

h 11 129  
ТРУДОВЕ НА ЧЕРНОМОРСКАТА БИОЛОГИЧНА СТАНЦИЯ ВЪ ВАРНА  
ARBEITEN AUS DER BIOLOGISCHEN MEERESSTATION  
AM SCHWARZEN MEER IN VARNA, BULGARIEN

ОТДЪЛЕНЪ ОТПЕЧАТЪКЪ  
SONDERABDRUCK

ДАРЪ ОТЪ АВТОРА

1.

A. Valkanov  
Hydrographische untersuchungen an  
den Varna-Seen

№ 10 и 11

1.

А. Вълкановъ  
Хидрографски изследвания върху  
Варненскитѣ езера



Universitätsdruckerei — Sofia  
Phisico-Mathematischen Facultät  
1941—1942

## HYDROGRAPHISCHE UNTERSUCHUNGEN AN DEN VARNA-SEEN

Von A. Valkanov

Längs der bulgarischen Schwarz-See-Küste befinden sich 12 Seen (s. Karte 1), die von Norden nach Süden heissen wie folgt:

- |                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| 1. Durankulak-See | 7. Atanaskjoi-See |
| 2. Sabla-See      | 8. Vajakjoi-See   |
| 3. Tuslata-See    | 9. Mandra-See     |
| 4. Gebedže-See    | 10. Alepu-See     |
| 5. Varna-See      | 11. Djavolsko-See |
| 6. Pomorie-See    | 12. Karaagač-See  |

Drei derselben, und zwar die ersten drei, gehörten bis 1940 zu Rumänien (Dobruđa) und sind erst seitdem wieder unserer Heimat einverleibt. Die beiden Varna-Seen befinden sich nördlich vom Balkangebirge in der Umgebung der Stadt Varna, während die übrigen 7 südlich vom Balkan und zwar die meisten in der Nähe der Stadt Burgas liegen. Die meisten der Seen sind je nach dem nächsten Siedlungsort genannt. Es gibt noch mehrere kleinere versumpfte Seen, die ich hier unberücksichtigt lassen will.

Bisher sind die Seen hydrographisch verhältnismässig gut untersucht worden und gibt es auch schon eine Reihe von Veröffentlichungen darüber. Da aber bis heute keine zusammenfassende Arbeit in einer fremden Sprache publiziert wurde, die geeignet wäre, auch ausländischen sich interessierenden Kreisen die Ergebnisse dieser Untersuchungen zugänglich zu machen, will ich versuchen, in einer Serie von Arbeiten diese Lücke auszufüllen. Als Grundlage für meine geplanten Veröffentlichungen dienen mir vor allem eigene Untersuchungen, die ich schon vor 10 Jahren begonnen habe, sowie die Beobachtungen anderer, teils bulgarischer, teils ausländischer Untersucher.

Ich finde es für zweckmässig, mit einem kurzen Überblick über die Morphometrie und Hydrologie des Schwarzen Meeres zu beginnen, wodurch jene kausalen Beziehungen, die zwischen der Hydrologie der Strandseen und der des Meeres bestehen, dem Leser leichter verständlich gemacht werden.

Das Schwarze Meer ist ein Bassin mit 424,013 km<sup>2</sup> Oberfläche. Im Vergleich dazu ist die Oberfläche der Ostsee ohne Kattegat 365,000 km<sup>2</sup>. Seine grösste Tiefe beträgt 2,245 m. Seine Küstenlinie ist 3,685 km lang; davon sind 387 km bulgarisch (s. Karte 4). Vor der bulgarischen Küste ist das Meer in einer breiten Strecke flach, nur 20—50 m tief. Das Schwarze Meer ist ein katohalines Bassin, d. h. sein Salzgehalt steigt beträchtlich von oben nach unten: An der Oberfläche beträgt der Salzgehalt 15 bis 18‰, wobei er vor der Mündung der grossen russischen Flüsse bis 10—12‰ fällt. Am grössten ist er in den beiden durch die Oberflächenstömungen abgegrenzten halostatischen Bezirken, wo ständig höhere Zahlen als 18‰ vorgefunden worden sind (s. Karte 5). Von ungefähr 50 m Tiefe an steigt der Salzgehalt allmählich und von 200 m bis zum Boden bleibt er ca. 22‰. Die Unterschicht dieses Meeres, d. h. von 200 m und stellenweise von 150 m abwärts, ist mit H<sub>2</sub>S angereichert. Der Salzgehalt des Oberflächenwassers ist jahreszeitlichen Änderungen unterworfen: Im Frühjahr sinkt er bis 16‰ und im Herbst steigt er von neuem bis 18‰. Diese Erscheinung steht in Zusammenhang mit der wechselnden Menge des Wassers der Donau und der grossen russischen

Zuflüsse. Diese Aussüßung des Oberflächenwassers ist nur im Bereich der Oberflächenströmungen fühlbar, die unter dem Einfluss dieser Flüsse stehen (s. Karte 5). Mit dem Wechsel der Wassermenge der Zuflüsse hängen noch zwei wichtige Erscheinungen zusammen: 1. Der Wasserstand des Meeres ist jahreszeitlichen Änderungen unterworfen; im Frühjahr ist er hoch, im Herbst und Winter sinkt er um etwa 30 cm. Auch der Wasserstand aller derjenigen Seen, die eine offene Verbindung mit dem Meer haben, ist denselben jahreszeitlichen Änderungen unterworfen. 2. Der Wasserstand vor der Donaumündung ist etwa 1 m höher als der Wasserstand vor dem Bosphorus (Angeloff, 1935). Das steht in Zusammenhang mit der ständigen von der Donaumündung nach dem Bosphorus gerichteten Strömung (s. Karte 5).

