

Die klimatischen Typen des holomiktischen Sees

Mit 1 Tafel

Von HEINZ LÖFFLER, dzt. Yale University, U. S. A. *

Vor bald 80 Jahren hat FOREL, der Begründer der modernen Limnologie und Verfasser des grundlegenden Werkes über den Genfer See, die Seen der Erde nach ihren thermischen Eigenschaften geliedert. Er unterschied einen temperierten, einen polaren und einen tropischen See. FOREL ging vom See unserer Breiten, dem temperierten See aus, der zweimal, nämlich im Frühjahr und Herbst, im Zustand der Homothermie (meist um 4° C, der Temperatur der maximalen Dichte chemisch reinen Wassers) schon bei geringster Windstärke Vollzirkulationen erfährt, im Winter „invers“ (kälteres Wasser über wärmerem), im Sommer „direkt“ geschichtet erscheint. Dabei werden durch die thermisch bedingten Dichteunterschiede vor allem im höheren Temperaturbereich sehr stabile Schichtungen erzielt, deren Folge die sogenannte „Sommerstagnation“ ist. Bekanntlich nimmt ja das spezifische Gewicht im höheren Temperaturbereich viel rascher als im niedrigen ab und so beträgt z. B. die Dichteänderung zwischen 24 und 25° C das Dreißigfache von jener zwischen 4 und 5° C.

Weiters bezeichnete FOREL als polare Seen Gewässer mit inverser Schichtung und sommerlicher Zirkulation nicht über 4° C, als tropische Seen solche, die stets „direkt“ geschichtet sind und deren Temperatur somit niemals unter 4° C absinkt.

Diese Einteilung wurde über ein halbes Jahrhundert beibehalten, ehe einige Autoren daran gingen, sie ihren Untersuchungsergebnissen gemäß zu erweitern, bzw. abzuändern. Die Arbeiten dieser Autoren bildeten letztlich auch die Grundlage für die hier zu besprechende Gliederung. Es ist verständlich, daß die Kritik erst so spät einsetzte, da sich zunächst die limnologischen Arbeiten auf Europa und Nordamerika beschränkten, also auf vor allem temperierte Seen, deren Abgrenzung durch FOREL kaum einer Korrektur bedarf. Außerdem standen für den Limnologen zunächst ökologische Fragestellungen, die den Nährstoffreichtum und das Ausmaß der Produktion an organischer Substanz eines Gewässers zum Gegenstand hatten, im Vordergrund und führten schließlich ihrerseits zu einer auf abiotischen und biotischen Faktoren beruhenden Seetypenlehre, die vor allem von NAUMANN und THIENEMANN begründet wurde und den Trophie-(Nährstoff-)gehalt zum Anlaß einer Ordnung nimmt. Darnach unterschied man einen „oligotrophen“ und einen „eutrophen“ See, also nährstoffarme und nährstoffreiche Gewässer und untergliederte dieses System noch durch weitere Trophiestufen. Heute neigt man freilich vielfach schon dazu, die Binnengewässer nach dem Ausmaß ihrer Produktion selbst zu ordnen, da hohe Trophiegrade nicht immer hohe Produktionen bedingen und umgekehrt geringer Nährstoffgehalt (vor allem in den warmen tropischen Seen) hohe Produktion nicht ausschließt. Früher war man hauptsächlich der Meinung, daß zwischen diesen beiden Faktoren immer ein ursächlicher Zusammenhang gegeben sei.

* Herrn Prof. G. E. HUTCHINSON (Yale Univ.) möchte ich für wertvolle Anregungen an dieser Stelle besonders danken.

Diese Seetypenlehre beinhaltet nur insofern ein geographisches Moment, als warme tropische Seen sehr wahrscheinlich höhere Produktion als kalte polare Gewässer haben. Im übrigen läuft aber das Trophie- und Produktionssystem quer durch jede geographische Einteilung, ja es ist eher noch mit geologischen und morphologischen Faktoren in Verbindung zu bringen.

FORELS Seetypen waren also bis auf weiteres die einzige geographische Gliederung. Es muß hier aber eingefügt werden, daß sie verständlicherweise nur auf bestimmte Gewässer anzuwenden ist, die jene morphologischen und auch chemischen Eigenschaften besitzen, um einerseits eine periodische Schichtung, andererseits Vollzirkulationen zu gewährleisten. So ist es einleuchtend, daß Tümpel und flache Seen, deren kurzfristige „diurne“ thermische Schichtungen schon bei nächtlicher Abkühlung, aber auch bei jeder mittleren Windstärke aufgehoben werden, auszuschneiden sind. Mit anderen Worten, es ist eine entsprechende Seetiefe erforderlich, die je nach Oberfläche und Windexponiertheit des betreffenden Sees bald größer, bald kleiner sein muß, um z. B. für den temperierten See eine Sommerstagnation zu garantieren. Die Seen dürfen aber auch keine stärkere chemische Schichtung zeigen, die zu einer so hohen Stabilität führt, daß die Vollzirkulationen unmöglich werden, denn dann würden sie in ihrem Schichtungstyp nicht mehr den FOREL'schen Bedingungen entsprechen und in ihren Tiefen den oberhalb eingeschichteten Wassermassen gegenüber weitgehend autarke Temperaturverhältnissen besitzen. Es würde dann z. B. während des Sommers neben der „Sprungschicht“ (Thermocline, Tiefenstufe des maximalen Temperaturabfalls) eine „Chemocline“, ein Konzentrationssprung bestehen, der auch meist zu einem abermaligen Temperatursprung führt. Solche Seen hat FINDENEGG treffend „meromiktisch“ genannt und allen übrigen, sich chemisch normal verhaltenden „holomiktischen“ Seen gegenübergestellt¹. Die Gruppe dieser sich nur thermisch schichtenden Seen soll nun Gegenstand der weiteren Ausführungen sein.

