierigkeiten sind die Kenntnisse des Strahlungsklimas in Gewässern verhältnismäßig jung. Wir werden sehen, daß die Standardmethode der Sichttiefebestimmung mit der Secchischeibe¹ meist recht unzuverlässige Angaben über die in einer bestimmten Tiefe vorhandene Strahlungsintensität ergeben mußte. Versuche mit lichtempfindlichen Platten, die in die Tiefe versenkt und dort exponiert wurden, konnten ebenfalls nicht befriedigen.

Gute Ergebnisse wurden aber von Birge und Juday (1929—32) in Nordamerika bei Messungen mit Thermosäulen erzielt.

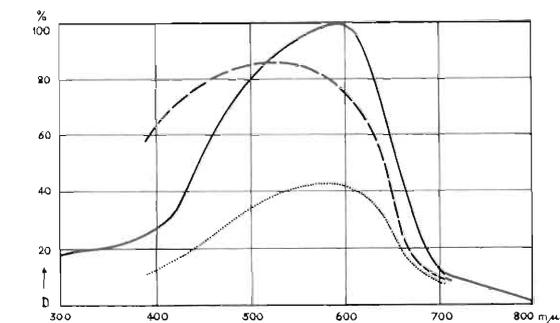
Einen weiteren Schritt bedeutete dann die Verwendung von Photozellen (Shelford und Gall, Puget 1920).

Aber erst die Sperrschichtphotoelemente brachten, dank der einfachen Handhabung, eine wesentliche Näherung an das Ziel, die Strahlungsmessung zu einem normalen Bestandteil der limnologischen Untersuchung werden zu lassen.

Hier müssen als Forscher Pearsall, Pettersson, Poole, Suchlandt und vor allem Sauberer und Ruttner [62] erwähnt werden.

Sperrschichtphotoelemente sind zu Strahlungsmessungen in Gewässern auch deshalb besonders geeignet, weil ihre Empfindlichkeitskurve den Licht-Durchlässigkeitskurven für Seewasser sehr ähnlich sind (siehe Abb. 3).

Abbildung 3



————— Spektrale Empfindlichkeitsverteilung einer Sperrschichtphotozelle
 - - - - - mittlere Transmissionskurve für Thunersseewasser
 mittlere Transmissionskurve für Rootseewasser

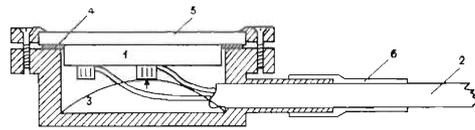
¹ Die Secchischeibe ist eine runde, meist weiße Platte von ca. 25 cm Durchmesser. Diese wird an einer Schnur ins Wasser versenkt, wobei die Tiefe des optischen Verschwindens als Sichttiefe bezeichnet wird.

2. Die Meßvorrichtung

a) Der Strahlungsempfänger

Die Sperrschichtphotozelle, System Lange, Berlin, mit 11 cm² Nutzfläche, wurde wasserdicht in ein Aluminiumgehäuse eingeschlossen (siehe Abb. 4).

Abbildung 4



Schematischer Schnitt durch die Zellenfassung

- 1 = Photoelement
- 2 = Kabel
- 3 = Feder aus Glimmer zum Anpressen der Zelle an die Glaswand
- 4 = Gummiring
- 5 = Platte aus unzerbrechlichem Glas
- 6 = Schlauchstück zum Abdichten (Ventilprinzip)

Um den Zellenraum trocken zu halten, werden einige Körner Silikagel eingelegt. Der Ring zum Aufpressen der Glasplatte wurde möglichst schmal gehalten, damit auch sehr schräg einfallende Strahlen die lichtempfindliche Fläche des Photoelementes noch treffen.

Beim Arbeiten mit Sperrschichtphotozellen müssen verschiedene Punkte beachtet werden. Uebersteigt z. B. die auffallende Beleuchtungsstärke 1000 Lux, so besteht keine angenäherte Linearität zwischen Lichtintensität und Zellenstrom mehr. Durch neutrale Dämpfungfilter kann die auffallende Intensität geregelt werden. Nach Möglichkeit arbeiteten wir mit Beleuchtungsstärken zwischen 10 und 500 Lux.

Eine weitere Fehlerquelle liegt in der Temperaturabhängigkeit des Photostromes der Sperrschichtzellen. Diese nimmt mit wachsendem Außenwiderstand und ebenfalls mit wachsender Beleuchtungsstärke zu.¹

Tabelle 1

Bel.stärke in Lux	Widerstand im Außenstromkreis in Ohm	Änderung des Photostromes
250	200	± 2 ‰
	1000	± 5 ‰
1000	200	± 3,5 ‰
	1000	± 5 ‰

Schwankungen des Photostromes pro Grad Temperaturänderung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke (Zelle mit 11 cm² Nutzfläche).

¹ Diesem Umstand suchten wir durch entsprechende Schaltanordnung im Außenstromkreis Rechnung zu tragen (siehe Abschnitt b) Ablesinstrument).

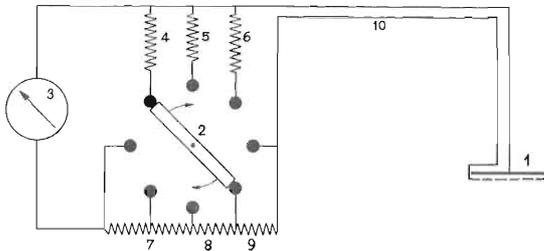
Gewöhnlich wurde mit zwei Zellen, von denen eine nach unten und die andere nach oben gerichtet war, gleichzeitig gemessen. (Berechnung des Unterlichtes in % des Oberlichtes.)

Die beiden Zellen zeigten gleiche spektrale Empfindlichkeit und waren von der Firma *L a n g e*, Berlin, entsprechend ausgesucht worden.

b) Das Ablesinstrument

Zur Messung der sehr schwachen Photoströme diente ein empfindliches Spannbandgalvanometer mit 300 Ohm Innenwiderstand. Dieses wurde für die Meßbereiche 0—12, 0—50, 0—300 und 0—1200 Lux geeicht. Durch entsprechende Kombination von Parallel- und Seriewiderständen wurde erreicht, daß der Instrumentenwiderstand für jeden Meßbereich ungefähr gleich blieb. (Siehe Abbildung 5.)

Abbildung 5



Schaltschema für unsere Lichtmessungen

- 1 = Sperschichtphotoelement
- 2 = Schalter
- 3 = Galvanometer
- 4—6 = Shuntwiderstände
- 7—9 = Vorschaltwiderstände
- 10 = Kabel

Für jeden Meßbereich wurde gesondert geeicht. Es zeigte sich, daß oft Nacheichungen nötig wurden, weil die Empfindlichkeit der Zellen mit der Zeit nachläßt.

c) Das Filterproblem

Um bei der Lichtmessung eine Unterteilung in einzelne Spektralbereiche zu erreichen, wurden die Photoelemente mit Farbfiltern der Firma *S c h o t t & G e n.*, Jena, bedeckt (Dicke 2 mm). Tabelle Nr. 2 enthält die wichtigsten Angaben über die verwendeten Filter.

Als Folge der recht großen spektralen Breite der Schott-Filter muß sich eine mit wachsender Dicke der von den Strahlen durchlaufenen Wasserschicht zunehmende Verschiebung des Durchlässigkeitschwerpunktes in Richtung maximaler Durchlässigkeit und damit eine Veränderung des Extinktionskoeffizienten ergeben. Denn die Wasserschicht zwischen Oberfläche und Photoelement wirkt ebenfalls als «Farbfilter» und, wie wir bereits auf Seite 10 ausführten, werden die Strahlen mit großem ϵ_λ am raschesten ausgelöscht.

Tabelle 2

Filter		Filter+Photoelement		
Filter	Durchlässigkeitsmax. $m\mu$	Opt. Schwerpkt. $m\mu$	Halbwertsbreite $m\mu$	Transmissionsgrenze ($D = 10^{-6}$)
UG ₁ + BG ₁₂	365	370	42	315—409
BG ₁₂	441	423	110	310—510
VG ₉	527	533	90	435—640
OG ₂	über 605	610	110	535—860
RG ₂	über 650	675	40	638—860
RG ₅	über 675	695	50	642—860

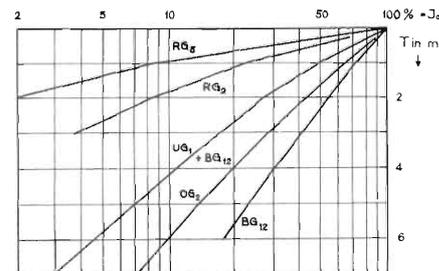
Daten der verwendeten Lichtfilter.

(Nach Angaben von *J o s e p h* [32], *S a u b e r e r* [62] und nach persönlichen Berechnungen anhand des Kataloges der Firma *S c h o t t & G e n.*)

Bei optisch homogenem Wasser muß deshalb die Durchlässigkeit nach der Tiefe zu scheinbar zunehmen, und zwar um so mehr, je weiter der betreffende Filterbereich vom Bereich maximaler Durchlässigkeit entfernt liegt (siehe Abbildung 6). Der Fehler wird in den obersten Wasserschichten am größten sein und kann in größerer Meßtiefe vernachlässigt werden.

Ebenso wird der Betrag der Schwerpunktverschiebung mit wachsender Tiefe kleiner.

Abbildung 6



Lichtdurchlässigkeit des Brienzerseewassers am 1. 1. 1956, Lichtintensität in Prozenten der eindringenden Strahlung auf der Abszisse, Meßtiefe auf der Ordinate aufgetragen. Da die Abnahme der Intensität logarithmisch erfolgt, sollte sich bei idealer Meßanordnung und optisch homogenem Wasser eine Gerade ergeben.

Wir verweisen im weiteren auf die Ausführungen von *J o a c h i m J o s e p h* in der «Deutschen Hydrographischen Zeitschrift» Jahrgang 1949, auf Seiten 255 bis 267.

Zur genauen Bestimmung der momentanen Transmissionskurven eines Gewässers wählten wir folgenden Weg:

Aus einer ersten Messung wurde für eine bestimmte Schichtdicke des Wassers eine Transmissionskurve ermittelt. Dann bestimmten wir die Lage der optischen Schwerpunkte für die Kombination Filterwirkung der Wasserschicht + Schottfilter + spektrale Empfindlichkeit Photoelement graphisch. Mit Hilfe der gefundenen Schwerpunktlagen und der in der entsprechenden Tiefe gemessenen Durchlässigkeit wurde eine zweite, oft eine dritte und vierte Transmissionskurve konstruiert.

Trotz den genannten Schwierigkeiten betrachten wir die verwendeten Schott-Filter als für Lichtmessungen in Seen geeignet. Wohl ließen sich durch Interferenzfilter engere Spektralbereiche herauschneiden. Dies würde aber eine Verminderung der durchgelassenen Strahlungsintensität und damit eine Herabsetzung der Meßgenauigkeit mit sich bringen.

d) *Montage des Meßgerätes (Abb. 7)*

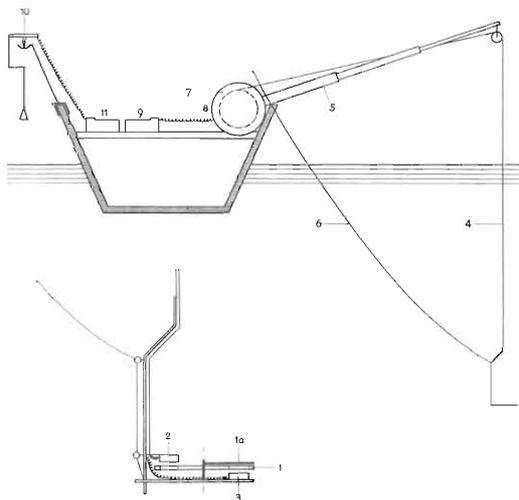
Die Filter werden in die kreisförmig angeordneten Öffnungen einer Metallscheibe von 30 cm Durch-

messer eingelegt und können durch Schnurzug nach «Revolverprinzip» vor die horizontal liegenden, nach oben und unten gerichteten Photoelemente geschoben werden. Das obere Zellgehäuse liegt auf der Filterscheibe, das untere wird durch eine Feder gegen diese gedrückt. Dies erwies sich als zweckmäßig, um seitlichen Lichteinfall zwischen Filter und Zellengehäuse zu verhindern.

Um das Oberlicht abzudämpfen (Schutz des Photoelementes beim Messen in den obersten Wasserschichten), kann ein neutrales Lochfilter mit Opalglas oder nur ein Opalglas durch Drehen einer Sektorscheibe vorgeschaltet werden.

Um Meßfehler als Folge von Abschattung oder Reflexion durch das Boot zu vermeiden, wird die Apparatur durch einen Ausleger 2 m vom Boot entfernt gehalten. Mit Hilfe eines Kabels, das zugleich der Stromzuführung dient, kann das Meßgerät in die gewünschte Tiefe versenkt werden. Zur genauen Tiefenbestimmung wurde das Kabel mit Metermarken versehen. Die Leine zur Betätigung der Filtervorrichtung führt direkt zum Boot und erlaubt zugleich, das Meßgerät stets in gleicher Stellung zur Sonne zu halten.

Abbildung 7



Schematische Darstellung der Lichtmeßvorrichtung

- 1 = Filterscheibe
- 1a = Sektorscheibe mit neutralem Dämpfungsfilm
- 2 = Photoelement für Unterlichtmessung
- 3 = Photoelement für Oberlichtmessung
- 4 = Kabel
- 5 = Ausleger
- 6 = Zugleine
- 7 = Kabelrolle
- 8 = Schleifkontakte
- 9 = Galvanometer
- 10 = Zelle zur Kontrolle von Schwankungen der Totalstrahlung
- 11 = Galvanometer zur Messung der Totalstrahlung

e) *Meßvorgang und Auswertung der Meßergebnisse*

Stets wurden das Oberlicht und das Unterlicht bis zu jener Tiefe, in der sich eben noch ein brauchbarer Galvanometerausschlag ergab, gemessen. Die Meßpunkte lagen in 0, 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 50 m Tiefe. Bei Messungen an der Oberfläche wurde das Photoelement stets einige Millimeter unter Wasser getaucht, um die Reflexion an der Wasseroberfläche nicht berücksichtigen zu müssen. Während ich das Meßgerät bediente und das Galvanometer beobachtete, notierte ein Gehilfe die Ergebnisse und sorgte zugleich mit leichtem Ruderschlag für gleichbleibende Bootstellung.

Mit Hilfe eines zweiten Photoelementes, das in kardanischer Aufhängung am Bootsrand befestigt war (siehe Abbildung 7), wurde die Totalstrahlung ständig kontrolliert. Die Erfahrung zeigte, daß leichte Intensitätsschwankungen bei der Auswertung berücksichtigt werden konnten. Bei größeren Abweichungen mußten einzelne Messungen wiederholt werden. Bei sehr rascher Intensitätsänderung wurde fortlaufend gemessen und zur Meßzahl aus der betreffenden Tiefe auch die jeweilige Meßzahl der Kontrollzelle notiert. Bei der Auswertung wurden in diesem Fall nur Meßzahlen mit ähnlichem Betrag für Totalstrahlung miteinander verglichen. Die Kontrollzelle erwies sich meistens als unentbehrlich, und es ist mir unverständlich, daß sie bis heute bei Lichtmessungen nicht verwendet wurde. Denn es zeigte sich, daß fast immer beträchtliche Intensitätsschwankungen der Totalstrahlung auftreten, auch dann, wenn unsere Sinnesorgane keine Veränderung wahrnehmen.

Zu jeder Messung wurde ausserdem der Zustand der Wasseroberfläche, der Grad der Bewölkung (in Zehnteln) und die Sonnenhelligkeit notiert. (0 = nur Himmelsbestrahlung, 6 = Sonnenschein ohne Abschirmung durch Wolken oder Nebel.)

Ferner wurde die Sichttiefe mit der Secchischeibe und die Wasserfarbe nach der Forel-Uhle-Skala bestimmt.

Bei der Auswertung wurde die gemessene Intensität auf einheitlichen Einfallswinkel von 45° reduziert¹, und dann wurden die relativen Durchlässigkeiten der einzelnen Schichten ausgerechnet. Ferner wurden die Verhältniszahlen Unterlicht: Oberlicht bestimmt. Die Berechnung des Extinktionskoeffizienten aus der Durchlässigkeit (und umgekehrt) geschah nach einem Diagramm, das von Herrn Dr. Vollenweider ausgearbeitet und mir freundlicherweise zur Verfügung gestellt worden war.

D. Morphometrie, Hydrologie und Trophiegrad der untersuchten Seen

1. Die morphometrischen Abmessungen der Seebecken bedingen:
 - a) den Grad der Verdünnung der zugeführten Trübungsstoffe,
 - b) den Trophiegrad des Sees (z. B. Ausbildung der Uferbank, Seetiefe usw., siehe Kapitel IV. D.
2. Größe, Höhenlage und Neigung des Einzugsgebietes bestimmen größtenteils Art und Menge der zugeführten Schwebstoffe und den zeitlichen Verlauf ihrer Einschichtung.
3. Das biologische Geschehen eines Sees beeinflusst die spektrale Absorption und die Wasserfarbe entscheidend. So konnte Thieme man schon 1925 sagen: «Kennt man die Eigenfarbe eines Sees, so kennt man auch seine übrigen Eigenschaften.»
Als Indikatoren für die Produktivität und den Trophiegrad eines Sees betrachten wir das Angebot an Nährstoffen (z. B. an Nitraten und Phosphaten) und deren Verbrauch, sowie den Sauerstoffhaushalt.
In den Tabellen 3 und 4 wurden deshalb die wichtigsten Angaben über Morphometrie, Hydrologie, Nährstoffgehalt und Karbonathärte der untersuchten Seen zusammengestellt. Ueber den Jahresverlauf der Durchschnittstemperatur in den obersten 50 m (resp. bis Grund in Root- und Murtensee) orientiert Abb. 44 und über die Tiefenlage der Sprungschicht und damit die Größe des Epilimnions Abb. 2.

¹ Die Reduktion wurde mit Hilfe der Tabellen von Whitney (siehe Sauberer und Ruttner [62] S. 74) ausgeführt.

Ueber den Sauerstoffhaushalt und über den Trophiegrad enthalten Tabellen 17—23 und Abb. 51 das Wesentlichste.

Die Angaben in Tabelle 3 bedürfen folgender Ergänzungen:

1. Die Oberflächen der Seen und die einzelnen Niveauflächen, aus denen sich dann der Rauminhalt berechnen ließ, ermittelten wir planimetrisch anhand der genauesten Karten der Eidg. Landestopographie.
2. Beim Zürichsee wurde nur der Untersee und beim Luganersee nur das Luganerbecken untersucht und ausplanimetriert. Denn diese beiden Wannen müssen praktisch als selbständige Seen betrachtet werden. Sie zeigen tatsächlich weitgehend ein Regime, das von demjenigen der übrigen Teilbecken abweicht.
3. Als Einzugsgebiet des Thunersees wurde nur dasjenige unterhalb Interlaken, für den Bielersee unterhalb Wohlensee und Thielle, für den Zürichsee unterhalb Wesen und für den Luganersee nördlich Melide berücksichtigt. Dienen doch die höher liegenden Seen eines Flußsystems als Klärbecken für die tiefer liegenden, und uns interessiert hier das Einzugsgebiet vor allem als Lieferant der Trübungsstoffe, die von den Zuflüssen den Seen zugeführt werden. Je größer das Verhältnis Einzugsgebiet : Seearial, um so stärker muß die Durchflutung und damit die Einschwemmung von Schwebstoffen sein.
4. Zweifellos spielt auch das Gefälle des Einzugsgebietes für den Schwebstofftransport eine Rolle. Die letzte Kolonne der Tabelle 3 enthält deshalb das Produkt aus dem Verhältnis Einzugsgebiet zu Seeoberfläche ($[E/S]$) und der Höhendifferenz zwischen den mittleren Meereshöhen des Einzugsgebietes und des Seespiegels ($[H_e - H_s]$). Dieser Proportionalitätsfaktor ist gewiß sehr willkürlich gewählt, und es handelt sich lediglich um einen ersten versuchsweisen Ansatz.
5. Das Einzugsgebiet des Rootsees wurde nicht berechnet, weil dieser See durch einen Kanal mit der Reuß in Verbindung steht und weil wir über den prozentualen Anteil des Flußwassers, das dem See durch diesen Kanal zufließt, keine Angaben finden konnten.

E. Meßergebnisse

1. Die spektrale Lichtdurchlässigkeit (Tageslichtmessungen)

Tabellen 5 und 6 zeigen die spektrale Lichtdurchlässigkeit der obersten Wasserschichten im Sommer 1955 und im Winter 1955/56.

Tabelle 3 Morphometrische und hydrologische Daten der untersuchten Seen.

	Brienzer-see	Thuner-see	Luganer-see	Bieler-see	Murten-see	Zürich-see	Root-see
Meereshöhe m	566,9	560,2	274	432,1	432,6	409,23	420
Oberfläche km ²	29,6	47,9	27,9	40,0	27,2	67,3	0,48
Länge km	14,0	18,2	15,5	14,8	7,7	28,0	2,5
mittl. Breite km	2,12	2,65	1,80	2,70	3,50	2,40	0,19
Volumen km ³	5,16	6,44	4,74	1,24	0,61	3,37	0,00432
größte Tiefe m	259,4	217,0	288,5	74,6	48,6	142,5	16,3
mittl. Tiefe m	174	135	170	31,0	22,4	54	8,8
Einzugsgebiet km ²	1140	1350	297	ca. 2420	697	1115	—
mittl. Höhe des Einzugsgeb. m	1950	1590	ca. 800	1130	630	805	—
Vergletscherung in %	18,2	4,7	0	0,3	0	0	—
Verhältnis Einzugsgeb.: Seareal	49 : 1	33 : 1	11 : 1	60 : 1	25 : 1	13 : 1	—
$\frac{[E/S]}{[H_E - H_S]}$	67,7	34,0	5,8	41,9	4,9	5,1	—

Tabelle 4: Angaben über Stickstoff- und Phosphorgehalt des Oberflächenwassers (n. Thomas [76] 1953) und der Karbonathärte im Epilimnion (eig. Mess. 1953/56). W=Winter-, S=Sommermessung.

	NO ₃ ⁻ , mg/l		NO ₂ ⁻ , mg/l		NH ₃ , mg/l		N-Abnahme mg/l	PO ₄ ³⁻ y/l aus GR.		Karbonathärte fr.°	
	W	S	W	S	W	S		W/S	W	S	W
Brienzer-see	0,9	0,8	0,005	0,005	0,02	0,03	0,02	15	20	6,7	5,5
Thuner-see	1,2	0,8	0,005	0,01	0,02	0,03	0,08	15	20	9,2	8,0
Bieler-see	4,8	1,6	0,008	0,05	0,05	0,03	0,74	100	40	14,0	10,2
Murten-see	6,0	4,0	<0,005	0,07	0,05	0,03	0,49	50	30	17,5	12,5
Zürich-see	1,8	< 0,2	0,005	0,01	0,06	0,03	0,43	110	55	11,7	8,0
Luganer-see	2,2	< 0,2	0,015	0,005	0,14	0,03	0,60	95	40	10,0	7,0
Root-see	1,6	< 0,2	0,045	0,005	1,5	0,03	1,58	800	60	12,0	6,0

Wir erkennen vorerst zwei Gruppen: (Siehe auch Abschnitt «Zeitliche Variation der Durchlässigkeit» Seite 23.)

- a) Seen mit größerer Durchlässigkeit im Winter (Thuner-, Briener-, Bieler- und Luganersee),
- b) Seen mit fast gleicher Durchlässigkeit für Sommer und Winter (Zürich-, Murten- und Rootsee).

In Abbildung 8 wurden die maximalen und in Abbildung 9 die minimalen Lichtdurchlässigkeiten der Meßperiode 1954/56 graphisch aufgetragen.

Die Abbildung 8 zeigt:

- a) Mit zunehmender Wellenlänge nimmt die Lichtdurchlässigkeit aller Seen stark ab, und es zeigen sich deshalb in der Rotdurchlässigkeit nur geringe Differenzen. Wie die Transmissionskurve des destillierten Wassers zeigt, ist dieser Effekt durch die Extinktion des reinen Wassers im roten Spektralbereich zu erklären.
- b) Während die Kurve für destilliertes Wasser bei 620 m μ eine deutliche Einbuchtung erkennen läßt, tritt dies bei den Kurven für Seewasser nicht in Erscheinung. Zweifellos liegt die Ursache dazu in einer Unzulänglichkeit unserer Meßapparatur, vermutlich in der großen Halbwertbreite der Schott-Filter.

Tabelle 5

Mittlere spektrale Lichtdurchlässigkeit für 0—5 m Tiefe, Sommer 1955 (in Prozent pro Meter).

ungefähr. optischer Schwerp.	695 m μ	660 m μ	600 m μ	530 m μ	430 m μ	380 m μ	Datum
Thunersee	9	29	58	68	56	47	3. 8. 55
Brienersee	8	19	27	27	24	21	2. 8. 55
Bielersee	9	27	52	53	36	17	6. 8. 55
Luganersee	9	23	55	68	33	8	29. 7. 55
Zürichsee	7	19	53	61	43	24	7. 8. 55
Murtensee	8	22	48	47	24	8	4. 8. 55
Rootsee	6	18	45	44	18	5	8. 8. 55

- c) Die Differenzen in der Lichtdurchlässigkeit werden gegen Blau zu größer. Da reines Wasser bei 450 m μ sein Durchlässigkeits-

maximum besitzt, muß die Extinktion in diesem Spektralbereich vor allem durch wasserfremde, gelöste oder suspendierte Stoffe verursacht sein.

- d) Das Durchlässigkeitsmaximum verschiebt sich mit abnehmendem mittlerem Tk immer mehr in Richtung längerer Wellen, also gegen Rot.

Tabelle 6

Mittlere spektrale Lichtdurchlässigkeit für 0—5 m Tiefe, Winter 1955/56 (in % pro m).

ungefähr. optischer Schwerp.	695 m μ	660 m μ	600 m μ	530 m μ	430 m μ	380 m μ	Datum
Thunersee	16	30	73	85	81	71	4. 1. 56
Brienersee	14	27	65	76	68	54	1. 1. 56
Bielersee	13	27	63	71	53	35	8. 1. 56
Luganersee	14	27	70	83	72	59	5. 1. 56
Zürichsee	3	13	49	51	44	10	30. 12. 55
Murtensee	6	20	49	48	26	6	8. 1. 56
Rootsee	8	20	40	40	22	10	29. 12. 55

Ueber den Durchlässigkeitsabfall in Blau sagt Sauberer [61] S. 304:

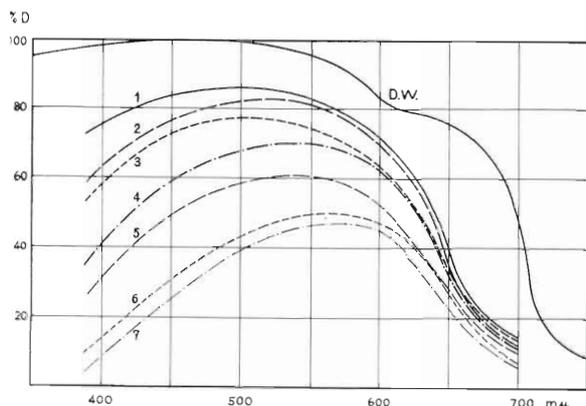
«Von den gelösten Stoffen sind hier die Humusstoffe (nach Kalle einfach als Gelbstoffe bezeichnet) die wichtigsten, die eine starke Absorption der kurzwelligen Strahlung und dadurch auch eine Verfärbung der Gewässer gegen Braun zu verursachen.

An zweiter Stelle sind die Kalklösungen zu nennen, von denen angenommen wird, daß sie die Humusstoffe zu einem gewissen Grad auszuflocken vermögen und demnach als Reinigungsmittel fungieren.»

Die Wirkung des gelösten Kalkes als Ausflockungsmittel für Humusstoffe ist umstritten. Von unseren sieben Seen stehen diejenigen mit der kleinsten Blaudurchlässigkeit, also mit dem größten Gehalt an Humusstoffen, an erster und dritter Stelle bezüglich der Karbonathärte. Dies würde gegen die Annahme von Sauberer sprechen. Das Problem ist sehr kompliziert und bedarf weiterer Untersuchungen.

Abbildung 8

Maximale spektrale Lichtdurchlässigkeiten
(D = Durchlässigkeit in % pro m)



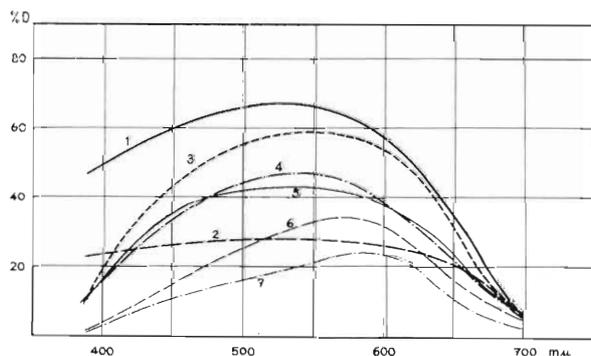
D. W. = Destilliertes Wasser (nach James)

1 = Thunersee	21. 2. 54
2 = Luganersee	5. 1. 56
3 = Brienzersee	1. 1. 56
4 = Bielersee	8. 1. 56
5 = Zürichsee	7. 8. 55
6 = Murtensee	4. 8. 55
7 = Rootsee	8. 8. 55

Vergleichen wir nun die Darstellung minimaler (Abb. 9) mit der Darstellung maximaler Lichtdurchlässigkeit (Abb. 8)

Abbildung 9

Minimale spektrale Lichtdurchlässigkeiten
(D = Durchlässigkeit in % pro m)



1 = Thunersee	3. 8. 55
2 = Brienzersee	2. 8. 55
3 = Luganersee	23. 7. 55
4 = Bielersee	13. 4. 54
5 = Zürichsee	14. 10. 54
6 = Murtensee	12. 4. 54
7 = Rootsee	15. 10. 54

a) Die Abbildungen 8 und 9 zeigen, daß die spektrale Lichtdurchlässigkeit der Seen innerhalb eines Jahres beträchtlich schwankt. Die Bestim-

mung des optischen Charakters eines Gewässers aus einer einzelnen Messung muß deshalb als «Zufallstreffer» bezeichnet werden.

b) Das Verhältnis der Extinktionszunahme in den verschiedenen Spektralbereichen ist von See zu See verschieden und kann für das Regime eines Gewässers als charakteristisch gelten.

Vor allem fällt der ausgesprochen flache Verlauf der Brienzerseekurve auf. Die Erklärung dafür gibt die Unterlichtmessung. (Siehe Abschnitt 2.) Das Unterlicht, gemessen in Prozenten des Oberlichtes, zeigt am 2. 8. 55 den ca. fünffachen Wert der Messung vom 1. 1. 56. Unterlicht entsteht durch Streuung und Reflexion an Wassermolekülen und an schwebenden Teilchen. Während die Streuung an sehr kleinen Partikeln mit der 4. Potenz der Wellenlänge indirekt proportional verläuft (Raleighsches Gesetz), erfolgt die Reflexion an mineralischen Teilchen fast gar nicht farbselektiv. Das Verhältnis der Durchlässigkeit vom 2. 8. 55 zu demjenigen vom 1. 1. 56 ergibt für den Brienzersee:

Wellenlänge	400 mμ	500 mμ	600 mμ
Verhältnis max. zu min.			
Lichtdurchlässigkeit	2,4 : 1	2,8 : 1	2,5 : 1

Für die übrigen Seen lauten die entsprechenden Verhältniszahlen:

	400 mμ (blau)	500 mμ (grün)	600 mμ (gelb)
Luganersee	3,1:1	1,2:1	1,2:1
Murtensee	3,5	1,2	1,4
Zürichsee	2,0	1,2	1,4
Rootsee	3,2	2,3	1,9
Bielersee	2,4	1,5	1,6
Thunersee	1,5	1,3	1,2

Dem Brienzersee am ähnlichsten verhält sich der Thunersee, während die andern Seen eine bedeutend größere Extinktionszunahme im Blau als im Grün und im Gelb zeigen.

Erinnern wir uns des Faktors $[(E/S) \cdot (H_F - H_S)]$ in Tabelle 3.

Dieser soll ein Maß für die dem See (pro Flächeneinheit der Seeoberfläche) zugeführte Wassermenge und für die erosive Tätigkeit der Zuflüsse (starkes Gefälle = intensive Erosion, wenig oder keine Akkumulation im Flußlauf), also für die Menge der eingeschwemmten mineralischen Trübungsstoffe sein.

Die Zahlen lauten:

Brienzersee 67,7, Thunersee 41,9, Bielersee 34, Luganer-, Zürich- und Murtensee ca. 5—6.

Die drei erstgenannten Seen müssen sich folglich durch großen Gehalt an mineralischen Schwebestoffen auszeichnen. Die Extinktion wird

also hier größtenteils durch Streuung und Reflexion an verhältnismäßig großen Teilchen bewirkt und ist deshalb wenig farboselektiv. Mit dieser Schlußfolgerung stehen die Ergebnisse aus der Unterlichtmessung (siehe Fig. 10) in bester Uebereinstimmung.

- c) Im Bielersee sollten wir also ähnliche Verhältnisse finden wie im Thunersee. Die Verhältniszahlen maximaler zu minimaler Lichtdurchlässigkeit gleichen sich aber nur im Grün und im Gelb, während die Extinktionszunahme im Blau für den Bielersee wesentlich größer ist. Dieser starke Abfall in der Blandurchlässigkeit läßt aber mit ziemlicher Sicherheit auf eine reichliche Zufuhr an Humusstoffen schließen. Bezieht der Bielersee doch sein Wasser zum großen Teil aus Murten- und Wohlensee, also aus zwei Gewässern, die zu den lichtundurchlässigsten der Schweiz gehören. Daß, wie wir weiter vorn feststellten, die höher gelegenen Seen als Klärbecken für die tieferliegenden dienen, gilt eben hauptsächlich in bezug auf Schwebestoffe und kaum für gelöste Substanzen. Tabelle 4 gibt uns zudem einen Hinweis auf den Nährstoffreichtum und die intensive biologische Produktion dieses Sees. Im Verbrauch an Stickstoff und Phosphat während des Sommers wird er nur vom Rootsee übertroffen.
- d) Einen eigentümlich flachen Verlauf zeigt die Transmissionskurve des Zürichsees zwischen 630 und 450 m μ , während sie gegen Rot und Ultraviolett¹ sehr steil abfällt. Diese Merkwürdigkeit wurde in zahlreichen Messungen immer wieder festgestellt; eine Erklärung konnte ich aber nicht finden. Liegt sie vielleicht in der Tatsache, daß der Zürichsee von Natur aus oligotroph wäre (morphometrisch), durch den Einfluß des Menschen aber zu einem eutrophen Gewässer umgestaltet wurde? M i n d e r sagt darüber [40]:

«Unserem Beobachter müßte also dieser See doch recht verdächtig und rätselhaft vorkommen. Wie steht es damit? Flüchtig skizziert und der eingehenden Behandlung vorweggenommen, lautet die Antwort, daß der Zürichsee ein anderes und reicheres Plankton, und zwar in erster Linie Pflanzenplankton hat als die übrigen großen und tiefen Voralpenseen, der Genfersee, Thuner- und Brienersee, Walensee, Vierwaldstättersee, Bodensee und die subalpinen Randseen südlich der Alpen. Er erhält sich im Zusammenhang damit auch anders in der Sichttiefe und Farbe. Das reiche Plankton-

¹ Mit Ultraviolett wird hier das Spektralgebiet um 380 m μ bezeichnet. In diesem Gebiet zeigt sich bereits eine außerordentlich große Variation in der Durchlässigkeit der Seen, und doch wird in den obersten Schichten gerade noch so viel Licht dieses Wellenbereiches durchgelassen, daß ein Messen und Vergleichen möglich ist.

leben bedingt einen intensiveren Seestoffwechsel mit mannigfaltigen Eigentümlichkeiten, besonders der Sauerstoffverhältnisse, aber auch der Sedimente des Profundals etc. Ueberdies werden wir nachweisen können, daß diese Abweichungen von Hause aus dem Zürichsee nicht immanent sind, sondern die Folge einer Entwicklung innerhalb einiger Jahrzehnte. Diese Entwicklung aber ist nur teilweise die von der Seetypenlehre vorgezeichnete; sie ist auch nicht natürlich, sondern kulturbedingt.»

- e) Wie zu erwarten zeigen die schwächer durchfluteten, aber nährstoffreichen Seen (Luganer-, Murten- und Zürichsee) ausgesprochen farboselektive Extinktionsschwankungen.
- f) Der Rootsee scheint verhältnismäßig gut durchflutet zu sein. Zeigt er doch in allen untersuchten Farbbereichen ähnliche, sehr große Extinktionsschwankungen. Leider sind wir bei diesem Gewässer in bezug auf Durchflutungsgrad auf bloße Vermutungen angewiesen.
- g) Wir stellten fest: Spektral gleichmäßige Extinktionszunahme läßt auf Vorhandensein von mineralischen Trübungsstoffen schließen, während Extinktionszunahme im Blau die Vermehrung von gelösten Substanzen, namentlich von Humusstoffen anzeigt. Recht aufschlußreich ist deshalb die Angabe der Ultraviolettdurchlässigkeit eines Gewässers in bezug auf seine Gelbdurchlässigkeit. So finden wir bei den untersuchten Seen folgende Zahlen

(T_k 380 m μ : T_k 600 m μ) :

	Max.	Min.
Thunersee	1,00	0,83
Brienersee	0,81	0,88
Luganersee	0,80	0,18
Bielersee	0,57	0,27
Zürichsee	0,49	0,28
Murtensee	0,19	0,09
Rootsee	0,09	0,08
Dest. Wasser	1,10	—

Dieses Verhältnis, das oft als «relative Ultraviolettdurchlässigkeit»¹ bezeichnet wird, zeigt:

- a) Der Thunersee kommt der relativen Ultraviolettdurchlässigkeit des destillierten Wassers am nächsten. (Klarster See unserer Untersuchungsreihe.)
- b) Ausgenommen beim Brienersee geht die R. U.-Abnahme mehr oder weniger parallel mit einer Abnahme der totalen Lichtdurchlässigkeit.

¹ Im folgenden wird die relative Ultraviolettdurchlässigkeit kurz mit R. U. bezeichnet.

Je größer diese Abnahme, um so größer muß der durch Absorption bewirkte Extinktionsanteil angenommen werden.

- c) Murtensee und Rootsee besitzen sowohl bei maximaler wie bei minimaler Lichtdurchlässigkeit ausgesprochen kleine R. U. Also spielen in diesen beiden Seen eingeschwemmte Suspensionen für die Extinktion eine unbedeutende Rolle.
- d) Luganer-, Bieler- und Zürichsee zeigen abwechselnd sowohl große wie verhältnismäßig kleinere R. U. Der Luganersee übertrifft in dieser Beziehung alle andern Gewässer bei weitem. Dies ist wohl intensiverer biologischer Tätigkeit zufolge höherer Temperatur zuzuschreiben.

2. Unterlicht

Unterlichtmessungen können zur Klärung zahlreicher Probleme beitragen wie z. B.:

- a) Anteil der Streuung an der Extinktion eines Gewässers.
- b) Art und Menge der suspendierten Stoffe.
- c) Zustandekommen der wahren Farbe¹ eines Gewässers.
- d) Welche Lichtintensität kommt einem undurchsichtigen Organismus von unten her zu? (Dieser Anteil kann bis über 25 % der Gesamtintensität betragen.)

Das Unterlicht wurde auf unseren Exkursionen stets möglichst gleichzeitig mit dem Oberlicht gemessen. Die Messung erfolgte bis zu jener Tiefe, in welcher sich noch ein brauchbarer Galvanometerausschlag zeigte. Tab 7 und 8 enthalten eine Zusammenstellung des im Sommer 1955 und im Winter 1955/56 in den obersten 5 Metern gemessenen mittleren Unterlichtes.

Tabelle 7

Intensität des Unterlichtes in Prozenten des Oberlichtes, Winter 1955/56.

Ungefährer opt. Schwerpunkt $m\mu$	660	600	530	430	380	ohne Filter	Datum
Thunersee	0,5	1,2	2,6	2,0	1,2	2,1	4. 1. 56
Brienzersee	0,2	2,6	6,0	5,8	1,4	5,5	1. 1. 56
Bielersee	0,6	2,6	4,1	1,9	1,0	4,3	8. 1. 56
Luganersee	0,1	0,6	1,0	0,7	0,2	1,0	5. 1. 56
Zürichsee	—	1,9	2,5	1,1	—	2	30. 12. 55
Murtensee	0,3	2,6	1,5	0,8	—	2	8. 1. 56
Rootsee	0,8	2,9	1,8	1,0	0,1	2	29. 12. 55

¹ Unter «wahrer Farbe» wird hier der Farbeindruck verstanden, der ohne Reflexion und Spiegelung der Umgebung zustande käme (im Gegensatz zu «scheinbarer Farbe»). Die «wahre Farbe» entspricht also der spektralen Zusammensetzung des Unterlichtes knapp unter der Oberfläche.

In Abb. 10 wurden die maximalen Unterlichtwerte aus Tab. 7 und 8 für jeden See graphisch dargestellt.

Nach den grundlegenden theoretischen Erörterungen von Joseph ändert sich der Quotient aus Unterlicht und Oberlicht bei optisch homogenem Wasser mit wechselnder Tiefe nicht («Deutsche Hydrographische Zeitschrift» Bd. 3, Heft 5/6):

«Das Verhältnis von Unter- zu Oberlicht, also die diffuse Reflexion der unterhalb der Tiefe x gelegenen Wasserschicht ist bei genügender Entfernung vom Meeresboden unabhängig von der Tiefe und nur eine Funktion des Verhältnisses von Rückwärtsstreuung zur Absorption.»

Mit zunehmender Tiefe zeigte sich bei optisch homogenem Wasser tatsächlich meistens zunehmende Konstanz von R^1 . Eine Zunahme in den

Tabelle 8

Intensität des Unterlichtes in Prozenten des Oberlichtes, Sommer 1955.

Ungefährer opt. Schwerpunkt $m\mu$	660	600	530	430	380	ohne Filter	Datum
Thunersee	0,2	5,2	9,6	5,1	0,8	7,3	3. 8. 55
Brienzersee	3,1	25,0	27,1	28,4	5,1	23,8	3. 8. 55
Bielersee	0,7	4,4	5,3	3,4	0,7	5,2	6. 8. 55
Luganersee	0,7	2,3	2,4	1,3	0,7	2,2	29. 7. 55
Zürichsee	0,1	1,8	2,2	1,4	0,2	2,4	7. 8. 55
Murtensee	0,2	5,1	4,7	1,0	0,6	5,4	4. 8. 55
Rootsee	0,2	1,5	2,5	0,4	—	1,7	8. 8. 55

obersten Schichten wird zweifellos ihren Grund sehr oft in der optischen Schwerpunktverschiebung der Schottfilter haben, und ist deshalb nur scheinbar. (Siehe Abschnitt «Das Filterproblem», Seite 12.) Doch zeigten sich auch häufig bedeutende Aenderungen des prozentualen Unterlichtes mit der Tiefe, die mit Sicherheit auf Unterschiede im Schwebestoffgehalt zurückgeführt werden konnten. (Vgl. z. B. Abb. 51 und 57.)

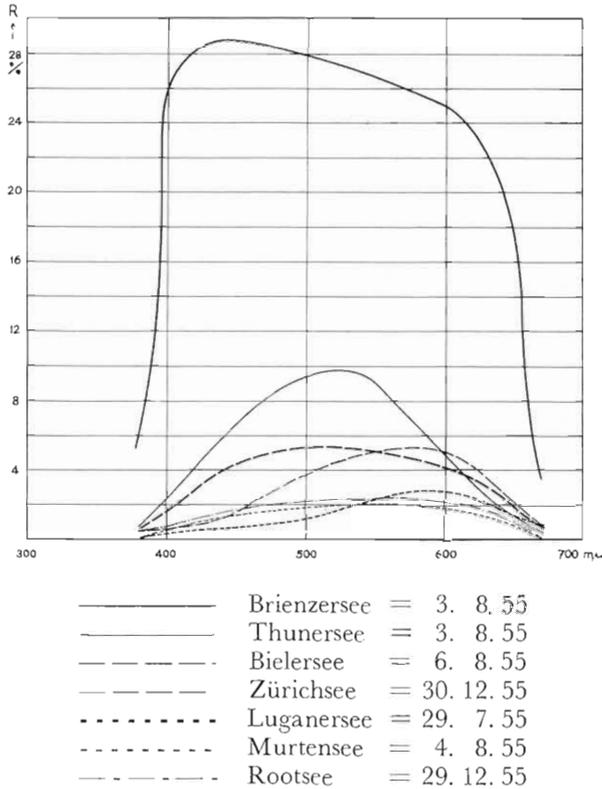
Bei Betrachtung von Tab. 7 und 8 und Abb. 10 ergibt sich im wesentlichen:

- a) Das intensivste Unterlicht zeigt der Brienzersee mit einem Durchschnitt von 26,7 % über die Spektralbereiche 600, 530 und 430 $m\mu$. Dieser See ist offenbar auch in dieser Beziehung ein Sonderfall. Das außerordentlich starke Unterlicht ist zweifellos auf eine Massenzufuhr von mineralischen Schwebestoffen infolge der Schneeschmelze im Hochgebirge zurückzuführen. Auf-

¹ R wird im folgenden zur Bezeichnung des Verhältnisses $\frac{\text{Unterlicht}}{\text{Oberlicht}} \cdot 100$ gebraucht.

Abb. 10

Maximale Unterlichtwerte aus Tab. 7 und 8.



schlußreich sind diesbezüglich die Meßergebnisse vom 19. Juni 1954. (Vgl. Abb. 14.) Zwischen 5 und 7 m Tiefe fand sich in einer Entfernung von 3 km vor der Lütschinemündung eine derart trübe Schicht, daß die Lichtdurchlässigkeit nur noch knapp 1% betrug. (Vgl. auch Abb. 50.)

- Wie ein Vergleich der Größe der Einzugsgebiete und deren Höhendifferenz gegenüber den Seehöhen (Tab. 2) vermuten läßt, folgen auf den Brienersee der Thunersee mit 6,6% und der Bielersee mit 4,3% Unterlicht.
- Starkes Unterlicht zeigt auch der Murtensee am 4. August 1955. Doch wird uns eine Betrachtung der spektralen Zusammensetzung noch zeigen, daß dieses Unterlicht nicht gleichen Ursprungs ist wie dasjenige von Briener-, Thuner- und Bielersee. (Siehe S. 23.)
- Schwaches Unterlicht finden wir bei Luganer-, Zürich- und Rootsee, was nach den Ausführungen auf Seite 14 zu erwarten ist (geringe Durchflutung).
- Minimalstes Unterlicht zeigt der Luganersee mit 0,8% am 5. Januar 1956. (Vergleiche dazu in Abbildung 8 die Transmissionskurve des Luganersees im entsprechenden Zeitpunkt.)

Außerst interessant sind die Unterschiede in der spektralen Zusammensetzung des Unterlichtes. Die Streuung wirkt offenbar zusätzlich zur Absorption selektiv und ergibt z. B. für den Rootsee eine weitere Verschiebung des optischen Schwerpunktes gegen Rot. Würde die durchgelassene Strahlung in allen Bereichen ungefähr gleich stark gestreut, so müßte die Darstellung des Unterlichtes, da es sich um relative Angaben handelt, eine Gerade ergeben. Allerdings legt das Licht, nachdem es in einer bestimmten Tiefe als Oberlicht gemessen wurde, bis zum Eintreffen an der gleichen Stelle als gestreutes Unterlicht, einen zusätzlichen Weg zurück. Und auf diesem Weg unterliegt es der spektralen Absorption des betreffenden Gewässers. Diese Absorption könnte aber höchstens eine Schwerpunktsverschiebung gegen das Maximum der spektralen Durchlässigkeit bewirken. Bei einem Vergleich von Abb. 10 (Unterlichtwerte) mit Abb. 11 und 12 (spektrale Durchlässigkeit der untersuchten Seen) zeigt sich eine deutliche Verschiebung des optischen Schwerpunktes im Unterlicht sowohl gegen Blau (Brienersee) wie auch gegen Rot (Murtensee) vom optischen Schwerpunkt der Lichtdurchlässigkeit des betreffenden Sees weg.

Bevor wir den Verlauf der Kurve in Abb. 10 einer weiteren Analyse unterziehen, bedarf es einiger theoretischer Ueberlegungen. Wir folgen dabei teilweise den vortrefflichen Ausführungen von L a u s c h e r [39]. In einer Schrift, betitelt «Optik der Gewässer», die 1955 erschien, setzt sich der Autor mit den theoretischen Grundlagen der Strahlungsforschung in den Gewässern auseinander.

Die gesamte Extinktion im Seewasser setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$\epsilon = \underbrace{a_w + s_w}_{\substack{\text{reines Wasser} \\ = \text{konstant} \\ \text{(abgesehen von} \\ \text{Temperatureinflüssen)}}} + \underbrace{a_l + s_l}_{\text{Lösungen}} + \underbrace{a_p + s_p}_{\text{Plankton}} + \underbrace{a_m + s_m}_{\substack{\text{Mineral.} \\ \text{Schwebestoffe}}} \\ \text{örtlich und zeitlich variabel}$$

Die Extinktionskoeffizienten sind also additiv, und zudem ist ihre Größe der Konzentrationsdichte von Lösungen angenähert proportional. Durch Subtraktion von a_w und s_w erhalten wir die Extinktionskoeffizienten für wasserfremde Substanzen. In Tab. 9 finden sich Streuungs- und Absorptionskoeffizienten im sichtbaren Spektrum für reines Wasser zusammengestellt. Wie die Zusammenstellung erkennen läßt, existiert also in reinem Wasser für $\lambda = 470 \text{ m}\mu$ ein Extinktionsminimum. Hier beruhen 77% der Lichtschwächung auf Streuung, während im Ultraviolett wieder die Absorption überwiegt.

Tabelle 9

$\lambda(\mu)$	0,30	0,36	0,40	0,45	0,47	0,50
ε	$2,22 \cdot 10^{-2}$	$4,50 \cdot 10^{-4}$	$1,64 \cdot 10^{-4}$	$6,13 \cdot 10^{-5}$	$4,52 \cdot 10^{-5}$	$7,74 \cdot 10^{-5}$
s	$2,32 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$0,69 \cdot 10^{-4}$	$4,13 \cdot 10^{-5}$	$3,47 \cdot 10^{-5}$	$2,62 \cdot 10^{-5}$
a	$2,20 \cdot 10^{-2}$	$3,41 \cdot 10^{-4}$	$0,95 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-5}$	$1,05 \cdot 10^{-5}$	$5,12 \cdot 10^{-5}$
$\frac{s}{\varepsilon}$	0,01	0,25	0,42	0,68	0,77	0,34

$\lambda(\mu)$	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
ε	$2,47 \cdot 10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-3}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$	$5,98 \cdot 10^{-3}$	$2,41 \cdot 10^{-2}$	$2,06 \cdot 10^{-2}$
s	$1,73 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$	—	$6,19 \cdot 10^{-6}$	—	$3,55 \cdot 10^{-6}$
a	$2,52 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$	$5,97 \cdot 10^{-3}$	$2,41 \cdot 10^{-2}$	$2,06 \cdot 10^{-2}$
$\frac{s}{\varepsilon}$	0,06	0,01	—	$\approx 10^{-3}$	—	$\approx 10^{-4}$

Extinktions-, Streuungs- und Absorptionskoeffizienten des reinen Wassers bei 20 °C Temperatur in Abhängigkeit von der Wellenlänge (nach L a u s c h e r [39]).

ε = Extinktionskoeffizient s = Streukoeffizient a = Absorptionskoeffizient

Das Intensitätsverhältnis u von Unterlicht durch Oberlicht ist proportional zur Streuung und indirekt proportional zur Extinktion, d. h. $u = c \cdot \frac{s}{\varepsilon}$.

Den Proportionalitätsfaktor c berechnete L a u s c h e r für einen Brechungswinkel von 0° zu 0,168, für 25,9° zu 0,174 und für 48,2° (maximaler Brechungswinkel bei einem Einfallswinkel von 90°) zu 0,197. Wir können also, ohne einen wesentlichen Fehler zu begehen, für c einen Mittelwert von $\bar{c} = 0,18$ annehmen. Für $s = \varepsilon$, wenn also die gesamte Extinktion auf Streuung beruhen würde, liefert die Gleichung $u = \bar{c} \cdot \frac{s}{\varepsilon}$ einen

Unterlichtwert von 0,18, also 18 % des Oberlichtes. Ein Teil des aufwärts gerichteten Streulichtes wird an der Wasseroberfläche reflektiert (innere Reflexion) und erzeugt ein «sekundäres Streulicht» usw. Nun wird aber nach allen Richtungen gestreut; also addiert sich zu dem oben genannten Unterlicht noch das Streulicht der abwärts gerichteten

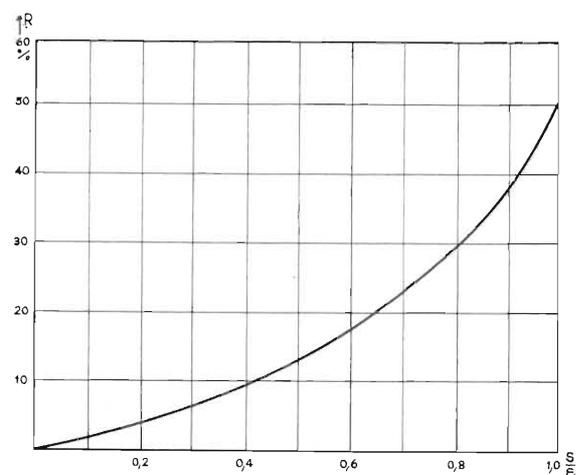
Streustrahlung. Bei Berücksichtigung aller dieser Effekte fand L a u s c h e r schließlich nachstehende Formel:

$$u = \frac{0,180 \frac{s}{\varepsilon}}{1 - 0,470 \frac{s}{\varepsilon}} \cdot \left[1 + \frac{0,156 \frac{s}{\varepsilon}}{1 - 0,470 \frac{s}{\varepsilon}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{0,225 \frac{s}{\varepsilon}}{1 - 0,470 \frac{s}{\varepsilon}}} \right]$$

Abb. 11 enthält die von uns nach dieser Formel berechnete graphische Darstellung der Beziehung zwischen R und $\frac{s}{\varepsilon}$. Zu einem bestimmten R läßt sich nun leicht der entsprechende Wert von $\frac{s}{\varepsilon}$ finden. Dieses Verhältnis zeigt, inwiefern die Extinktion durch Streuung bzw. durch Absorption bedingt ist.

Abbildung 11

R (100 · Unterlicht / Oberlicht) in Abhängigkeit von $s : \epsilon$



Nun versuchen wir, die Unterlichtkurven in Abbildung 10 zu deuten: Wir berechnen die Extinktionskoeffizienten (Totalext.) nach Abb. 11 bzw. 12, subtrahieren davon ϵ_w (Extinkt. des reinen Wassers) und s_w (Streuung des reinen Wassers) und erhalten so ϵ_v (Extinkt. durch wasserfremde Substanzen). Weiter wird anhand von R aus Abb. 19 das Verhältnis s/ϵ bestimmt und dann s berechnet. Von s_t s_w subtrahiert ergibt s_v (Streuung durch wasserfremde Substanzen) und $\epsilon_v - s_v$ gibt a_v (Absorption durch wasserfremde Substanzen).

Die Rechenergebnisse wurden für 400, 500 und 600 $m\mu$ Wellenlänge in Tabelle 10 zusammengestellt.

Tabelle 10

Extinktionskoeffizienten (ϵ_w und ϵ_v), Absorptionskoeffizienten (a_w und a_v) und Streuungskoeffizienten (s_w und s_v) für reines Wasser (w) und wasserfremde Substanzen (v) für sieben Schweizerseen (nach Messungen im Sommer 1955 und im Winter 1955/56). (Alle Werte sind mit 10^{-4} zu multiplizieren.)

λ $m\mu$	400			500			600		
	ϵ_v	a_v	s_v	ϵ_v	a_v	s_v	ϵ_v	a_v	s_v
Brienzersee	138	59	79	125	28,5	96,5	120	35,8	84,2
Thunersee	67	59	8	41	26,0	15,0	45	43,4	1,6
Bielensee	143	131	12	77	59,5	17,5	57	54,6	2,4
Luganersee	160	153	7	59	53,0	6,0	50	50,0	0,0
Zürichsee	117	112	5,0	54	48,5	5,5	52	52,0	0,0
Murtensee	191	185	6,0	82	69,8	12,2	65	59,5	5,5
Rootsee	130	127	3,0	102	97,5	4,5	71	69,6	13,4
reines Wasser	ϵ_w 1,64	a_w 0,69	s_w 0,95	ϵ_w 0,77	a_w 0,26	s_w 0,51	ϵ_w 1,24	a_w 0,17	s_w 1,23

Die Ergebnisse der Tabelle 10 finden sich in Abbildungen 12 und 13 graphisch dargestellt.

Abbildung 12 bestätigt, was wir schon wissen: kleine Absorptionsunterschiede der verschiedenen Seen im Gelb, sehr große dagegen im Blau, mittlere im Grün.

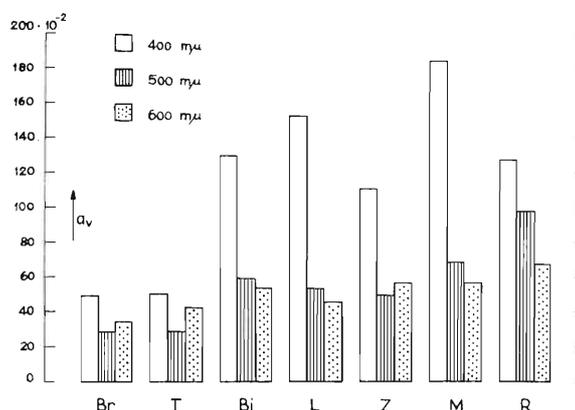
Interessanter ist Abbildung 13. Sie zeigt:

a) Die Lichtschwächung durch Streuung übertrifft im Brienzersee diejenige durch Absorption ganz beträchtlich. In allen andern Seen ist das Verhältnis Absorption : Streuung > 1 .

Ferner ist die durch Suspensionen verursachte Extinktion des Brienzersees zirka dreimal so groß wie in Thuner- und Bielersee und zirka siebenmal so groß wie in den vier übrigen von uns untersuchten Gewässern.

Abbildung 12

Die Absorption des Lichtes durch suspendierte und gelöste Stoffe in den untersuchten Seen.

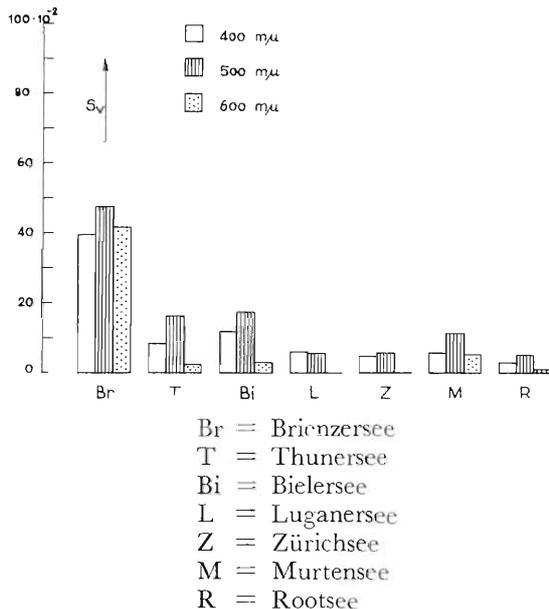


Br = Brienzersee
T = Thunersee
Bi = Bielersee
L = Luganersee
Z = Zürichsee
M = Murtensee
R = Rootsee

- b) In allen drei Spektralbereichen zeigt der Brienersee fast gleichstarke Streuung, während in Bieler- und Thunersee die Streuung in Grün deutlich überwiegt.

Abbildung 13

Die Streuung des Lichtes durch wasserfremde Substanzen.



Wir vermuten, daß hier die Größe der suspendierten Teilchen eine Rolle spielt. Während bei Streuung an kleinsten Teilchen (nach dem Gesetz von Rayleigh) der Effekt zur 4. Potenz der Wellenlänge indirekt proportional ist, findet an größeren Teilchen vor allem Reflexion statt. Da die größten Partikel am raschesten absinken, gelangen durch die Aare bei Interlaken zweifellos nur noch feinste Suspensionen in den Thunersee. Analoge Überlegungen gelten für den Bielersee. Die spektrale Zusammensetzung des Unterlichtes im Brienersee, wie sie sich aus Abb. 13 ergibt, steht in bester Übereinstimmung mit dem weißlichen Farbeindruck, den dieser See während des ganzen Jahres mehr oder weniger vermittelt. Bei diesem Gewässer stammt der Hauptteil des austretenden Lichtes bestimmt aus unbedeutenden Tiefen und wird deshalb im See kaum verändert. Denn je weniger Schwebstoffe sich in einem See finden, um so größer wird die mittlere Weglänge eines Strahles nach Durchdringen einer Niveaufläche bis zum Eintreffen am gleichen Ort als Streustrahl. Auf diesem Weg unterliegt der Strahl aber der spektralen Absorption des Wassers.

- c) Eigentümlicherweise zeigt der Murtensee ein recht starkes Unterlicht im Gelb. Der See erschien zur Zeit der betreffenden Untersuchung schmutzig braunrot. Die Ursache lag vermut-

lich in einer Massenproduktion der Alge *Oscillatoria rubescens*. Es handelt sich also um eine ausgesprochene Vegetationsfärbung, und es ist selbstverständlich, daß eine Alge vor allem die Farbe als Unterlicht zurückwirft, in der sie unserem Auge erscheint.

Mit diesem vorläufigen Deutungsversuch wurde ein wesentliches Ziel der Lichtmessungen von weitem anvisiert. Ruttner sagt in seiner zusammenfassenden Arbeit «Die Strahlungsverhältnisse der Binnengewässer» (S. 88):

«Hier sind wir bei einem Kapitel angelangt, wo die Lichtmessungen in den Seen aufgehört haben, Selbstzweck zu sein, und nur entfernt können wir die sich hier auftuenden Möglichkeiten und der Verbreitung von Humusstoffen, die Gewinnung von Anhaltspunkten über Größe und Konzentration der Schwebstoffe sowie die Lüftung sonstiger Geheimnisse des Stoffwechsels und der Bewegung in den Gewässern.»

3. Zeitliche Änderungen der Lichtdurchlässigkeit, des Unterlichtes und der Sichttiefe.

In Abb. 14—20 wurden die während der Jahre 1953 und 1954 gefundenen Werte für Lichtdurchlässigkeit und Unterlicht der untersuchten Seen für Blau, Grün und Rot graphisch dargestellt. Zudem wurden die durchschnittlichen monatlichen Abflussmengen (m^3/sec) und die Sichttiefen aufgetragen. Auf den ersten Blick zeigt sich, daß Briener- und Bielersee in ihrer Lichtdurchlässigkeit außerordentlich empfindlich auf die Wasserführung reagieren. Das gleiche Verhalten zeigt sich, allerdings weniger ausgeprägt, für den Thuner- und teilweise für Luganer- und Zürichsee, während bei Murten- und Rootsee zweifellos das biologische Geschehen die Transparenz beherrscht. Im weiteren ergeben sich folgende Feststellungen:

- Für alle untersuchten Seen nördlich der Alpen zeigt sich ein Minimum der Transparenz im Frühsommer (Junimessungen). Dieses ist teilweise durch die Wasserführung (Zufuhr von Trübungstoffen bei Briener-, Thuner-, Bieler- und Zürichsee), teilweise durch ein Maximum biologischer Produktion (z. B. in Murten- und Rootsee) bedingt.
- Ein zweites Minimum finden wir in den stark eutrophierten Gewässern (Murten-, Zürich- und Rootsee) im Herbst (Oktobermessungen). Dieses wird sehr wahrscheinlich durch die Herbstteilzirkulation bewirkt. Denn es ist eine längst bekannte Tatsache, daß sich die Burgunderblutalge während der Sommerstagnation in riesigen Mengen in der Sprungschicht der drei genannten Seen findet und daß sie durch die beginnende Herbstzirkulation ins Epilimnion aufgewirbelt wird, wodurch die Seen meist ein bräunliches Aussehen erhalten. Das Extinktionsmaximum am 1. Januar 1954 im

Murtensee ergab sich durch Aufwirbelung von Bodenschlamm. Denn die Messung mußte der schlechten Witterung wegen von einem Steg aus vorgenommen werden. Für den Zustand des Sees ist deshalb nur die Messung, die zehn Tage später ausgeführt wurde, repräsentativ.

- c) Sehr charakteristisch zeigt sich annähernd gleiche Lichtdurchlässigkeit beim Brienersee in Gelb, Grün und Blau (Zusammenlaufen der Kurven Juni 1953 und 1954) bei Extinktionszunahme infolge intensiver Durchflutung. (Vergleiche hierüber die Ausführungen S. 17.)

Ebenso wie bei Abschätzung der Beziehung zwischen Extinktion und Durchflutung ergeben sich bei einem Vergleich der Variation von Extinktion und Unterlicht zwei Hauptgruppen. In stark durchfluteten Seen wie Briener-, Thuner- und Bielersee entspricht einer Extinktionszunahme im allgemeinen eine Zunahme des Unterlichtes, während in den ausgesprochen eutrophen Gewässern wie Root- und Murtensee ein Minimum der Lichtdurchlässigkeit jeweils mit einem Minimum im Unterlicht korrespondiert. Auch hierin zeigt sich deutlich, daß die Lichtverhältnisse in diesen beiden Seen nicht wesentlich von der Durchflutung abhängig sind. Zürich- und Luganersee zeigen sowohl Merkmale der ersten wie der zweiten Gruppe und verraten damit erneut ihren zwiespältigen Charakter. (Von Natur aus oligotrophe, aber durch Kultureinfluß weitgehend eutrophierte Gewässer; bezüglich Zürichsee siehe hierüber S. 18.) Doch zeigen sich auch sonderbare Abweichungen von der Regel, die einer Erklärung bedürfen:

- a) Unterlichtmaximum im Brienersee Anfang Januar 1954: Zufolge bedeutender Windtätigkeit waren wir gezwungen, die Messung im Windschatten innerhalb der Bucht von Böningen, also in Nähe der Lüttschinnenmündung auszuführen. Die Lüttschine zeigte einen für die Jahreszeit verhältnismäßig hohen Trübungsgrad, und die bedeutende Unterlichtintensität ist zweifellos der überdurchschnittlichen Zufuhr von Flußtrübe und der unmittelbaren Nähe der Flußmündung zuzuschreiben. Vermutlich hätte sich in genügender Entfernung zu dieser Jahreszeit auch eine größere Lichtdurchlässigkeit gezeigt.
- b) Anstieg sowohl in der Lichtdurchlässigkeit wie im Unterlicht im Brienersee vom Juni zum August 1954: Seitherige Untersuchungen ergaben, daß sich Aare und Lüttschine im August meist in einer Tiefe zwischen 10 und 15 m ähnlich einem Teppich in die Wassermasse einschoben (vergl. Temperaturkurve Abb. 33). Dieser Trübungs-horizont ist so dicht, daß er gewissermaßen wie weißlicher Seeboden wirkt und die Lichtstrahlen größtenteils reflektiert. Dadurch ist auch die geringe Selektivität des Unterlichtes zu erklären. Auf die Lichtdurchlässigkeit in den oberen Schichten hat aber der

genannte Trübungs-horizont keinen Einfluß. Im Gegensatz zum Brienersee zeigt der Thunersee vom Juni zum August 1954 einen Abfall des Unterlichtes bei gleichzeitigem Anstieg der Lichtdurchlässigkeit, also normalen Verlauf trotz quantitativ ähnlichen Durchflutungsverhältnissen. Dies ist aber auch zu erwarten, wenn wir bedenken, daß sich die eingeschwemmten Trübungsstoffe im Brienersee in ganz bestimmter Tiefe halten und daß dem Thunersee deshalb verhältnismäßig wenig getrübtetes Oberflächenwasser zufließt. Zudem schichtet sich, wie Untersuchungen gezeigt haben, dieses Wasser in Tiefen ein, die selbst während des Tages bedeutend schwanken können, entsprechend den Veränderungen der Oberflächentemperatur im Brienersee. Allerdings zeigt die Kander ein ähnliches Verhalten wie Hasliaare und Lüttschine; doch tritt ihre Bedeutung quantitativ gegen diejenige der Aare bei Interlaken zurück.

- c) Interessant ist der gleichzeitige Abfall in der Lichtdurchlässigkeit wie im Streulicht im Luganersee vom Juni zum August 1954. Die Abnahme im Streulicht erklären wir uns durch einen Rückgang der Wasserführung, während der starke Abfall in der Blaudurchlässigkeit auf eine Zunahme an gelösten Humussubstanzen schließen läßt. Im allgemeinen wird das Vorhandensein von sogenannten «Gelbstoffen» der Wasserzufuhr aus Mooren zugeschrieben, während nach unseren Beobachtungen ebenfalls intensive biologische Tätigkeit eine ausgesprochene Anreicherung von blauabsorbierenden Stoffen im Gefolge hat.

Das Parallelgehen von Unterlicht- und Lichtdurchlässigkeitskurven in Root- und Murtensee erklären wir uns durch das an und für sich geringe Unterlicht in diesen Seen, verbunden mit einem eventuelle Schwankungen überdeckenden größeren, durch die Konstruktion der Meßgeräte bedingten systematischen Fehler. Denn die genaue Unterlichtintensität würde sich nur bei unendlich kleinem Ausmaß des Lichtmeßgerätes ergeben. Je größer dieses, um so mehr wird es sich den von oben kommenden Lichtstrom selber abdecken. Je größer ferner die Extinktion, um so stärker wird dieser Effekt in Erscheinung treten, weil in diesem Fall die wirksame Streustrahlung aus um so engerem Nachbarbezirk und aus um so geringerer Tiefe auf die lichtempfindliche Fläche der Zelle gelangt. Wie wir auf S. 20 ausführten, müßte sich bei geringer Selektivität im Unterlicht in Abb. 10 eine Gerade ergeben. Diese Behauptung gilt sinngemäß auch nur streng bei unendlich kleinen Dimensionen des Lichtmeßgerätes. Im praktischen Fall aber muß sich ein scheinbarer Intensitätsabfall gegen die Bereiche zunehmender Extinktion zeigen, wodurch die Kurven für das Unterlicht ein den Oberlichtkurven mehr oder weniger ähnliches Aussehen erhalten. Diese Zusammenhänge werden von uns

gegenwärtig nach quantitativen Beziehungen weiter untersucht.

Uns interessiert im weiteren die Variationsbreite im Unterlicht, also die Spanne zwischen maximaler und minimaler Unterlichtintensität eines Sees über einen längeren Zeitraum. Eine Durchsicht von Abb. 14 — 20 liefert folgende Zusammenstellung (Werte für Grün, Filter VG 9):

	Max. Unterl. in ‰ d. Oberl.	Min. Unterl. in ‰ d. Oberl.	Differenz
Brienzersee	29,2	12,6	16,6
Thunersee	13,8	1,6	12,2
Zürichsee	9,8	1,5	8,3
Luganersee	9,0	1,5	7,5
Bielsee	9,4	3,1	6,3
Murtensee	8,0	2,4	5,6
Rootsee	7,0	2,3	4,7

Wie zu erwarten, stehen Thuner- und Brienzersee, also die stark durchfluteten Gewässer, an der Spitze. Auf den ersten Blick überrascht die geringe Schwankung im Unterlicht bei dem am ausgiebigsten durchströmten Bielersee. Doch bezieht dieser See, wie wir weiter oben ausführten, den bedeutendsten Anteil seines Zuflusses aus anderen Seen, die gewissermaßen als Sedimentations- und damit Klärbecken dienen. Der Bielersee zeigt deshalb in seinem Unterlicht wenig ausgeprägte Spitzen aber dennoch während des ganzen Jahres bedeutende Intensität. Der Minimalwert von 3,1 ‰ wird einzig vom Brienzersee nicht unterschritten. Durch Sedimentation verliert das durchfließende Wasser eben vorerst die größten Partikel, während allerfeinste Suspensionen infolge ihrer oft unmerklichen Sinkgeschwindigkeit ins Abflußwasser eines Sees gelangen. Dem Bielersee werden deshalb vor allem feinste Schwebestoffe zugeführt, die sich dann noch monatelang in Schwebe halten können.

Abb. 14 — 20: Zeitliche Aenderung von Lichtdurchlässigkeit, Unterlicht, Durchflutung und Sichttiefe in sieben Schweizerseen.

Es bedeuten:

- R Unterlicht in Prozenten des Oberlichtes.
- D Lichtdurchlässigkeit in Prozenten pro Meterschicht
- Grün } für Lichtdurchlässigkeit und Unterlicht.
- Gelb }
- Blau }
- Sm Sichttiefe in Metern (Sm)
- Monatsumittel der sekundlichen Abflußmengen (m³/s)

Abb. 14

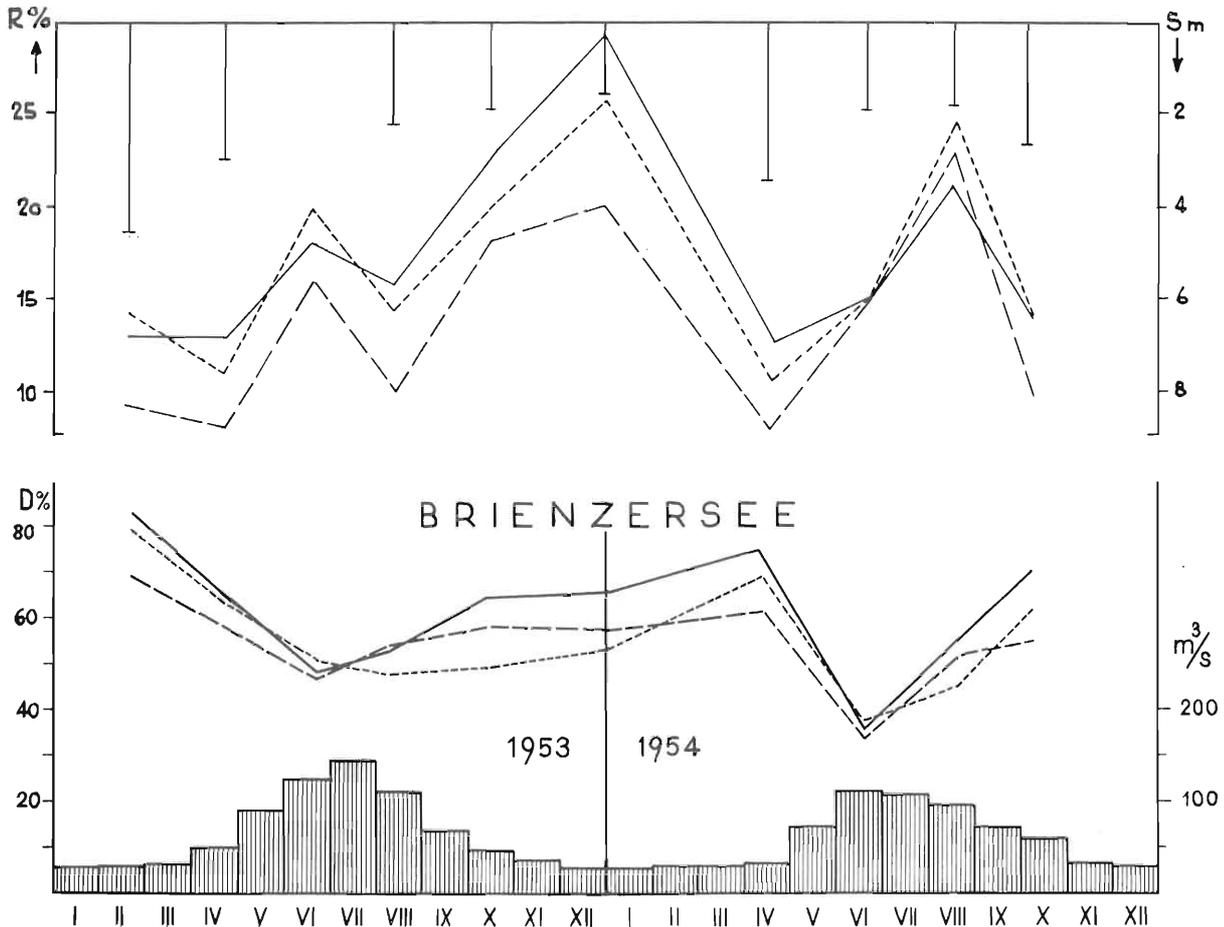
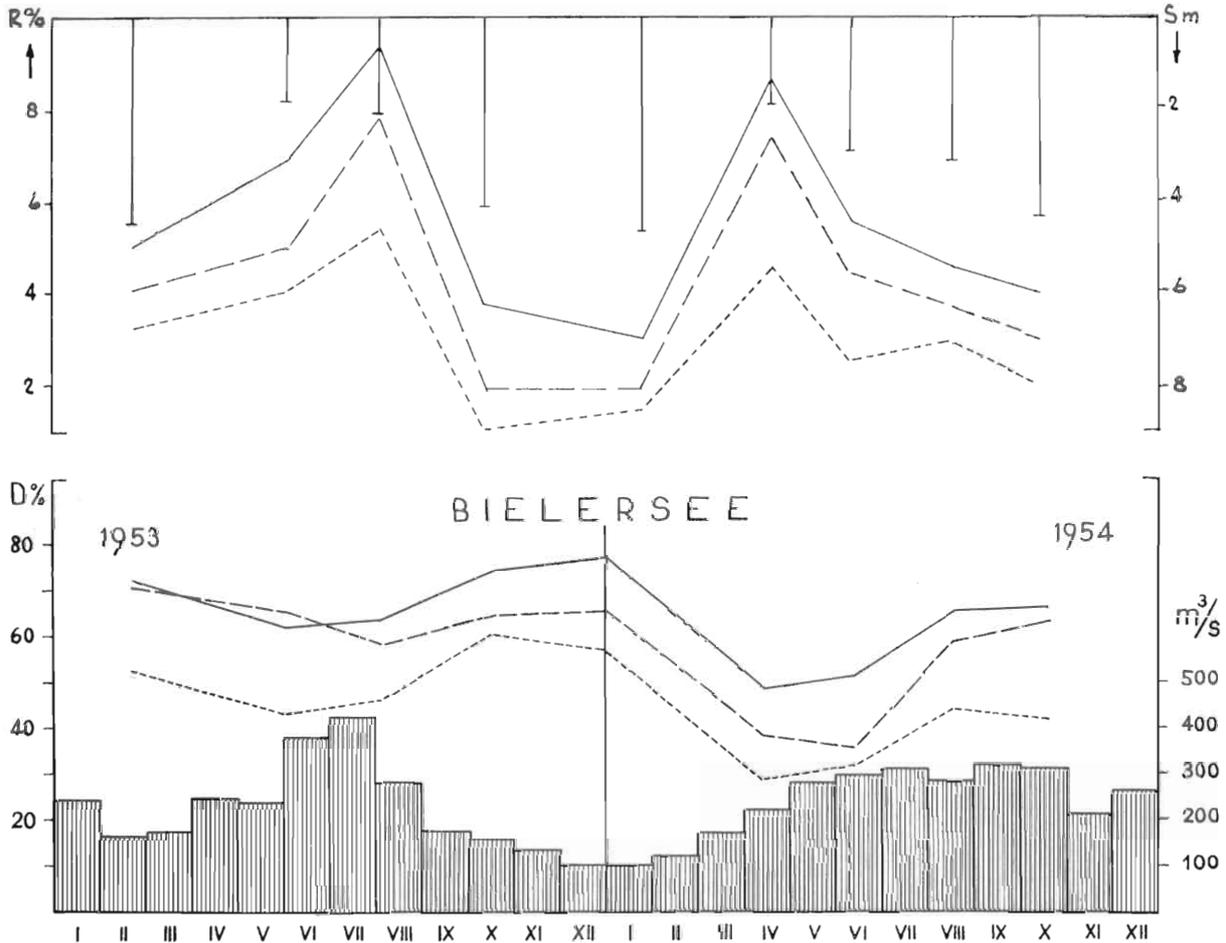


Abb. 15



Fragen wir zum Schluß noch nach der Variationsbreite in der Lichtdurchlässigkeit unserer sieben Seen. Nehmen wir das Maximum zu 100 % an, so ergibt sich nach Abb. 14—20 im grünen Spektralbereich (VG 9) folgende Abnahme bis zur minimal festgestellten Transmission:

Brienzersee 60 %, Thunersee 26 %, Bielersee 36 %, Luganersee 32 %, Zürichsee 46 %, Murtensee 56 %, Rootsee 82 %.

Diese Transmissionsabnahmen können durch Schwebstoffe oder durch gelöste Substanzen verursacht sein. Wie wir weiter oben ausführten, läßt spektral gleichmäßige Extinktionszunahme auf das Vorhandensein von Suspensionen, eine vorwiegend im Blau sich auswirkende Lichtauslöschung auf gelöste Substanzen (Humusstoffe, Gelbstoffe) schließen. Aufschlußreich ist deshalb ein Vergleich der prozentualen Extinktionszunahme im Blau (BG 12) gegenüber den oben angeführten Werten im Grün. Wir finden:

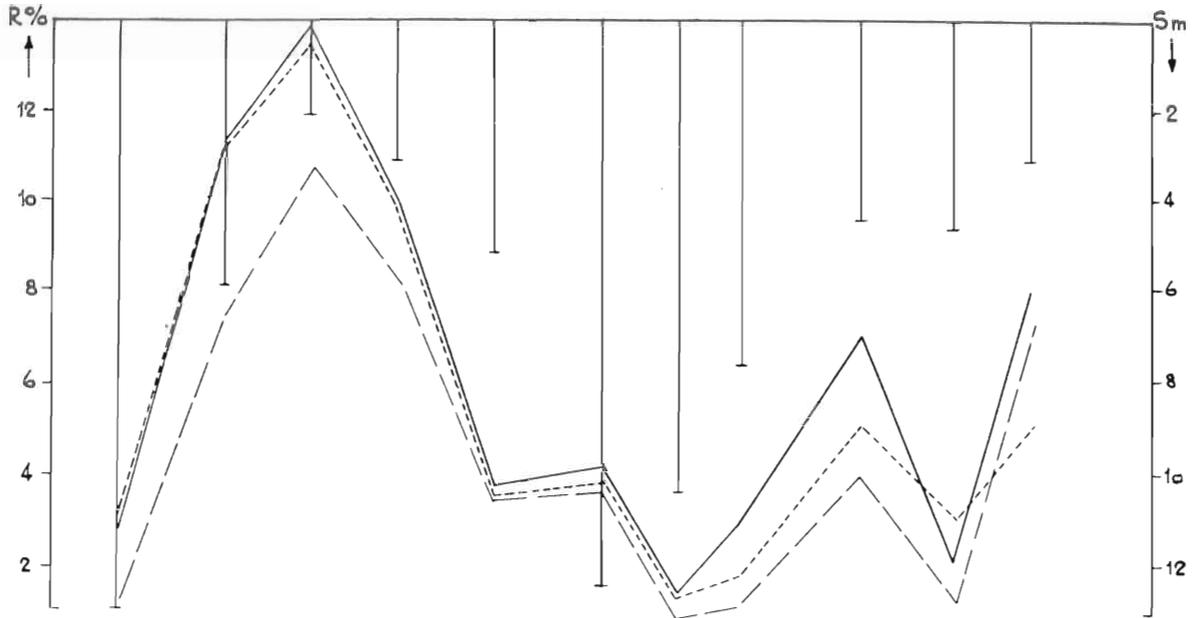
Brienzersee 53 %, Thunersee 24 %, Bielersee 54 %, Luganersee 52 %, Zürichsee 65 %, Murtensee 76 %, Rootsee 93 %.

Also wird im Brienzersee und sehr schwach auch im Thunersee die Extinktionszunahme im Blau von derjenigen im Grün noch übertroffen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß der Anteil der Absorption an der Gesamttextinction mit zunehmender

der Lichtdurchlässigkeit in den beiden Seen relativ zunimmt und daß sich deshalb in der Gröndurchlässigkeit ein stärkerer Anstieg zeigen muß als in der Blaudurchlässigkeit.

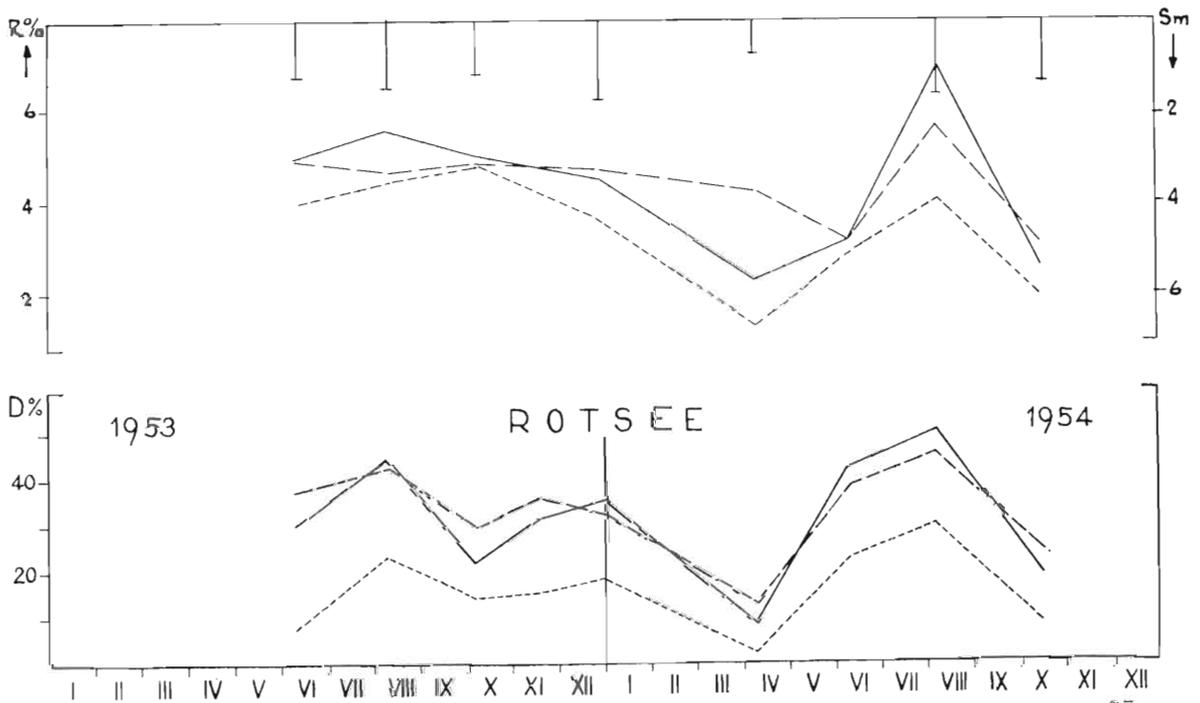
In allen anderen Seen zeigt sich ein deutliches Ueberwiegen in der Extinktionszunahme im Blau gegenüber Grün. Die Zunahme in der Lichtschwächung beruht hier also größtenteils auf Zunahme der Absorption und wird deshalb vorwiegend durch gelöste Substanzen verursacht sein. Dies verwundert vorerst bezüglich des stark durchfluteten Bielersees. Doch haben wir gesehen, daß dieses Gewässer während des ganzen Jahres ein verhältnismässig hohes Unterlicht zeigt, und nach unseren Ausführungen auf S. 18 (Zufuhr gelöster Humussubstanzen aus Wohlen- und Murtensee) ist eine bedeutende Schwankung in der Absorption zu erwarten. Im Rootsee, über dessen Durchflutungsgrad keine zuverlässigen Angaben vorliegen, vermuten wir eine bedeutende Lichtschwächung durch Streuung, also durch Schwebstoffe (Verhältnis der prozentualen Extinktionszunahme im Grün und im Blau = 82 : 93). Wir glauben, daß dieser See bei idealer Konstruktion der Meßvorrichtung ein viel stärkeres Unterlicht zeigen würde. Denn der auf S. 24 genannte Fehler muß hier, infolge geringer Lichtdurchlässigkeit, besonders schwer ins Gewicht fallen.