Man erkannte schließlich, daß der Begriff des tropischen Sees nach FOREL zu weit gefaßt sei. Besonders im südlichen Japan, etwa vom 35—36° n. B. an, liegen zahlreiche Seen, die sich „tropisch“ verhalten, weshalb auch gerade ein japanischer Autor, YOSHIMURA, vorschlug, man möge nur Seen mit ständig geringen Temperaturdifferenzen zwischen Epilimnion (Wassermassen oberhalb der Sprungschicht) und Hypolimnion (Wassermassen unterhalb der Sprungschicht) tropisch nennen, alle übrigen im Winter oberhalb 4° C zirkulierenden Seen aber subtropisch. Auch diese Bezeichnung ist nicht glücklich gewählt, da man mit geographischen Begriffen in Schwierigkeiten geriet, als solche „subtropischen“ Seen auch im westlichen Schottland und in British Kolumbien entdeckt wurden.

Schließlich zeigte es sich, daß der Begriff „tropischer“ See auch jetzt noch in weitere Gruppen zerfällt. RUTTNER [1931] beschrieb in seiner Arbeit über die Sundagewässer einen selten vollständig zirkulierenden, sehr stabil geschichteten See, MORANDINI [1940] fand in Aethiopien Seen, die infolge der starken nächtlichen Abkühlung sehr regelmäßig Vollzirkulationen haben und gelegent-

¹ Wie vor allem FINDENEGG [1937] ausführlich dargestellt hat, finden sich zwischen holomiktischen und meromiktischen Seen erwartungsgemäß Übergänge. So kann vor allem bei dimiktischen Seen, deren Tiefentemperaturen um den Wert der maximalen Dichte pendeln, die vom Wind der Seefläche mitgeteilte Energie zu klein sein, um im gesamten Wasserkörper Strömungen hervorzurufen, die zur Totalzirkulation führen. Sowohl klimatische als auch morphologische (Beckenform des Sees, Lage) Ursachen können somit Anlaß sein, daß die primär homogene Wassermasse eines Sees durch das häufige Ausbleiben der Vollzirkulationen in zunehmendem Maß chemisch geschichtet wird, wobei diese Schichtung ihrerseits wieder den Übergang zu totaler Meromixie beschleunigt.

lich eigener Untersuchungen an zahlreichen peruanischen Hochgebirgsseen fand ich [LÖFFLER, im Druck] Gewässer mit stets geringer Stabilität, sehr häufigen Vollzirkulationen und oftmals (bei Gletscherseen) inverser Schichtung. Dagegen fehlt natürlich in den tropischen Hochgebirgen im Gegensatz zu den übrigen außertropisch gelegenen Hochgebirgen eine längere Eisbedeckung der Seen.

FORELS Angaben für polare Seen sind hingegen viel zu eng gefaßt und wurden vor allem durch STRÖM [1934] kritisiert. Es ist im Gegensatz zu FORELS Definition vielmehr so, daß der überwiegende Teil auch extrem polarer Seen während des Sommers über 4° C zirkuliert, jedoch — ähnlich dem tropischen Hochgebirgssee — keine stabilen Schichtungen ausbildet.

HUTCHINSON hat nun in seinem umfangreichen Werk über Limnologie [im Druck] für die außertropischen Seen eine klimatische Gliederung getroffen, in der auf geographische Begriffe bewußt verzichtet wird und statt dessen die für das Klima eines Sees charakteristische Anzahl der Vollzirkulationen herangezogen werden. HUTCHINSON bezeichnet den temperierten See FORELS dimiktisch, wodurch der für z. B. subtropische Hochgebirgsseen nicht recht passende Ausdruck „temperiert“ vermieden werden kann, den subtropischen See YOSHIMURAS warm monomiktisch und erweitert den Begriff des polaren Sees durch die Bezeichnung kalt monomiktisch für alle Seen, die im Verlauf des Sommers zu keiner stabilen Schichtung gelangen, also bei oder auch über 4° C während des Sommers unregelmäßig zirkulieren.

Für die tropischen Seen wurden von HUTCHINSON & LÖFFLER [1956] die Bezeichnungen oligomiktisch für warme Tropenseen mit seltenen Vollzirkulationen und hoher Stabilität, polymiktisch für Tropenseen der Beschreibung durch MORANDINI entsprechend, sowie für tropische Hochgebirgsseen vorgeschlagen. In einer Studie über die thermische Gliederung der Seen sind diese von HUTCHINSON & LÖFFLER [1956] definierten thermischen Typen durch ein Schema in ihrer Verteilung auf der Erde nach geogr. Breite und Seehöhe dargestellt. Diese Verteilung in Beziehung zu den Klimatypen der Erde zu setzen, soll nun Aufgabe der vorliegenden Schrift sein. Vor Darstellung dieser Relation soll an der zuletzt getroffenen Einteilung noch eine Korrektur angebracht werden, indem nämlich der Hochgebirgssee von den übrigen, sich polymiktisch verhaltenden Tropenseen gesondert wird. Dies erscheint mir schon auf Grund rein ökologischer Überlegungen gerechtfertigt und kann zudem auch mit einer klaren Definition unterbaut werden: Der tropische Hochgebirgssee ist als ständig zirkulierender Kaltwassersee auch im Verlauf der täglichen Erwärmung einer Durchmischung unterworfen, während die übrigen polymiktischen Seen zufolge ihrer weitaus größeren Stabilität nur bei nächtlichen Abkühlungen Vollzirkulation gewährleisten.

Ebenso möchte ich den warm monomiktischen vom oligomiktischen See im Gegensatz zu dem in der genannten Studie entworfenen Schema noch schärfer trennen und für die zwei Typen folgende Unterschiede anführen:

Der warm monomiktische See, außerhalb der Tropen gelegen, zeigt eine längere, durch die jahreszeitliche Abkühlung bedingte Zirkulationsperiode, der oligomiktische See, ausschließlich innerhalb der Tropen gelegen, ist dagegen durch unregelmäßige, meist plötzlich eintretende Zirkulationsperioden gekennzeichnet, bildet jedoch infolge der höheren Temperaturen wenigstens im Verlauf der täglichen Erwärmung wieder hohe Stabilitäten aus. Ein einmalig zirkulierender oligomiktischer See kann also nicht ohne weiteres einem warm monomiktischen gleichgesetzt werden. Fassen wir diese Zusätze mit der oben ange-

fürten Einteilung zusammen, so sieht die thermische Gliederung der holomiktischen Seen folgendermaßen aus:

- Außerhalb der Tropen: kalt monomiktisch
dimiktisch
warm monomiktisch
- Innerhalb der Tropen: oligomiktisch
warm polymiktisch
kalt polymiktrisch.

Der nur sehr selten verwirklichte Fall über mehrere Jahre hinaus eisbedeckter („amiktischer“) Seen [MURRAY 1909] ohne Vollzirkulationen kann in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden.

Da hier die thermischen Typen des holomiktischen Sees behandelt werden sollen, können zwei Klimabereiche, nämlich der nivale mit ewiger Schneebedeckung (der amiktische See kann dort auftreten) und der aride mit Verdunstung größer als Niederschlag ausgeschieden werden. Dem ariden Gebiet [siehe HUTCHINSON 1937] entsprechen ja in erster Linie abflußlose, stark salzige Seen von meist geringer Tiefe, denen überdies eine mehr oder minder ausgeprägte Periodizität eigen ist.

Für einen Vergleich der oben angegebenen See- mit den Klimatypen möchte ich das nach Temperatur und Niederschlag aufgestellte System nach KÖPPEN [1936] heranziehen, dieses jedoch mit den wesentlichen Ergänzungen nach TROLL [1943, 1951] in Anwendung bringen. TROLL hat im Gegensatz zu KÖPPEN, der nur Jahresamplitude und Jahresgang der Temperatur berücksichtigt, auf die Bedeutung der täglichen Temperaturschwankungen hingewiesen und damit vor allem das Wesen der tropischen Höhenklimate erfaßt. Es ist einleuchtend, daß diese Einsichten sich wenigstens teilweise für unseren Vergleich als bedeutungsvoll zeigen werden und die Kenntnis des thermischen Gesamtverhaltens der Klimate (dargestellt durch die sogenannten Thermoisoplethen-Diagramme²) unerläßlich für eine geographische Gliederung der Seen sein wird. Ich bin mir aber auch bewußt, daß die derzeit vorliegenden Angaben über holomiktische Seen und ihre Verteilung auf der Erde bei weitem nicht ausreichen, um zu exakten Feststellungen bezüglich der Abgrenzung der Areale unserer Typen zu gelangen.

1. Die außertropischen Seen

a) Der kalt monomiktische See: Während der meist 8—9 monatigen Eisbedeckung (ihr Beginn kann bei sehr großen Seen stark verzögert sein) sind diese Gewässer bei einer Tiefentemperatur von unter 4° C invers geschichtet, nach dem Auftauen der Eisdecke tritt die erste Vollzirkulation ein, die sich nun mit der langsamen Erwärmung und den immer wieder auftretenden Temperaturstürzen vielfach wiederholt, wobei die gesamte Wassermasse um mehrere Grade erwärmt werden kann. Wesentlich ist, daß auch während des Sommers infolge der niedrigen Temperaturen keine stabile Schichtung zustande kommt und somit ein Zustand herrscht, der jenem des kalt polymiktischen Sees das ganze Jahr über entspricht. Diese weitgehende Homothermie kann einerseits durch die Zufuhr von Gletscherwässern und vor allem, wie bereits erwähnt, durch den häufigen Rückgang der sommerlichen arktischen bzw. außertropischen Hoch-

² Aus diesen Diagrammen ist für Kleingewässer und Flachseen mit nur geringen Abweichungen die thermische Entwicklung sofort abzulesen.

gebirgstemperaturen erklärt werden. Die Angaben FORELS für den „polaren“ See wurden vor allem gelegentlich der Untersuchungen an Flakevattnet (Norwegen) durch STRÖM kritisiert.

Das Erscheinungsbild des kalt monomiktischen Sees ist eng mit den Klimaten der hochpolaren Breiten verknüpft, die durch das Fehlen von thermischen Tageszeiten ausgezeichnet und ausgesprochene Jahreszeitenklimate sind (bekanntlich hängen die Tagesschwankungen von den Unterschieden des Sonnenstandes und der Größe der Ein- und Ausstrahlung ab). Ebenso tritt aber der kalt monomiktische See auch in den Hochgebirgen der gemäßigten und subtropischen Breiten auf, deren Klima eine starke Annäherung des thermischen Typus an die Tieflandsklimate höherer Breiten zeigt [TROLL 1951]. Er entspricht somit im wesentlichen dem E-Klima KÖPPENS, teilweise scheint seine Südgrenze in die D-Klimate verschoben. Oder mit anderen Worten: er gehört hauptsächlich dem subarktischen Tundrenklima, zum Teil dem borealen Nadel- bzw. Birkenwaldklima an. Auf der Südhalbkugel ist das E-Klima auf einen kleinen Festlandsraum eingeschränkt. Angaben über entsprechende Seen des südlichsten Patagonien fehlen bisher. Dabei ist das subantarktische Klima durch einen hohen Ozeanitätsgrad ausgezeichnet, der analog den hier fast aneinander grenzenden tropischen und subpolaren Pflanzenelementen ein Zusammenrücken von kalt und warm monomiktischen Seen erwarten läßt.