Abb. 16



THUNERSEE
1953 1954

Abb. 17



ROTSEE

Abb. 18

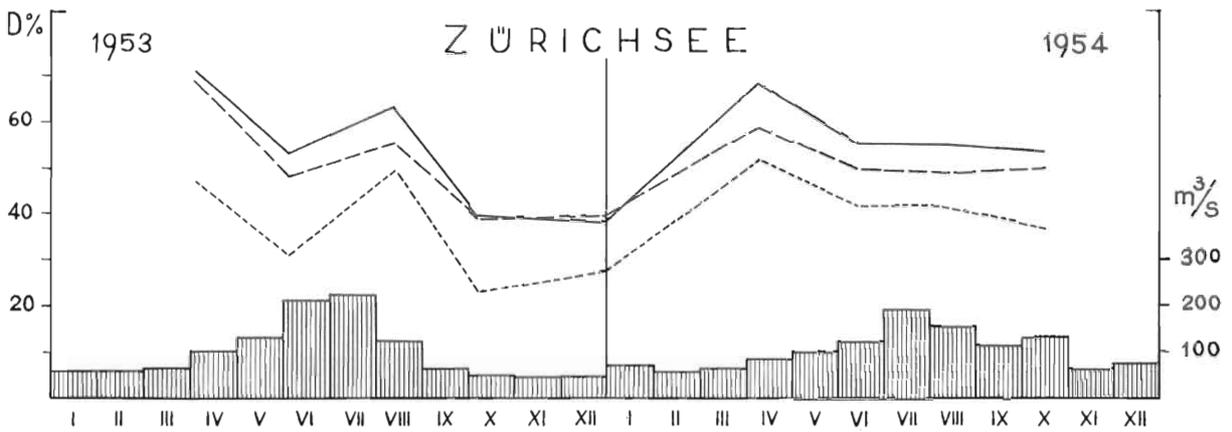
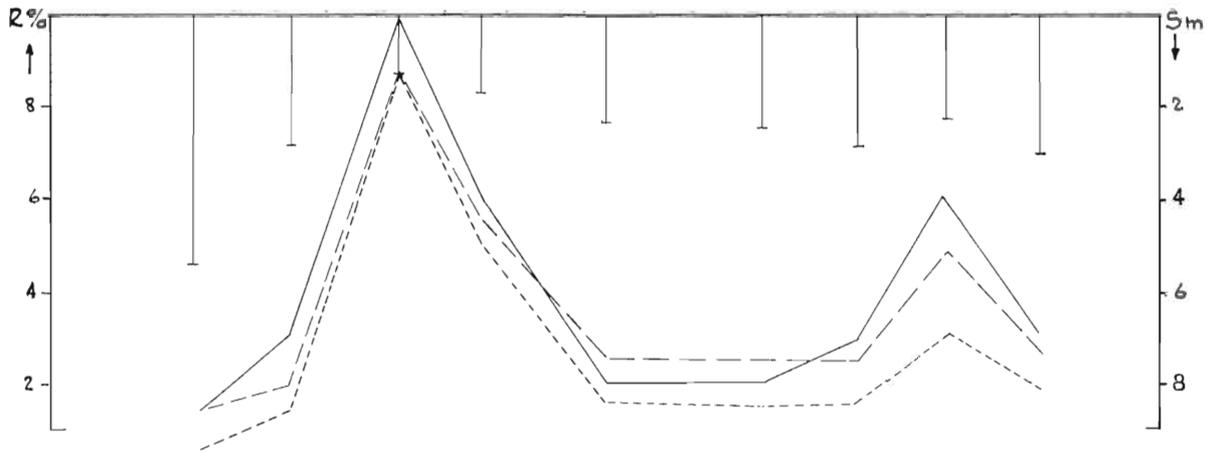


Abb. 19

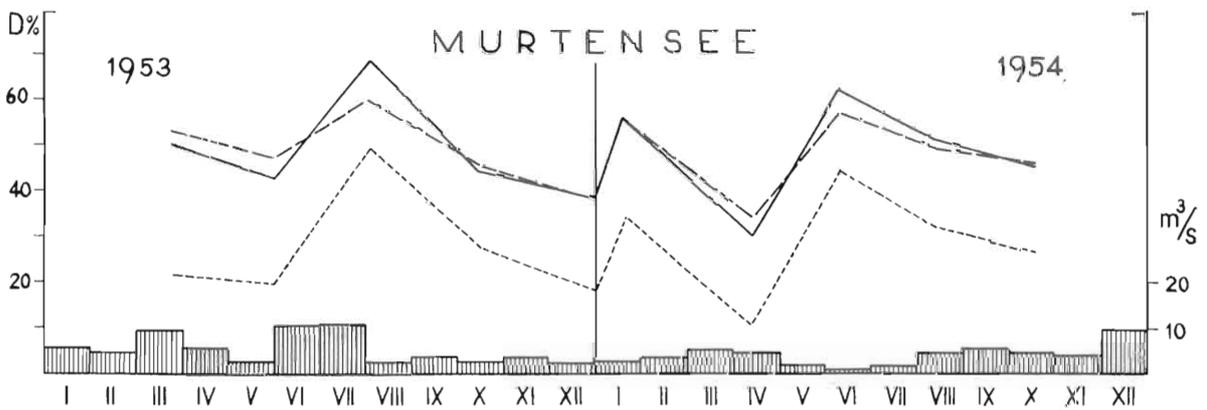
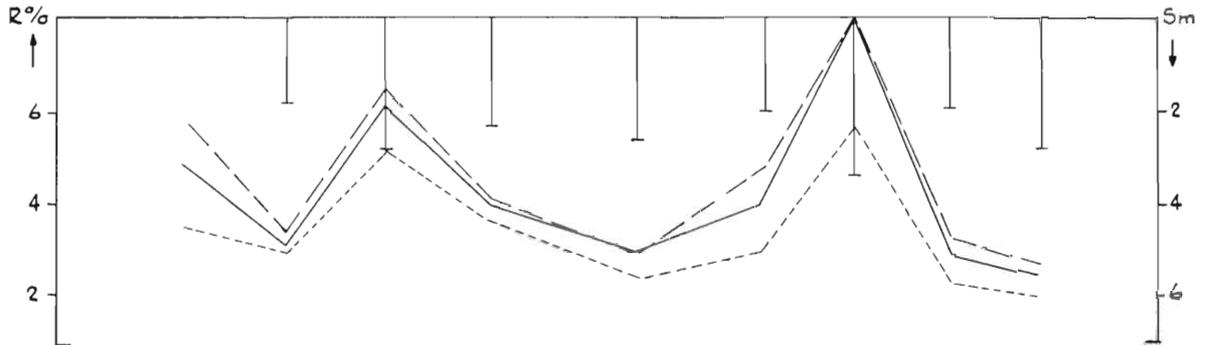


Abb. 20

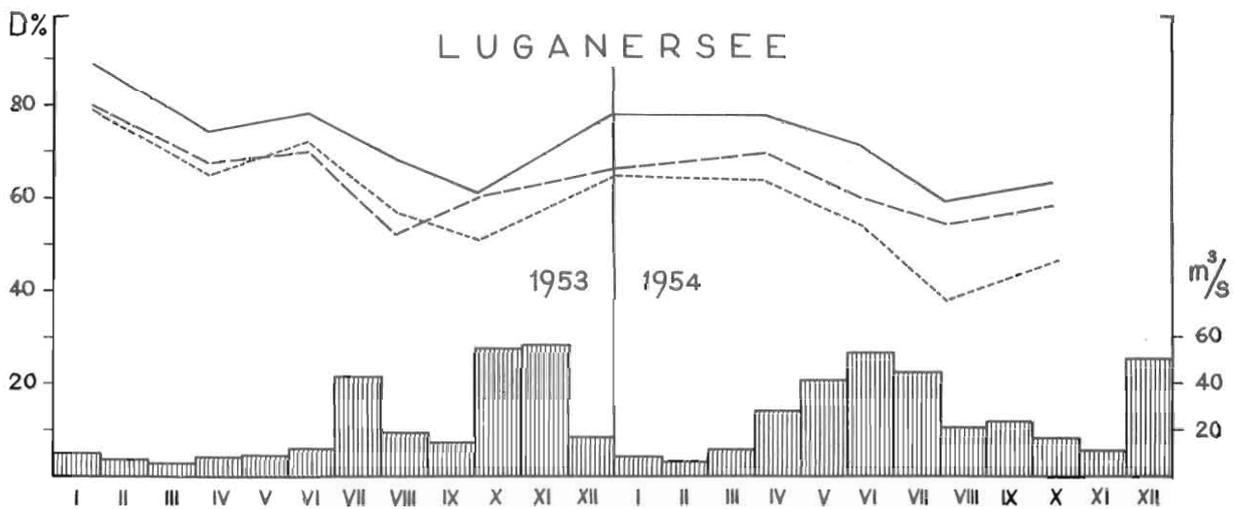
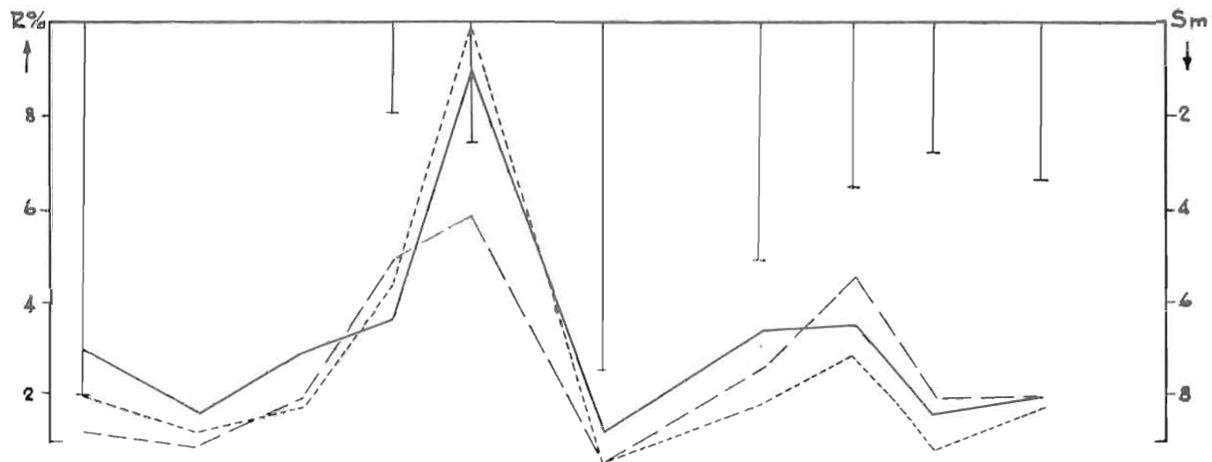
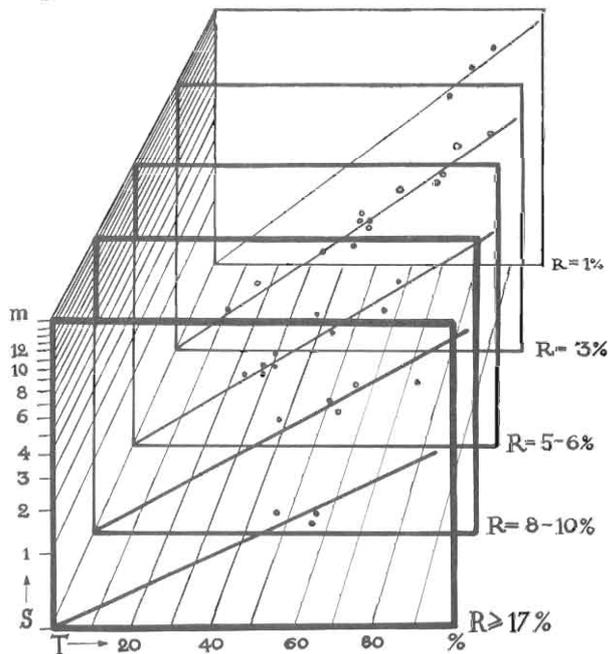


Abb. 21

Beziehung zwischen Sichttiefe und Lichtdurchlässigkeit für verschiedene Unterlichtwerte.



4. Sichttiefe und Lichtdurchlässigkeit.

Zum Schluß sei untersucht, wieweit die klassische Methode der Sichttiefebestimmung uns über die Lichtdurchlässigkeit einer Wasserschicht Aufschluß geben kann. Um diese Frage zu klären, wurde bei jeder Lichtmessung auch die Sichttiefe mit der Secchischeibe bestimmt. Die Ergebnisse finden sich in Abb. 14—20 graphisch aufgetragen. Recht gute Korrelation zwischen Sichttiefe und Lichtdurchlässigkeit finden wir in Root- und Murtensee, also den Seen mit der größten Extinktion, sehr schlechte in Briener- und Thunersee, also in den Seen mit großen Schwankungen im Unterlicht. Es ist klar, daß starke Lichtstreuung die Begrenzung der Scheibe früher unscharf erscheinen läßt, und daß sich deshalb eine kleinere Sichttiefe ergibt. Das Gegenteil müßte der Fall sein, wenn die Extinktion fast nur auf Absorption beruht. Aufschlußreich ist in dieser Beziehung folgender Vergleich: Eine Messung im Luganersee ergab am 6. Januar 1956 bei schwachem Unterlicht eine Durchlässigkeit von 83 % im Grün. Die Sichttiefe betrug 11 m, während diese im schwebstoffreichen Brienersee bei einer Durchlässigkeit von 76 % zu nur 5,3 m

bestimmt wurde. Das einfallende Licht an der Oberfläche zu 100 % gesetzt, ergäbe sich in der Tiefe des optischen Verschwindens der Scheibe beim Luganersee eine Oberlichtintensität von 13 % und beim Brienersee eine solche von 23 %, also fast das Doppelte. Dazu kommt im Brienersee noch ein bedeutender Prozentsatz Unterlicht.

Die Sichttiefe wird uns also kaum über die in einer bestimmten Tiefe vorhandene Lichtintensität Aufschluß geben können. Da sie aber in ziemlich weiten Grenzen von der Außenhelligkeit unabhängig ist, bleiben bei Verwendung von ein und derselben Scheibe nur zwei variable Größen, die von Einfluß sein können, nämlich Lichtdurchlässigkeit und Unterlichthelligkeit. Wählt man deshalb nur Vergleichspaare mit gleichen Unterlichtwerten, so muß sich eine eindeutige Beziehung zwischen Sichttiefe und Transparenz ergeben. Da die Tageslichthelligkeit nach der Tiefe logarithmisch abnimmt, liegt die Vermutung nahe, daß dies auch für die Sicht-

tiefe bei Abnahme der Lichtdurchlässigkeit der Fall sein muß. In Abb. 21 haben wir deshalb alle aus Abb. 14 — 20 sich ergebenden Wertepaare aus Sichttiefe und Transparenz für ähnliche Unterlichtwerte zusammengestellt. Auf der Ordinate wurden die Sichttiefen in logarithmischem und auf der Abszisse die Lichtdurchlässigkeiten (in Prozenten der Meterschicht) in linearem Maßstab aufgetragen. Wie die Abbildung erkennen läßt, liegen die Schnittpunkte der Wertepaare recht gut auf Geraden. Die Eindeutigkeit der Beziehung verblüfft um so mehr, wenn man bedenkt, mit welcher primitiven Mitteln wir sehr oft die Sichttiefe bestimmen (Scheiben sehr ungleicher Größen, keine Abschirmung gegen Reflexion auf der Wasseroberfläche). Abb. 21 zeigt deutlich, daß die Sichttiefenbestimmung mit der Secchischeibe recht gute Anhaltspunkte über die Lichtdurchlässigkeit liefern kann, wenn es sich um Seen mit geringem und wenig wechselndem Unterlicht handelt.

III. THERMIK

A. Einleitung

Wie wir im Abschnitt «Optik» erkannten, vermag ein Teil der durch die Oberfläche eines Sees eintretenden Strahlung in größere Tiefe vorzudringen; der größte Teil aber wird in den obersten Zentimetern absorbiert. R u t t n e r [55] führt aus:

«Bedingt der erstere das Lichtklima einer bestimmten Tiefe und schafft die Voraussetzungen für die Assimilation des Kohlenstoffs durch die grüne Pflanze, so liefert die Absorption im Wasser die Wärme, den wichtigsten Regulator der Lebensvorgänge. Darüber hinaus beherrschen die Temperaturverhältnisse indirekt — durch die Dichteänderung des Wassers — auch die Schichtung der Wassermassen und die Strömungen in einem Seebecken. Wir können daher die Thermik als den Angelpunkt jeder limnologischen Forschung bezeichnen.»

Zur Orientierung über den jahreszeitlichen Gang der Temperatur und über Schichtungstypen verweisen wir auf R u t t n e r [55], F i n d e n e g g [21], H o f e r [29] und andere.

Für den Wärmehaushalt und die Temperaturschichtung eines Sees sind folgende Faktoren ausschlaggebend:

1. Wärmezufuhr und -abgabe
 - a) durch Strahlung,
 - b) durch Leitung Atmosphäre—Wasser und Erdboden—Wasser,
 - c) durch Zu- und Abflüsse.
 - d) durch Niederschläge,
 - e) durch Kondensation und Verdunstung.
2. Durchmischung
 - a) durch windbedingte Strömungs- und Turbulenzerscheinungen,
 - b) durch Abkühlung und dadurch verursachte Konvektionsströmungen.
3. Beckenform; denn diese bedingt:
 - a) Größe der Seeoberfläche und damit Angriffsmöglichkeit für die Scherkraft des Windes,
 - b) Verhältnis von Oberfläche und Wasservolumen; denn dieses Verhältnis ist für den Betrag der Temperaturerhöhung durch die pro Flächeneinheit eingestrahlte Wärmemenge ausschlaggebend.
 - c) Evtl. Entwicklung der Uferbank. (Turbulenzhemmung bei geringer Tiefe; scharfe Ausbildung der Sprungschicht.)
4. Lage
 - a) Im Gradnetz und nach Meereshöhe,
 - b) zu den vorherrschenden Winden (Windexposition).

Die Bedeutung der einzelnen Faktoren soll im folgenden durch eine vergleichende Betrachtung des Wärmehaushaltes und der thermischen Schichtung in den einzelnen Seen abgeschätzt werden. Die Seen wurden so gewählt, daß verschiedene Bedingungen weitgehend übereinstimmen, wodurch die Wirkung der übrigen klarer hervortritt.

Wir verzichten auf die Veröffentlichung des Zahlenmaterials, einerseits wegen seines großen Umfangs, andererseits weil die Messungen, je nach Kurvenverlauf, in Abständen von Dezimetern bis zu mehreren Metern erfolgten.

Von jeder Temperaturlotung, die etwas Wesentliches enthält, wird im folgenden eine Temperaturkurve zu finden sein. Gemessen wurde meist mit einem Elektrothermometer eigener Konstruktion (siehe Abschnitt «Meßmethodik»). Ueber den Umfang der Temperaturmessungen siehe S. 7.

B. Meßmethodik

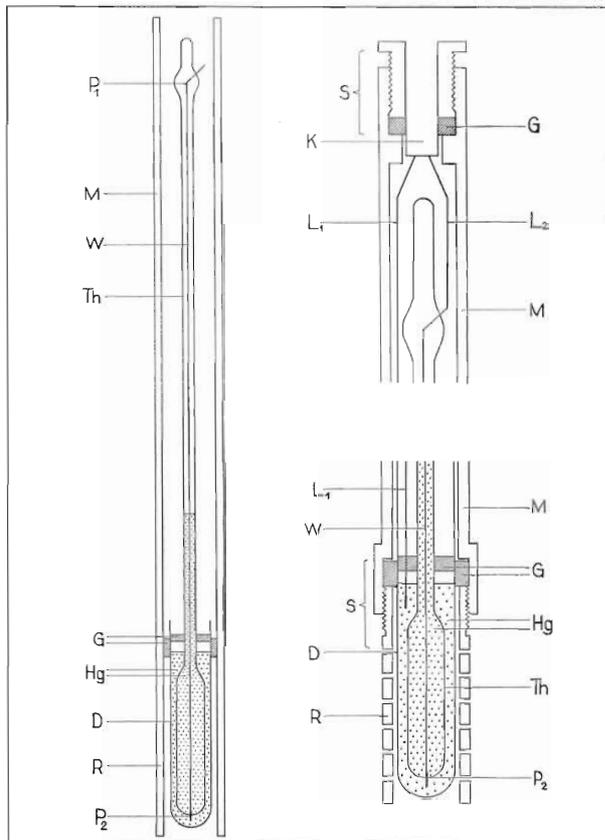
Die ersten Temperaturmessungen im Frühjahr 1951 wurden mit einem Kippthermometer der Firma Friedinger in Luzern ausgeführt. Im Bestreben, den vertikalen Temperaturverlauf eines Sees kontinuierlich abzutasten, suchten wir aber nach geeigneten elektrischen Meßmethoden. Versuche mit verschiedenen Halbleitermaterialien, sogenannten NGT-Widerständen, wie sie z. B. von Mortimer [45], Dussard [10] und Schmolinski [66] verwendet werden, befriedigten uns nicht, da sich deren Ausgangswiderstand veränderlich zeigte, so daß diese «Thermistoren» und «Heißleiter» immer wieder geeicht werden mußten. Zudem sind diese Widerstände, die allerdings einen sehr hohen Temperaturkoeffizienten besitzen, sehr stromempfindlich. Es sollte also mit sehr kleinen und konstanten Stromstärken gearbeitet werden, um eine Erwärmung der Widerstandskörper zu vermeiden. Dies erfordert ein außerordentlich empfindliches Galvanometer. Je empfindlicher aber ein Meßinstrument ist, desto leichter reagiert es auf kleinste Schwankungen des Arbeitsbootes. An dieser Schwierigkeit scheitert ja im allgemeinen auch die exkursionsmäßige Verwendung von Thermoelementen, obwohl es sich bei diesen zweifellos um die genaueste und einfachste Vorrichtung zur elektrischen Temperaturmessung handeln würde. Die im folgenden beschriebene Konstruktion eines Elektrothermometers zeigt die genannten Nachteile nicht und hat sich bei unseren Untersuchungen bewährt.

1. Temperaturempfindlicher Teil (siehe Abb. 22):
Durch die Kapillare eines Quecksilberthermo-

mers Th führt ein Widerstandsdraht W, dessen beide Enden durch Platinkontakte P_1 und P_2 mit einem Zuleitungskabel verbunden sind. Ein Steigen oder Sinken der Quecksilbersäule, als Funktion einer Temperaturänderung, hat zur Folge, daß ein Strom auf dem Wege P_1 — P_2 ein kürzeres oder längeres Stück des Wider-

Abbildung 22

Schematische Darstellung des Widerstandsthermometers



standsdrahtes durchfließen muß. Durch Messung des jeweiligen Widerstandes läßt sich also die entsprechende Temperatur ermitteln.

Als Widerstandsdraht wurde zuerst Platin, dann Chromnickel, das gegen Quecksilber ebenfalls widerstandsfähig zu sein scheint, verwendet. Der Gesamtwiderstand bewegt sich in unserem Fall für die Temperaturen von 0—30° C zwischen 0,5 und 203 Ω . Widerstandsänderung und Temperaturänderung verlaufen praktisch linear, was die Eichung der Meßvorrichtung wesentlich erleichtert. Gearbeitet wurde meist mit Stromstärken von ca. 3 mA. Doch zeigte sich, daß Stromstärken bis 20 mA keinen Meßfehler durch Erwärmung des Widerstandsdrahtes bewirken. Der Temperaturkoeffizient des Drahtes kann übrigens wegen der großen Widerstandsänderung, die durch die Längenveränderung der

Quecksilbersäule bewirkt wird, vernachlässigt werden. Da Widerstand- und Temperaturänderung annähernd zueinander proportional sind, muß sich natürlich die prozentuale Widerstandsänderung pro Temperatureinheit bei Zunahme des Widerstandes vermindern. Diese Änderung beträgt z. B. bei 4° C 18 % und bei 20° C noch 4,5 %, ist also in jedem Fall sehr groß.

Das Glasthermometer wurde in ein Messingrohr eingeschlossen und sowohl oben als unten durch ein Stopfbüchensystem abgedichtet. Die einzelnen Buchstaben in Abb. 22 bedeuten:

M	=	Messingrohr
G	=	Gummidichtung
D	=	Druckschutzzyylinder
R	=	gelochtes Stahlrohr
S	=	Stopfbüchensystem
L	=	Stromzuführungen
K	=	Kabel
Hg	=	Quecksilber

2. Messung der Widerstandsänderung.

Um Meßfehler infolge Spannungsschwankungen der Stromquelle (3 Volt-Trockenbatterie) auszuschließen, wurde der Widerstand mit einer Wheatstonbrücke, deren Skala direkt in °C geeicht worden war, gemessen.

3. Das Thermometer wurde am Zuleitungskabel, welches von Meter zu Meter mit Marken versehen worden war, in die gewünschte Tiefe hinunter gelassen.

Ein Nachteil des beschriebenen Thermometers gegenüber NGT-Widerständen besteht in der größeren Trägheit. Neuerdings konnte aber durch Verwendung von Stahl an Stelle von Glas für den äußersten Mantel D die Reaktionszeit auf diejenige eines gewöhnlichen, empfindlichen Quecksilberthermometers gebracht werden. Denn die Verzögerung der Ausdehnung des Quecksilbers bei Temperaturanstieg hat seinen Grund praktisch nur in der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Glases, wogegen die Wärmekapazität des Quecksilbers vernachlässigt werden kann.

C. Betrachtungen über den jahreszeitlichen Temperaturverlauf in den einzelnen Seen

1. Allgemeines

Der funktionelle Zusammenhang der Größen Temperatur, Tiefe, Zeit läßt sich wohl an übersichtlichsten durch Tautochronen, die zeitlich von links nach rechts geordnet werden, darstellen. Diese Darstellungsart wurde deshalb in Abb. 28 bis 35 gewählt. Um den Zusammenhang Klima—Temperaturschichtung besser überblicken zu können, fügten wir jeder Abbil-

dung entsprechende Darstellungen über Windverhältnisse und Lufttemperatur¹ bei. Um die Kurven zu «glätten» und dadurch übersichtlicher zu gestalten, wurden die Angaben von je drei Tagen zusammengefaßt. Für die Temperaturangaben errechneten wir also das Mittel aus je drei Tagesmitteln, während die Windstärkeangaben jedes Beobachtungspostens quadriert und die Quadrate addiert wurden. So ergaben sich für je drei Tage immer neun Quadratzahlen.

Dieses Vorgehen beruht auf folgenden Ueberlegungen:

- a) die Angaben der Windstärken erfolgen nach der sechsteiligen Beaufortskala. Die Beziehung Windstärke-Windgeschwindigkeit ist folgende:

Windstärke (nach der sechsteiligen Beaufortskala)	1	2	3	4
Ungefähre Windgeschwindigkeit in m/sec	2,5	6,2	11,1	16,7

Das Verhältnis ist also annähernd linear.

- b) Beobachtungen haben aber folgende Beziehung zwischen Austauschwert A und Windgeschwindigkeit ergeben (siehe Geßner [23] S. 401).

Windgeschw. in m/sec	3	5	7	15
Austauschwert	28	110	220	1000

Daraus ergibt sich, daß die Windwirkung mit dem Quadrat der Windgeschwindigkeit zunimmt.

Da aber (nach a) Windstärke in Graden der Beaufortskala und Windgeschwindigkeit annähernd proportional sind, verhalten sich (nach b) die Windwirkungen zueinander wie die Quadrate der Beaufortwerte.

Die Kurven der täglichen Pegelstände, die in Abb. 28 bis 35 zu finden sind, sollen einen evtl. Einfluß der Durchflutung auf die Temperaturschichtung der Seen erkennen lassen. Die entsprechenden Angaben wurden der täglichen Wasserstandmeldung des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft entnommen.

2. Vergleich der klimatischen, morphometrischen und hydrologischen Größen in den Gebieten der untersuchten Seen.

a) Klimatische Größen.

In Abb. 23 wurden die Monatsmittel der Lufttemperatur der Stationen Zürich, Bern, Interlaken, Neuchâtel und Lugano für 1953

¹ Die entsprechenden Daten wurden teilweise den Annalen, teilweise unveröffentlichten Angaben der Schweiz. Meteorologischen Zentralanstalt entnommen. Das Entgegenkommen und weitgehende Verständnis der Schweiz. Meteorologischen Zentralanstalt, besonders des Herrn Dr. Schüepp, sei ausdrücklich verdankt.

aufgetragen, und wir erkennen, daß die Kurven für alle Stationen nördlich der Alpen verblüffend gut übereinstimmen. Einzig die Monatsmittel von Neuenburg liegen von April bis Oktober ca. 1°C höher.

Die gleiche Feststellung ergibt sich für die Monatssummen der Sonnenscheindauer in Zürich, Bern und Neuchâtel im Jahr 1954 (siehe Abb. 24) und größtenteils auch für 1953. Lediglich für November und Dezember 1953 wurden in Neuchâtel beträchtlich mehr Sonnenscheinstunden registriert als an den übrigen Stationen nördlich der Alpen. Für Luzern liegt das Total der Sonnenscheinstunden 10—15% tiefer als für Bern, Zürich und Neuenburg.

Bei Thuner-, Briener-, Bieler-, Murten- und Zürichsee können wir also für 1953 und 1954 mit sehr ähnlichen Einstrahlungsverhältnissen rechnen, während dieselben für den Rootsee ein wenig ungünstiger liegen. Auch für Lugano verläuft die Temperaturkurve im großen und ganzen gleichsinnig mit derjenigen jenseits des Alpenkammes. Doch liegt die Lufttemperatur im Sommer

Abb. 23

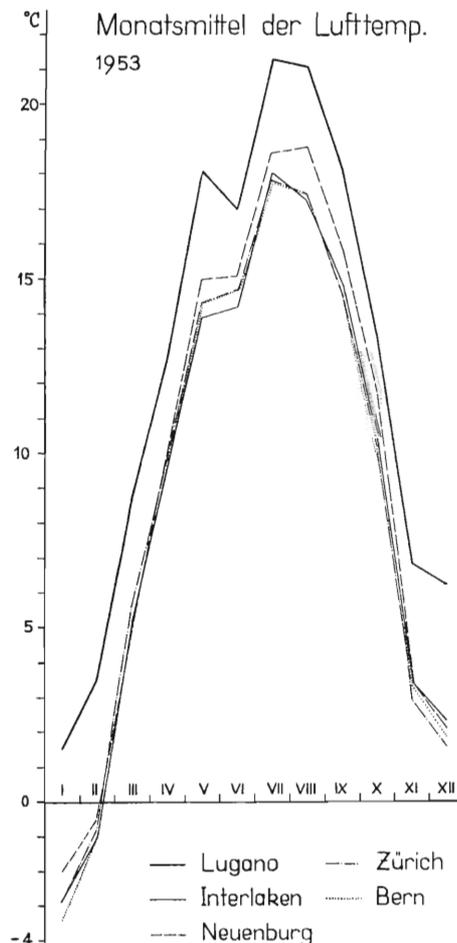
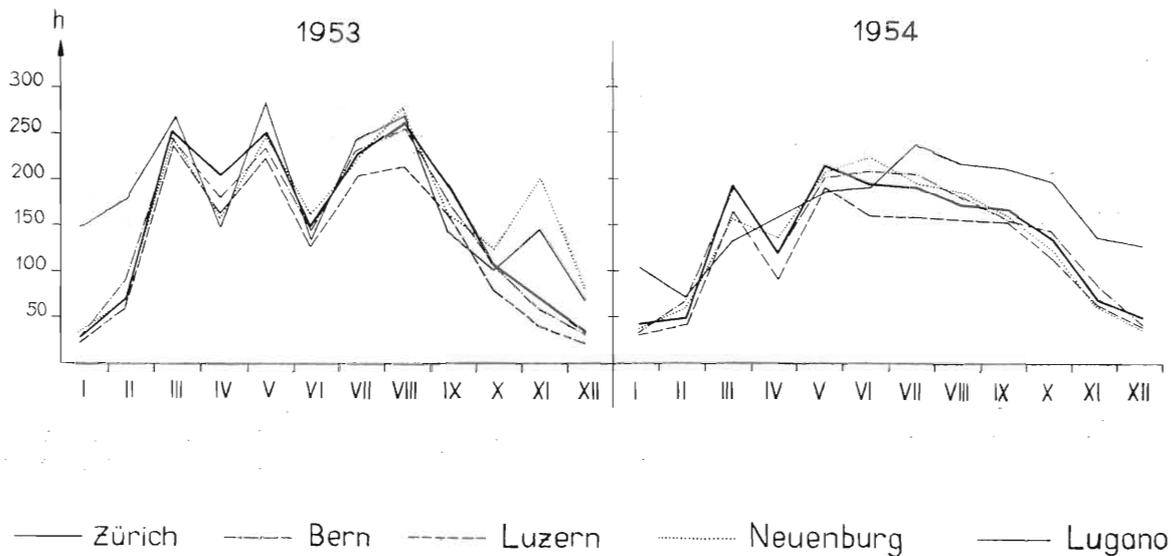


Abb. 24

Sonnenscheindauer in Stunden/Monat



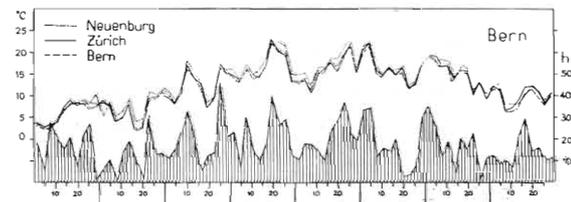
ca. $3,6^{\circ}\text{C}$ höher. Dies muß sich auch im Wärmeinhalt des Sees zeigen.

Der Verlauf der Lufttemperatur wurde für unsere Betrachtungen lediglich als Indikator für die Erwärmung durch Einstrahlung gewählt. Und es verblüfft auch, wie Lufttemperatur und Sonnenscheindauer mit einer Phasenverschiebung von 2—3 Tagen gleichsinnig laufen. (Siehe Abb. 25 und 26.) Die Luft wird ja vom Boden her erwärmt, also indirekt ebenfalls durch Einstrahlung. Aus folgenden Ueberlegungen glaube ich, daß die Wärmeleitung Luft-Wasser für die Erwärmung der Wassermasse keine wesentliche Rolle spielt:

- Die spezifischen Wärmen gleicher Volumina Wasser und Luft verhalten sich wie 1 : 3300.
- Angenommen die Luft würde Wärme an das Wasser abgeben, so würden sich die wassernahen, also die untersten Luftschichten abkühlen und dadurch schwerer werden als die überlagernden. So ergibt sich eine gewisse Stabilität der Luftmasse über dem See, die turbulenz- und damit austauschhemmend wirkt.

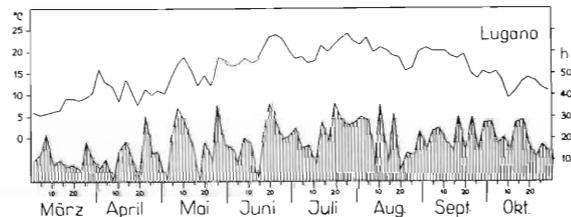
Umgekehrt wird bei Wärmeabgabe Wasser-Luft eine Konvektionsströmung sowohl in der Luft wie im Wasser hervorgerufen und dadurch der Austausch beschleunigt. Aber auch in diesem Fall wird die Abkühlung der Wassermassen durch Wärmeleitung, infolge der ungleichen spezifischen Wärmen von Wasser und Luft, unbedeutend sein.

Abb. 25



Sonnenscheindauer für Bern (schraffiert) und Mittelwerte der Lufttemperaturen aus je drei Tagen für Bern, Zürich und Neuenburg 1954.

Abb. 26



Sonnenscheindauer (schraffiert) und Mittelwerte der Lufttemperaturen aus je drei Tagen für Lugano 1954

Wesentlich größere Unterschiede als für Strahlung und Lufttemperatur zeigen sich nun aber für die Windverhältnisse, die während unseren Untersuchungen in den entsprechenden Regionen herrschten. (Siehe Abb. 28 bis 35 und vor allem Abb. 27.)

Wir stellen fest:

- Neuenburg zeigt die größten Windstärkeschwankungen (Differenzen zwischen minimaler und maximaler Windstärke) und überragt auch im Total der Windtätigkeit alle andern Stationen ganz beträchtlich. Auffallend sind auch die ausgesprochen windarmen Perioden.
- Im Total der Windtätigkeit werden Interlaken und Lugano von Zürich ein wenig übertroffen. Alle drei Stationen zeigen aber praktisch keine windfreien Perioden.
- Ähnlich wie Neuenburg, aber weniger ausgeprägt, zeigen auch Zürich und Lugano heraustretende Perioden intensivster Windtätigkeit (Spitzen), während dieselben bei Interlaken fast ganz fehlen.
- Bei allen Stationen zeigt das Jahr 1954 die unregelmäßigere und intensivere Windtätigkeit als 1953. (Siehe Abb. 28 bis 35.)
- Auffallend geringe Windtätigkeit finden wir für Interlaken 1951 und vor allem 1952. (Siehe Abb. 40 und 41.)

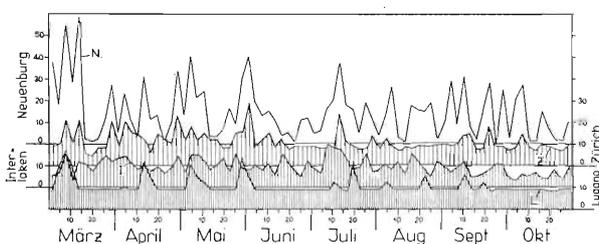
b) *Morphometrische Größen.*

Ueber Beckenform, Tiefe, Oberfläche im Verhältnis zum Seevolumen, Größe der Uferbank und Steilheit der Ufer orientieren die hypsographischen Diagramme in Abb. 2 und die Angaben in den Tabellen 3 und 4.

c) *Hydrologische Größen*

Für den Wärmehaushalt eines Sees spielt die Wassererneuerung eine wesentliche Rolle. Bringen doch die Zuflüsse meist kälteres Wasser, das sich in derjenigen Tiefe einschichtet, die seiner Temperatur und damit seiner Dichte entspricht, während

Abb. 27



Windverhältnisse März—Oktober 1953

Die Angaben in Graden der sechsteiligen Beaufortskala wurden quadriert und als Summe für je drei Tage aufgetragen.

das wärmere Oberflächenwasser durch den Abfluß abgeschöpft wird. Bei ähnlichen Niederschlagsmengen gibt das Verhältnis Einzugsgebiet zu Secareal ein brauchbares Vergleichsmaß für den Grad der Durchflutung. Nach den Angaben in Tabelle 3 würde sich also der Durchflutungsgrad in der Reihenfolge Bielersee, Brienersee, Thunersee, Murtensee, Zürichsee, Luganersee wie 60 : 49 : 33 : 25 : 13 : 11 verhalten¹. Für den Rootsee liegen leider keine genauen Angaben vor; doch schätzt A d a m [2], daß durch den Verbindungskanal mit der Reuß pro Sekunde 1 m³ Wasser zugeführt wird. Auf die Seeoberfläche bezogen würde dann die Durchflutung ungefähr derjenigen des Brienersees entsprechen, auf das Seevolumen bezogen wäre sie aber zwanzigmal so groß, was wir bezweifeln. Die mittlere jährliche Niederschlagshöhe der einzelnen Einzugsgebiete beträgt nach der Karte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt für 1901—1940 ca.:

Thuner-, Briener-, Zürichsee	160 cm
Luganersee	180 cm
Bielersee	130 cm
Murtensee	100 cm

Berücksichtigen wir nun, außer dem Verhältnis Einzugsgebiet : Secareal, auch die Niederschlagshöhe für den Grad der Durchflutung, so ergeben sich für Bieler-, Briener-, Thuner-, Murten-, Zürich-, Luganersee die Verhältniszahlen 78 : 78 : 53 : 25 : 21 : 20. Der Durchflutungsgrad ist bei allen Seen unserer Untersuchungsreihe verhältnismäßig hoch und dennoch so unterschiedlich, daß die Bedeutung der Wassererneuerung für den Wärmehaushalt bei einer vergleichenden Betrachtung ersichtlich werden dürfte. Da wir zur Abklärung verschiedener Fragen auch auf Untersuchungen in Kärnten hinweisen werden, seien noch einige Angaben über das Verhältnis von Einzugsgebiet zu Secareal dieser Seen (nach F i n d e n e g g) angeführt:

Millstättersee	21 : 1
Ossiachersee	14 : 1
Wörthersee	8 : 1
Weißensee	7 : 1
Klopeinersce	3,5 : 1

3. *Charakteristische Merkmale des Temperaturverlaufes in den einzelnen Seen. (Abb. 28—35)*

a) *März—April 1953*

Bielersee (22. 3.) und Murtensee 25. 3.)

Die ganze Wassermasse erscheint ein wenig unter 4 ° C abgekühlt, was auf die intensive

¹ Ueber Berechnung der Einzugsgebiete siehe S. 14.

Windtätigkeit verbunden mit kühler Witterung in der ersten Märzhälfte zurückzuführen ist. Nach Berichten der Anwohner waren die beiden Seen in den der Messung unmittelbar vorangegangenen Tagen morgens stets mit einer dünnen Eisschicht bedeckt.

Thuner- und Brienersee (19. und 12. 4.): Die erste Erwärmung wurde beim Thunersee bis in 29 m, beim Brienersee aber bis in 40 m Tiefe bewirkt. Wahrscheinlich hat die Stabilität der Schichtung im Thunersee, infolge Einschichtung vorerwärmten Oberflächenwassers aus dem Brienersee, rascher zugenommen, wodurch der Wärmeaustausch früher abgebremst worden ist als im Brienersee. Der steile Anstieg der Pegelstandkurve Anfang April stützt diese Vermutung.

Zürichsee (12. 4.):

Auch hier gelangte ein unbedeutender Wärmetransport bis zu 40 m hinab (kühle und windige erste Märzhälfte). Ein weiterer Wärmeschub erreichte nur eine Tiefe von 17—18 m (ebenfalls windige, aber verhältnismäßig warme Periode Ende März—Anfang April). (Ueber die für die Temperaturschichtung des Zürichsees charakteristische Tiefe von 17—18 m siehe S. 48.)

Luganersee (8. 4.):

Hier finden wir die entsprechenden Temperaturstufen in Tiefen von 25 und 15 m, was wohl auf die außerordentlich milde erste Märzhälfte zurückzuführen ist. Rasche Erwärmung im Frühjahr bewirkt frühzeitige Bildung einer Temperaturbarriere, wodurch weiterer Austausch mit der Tiefe verunmöglicht wird. Auch dürfte die höhere Ausgangstemperatur, die dieser See bei Frühjahrshomothermie zeigt, eine Rolle spielen, da die Dichtedifferenzen pro Grad Temperaturerhöhung mit Temperaturanstieg beträchtlich zunehmen.

b) *Mai—Juni 1953*

Murten- und Bielersee (29. 5. und 1. 6.): Wir erkennen, namentlich im Murtensee, fünf deutliche Temperaturschichten, entsprechend dem Wechsel von fünf Wind- und fünf Warmwetterperioden seit der letzten Messung. Im Bielersee wurden die einzelnen Stufen, wohl infolge sehr viel stärkerer Durchflutung, teilweise verwischt.

Thuner- und Brienersee (19. 6. und 21. 6.): Auch hier, allerdings weniger markant als im Murtensee, finden wir, den Witterungs-

perioden entsprechend, blätterartigen Aufbau der erwärmten Wassermasse. Der Kälteeinbruch vom 5.—10. April, verbunden mit einer Periode vermehrter Windtätigkeit, brachte eine beträchtliche Temperaturerhöhung unterhalb 30 m Tiefe. Im Thunersee liegen die entsprechenden Temperaturstufen im allgemeinen etwas tiefer als im Brienersee. Dies läßt sich durch das Abfließen der wärmsten, obersten Wasserschichten aus dem Brienersee und entsprechendes «Aufblähen» der betreffenden Schichten im Thunersee erklären. (Siehe Pegelkurven Mai—Juni für Thuner- und Brienersee.) Die gleiche Ursache darf wohl ganz allgemein für die höhere Temperatur des Thunersees zwischen 5 und 30 m gegenüber der entsprechenden Tiefe im Brienersee angeführt werden. (Siehe hierüber S. 55.)

Zürichsee (4. 6.):

Zürich- und Luganersee zeigen ein deutliches Epilimnion, während bei allen andern Seen die sogenannte «Sprungschicht» die Oberfläche erreicht. Dieses Epilimnion ist wahrscheinlich durch den Kälterückfall Ende Mai bis Anfang Juni, also gewissermaßen durch ein Beschneiden der Temperaturkurve «von rechts her», gebildet worden und wird zweifellos bald wieder zerstört sein. (Siehe hierüber Abschnitt C, 4.)

Rootsee (8. 6.):

Die Temperaturkurve dieses Sees liefert die Bestätigung für die Voraussage der baldigen Zerstörung des Epilimnions im Zürichsee. Trotzdem die Temperaturmessung nur vier Tage später erfolgte, reicht die «Sprungschicht» bereits wieder bis zur Oberfläche. Zweifellos wurde aber die thermische Schichtung dieses Sees durch den erwähnten Kälterückfall mindestens ebenso beeinflusst wie diejenige des Zürichsees.

Luganersee (11. 6.):

Sehr deutlich lassen sich auf der «Windkurve» ab Anfang März vier Spitzen, die gut mit vier Kälteeinbrüchen korrespondieren, erkennen. Dementsprechend deutlich ist die thermische, treppenförmige Schichtung ausgebildet. (Ueber Epilimnionbildung siehe bei «Zürichsee» und Abschnitt C, 4.)

c) *August 1953*

Sämtliche Pegelkurven lassen für Ende Juni bis Anfang Juli ein ausgesprochenes Maximum der Wasserführung erkennen. Wir werden deshalb versuchen, in den Temperaturkurven die Auswirkung dieser regen Durchflutung zu verfolgen.