Am besten ist zweifellos das europäische Gebiet bekannt [OLOFSSON 1918, EKMAN 1922, BRUNDIN 1949, Statens forskningsråds årsbok 1948/49 u. zahlr. a.], während aus Grönland bisher nur Angaben von seichten Gewässern [ANDERSEN 1937, 1946 u. a.], aus Kanada und Sibirien nur spärliche Beschreibungen vorliegen³.

b) Der dimiktische See: Die Definition des dimiktischen Sees wurde bereits oben gegeben, seine Beschreibung ist besonders klar bei RUTTNER [1952] durchgeführt. Es muß hier nur der Vollständigkeit halber hinzugefügt werden, daß die Tiefentemperaturen weder im Sommer, noch im Winter genau 4⁰ C betragen müssen, sondern vielmehr von der Dauer der Vollzirkulationen etc. abhängen. Außerdem kann in sehr tiefen Seen (z. B. Baikalsee 1741 m) die Tiefentemperatur infolge des hohen Drucks tiefer liegen. Aber auch diese größten Tiefen scheinen die Vollzirkulationen wenigstens zeitweilig zu erfassen, wie vor allem der hohe Sauerstoffgehalt des Baikaltiefenwassers erkennen läßt [BROOKS 1950]. Immerhin ist es möglich, daß sich derart tiefe Seen schon beim geringsten Elektrolytanstieg mit der Tiefe wenigstens über lange Zeiten hin meromiktisch verhalten.

Die dimiktischen Seen verteilen sich auf die C- und D-Klimate, also auf die feuchttemperierten, soweit ihre Ozeanität nicht immer frostfreie Winter garantiert (westl. Großbritannien, Brit. Kolumbien) und die subarktischen (feuchtwinterkalt und wintertrockenkalt) Klimate. In den entsprechenden Breiten der Südhalbkugel nimmt das Festland nur noch ganz geringe Areale ein, weshalb auch der Ozeanitätsgrad besonders hoch erscheint, sodaß warm- und kaltmonomiktische Seen oft in engster Nachbarschaft vorkommen können. Dimiktische Seen sind also hauptsächlich in den höheren Lagen der südlichen Anden [LÖFFLER, im Druck], den Gebirgen Neuseelands und vielleicht Australiens zu erwarten.

³ Auch von den Hochgebirgen der USA sind erst jüngst kalt monomiktische Seen bekanntgeworden (Colorado).

Zusammen mit den kalt monomiktischen Seen bilden sie den zahlenmäßig umfangreichsten Teil aller Binnenseen überhaupt. (Umfassen doch schon die vorwiegend kalt monomiktischen, aber auch dimiktischen Gletscherrandseen, allerdings einschließlich der epilimnischen, also flachen Gewässer, mehr als 90% der gesamten Binnengewässer!) Daß sie zu den bestuntersuchten Seen gehören, braucht nicht besonders betont zu werden.

c) Der warm monomiktische See: er gehört auf der Nordhalbkugel hauptsächlich den warmen, sommertrockenen, aber auch den feuchttemperierten (beide C-)Klimaten an, soweit letztere unter starkem ozeanischen Einfluß stehen, also z. B. in Westschottland und Britisch Kolumbien. Auf der Südhalbkugel entsprechen dieser Gruppe das hochozeanische Regenwaldklima (C), ferner die Graslandklimate der argentinisch-uruguayischen Pampa, des südafrikanischen Velds und Südostaustraliens; doch auch in den warmen sommertrockenen Klimaten der Südhalbkugel werden solche Seen zu erwarten sein.

Diese dritte, außerhalb der Wendekreise gelegene Gruppe, nimmt einen verhältnismäßig begrenzten Raum ein, vor allem deshalb, weil das entsprechende Gebiet vom altweltlichen Trockengürtel stark eingeengt wird und auch auf der Südhalbkugel aride Gebiete das Areal begrenzen.

Eine Reihe von Untersuchungen liegen über solche Seen von der Nordhalbkugel vor (z. B. aus Italien, Mazedonien, Japan, USA.), während von der südlichen Hemisphäre erst jüngst Daten gelegentlich eigener Untersuchungen [LÖFFLER, im Druck] in Chile bekannt wurden. Aus dem übrigen Gebiet fehlen meines Wissens derzeit Angaben.

2. die tropischen Seen

Den Klimaten der äquatorialen Zone fehlen deutlich ausgeprägte thermische Jahreszeiten, sie sind ausgesprochene Tageszeitenklimate. Dementsprechend sind es die Größe der Temperaturschwankung innerhalb eines Tages und der Mittelwert, um den diese pendelt, die das thermische Geschehen in den tropischen holomiktischen Seen bestimmen. Ich habe deshalb auch schon darauf hingewiesen [LÖFFLER, im Druck], daß man innerhalb der Tropen für die Seen das jährliche durch ein tägliches Wärmebudget ersetzen müsse. Die Größe dieser Temperaturschwankungen nimmt im allgemeinen vom fast isothermen Af-Klima (feuchtheißes Urwaldklima) einerseits gegen die anschließenden trockeneren bzw. periodisch trockenen Gebiete (Aw-Klima), andererseits mit zunehmender Höhe [TROLL 1932] zu. Sie erreichen ihre höchsten Werte in den trockenen Randgebieten und den andinen Hochländern. Dem entsprechen nun folgende thermische Seetypen:

a) Der oligomiktische See: Ihm ist eine hohe Temperatur (20°—30° C), eine hohe Stabilität bei geringer thermischer Schichtung (d. h. also innerhalb geringer Temperaturdifferenzen) und das Ausbleiben von Vollzirkulationen über lange Zeiträume hin eigen, sodaß man in manchen extremen Fällen von „thermischer Meromixis“ sprechen könnte. Auch zirkulieren die oligomiktischen Seen, ebenso wie die warm polymiktischen, infolge der hohen Temperatur viel heftiger als etwa die dimiktischen, sobald einmal Vollzirkulation eingetreten ist⁴.

Seen dieser Art sind vor allem von RUTTNER [1931], JUDAY [1915], BEAUCHAMP [1953], GESSNER [1955] u. a. ausführlich beschrieben worden und

⁴ Die beiden warmen Tropenseen sind daher auch in ihrem Zirkulationsmechanismus — im Gegensatz zu allen übrigen thermischen Typen — weitgehend vom Wind unabhängig. Es sind vielmehr regelmäßig die Abkühlung der obersten Wasserschichten und die dadurch entstehenden heftigen Konvektionsströme allein, die zur Vollzirkulation führen.

zwar vorwiegend — wie dies ja auch zu erwarten ist — aus dem tropischen Regenwaldklima (Af) mit feuchtheißem Urwaldklima in Mittel-(Süd-)Amerika, Zentralafrika und dem Sundaarchipel. Aus dem riesigen Amazonasgebiet liegen bis jetzt noch keine Berichte vor. Der oligomiktische See scheint also — es liegen wenigstens bisher keine anderen Ergebnisse vor — die Entsprechung des Af-Klimas zu sein.

b) Der warm polymiktische See: Er nimmt vor allem den Raum der periodisch trockenen Savannengebiete (Aw) ein, bildet tagsüber hohe Stabilitäten aus und zirkuliert besonders während der Trockenzeit im Verlauf der nächtlichen Abkühlung, wobei auch diese Zirkulationstemperaturen noch hoch liegen (meist über 10°C ⁵). Angaben über solche Seen verdanken wir aus Afrika MORANDINI [1940], BEADLE [1930, 1932], DAMAS [1955], WORTHINGTON & BEADLE [1932], denen man entnehmen kann, daß bei extremer Tiefe der Zeitraum der nächtlichen Abkühlung nicht mehr ausreicht, um die Zirkulation bis zum Grund vordringen zu lassen. Dies dürfte vor allem beim Nyassa-See [BEAUCHAMP 1953] der Fall sein, der somit eine Tendenz zu Meromixis zeigt. Ähnliche Fälle sind mir sonst nicht bekannt.

Der warm polymiktische See tritt außerdem in tropischen Bergzonen, an den kalt polymiktischen Seen nach unten anschließend, auf. Wenigstens scheinen einige, freilich nicht besonders tiefe Gewässer Perus, z. B. der Huaypo-See bei Cusco [LÖFFLER, im Druck] darauf hinzudeuten. Aus Südamerika liegen sonst Beispiele nur aus Venezuela [GESSNER 1955] vor, doch wurden während der kurzen Beobachtungszeit keine Vollzirkulationen beobachtet. Häufig zirkulierende, warme Tropenseen sind noch auf Madagaskar, in Vorder- und Hinterindien sowie NO-Australien zu erwarten.

c) Der kalt polymiktische See: Bei verhältnismäßig niedriger Temperatur zirkulieren diese Seen fast ununterbrochen und bilden niemals eine stabile Schichtung aus. Sie entsprechen ganzjährig dem Sommerzustand der kalt monomiktischen Gewässer, zeigen aber wahrscheinlich viel konstantere Mitteltemperaturen.

Der kalt polymiktische See ist durch seine hohe Lage in den Gebirgen der Tropen gekennzeichnet und dürfte außerhalb Südamerikas nur noch auf sehr begrenzten Arealen Afrikas und Neu Guineas zu erwarten sein. Untersuchungen an derartigen Seen konnten jüngst in Peru [LÖFFLER, im Druck] durchgeführt werden, ihre Lage wird vor allem durch die Arbeiten von TROLL [1932, 1951] umschrieben.

In den Tropen herrscht in entsprechender Meereshöhe die weitaus größte Frostwechselhäufigkeit auf der Erde. Sie hängt mit den Tageszeitenklimaten innerhalb der Tropen zusammen, die ab einer bestimmten Höhenstufe zum ständigen Frostwechsel führen. Es war das Verdienst TROLLS, die tropischen Hochgebirge mit diesen Eigenschaften von den übrigen Hochgebirgsklimaten scharf zu trennen und die tropischen Höhenklimate zu kennzeichnen. Nach den Untersuchungen TROLLS ist innerhalb der tropischen Anden von 3000 m aufwärts mit Frösten zu rechnen und bei 3800 m sind schon gegen 300 Tage des Jahres Frostwechseltage. Den eigenen Messungen an zahlreichen kalt polymiktischen Gewässern in Peru zufolge scheint die Grenze, unterhalb welcher keine sich ständig kalt polymiktisch verhaltenden Gewässer mehr auftreten, mit der unteren Grenze

⁵ Dagegen können die warm polymiktischen Seen während der Regenzeit eine dem oligomiktischen See ähnliche thermische Situation zeigen.

des ständigen Frostwechsels zusammenzufallen, bzw. (nach TROLL) mit der unteren „Paramo“-Grenze und liegt somit teilweise noch unterhalb der oberen Ackerbaugrenze.