Murtensee (2. 8.):

Die Temperatursprünge wurden weitgehend geglättet und verwischt.

Bielersee (3. 8.):

Da das zufließende Wasser sich in derjenigen Tiefe des Sees einschichtet, die seiner Dichte entspricht, ist zu erwarten, daß dadurch beim Bielersee vor allem oberflächennahe Schichten betroffen werden. Erhält dieser See doch hauptsächlich erwärmtes Oberflächenwasser aus verschiedenen andern Seen. Damit läßt sich wohl auch die «Epilimnionbildung», die am 2. 8. 53 bis 12 m und am 18. 8. 54 bis 15 m Tiefe reicht, erklären.

Thuner- und Brienersee (4. 9. und 6. 8.):

Auch hier Einschichtung des im Brienersee vorerwärmten Wassers in oberflächennahe Schichten des Thunersees, wodurch sich dessen Wärmeinhalt noch deutlicher als bei der letzten Messung von demjenigen des Brienersees unterscheidet. Der Abfluß erwärmten Wassers aus dem Brienersee in den Thunersee und der dadurch bewirkte Wärmetransport wird im Abschnitt «Wärmeinhalt» eingehender besprochen.

Zürichsee (13. 8.):

Vermutlich hat sich hier das zufließende Wasser in 14 bis 30 m Tiefe eingeschoben, wodurch Temperatursprünge in dieser Tiefe verwischt, oberhalb aber verschärft wurden. Doch spielt beim Zürichsee die Beckenform für die Bildung thermischer Schichten zweifellos eine wichtige Rolle (siehe Abschnitt C 5).

Wir stellen zusammenfassend fest:

- Rege Durchflutung bläht die sogenannte Sprungschicht auf und verwischt die feineren Temperatursprünge in derselben.
- Sekundär kann Durchflutung aber auch Temperaturerhöhung im Epilimnion und damit Verschärfung thermischer Schichtung bewirken, indem warmes Oberflächenwasser eines Sees einem andern See zugeführt wird.

d) Oktober 1953

Die herbstliche Abkühlung hat eingesetzt; die Wärmeabgabe übertrifft die -aufnahme, und damit hat auch die Bildung eines eigentlichen Epilimnions begonnen. (Siehe hierüber Abschnitt C 4.) Die Abnahme der Stabilität läßt die Durchmischungsarbeit des Windes augenscheinlicher zur Geltung kom-

men. (Verschärfung des Temperaturgefälles in 14 m Tiefe bei Murten- und Luganersee, in 12 m beim Zürich- und in 6 m beim Rootsee.) Eine Ausnahme macht nur der Brienersee infolge seiner geringen Oberflächentemperatur. Denn je niedriger diese, um so später wird sich jener Zustand einstellen in welchem die Wärmeabgabe an die Atmosphäre die Einstrahlung übertrifft. Der Unterschied im Wärmeinhalt bei Thuner- und Brienersee (trotz weitgehender Uebereinstimmung von Beckenform und Klima) ist überraschend groß. (Siehe hierüber Abschnitt «Wärmeinhalt».) Interessant ist ein Vergleich der Monatsmittel der Lufttemperaturen der entsprechenden Gebiete im Oktober 1953 mit den Oberflächentemperaturen der verschiedenen Seen. (Siehe Abb. 23.) Es ergibt sich folgende Reihenfolge:

	Differenz aus Monatsmittel der Lufttemp. und Ober- flächentemp. der Seen
Luganersee	ca. 7 ° C
Zürichsee	ca. 6 ° C
Rootsee	ca. 5,5 ° C
Thunersee	ca. 4 ° C
Bieler- und Murtensee	ca. 3 ° C
Brienersee	ca. 2 ° C

Die herbstliche Abkühlung geht bekanntlich in der Weise vor sich, daß die an der Oberfläche abgekühlten Wasserteilchen absinken, wodurch wärmere nach oben gedrängt und dem Wärmeentzug ausgesetzt werden. Durch diese Konvektionsströmung wird die Temperaturkurve gewissermaßen von «rechts her senkrecht beschnitten». Windwirkung kann nun durch Turbulenz diesen Wärmetransport aus der Tiefe in Richtung Oberfläche wesentlich beschleunigen. Und wir glauben, daß die rasche Abkühlung bei Murten- und Bielersee der intensiven Windtätigkeit zuzuschreiben ist. (Vergleiche die verschiedenen Windkurven für Sept.–Okt. 1953 in Abb. 28.) Das Gegenbeispiel finden wir im Luganersee: Zuzug der höheren Temperatur besitzt dieser See eine größere Stabilität der Schichtung und setzt der durchmischenden Wirkung des Windes größeren Widerstand entgegen als die anderen Seen.

Der Einwand, die genannten Erscheinungen könnten auf die Zeitdifferenz zwischen der Messung im Luganersee (3. 10.) und derjenigen im Murtensee (15. 10.) zurückgeführt werden, wird durch die Feststellung, daß ab 10. 10. 1953 wieder ein bedeutender Anstieg der Lufttemperatur einsetzte, entkräftet.

e) *Erwärmungshalbjahr 1954*

Ein gegenseitiger Vergleich des Temperaturverlaufs ergibt im wesentlichen die gleichen, für jeden See charakteristischen Merkmale, wie wir sie für das Erwärmungshalbjahr 1953 feststellten. Die Uebereinstimmung in den Kurvenbildern der beiden Jahre ist verblüffend. Wir verzichten deshalb auf eine diesbezügliche Diskussion. Interessanter dürfte ein Vergleich der Temperaturgänge beider Jahre in einzelnen Seen und damit eine Abschätzung des Einflusses klimatischer und hydrologischer Faktoren sein. Wie wir weiter oben feststellten, zeigen die Windstärkekurven für 1954 vermehrte Windtätigkeit gegenüber 1953. Die Zahl der Sonnenscheinstunden der Monate März, April, Mai 1954 liegt auf der Alpennordseite mindestens 20 % tiefer als in der entsprechenden Zeitperiode des Vorjahres. (Siehe Abb. 24.) Es ist eine längst bekannte Tatsache, daß kühles und windiges Frühsommerwetter hohe Tiefentemperaturen der Seen zur Folge hat. Denn bei langsamer Erwärmung der Oberfläche vermag der Wind die zugestrahlte Wärme laufend in die Tiefe zu arbeiten, und so kommt es verhältnismäßig spät zu einer austauschhemmenden Temperaturschichtung. Diese Zusammenhänge finden wir bei einem Vergleich der Temperaturkurven der beiden Jahre in Zürich-, Bieler-, Murten- und Rootsee vortrefflich bestätigt, während sich Thuner-, Briener- und Luganersee, also die ausgesprochen tiefen Alpenrandseen, gegenüber Klimaschwankungen stabiler zu verhalten scheinen.

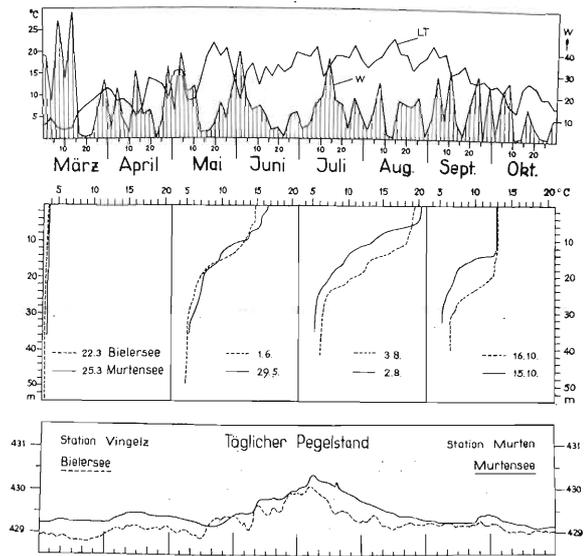
Ein Vergleich der Temperaturkurven bei Briener- und Thunersee im Jahr 1954 ist außerordentlich aufschlußreich für die Erklärung der Epilimnionbildung. (Siehe hierüber auch Abschnitt C 4.) Die beiden Seen unterliegen sehr ähnlichen klimatischen, morphologischen und hydrologischen Bedingungen. Wie wir schon weiter vorn bemerkten, saugt die Aare bei Interlaken das erwärmte Oberflächenwasser des Brienersees zum Teil ab und führt dieses dem Thunersee zu. Der Wärmeinhalt des Thunersees und auch seine Oberflächentemperatur werden deshalb wesentlich höher liegen, als beim Brienersee. Bei Temperaturrückgang wird sich folglich ein Ueberwiegen der Wärmeabgabe gegenüber der Wärmeaufnahme (negative Strahlungsbilanz) und damit die Bildung eines Epilimnions («Beschneiden der Temperaturkurve von rechts» bei Tautochronendarstellung) im Thunersee früher einstellen. Abb. 33 zeigt, daß der Thunersee tatsächlich bis zum 3. 10. von der herbstlichen Abkühlung schon sehr stark erfaßt worden war, während dieselbe dem Briener-

see, infolge seiner geringen Oberflächen-temperatur, noch nichts anhaben konnte.

f) *Der Grad der winterlichen Abkühlung*

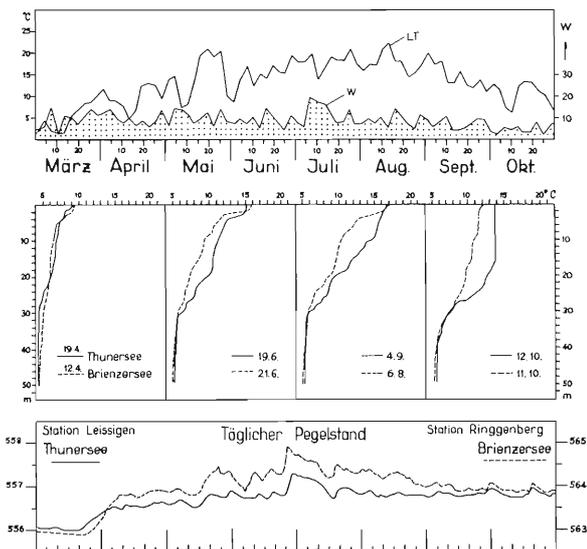
Je nach dem Verhältnis Oberfläche : Seevolumen wird die Abkühlung der Wasser-

Abb. 28



Lufttemperatur (LT), Windtätigkeit (W), Wassertemperatur und Pegelstand von Bieler- und Murtensee, Sommer 1953.

Abb. 29

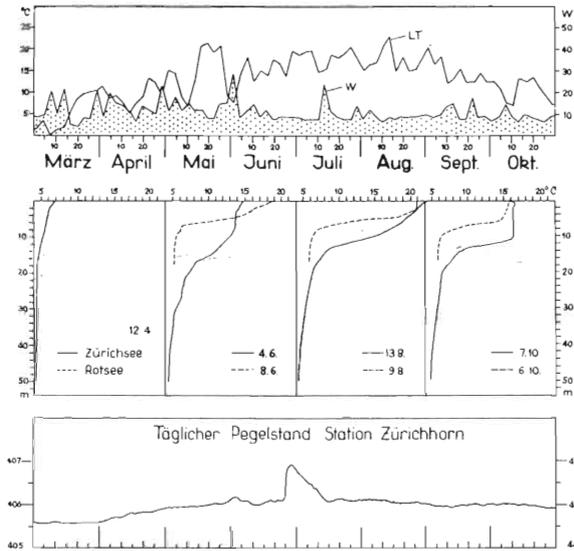


Lufttemperatur (LT), Windtätigkeit (W), Wassertemperatur und Pegelstand von Thuner- und Brienersee, Sommer 1953.

masse rascher oder langsamer erfolgen. Tabelle 11 gibt eine Zusammenstellung der von uns bestimmten Oberflächentemperaturen der Wassermassen der einzelnen Seen bis

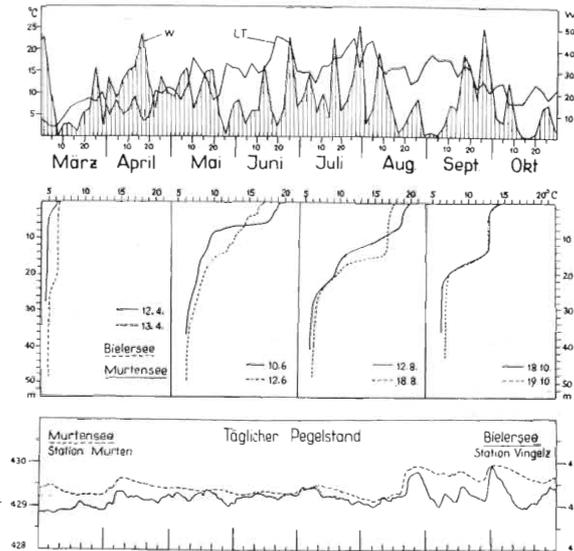
50 m Tiefe (resp. bis Grund). Ferner werden die mittleren Tiefen angegeben. (Ueber Berücksichtigung der obersten 50-m-Schicht siehe S. 51.)

Abb. 30



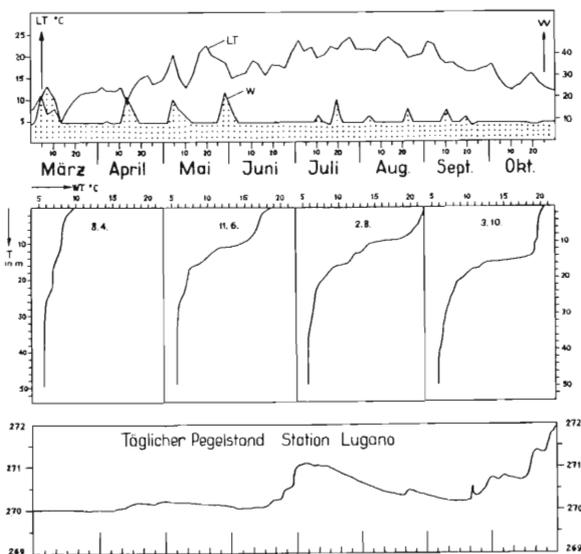
Lufttemperatur (LT), Windtätigkeit (W), Wassertemperatur und Pegelstand von Zürich- und Rootsee, Sommer 1953.

Abb. 32



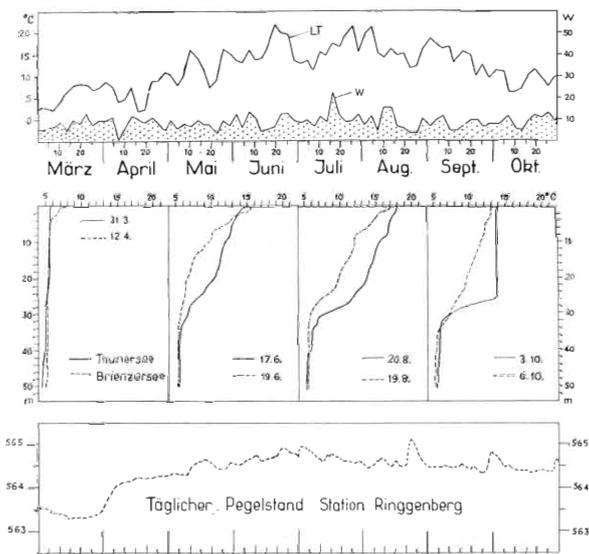
Lufttemperatur (LT), Windtätigkeit (W), Wassertemperatur und Pegelstand von Murten- und Bielersee, Sommer 1954.

Abb. 31



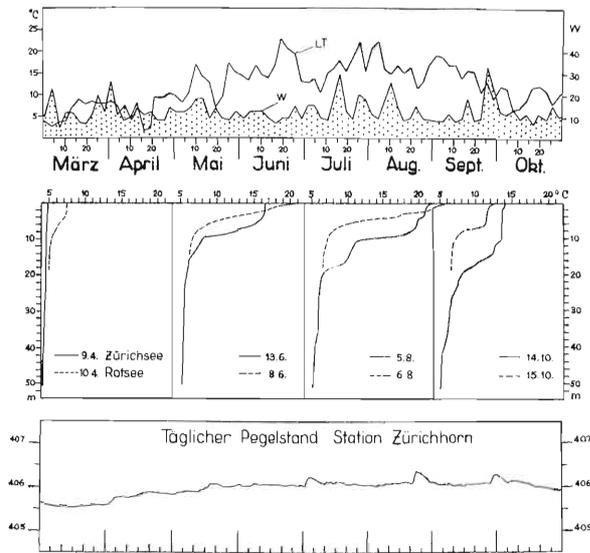
Lufttemperatur (LT), Windtätigkeit (W), Wassertemperatur und Pegelstand, Luganersee, Sommer 1953.

Abb. 33



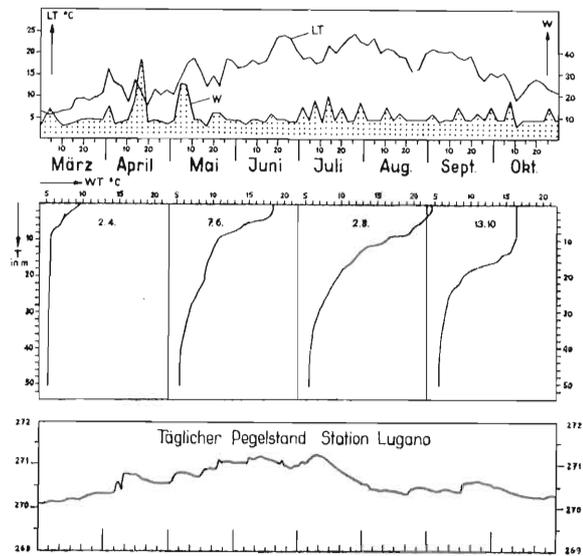
Lufttemperatur (LT), Windtätigkeit (W), Wassertemperatur und Pegelstand von Thuner- und Brienzsee, Sommer 1954.

Abb. 34



Lufttemperatur (LT), Windtätigkeit (W), Wassertemperatur und Pegelstand von Zürich- und Rootsee, Sommer 1954.

Abb. 35



Lufttemperatur (LT), Windtätigkeit (W), Wassertemperatur und Pegelstand, Luganersee, Sommer 1954.

Tabelle 11

Oberflächen- und Mitteltemperaturen (bis 50 m Tiefe)
Winter 1952/53 und 1953/54 sowie mittlere Tiefe der Seen

See	Datum	Oberflächen- temperatur ° C	Mittel- temperatur ° C	Mittel der Mitteltemp. ° C	mittlere Tiefe m
Rootsee	1. 1. 54	3,8	4,54	4,54	8,8
Murtensee	25. 3. 53	4,0	3,90	3,86	22,4
	19. 1. 54	3,8	3,83		
Bielersee	22. 3. 53	3,8	3,71	3,96	31,0
	17. 1. 54	4,2	4,20		
Zürichsee	12. 4. 53	7,0	4,78	4,72	54,0
	28. 12. 53	6,2	4,64		
Thunersee	19. 2. 53	4,4	4,28	4,14	135
	21. 2. 54	4,3	4,00		
Brienzersee	22. 2. 53	4,4	4,13	4,56	174
	2. 1. 54	5,1	5,00		
Luganersee	25. 1. 53	5,4	5,54	5,65	170
	2. 4. 54	9,7	5,77		

Wie zu erwarten, zeigen Seen mit geringer mittlerer Tiefe (Murten- und Bielersee) Temperaturen unter, Seen mit bedeutender Tiefe (Thuner-, Brienzer- und Zürichsee) über 4 ° C. Einzig der Rootsee mit seiner hohen Mitteltemperatur von 4,54 ° C bei

geringer mittlerer Tiefe paßt nicht in unser Schema.

Diese Abweichung läßt sich aber leicht erklären:

Wie Messungen zeigen, bestand die Wassermasse am 1. 1. 54 aus zwei Schichten, einer

oberen von ca. 4 °C Mitteltemperatur und einer untern von ca. 5,2 °C Mitteltemperatur (inverse Schichtung). Windbedingte und Konvektionsströmungen vermochten die Wassermasse nur bis ca. 10 m Tiefe zu durchmischen, weil das Tiefenwasser hohen Elektrolytgehalt besaß und dadurch spezifisch schwerer als das viergrädige Oberflächenwasser war. Die tiefsten Schichten blieben deshalb im Winter 1953/54 sauerstoffleer. (Siehe Abb. 47.)

Die Karbonathärte betrug:

Tiefe	0	5	15	m
Härte	12,4	12,5	22,7	f.H ^o

Im Winter 1955/56 reichte die Durchmischung und damit der Sauerstofftransport auch im Rootsee bis zum Grund. Der See ist also als zeitweise «meromiktisch» zu bezeichnen. (Ueber Meromixie siehe bei F i n-

d e n e g g [21], der dieses Problem an Kärntnerseen eingehend studiert hat.)

Die verhältnismäßig hohe Mitteltemperatur der obersten 50 m im Zürichsee ist vermutlich auf den vorzeitigen, resp. verspäteten Meßtermin (28. Dez. und 12. April) zurückzuführen, während z. B. beim Thunersee wirklich die minimalen Temperaturen (19. und 21. Feb.) festgestellt werden konnten.

g) *Die Temperaturen und deren Verlauf in den Tiefen der Seen — Seetypen*

Es ist selbstverständlich, daß seichte Seen in ihrer größten Tiefe größere Temperaturschwankungen zeigen als tiefe; denn bei Durchmischung verteilt sich eine zugeführte Wärmemenge bei den ersteren auf eine kleinere Wassermasse als bei den letzteren. Analog verhält es sich bei Abkühlung. Diese Tatsachen werden durch die Angaben der Tabelle 12 bestätigt.

Tab. 12

Höchste und tiefste während unserer Beobachtungsperiode gemessene Temperaturen der Seetiefen

See	Datum	Meßtiefe in m	höchste gem. Temperatur °C	tiefste gem. Temperatur °C	Temperaturdifferenz °C
Rootsee	8. 6. 53	16		5,0	1,7
	15. 10. 54	16	6,7		
Murtensee	25. 3. 53	36		3,9	2,8
	12. 8. 54	36	6,7		
Bielersee	22. 3. 53	60		4,1	2,3
	1. 10. 54	70	6,4		
Zürichsee	9. 4. 54	80		4,0	0,4
	13. 6. 54	80	4,4		
Thunersee	6. 5. 51	180	4,9		0,1
	3. 8. 55	190		4,8	
Brienzersee	6. 5. 51	200	4,9		0,2
	6. 10. 54	200		4,7	
Luganersee	8. 4. 53	180	5,5		0,3
	4. 4. 57	190		5,2	

Ueber das abnorme Verhalten des Rootsees orientiert Abschnitt 3. f.

Aus zahlreichen Veröffentlichungen verschiedener Autoren wissen wir, daß auch der Zürichsee zu den meromiktischen Seen gehört, indem in seiner Tiefe ein sogenanntes «Monolimnion» lagert, das der Durchmischung im allgemeinen nicht zugänglich ist. Wie verhält es sich nun mit Thuner- und

Brienzersee? F i n d e n e g g [21] führt auf Seite 22 aus:

«Hier soll nur auf eine thermische Eigenschaft hingewiesen werden, an der ein meromiktischer See erkannt werden kann. Diese besteht nicht etwa darin — wie man vermuten könnte —, daß die Temperaturbeweglichkeit in einer gewissen Tiefe aufhört, sondern darin, daß die

Tiefentemperaturen, wenigstens in unserem Klimagebiet, auch während des Winters, also nach Ablauf der Herbst-Temperaturgleiche, sich auf einer das ganze Jahr gleichbleibenden Höhe von etwas über 4°C halten. In unseren meromiktischen Seen handelt es sich um konstante Tiefentemperaturen zwischen $4,2$ und $5,1^{\circ}$. Bei den holomiktischen aber können wir sicher sein, mindestens zur Zeit der Herbst- und Frühjahrs-Temperaturgleiche einmal Wasser von genau 4°C über dem Seegrund anzutreffen.»

Die Symptome, die Ingo Findenegg angibt, deuten also bei Thuner- und Brienersee eindeutig auf meromiktisches Verhalten. Den Luganersee, dessen Tiefentemperatur offenbar auch nie unter $5,2^{\circ}\text{C}$ sinkt, schließen wir von der Diskussion aus. Er gehört dem insubrischen Klimagebiet an, zeigt im Winter keine inverse Schichtung und kann, wie ja auch die meisten oberitalienischen Seen, als subtropisches Gewässer gelten. (Siehe hierüber Ruttner [55].) Ich glaube aber, daß die Formulierung von Findenegg doch zu eng gefaßt ist, und daß sowohl Thuner- wie Brienersee als holomiktisch bezeichnet werden müssen. Die beiden Seen sind wahrscheinlich im Verhältnis zu ihrer Oberfläche, durch welche ja der Wärmeaustausch vor allem vor sich geht, zu tief, als daß die Zeit der winterlichen Abkühlung ausreichen würde, um Homothermie bei 4°C zustande zu bringen. Liegt doch ihre Oberflächentemperatur während des ganzen Winters über 4°C . Der Wärmeverrat ist so groß, daß abgekühlte und deshalb absinkende Wasserteilchen fortwährend durch aufsteigende über 4° warme ersetzt werden können. Thuner- und Brienersee müssen also nach ihrem thermischen Verhalten ebenfalls als «subtropisch» bezeichnet werden. Und Findeneggs Kennzeichen für Meromixie würden nur für Seen, deren Oberflächen während des Winters auf mindestens 4° abgekühlt werden, Gültigkeit haben. Daß die beiden genannten Seen nicht meromiktisch sein können, ergibt sich aus dem sehr hohen Sauerstoffgehalt ihrer Tiefen. (Siehe Tab. 17 und 18.)

Als typisch temperierte Seen (im Winter inverse Schichtung) sind in unserer Untersuchungsreihe Murten- und Bielersee anzusprechen.

4. Ueber die thermische Schichtung von Wassermassen

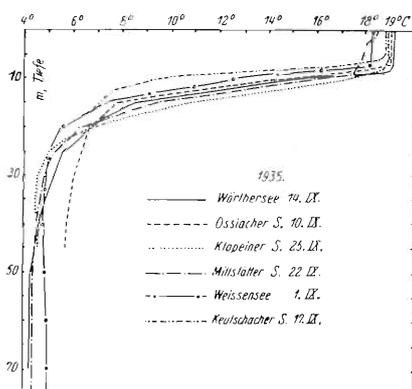
Die verfeinerte Methode der Temperaturmessung mit elektrischen Meßinstrumenten zeigt

ganz allgemein einen sehr unruhigen Verlauf der Temperaturkurven. (Siehe Abb. 28 bis 35.) Kurven, wie diejenige des Rootsees (Abb. 30 und 34) bilden die Ausnahme, und wir vermuten, daß sich bei noch feineren Messungen auch hier die sogenannte Sprungschicht in mehrere thermische Mikroschichten auflösen würde. Diesbezügliche Untersuchungen sind im Gange. Wir finden also im Sommer eine feingeschichtete Wassermasse mit nach oben zunehmender Temperatur, die das sogenannte homotherme Hypolimnion überlagert. Ein homothermes Epilimnion von einiger Mächtigkeit stellt sich im allgemeinen erst bei Beginn der herbstlichen Abkühlung ein und zeigt also bereits den Beginn des Abbaus, des Zerfalls der thermischen Schichtung an. Je flacher nun eine Temperaturkurve im obern, im geschichteten Wasserkörper verläuft, um so rascher muß, bei gleicher Einstrahlung, die Erwärmung der obersten Schichten vor sich gehen, und um so eher wird das Gleichgewicht zwischen Einstrahlung und Ausstrahlung erreicht sein. Dies ist im Rootsee z. B. schon im Juli der Fall, und so können wir sagen, daß in diesem See mit diesem Zeitpunkt der Abbau der thermischen Schichtung und damit die Bildung eines Epilimnions beginnt. Während des Aufbaus zeigt auch dieser See eine lamellenartige Schichtung der oberen Wassermassen bis unmittelbar zur Oberfläche. (Vgl. die Kurven des Rootsees vom 8. 6. und 8. 8. 1953 in Abb. 30.) Der Brienersee verkörpert in unsern Untersuchungen das andere Extrem (steile Temperaturkurve, größere Dicke der thermischen Schichten und dadurch kleinere Temperaturdifferenzen derselben). Weil die Oberflächentemperatur nur langsam zunimmt, übertrifft die Einstrahlung die Ausstrahlung verhältnismässig lange. Der Abbau der thermischen Schichtung und damit die Bildung eines Epilimnions setzen deshalb erst im Oktober, rund drei Monate später ein als im Rootsee. (Siehe Abb. 29 und 33.) Wie im nächsten Abschnitt ausgeführt wird, könnte sich bei regelmäßiger Einstrahlung und gleichzeitiger regelmäßiger Windwirkung, welche die zugeführte Wärme fortwährend in die Tiefe arbeiten würde, sehr wohl schon während der Erwärmungsperiode ein Epilimnion bilden. Da aber der Wechsel von Schön- und Schlechtwetterperioden den Normalfall bildet, so werden wir im allgemeinen während der Erwärmungsperiode in den Seen zwei Wasserkörper finden, einen unteren ungeschichteten und einen oberen, lamellenartig aufgebauten. Die Dicke des letzteren und die Dicke der einzelnen Schichten hängt vor allem von der Stärke und der Dauer der einzelnen Windperioden ab.

Diese Behauptung stimmt auch mit den Beobachtungen, welche Dussard [10] im Genfer-

see machen konnte, überein. Dussard fragt sich deshalb, und wir halten die Fragestellung für angebracht, ob eine Zweiteilung der Wassermasse, ähnlich der Zweiteilung in der Ozeanographie, dem thermischen Verhalten unserer Seen nicht besser gerecht würde. Die Bezeichnung der obern und untern Wassermasse als Tropo- und Stratosphäre scheint allerdings, wie Wüest [82] für die Ozeanographie darzulegen sucht, nicht sehr glücklich gewählt. Wir sprechen deshalb vorläufig von einer «ungeschichteten» und einer «geschichteten» Wassermasse.

Abb. 36



Temperaturschichtung in Kärntnerseen bei Sommerstagnation (nach Findenegg [20]).

Es war Richter, der 1898 den Begriff der «Sprungschicht» in die Limnologie einführte. Seine thermische Dreiteilung der Wassermasse beruhte auf Beobachtungen am Wörthersee. Wie spätere Temperaturmessungen durch W. Schmitt [64] und vor allem durch Findenegg [20] zeigen, stellen die Kärntnerseen tatsächlich einen Sonderfall dar. Wie Abb. 36 erkennen läßt, besitzen sie alle eine in der oberen, geschichteten Wassermasse recht flach verlaufende Temperaturkurve. Zweifellos sind diese ausgeprägten Homothermien in den obersten Schichten durch die Regelmäßigkeit und Gleichzeitigkeit von Einstrahlung und Windarbeit bedingt. Hören wir, was W. Schmidt, [64], der «Altmeister der Meteorologie der Seen», darüber sagt:

«Laufen die allgemeinen Gänge für Lunzer- und Klopeinersee ziemlich gleichsinnig, so gibt es da immerhin auch gewaltige Gegensätze. Der Klopeinersee z. B. zeigt bereits während der Temperaturzunahme im Sommer eine Isothermie, die etwa sechs bis acht Meter tief hinabreicht. Diese entsteht unter Mitwirkung der regelmäßigen Winde, die sich insbesondere bei Schönwetter in voller Stärke einstellen. Der Morgen ist verhältnismäßig am ruhigsten, offenbar deswegen,

weil nicht bloß der See, sondern das ganze weite Kärntnerbecken unter einer ausgesprochenen Inversion der Temperatur begraben liegt. Schon vor acht Uhr wird ein leiser Luftzug von Wellen fühlbar. Meist gegen zwölf Uhr setzt Westwind der Stärke eins bis zwei ein, nachmittags weht aber bei anhaltend schönem Wetter meist Ostwind. Wir haben hier also gerade zur Zeit der stärksten Einstrahlung immer eine bestimmte Luftbewegung, die in der Tiefe ist, die an der Oberfläche gebildete wärmere Wasserschicht sofort in die Tiefe zu verarbeiten, ehe es zur Bildung eines austauschhemmenden Temperaturgefälles kommt.»

Und Findenegg [21] sagt (S. 14):

«Es ist somit für die Erwärmung unserer Seen von großer Bedeutung, daß sie nach allen Seiten hin durch die Randgebirge des Kärntnerbeckens vor starken Winden abgeschirmt werden, andererseits aber im Kärntnerbecken selbst, besonders im Frühjahr, bei sonnigem Wetter schwache Lokalwinde auftreten, die gerade den oben geschilderten günstigsten Fall der See-Erwärmung realisieren. Während etwa in den Nordalpen bei sonnigem Wetter oft Windstille herrscht und, abwechselnd damit, anhaltender, starker Wind weht, schaffen die leichten Schönwetterbrisen im Laufe des Frühjahrs an unseren Seen jene etwa 5 m mächtige Warmwasserschicht von rasch steigender Temperatur, die wir aus dem vorigen Abschnitt kennen.»

(S. 16): «Zusammenfassend läßt sich also sagen: Unsere Seen verdanken ihre bedeutende Badewärme der hohen Sonnenscheindauer und ihrer relativ windgeschützten Lage.»

Findenegg [21] führt also die den Kärntnerseen eigene, scharf ausgeprägte Temperaturschichtung auf die windgeschützte Lage des Kärntnerbeckens zurück. Dies würde mit unserer Behauptung (wenig Windwirkung → flache Kurve → hohe Oberflächentemperatur → früher Beginn des Abbaus der Schichtung = Bildung eines Epilimnions) übereinstimmen. Wie dem auch sei, haben wir es bei den Kärntnerseen mit einem Spezialfall zu tun, und dieser Spezialfall hat zur allgemeinen Annahme einer thermischen Dreiteilung der Wassermasse in der Limnologie geführt. Die recht grobe Temperaturmessung mit Kippthermometer bei willkürlicher Wahl der Meßpunkte läßt der Phantasie im Verbinden der Punkte durch einen geschlossenen Kurvenzug großen Spielraum, und wir glauben, daß die bisher angenommene Dreiteilung in Epi-, Meta- und Hypolimnion sehr oft zu falschen Interpretationen geführt hat.

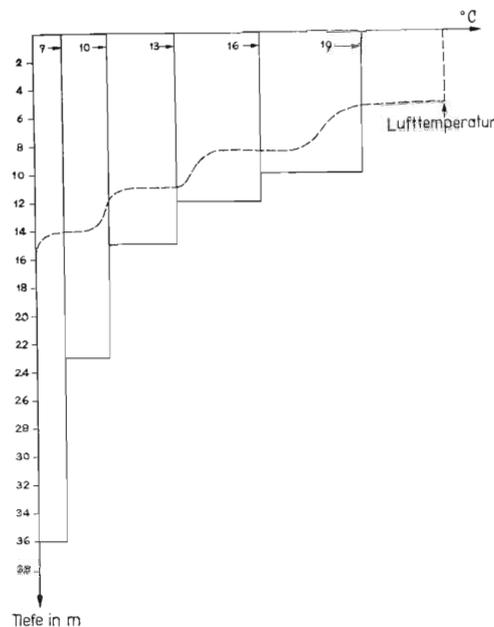
raturgefälle, um so langsamer verläuft der Wärmetransport in die Tiefe, um so rascher geht die Erwärmung des Epilimnions vor sich, desto höher muß die Potenz liegen, mit der die Durchmischungsarbeit im Verhältnis zur Durchmischungstiefe zunimmt. Der Vorgang ist mit der elektrischen Selbstinduktion vergleichbar. Wird umgekehrt die Wärmezufuhr verlangsamt, so nähert sich das Verhältnis von Durchmischungsarbeit und Durchmischungstiefe einem konstanten Wert. Die vorhandene Wärmemenge kann dann verhältnismäßig rasch in die Tiefe gearbeitet werden. Abgesehen von der geringen Dichtedifferenz pro Temperatureinheit bei niederen Temperaturen, steht die leichte Zerstörbarkeit von Frühjahrssprungschichten bei Temperaturrückgang sicher auch mit dieser Tatsache im Zusammenhang.

Je mehr Windenergie einem See zur Verfügung steht, je rascher die zugeführte Wärmemenge also in die Tiefe gearbeitet werden kann, um so kleiner wird der Temperaturgradient der Sprungschicht sein (siehe z. B. die Temperaturkurve des Neuenburgersees, Abb. 42), um so deutlicher müssen sich ferner Klimaschwankungen in der Temperaturkurve abbilden. Betrachten wir nun noch einmal Abb. 37 und stellen wir uns vor, es wechselten Perioden gleicher Einstrahlung mit Perioden gleicher Windwirkung ab. Die zugeführte Wärme würde jedesmal bis in die Tiefe Z_3 gearbeitet. Auch so müßte sich ein Temperatursprung ausbilden, dessen Tiefenlage bei Z_3 von Anfang an gegeben wäre und konstant bleiben würde. Die stufenweise Erwärmung des Epilimnions würde in der Tautochronendarstellung das Bild nach rechts aneinandergereihter «Säulen» ergeben. Da nun aber mit zunehmender Temperatur die Dichtedifferenz pro Temperaturgrad wächst, würde sich eine Temperaturkurve nach Abb. 38 zeigen; die Länge der «Säulen» müßte nach rechts abnehmen. Die jeweilige Tiefe Z würde sich indirekt proportional zu den Dichtedifferenzen der betreffenden Temperaturbereiche verhalten, also z. B. für 7, 10, 13, 16, 19 °C wie

$$\frac{1}{55} : \frac{1}{85} : \frac{1}{127} : \frac{1}{165} : \frac{1}{196} = 36 : 23 : 15 : 12 : 10$$

Da die zugeführte Wärmemenge mit abnehmender Durchmischungstiefe einem kleiner werdenden Volumen zur Verfügung steht, muß die Geschwindigkeit der Erwärmung des Epilimnions zunehmen (in Abb. 38 durch zunehmende Breite der angelagerten Flächen nach rechts dargestellt). Verblüffende Ähnlichkeit mit der theoretischen Kurve zeigt die Temperaturkurve des Luganersees im August 1954 (Abb. 42). Abb. 38 zeigt gleichzeitig den zu erwartenden Kurvenverlauf (punktiert) bei halber Wind-

Abb. 38



Theoretische Temperaturschichtung bei regelmäßigen Wechseln von Einstrahlung und Windtätigkeit (siehe Text).

intensität aber gleicher Wärmezufuhr. Da die zugeführte Wärme in diesem Fall dünneren Schichten eingelagert wird, muß die Erwärmung derselben um so rascher erfolgen. Nehmen wir an, die nächtliche Ausstrahlung kompensiere die Einstrahlung während des Tages sobald die Oberflächentemperatur des Sees das Tagesmittel der Lufttemperatur oder wenig mehr erreicht habe, so stellt sich also dieses Gleichgewicht um so eher ein, je geringer die Windwirkung ist. (Siehe Temperaturkurve des Rootsees vom 9. 8. 1953, Abb. 30.) Ein windexponierter See wird also bei gleicher Einstrahlung mehr Wärme einlagern können als ein windgeschützter.

Das Verhältnis Wärmezufuhr-Windeinfluß ist also in doppelter Beziehung für die Gestaltung der Temperaturkurve eines Sees von Bedeutung:

1. Quantitativ.

Überwiegt die Windarbeit gegenüber der Einstrahlung, werden wir eine Kurve von Typ Ia oder IIa finden (Abb. 39), (stark geneigt, kleiner Temperaturgradient). Andernfalls werden sich Kurven nach Ib oder IIb ergeben.

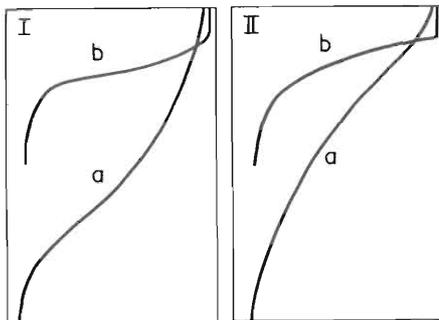
2. Qualitativ.

Bei rhythmischen Wechsel von schönem Wetter und windigen Kälteperioden wird sich eine Kurve von Typ II (konvexer Verlauf), bei gleichmäßig mildem Wetter

und regelmäßiger Windtätigkeit eine solche von Typ I (gerader bis konkaver Verlauf in der Sprungschichtgegend) ergeben.

Vergleichen wir die Temperaturen der untersuchten Schweizerseen mit unserem Schema (Abb. 28 bis 35), so finden wir, daß sie fast durchwegs zu Typ II gehören. (Ueber scheinbare Abweichungen bei Bieler- und Thunersee siehe weiter unten.) Dies stimmt mit den instabilen Witterungsverhältnissen, wie sie für die Schweiz charakteristisch sind, überein (siehe graphische Darstellung der Wind- und Temperaturverhältnisse, Abb. 25—27).

Abb. 39



Theoretische Kurventypen (siehe Text)

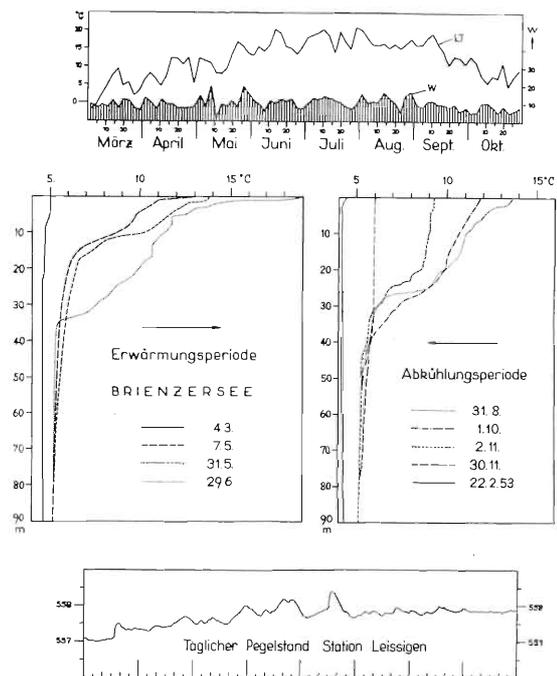
Temperaturkurven, die zu Typ I neigen, finden wir aber z. B. in Kärnten (Abb. 36). Dies ist bei der Stetigkeit der dortigen Winde (siehe hierüber die Bemerkungen Findeneggs [21] S. 14) auch zu erwarten.

Doch sind ebenfalls bei uns Unterschiede in Periodizität und Intensität des Windes zu finden. Und tatsächlich neigen auch Thuner- und Brienersee leicht zu Kurventyp I (siehe Abb. 40/41), was mit den Ausführungen über die Windtätigkeit an den einzelnen Seen (siehe S. 35) in bester Übereinstimmung steht.

Betrachten wir die Temperaturkurven der einzelnen Seen (Abb. 28 bis 35), so fällt die Gleichartigkeit des Verlaufs und der Ausbildung in den verschiedenen Jahren auf. Jeder See besitzt die ihm eigene, offenbar für Beckenform, Lage und Klimaablauf charakteristische Temperaturschichtung. Die Klimaunterschiede der einzelnen Jahre scheinen von geringer Bedeutung zu sein. Wir haben aus den Mittelwerten von 1953, 1954 und 1955 in Abb. 42 den typischen Kurvenverlauf jedes Sees bei Sommerstagnation (Augustwerte) dargestellt. Dazu wurde die mittlere Tiefenlage der 7-, 8-, 9-, 10-, 12- und 16°-Isothermen ermittelt und aufgetragen. Die Temperaturkurve des Neuenburgersees basiert auf einer einzigen Messung vom August 1953. Die Darstellung ist außerordentlich aufschlußreich. Sie zeigt z. B.:

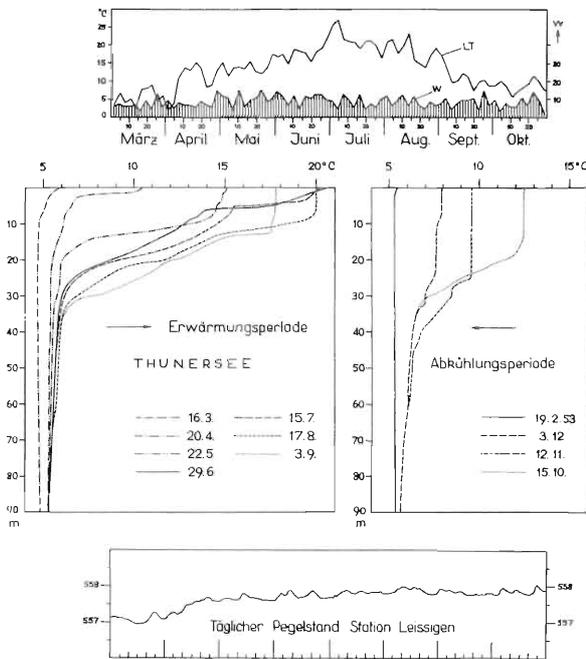
1. Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Größe der Seeoberfläche und Durchmischungstiefe.
2. Die Temperaturkurven von Thuner- und Brienersee weichen in ihrer Form von allen andern ab (Typ I, siehe oben).
3. Root-, Zürich- und Luganersee zeigen Kurven, die leicht zu Typ II neigen, während Typ II bei Bieler-, Murten- und Neuenburgersee ganz eindeutig verwirklicht ist. Diese Feststellung steht in gutem Einklang mit unserer Theorie und den Winddarstellungen in Abb. 28—34.
4. Der Zürichsee sowie die drei Jurarandseen zeigen einheitlich eine Einknickung der Temperaturkurven zwischen 8 und 10°. Diese läßt sich durch eine erste Erwärmung Ende März und Anfang April und durch den nachfolgenden Temperaturrückfall mit erhöhter Windtätigkeit erklären. (Siehe Temperatur- und Windkurven 1953/54 in Abb. 23, 25 und 27 sowie die Kurven über Sonnenscheindauer der beiden Jahre in Abb. 24.) Die erwärmte Oberflächenschicht wurde durch die nachfolgende Windtätigkeit in die Tiefe gearbeitet. Jede spätere Erwärmung und Durchmischung erreichte diese Tiefe infolge der größeren Dichtedifferenz bei höheren Temperaturgraden und der daher erforderlichen größeren Durchmischungsarbeit nicht mehr ganz. So

Abb. 40, Brienersee.