Wie sich die Seen innerhalb der periodischen Frostwechselzone verhalten, kann vorläufig nicht beurteilt werden, da entsprechend zahlreiche Daten von tieferen Gewässern fehlen. Es ist möglich, daß sie sich, wie vielleicht auch der Titicacasee [MONHEIM 1956], über kurze Perioden hin warm polymiktisch verhalten, doch wird in diesem Fall die Länge dieser Perioden und damit auch die ökologische Prägung für eine Zuordnung maßgeblich sein. Leider liegen gerade vom Titicacasee nur wenige verlässliche Temperaturserien, keine O₂-Messungen und quantitativen Planktonserien vor.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß das südlich der antarktische Waldgrenze bei hohen Niederschlägen entstehende, isotherme und ständig kühle subantarktische Regenklima, zu dem es auf der Nordhalbkugel kein Gegenstück gibt, in entsprechend kleinen Gebieten (z. B. Macquarie-Insel) Seen erwarten läßt, die eine Stellung zwischen kalt monomiktisch und kalt polymiktisch einnehmen dürften: sie bilden im Sommer keine stabile Schichtung aus und sind im Winter bei inverser Schichtung eisfrei. Als Seen innerhalb eines, wenn auch schwach ausgeprägten Jahreszeitenklimas sind sie (falls vorhanden) doch zu den kalt monomiktischen Seen zu stellen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß zwischen den einzelnen holomiktischen Typen und den Klimaten der Erde eine deutliche Beziehung besteht, die besonders mit Hilfe der TROLLSchen Isoplethenlehre herausgearbeitet werden kann. Daß die Seentypen dabei nicht genau mit den Grenzen der einzelnen Klimagebiete wechseln, ist schon durch jene thermische Verzögerung verständlich, durch die sich jeder größere Wasserkörper gegenüber dem Land auszeichnet. Nur sehr flache Gewässer und Tümpel werden in ihrem Temperaturgang einem Isoplethen-Diagramm entsprechen. Innerhalb der außertropischen und der tropischen Gruppe läßt sich eine Abhängigkeit von der Tiefe, sehr grob schematisiert, insofern skizzieren, als an den nördlichen Grenzen der außertropischen jeweiligen Seentypen immer nur noch sehr tiefe Gewässer ihren Typ repräsentieren. Ebenso schieben sich vom oligomiktischen gegen das warm polymiktische und vom warm polymiktischen gegen das kalt polymiktische Gebiet hauptsächlich die tiefen Seen vor⁶.

Vereinfacht läßt sich folgende Beziehung angeben:

Außertropisches Gebiet:

- kalt monomiktisch: E-Klima (außertropisch)
- dimiktisch: D-Klima, C-Klima mit kontinentalem Einfluß
- warm monomiktisch: C-Klima (sommertrocken oder mit starker Ozeanität)

Tropisches Gebiet:

- oligomiktisch: Af-Klima
- warm polymiktisch: Aw-Klima, tropische Bergwälder (bei KÖPPEN C)
- kalt polymiktisch: „Paramo“- und Punastufe (TROLL) (E-Klima bei KÖPPEN)

⁶ Daß zwischen fast allen thermischen Typen Übergänge vorkommen, also dimiktische Seen sich z. B. manche Jahre warm oder kalt monomiktisch verhalten können, ist bekannt. Doch bilden derartige Übergänge — in den Grenzgebieten der einzelnen Typen auftretend — eine Minderheit.

In der beigegebenen Tafel habe ich den Versuch unternommen, die Verteilung der eben genannten 6 holomiktischen Typen auf der Erde festzulegen, wobei ich mir bewußt bin, daß die eingezeichneten Grenzen zum Teil recht unsicher sind. Die ariden Gebiete wurden, da holomiktische Seen dort nicht zu erwarten sind, überhaupt weiß gelassen, doch ist auch die Grenzziehung in manchen anderen Gebieten illusorisch, da holomiktische Seen nur vereinzelt auftreten (Spaniens tiefster See z. B. mißt 62,5 m, WASMUND 1934), alle übrigen sind schon kaum mehr als holomiktische Seen aufzufassen.

Als gesichert können die Grenzen vor allem für den größten Teil Europas, für Iran und vor allem Japan (YOSHIMURA [1936] hat selbst die nördlichste Grenze für warm monomiktische und die südlichste Grenze für dimiktische Seen festgehalten), ferner für den Sunda-Archipel und das westliche Südamerika gelten. Auch aus Nordamerika liegt reiches Untersuchungsmaterial vor.

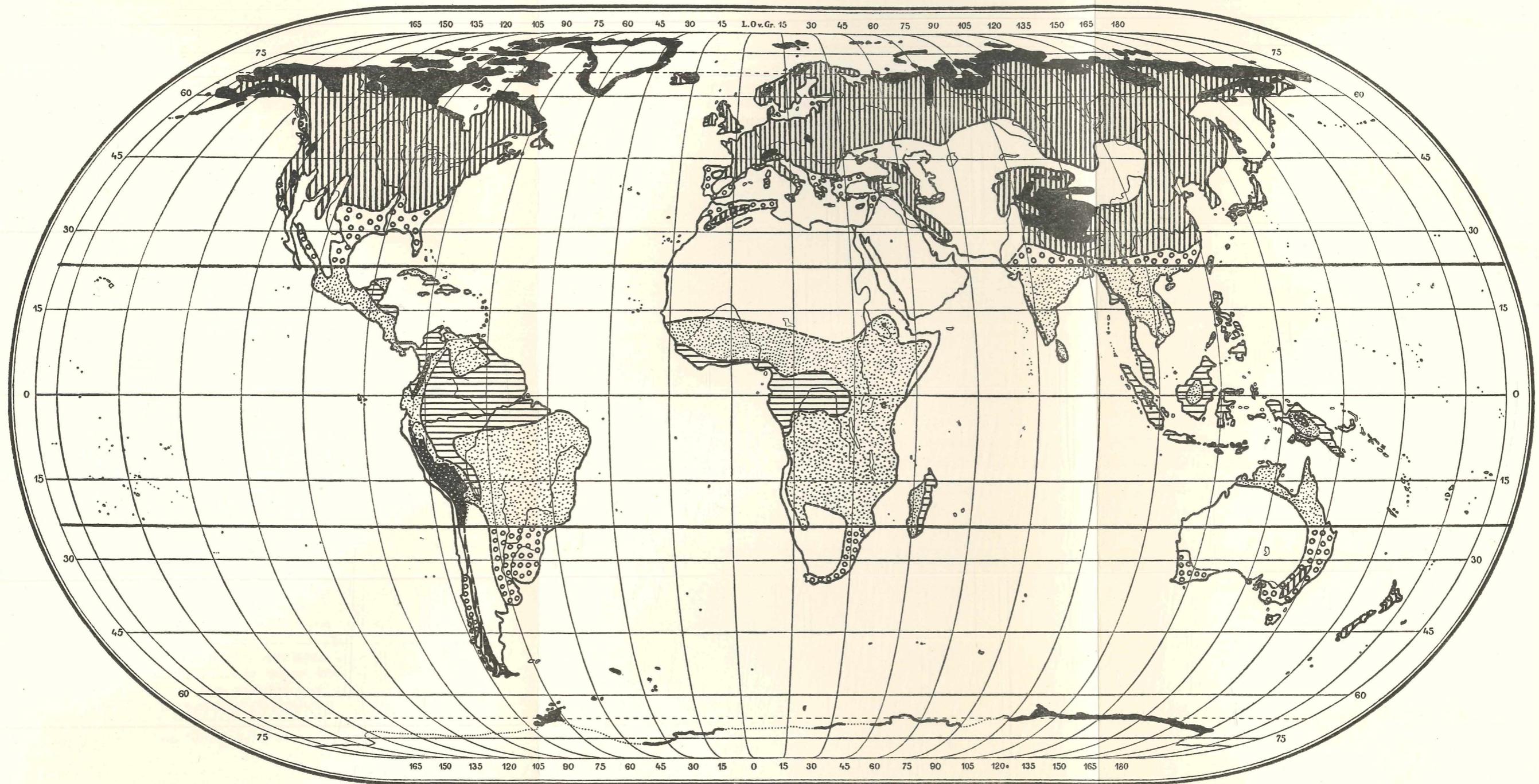
Um eine vorläufige Übersicht zu ermöglichen, habe ich in Afrika, dem östlichen Südamerika und Australien die Grenzen der holomiktischen Typen den Klimaten entsprechend eingezeichnet, die nördliche Grenze des warm monomiktischen Sees mit Hilfe der nördlichen Reisbaugrenze in Nordamerika festgehalten. Es werden ohne Zweifel in vielen Gebieten noch manche Korrekturen anzubringen sein, doch möchte ich mit dieser Karte vor allem die großräumige Verteilung der holomiktischen Typen und den Umfang der Areale darstellen.

In einer vorbereiteten Studie werde ich auf die ökologischen Grundlagen dieser thermischen Typen und ihre faunistischen Elemente eingehen, was im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war.

L i t e r a t u r

- D'ANCONA, U.: 1941 Relazione sulle ricerche idrobiologiche e idrografiche compiute nel Lago di Nemi. Int. Rev. Hydrobiol. 41.
- ANDERSEN, F. S.: 1946 East Greenland Lakes as Habitats for Chironomid Larvae. Medd. om Grönland, 100, 10: 1—65.
- BALDI, E.: 1949 Alcuni caratteri generali dei laghi marginali sudalpini. Verh. int. Ver. Limn. X.
- BEADLE, L. C.: Scientific Results of the Cambridge Expedition to the East African Lakes, 1930. I. 4. The Waters of Some East African Lakes. J. Linn. Soc. London, Zool., 38: 157—211.
- BEAUCHAMP, R. S. A.: 1939 Hydrology of Lake Tanganyika. Int. Rev. Hydrobiol. 39.
- 1953 Hydrological Data from Lake Nyasa. J. Ecol. 41, 2: 226—239.
- BROOKS, J. L.: 1950 Speciation in Ancient Lakes. Quart. Rev. Biol. 25: 30—176.
- BRUNDIN, L.: 1949 Chironomiden und andere Bodontiere der südschwedischen Urgebirgsseen. Rep. Inst. Freshwat. Res. Drottningholm, 30: 1—914.
- DAMAS, H.: 1937 Quelques caractères écologiques de trois lacs équatoriaux: Kivu, Edward, Ndalga. Ann. Soc. Royale Zool. Belgique. I. LXVIII.
- 1953 Les lacs du Ruanda et leurs problèmes. *ibid.* LXXXIV.
- 1953 Recherches limnologiques dans quelques lacs du Ruanda. Verh. int. Ver. Limn. 12: 335—341.
- EKMANN, S.: 1922 Djurvärldens utbredningshistoria på Skandinaviska halvön. A. Bonniers, Stockholm.
- EKMANN, S., LOHAMMAR, G., RHODE, W., SKUJA, H.: 1950 Undersökningar av sjöar i Torne Lapmark med särskild hänsyn till deras plankton och vattenkemi. Stat. Forskningsråds Årsbok 1948/49. Stockholm.
- FEHLMANN, J. W.: 1912 Die Tiefenfauna des Luganer Sees. Int. Rev. Hydrobiol. Suppl. 1912.
- FINDENEGG, I.: 1937 Holomiktische und meromiktische Seen. Int. Rev. Hydrobiol. 35.
- 1955 Trophiezustand und Seetypen. Schweiz. Zeitschr. Hydrologie 17, 87—97.
- FOREL, F. A.: 1880 „Températures lacustres: Recherches sur la température du Lac Léman et d'autres lacs d'eau — douce. Arch. sci. phys. et nat. (ser. 3) 35: 505—575.
- 1901 Handbuch der Seenkunde. Allgemeine Limnologie. Bibliothek Geograph. Handb. F. Ratzel Stuttgart.
- GAURIER, L.: 1934 Les lacs des Pyrénées Françaises. Toulouse et Paris.
- GESSNER, F.: 1955 Die limnologischen Verhältnisse in den Seen und Flüssen von Venezuela. Verh. int. Ver. Limn. XII: 284—295.
- GORCEIT, Ch.: 1922 Répartition des températures dans le lac du Bourget. Rev. Géogr. Alpine X.
- HACKER, W.: 1933 Sichttiefe, Wärmegang und Durchlüftung in Hochgebirgsseen. Geogr. Jahresber. Österr. XVI.
- HOLSINGER, E. C. T.: 1955 The Plankton Algae of 3 Ceylon Lakes. Hydrobiol. VII.