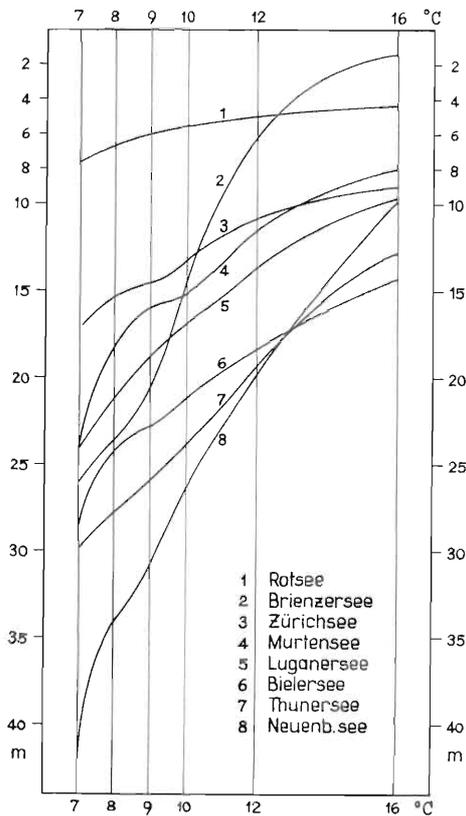
Lufttemperatur (LT), Windtätigkeit (W) und Pegelstand (Sommer 1951) sowie Wassertemperaturen 1951/52.

Abb. 41, Thunersee.



Lufttemperatur (LT), Windtätigkeit (W) und Pegelstand (Sommer 1951) sowie Wassertemperaturen 1951/52.

Abb. 42



Temperaturkurven bei Sommerstagnation (Mittelwerte der Jahre 1953/54/55).

hielt sich jedes Jahr eine deutliche Temperaturstufe bis zum Abbau durch Konvektionsströmungen im Herbst. Vermutlich läßt die leicht konkave Form der Temperaturkurven bei Thuner- und Brienzersee diese Einknickung nicht in Erscheinung treten.

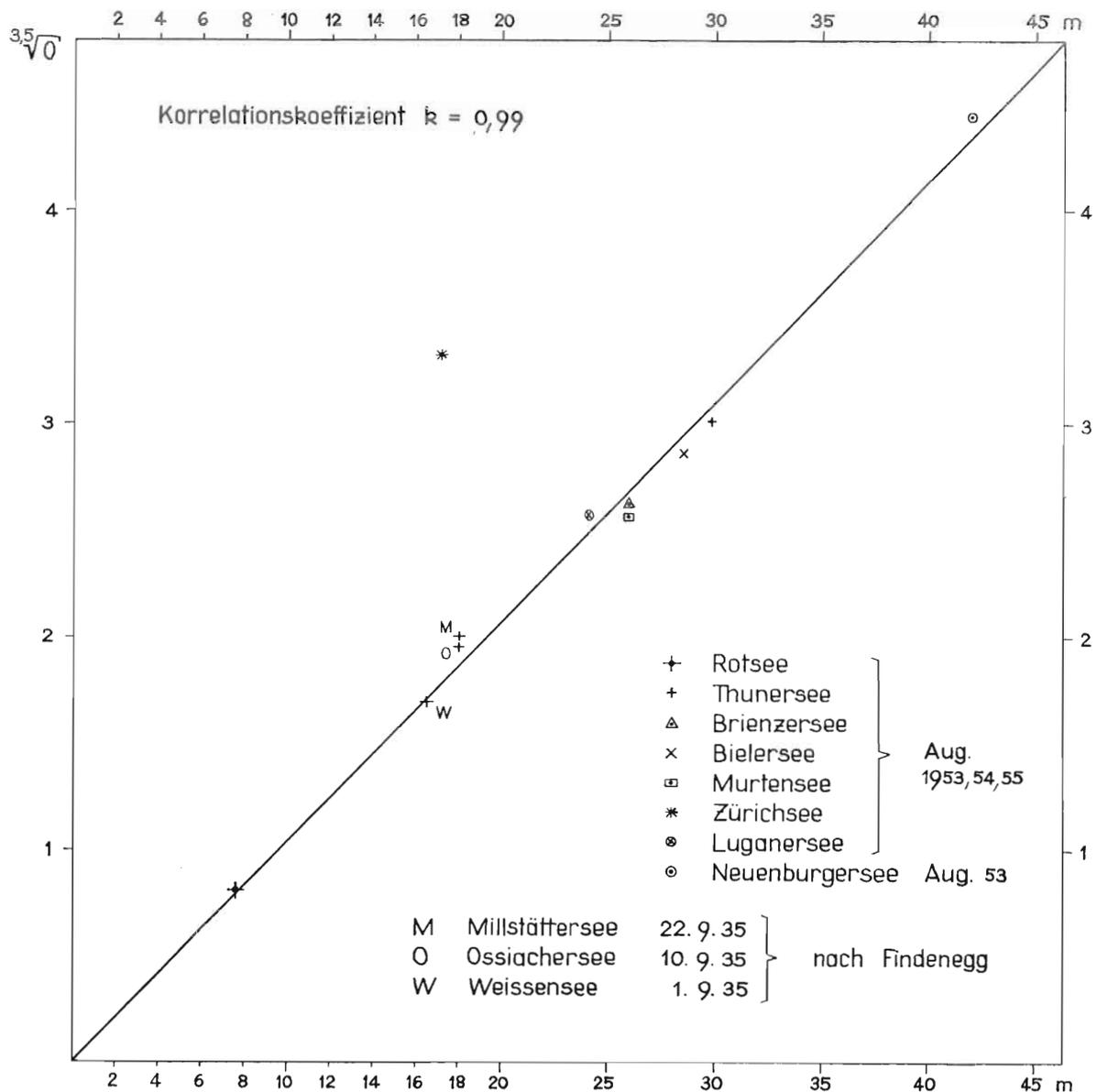
Bei unseren Untersuchungen zeigte sich zwischen Oberflächengröße und Durchmischungstiefe eine derart gute Korrelation, daß wir uns fragen, ob sich nicht zwischen beiden eine bestimmte mathematische Gesetzmäßigkeit finden ließe. Würde diese bestehen und würde es gelingen, sie zu ermitteln, so ergäbe sich die Möglichkeit, aus der jeweils bestimmten Durchmischungstiefe die Bedeutung und die Größe der übrigen Faktoren wie Windenergie, Windabschirmung, Durchflutung usw. abzuschätzen. Andererseits müßte sich durch Vergleich zahlreicher Seen gewissermaßen ein «Durchmischungsfaktor» als Funktion der Oberflächengröße ergeben, aus dem sich dann, unter Berücksichtigung weiterer Koeffizienten die Temperaturschichtung eines Sees berechnen ließe. Bei ähnlichen Einstrahlungsverhältnissen wie dies bei den von uns untersuchten Seen der Fall ist, und bei Vernachlässigung der nächtlichen Abkühlung, müßten die Flächen, die in der Tautochronendarstellung von Abszisse, Ordinate und Kurve begrenzt werden, im gleichen Zeitpunkt bei allen Seen annähernd gleich groß sein. Also müßte die Oberflächentemperatur bei flacher Kurve höher liegen als bei steiler. Die Neigung der Temperaturkurve könnte ein Maß für die via Oberfläche zugeführte Windenergie sein. Diese nimmt aber mit der Größe der Seeoberfläche zu. Also wird eine Beziehung zwischen Größe des Seereals und Temperaturgradient bestehen (siehe Abb. 42). Die Tiefe, in welcher der mehr oder weniger senkrechte Verlauf der Temperaturkurve aufhört, die Kurve also flacher zu werden beginnt, ist ein Maß für die Neigung und zeigt auch, wie weit hinunter im Frühsommer die Durchmischung reichte. Eigentlich muß dieser Punkt je nach Tiefentemperatur der Seen bei verschiedenen Temperaturen liegen, im Durchschnitt aber etwa bei 7 °C. Um möglichst eindeutige Vergleichswerte zu erhalten, wollen wir deshalb im folgenden die Tiefe, bei welcher wir diese Temperatur feststellen, als Durchmischungstiefe bezeichnen. Berechnungen und graphische Darstellungen ergaben nun, daß dieser Wert im Durchschnitt der 3,5ten Wurzel der Seeoberfläche proportional ist. In Abb. 43 wurden die Tiefen, in welchen wir bei Sommerstagnation 7 °C ermittelten, auf der Abszisse, die 3,5te Wurzel aus der Oberfläche auf der Ordinate aufgetragen, und wir stellen fest, daß die Schnittpunkte verblüffend gut auf einer Geraden liegen. Vergleichsweise wurde auch der

Wert des Neuenburgersees eingezeichnet. Dieser basiert auf einer einzigen Messung im August 1953, während für die regelmäßig untersuchten Seen die Mittelwerte aus den Augustmessungen 1953, 54, 55 verwendet wurden. Außerdem wurden Werte für Kärntnerseen nach Angaben F i n d e n e g g s [20] eingezeichnet. Daß die gleiche Proportionalität offenbar weitgehend auch für Seen, die unter andern klimatischen Bedingungen liegen, gilt, verwundert und zeigt die überragende Bedeutung der Oberflächengröße. Daß die Punkte für Thuner- und Bielersee ein wenig rechts der Geraden liegen, ist nicht verwunderlich, da die beiden Seen bedeutende Mengen erwärmten Oberflächenwassers aus andern Seen erhalten, wodurch die

Dicke der erwärmten Wassermasse vergrößert und die Temperaturkurve gewissermaßen «tiefer gedrückt» wird.

Erstaunlich aber ist die geringe Tiefe, in welcher wir im Zürichsee die erwähnte Temperatur von 7° antreffen. Die Differenz der gefundenen Tiefe (17,2 m) mit der nach Oberflächengröße zu erwartenden (ca. 30 m) zeigt, daß es sich hier nicht nur um klimatische Abweichungen handeln kann. Auch die Abschirmung gegen die vorherrschenden Winde ist unbedeutend. Da der See schon im Frühjahr eine ausgeprägte biogene Entkalkung zeigt, lag die Vermutung nahe, daß sich durch Ausscheidung von Kalk in den Oberflächenschichten, durch Absinken der Kalkkristalle und deren

Abb. 43 Oberflächengröße und Durchmischungstiefe (siehe Text)



Anreicherung in einer Tiefe unterhalb etwa 15 m, ein fröhsommerliches Konzentrationsgefälle ausbilden könnte, welches die Stabilität der Schichtung so weit zu erhöhen vermöchte, daß die windbedingte Durchmischung wesentlich gebremst wird. (Siehe Tab. 23.) Dagegen läßt sich sagen, daß dann die gleiche Erscheinung wohl auch in Root- und Murtensee anzutreffen wäre. Außerdem zeigt sich auch im Bodensee eine zu der Oberflächengröße viel zu geringe Durchmischungstiefe. Zürich- und Bodensee zeigen nun beide eine außerordentlich ausgedehnte, aber in bedeutender Tiefe liegende Uferbank. Zweifellos wird durch die Lage dieser Uferbank die Dicke der durchmischten Schicht wesentlich vorgezeichnet und «erzwungen». Die hypsographische Kurve (Abb. 2) läßt erkennen, daß ca. die Hälfte des Sees (nur Seegebiet westlich Seedamm berücksichtigt) eine mittlere Tiefe von 16 m besitzt. Da die vorhandene Windenergie für eine größere Durchmischungstiefe ausreichen würde, muß sich im Gebiet der Uferbank eine homotherme Wasserschicht bis auf den Grund bilden. Und man kann sich nun gut vorstellen, daß sich dieser infolge Bodennähe erzwungene Temperatursprung durch horizontale Einschiebung erwärmten Wassers der ganzen Wassermasse mitteilt. Auch ist zu bedenken, daß sich durch die ausgesprochene Verjüngung des Seebeckens in ca. 16 m Tiefe gewissermaßen eine «Temperaturstauung» ergeben muß, da sich bei gleicher Schichtdicke die zugeführte Wärme in dieser Tiefe, verglichen mit der Oberflächenschicht, dem halben Volumen einlagert. Der Temperaturgradient muß deshalb in dieser Tiefe besonders ausgeprägt sein (siehe Abb. 30 und 34), wodurch eine tiefergreifende Durchmischung verunmöglicht werden dürfte. Beim Bodensee liegen die Verhältnisse ähnlich; besitzt doch auch hier die Hälfte des Sees eine mittlere Tiefe um 15 m. Wir möchten ausdrücklich betonen, daß wir den Einfluß von Lage und Ausdehnung der Uferbank auf die Durchmischungstiefe im Zürich- und Bodensee als sehr wahrscheinlich annehmen, aber keinesfalls als gesicherte Tatsache betrachten. Immerhin weiß man aus der Ozeanographie, daß der Bodeneinfluß auf die Strömungsvorgänge bedeutend sein kann, wenn die Wassertiefe innerhalb der Reibungstiefe liegt.¹

Wie läßt sich nun die überragende Bedeutung der Oberflächengröße für die Durchmischungstiefe erklären? Ueberlegen wir uns vorerst einmal, daß jede windbedingte Durchmischung ihren Ausgang in einer oberflächlichen Horizontalströmung, verursacht durch die Reibung

des Windes an der Wasseroberfläche, nimmt. Da wir es bei einem See mit einem nach der Seite und nach unten praktisch unbegrenzten Gerinne zu tun haben, werden wir darin, gemäß den Reynoldsen Fundamentalversuchen, stets nur turbulente Strömung finden.

Jede Horizontalverschiebung von Wassermassen wird also immer auch eine Vertikalverschiebung von Turbulenzelementen, von Bewegungsimpulsen zur Folge haben. Diese Turbulenz ist es, welche den Wärmeausgleich benachbarter Schichten bewirkt. Den Gesamtkomplex der Ausgleichsvorgänge bezeichnen wir nach Schmidt [64] als Austausch. Schmidt hat gezeigt, daß die molekulare Reibung gegenüber der virtuellen, also der Reibung der einzelnen Turbulenzelemente gegeneinander, vernachlässigt werden kann. Durch diese Reibung werden kältere Wassermassen der Tiefe gegen die Schwerkraft emporgehoben, während wärmere, entgegen ihrem Auftrieb, hinuntergedrückt werden. Diese Arbeitsleistung gegen die Schwerkraft läßt sich berechnen durch die Schwerpunktverschiebung (siehe S. 44). Ein weiterer Teil der Windenergie aber wird via Reibung in Wärme umgewandelt. Seine quantitative Erfassung ist bis heute nicht möglich, und wir sind auf recht rohe Schätzungen angewiesen. Für unsere Betrachtung ist wichtig, daß die Durchmischungsvorgänge in einer horizontalen Wasserverschiebung ihren Ausgang nehmen. Die zugeführte Energie ist dem Quadrat der Oberflächengeschwindigkeit proportional nach der Formel

$$E = \frac{m}{2} v^2$$

Nun ist aber selbstverständlich, daß diese Geschwindigkeit um so größer wird, je länger der Beschleunigungsweg ist. Denn sobald die Wassermassen ans Ufer gelangen, werden sie abgebremst, in die Tiefe gedrückt und gezwungen, in bestimmter Tiefe sich in rückläufiger Richtung zu bewegen. Aber auch der Wind wird eine um so größere Geschwindigkeit entwickeln können, je größer die ebene Fläche ist, über die er dahinstreicht. Deshalb werden ja die Wassermassen im offenen Meer 5- bis 10-mal so tief durchmischt als in Binnengewässern. Auch finden wir auf großen Seen bekanntlich viel höhere Wellen als auf kleinen. So ist also die Abhängigkeit der Durchmischungstiefe von der Seeoberfläche eine Selbstverständlichkeit. Was aber überrascht, ist die eindeutige Gesetzmäßigkeit, wie sie sich für Seen mit einfacher Beckenform und genügender Tiefe ergibt. Zweifellos würden sich bei Seen mit stark gegliederter Oberfläche bedeutende Abweichungen zeigen. Als Vergleichsseen aus dem Gebiet Kärntens wurden deshalb auch nur solche mit verhältnismäßig einfach gestalteten Oberflächen gewählt.

¹ Die Reibungstiefe D ist je nach der Strömungsgeschwindigkeit verschieden. Als Regel gilt, daß die Strömung in der Tiefe $1,25 D$ unmerklich wird. Im freien Meer liegt D etwa bei 50—200 m.

D. Wärmehalt - Wärmebilanz

1. Allgemeines

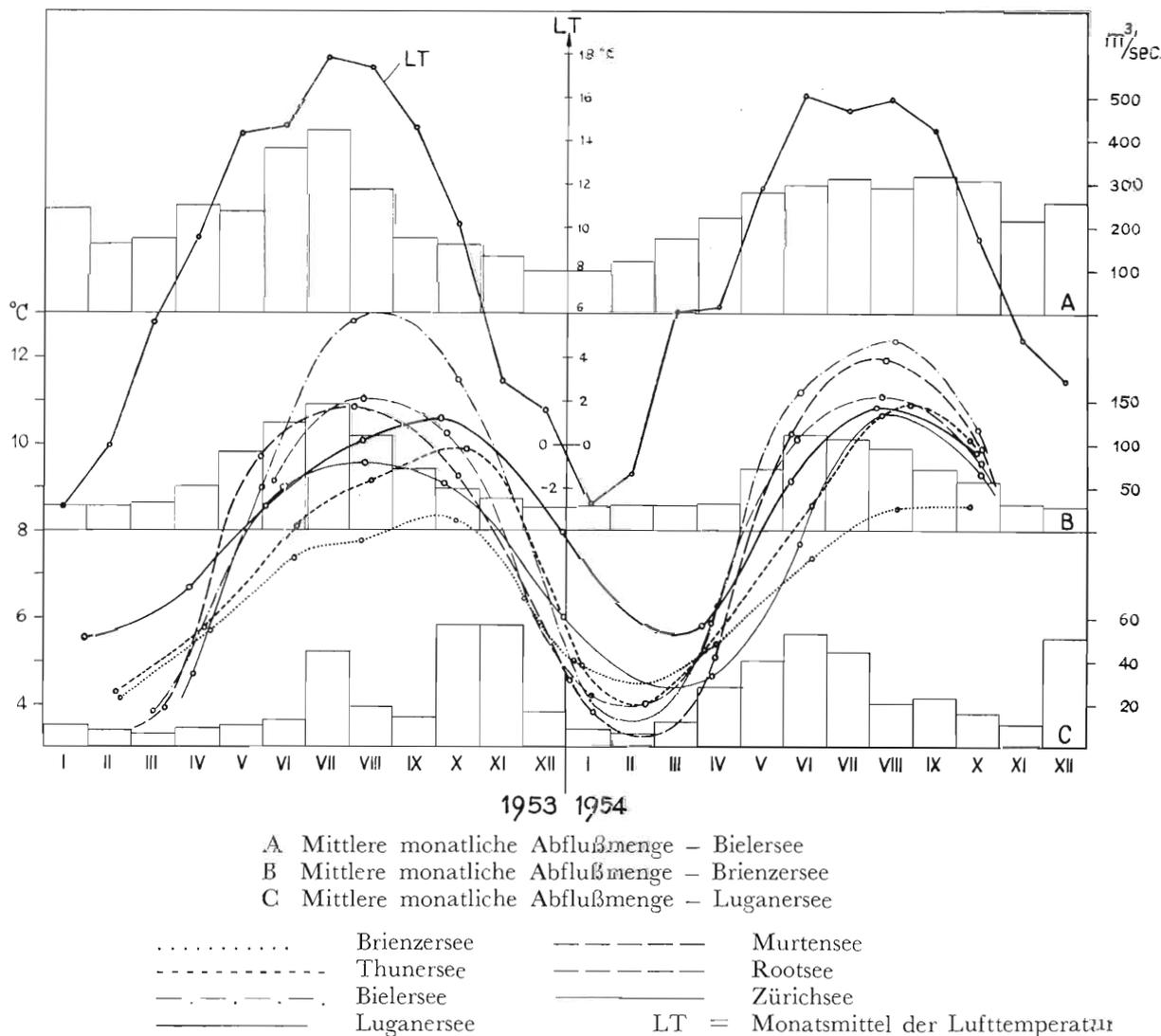
Ruttner 1952 [55]: «Angesichts der über-
ragenden Bedeutung, die den Temperaturver-
hältnissen für fast alle hydrographischen und
biologischen Probleme in einem See zukommt,
ist es nicht zu umgehen, auch den durch die
Wärme- und Dichteschichtung gegebenen
Energiegehalt zu berücksichtigen, da oft nur
auf diesem Wege ein Verständnis der beobach-
teten Erscheinungen gewonnen werden kann.»
Der Wärmehalt eines Sees läßt sich nach
folgenden Gesichtspunkten berechnen:

- Wärmemenge, die benötigt würde, um die
Wassermasse von 0 °C bis zur Temperatur
bei Sommerstagnation zu erwärmen.
- Berechnung wie bei a), aber als Ausgangs-
temperatur wird diejenige größter Dichte,
also 4 °C gewählt.

c) Ermittlung der Differenz zwischen maxi-
malen Wärmehalt im Sommer und mi-
nimalem im Winter. Hieraus ergibt sich die
Wärmebilanz eines Sees.

Diese letzte Betrachtungsweise ist wohl die in-
teressanteste. Denn nur sie ermöglicht einen
sinnvollen Vergleich der einzelnen Seen. Wel-
che Wärmemengen in die Seen eingelagert und
im Winter wieder abgegeben werden, zeigt ein
Beispiel am Lunzer Untersee (Ruttner 1952
[55]): Dieser See hat eine Oberfläche von
0,68 km², also rund ein Fünfzigstel derjenigen
des Brienersees. Der jährliche Wärmegewinn
beträgt ca. 120×10^6 Tonnenkalorien. Dies
entspricht der Wärmemenge, die beim Ver-
brennen von 1500 Eisenbahnwagen hochwer-
tiger Kohle frei würde. Könnte diese Wärme nur
durch die Oberfläche des Sees ein- und aus-
treten, so ergäbe sich eine Wärmeverschiebung
von ca. 17 600 cal. pro cm². Selbstverständlich

Abb. 44 Mitteltemperaturen für die Wasserschicht bis 50 m Tiefe (resp. bis Grund)



überragt die vertikale Wärmeverschiebung (via Oberfläche) den Wärmeverlust oder -gewinn durch Zu- und Abflüsse, welchen wir als horizontale Wärmeverschiebung bezeichnen wollen. Die Bedeutung der Durchflutung für die Erwärmung eines Sees ist umstritten und wurde namentlich von Halbfäß [27] nicht sehr hoch eingeschätzt (siehe S. 13). Wir werden in den folgenden Betrachtungen versuchen, das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Wärmeverschiebung abzuschätzen.

2. Methodisches

Die Grundlage zur Berechnung des Wärmeinhalts eines Sees ist die Kenntnis der Temperaturen der einzelnen Horizontalschichten. Durch Multiplikation der Temperatur mit dem Volumen läßt sich der Wärmeinhalt einer Schicht und durch Addition der Wärmeinhalte aller Schichten die Wärmemenge des ganzen Sees ermitteln. Es muß also berücksichtigt werden, daß die tieferen Schichten, bei gleicher Dicke, entsprechend weniger ins Gewicht fallen als die obersten. Die Addition der Wärmeinhalte der einzelnen Würfel einer Wassersäule unterhalb einer bestimmten Fläche (z. B. eines cm^2), wie dies durch Ausplanimetrieren bei Tautochronendarstellung leicht möglich ist, ergibt also ein recht ungenaues Bild über den Wärmeinhalt. Je steiler die Seeufer verlaufen, um so kleiner wird der Fehler sein. Bei Nichtberücksichtigung der Beckenform und bei der vereinfachenden Annahme, die Ufer würden, ähnlich einem Brunnentrog, von der Oberfläche weg senkrecht abfallen, ergäben sich für unsere Seen bei Berechnung des Wärmeinhaltes bis zu einer einheitlichen Tiefe von 50 m folgende Fehler:

See	Datum	Fehler in %
Brienzersee	12. 4. 54	0,4
	19. 8. 54	2,4
Luganersee	2. 4. 54	0,5
	2. 8. 54	0,9
Thunersee	31. 3. 54	0,9
	20. 8. 54	2,9
Zürichsee	9. 4. 54	1,1
	5. 8. 54	11,9
Bielersee	13. 4. 54	4,0
	18. 8. 54	13,5

Beim Rootsee würde der Fehler sogar bis 18 % betragen; doch lassen sich Murten- und Rootsee infolge ihrer geringen Tiefe nicht ohne weiteres mit den andern Seen vergleichen. Die Zusammenstellung zeigt, daß bei tiefen und steilufrigen Seen, wie Brienzer-, Luganer- und Thunersee, die vereinfachende Annahme durch-

aus statthaft wäre und die Ergebnisse nicht wesentlich verfälschen würde, während bei flachen Seen die Berücksichtigung der Beckenform zur Berechnung des Wärmeinhaltes unumgänglich ist.

Berechnungen haben uns gezeigt, daß die Wärmebilanz eines Sees auch gut erfaßt werden kann, wenn sein Volumen nur bis 50 m Tiefe berücksichtigt wird, wenigstens in den von uns untersuchten Fällen. Denn die tiefer hinabtransportierte Wärmemenge ist so gering, daß sie meist vernachlässigt werden kann. Dies um so mehr, da ja das Volumen der Seen sich nach unten verzünigt. Zudem verzögert sich der Wärmetransport in größere Tiefen um mehrere Monate, so daß sich beispielsweise im Brienzersee die Wärmezunahme zwischen 50 und 100 m Tiefe und die Abkühlung in größeren Tiefen, die hier mit einem halben Jahr Verspätung eintrifft, gegenseitig weitgehend kompensieren. Wollte man die Temperaturschwankung größerer Tiefen berücksichtigen, so müßte man also auch der Phasenverschiebung der in den See eindringenden Temperaturwelle Rechnung tragen.

Für den Thunersee ermittelten wir bei der genannten Art der Wärmeberechnung für 1954 einen maximalen Fehler von 2,3, für den Zürichsee von 1,6 %.

Der Vorteil der bessern Vergleichbarkeit bei Berücksichtigung einheitlicher Tiefe von 50 m überwiegt also den Fehler, der damit in Kauf genommen wird, bei weitem. Wir verzichten im folgenden auf eine Wiedergabe der Wärmeinhalte, die von uns für die einzelnen Seen und für die verschiedenen Terminmessungen ermittelt wurden. Denn für unsere Problemstellung ist vor allem die Wärmemenge, die durch die Flächeneinheit der Seeoberfläche hindurchtritt, von Bedeutung. Diese ergibt sich, indem die Wärmezu- oder -abnahme durch die Oberfläche dividiert wird. Von Bedeutung ist ferner die Mitteltemperatur (Division des Wärmeinhaltes durch das Volumen des Sees), woraus sich dann die Wärmeamplitude (Spanne zwischen Maximum und Minimum der Mitteltemperatur) ermitteln läßt.

3. Jahreszeitlicher Verlauf der Mitteltemperatur (bis 50 m Tiefe).

Die Mitteltemperaturen der untersuchten Seen wurden für 1953/54 berechnet und in Abb. 44 graphisch aufgetragen. Die Verbindung der einzelnen Punkte durch Kurven ist sicher gewagt und soll vor allem der Anschaulichkeit dienen. Doch ist auch zu bedenken, daß die Terminmessungen wohl äußerst selten den wirklichen maximalen oder minimalen Wärmeinhalt eines Sees erfassen und daß die Interpolation deshalb dem wahren Wert näher kommt. Um einen evtl. Zusammenhang des Temperaturverlaufs

mit der Durchflutung zu erkennen, wurden die Monatsmittel der sekundlichen Ablumenge einiger Seen ebenfalls dargestellt. Die Monatsmittel der Lufttemperatur sollen vor allem als Indikator für die Einstrahlung dienen. Denn die Atmosphäre wird ja vor allem vom Boden her, also indirekt auch durch Einstrahlung erwärmt (siehe S. 34). Erwartungsgemäß erreichen die tiefsten Seen Maximum und Minimum ihrer Mitteltemperaturen später als die seichteren. Die Verzögerung gegenüber dem Maximum der Lufttemperatur (Juli) beträgt beispielsweise für 1953 bei Luganer-, Thuner- und Brienzensee ca. 3 Monate, bei allen andern ca. 1 Monat. Hier wirkt sich beim Zürichsee wieder seine Beckenform aus, welche der windbedingten Durchmischung sehr bald eine Tiefengrenze setzt (siehe S. 48), während dies beim Absinken abgekühlter Wasserteilchen (Konvektionsströmung) viel weniger der Fall ist. Ist einmal die Temperatur der obern Schichten bis auf diejenige der tiefern abgebaut, so kann sich die Wrmereserve der Seetiefe einschalten und den Tiefpunkt der winterlichen Abkühlung noch lange hinausschieben, während diese Seetiefe im Sommer durch einen markanten Temperatursprung, eine Temperaturbarriere, für den Austausch abgeriegelt wird. Wir wundern uns deshalb nicht, daß das Minimum der Mitteltemperatur des Zürichsees 1953/54 mit demjenigen des Luganersees zeitlich zusammenfällt. 1954 liegt das Monatsmittel der Lufttemperatur und damit wohl auch dasjenige der Einstrahlung für Juni und August höher als für den Monat Juli. Dadurch ergeben sich auch für die Maxima der Mitteltemperaturen der Seen recht verworrene Verhältnisse, und wir verzichten deshalb auf eine Diskussion. Es fällt weiter auf, daß 1953 das Maximum der Durchflutung beim Bielersee annähernd mit dem Maximum der Mitteltemperatur zusammenfällt, während intensive Wassererneuerung bei Thuner- und Brienzensee eine Verzögerung in der Temperaturzunahme zu bewirken scheint. Es läßt sich allerdings schwer ermitteln, ob die Einknickung der Kurven von Luganer-, Thuner- und Brienzensee im August 1953 das Abbild der Einstrahlungskurve (siehe Abb. 24) mit einer Phasenverschiebung von ca. 2 Monaten darstellt, oder ob es sich um Einflüsse der Durchflutung handelt. (Ueber die Bedeutung der Durchflutung für die Temperaturgestaltung der Seen siehe nächsten Abschnitt.)

4. Die Wärmeamplituden

Die Mittel aus der Abnahme der Mitteltemperatur Sommer 1953 bis Winter 1953/54 und aus der Zunahme bis zum Sommer 1954 (in der 50-m-Schicht) finden sich in Tab. 13 zusammengestellt.

Tabelle 13

See	Wärmeamplitude in ° C	Oberfläche km ²
		Volumen km ³
Brienzensee	4,0	21,6
Luganersee	5,1	21,5
Thunersee	6,3	22,6
Zürichsee	5,8	32,2
Bielersee	8,9	35,7
Murtensee	8,0	47,9
Rootsee	7,5	108,5

Wärmeamplituden Sommer 1953 bis Sommer 1954 und Verhältnis von Oberfläche: Volumen der 50-Meter-Schicht.

Da der Wärmeaustausch vorwiegend via Oberfläche erfolgt, ist die Wärmeamplitude zweifellos in erster Linie eine Funktion der Oberflächengröße im Verhältnis zum Volumen. Dieses Verhältnis wurde deshalb in Tab. 13 ebenfalls angegeben, und wir sehen die Regel im großen und ganzen bestätigt.

- a) Thuner- und Bielersee zeigen zu große Wärmeamplituden, während dieselbe beim Brienzensee außerordentlich tief liegt.
Erklärung: Während die Durchflutung dem Brienzensee vor allem erwärmtes Oberflächenwasser entzieht, erhalten Thuner- und vor allem Bielersee bedeutende Mengen Oberflächenwasser aus benachbarten Seen.
Auch der Zürichsee dürfte in geringem Maße von dieser Tatsache profitieren.
- b) Im Vergleich zur relativen Oberflächengröße zeigt der Rootsee eine viel zu kleine Amplitude.
Erklärung: Dieser See besitzt ein konzentrationstabiles Hypolimnion, wodurch er gegen Vollzirkulation geschtzt wird (siehe S. 41).

5. Abschätzung der einzelnen Wrmebilanzposten.

Für die Erwärmung und Abkühlung eines Sees sind drei Komponenten von überragender Bedeutung:

- a) Wärmezufuhr oder -entzug als Folge der Durchflutung.
- b) Die Verdunstung der freien Wasserfläche.
- c) Die kurzwellige und langwellige Strahlungsbilanz.

H o f e r [29] hat 1947/48 aus umfangreichen Messungen die Größe der drei Posten für den Brienzensee berechnet. Er gelangt zu folgenden Ergebnissen (S. 52):

Wärmeentzug durch Abfluß	21 136	· 10 ⁹ Cal.
Wärmezufuhr durch Zuflüsse	13 765	
Wärmeverlust		
infolge Durchflutung	7 371	
Verdunstungswärme	14 019	
Schmelzwärme	399	
Total Wärmeverlust	21 789	· 10 ⁹ Cal.

Diese Wärmemenge muß dem See im Verlaufe eines Jahres aus der Strahlungsbilanz zugeführt werden, wenn seine Temperatur im Durchschnitt mehrerer Jahre gleich bleiben soll. Infolge eines milden Winters und eines warmen Sommers ergab sich am Ende des Beobachtungsjahres ein Wärmeüberschuß von $2500 \cdot 10^9$ Cal. Aus den genannten Daten errechnet Hofer eine Wärmezufuhr von $24\,289 \cdot 10^9$ Cal. ($21\,789 \cdot 10^9$ Cal. + $2500 \cdot 10^9$ Cal.) durch Strahlung und Leitung. Das Beispiel zeigt, daß Strahlung, Verdunstung und Durchflutung den Wärmehaushalt eines Sees beherrschen, und daß vorläufig weitere Komponenten wie Reibungswärme, Erdwärme, Wärmegewinn durch Regen und Kondensation vernachlässigt werden können. Wir sagen «vorläufig», weil die drei Hauptkomponenten noch sehr summarisch abgeschätzt werden müssen. Liegt einmal ein beträchtliches Material über Wärmebilanzuntersuchungen vor, so wird man daran gehen können, auch die kleinen Komponenten zu erfassen. Hofer hat als bedeutendste Nebenkomponekte auch die Schmelzwärme (z. B. bei Schneefall) berücksichtigt. Ihr Anteil am gesamten Wärmeverlust des Sees beträgt 1,8 %. Wärmestrahlung und Leitung wurden von Hofer zusammengefaßt. Wir sprechen im folgenden nur von der Strahlung, weil wir glauben, daß die Wärmeleitung Wasser-Luft und umgekehrt unbedeutend ist im Vergleich zur Strahlung (siehe hierüber S. 34).

Wie groß veranschlagen wir nun die einzelnen Posten in unseren Vergleichsseen? Als Diskussionsgrundlage mögen uns die Wärmeamplituden, die Schwankungen der Mitteltemperaturen zwischen Maximum und Minimum, in der 50-m-Schicht dienen (siehe Abb. 44). Doch müssen dieselben vorerst auf einheitliche Volumen- und Oberflächenverhältnisse reduziert werden. Da Erwärmung und Abkühlung vorwiegend via Oberfläche verlaufen, fragen wir nach der Wärmemenge, die pro Flächeneinheit (cm^2) in die Wassermasse eingedrungen oder aus ihr ausgetreten ist. Diese ergibt sich, indem wir die Wärmeamplituden mit dem Volumen multiplizieren und durch die Oberfläche dividieren. Die Ergebnisse finden sich in Tab. 14 zusammen mit den Angaben über Oberfläche und mittlere Tiefe der 50-m-Schicht.

Nach den Angaben Hofers [29] umgerechnet, würde sich für den Brienersee im Abküh-

lungshalbjahr 1947/48 ein Wärmefluß von 21 250 und für das Erwärmungshalbjahr ein solcher von 30 100 cal pro cm^2 ergeben. Wir werden weiter unten sehen, daß es sich hier um einen Zufallswert handelt, der einer überdurchschnittlichen Einstrahlung zugeschrieben werden muß. Vorerst seien noch andere Wärmeinhaltsberechnungen zum Vergleich herangezogen. 1910 veröffentlichte Halbfab [28] einige Ergebnisse über simultane Temperaturmessungen in verschiedenen Seen Europas. Daraus finden wir ausgewählte Angaben in Tab. 15 zusammengestellt.

Tabelle 14

See	cal/cm ²	Oberfläche km ²	mittlere Tiefe der 50-m-Schicht m
Luganersee	22850	27,9	46,3
Thunersee	29250	47,9	44,5
Bielensee	27156	40,0	26,5
Zürichsee	26050	67,3	30,9
Brienersee	18650	29,6	46,3
Murtensee	16890	27,2	22,4
Rootsee	5755	0,48	8,8

Jährliche Wärme- Zu- oder Abnahme pro cm^2 Oberfläche und Größenangaben für Oberfläche und mittlere Tiefe der 50-m-Schicht.

Tabelle 15

(Erklärung siehe Text)

See	Geogr. Breite	Meeresh. m	Oberfl. km ²	mittlere Tiefe m	Wärme- fluss cal/cm ²
Comersee	46°	198	145,9	185	34 965
Wörthersee	46° 35'	439	19,5	43	24 553
Thunersee	46° 43'	560	47,9	135	24 165
Hallstättersee	47° 33'	494	8,6	65	24 505
Genfersee	46° 21'	395	585,2	154	39 424
Vettersee	57° 57'	88	1 846,1	39	29 718
Loch Morar	56° 51'	9	27,5	87	17 050
Ladogasee	61° 20'	5	18 214,0	56	33 208
Loch Neß	57° 15'	16	53,4	133	43 092
See von Bolsena	42° 36'	305	115,4	78	31 200
Ortasee	45° 45'	290	18,1	71	25 844

Halbfab gibt in seiner Zusammenstellung Minimum und Maximum des Wärmeinhaltes und die daraus resultierende absolute Zu- resp. Abnahme sowie die prozentuale und durch-

schnittliche tägliche Zu- resp. Abnahme bekannt. Daraus wurde von uns der Wärmefluß pro cm^2 berechnet. Die Oberfläche der betreffenden Seen wurde anhand der Angaben, die Halbfäß über Volumen und mittlere Tiefe gibt, ermittelt. Es scheint, daß Halbfäß der Oberflächengröße der Seen wenig Bedeutung für den Umfang der sommerlichen Wärmespeicherung beimaß. Er richtete sein Hauptaugenmerk auf die geographische Breitenlage des Sees. Interessant ist seine Kontroverse mit Forel, über die er auf S. 60 ausführt:

«Ich muß zugeben, daß die von mir früher heftig bekämpfte Annahme von Forel, daß nämlich der Wärmeumsatz nordischer Seen ein größerer ist als derjenige zentraleuropäischer, unter gewissen Umständen doch mit der Wirklichkeit übereinstimmt, wobei die Nähe des Ozeans auf den Umfang des Wärmeaustausches beschränkend zu wirken scheint. Als für das Forelsche Gesetz beweiskräftig können nicht diejenigen Resultate Anspruch erheben, welche bei Seen von ganz verschiedenem morphologischem Charakter sich ergeben haben.»

Halbfäß erkannte also den Einfluß der Morphologie des Beckens auf den Wärmeumsatz, aber er vermutete den morphologischen Hauptfaktor in der mittleren Tiefe. Die Tatsache, daß in bezug auf Wärmespeicherung der Genfersee vom Vettersee und dieser vom Ladogasee übertroffen wird, erklärt er folgendermaßen:

«Der Genfersee hat zwar annähernd das gleiche Volumen wie der Vettersee, aber eine dreimal so große Maximal-, eine viermal so große mittlere Tiefe; der Ladogasee übertrifft den Genfersee zwar an Volumen um das Zwölfwache, steht aber an Maximal-, besonders aber an mittlerer Tiefe erheblich hinter ihm zurück; und gerade dieser Faktor ist entscheidend für die Frage, ob Seen vom morphologischen Gesichtspunkt aus auf ihre Wärmeverhältnisse miteinander verglichen werden dürfen.»

Wir glauben, daß die mittlere Tiefe eines Sees, wenn dieselbe einen bestimmten Betrag, nämlich die von der Oberflächengröße abhängige Durchmischungstiefe (siehe S. 48), überschreitet, für den Wärmeumsatz des Sees unbedeutend wird. Hätte Halbfäß den sommerlichen Wärmegewinn pro Oberflächeneinheit berechnet, so wäre ihm zweifellos die dominierende Rolle des Seareals aufgefallen. Hierzu noch ein Beispiel. Halbfäß führt aus:

«Mjösensee und Comersee haben annähernd gleiche mittlere Tiefe; ersterer besitzt entsprechend seinem größeren Areal und größerer mittlerer Tiefe ein größeres Volumen. Man sollte also vom rein geophysikalischen

Standpunkt aus bei ihm geringere Wärmeschwankungen erwarten als beim Comersee. In Wirklichkeit verhält sich aber die Sache genau umgekehrt. Die Zunahme im Sommerhalbjahr betrug beim Comersee im Mittel 30, beim Mjösensee dagegen 70 %, die Abnahme im Winterhalbjahr dort 22, hier 38 %, also jedesmal bedeutend mehr.»

Unsere Erklärung lautet: Die Oberflächen des Mjösen- und des Comersees verhalten sich wie 2 : 1, (359 km^2 , 145 km^2); wir müssen also beim ersteren eine größere sommerliche Wärme-einlagerung erwarten. Außerdem aber gibt der Vergleich der prozentualen Zunahme des Wärmehaltes der beiden Seen ein verzerrtes Bild. Denn die Ausgangssumme, also 100 %, liegt beim nördlichen Mjösensee natürlich viel tiefer als beim Comersee mit seiner im Winter um etwa $3,5^\circ \text{C}$ höheren Mitteltemperatur. Die Größe des Seareals ist für den Wärmeumsatz in zweifacher Hinsicht bedeutungsvoll:

- a) Weil Wärmezufuhr und Wärmeentzug zum größten Teil via Oberfläche erfolgen, also dem Ausmaß der Oberfläche proportional sind,
- b) weil die zugeführte Wärme, die hauptsächlich die obersten Schichten erwärmt, durch Windarbeit in die Tiefe gearbeitet werden muß, soll sie dem Verlust durch nächtliche Abkühlung entzogen werden. Je tiefer zudem die Wärme hinabgearbeitet wird, je dicker also die Schicht ist, auf die sich eine bestimmte Wärmemenge verteilt, um so geringer wird die Erwärmung der Seeoberfläche. Um so kleiner wird damit auch der Wärmeverlust durch Ausstrahlung.

Die Bedeutung der Ausstrahlung der Wasseroberfläche für den Wärmehaushalt ergibt sich aus Berechnungen Saubereers [58], nach welchen diese ca. 10 % der gesamten Strahlungsbilanz ausmacht.