- HUTCHINSON, G. E.: 1937 A Contribution to the Limnology of Arid Regions. *Transact. Conn. Acad. Arts & Sc.* 33: 47—132.
— The Study of Lakes, im Druck.
- HUTCHINSON, G. E. & LÖFFLER, H.: 1956 The Thermal Classification of Lakes. *Proc. Nat. Acad. Sc.* 42,2: 84—86.
- JUDAY, Ch.: 1915 *Limn. Studies on Some Lakes in Central America*. *Trans. Wisc. Acad. Sc.* XVIII, 1.
- KÖPPEN, W.: 1936 Das geographische System der Klimate. In: *Handb. d. Klimatologie I*, Teil C, Berlin.
- LÖFFLER, H.: *Limnologische Untersuchungen an andinen Gewässern*. Im Druck.
- LÖNNERBLAD, G.: 1933 Die Thermik der Seen und die Seetypenlehre. *Arch. Hydrobiol.* 25.
- MONHEIM, F.: 1956 Beiträge zur Klimatologie und Hydrologie des Titicacabeckens. *Heidelberger Geogr. Arbeiten*, Heft 1: S. 121.
- MORANDINI, G.: 1940 *Missione di studio al Lago Tana*, 3: *Ricerche limnologiche*, 1, Rom.
- MURRAY, J.: 1909 in: E. H. Shackleton. *The Heart of the Antarctic*. London. W. Hienemann.
- ÖLOFSSON, O.: 1918 Studien über die Süßwasserfauna Spitzbergens. *Zool. Bidr. Upsala*, 6.
- PESTA, O.: 1929 *Der Hochgebirgssee der Alpen*. Die Binnengewässer, VIII. Stuttgart.
- RAWSON, D. S.: 1953 The Limnology of Amethyst Lake, a high alpine type near Jasper, Alberta, *Canad. Journ. Zool.* 31: (193—210).
- RICCARDO, R.: 1929 Il lago di Scamo. *Boll. Reale Soc. Geogr. Ital.* VI.
- RIKOJA, H.: 1935 zit. v. List of Estonian Lakes, Tartu 1934 in: I. R. 32.
- RUTTNER, F.: 1931 Hydrographische und hydrochemische Beobachtungen auf Java, Sumatra und Bali. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 8, „Trop. Binnengewässer“ 1: 197—454.
— 1952 a Grundriß der Limnologie. 2. Aufl. de Gruyter, Berlin.
— 1952 b Planktonstudien der Deutschen Limn. Sunda-Expedition. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* XXI „Trop. Binnengewässer 1/2“: 1—274.
- RYLOV, W. M.: 1931 Einige Resultate der limn. Unters. am Kardywatsch-See. *Arch. Hydrobiol.* XXII.
- STRÖM, K. M.: 1934 *Flakevattn*. Norsk. Vid. Ak. Oslo. *Math. nat. Kl.* 5.
— 1938 *Norwegian Mountain Lakes*. *Arch. Hydrobiol.* XXXIII, 1.
- THIENEMANN, A.: 1931 *Tropische Seen und Seetypenlehre*. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 9, „Trop. Binnengewässer“: 205—231.
— 1950 *Verbreitungsgeschichte der Süßwassertierwelt Europas*. Die Binnengewässer, 18.
— 1954 *Chironomus*. Leben, Verbreitung und wirtschaftl. Bedeutung der Chironomiden. *ibid.* 20.
- TROLL, C.: 1932 Die Landschaftsgürtel der tropischen Anden. *Verh. d. 24. dt. Geographentages zu Danzig 1931*. Breslau.
— 1943 *Thermische Klimatypen der Erde*. *Pet. Mitt.* 89.
— 1951 *Tatsachen und Gedanken zur Klimatypenlehre*. *Festschr. J. Sölch*. Wien.
- WASMUND, E.: 1934 *Der Karstquellsee Estany de Bamyoles in Catalonien*. *Geogr. Wochenschrift* 2.
- WORTHINGTON, E. B., BEADLE, L. C.: 1932 *Thermoclines in Tropical Lakes*. *Nature* 9.
- YOSHIMURA, S.: 1931 *Contr. to the Knowledge of the Strat. of Fe and Mn in Lake Water of Japan*. *Jap. Journ. of Geol. and Geogr.* IX, 1—2.
— 1936 *A Contr. to the Knowledge of Deep Water Temp. of Japanese Lakes I. u. II. (Winter and Summer Temp.)* *Jap. Journ. Astronomy and Geophysics*, XIII, XIV.



Weiße Landflächen: Gebiete ewigen Frostes und aride Zonen ohne holomiktische Seen; schwarz: Gebiet der kalt monomiktischen Seen; vertikal. Schraffur: Gebiet der dimiktischen Seen; Kreise: Gebiet der warm monomiktischen Seen; punktiert: Gebiet der warm polymiktischen Seen; horiz. Schraffur: Gebiet der oligomiktischen Seen; schwarz mit weißen Punkten: Gebiet der kalt polymiktischen Seen.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft](#)

Jahr/Year: 1957

Band/Volume: [99](#)

Autor(en)/Author(s): Löffler Heinz

Artikel/Article: [Die klimatischen Typen des holomiktischen Sees 35-44](#)