Bei gleichen Einstrahlungs- und Durchflutungsverhältnissen und bei gleicher Windintensität müßte also ein See mit größerer Oberfläche eine größere sommerliche Wärmehaushalt pro Oberflächeneinheit zeigen als ein kleiner. Wir wollen diese Wärmehaushalt resp. -abgabe pro cm^2 der Oberfläche im folgenden als den «spezifischen Wärmeumsatz» eines Sees bezeichnen. Vergleichen wir daraufhin unsere Schweizerseen (Tab. 14), bei denen wir, wenigstens für die Alpennordseite, sehr ähnliche Einstrahlungsverhältnisse annehmen dürfen (vergleiche die Kurven über Sonnenscheindauer Abb. 24). Das Mittel des spezifischen Wärmeumsatzes beträgt, wenn wir Root- und Murtensee nicht berücksichtigen, $24\,800 \text{ cal/cm}^2$. Darüber liegen wieder Thuner- und Bielersee, beträchtlich darunter der Brienersee. Wiederholt haben wir darauf hingewiesen, daß Thuner- und Bieler-

see erwärmtes Oberflächenwasser aus andern Seen beziehen, während der Brienersee diesbezüglich nur Lieferant ist. Hofer [29] berechnete die Wärmemenge, die der Brienersee infolge Durchflutung im Erwärmungshalbjahr 1948 verliert, auf $4876 \cdot 10^9$ cal. Diese Wärmemenge wird via Aare dem Thunersee zugeführt. Rechnen wir auf die Oberflächeneinheit des Thunersees um, so ergeben sich $10\,200$ cal/cm². Die Übereinstimmung der Zahlen (Diff. des Wärmeeumsatzes Thunersee–Brienersee = $10\,600$ cal/cm².) verblüfft und ist gewiß zum Teil ein Zufallsergebnis. Die Übereinstimmung in der Größenordnung betrachten wir aber doch als eine Bestätigung unserer Annahme.

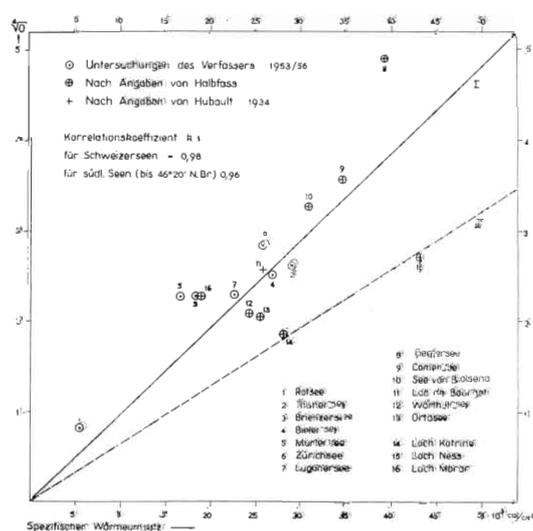
Weil vom Murtensee keine Messungen über Menge und Temperatur von Zu- und Abfluß, wie wir sie aus der Untersuchung Hofers für den Brienersee besitzen, vorliegen, läßt sich nur vermuten, daß auch hier bedeutende Wärmemengen durch die Broye in den Neuenburgersee verfrachtet werden. Dementsprechend liegt der spezifische Wärmeumsatz sehr tief. Daß er nicht einmal den Wert des Brienersees erreicht, wird seinen Grund in der geringen Tiefe des Sees und damit in der Beckenform haben. Der Zusammenhang Beckenform–Wärmeeumsatz wird leicht ersichtlich beim Betrachten der hypsographischen Kurven in Abb. 2. Weil sich bei einem seichten Gewässer das Volumen nach unten stark verjüngt, besitzen die tieferen Schichten im Verhältnis zu den höheren, bei gleicher Wärmeschichtung, eine wesentlich kleinere Wärmemenge als bei einem «steilwandigen» See. Beim Murtensee z. B. nimmt das Volumen von 20–40 m Tiefe nur 38 %, beim Brienersee aber 48,7 % des Gesamtvolumens der obersten 40-m-Schicht ein. Anders ausgedrückt: Ein flacher See braucht, um eine bestimmte Temperaturschichtung zu erreichen, eine kleinere Wärmemenge pro Oberflächeneinheit als ein steilrufriger. Bei ihm stellt sich deshalb bei gleicher Einstrahlung, gleicher Oberfläche und gleicher Windintensität auch entsprechend früher ein bestimmter Grad der Turbulenzhemmung als Folge der Temperaturschichtung ein. Dabei kommt es vor allem auf den Uferverlauf bis zu jenen Tiefen an, bis zu welchen die Durchmischungsvorgänge eine wesentliche Rolle zu spielen vermögen. (Siehe hierüber S. 47 und Abb. 42.) Die mittlere Tiefe der Seen spielt dabei lediglich die Rolle eines Indikators für die Beckenform; denn auch bei verhältnismäßig großer mittlerer Tiefe, wie wir dies z. B. beim Zürichsee finden (54 m), können die obersten Meter des Beckens den Temperaturverlauf des Sees entscheidend gestalten (siehe hierüber auch die Ausführungen auf S. 49). Wir haben deshalb in Tab. 14 auch die mittleren Tiefen der Wasservolumen der obersten 50-m-Schicht angegeben. Je mehr

diese 50 m unterschreiten, um so entscheidender muß die Beckenform für den Wärmeeumsatz sein. Der Zusammenhang Seereal–Größe des spezifischen Wärmeeumsatzes ist offensichtlich. Aus Angaben verschiedener Autoren über Wärmeeumsatz in Seen und nach unseren eigenen Beobachtungen haben wir deshalb den Grad der Abhängigkeit zu ermitteln versucht. Würde dieser bekannt sein, so ließe die Abweichung von der Regel Schlüsse auf die Bedeutung weiterer Faktoren zu. Abb. 45 zeigt, daß die Größe des spezifischen Wärmeeumsatzes ca. der 4. Wurzel aus der Oberfläche proportional ist. Dieser Wert wurde empirisch ermittelt, und es handelt sich deshalb um einen ersten, versuchsweisen Ansatz. In der Figur wurden die Werte für alle von uns untersuchten Seen sowie einiger aus Tab. 15 aufgetragen. Weggelassen wurden Vetter- und Ladogasee, weil ihre mittlere Tiefe viel kleiner als die aus der Oberflächengröße sich ergebende theoretische Durchmischungstiefe ist. Die Gerade I wurde nach ungefährem Ermessen gelegt, während Gerade II zwei schottische Seen annähernd verbindet. Bei Betrachtung von Abb. 45 stellt sich vor allem folgendes Problem:

Besteht eine quantitative Abhängigkeit des Wärmeeumsatzes eines Sees von der geographischen Breite? Bekanntlich wurde diese Frage von Halbfab verneint, von Forel bejaht. (Siehe Halbfab [28] S. 60.) Für die Forelsche Annahme lassen sich folgende Überlegungen ins Feld führen.

— Mit zunehmender Breite nimmt die Differenz zwischen Maximum und Minimum der täglichen Strahlungssummen auf die Horizontalfläche während eines Jahres zu.

Abb. 45



Spezifischer Wärmeumsatz als Funktion der Oberfläche.

— Die Mitteltemperatur eines nördlichen Sees liegt bei Beginn der sommerlichen Erwärmung tiefer als diejenige eines südlichen (gilt für die nördliche Halbkugel). Weil aber die Dichtedifferenz pro Temperaturgrad beim Wasser mit zunehmender Entfernung vom Dichtemaximum wächst, wird die gleiche Windarbeit eine bestimmte Wärmemenge bei einem nördlicheren See in größere Tiefen verfrachten als bei einem südlicheren.

Zweifellos läßt sich die Kontroverse Halbfab-Forel am ehesten durch Vergleich des spezifischen Wärmeumsatzes der Seen abklären. Und tatsächlich liegt dieser, wie Abb. 45 zeigt, im Durchschnitt für die nördlichen Seen höher als für die südlichen (Loch Neß $57^{\circ} 15'$ und Loch Katrine $56^{\circ} 15'$, Gerade II). Links von Kurve I (zu kleiner spez. Wärmeumsatz) liegen Genfer- ($46^{\circ} 21'$), Comer- (46°) und Luganersee (46°) sowie See von Bolsena ($42^{\circ} 36'$) und Lac de Bourget ($45^{\circ} 44'$). Passen die meisten Seen recht gut in unser Schema, so gibt es doch auch bemerkenswerte Ausnahmen, für die wir keine Erklärung geben können (Loch Morar $56^{\circ} 51'$, Ortasee $45^{\circ} 45'$). Die Gründe für etwas zu kleinen Umsatz bei Murten-, Zürich- und Brienersee wurden weiter oben erörtert, und beim Rootsee vermuten wir einen Einfluß seines meromiktischen Zustandes. Leider fehlen uns weitere Unterlagen über das Temperaturverhalten der schottischen Seen. Vielleicht aber könnte die Erklärung für das abweichende Verhalten des Loch Morar in seiner Lage gefunden werden. Befindet sich dieser See doch in unmittelbarer Küstennähe, während Loch Neß und Loch Katrin im Landesinnern liegen. Zweifellos wirkt Ozeanität auch auf den Temperaturgang der Seen ausgleichend. Ueber den Grad dieses Ausgleichs konnten wir aber bis heute keine zuverlässigen Anhaltspunkte finden. Bedenken wir, wie viele Faktoren für die Größe des Wärmeumsatzes eines Sees bestimmend sind, so überrascht die überragende Bedeutung, die sich aus Abb. 45 für die Größe des Seearcals und daraus für das Ausmaß der Windeinwirkung ergibt. Mit allem Vorbehalt wagen wir dies so zu deuten, daß sich gewisse Faktoren gegenseitig mehr oder weniger kompensieren. Als wichtigste Wärmelieferanten und -zehrer haben wir zu Beginn dieses Abschnittes Strahlung, Verdunstung und Durchflutung genannt. Es wäre nun denkbar, daß vermehrte Strahlungsintensität vermehrten Wärmeentzug infolge erhöhter Verdunstung zur Folge hätte. Vergleichen wir deshalb die beiden Posten auf ihre Größenordnung.

a) Strahlung. Sauberer [58] berechnete die jährliche Strahlungsbilanz für den Lunzersee zu $53\,670$ cal pro cm^2 . Dieser See entspricht in bezug auf Meereshöhe (608 m),

geogr. Breite ($47^{\circ} 51'$) und Gebirgslage recht gut den von uns untersuchten Seen, und wir können deshalb wohl annehmen, daß die dort gefundene Strahlungsbilanz in der Größenordnung auch für unsere Verhältnisse gilt. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß Albrecht für den Sakrowersee einen Jahreswert von $30\,500$ cal/ cm^2 fand, was zum Teil mit der höheren geographischen Breite dieses Sees erklärt werden kann.

b) Verdunstung. Wie bereits erwähnt, nahm Hofer [29] für den Brienersee im Beobachtungsjahr 1947/48 eine jährliche Verdunstung von 800 mm an. Dies würde eine Wärmezehrung von $47\,000$ cal/ cm^2 ergeben. Hofer stützte sich auf Berechnungen Maurers, der aus Messungen von Zu- und Abfluß sowie Niederschlag am Zugersee eine jährliche Verdunstungshöhe von 700 — 900 mm ermittelte.

Henry fand für Huron-, Michigan- und Erisee 620 , 580 und 600 mm. Für die Verdunstung gilt die Daltonsche Formel:

$$V = C \cdot (e_0 - e) (1 + 0,084 W)$$

Es bedeuten:

V = Verdunstung

C = Konstante

e = Dampfdruck der überlagernden Luft

e_0 = Sättigungsdruck

W = Windgeschwindigkeit in km/h

Da die Differenz ($e_0 - e$) für die Verdunstung bestimmend ist, leuchtet ein, daß diese dadurch auch von der Größe des Seearcals abhängig wird. Denn über einer kleinen Seefläche wird die relativ feuchte Luft schon bei kleinerem Windweg erneuert sein als über einer großen. Somit ergibt sich, daß die Größe des Seearcals auch in dieser Beziehung für die Wärmebilanz eines Gewässers Bedeutung hat.

Da weiter e_0 eine Funktion der Temperatur ist, wird bei vermehrter Einstrahlung entsprechend mehr verdunstet. So hat Tomlinson in Bombay eine jährliche Verdunstungshöhe von 1930 mm auf einer Fläche von 10 km^2 gefunden.

Wir stellen also fest, daß die aus der Strahlungsbilanz resultierende und die durch Verdunstung entzogene Wärmemenge größenordnungsmäßig ziemlich gut übereinstimmen. Für die Frage, wie weit die zugestrahlte Wärmemenge durch Verdunstung und Ausstrahlung wieder aufgezehrt wird, ist entscheidend, wie rasch die Wärme der Oberfläche durch die Windarbeit entzogen und in tiefere Schichten gearbeitet wird. Da die pro Oberflächeneinheit eingelagerte Wärmemenge mit der Größe der Ober-

fläche zunimmt, die pro cm^2 zugestrahlte Energie aber zweifellos von der Flächengröße unabhängig ist, liegt die Vermutung nahe, daß sich für die meisten Seen an der Oberfläche gewissermaßen ein «Ueberangebot» an Wärme vorfindet, und daß, je nach Turbulenzgrad, nur ein Teil für die Auftemperierung der Wassermasse nutzbar gemacht werden kann. Damit wird die überragende Bedeutung der Oberflächengröße für den spezifischen Wärmeumsatz einleuchtend. Denn die Größe der Oberfläche haben wir ja auch als Hauptfaktor für die

Durchmischungstiefe gefunden. Es muß weiter gefolgert werden, daß eine Grenze existiert, bei welcher die zugestrahlte Wärmemenge ange nähert vollständig in die Wassermasse hineingearbeitet wird, so daß ein weiteres Angebot an Turbulenzenergie keine vermehrte Wärmespeicherung mehr bewirken könnte. Die Frage, ob diese Grenze vielleicht beim Genfersee erreicht ist und dieses Gewässer deshalb nach Abb. 45 einen im Verhältnis zur Oberfläche zu kleinen spezifischen Wärmeumsatz zeigt, lassen wir offen.

IV. CHEMISMUS

A. Allgemeine Überlegungen

Das Wechselspiel von Temperaturschichtung und Durchmischung ist von zentraler Bedeutung für zahlreiche Vorgänge im See. Denn die thermische Schichtung, die ihre ausgeprägteste Form in der Sommerstagnation findet, unterteilt den See in einzelne Stockwerke, indem sie den vertikalen Austausch drosselt oder unterbindet. Das biologische Geschehen jedes Stockwerkes wird deshalb, solange die Schichtung besteht, durch die Quantität der anfänglich vorhandenen Stoffe (z. B. Nährstoffe und Sauerstoff) begrenzt. Erst die Sommerteil- und vor allem die Herbstvollzirkulation gleichen die vorhandenen Konzentrationsunterschiede wieder aus. Sie führen der Tiefe immer wieder den unentbehrlichen Sauerstoff zu und heben gleichzeitig die in der Tiefe angereicherten Nährsalze in oberflächennahe Schichten, wodurch diese Schichten gewissermaßen gedüngt werden. Dieser Vorgang kann als ein jährliches «Atemholen» des Sees bezeichnet werden. Einzig der Wachstumsfaktor Licht wird von diesen Vorgängen nicht betroffen; er bildet einen «Elementarfaktor». Wir haben deshalb das Kapitel über die Lichtverhältnisse der untersuchten Seen an den Anfang unserer Betrachtungen gestellt. Nachdem nun auch die Temperatur- und Turbulenzverhältnisse und die sich daraus ergebenden Schichtungen diskutiert worden sind, können wir uns der räumlichen Verteilung und der zeitlichen Veränderung der übrigen Wachstumsfaktoren zuwenden. In erster Linie betrifft dies die Nährstoffe. Diese bestimmen primär die Fruchtbarkeit eines Sees. Sind sie reichlich vorhanden, so sprechen wir von einem eutrophen, im andern Fall von einem oligotrophen Gewässer. Der

dritte Typus, der distrophe See, interessiert uns hier nicht, da er in unserer Untersuchungsreihe nicht vertreten ist. Nun sind vor allem zwei Nährstoffe von besonderer Wichtigkeit, weil sie meist zuerst aufgezehrt werden und dann den produktionsbegrenzenden Minimumfaktor darstellen, nämlich Nitrat und Phosphat. Wir beschränkten uns deshalb in unseren Untersuchungen auf diese beiden.

Durch den Lichtfaktor wird der See in zwei biologische Räume getrennt, einen oberen, belichteten und einen unteren, welcher vom Licht nicht erreicht wird. Da das Licht für die Assimilation des Planktons, also für die biologische Produktion unentbehrlich ist, bildet der belichtete Raum die aufbauende oder trophogene Schicht, der unbelichtete die abbauende oder tropholytische Zone, in welcher die absinkenden Planktonleichen zersetzt und schließlich mineralisiert werden. Da die beiden Räume während der Zeit der Hauptproduktion durch die thermische Schichtung getrennt sind, findet zwischen ihnen kein Stoffaustausch statt. Die produzierende Schicht muß deshalb allmählich an Nährstoffen verarmen, während die Tiefenzone infolge Zersetzung der absinkenden organischen Substanz eine Anreicherung erfährt. Die Nährstoffdifferenz zwischen trophogenem und tropholytischem Bezirk gibt deshalb bei Ende der Sommerstagnation ein gutes Bild über das Ausmaß der Produktion eines Sees.

Ein weiteres, außerordentlich zuverlässiges Produktionskriterium liefert uns die Sauerstoffkurve eines Gewässers. Es wird deshalb oft von eutropher und oligotropher Sauerstoffkurve gesprochen. Th i e n e m a n n [69] gebührt das Verdienst, diese Zusammenhänge als erster klar erkannt und einge-

hend untersucht zu haben. Lesen wir, was dieser Forscher über sein Einteilungsprinzip ausführt:

«Das Hauptprinzip, das ich für die Aufstellung meiner beiden Seetypen I und II benutzt habe, lag in der Verschiedenheit der Sauerstoffverhältnisse: beim Typus I erfährt im Sommerwasser das Sauerstoffgefälle von der Oberfläche zur Tiefe im Metalimnion keine Verstärkung, beim Typus II ist der Sauerstoffgehalt des Epilimnions hoch, im Metalimnion findet plötzlich eine starke Abnahme des Sauerstoffgehaltes statt, das Hypolimnion ist sauerstoffarm- oder sauerstofflos; die Sauerstoffkurve hat also einen «Knick» im Gebiete der Sprungschicht.»

Der Hauptgrund für die Sauerstoffdifferenz zwischen Aufbau- und Zehrschicht liegt bekanntlich in der Sauerstoffanreicherung der ersteren infolge der Assimilation und in der Sauerstoffkonsumation der letzteren durch die absinkende Verwesungssubstanz. M i n d e r [41] führt über die Bedeutung der Sauerstoffuntersuchungen auf S. 283 aus:

«Die planmäßig ausgeführten Sauerstoffbestimmungen waren und sind zur Beurteilung der Seetypenfrage immer noch das beste Auskunftsmittel und werden ihre zentrale Stellung beibehalten. Sie können durch chemische Bestimmungen anderweitiger Komponenten oder Gruppen von solchen wohl gestützt, kaum jedoch ersetzt oder überholt werden.»

Ueber die Härtebestimmung führt der gleiche Autor in «Untersuchungen am Bielersee» aus:

«Nach chemischen Gesichtspunkten wird ein Wasser am besten durch die Härte charakterisiert, weil die weitaus überwiegenden gelösten Bestandteile natürlicher Wässer durch die Erdalkalisalze der Kohlensäure gebildet werden, wobei fast immer unter den Kationen das Calcium, und unter den Anionen das Carbonat- bzw. Hydrokarbonat überwiegt.»

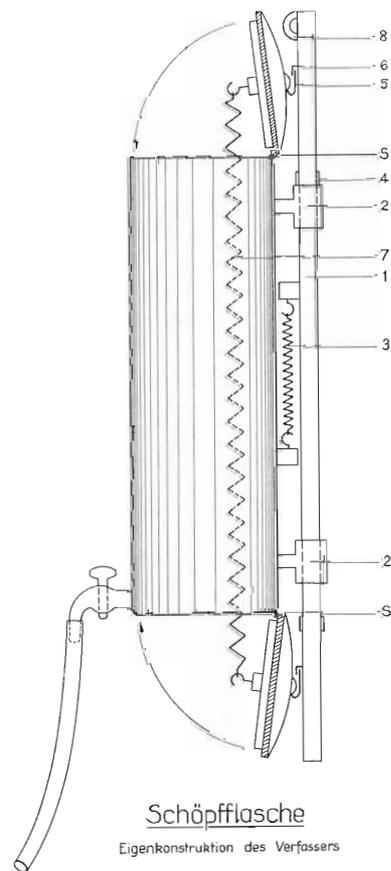
Aus diesen Gründen, und weil große Härte-differenz zwischen trophogener und tropholytischer Schicht auf «biochemische Entkalkung» schließen läßt, wurden von uns auch Härtebestimmungen durchgeführt. Denn das Hauptziel unserer chemischen Untersuchungen liegt im Klassifizieren, in der Ermittlung des Trophiegrades der von uns untersuchten Seen. Die Klagen, die von zunehmender Verschmutzung schweizerischer Gewässer berichten, mehren sich. M i n d e r hat z. B. in zahlreichen Arbeiten über den Zürichsee nachgewiesen, daß dieser Alpenrandsee erst in den letzten Jahrzehnten durch menschlichen Unverstand eutrophiert und weitgehend verschmutzt worden ist. Zahlreichen andern Seen droht das gleiche Schicksal. Wo es möglich ist, werden wir deshalb unsere Feststellungen mit Angaben aus früheren Arbeiten vergleichen, um eine evtl. Veränderung im Chemismus der Gewässer zu erfahren.

B. Untersuchungsmethodik

1. Die Probeentnahme

Die Entnahmestellen decken sich mit denjenigen für Optik und Thermik (siehe S. 7). Da uns vor allem die Zunahme der Konzentrationsunterschiede zwischen Produktions- und Zehrschicht interessierte, beschränkten wir uns meist auf Entnahme je einer Probe aus dem oberen und unteren Grenzbezirk der beiden Schichten, also aus mindestens vier Tiefen. Die Entnahme geschah mit Hilfe einer Schöpfflasche eigener Konstruktion (siehe Abb. 46). Die beiden Verschußdeckel, die beim Hinunterlassen der Flasche offen stehen, werden durch ruckartigen Zug ausgeklinkt und dann mittelst einer Spiralfeder gegen den oberen und unteren Flaschenrand gepreßt, wodurch die Flasche geschlossen wird. Die beschriebene Schöpfflasche wurde

Abb. 46



- S Scharniere
- 1 Führungsschiene
- 2 Führungsnuten
- 3 Feder zum Emporziehen der Flasche
- 4 Anstellnocken
- 5, 6 Einklinkvorrichtung zum Offenhalten der Deckel
- 7 Feder zum Schließen der Deckel
- 8 Befestigungsring

von uns seit 1951 verwendet und hat sich ausgezeichnet bewährt. Ihr besonderer Vorteil liegt im Wegfall des Fallgewichtes.

2. Die Bestimmung von Nitrat und Phosphat

Die Nitrate wurden nach Angaben des Schweiz. Lebensmittelbuches, die Phosphate mit Molybdän-Wolfram-Reagens, Zinnchlorür und Phosphatvergleichslösung nach Anleitung des Kantonschemikers in Luzern, Herrn Dr. Adam, bestimmt.

3. Sauerstoffbestimmung

Die Sauerstoffwerte ermittelten wir nach der bewährten Winklermethode mit der von Alsterberg angegebenen Modifikation. (Vorbromierung der Proben.) Ab Sommer 1954 wurde, unseres Wissens erstmals in der Schweiz, das elektrische Sauerstofflot angewendet. Wir verweisen diesbezüglich auf eine Publikation von Ohle [50] im «Jahrbuch für Wasserchemie und Wasserreinigungstechnik» 1952, Bd. XIX. Unsere Erfahrungen sind kurz folgende:

- a) Das elektrische Sauerstofflot ist in der Handhabung sehr einfach und gestattet, eine Wassermasse in bezug auf Sauerstoffgehalt gewissermaßen abzutasten. Auf diese Weise können auch Mikroschichtungen, deren Ermittlung sonst auf Zufälligkeit beruht, festgestellt werden.
- b) Die Anwendung des Sauerstofflotes bedingt aber eine lückenlose vertikale Temperaturkontrolle, wozu sich nur ein elektrisches Thermometer eignet. Denn die ermittelten Sauerstoffwerte müssen peinlich genau auf einheitliche Temperatur reduziert werden.
- c) Bei Anwendung des Lotes in verschiedenen Seen müssen unbedingt jedesmal mindestens zwei Vergleichsuntersuchungen nach der Winklermethode durchgeführt werden, wozu sich am besten die Extremstellen der Sauerstoffkurve eignen. Dies ist aber auch bei Verwendung des Lotes im gleichen See zu empfehlen.
- d) Wir erzielten gute Ergebnisse mit Gold- (1 cm²) und Zinkelektroden (4,5 cm²), deren gegenseitiger Abstand 11 mm betrug. Das verwendete Ampèremeter hatte bei der betreffenden Shuntschaltung einen Innenwiderstand von zirka 350 Ω und einen Endausschlag von 300 μ A.

4. Härtebestimmung

Wir titrierten in üblicher Weise 100 cm³ Untersuchungswasser mit einer zehntelnormalen Salzsäure gegen Methylorange (später «Mischindikator» des kantonalen chemischen Labora-

toriums in Bern) und multiplizierten den Alkalinitätswert mit 5, wodurch sich die Härte in französischen Härtegraden ergab.

C. Nitrate und Phosphate

Es sei einleitend betont, daß der Nährstoffhaushalt der Gewässer äußerst komplexe Probleme bietet. (Siehe Ruttner [55] S. 75—93.) Wir glauben nicht etwa durch unsere unvollständigen und vereinzelt Bestimmungen von Nitraten und Phosphaten zur Lösung dieser Probleme beizutragen. Es handelt sich lediglich um eine erste Orientierung, um ein Abtasten. Unsere Angaben werden wir ergänzen durch diejenigen aus einer 1953 erschienenen Publikation von Thomas über «Empirische und experimentelle Untersuchungen zur Kenntnis der Minimumstoffe in 46 Seen der Schweiz und angrenzender Gebiete».

Ueber die Bedeutung der Nitratbestimmung als Indikator für den Gesamtkreislauf des Stickstoffs sagt Minder [42] auf S. 137:

«Im allgemeinen lassen sich nicht alle hier wiedergegebenen biochemischen Umsetzungen gleichmäßig leicht verfolgen. Am ausgeprägtesten sind Verschiebungen am Gehalt des Nitratstickstoffes feststellbar. So z. B. nimmt der Nitratstickstoff, soweit wir das bis heute verfolgen konnten, beim Anschließen der Planktonvegetation im Frühjahr in den entsprechenden Oberflächenschichten spontan ab, während der Ammoniakstickstoff anscheinend kaum angegriffen wird, oder doch nicht so, daß der Vorgang analytisch erfaßbar ist. Die Gründe dafür sind verschieden und manches ist noch dunkel.»

Ueber die Bedeutung der Phosphate lesen wir bei Ruttner [55] auf S. 81:

«Phosphate gehören zu jenen Nährstoffen, die in unseren Gewässern in den geringsten, ja oft unvorstellbar kleinen Mengen vorkommen. Enthält doch das Wasser der oligotrophen Seen oft weniger als ein Tausendstel Milligramm (1 γ) anorganischen P im Liter, ja, der Gehalt sinkt nicht selten unter die Erfassungsgrenze der überaus empfindlichen Molybdänblau-Methode. Noch mehr als die Möglichkeit des Nachweises solcher geringer Mengen muß die Fähigkeit der Planktonalgen, auch diese Spuren eines lebenswichtigen Nährstoffes zu verwerten, Staunen erregen.»

Auf ein aufschlußreiches Experiment, das Thomas an Winter- und Sommerwässern aus 46 Schweizerseen ausführte, sei hier hingewiesen, da sich unter diesen Seen auch sämtliche von uns untersuchten befinden. Ein Zusatz von reichlich Nitraten und Phosphaten vermochte in sämtlichen Proben eine Algenhochproduktion zu bewirken, woraus hervorgeht, daß die biologische Tätigkeit

dieser Seen durch keinen andern Nährstoff begrenzt wird. Der Autor berichtet über die Ergebnisse seiner Untersuchungen:

«Die unseren Experimenten zugrunde liegende Frage kann nun auf Grund der geschilderten Ergebnisse beantwortet werden: Bei Zufuhr von Nitraten und Phosphaten genügt in den genannten Seen der Gehalt an allen andern lebenswichtigen Stoffen, um eine erhöhte Planktonproduktion hervorzurufen und um wenigstens den Hauptteil der zugeführten Nährstoffe zu verbrauchen und in organische Substanz umzuwandeln.»

In Tab 16 sind die von uns bei Sommerstagnation (August 1955) gefundenen Werte für Nitrate und Phosphate zusammengestellt. Nimmt man an, daß am Ende der Frühjahrsvollzirkulation die Nährstoffkonzentration von der Oberfläche bis zum Grund nahezu ausgeglichen war, so vermittelt die Nährstoffdifferenz zwischen Zehr- und Produktionsraum nach längerem Ausbleiben des Austausches infolge thermischer Schichtung einen ungefähren Anhaltspunkt über das Ausmaß des «biologischen Umsatzes» im See.

Tabelle 16

	Brien- zersee	Thu- ner- see	Lu- ganer- see	Bieler- see	Zü- richsee	Mur- tensee	Rootsee
N ₂ O ₅ mg/l	Z 1,0	2,2	1,0	1,4	1,0	1,0	0,0
	P 0,8	1,4	0,1	0,5	0,0	0,6	0,4
	D 0,2	0,8	0,9	0,9	1,0	0,4	-0,4
PO ₄ γ/l	Z <20	30	60	60	40	40	300
	P <20	20	40	50	50	40	30
	D 0	10	20	10	-10	0	270

Phosphat- und Nitratwerte bei Sommerstagnation (August 1955)

Z = Zehrschicht

P = Produktionsschicht

D = Differenz (Aufbrauch in der Produktionsschicht)

Vergleichen wir die Ergebnisse in Tab. 16 und ergänzen wir sie durch die Beobachtungen verschiedener Autoren:

Brienzer- und Thunersee: Der Befund über Nitrate und Phosphate deckt sich mit demjenigen von Thomas. Die beiden Seen müssen als ausgesprochen oligotroph und vor allem der Brienzersee als phosphatarm bezeichnet werden.

Luganersee: Da dieses Gewässer eine um mehrere Grade höhere Temperatur als die Seen der Alpennordseite besitzt, und da nach der van Th' Hoffschens RGT-Regel der Umsatz in der Zeit-

einheit bei einer Temperatursteigerung von 10° mindestens verdoppelt wird, muß er einen besonders großen Nährstoffbedarf zeigen. Es verwundert deshalb nicht, daß Thomas im Oberflächenwasser eine Nitrat-Differenz von 2,2 mg/l vom Winter zum Sommer fand. Ja g soll 1952 sogar einen Nitratverbrauch von 3,6 mg/l ermittelt haben. Wir stellten an der Oberfläche 0 mg/l und in 20 m Tiefe 0,2 mg/l fest. Dagegen fanden wir in den entsprechenden Tiefen noch 60 und 20 γ/l PO₄. Dieser Befund widerspricht demjenigen von Thomas (<20 γ/l PO₄ Sommer und Winter) und von Märki (<10 γ/l PO₄ in 5 von 8 Proben 1945, nach Mitteilung von Thomas). Da aber in unserem Fall der Nitratvorrat der Oberfläche praktisch aufgezehrt war, wäre wohl möglich, daß neuerdings zugeführte Phosphate (z. B. durch Abwässer) infolge Fehlens der Nitrate nicht angegriffen werden konnten. (Vergleiche Ausführungen über den Zürichsee.)

Bielerssee: Minder [42] bezeichnet den See als ein Gewässer, das in bezug auf die Pflanzen-nährstoffe eutroph sein sollte, das aber in bezug auf Planktongehalt und Sauerstoffverhältnisse oligotrophen Charakter zeigt. Er fand Nitratgehalte von 0,8—2,4, vereinzelt sogar bis 4,2 mg/l, was er hauptsächlich dem Einfluß der Aare zuschreibt. Außerdem macht er die Aare für eine überdurchschnittliche Trübung des Sees verantwortlich, wodurch die Planktonproduktion gedrosselt werde. Nach Aussagen von Thomas bilden die Nitrate auf alle Fälle nicht den Minimumstoff, was mit unsern Feststellungen übereinstimmt.

Zürichsee: Dieses Gewässer ist zweifellos von allen Schweizerseen das am besten untersuchte. Nach Aussagen von Minder [41] (1943) liegen reichlich zwei Dutzend limnologische Arbeiten über diesen See vor. Wir wählten den Zürichsee also nicht etwa, um die vorliegenden Untersuchungen zu ergänzen, sondern lediglich zu Vergleichszwecken. Minder [40] konnte nachweisen, daß die biologische Produktion im Zürichsee durch die Nitrate begrenzt wird. Diese Behauptung wurde 1949 durch Untersuchungen von Thomas und Märki [77] bestätigt. Unsere Nährstoffbestimmungen zeigen ebenfalls vollständigen Schwund der Nitrate in der Produktionsschicht und sogar ein leichtes Ueberwiegen der Phosphate im Epilimnion gegenüber dem Gehalt in der Zehrschicht. Dies ist ein deutlicher Hinweis für die Belastung des Sees mit Abwässern. Während nämlich normalerweise in den natürlichen Gewässern die Nitrate gegenüber den Phosphaten noch überwiegen, da letztere dem Boden der Einzugsgebiete nur mühsam entzogen werden (z. B. aus phosphathaltigen Gesteinen wie Apatit), bringen Abwässer aus Industrie und Haushalt verhältnismäßig reichlich Phosphate (nach Thomas [75] S. 8).

Murtensee: Nach Thomas und Märki wurden die Nitrate 1946 und 1951 nicht zu Mini-

mumstoffen, und auch unsere Untersuchung zeigt noch einen Nitratgehalt von 0,6 mg/l im Oberflächenwasser.

Für die Phosphate aber ergeben sich recht widersprechende Verhältnisse. *O d e t t e R i v i e r* [52] fand Ende Juni, Ende August und Anfang Oktober 1935 einen restlosen Aufbrauch in der Produktionsschicht, dazwischen aber erneute Zunahme des Phosphatgehaltes. *T h o m a s* fand sowohl im Sommer wie im Winterwasser einen Wert $< 20 \gamma / l$, während unsere Analysen $40 \gamma / l$ für Produktions- wie Zehrschicht zeigten. Es scheint also, daß die Phosphate in diesem See raschen Änderungen in quantitativer Beziehung unterworfen sind.

Rootsee: Dieser See zeigt im Sommer ab ca. 6 m Tiefe völligen Sauerstoffschwund. *R u t t n e r* [55] führt S. 81 aus:

«Das Verschwinden des Nitrates an der Sauerstoffgrenze wird sehr wahrscheinlich durch denitrifizierende Bakterien bewirkt, welche es über Nitrit und Stickoxydul zu elementarem Stickstoff reduzieren.»

So wundern wir uns nicht, im Tiefenwasser des Rootsees kein Nitrat zu finden. Aber auch die Oberflächenschichten zeigen nur noch 0,4 mg/l. Am 18. Februar 1950, also vor Beginn der biologischen Hochproduktion, fand *V o l l e n w e i d e r* einen Nitratwert von 7,4 mg/l, und *T h o m a s* bestimmte die Phosphate dieses Sees im Winterwasser zu $600 \gamma / l$. Diese Nährstoffmengen werden offenbar während des Sommers nahezu aufgezehrt. *M i n d e r* bezeichnet den See deshalb als polytroph. Trotzdem die Beckenform für natürliche Eutrophie spricht, müssen zweifellos noch weitere Gründe für den außerordentlich hohen Trophiegrad vorliegen. *A d a m* [2], der den Rootsee 1935/36 untersuchte, sieht bezüglich der Nährstoffzufuhr ähnliche Verhältnisse wie im Gerzensee, von dem er ausführt:

«Hier sind wir offenbar gezwungen, die Erklärung für die scheinbare Verschmutzung in der Natur des Sees selbst zu suchen. Wir sind der Auffassung, daß dieser See durch das Sickerwasser vom umgebenden Gelände her mit organischen Stoffwechselprodukten, namentlich aber mit Nährsalzen versehen wird und daß die großen Planktonmengen des Sees dank dieser natürlichen Düngung möglich sind. Sie verschmutzen das Wasser beim Absterben und schließen damit den Ring von der mineralischen Düngung zur organischen Verschmutzung, die ihrerseits den Sauerstoffschwund bewirkt. Es scheint uns klar, daß kultivierte Uferlinien diesen Düngungsprozeß begünstigen, weshalb wir die Erscheinung der Ubertrophierung vorwiegend bei kleinen Vorlandseen antreffen, ohne daß sie bei Bergseen fehlen müßte, wenn diese in Weidgebiet oder in Moorgebiet liegen.»

Zusammenfassend stellen wir fest: Briener- und Thunersee gehören nach Nährstoffgehalt zu den

oligotrophen, Murten-, Bieler-, Zürich- und Rootsee zu den eutrophen Gewässern. Für den Luganersee sind die Verhältnisse nicht abgeklärt, doch scheint er nach der eutrophen Seite zu neigen.

Während Murten-, Bieler- und Rootsee nach morphologischen Gesichtspunkten betrachtet (siehe hierüber S. 62) bereits eutrophen Charakter erwarten lassen, sind Zürich- und Luganersee «von Haus aus» oligotroph. Ihre mehr oder weniger eutrophe Erscheinungsform muß daher durch übermäßige Nährstoffzufuhr, also durch «kulturbedingte Verschmutzung», verursacht worden sein.

D. Die Sauerstoffverhältnisse

Tab. 20 bis 26 enthalten die von uns gefundenen Sauerstoffwerte, sowie Angaben über Temperatur und prozentuale Sättigung in der Entnahmetiefe. Die Berechnung der Sättigung führten wir nach *M i n d e r* [44] und anhand der dort publizierten Tabelle von *F o x* durch. Doch weicht unsere Ansicht in einem Punkt von derjenigen *M i n d e r s* ab. Bei *M i n d e r* [44] lesen wir auf S. 170:

«Wenn in tieferen Wasserschichten, d. h. in und unter der Sprungschicht, der relative Sauerstoffgehalt, d. i. in Prozenten der Sättigung, berechnet werden soll, empfiehlt es sich, von der bisherigen Gepflogenheit abzugehen und den gefundenen Sauerstoffgehalt bei allen temperierten Seen auf diejenige Sättigung zu beziehen, die das Wasser in der Oberfläche beim Dichtemaximum, $4^{\circ} C$, annimmt.»

Obschon tiefere Schichten infolge höheren Druckes bei physikalischer Sättigung eine größere absolute Sauerstoffmenge enthalten würden als oberflächennahe, muß für biologische Betrachtungen doch der Sättigungswert an der Oberfläche, also bei Atmosphärendruck in Meereshöhe des Seespiegels, als 100 % angenommen werden, weil jedes Wasserteilchen nur im Moment seiner Oberflächennähe mit atmosphärischem Sauerstoff angereichert werden kann. *M i n d e r* geht nun von der Ueberlegung aus, daß die Anreicherung der Tiefe mit Sauerstoff im Zeitpunkt der Vollzirkulation, also bei Homothermie und einer Temperatur von $4^{\circ} C$, vor sich geht und deshalb diese Temperatur für spätere Berechnungen zu berücksichtigen sei. Demgegenüber sind wir der Ansicht, daß zur Berechnung der Sättigung in allen Tiefen die jeweils in dieser Tiefe gefundene Temperatur berücksichtigt werden muß. Denn ebenso wie Sauerstoffaufnahme und Auslüftung immer an der Oberfläche geschieht, geht jede Wärmeaufnahme oder -abgabe immer von der Oberfläche aus. Wird beispielsweise die Temperatur in einer bestimmten Tiefe erhöht, so geschieht dies in der Weise, daß die Durchmischung eine von der Oberfläche ausgehende und nach der Tiefe sich ausbreitende Homother-

mie schafft, wodurch immer tiefer liegende Wasser-
teilchen erfaßt und abwechselnd, in Oberflächen-
nähe gehoben werden. Die Durchmischung schiebt
beim Tieferwandern das Temperaturgefälle gewis-
sermaßen vor sich her und kommt in jener Tiefe
zum Stillstand, in welcher ihre Energie durch Rei-
bung und Arbeitsleistung beim Emporheben schwe-
rerer Wasserteilchen aufgezehrt ist. Die Tempera-
turerhöhung in der Tiefe beruht letztendlich auf
einer Vermischung von kälterem Tiefenwasser mit
wärmerem Oberflächenwasser, woraus eine Mittel-
temperatur resultiert. Die kälteren Wasserteilchen
verließen aber die Oberfläche bei tieferer, die
wärmeren bei höherer Temperatur, so daß auch
in bezug auf ihre Sauerstoffsättigung während
ihrer Oberflächennähe ein Mittelwert existieren
muß, dem wir zweifellos bei Berücksichtigung der
momentanen Temperatur in der Entnahmetiefe am
nächsten kommen. Diese grundsätzlichen Ueber-
legungen gelten auch für Änderungen des Sauer-
stoff- und Wärmeinhaltes infolge horizontaler Ein-
schichtung von Wassermassen.

Wie Thienemann gezeigt hat, ist für den
Trophicgrad eines Sees das Größenverhältnis von
Produktionsschicht zu Zehrschicht von ausschlag-
gebender Bedeutung. So wird ein tiefer See von
Natur aus oligotroph, ein sehr flacher eutroph sein;
denn je größer die Zehrschicht, um so größer ist
auch ihr Sauerstoffvorrat, der ja ausreichen muß,
um die aus der trophogenen Zone absinkenden
organischen Massen zu oxydieren. Der Umschlag-
punkt für natürliche Oligo- und Eutrophie liegt
nach Thienemann [67] ungefähr bei einem
Verhältnis von 1 : 1 für Produktions- und Zehr-
schicht. Betrachten wir die hypsographischen Kur-
ven in Abb. 2 (die ungefähre Größe des Produk-
tionsraumes wird durch die oberste weiße Fläche
veranschaulicht), so ergeben sich für Briener-,
Thuner-, Luganer- und Zürichsee natürliche Oligo-
trophie, für Murten-, Bieler- und Rootsee natür-
liche Eutrophie.

Wir wollen im folgenden die «Prädestination»,
die sich aus der Beckenform ergibt, als primäre,
diejenige aus dem Reichtum an Nährstoffen (vgl.
S. 57) als sekundäre Trophie bezeichnen, wobei
wir noch zwischen natürlicher (Nährstoffe aus Ge-
steinen des Einzugsgebietes) und künstlicher Tro-
phierung (Nährstoffe aus Kultur und Industrie)
unterscheiden. Interessant ist die Frage, ob pri-
märe oder sekundäre Trophie stärker ins Gewicht
fällt, und welche von beiden dem See den Stempel
aufdrückt. Untersuchen wir daraufhin die Sauer-
stoffverhältnisse!

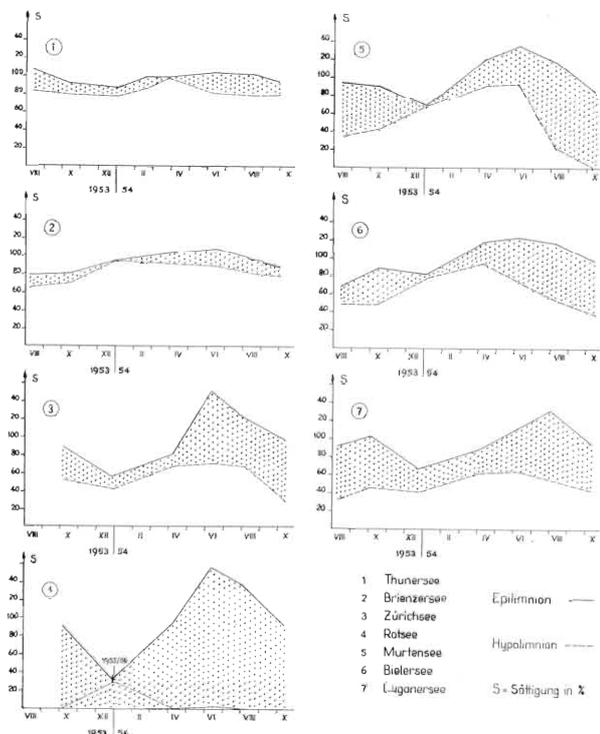
Die für unsere Betrachtung wesentlichen Ergeb-
nisse finden sich in Tab. 17 bis 23 und wurden in
Abb. 47 graphisch dargestellt. Wir stellen fest:

1. Briener- und Thunersee zeigen auch hier den
Charakter des tiefen, ausgesprochen oligo-
trophon Alpenrandsees. Die Sauerstoffsättigung
beträgt in der Produktionsschicht maximal

108 ‰, in der Zehrschicht liegt sie beim Thu-
nersee nie unter 80, beim Brienersee nie unter
64 ‰.

2. Außerordentlich klar kommt der polytrophe
Charakter des Rootsees in den Sauerstoffver-
hältnissen zum Ausdruck. (Uebersättigung in
der Produktionsschicht bis zu 158 ‰, vollstän-
diges Fehlen in der Tiefe während des ganzen
Jahres). Im Winter 1955/56 konnten wir fest-
stellen, daß auch die Tiefe mit Sauerstoff ver-
sorgt wurde (bis zu 30 ‰ Sättigung). A d a m
[?] fand am 6. Januar 1936 in 12 m Tiefe
2,70 und in 15 m Tiefe 1,13 mg O₂/l. Es
scheint also, daß der meromiktische Charakter
des Rootsees (siehe S. 40) nicht jeden Winter
dominiert.

Abb. 47



Prozentuale Sauerstoffsättigung 1953/54. Die Dar-
stellung enthält die Mittel aus den in verschiede-
nen Tiefen der Zehr- resp. Produktionsschicht ge-
fundenen Werte. Die Höhe der punktierten Flä-
chen veranschaulicht die Sättigungsdifferenz zwi-
schen Produktions- und Zehrschicht.

3. Dem Rootsee kommt der Murtensee bezüglich
des eutrophon Charakters am nächsten. Am
18. Oktober 1954 war der Sauerstoff unterhalb
25 m vollständig aufgezehrt, während wir un-
gefähr um die gleiche Zeit des Vorjahres in
22 m Tiefe noch eine Sättigung von 22,8 ‰
konstatierten. Leider unterließen wir es damals,
aus größerer Tiefe Proben zu entnehmen.

Odette Rivier [52] fand 1934/35 nie völligen Sauerstoffschwund in der Tiefe, und das Maximum der Sättigung lag in der Oberflächenschicht am 17. August 1934 bei 129 ‰ und am 23. August 1935 bei 127 ‰. Wir stellten Uebersättigungen bis zu 146 ‰ (10. Juni 1954) fest. Aus diesem Vergleich ergäbe sich eine deutliche Zunahme der Eutrophie in den letzten zwanzig Jahren. Doch genügen natürlich die vorliegenden Untersuchungen noch nicht, um endgültige Schlüsse zu ziehen.

4. Bieler- und Luganersee zeigen ähnliches Verhalten wie der Zürichsee. Dies beunruhigt einigermaßen. Zu bedenken ist allerdings, daß wir die Sauerstoffverhältnisse nur bis 80, vereinzelt bis 100 m Tiefe untersuchten. Zur Beruhigung sei erwähnt, daß der Bielersee zu jeder Zeit bis in unmittelbare Bodennähe noch ansehnliche Mengen Sauerstoff zeigte, während der Zürichsee in größter Tiefe fast sauerstofffrei bleibt. Nach Minder [41] beträgt die Sauerstoffmenge in diesem See unterhalb 130 m selten 1 cm³/l, meist aber weniger. Auch im Luganersee konnten wir im Frühjahr 1957 bis in die größte Tiefe noch beträchtlichen Sauerstoffvorrat feststellen. Tab. 17 zeigt die recht ähnlichen Sauerstoffverhältnisse der drei Seen.

Tab. 17

	Max. der O ₂ -Sättigung in der Produktions-schicht	Min. der O ₂ -Sättigung bis 80 m Tiefe	Differenz
Zürichsee	154,5 ‰	16,7 ‰	137,8 ‰
Luganersee	163,0 ‰	33,7 ‰	129,3 ‰
Bielersee	147,2 ‰	26,0 ‰	121,2 ‰

Vergleichen wir unsere Resultate bezüglich der Sauerstoffverhältnisse des Bielersees mit denjenigen Minders [42] aus den Jahren 1930/31 (Tab. 18):

Tab. 18

Sauerstoffsättigungswerte im Bielersee zur Zeit der Sommerstagnation.

Nach Minder (5. 9. 1930)			Nach unseren Untersuchungen (21. 10. 1954)		
Tiefe m	Temp. °C	Sättigung ‰	Tiefe m	Temp. °C	Sättigung ‰
5	18,1	111	0	15,0	118,2
10	16,9	97			
20	13,5	83	25	6,8	78,3
30	10,0	66	35	6,7	50,4
40	8,4	60			
46	7,5	60	75	6,2	26,0

Leider können die Angaben nur sehr bedingt verglichen werden (ungleiche Tiefen und verschiedene Zeitpunkte der Untersuchung).

Immerhin fällt der Unterschied im Sauerstoffdefizit des Hypolimnions im Jahre 1954 gegenüber 1930 auf. Die größere O₂-Zehrung kann nicht etwa allein durch den späteren Zeitpunkt der Untersuchung (21. 10. statt 5. 9.) erklärt werden. Denn auch die Analysen vom 12. 8. 54 ergaben wesentlich geringere Sauerstoffsättigung im ganzen Hypolimnion als Minder sie am 5. 9. 1930 fand (siehe Tab. 21).

Abschließend und zusammenfassend wagen wir, die untersuchten Seen bezüglich ihres Trophiegrades zu klassifizieren (Tab. 19).

Tab. 19. Klassifikation der untersuchten Seen bezüglich Trophiegrad.

	Prim. Trophie (aus Beckenform)	Sekund. Trophie (aus Nährstoffreichtum)	Trophiegrad aus Sauerstoff-schichtung
Brienzersee	oligotr.	oligotr.	oligotr.
Thunersee	oligotr.	oligotr.	oligotr.
Luganersee	oligotr.	mesotroph	mesotroph
Bielersee	eutroph	eutroph	mesotroph
Zürichsee	oligotr.	eutroph	eutroph
Murtensee	eutroph	eutroph	eutroph
Rootsee	eutroph	polytroph	poliotroph

Die Bezeichnung mesotroph bei Bieler- und Luganersee besagt, daß diese Gewässer eine Mittelstellung einnehmen. Deutlich oligotroph sind Brienzer- und Thunersee, deutlich eutroph (resp. polytroph) Murten- und Rootsee. Odette Rivier [52] bezeichnet den Murtensee als mesotroph, während der Bielersee von Minder [42] nach Planktonproduktion als oligotroph betrachtet wird. Als hemmenden Faktor für die biologischen Abläufe bezeichnet er die starke Wassertrübung infolge intensiver Durchflutung. Ueber einen Vergleich Zürichsee—Bielersee führt dieser Autor auf S. 143 aus:

«Und nun zur Erklärung dieser Eigenart. Wenn wir der späteren Behandlung der biologischen Verhältnisse etwas vorgreifen wollen, ist dies nicht allzu schwierig. Der Bielersee ist arm an autotrophem, d. i. Pflanzenplankton. Aber auch diese Planktonarmut in einer relativ konzentrierten Nährlösung, als welche das Wasser des Bielersees aufgefaßt werden muß, bedarf der Erklärung. Die Ursache liegt, wie wir später erfahren werden, in den Wassertrübungen. Das ist die primäre Veranlassung, daß im Bielersee eine Korrelation zwischen Chemismus und Planktongehalt nicht besteht.

Etwas ganz anderes finden wir beim Zürichsee, wo dieses hemmende Agens fehlt. Hier richtet sich die Planktonproduktion nach dem Mini-

mumfaktor, als welchen wir den Nitratsückstoff nachgewiesen haben. Die Planktonproduktion ist in einem solchen Falle mit Rücksicht auf die vorhandenen Pflanzennährstoffe eine maximale. Der Phytoplanktongehalt des Zürichsees dürfte etwa zehnmal höher sein als derjenige des Bielersees.»

Unsere Ausführungen über Sauerstoffverhältnisse und Trophiegrad der Seen bedürfen folgender Ergänzungen:

1. Sauerstoffzehrung kann auch durch allochthone, also seefremde, eingeschwemmte organische Substanzen bedingt sein. Dies ist zweifellos im Rootsee der Fall. A d a m [2] führt darüber aus:

«Der See ist oben und unten von einer starken Torfschicht begrenzt, die an sich schon viel organisches Material durch Uferauslaugung abzugeben imstande ist. Das ganze Nordufer dieses sehr langgestreckten Sees ist Kulturland und das Südufer in der Hauptsache Wald, dessen Laubfall im Herbst viel zersetzliches Material an die Uferzone des Sees und in das Wasser abgibt.»

Wir vermuten diesen Einfluß auch bei dem nach Morphometrie ausgesprochen oligotrophen Brienzensee (Sauerstoffsättigung im Hypolimnion bis 62 % sinkend, im Thunersee nur bis 80 %). Vereinzelt Bestimmungen des Kaliumpermanganatverbrauches ergaben Werte bis zu 8,8 für Oberflächenwasser des Brienzensees, während wir für den Thunersee den Maximalwert bei 6,5 fanden. Wahrscheinlich enthalten die ausgesprochen trüben Zuflüsse bei Hochwasser verhältnismäßig viel organische Substanzen.

2. Aber auch die Bodensedimente können als O₂-Zehrer ins Gewicht fallen. Dies gilt namentlich für kleine und flache Gewässer (z. B. Root- und Murtensee); denn ein kleiner See hat im Verhältnis zum Volumen eine größere Begrenzungsfläche als ein großer. T h o m a s [74] berechnete beispielsweise für den Greifensee ein Verhältnis von 1 : 0,68 für O₂-Zehrung des Jahressedimentes zur O₂-Zehrung im Hypolimnion bei Sommerstagnation (S. 448, Tab. 12) (vergleiche z. B. Sauerstoffkurve des Bielersees in Abb. 51).
3. Im oligotrophen «Fiolen» Südschwedens fand R o d h e [1] eine «eutrophe Sauerstoffkurve», die durch die morphometrischen Verhältnisse des Sees bedingt war (S. 186). Er schlägt deshalb vor, die Bezeichnungen «oligotroph» und «eutroph» für die Charakterisierung der Sauerstoffkurve durch «orthograd» und «klinograd»

zu ersetzen (S. 192); Kurven mit einem metalimnischen Maximum oder Minimum würden entsprechend «heterograd» genannt. In unserer Untersuchungsreihe stimmt, mit Ausnahme des Bielersees, der Befund über den Trophiegrad aus Nährstoffreichtum mit demjenigen aus der Sauerstoffkurve am Ende der Sommerstagnation überein. Der Bielersee bildet gewissermaßen das Gegenbeispiel zum oligotrophen «Fiolen» Südschwedens. («Mesotrophe» Sauerstoffkurve in einem eutrophen See). In seltenen Fällen versagt also die Sauerstoffkurve als Indikator für den Trophiezustand eines Gewässers. Die Ausnahmen bestätigen aber bekanntlich die Regel, und uns scheint es nicht ratsam, die bisher gebräuchlichen und im allgemeinen zutreffenden Bezeichnungen «oligotroph» und «eutroph» für die Charakterisierung der Sauerstoffkurve eines Gewässers aufzugeben. Das Wissen um die Möglichkeit der Abweichung bleibt auch hier das Wesentliche und macht eine Änderung der Bezeichnung überflüssig.

4. In zahlreichen Arbeiten wird darauf hingewiesen, daß sinngemäß nur die vorhandene Nährstoffmenge den Trophiegrad eines Sees bestimmt. Wir halten uns aber an die Definitionen von R o d h e [1] (S. 230):

«Die *Trophie* eines Sees bezeichnet die Intensität und Art seiner Versorgung mit organischer Substanz.»

«Die *Autotrophie* eines Sees bezeichnet die Intensität seiner totalen Eigenproduktion organischer Substanz.»

«Die *Allotrophie* eines Sees bezeichnet die Intensität der Zufuhr organischer Substanz aus seiner Umgebung.»

Trophie ist in diesem Fall das Ergebnis aus dem Zusammenspiel zahlreicher Faktoren wie Morphometrie, Hydrologie, Nährstoffreichtum und Klima eines Gewässers. Die Angaben in den ersten beiden Kolonnen der Tab. 19 möchten wir lediglich als vorläufige Feststellungen im Zusammentragen der einzelnen Trophiefaktoren betrachten. Entsprechend enthält Kolonne 3 erste Schlußfolgerungen aus den Sauerstoffkurven über den Trophiezustand der betreffenden Seen, vorläufig ohne in Auto- und Allotrophie zu unterteilen.

5. Zweifellos erlaubt der Grad der Sauerstoffübersättigung in der Produktionszone während der Stagnationsperiode, mit Sicherheit auf die Intensität der Eigenproduktion an organischer Substanz, also auf die Autotrophie eines Sees zu schließen. Eine Zusammenstellung der gefundenen Maximalwerte der Sauerstoffübersättigung (Anteil, der 100 % überschreitet) aus den Juni- und Augustuntersuchungen des Jahres 1954 zeigt folgende Reihenfolge:

	Max. der Übersättigung Juni 1954, %	Max. der Übersättigung August 1954, %	Mittel aus der Juni- und August- maxima, %
Rootsee	58,7	68,8	63,7
Murtensee	46,1	35,6	40,8
Zürichsee	54,5	26,8	40,6
Luganersee	16,5	63,0	39,7
Bielsee	47,2	10,4	28,8
Thunersee	7,4	6,1	7,0
Brienzersee	12,7	1,1	6,9

Der Befund bez. Autrophiegrad deckt sich mit den Angaben in Kol. 3 der Tab. 19.

Der verhältnismäßig hohe Grad der Sauerstoffübersättigung im mesotrophen Luganersee läßt sich durch die wesentlich höhere Temperatur dieses Sees gegenüber den Seen der Alpennordseite erklären (erhöhte Reaktionsgeschwindigkeit bei allen Stoffwechselfvorgängen). Das Beispiel zeigt den Einfluß des Klimafaktors auf die «Trophie» eines Sees. Entsprechend fand Rodhe [1] im Oberflächenwasser der viel nördlicher gelegenen südschwedischen Seen im Maximum nur 122,9 % Sauerstoffsättigung (Vaxjösjön 1. 8. 1938) bzw. 99 % (Fiolen 10. 8. 1938).

Tab. 17

Temperatur, Sauerstoffgehalt, Sauerstoffsättigung und Karbonathärte im Brienzersee

Datum	Tiefe m	Temp. °C	O ₂ cm ³ /l	% der Sättig.	Härte f°
6. 8. 1953	0	16,7	5,05	78,3	6,9
	4	12,8	5,65	80,8	7,0
	23	7,3	5,40	67,7	
	50	5,0	5,45	64,7	8,65
11. 10. 1953	0	16,1	4,90	75,2	6,60
	15	10,3	5,22	70,5	6,22
	30	7,5	7,40	93,4	7,10
	50	5,2	5,70	67,9	7,75
2. 1. 1954	0	5,1	7,95	94,5	6,87
	30	5,0	7,90	93,8	6,81
	70	5,0	7,92	93,9	6,62
12. 4. 1954	0	7,8	8,00	101,7	7,31
	4	5,6	9,40	110,2	7,44
	20	5,3	9,08	108,5	7,19
	60	5,2	7,55	90,1	7,10
	80	5,0	7,85	93,2	7,44
19. 6. 1954	0	15,3	7,48	112,7	7,10
	5	12,1	7,33	103,4	
	10	9,7	7,87	104,8	7,50
	15	7,3	7,40	92,9	
	30	5,9	7,25	88,0	7,35
	80	5,0	7,55	89,6	7,55
19. 8. 1954	0	17,1	6,47	101,1	6,06
	5	14,0	6,77	99,3	6,54
	10	11,8	6,43	89,8	6,60
	20	9,7	7,05	93,9	
	30	5,5	6,83	82,0	7,30
	100	4,8	6,57	78,0	7,30
6. 10. 1954	0	12,9	6,73	96,4	6,08
	7	12,2	6,97	98,3	6,54
	27,5	7,7	6,30	79,8	6,45
	40	5,4	6,50	77,8	7,07
	100	4,8	6,57	77,6	7,20

Tab. 18

Temperatur, Sauerstoffgehalt, Sauerstoffsättigung und Karbonathärte im Thunersee.

Datum	Tiefe m	Temp. °C	O ₂ cm ³ /l	% der Sättig.	Härte f°
11. 8. 1953	0	17,4	6,93	109,2	
	10	14,6	7,20	106,6	
	25	9,3	6,57	86,7	
	60	5,0	6,93	82,3	
12. 10. 1953	0	13,5	6,48	94,0	9,10
	18	13,2	6,52	94,0	9,45
	35	6,1	6,61	80,7	10,05
	80	4,9	6,91	81,8	10,35
6. 1. 1954	0	4,0	7,39	85,5	9,50
	30	4,0	7,92	91,5	9,75
	80	4,0	6,83	79,0	10,87
21. 2. 1954	0	4,0	8,61	99,7	9,45
	30	4,0	8,61	99,7	9,50
	80	4,7	7,40	87,2	10,55
31. 3. 1954	0	5,7	8,32	100,3	9,50
	20	5,6	8,35	100,5	9,85
	80	4,5	8,37	98,1	10,85
17. 6. 1954	0	15,2	7,14	107,4	9,75
	15	11,0	7,48	102,5	9,90
	35	5,6	7,21	86,1	11,00
	80	4,5	6,73	78,9	10,80
22. 8. 1954	0	18,0	6,67	106,1	8,60
	7	16,8	6,50	101,0	
	18	14,2	5,33	78,4	9,00
	35	6,1	6,72	82,0	10,35
	80	4,5	6,52	77,3	10,50
2. 10. 1954	0	13,8	6,34	92,7	8,55
	24	13,6	6,90	100,1	9,60
	28	9,2			
	35	6,0	6,77	82,3	10,40
	80	5,0	6,77	80,3	10,35

Tab. 19

Temperatur, Sauerstoffgehalt, Sauerstoffsättigung und Karbonathärte im Rootsee

Datum	Tiefe m	Temp. °C	O ₂ cm ³ /l	% der Sättig.	Härte f°
5. 10. 1953	0	15,8	6,22	93,0	8,65
	6	14,5	2,45	35,8	9,55
	10	6,3	0,0		16,55
	15	5,75	0,0		21,55
1. 1. 1954	0	3,8	3,09	34,8	12,40
	5	3,8	2,54	27,7	12,50
	15	5,4	0,0		22,70
10. 4. 1954	0	7,5	7,80	96,8	11,45
	5	7,0	3,54	42,3	11,55
	10	5,4	0,0		13,30
	15	5,15	0,0		14,55
8. 6. 1954	0	20,0	9,76	158,7	9,45
	4	12,4	1,48	20,5	11,95
	9	7,0	0,23	2,8	13,50
	15	6,45	0,0		14,30
6. 8. 1954	0	24,5	7,83	138,5	6,60
	2	22,3	9,92	168,8	
	5	11,5	0,0		15,67
	8	7,4			16,28
	15	6,45			21,35
15. 10. 1954	0	13,7	5,13	73,3	10,00
	5	12,2	5,42	75,3	9,65
	10	7,1	0,0		14,70
					17,70
	15	6,7			20,35

Tab. 20

Temperatur, Sauerstoffgehalt, Sauerstoffsättigung und Karbonathärte im Murtensee

Datum	Tiefe m	Temp. °C	O ₂ cm ³ /l	% der Sättig.	Härte f°
3. 8. 1953	0	20,4	6,80	112,1	
	6	18,9	5,09	81,5	
	18	8,5	2,51	32,0	
	30	6,8	2,92	35,7	
15. 10. 1953	0	13,0	6,90	97,5	11,30
	14	13,0	6,12	86,5	11,60
	18	7,7	3,50	43,8	15,80
	22	6,9	3,50	42,8	14,05
19. 1. 1954	0	3,75	6,32	71,3	17,55
	10	3,80	6,51	69,7	17,45
	25	3,85	6,08	69,0	17,55
12. 4. 1954	0	6,2	9,85	118,5	17,50
	3	5,6	8,85	105,1	18,70
	7	5,1	9,57	112,0	18,35
	30	5,0	7,92	92,6	19,90
10. 6. 1954	0	19,3	7,95	128,1	14,50
	5	18,4	9,23	146,1	14,60
	10	9,9	7,30	96,2	18,00
	20	8,5	7,48	95,4	20,30
12. 8. 1954	0	20,0	6,40	104,0	12,55
	4	18,9	8,84	135,6	12,55
	10	15,5	3,77	61,0	14,65
	18	9,6	1,74	22,8	17,25
	30	6,7	1,93	23,6	17,45
18. 10. 1954	0	15,0	6,63	97,7	14,90
	11	13,3	5,75	79,4	15,75
	18,5	12,4	0,34	4,7	17,02
	25	6,7	0,34	0,0	17,80
	35	6,7			19,30

Tab. 21

Temperatur, Sauerstoffgehalt, Sauerstoffsättigung und Karbonathärte im Bielersee

Datum	Tiefe m	Temp. °C	O ₂ cm ³ /l	% der Sättig.	Härte f°
3. 8. 1953	0	19,4	4,46	72,0	
	12	17,3	4,41	68,3	
	23	8,8	3,71	47,7	
	30	6,8	4,15	50,8	
16. 10. 1953	0	13,1	7,12	100,8	11,2
	18	12,5	5,50	76,8	11,65
	27	8,0	4,10	52,3	13,85
	35	7,5	3,72	46,3	14,05
17. 1. 1954	0	4,2	7,54	87,3	13,45
	25	4,2	6,85	78,6	14,25
13. 4. 1954	0	6,6			13,75
	5	6,4	10,20	121,0	14,10
	15	6,3	9,72	117,3	13,95
	30	5,3	8,10	95,6	14,15
10. 6. 1954	0	17,0	9,60	147,2	11,60
	10	13,2	7,42	105,2	12,00
	25	8,7	6,25	80,2	13,60
	70	6,2	4,12	49,7	14,10
12. 8. 1954	0	17,6	7,10	110,4	11,40
	14	16,8	5,70	87,3	11,60
	18	11,0	4,18	56,5	13,50
	30	7,7	4,24	53,0	13,85
21. 10. 1954	0	15,0	8,03	118,2	12,65
	25	6,8	6,40	78,3	12,85
	35	6,7	4,13	50,4	13,40
	75	6,2	2,16	26,0	14,40

Tab. 22

Temperatur, Sauerstoffgehalt, Sauerstoffsättigung und Karbonathärte im Luganersee

Datum	Tiefe m	Temp. °C	cm ³ /l O ₂	% der Sättig.	Härte f°
8. 8. 1953	0	21,9	5,94	98,4	
	6	21,0	5,40	88,0	
	19	8,4	2,53	31,4	
	70	5,5	2,91	33,7	
2. 10. 1953	0	20,6	6,37	104,4	10,70
	15	17,0	3,27	49,2	10,70
	22	7,7	3,11	38,1	12,50
	50	5,4	4,68	54,0	12,30
24. 12. 1953	0	9,2	5,60	71,2	11,35
	20	9,2	5,17	65,7	11,50
	30	7,0	3,33	40,0	13,15
	100	5,6	3,60	41,8	12,40
2. 4. 1954	0	9,7	7,77	99,8	11,50
	7	6,1	6,64	78,2	11,55
	20	5,5	6,25	72,5	11,45
	80	5,3	4,51	52,0	11,40
7. 6. 1954	0	18,3	6,90	106,5	10,65
	4	17,8	7,70	116,5	10,70
	20	8,8	6,38	80,3	11,60
	80	5,4	4,30	49,7	12,40
2. 8. 1954	0	22,5	9,76	163,0	
	4	21,6	8,63	142,1	8,80
	10	16,2	6,42	95,0	10,10
	20	9,7	5,18	66,6	11,10
12. 10. 1954	0	16,4	6,26	93,0	8,00
	9	16,3	6,67	99,0	8,85
	18	10,9	2,82	37,2	10,95
	30	6,4	4,08	48,5	10,80
70	5,5	4,37	39,4	11,20	

Tab. 23

Temperatur, Sauerstoffgehalt, Sauerstoffsättigung und Karbonathärte im Zürichsee

Datum	Tiefe m	Temp. °C	O ₂ cm ³ /l	% der Sättig.	Härte f°
8. 10. 1953	0	16,1	6,10	91,5	10,30
	11	15,7	5,68	84,7	10,30
	15	8,1	2,26	32,9	12,40
	50	4,3	4,45	50,8	13,10
29. 12. 1953	0	6,2	5,60	67,1	11,85
	30	5,6	3,16	42,7	13,00
	70	4,2	3,42	38,9	13,10
9. 4. 1954	0	4,8	7,11	82,2	12,35
	20	4,7	6,87	79,1	12,65
	60	4,5	5,77	66,3	13,90
	115	4,2	3,30	37,6	
11. 6. 1954	0	16,5	10,22	154,5	11,40
	6	15,2	9,90	145,5	11,95
	12	7,4	6,93	85,5	13,30
	80	4,2	4,88	55,6	13,45
5. 8. 1954	0	21,8	7,55	126,8	10,45
	5	19,8	7,20	116,5	10,35
	12	10,6	4,16	55,3	12,30
	20	6,0	4,25	50,7	12,30
	60	4,8	5,48	82,4	12,20
14. 10. 1954	0	13,8	6,72	96,0	11,40
	9	13,6			11,65
	16	10,6	2,41	32,1	12,10
	30	6,2	3,34	40,0	
	70	4,4	1,46	16,7	

E. Karbonathärte

Die Photosynthese der Pflanzen verläuft nach folgender Formel (unter Ausnützung der Lichtenergie):



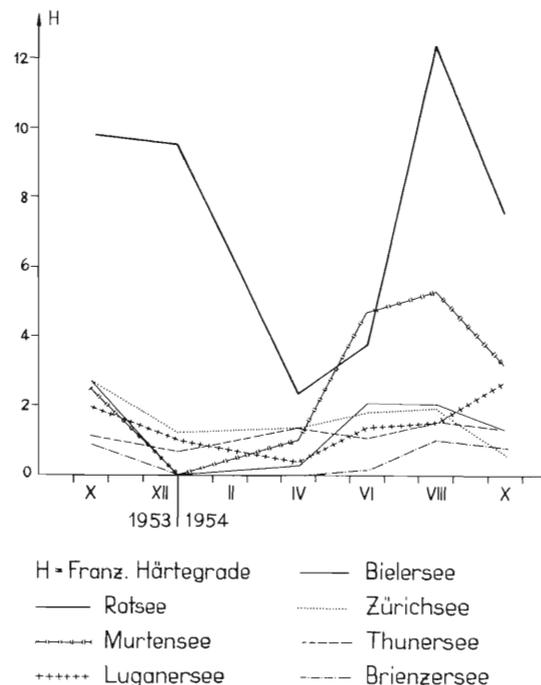
Es muß dem Wasser also CO₂ entzogen werden. Um Bikarbonat in Lösung zu halten, ist je nach Konzentration, ein bestimmtes Quantum freie zugehörige Kohlensäure notwendig. Wird nach Aufbrauch der überschüssigen, der sogenannten aggressiven Kohlensäure, die zugehörige oder Gleichgewichtskohlensäure angegriffen, so muß, weil das Lösungsgleichgewicht gestört wird, Ca CO₃ ausfallen. Dieser Vorgang wird nach Minder, der diese Zusammenhänge im Zürichsee zuerst eingehend untersucht hat, als «Biogene Entkalkung» bezeichnet.

Bezüglich eingehender Orientierung verweisen wir auf Ruttner [55] (S. 57—67) und Minder [40].

Für unsere Betrachtungen ist lediglich wichtig, daß bei intensiver biologischer Tätigkeit in der trophogenen Schicht Kalk ausfällt, in die Tiefe sinkt und bei Vorhandensein von aggressiver Kohlensäure im Tropholytikum wieder gelöst, andernfalls aber sedimentiert wird. Dadurch muß sich ein vertikales Konzentrationsgefälle bezüglich Kalziumbikarbonat ergeben, das um so ausgeprägter ist, je länger die Stagnation dauert und je intensiver die biologische Produktion verläuft.

Abb. 48

Härtedifferenz Hypolimnion – Epilimnion



Tab. 24

Chemische und bakteriologische Untersuchungen von Wasserproben aus dem Thunersee, ausgeführt durch das Kantonale Chemische Laboratorium in Bern

Datum	Standort	Tiefe m	Trocken- rückstand mg/l	Glüh- rückstand mg/l	Oxidier- barkeit	Organ. Stoffe mg/l	Chloride als Chlor mg/l	Sulfate mg/l	Nitrate mg/l	Nitrite	Ammoniak- frei mg/l	Ammoniak- albumin. mg/l	Gesamt- härte f°	Calcium- härte f°	Eisen mg/l	Mangan	¹ Keim- gehalt	² Filtrate		³ Glas u. Trübg.	⁴ Coli
																		a	b		
12. 10. 1953	I	0	136	102	4,0	20,0	0,2	14	1,3	neg.	0,075	0,049	11,0	9,1	0,035	neg.	50			pos.	neg.
		18	138	122	4,4	22,0	0,2	15	1,6	neg.	0,019	0,009	11,2	9,4	0,085	Spur	27			pos.	pos.
		35	176	163	3,3	16,5	0,4	39	2,5	neg.	0,016	0,048	14,2	11,5	0,115	Spur	15			neg.	neg.
		80	189	164	3,1	15,5	0,7	20	2,5	neg.	0,004	0,017	14,2	11,7	0,060	neg.	144			pos.	pos.
6. 1. 1954	I	0	137	130	3,4	17,0	0,4	32	2,3	neg.	0,004	0,031	13,9	10,9	0,070	neg.	7			pos.	neg.
		80	167	157	2,8	14,0	0,3	34	2,1	neg.	0,007	0,016	14,5	12,0	0,060	neg.	1			pos.	pos.
	II	0	149	134	3,35	16,75	0,1	27	2,6	neg.	0,033	0,029	13,7	10,9	0,090	neg.	9			pos.	pos.
		80	188	178	5,8	29,0	0,1	43	2,4	pos.	0,002	0,001	16,4	12,8	0,090	neg.	8			pos.	pos.
	III	0	162	145	3,7	18,5	0,1	34	2,5	neg.	—	—	13,4	11,3	0,050	neg.	20			pos.	neg.
		40	162	155	3,4	17,0	0,1	27	2,2	neg.	0,001	0,030	13,2	11,1	0,060	neg.	33			pos.	pos.
31. 3. 1954	I	0	164	145	3,2	16,0	0,4	22	3,2	neg.	0,139	0,033	13,6	10,9	neg.	neg.	117			neg.	neg.
		18	157	150	3,3	16,5	0,4	24	4,4	neg.	0,027	0,066	13,7	10,9	neg.	neg.	9			pos.	pos.
		35	172	160	3,2	16,0	0,4	21	2,5	neg.	0,039	0,032	13,2	11,1	neg.	neg.	9			neg.	neg.
		80	172	168	3,5	17,5	0,4	26	2,6	neg.	0,004	0,006	14,0	11,2	neg.	neg.	10			neg.	neg.
17. 6. 1954	I	0	159	138	6,5	32,5	0,8	17,0	3,4	neg.	0,110	0,091	12,2	10,2			200			neg.	neg.
		15	162	131	5,0	25,0	1,4	7,0	2,1	neg.	0,109	0,002	12,4	10,2			260			pos.	pos.
		35	182	154	5,6	28,0	1,0	27,0	2,1	neg.	0,026	0,027	12,0	11,6			160			pos.	pos.
		80	188	161	4,0	20,0	1,0	28,0	2,2	neg.	0,051	0,055	14,1	10,6			740			pos.	pos.
26. 8. 1954	I	0	145	142	4,0	20,0	0,4	23,8	1,4	Spur	0,121	0,059	11,4	9,7	neg.	neg.	210	8	300	pos.	pos.
		18	182	168	4,9	24,5	0,6	29,3	1,7	Spur	0,156	0,098	14,1	12,0	neg.	neg.	570	—	1000	pos.	pos.
		35	182	174	4,5	22,5	0,3	36,5	2,5	—	0,159	0,063	14,2	12,1	neg.	neg.	157	47	190	pos.	pos.
		80	188	152	4,3	21,5	0,4	37,2	2,3	—	0,134	0,072	14,4	12,4	neg.	neg.	182	27	550	neg.	pos.
	II	0	149	141	3,8	19,0	0,4	25,0	1,4	Spur	0,100	0,076	11,4	9,9	neg.	neg.	176	1	12	neg.	pos.
		18	190	180	5,5	27,5	0,3	29,3	1,9	schwach	0,061	0,080	14,0	11,7	neg.	neg.	625	35	190	pos.	pos.
		35	183	153	4,0	20,0	0,6	31,1	2,3	—	0,088	0,059	14,0	12,0	neg.	neg.	235	—	560	neg.	pos.
		70	184	139	4,0	20,0	0,3	29,5	2,2	—	0,128	0,047	14,3	12,3	neg.	neg.	160	9	375	pos.	pos.
	III	0	151	148	4,6	23,0	0,5	25,0	1,6	Spur	0,028	0,067	11,3	9,3	neg.	neg.	123	6	100	neg.	pos.
		9	140	138	6,0	30,0	0,4	26,2	1,5	Spur	0,095	0,059	11,5	9,8	neg.	neg.	175	6	200	neg.	pos.
		18	170	113	4,6	23,0	0,4	26,8	2,0	schwach	0,060	0,047	13,2	11,3	neg.	neg.	200	45	137	pos.	pos.
		35	182	160	4,1	20,5	0,5	26,2	2,3	—	0,161	0,073	14,1	12,0	neg.	neg.	122	12	210	pos.	pos.
21. 10. 1954	I	0	157	150	3,0	15,0	0,4	6,0	1,25	schwach	0,038	0,052	12,2		0,015	neg.	660	27	270	pos.	
		23	177	177	3,3	16,5	0,4	9,0	1,6	stark	0,024	0,043	14,5		0,025	neg.	560	9	380	pos.	
		40	175	174	2,7	13,5	0,5	6,0	2,3	Spur	0,008	0,046	14,0		0,020		680	2	23	pos.	
		100	184	169	2,4	12,0	0,5	9,0	2,3	neg.	0,027	0,031	14,4		0,025	neg.	8200	4	14	pos.	

¹ Keimgehalt = durchschnittlicher Keimgehalt in 1 cm³ Wasser nach 5 Tagen.² Filtrate a = Escherichia-Coli in 100 cm³
b = Thermophile Keime in 100 cm³.³ Gärprobe in 20 cm³ Wasser in Milchzucker-Ricinoleat-Formiatbouillon bei 37 °.⁴ Coli = Endo-Agar und Escherichia Coli.

Die Resultate unserer Härtebestimmungen sind, zusammen mit den Sauerstoffzahlen, in Tab. 17 bis 23 zu finden. Der jahreszeitliche Verlauf der Härte­differenz zwischen Produktions- und Zehr­schicht wurde in Abb. 48 graphisch aufgetragen. Die Darstellung zeigt nichts Neues bezüglich Produktion und deckt sich verblüffend gut mit der Darstellung der Sauerstoffsättigungsdifferenzen zwischen Epi- und Hypolimnion in Abb. 47.

Wir können drei Gruppen unterscheiden:

1. Root- und Murtensee mit maximalen Differenzen von 12,5 und 5,3 f° (franz. Härtegraden).
2. Luganer-, Bieler- und Zürichsee mit maximalen Differenzen von 2,7, 2,1 und 1,9 f°.
3. Thuner- und Brienersee mit Differenzmaxima von 1,5 und 1,0 f°.

Es muß berücksichtigt werden, daß Härte­differenzen natürlich auch die Folge vermehrter Durchflutung sein können. So werden die durch Schneeschmelze verursachten Hochwasser verhältnismäßig wenig gelöste Stoffe führen, da sie oberflächlich und rasch abfließen und deshalb nur wenig Mineralsalze aus dem Untergrund zu lösen vermögen. Wie wir gesehen haben (S. 72), schichtet sich das Wasser der Zuflüsse während des Sommers meist am Grunde der Produktionsschicht ein, weil es hier korrespondierende Dichte vorfindet. Dadurch wird der Elektrolytgehalt dieser Schicht gewissermaßen verdünnt und die Konzentrations­differenz zwischen trophogener und tropholytischer Zone vergrößert. Wir vermuten, daß dieser Einfluß vor allem in Bieler- und Thunersee zur Gelung kommt.

F. Chemische und bakteriologische Untersuchungen von Thunerseewasserproben

Von Oktober 1953 bis Oktober 1954 wurden im Auftrag der Licht- und Wasserwerke Thun und des Wasserrechtsamtes des Kantons Bern zusätzliche Analysen von Wasserproben aus dem Thunersee durchgeführt. Die Proben wurden von uns geschöpft und dem Kantonalen chemischen Laboratorium in Bern zur Untersuchung übergeben. Geschöpft wurde mit der auf S. 58 beschriebenen Schöpf­flasche. Die zwei oberen Schöpfproben entstammen dem jeweiligen Epilimnion, die zwei unteren dem Hypolimnion. Bei Homothermie (6.1.54) begnügten wir uns mit je einer Oberflächen- und einer Tiefenprobe pro Standort. Standort I befindet sich 600 m südlich der Schiffstation Hilterfingen, Standort II 600 m nordöstlich der Kandermündung und Standort III 700 m östlich Strandbad Thun.

Die Angaben betr. Sauerstoff und Karbonathärte wurden im vorangehenden Abschnitt mit denjenigen anderer Seen verglichen. Die übrigen Untersuchungsergebnisse finden sich in Tab. 24 zusammengestellt. Da es sich nur um Proben aus dem Thunersee handelt und weil unsere Untersuchung vergleichender Art ist, verzichten wir auf eine Diskussion. Wir glauben aber, daß die genannten Analysen wertvolle Anhaltspunkte zu weiteren Untersuchungen (z. B. für Trinkwasserentnahme aus dem See) liefern können. Dem Kantonschemiker, Herrn Dr. Jahn, der für die Richtigkeit der Angaben verantwortlich ist, danken wir an dieser Stelle für sein Verständnis und die zusätzliche Arbeitsleistung seines Institutes.

V. KORRELATION VON THERMISCHER, OPTISCHER UND CHEMISCHER SCHICHTUNG

A. Allgemeines

Als Ergänzung und gleichzeitig Zusammenfassung betrachten wir zum Schluß die funktionellen Beziehungen zwischen Thermik, Optik und Chemismus, soweit sie sich in der Stratifikation äußern. Jede stabile Schichtung von Wassermassen beruht auf Dichtezunahme nach der Tiefe. Diese kann durch Konzentrations- oder Temperaturdifferenzen bedingt sein, wobei sich beide Faktoren gegenseitig verstärken, abschwächen oder aufheben können. Ueber konzentrationsbedingte Dichteschichtung liegen ausführliche, leider teilweise noch unveröffentlichte Berechnungen und Tabellen von Berger

vor. Im weiteren verweisen wir auf Ruttner [55] S. 36. Wir befassen uns im folgenden nur mit der temperaturbedingten Dichteschichtung (über konzentrationsbedingte Schichtung im Rootsee siehe S. 41). Optische, biologische und Sauerstoffschichtungen können als sekundäre bezeichnet werden, da sie auf der turbulenzhemmenden Wirkung der Temperaturgefälle beruhen. Denn indem der Austausch zwischen den verschiedenen Schichten unterbunden wird, die Milieufaktoren (z. B. Licht) mit der Tiefe aber variieren, muß jedes Niveau einen spezifischen, biologischen Ablauf zeigen, der sich in Konzentrationsunterschieden verschiedener Stoffe ausprägen wird.

B. Meßgeräte

1. Ueber Temperaturmessung wurde S. 31 und über Sauerstoffbestimmung mit dem elektrischen Sauerstofflot S. 59 orientiert.

Die Tageslichtmessungen vermögen wohl Aufschluß über den einer bestimmten Tiefe zukommenden Lichtgenuß sowie über die durchschnittliche Strahlungsdurchlässigkeit einer Wassermasse zu geben. Bezüglich Ermittlung der Transmissionsdifferenzen der einzelnen Meter-schichten konnten sie unsere Erwartungen nicht erfüllen. Dies war der Anstoß zur Konstruktion des im folgenden beschriebenen Transmissionsmessers (Abb. 49).

Das Licht einer 6-Watt-Lampe L_1 durchläuft eine Strecke von 50 cm und trifft dann, durch Extinktion in der durchlaufenen Wasserschicht mehr oder weniger geschwächt, auf die Sperrschichtphotozelle P_1 . Der Photostrom gelangt von P_1 zum Ablesinstrument M_1 . Durch ein Abschirmgehäuse aus Holz wird die optische Einrichtung von L_1 bis P_1 gegen Tageslicht abgeschlossen. Beim Hinunterlassen des Gerätes öffnen sich infolge des Wasserwiderstandes die beiden im Querschnitt in Abb. 49 ersichtlichen Deckel, und das Wasser kann ungehindert durchströmen. In Ruhelage schließen die Deckel durch ihr Eigengewicht. Die Lampe L_1 wird durch einen Akkumulator B gespeist, wo-

bei der Strom gleichzeitig die Kontrolllampe L_2 (Serieschaltung) durchlaufen muß. Deren Licht fällt via Dämpfungsfiler F_2 auf die Sperrschichtzelle P_2 . Der Photostrom aus P_2 wird am Ablesinstrument M_2 fortlaufend kontrolliert. Jede noch so kleine Schwankung des Stromes wird, wenn sie die Lichtintensität in L_1 zu verändern vermag, sich auch via L_2 , P_2 , M_2 bemerkbar machen und kann durch ein Präzisionspotentiometer ausreguliert werden. Diese Art der Kontrolle wurde von uns gewählt, nachdem wir feststellen konnten, daß oft kleine Stromschwankungen an einem in Serie geschalteten Ampèremeter noch nicht bemerkt wurden, trotzdem sie bereits eine Schwankung der Lichtintensität zur Folge hatten. F_1 bezeichnet ein Schottfarbfilter, das ausgewechselt werden kann. Meist arbeiteten wir aber ohne Filter.

C. Diskussion der Ergebnisse

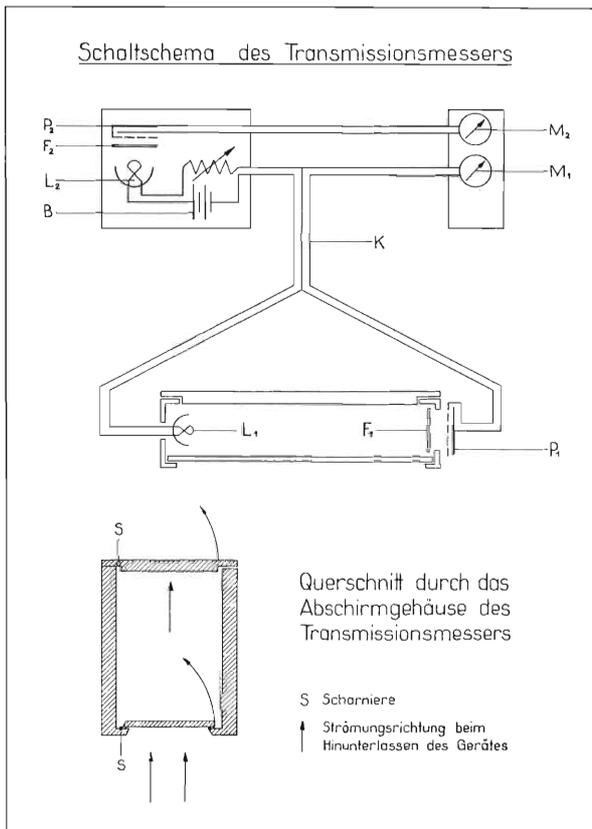
Die Grundlage unserer Diskussion bilden die Abb. 50 bis 57. Sie zeigen für jeden See den Verlauf von Temperatur-, Durchsichtigkeits- (mit Ausnahme des Thunersees) und Sauerstoffkurve bei Sommerstagnation 1955. In die Abbildungen wurden außerdem die gleichzeitig bestimmten Unterlichtwerte (in Prozenten des Oberlichts) eingetragen und geben die prozentuale Durchlässigkeit im Verhältnis zur Strahlungsdurchlässigkeit in Luft an.

Wie den Ausführungen auf S. 10 zu entnehmen ist, weisen Transmissionsunterschiede auf Unterschiede in Art und Menge der gelösten und suspendierten Stoffe hin. R o d h e [1] führte an süd-schwedischen Seen ausgedehnte Untersuchungen über Farbschichtung durch. Die Farbe geschöpfter Wasserproben wurde anhand von Vergleichslösungen (Img Pt) ermittelt. Ueber die Genese der Farbschichtung führt der Autor aus:

«Durch die Sedimentation von abgestorbenen Planktonorganismen, allochthonem Detritus u. dgl. werden organische Stoffe dem Tiefenwasser zugeführt und dort sowie im Sediment unter Bildung dunkelfarbiger kolloidal löslicher Substanzen weiter abgebaut. Falls sich die sedimentierenden Partikel im Metalimnion ansammeln, kann dort ein ausgeprägtes Farbmaximum entstehen. — Bei dem Mineralisationsprozeß freigewordene Fe- und Mn-Verbindungen gehen ebenfalls in das Tiefenwasser über und spielen manchmal bei den hier berührten Farbschichtungen eine überragende Rolle.»

Wir verweisen auf die weitem interessanten Ausführungen über Farbschichtung bei R o d h e [1], glauben aber, daß für die optische Schichtung in unseren Schweizerseen weniger Färbungen durch gelöste Substanzen als vielmehr Suspensionen ausschlaggebend sind. Eindeutig läßt sich diese Be-

Abb. 49



hauptung für den Brienzersee anhand von Abb. 50 belegen. Das in der Abbildung ersichtliche Transparenzminimum in 23 m Tiefe ist zweifellos der Einschichtung von Flußtrübe durch die Aare zuzuschreiben. Denn bekanntlich schiebt sich das zufließende Wasser in jener Tiefe eines Sees ein, in der gleiche Dichte vorherrscht. Um die horizontale Ausbreitung der durch die Aare gebildeten optischen Filterschicht abzutasten, führten wir an den folgenden Tagen Transparenzmessungen bis in die Nähe von Bönigen durch. Diese ergaben:

- Die Trübungsschicht hält sich bis Höhe Niederried in konstanter Tiefe von 23 m, wobei die Trübungspartikel sich sowohl nach oben wie nach unten allmählich verteilen. Dadurch nimmt die Transparenz im Gebiet der stärksten Extinktion von 2 bis 25 % zu, in Oberflächennähe aber von 41 auf 38 % ab. Auf Höhe Hauetenbachmündung zeigt sich wahrscheinlich bereits der Einfluß des Lüttschinerwassers, wodurch die Transmissionskurve unruhig und unklar wird. Wir vermuten, daß das Extinktionsmaximum in 33 m Tiefe durch die bei Bönigen zufließende Lüttschine verursacht wird. Leider erzwangen die Witterungsverhältnisse die Einstellung der Untersuchungen.

- Interessant ist die deutliche Dreiteilung der optischen Schichtung 300 m vor der Aaremündung entsprechend einer thermischen aber etwas tiefer liegenden Dreiteilung im Gebiet der «Sprungschicht».

Ferner verwundert, daß die Trübungspartikel, statt langsam abzusinken, sich gleichmäßig nach oben und unten verteilen. Denn zweifellos sind die eingeschwemmten Stoffe 2 bis 3mal so schwer wie Wasser und müßten nach folgender Formel (Ostwald'sche Formel) absinken:

$$\text{Sinkgeschwindigkeit} = \frac{\text{Übergewicht}}{\text{Viskosität} \cdot \text{Formwiderstand}}$$

Dies ist die für beliebig geformte Körper ab-

geänderte Stokes'sche Formel. Unter dem Uebergewicht ist die Differenz der spez. Gewichte des Körpers und des Wassers gemeint. Unter «Formwiderstand» fällt hier auch die Größe des Teilchens. Je kleiner dieses, um so größer ist seine relative Oberfläche (im Verhältnis zum Volumen) und um so größer wird deshalb die relative Reibung an den Wassermolekülen sein. Die Tatsache, daß belebte und unbelebte Suspensionen im Gebiete ausgeprägter Temperatursprünge sehr lange verweilen, sogenannte Trübungsschirme bildend, ist längst bekannt. Gessner [23] sagt darüber auf S. 400:

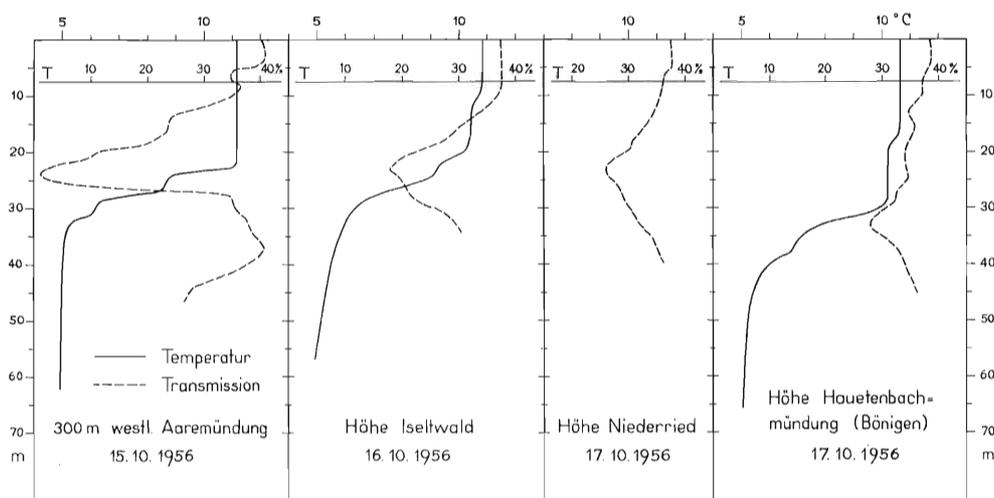
«Derartige Trübungsschirme wurden seither im Meere immer wieder beobachtet, so von W a t t e n b e r g und J o s e p h (1944) in der westlichen Ostsee und in neuester Zeit (1954) von K r e y in der Nordsee. Hier ergab die optische und die biologische Untersuchung auf einer Forschungsfahrt im August 1952 zwischen 30 und 40 m, ebenfalls im Bereich der Sprungschicht, das Vorhandensein eines ausgedehnten Trübungsschirms, der sowohl von Planktern als auch von unbelebtem Seston gebildet wurde.»

Auf S. 398 lesen wir ferner:

«Nun ist es ja eine allgemein bekannte Tatsache, daß bewegtes Wasser feste Teilchen länger in Schwebelage halten kann, als ruhendes, sofern die Teilchen klein sind, und infolgedessen an und für sich schon geringe Sinkgeschwindigkeit besitzen.»

Gessner macht dann die erhöhte Turbulenz in Temperaturgrenzschichten, die durch das Uebereinanderweggleiten der verschiedenen temperierten Wasserkörper entsteht, für das Verweilen der Suspensionen in diesem Bezirk verantwortlich.

Abb. 50



Wir glauben aber, daß Turbulenz im allgemeinen an der Secoberfläche ihren Ausgang nimmt und daß sich die durch Windarbeit erzeugten Turbulenzelemente nach der Tiefe zu fortpflanzen bis ihre Bewegungsenergie aufgezehrt ist. Dies ist normalerweise erst im Gebiet eines Temperaturgefälles der Fall, weil hier zu den Verlusten an Bewegungsenergie durch innere Reibung die viel größeren Verluste infolge Arbeitsleistung beim Emporheben von kälterem und deshalb schwererem Wasser gegenüber absinkendem, leichterem hinzukommt. (Siehe hierüber S. 44.) Aus diesem Grunde ist ja bekanntlich auch der Austausch in einer bestimmten Wassertiefe dem dort herrschenden Dichtegefälle indirekt proportional. Wäre die Turbulenz allein für die Verminderung der Absinkgeschwindigkeit verantwortlich, so müßten die Schwebeteilchen zweifellos oberhalb der Sprungschicht langsamer absinken als in derselben. Wir werden im folgenden zu begründen versuchen, daß nicht Turbulenz an sich Teilchen, die schwerer als Wasser sind, in Schwebelage halten vermag, sondern daß dies nur dort der Fall ist, wo Turbulenz im Gebiet eines Dichtegefälles wirkt.

Folgende Zusammenhänge scheinen uns wahrscheinlich: Die Viskosität des Wassers nimmt mit steigender Temperatur ab und beträgt beispielsweise bei 25° C nur noch die Hälfte derjenigen bei 0° C. Findet nun turbulente Bewegung im Grenzgebiet verschieden temperierter Wassermassen statt, so besitzen die Wasserteilchen oder -körper¹, die sich in Richtung höherer Temperatur bewegen, zufolge ihrer relativ tiefen Temperatur größere Viskosität als diejenigen, die aus der Zone höherer Temperatur stammen und sich in Richtung des Temperaturgefälles verlagern. In der gleichen Zeitspanne müssen durch eine genügend groß gewählte horizontale Fläche im Durchschnitt gleichviel Wasserteilchen nach oben wie nach unten durchtreten. Infolge der auftretenden Reibungskräfte reißen die bewegten «Wasserkörper» feste Teilchen mit sich, und zwar müßte bei Homothermie der Wassermasse und spez. Gewicht eins der festen Teilchen ebenfalls gelten, daß pro Zeiteinheit gleichviel Suspensionen nach oben wie nach unten durch eine bestimmte Fläche hindurch geführt würden. Sind die festen Teilchen aber schwerer als Wasser, so kommt zu den durch die Reibungskräfte bewirkten und im Durchschnitt gleich großen nach oben und unten gerichteten Beschleunigungen eine nach unten gerichtete Beschleunigung der Teilchen, die aus ihrer Gewichtsdifferenz gegenüber Wasser resultiert.

¹ Wir stellen uns dabei die Durchmischung so vor, daß zuerst kleinere Wasserkörper vertikal verschoben werden, wodurch sich gewissermaßen Schlieren bilden.

Diese bewirkt, daß der pro Zeiteinheit zurückgelegte Weg der sinkenden Suspensionen bei gleicher Geschwindigkeit der Wasserteilchen größer ist als derjenige der steigenden. Im Durchschnitt müßte sich also trotz Turbulenz ein Absinken der Suspensionen von gleicher Geschwindigkeit wie im ruhenden Wasser zeigen. Findet der betrachtete Vorgang aber im Gebiet eines Temperaturgefälles statt, so besitzen, wie wir gesehen haben, die steigenden Wasserkörper größere Viskosität als die fallenden, und somit werden sie bei gleicher Geschwindigkeit einem festen Teilchen auch die größere Beschleunigung vermitteln. Die Folge ist ein Ueberwiegen der durch Wasserbewegung erzeugten Beschleunigungskräfte nach oben, wodurch die Erdbeschleunigung kompensiert werden könnte. Diese «Kompensationsbeschleunigung» wächst mit zunehmendem Temperaturgefälle, und es muß sich eine Zone des Gleichgewichts finden, in der die Suspensionen in Schwebelage gehalten werden.

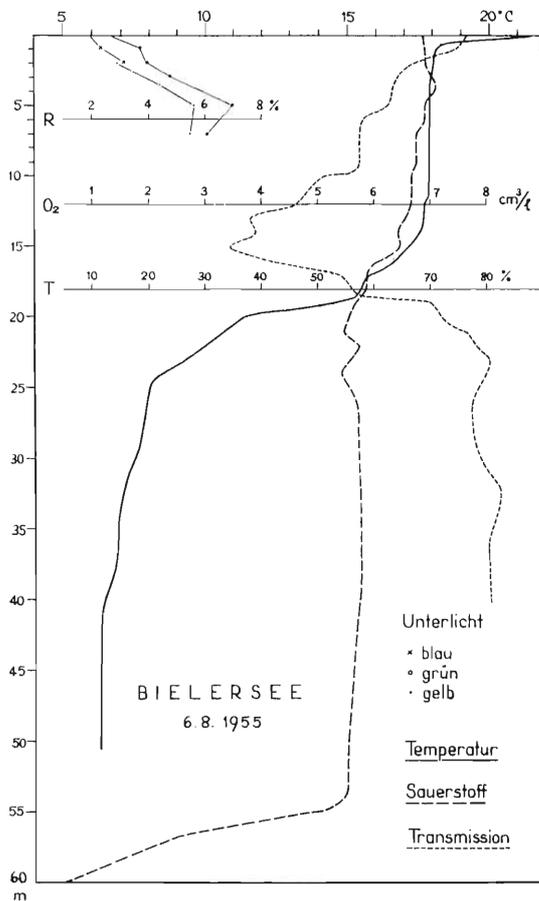
Betrachten wir nun Abb. 51 und 52:

— Sowohl Bieler- wie Murtensee zeigen ein deutliches Extinktionsminimum oberhalb der «Sprungschicht». Ist dieses biologisch bedingt oder handelt es sich um eingeschwemmte Trübungstoffe? Die Antwort darauf gibt die Sauerstoffkurve. Diese zeigt beim Bielersee einen unbedeutenden Sauerstoffabfall von der Produktions- zur Zehrschicht von ungefähr 1 cm³/l. Würde die Trübung in 15 m Tiefe durch Planktonanhäufung verursacht, so müßte sich zweifellos im Gebiet des ausgeprägtesten Temperaturgefälles ein Sauerstoffminimum, verursacht durch Oxydation herabfallender Planktonleichen, zeigen. Dies ist aber im Murtensee der Fall, und wir schließen deshalb hier auf ein Planktonmaximum in 7 m Tiefe, während wir im Bielersee mit großer Wahrscheinlichkeit ein Maximum von anorganischen Schwebestoffen (Flußtrübe) in 15 m Tiefe annehmen dürfen.

Aufschlußreich sind in Abb. 52 weitere Extinktionsmaxima in 13, 17, 20 m Tiefe, die jedesmal mit einem entsprechenden Sauerstoffminimum in gleicher Tiefe korrespondieren. Gleichzeitig fällt jedes Minimum mit einem kleineren oder größeren Temperatursprung zusammen, und wir dürfen wohl folgern, daß absinkende Planktonorganismen oder eingeschwemmtes organisches Material längere Zeit im Gebiet der Temperatursprünge verweilen, hier gewissermaßen einen Trübungsschirm bildend, und daß diese Tiefen deshalb durch vermehrte Sauerstoffzehrung ausgezeichnet sind.

— Ebenso wie im Bielersee verblüfft auch im Murtensee der schroffe Sauerstoffabfall, der sich hier in ca. 34 m Tiefe findet (Zehrung durch Bodensedimente!).

Abb. 51



— Zürich und Luganersee (Abb. 53 und 54) zeigen wenig ausgeprägte Extinktionsmaxima in 3—5 m Tiefe, die wahrscheinlich durch Planktonanhäufungen bedingt sind, worauf die ebenfalls schwach ausgeprägten Sauerstoffmaxima schließen lassen. Während die Transmissionsmessung ohne Filter in 9—10 m Tiefe des Luganersees nichts Besonderes erkennen läßt, zeigt sich für Blandurchlässigkeit (gemessen mit BG 12) ein ausgesprochenes Minimum. Selektive Extinktion läßt auf Absorption schließen, während wenig selektive Extinktion meist durch Streuung verursacht wird. Wir vermuten deshalb, daß dieses Minimum in der Blandurchlässigkeit durch einen schwach ausgeprägten Gelbstoffhorizont bewirkt wurde. (Vergleiche Verlauf der Temperaturkurve in 8 bis 12 m Tiefe.) Interessant sind die Sauerstoffminima, die Zürich- und Luganersee in ca. 13 m Tiefe zeigen. Wir müssen annehmen, daß in dieser Tiefe die Dissimilation die Assimilation übertrifft. Die Tiefenlage dieses Punktes ist von der Lichtdurchlässigkeit eines Sees abhängig. Wir stellen fest (siehe Abb. 53 und 54), daß beide Seen im entsprechenden Zeitpunkt eine Gründurchlässigkeit von zirka 60 % besaßen. Die gleiche Tiefenlage des Kompensationspunktes

überrascht also nicht. Bis in 13 m Tiefe drang damals noch ca. 0,1 % des grünen Lichtes. Der gleiche Lichtanteil drang beim Murtensee im August 1955 in ca. 10 m Tiefe (Sauerstoffminimum in 11 m Tiefe) und im Rootsee in ca. 8 m (Sauerstoffgrenze bei 9 m).

Sehr ausgeprägte Verhältnisse zeigt der Rootsee (Abb. 55). Temperatur- und Sauerstoffkurven laufen fast parallel. Die Transmissionskurve zeigt das bekannte Minimum im Gebiet stärksten Temperaturabfalles, verbunden mit einem untersten Sauerstoffmaximum (also noch Assimilation?)

— Wir glauben, daß die Streulichtmessung die Transmissionsmessung sehr wertvoll ergänzen könnte, indem sie beispielsweise erkennen läßt, ob ein Extinktionsmaximum durch gelöste (nicht streuende) oder suspendierte (streuende und reflektierende) Stoffe verursacht wird. Versuchsweise wurde die Lichtmeßzelle deshalb seitlich am Transmissionsmesser befestigt, so daß kein direktes Licht auf die lichtempfindliche Fläche fiel. So konnte das Gerät auch zur Messung des Streulichtes verwendet werden. Aus zahlreichen Versuchen zeigen wir in Abb. 55 ein charakteristisches Beispiel. Die Streulichtkurve «S» zeigt gute Übereinstimmung mit der Transmissionskurve, indem beide im großen und ganzen spiegelbildlich verlaufen. Ganz ausgeprägt trifft dies ab 5 m Tiefe zu, während bei 3 m ein Extinktionsmaximum ohne entsprechenden Anstieg der Streulicht-

Abb. 52

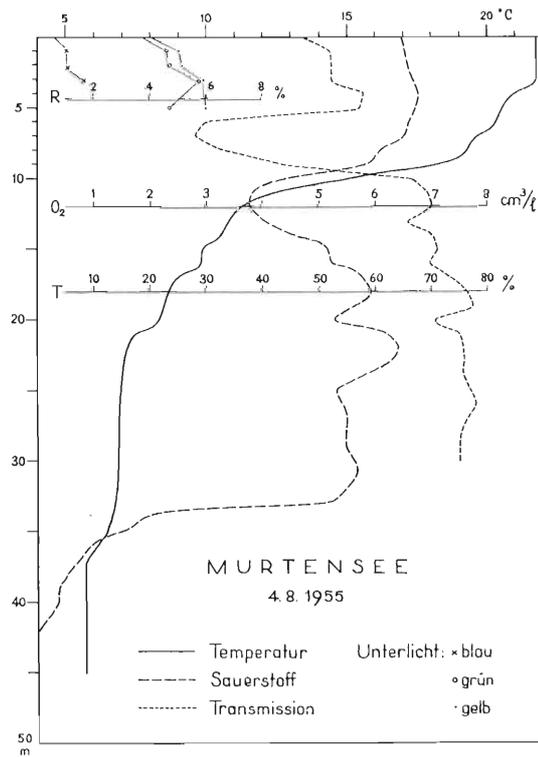


Abb. 53

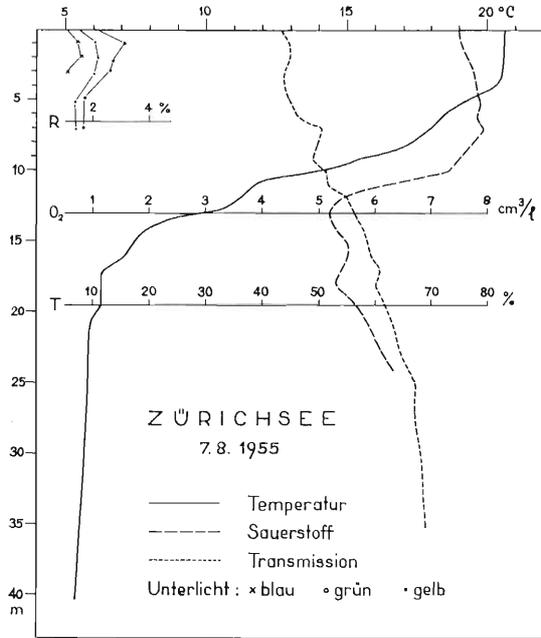
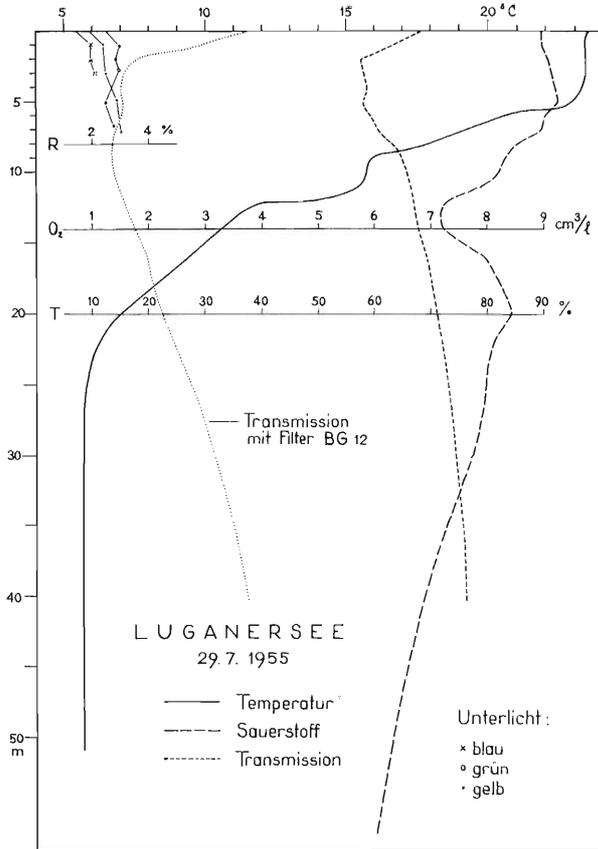


Abb. 54



intensität einen Färbungshorizont vermuten läßt.

Leider liegen aus Thuner- und Brienersee (Abb. 56 und 57) für August 1955 keine Transmissionsmessungen vor. Die Unterlichtkurven lassen aber die optische Inhomogenität der Wassermassen erkennen. Beide Seen zeigen in 4—5 m Tiefe ein ausgeprägtes Unterlichtmaximum, das zweifellos durch Schwebestoffe der in dieser Tiefe sich einschiebenden Zuflüsse verursacht wurde. Dies gilt auch für den Bielersee in 5 m Tiefe (vergleiche den entsprechenden Transmissionsabfall).

Abb. 55

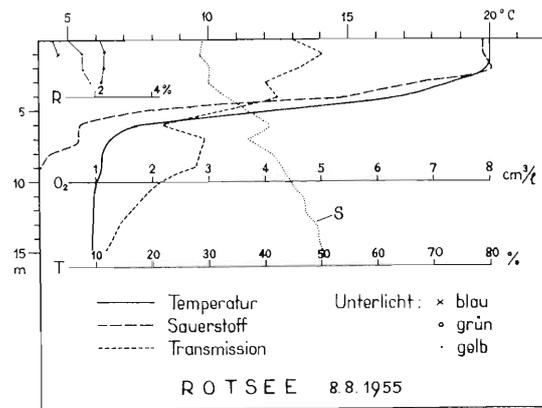


Abb. 56

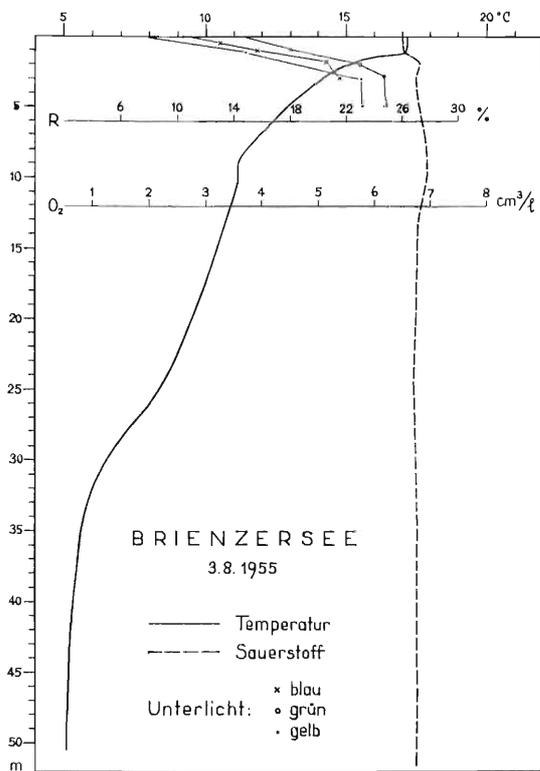
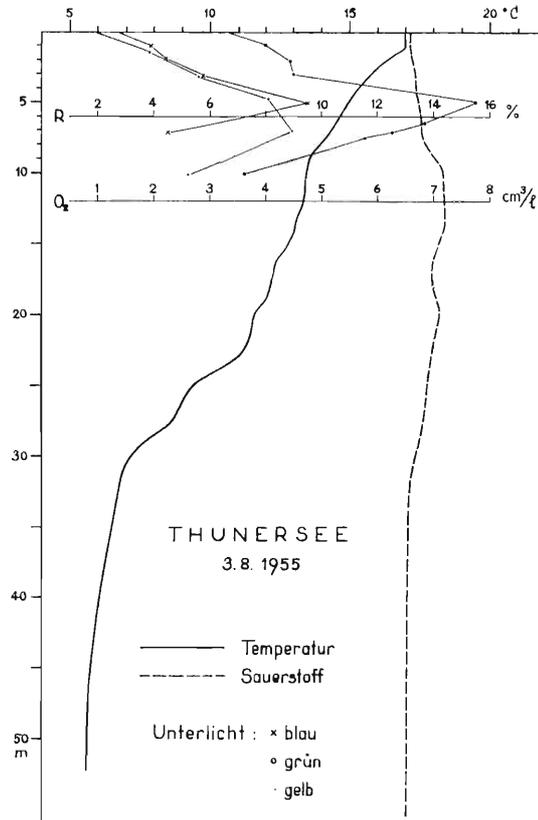


Abb. 57



ZUSAMMENFASSUNG

1. An sieben Schweizerseen wurden Untersuchungen über Lichtverhältnisse, Thermik und Chemismus durchgeführt.
2. Nach einem kurzen Ueberblick über die theoretischen Grundlagen der Lichtmessung wird ein selbstkonstruiertes Lichtmeßgerät zur Messung von Unter- und Oberlicht beschrieben.
3. Die Meßergebnisse über Lichtdurchlässigkeit und Streuung werden in Zusammenhang mit den morphometrischen, hydrologischen und chemischen Faktoren gebracht. Die wichtigsten Feststellungen sind:
 - Die Variation der Lichtdurchlässigkeit ist im Verlauf eines Jahres bei allen Seen bedeutend; doch zeigen stark durchflutete Seen eine gleichmäßige Schwankung in allen Spektralbereichen (Brienzer- und Thunersee), während weniger durchflutete, aber nährstoffreiche Gewässer eine durch gelöste

Substanzen bedingte maximale Variationsbreite im Blau aufweisen. (Murten-, Root-, Zürichsee).

- Die «relative Ultraviolett durchlässigkeit» (im Verhältnis zu Gelb) liegt beim Thunersee bei 1,0 (dest. Wasser 1,1) und erreicht beim Rootsee ein Minimum mit 0,09.
 - Es wird gezeigt, daß die Intensität des Unterlichtes hauptsächlich von der Schwebestoffführung der Gewässer und deshalb vom Durchflutungsgrad abhängig ist.
4. Auf Grund theoretischer Ueberlegungen wird versucht, aus dem Verhältnis Unterlicht zu Extinktion den Anteil der Streuung und denjenigen der Absorption an der Lichtauslöschung zu bestimmen und dadurch Schlüsse auf die Menge der gelösten und suspendierten Stoffe zu ziehen.
Die durch Suspensionen verursachte Extinktion ist im Brienzersee ungefähr dreimal so groß

- wie in Thuner- und Bielersee und zirka siebenmal so groß wie in den vier übrigen Gewässern.
5. Aus den graphischen Darstellungen über den fast zwei Jahre umfassenden Verlauf von Lichtdurchlässigkeit, Unterlicht, Monatsmittel der sekundlichen Abflußmengen und Sichttiefe ergeben sich folgende Feststellungen:
 - Für alle untersuchten Seen zeigt sich ein Minimum der Transparenz im Frühsommer. Dieses ist in den stark durchfluteten Seen durch mineralische Schwebestoffe, in den übrigen Gewässern durch eine biologische Hochproduktion bedingt.
 - Ein zweites Minimum zeigt sich in den eutrophierten Seen im Herbst. Dieses korrespondiert mit einer bräunlichroten Färbung der Wasseroberfläche und ist hauptsächlich durch Blaualgen, die durch die beginnende Herbstteilzirkulation aus der Sprungschicht aufgewirbelt werden, bewirkt.
 - Aare und Lüttschne schieben sich während des Sommers wie ein Teppich in ganz bestimmten Tiefen in den Brienersee ein und bilden so einen ausgeprägten Trübungshorizont, an welchem das Oberlicht zu einem großen Teil reflektiert wird, wodurch sich eine überdurchschnittliche Unterlichtintensität ohne entsprechenden Abfall in der Lichtdurchlässigkeit ergibt.
 - Ein durch Konstruktion des Meßgerätes bedingter systematischer Fehler wird diskutiert und als Ursache für die regelmäßige scheinbare Abnahme des Unterlichtes bei gleichzeitiger Abnahme der Lichtdurchlässigkeit in Seen mit großer Extinktion erkannt.
 - Die Schwankung der Unterlichtintensität ist erwartungsgemäß in Briener- und Thunersee sehr groß. Die verhältnismäßig kleine Schwankung im stark durchfluteten Bielersee wird begründet.
 6. Die Beziehung zwischen Sichttiefe (Bestimmung mit Secchischeibe), Streuung und Absorption wird diskutiert und an einer graphischen Darstellung die eindeutige Abhängigkeit der Sichttiefe von der Lichtdurchlässigkeit bei konstantem Unterlicht gezeigt.
 7. Im Abschnitt Thermik wird die Konstruktion eines elektrischen Thermometers, das sich speziell zu Seeuntersuchungen eignet, beschrieben.
 8. Der jahreszeitliche Temperaturverlauf der verschiedenen Seen wird verglichen und der Einfluß der wichtigsten Faktoren abgeschätzt. Der Rootsee wird als zeitweilig meromiktisch erkannt, und auch Thuner- und Brienersee wären nach den Symptomen von Findenegg meromiktisch. Letzterem widerspricht der hohe Sauerstoffgehalt in den Tiefen dieser Seen.
 9. Die verfeinerte Methode der Temperaturmessung mit Elektrothermometer zeigt einen lamellaren, fein geschichteten Aufbau der oberen Wassermassen. Es wird ausgeführt, daß die Epilimnionbildung den Beginn des thermischen Zerfalls anzeigt, und daß eine Zweiteilung der Wassermassen an Stelle der Dreiteilung (Epi-, Meta-, Hypolimnion) den Temperaturverhältnissen in unseren Seen besser gerecht würde.
 10. Der Vorgang der windbedingten Durchmischung wird besprochen, und daraus werden verschiedene «Kurventypen» abgeleitet.
 11. Es wird gezeigt, daß die Durchmischungstiefe (Tiefenlage der 7 °-Isotherme bei Sommerstagnation) bei genügend tiefen Seen zirka der 3,5ten Wurzel aus der Oberfläche proportional ist.
 12. Die Mitteltemperaturen der untersuchten Seen wurden berechnet und daraus die jährliche Wärmeamplitude der Schicht bis 50 m Tiefe (resp. bis Grund in Murten und Rootsee) ermittelt. Der jährliche Wärmegewinn resp. -verlust pro cm² Seeoberfläche wird als «spezifischer Wärmeumsatz» bezeichnet. Es zeigt sich weitgehend Proportionalität dieser Größe mit der 4ten Wurzel der Seeoberfläche. Die Abweichung von der Regel läßt sich durch Wärmetransport infolge Durchflutung erklären und teilweise berechnen.
 13. Untersuchungen über Nährstoffgehalt, Sauerstoffsättigung und Wasserhärte ergeben ein Bild über den gegenwärtigen Zustand der betreffenden Seen bezüglich Trophiegrad und evtl. Verschmutzung.
 14. Die Wasserproben wurden mit einer neuartigen und selbstkonstruierten Schöpfflasche, die kurz beschrieben wird, entnommen. Für die Sauerstoffbestimmung wurde neben der Winklermethode ein elektrisches Sauerstofflot (erstmalig in der Schweiz) verwendet.
 15. Zum Schluß werden die funktionellen Beziehungen zwischen thermischer, optischer und chemischer Schichtung anhand typischer Kurven, die bei Sommerstagnation aufgenommen wurden, besprochen. Zur Ermittlung der Transmission wurde ein Transmissionsmeßgerät entwickelt, das sich gut bewährt und das deshalb kurz beschrieben wird.
 16. Mit Hilfe des Transmissionsmessers konnte die vertikal begrenzte Einschichtung des Aarewassers in den Brienersee bis nach Bönigen nachgewiesen werden. Die langsame Sedimentation der Schwebestoffe verblüfft, und es wird dafür eine vorläufige Erklärung gegeben.
 17. Anhand der Sauerstoffkurven können verschiedene Extinktionsmaxima als durch organische oder anorganische Schwebestoffe verursacht bezeichnet werden.

Verwendete Literatur

- 1 Aberg und Rodhe
Ueber die Milieufaktoren in einigen südschwedischen Seen. *Symbolae Botanicae Upsalienses*, Upsala 1942.
- 2 Adam, F.
Chemische Untersuchungen am Rootsee, Sonderabdruck aus «Straße und Verkehr», Luzern 1938.
- 3 Alsterberg, G.
Die Sauerstoffschichtung der Seen. *Botaniska Notiser*. Lund 1927.
- 4 Becker, R.
Kraftantrieb und Leistung des Windes an der Meeresoberfläche. *Deutsche Hydr. Zeitschrift*, Band 2, Heft 4, 1949.
- 5 Defant, A.
Die Strömungen in Meeresstraßen. *Deutsche Hydr. Zeitschrift*, Bd. 8, Heft 4, 1955.
- 6 Defant, A.
Turbulenz und Vermischung im Meere. *Deutsche Hydr. Zeitschrift*, Bd. 7, Heft 1/2, 1954.
- 7 Dirmhirn, I.
Neuere Strahlungsmessungen in den Lunzerseen. Sonderabdruck aus «Wetter und Leben», Jahrgang 3, Heft 11—12. Wien.
- 8 Dirmhirn, I.
Untersuchungen der Himmelsstrahlung in den Ostalpen mit besonderer Berücksichtigung ihrer Höhenabhängigkeit. Sonderabdruck aus *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Bd. 2, Heft 4, 1951.
- 9 Dussart, B.
Recherches Hydrographiques sur le lac Léman, Paris 1948.
- 10 Dussart, B.
Température et mouvements des eaux dans les lacs. Extrait des *Annales de la Station Centrale d'Hydrobiologie appliquée*, Tome V. 1954.
- 11 Eckel, O.
Ueber die spektrale Lichtdurchlässigkeit einiger Seen in Berlin und Umgebung. Sonderdruck aus «*Bioklimatische Beiblätter*», Heft 2, Braunschweig, 1941.
- 12 Eckel, O.
Ueber Mittel- und Extremtemperaturen des Lunzer Untersees. Sonderdruck aus «*Wetter und Leben*», Jahrg. 4, Heft V, 1952.
- 13 Eckel, O.
Statistisches zur Vereisung der Ostalpenseen. Sonderabdruck aus «*Wetter und Leben*», Jahrg. 7, Heft 3—4.
- 14 Eckel, O.
Mechanische Arbeitsgrößen der Binnenseen. Sonderdruck aus *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Bd. 1, Heft 1, Wien 1948.
- 15 Eckel, O.
Beitrag zum Studium des Wärmeumsatzes in Seen. Sonderdruck aus *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Bd. 9, Heft 1, Wien 1956.
- 16 Eckel, O.
Ueber die numerische und graphische Ermittlung der Stabilität von Gewässern nach W. Schmidt. Sonderdruck aus *Schweiz. Zeitschr. für Hydrologie*, Vol. XII, Fasc. 1, 1950.
- 17 Eckel, O.
Mittel- und Extremtemperaturen des Hallstättersees. Sonderdruck aus «*Wetter und Leben*», Jahrgang 4, Heft 5—7, Juli 1952.
- 18 Fehlmann, W.
Die Tiefenfauna des Luganersees. Inaugural-Dissertation, Universität Basel, Leipzig 1911.
- 19 Fehlmann, W.
Zuflußbedingte Sekundärströmungen in Seen. *Schweiz. Zeitschrift für Hydrologie*, 1948.
- 20 Findenegg, I.
Sechs Jahre Temperaturlotungen in den Kärntnerseen. Sonderdruck aus «*Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*», 37, 364—384, Leipzig 1938.
- 21 Findenegg, I.
Kärntnerseen, naturkundlich betrachtet. Klagenfurt 1953.
- 22 Fyg, W.
Die Transparenzverhältnisse des Thunersees im Frühjahr 1921. Thun 1921.
- 23 Geßner, F.
Hydrobotanik, Bd. 1, Berlin 1955.
- 24 Grote, A.
Der Sauerstoffhaushalt der Seen. Stuttgart 1934.
- 25 Gygax, F.
Zum Wasserhaushalt des Schweiz. Hochgebirges, Niederschlag und Abfluß im Einzugsgebiet der Magliasina. Bellinzona 1948.
- 26 Heuscher, J.
Thuner- und Brienzensee, ihre biologischen und Fischerei-Verhältnisse. Pfäffikon 1901.
- 27 Halbfaß, W.
Das Süßwasser der Erde. Leipzig 1914.
- 28 Halbfaß, W.
Ergebnisse neuerer simultaner Temperaturmessungen in einigen tiefen Seen Europas. Abdruck aus *Dr. A. Petermanns Geographischen Mitteilungen*, 1910, Heft 2.
- 29 Hofer, F.
Ueber die Energieverhältnisse des Brienzersees. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, Hydrologie, Bern 1952.
- 30 Jaag, O.
Die limnologische Wissenschaft in ihrer Bedeutung für die Schweiz. Separatdruck a. d. Jahrbuch 1948/49 des Verbandes zum Schutze des Landschaftsbildes am Zürichsee.
- 31 Jaag, O.
Die neuere Entwicklung und der heutige Zustand der Schweizer Seen. Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie, Verhandlungen 1949.

- 32 Joseph, J.
Ueber die Messung des «vertikalen Extinktionskoeffizienten». Deutsche Hydr. Zeitschrift, Bd. 2, Heft 6, 1949.
- 33 Joseph, J.
Durchsichtigkeitsmessungen im Meere im ultravioletten Spektralbereich. Deutsche Hydr. Zeitschrift, Bd. 2, Heft 6, 1949.
- 34 Kalle, K.
Zur Frage der Produktionsleistung des Meeres. Deutsche Hydr. Zeitschrift, Bd. 1, Heft 1, 1948.
- 35 Kalle, K.
Fluoreszenz und Gelbstoffe im Bottnischen und Finnischen Meerbusen. Deutsche Hydr. Zeitschrift, Bd. 2, Heft 4, 1949.
- 36 Keller, R.
Limnologische Untersuchungen im Hallwilersee. Aarau 1945.
- 37 Klut-Olszewski
Untersuchungen des Wassers an Ort und Stelle. Berlin 1945.
- 38 Kuhn, H.
Gewässerleben und Gewässerschutz. Zürich 1952.
- 39 Lauscher, F.
Optik der Gewässer, Kap. 12 Handbuch der Geophysik, Bd. VIII, Berlin 1955.
- 40 Minder, L.
Der Zürichsee im Lichte der Seetypenlehre. Zürich 1943.
- 41 Minder, L.
Neuere Untersuchungen über den Sauerstoffgehalt und die Eutrophie des Zürichsees. Sonderdruck aus dem Archiv für Hydrobiologie, Bd. XI, Heft 1, S. 279—304, 1943.
- 42 Minder, L.
Untersuchungen am Bielersee. Zürich 1936.
- 43 Minder, L.
Die Sauerstoffverhältnisse des Zürichsees im Wandel der letzten Jahrzehnte. Zürich 1934.
- 44 Minder, L.
Ueber die Löslichkeit des Sauerstoffs in Gebirgsgewässern. Zürich 1941.
- 45 Mortimer, C. H.
A review of temperature measurement in limnology. Aus Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie, Stuttgart 1953.
- 46 Mortimer, C. H.
The use of thermistors for the measurement of lake temperatures. Aus internat. Vereinigung für theoret. und angewandte Limnologie. 1953.
- 47 Mörkhofer, W.
Meteorologische Strahlungsmeßmethoden. Aus Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden, Berlin 1939.
- 48 Neumann, G.
Stabilitätsschwingungen und die innere thermische Unruhe im Meere und in der Atmosphäre. Deutsche Hydr. Zeitschrift, Bd. 2, Heft 1—3, 1949.
- 49 Neumann, G.
Ueber Seegang, Dünung und Wind. Deutsche Hydr. Zeitschrift, Bd. 3, Heft 1 und 2, 1950.
- 50 Ohle, W.
Prüfung und Anwendung der elektro-chem. Sauerstoffbestimmung für Gewässeruntersuchungen. Aus Jahrbuch für Wasserchemie und Wasserreinigungstechnik, XIX. Bd., 1952.
- 51 Quartier, A.
Le lac de Neuchâtel. Neuch. 1948.
- 52 Rivier, O.
Recherches hydrobiologiques sur le lac de Morat. Neuchâtel 1937
- 53 Roll, H. U.
Ueber die Ausbreitung der Meereswellen unter der Wirkung des Windes. Deutsche Hydr. Zeitschrift, Bd. 7, Heft 1 und 2, 1949.
- 54 Ruttner, F.
Stabilität und Umschichtung in tropischen und temperierten Seen. Aus dem Archiv für Hydrobiologie, 1937, Bd. XV und Bd. VII.
- 55 Ruttner, F.
Grundriß der Limnologie. Berlin 1952.
- 56 Ruttner, F.
Verhalten und Wirkung der Sonnenstrahlung im Lebensraum der Gewässer. Aus «Scientia», Milano.
- 57 Ruttner, F.
Durchsichtigkeit des Wassers und Planktonschichtung. Aus «Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie», 1938.
- 58 Sauberer, F.
Der Strahlungshaushalt eines alpinen Sees. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Bd. IV, Heft 3, 1953.
- 59 Sauberer, F.
Ueber das Licht im Neusiedlersee. Sonderdruck aus «Wetter und Leben», Jahrgang 4, Heft 1 und 2, 1952.
- 60 Sauberer F.
Bemerkungen über optische Untersuchungen an Gewässern. Aus «Bioklimatische Beiblätter», Heft 3, 1942.
- 61 Sauberer, F.
Beiträge zur Kenntnis der optischen Eigenschaften der Kärntnerseen. Aus Archiv für Hydrobiologie, Bd. XLI, 1945.
- 62 Sauberer, F.
Die Strahlungsverhältnisse der Binnengewässer. Leipzig 1941.
- 63 Schmidt-Ries
Trübungsmessungen, eine Möglichkeit zur einfachen und schnellen Feststellung von Veränderungen in Gewässern. Stuttgart 1953.
- 64 Schmidt, W.
Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen. Hamburg 1925.
- 65 Schmidt, W.
Ein Jahr Temperaturmessungen in 17 österreichischen Alpenseen. Wien 1934.
- 66 Schmolinsky
Einige Ergebnisse vergleichender Lichtmessungen an Seen des Hochschwarzwaldes und der Schweiz. Archiv für Hydrobiologie, 1954.

- 67 Schmolinsky
Konstruktion und Anwendung eines Heißleiterthermometers. Archiv für Hydrobiologie, 1954.
- 68 Thienemann, A.
Die Binnengewässer in Natur und Kultur. Berlin 1955.
- 69 Thienemann, A.
Tropische Seen und Seetypenlehre. Archiv für Hydrobiologie, 1931.
- 70 Thienemann, A.
Biologische Seetypen. Archiv für Hydrobiologie, 1920.
- 71 Thienemann, A.
Die Binnengewässer Mitteleuropas. Stuttgart 1926.
- 72 Thomas, E. A.
Produktionsforschung auf Grund der Sedimente im Pfäffikersee und Zürichsee. Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie, Band XI, 1951.
- 73 Thomas, E. A.
Sprungschichtneigung im Zürichsee durch Sturm. Schweiz. Zeitschrift für Hydrologie, 1949.
- 74 Thomas, E. A.
Sturmeinfluß auf das Tiefenwasser des Zürichsees im Winter. Schweiz. Zeitschrift für Hydrologie, 1951.
- 75 Thomas, E. A.
Stoffhaushalt und Sedimentation im oligotrophen Aegerisee und im eutrophen Pfäffiker- und Greifensee. Habilitationsschrift, Universität Zürich.
- 76 Thomas, E. A.
Phosphatgehalt der Gewässer und Gewässerschutz. Monatsbulletin des Schweiz. Vereins von Gas- und Wasserfachmännern, 1955.
- 77 Thomas, E. A.
Empirische und Experimentelle Untersuchungen zur Kenntnis der Minimumstoffe in 46 Seen der Schweiz und angrenzender Gebiete. Monatsbulletin d. Schweiz. Vereins von Gas- und Wasserfachmännern, 1953.
- 78 Thomas, E. A.
Der heutige Zustand des Zürichsees. Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie.
- 79 Vollenweider, R.
L'influenza della torbità provocata dalle acque di piena nel bacino di Pallanza. Mem. Ist. Ital. Idrobiol. 1956.
- 80 Vollenweider, R.
Das Strahlungsklima des Lago Maggiore und seine Bedeutung für die Photosynthese des Phytoplanktons. Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 1956.
- 81 Wüst, G.
Ueber die Zweiteilung der Hydrosphäre. Deutsche Hydr. Zeitschrift, Bd. 2, Heft 6, 1949.
- 82 Zorell, F.
Zur Frage des Trophiezustandes einiger oberbayrischer Seen. Archiv für Hydrobiologie, 1954.
- 83 Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, 1951—1956.