Im allgemeinen ist die nordwestliche und nördliche Küste des Schwarzen Meeres sehr reich an Seen. Die bulgarische Küste, wie auch die anato-lische und die kaukasische, ist arm an Seen. Fast alle Seen, die in der Um-ggebung des Schwarzen Meeres liegen, sind als *Limanen*, d. h. als gesunkene Flusstäler aufzufassen. Viele davon stehen in offener Verbindung mit dem Meer und sind infolgedessen mehr oder weniger brackisch geworden. Die Höhe des Salzgehaltes eines Limans hängt mit der Menge des zufließenden Flusswassers einerseits und mit der Menge des eindringenden Meereswassers andererseits zusammen. Jene Limanen, die irgendwie die Verbindung mit dem Fluss verloren haben, weisen einen höheren Salzgehalt als das Meer selbst auf. Andererseits aber gibt es Limanen, die die ursprüngliche Verbindung mit dem Meer aufgegeben haben und infolgedessen vollkommen ausgetüßt sind.

Bei uns sind alle diese Kategorien von Seen vertreten, zu dem sich noch ein Seentyp gesellt — ein See, der nicht als Liman, sondern als *Lagune*, d. h. als ein durch Sandstreifen vom Meer abgetrennter See, aufzufassen ist.

Die ersten drei Seen, Durankulak-See, Šabla-See und Tuzlata-See, bis vor kurzem Rumänien angeschlossen, sind hydrologisch erst in letzter Zeit, und zwar von mir, untersucht worden. Die Varna-Seen sind die am besten unter-suchten Seen unserer Schwarz-Meer-Küste. Daran sind mehrere bulgarische wie auch ausländische Forscher beteiligt. Die Burgas-Seen sind ebenfalls schon Gegenstand von Untersuchungen gewesen, die zum Teil von der bulgarischen Ichthyologischen Station, zum Teil durch die Salinenverwaltung, zum Teil auch von mir ausgeführt wurden. In dieser meiner Arbeit gebe ich einen Überblick über den heutigen Stand unserer Kenntnisse betreffs der Hydrologie der beiden Varna-Seen. Gleichzeitig stellt diese meine Arbeit einen Beitrag zur Frage der Bedeutung des Windes bei den herbstlichen Durchmischungen des Wassers dar.

## Die Varna-Seen

### BULGARISCH: VARNENSKI ESERA

Die Lage beider Varna-Seen, sowie ihre Verbindung untereinander und in Zusammenhang damit ihre gegenseitige Beein-flussung in hydrographischer Hinsicht, veranlasst mich, sie zusam-men zu betrachten.

Die Varna-Seen gehören ein und demselben Flusssystem an, stellen sozusagen zwei Teile einer ursprünglichen allgemeinen Bucht dar. Zuerst ist der obere Varna-See vom Meer abgetrennt worden und erst dann der untere, worüber uns auch die geolo-gischen Verhältnisse der Umgebung belehren. Der Sanddamm, der den unteren See vom Meere trennt, und der nur ungefähr 2 km breit ist, wächst an Breite sehr schnell heutzutage mit ca.

60 cm pro Jahr, so dass man annehmen könnte, dass der untere See vor etwa 3000 Jahren vom Meer abgetrennt worden ist. Landeinwärts befinden sich noch einige kleinere Seen, die zu demselben System gehören und die zum Teil verlandet, zum Teil aber trockengelegt sind. Diese kleinen Seen stellen in hydrographischer Hinsicht keine Besonderheiten dar, aus welchem Grunde ich sie hier beiseite lasse. — Die Varna-Seen werden von einer, 7 km weit liegenden, grossen Karstquelle mit 3·7 cbm/S Wasser, sowie von einem kleinen Fluss (Provadiiska reka) gespeist. Hier und da befinden sich in ihrer Umgebung wie auch in ihnen selbst noch mehrere kleinere Karstquellen.

**Geschichtliches.** Bis vor 30 Jahren waren die beiden Varna-Seen reine Süsswasserseen. Ihr Wasserstand ist damals beträchtlich höher als der des Meeres gewesen: der des oberen Sees 2·2 m und der des unteren 1 m. Bis zum Ende des vorigen Jahrhunderts hat der untere Varna-See sein Wasser durch einen natürlichen Kanal ins Meer abfliessen lassen (s. Karte 3). Dieser Kanal wurde um das Jahr 1900 reguliert (s. Karte 2). Aus technischen Gründen ist dann der natürliche, bereits regulierte Kanal 1909 durch einen künstlich ausgegrabenen ersetzt worden. Der letztere ist 2·5 km lang, 50 m breit und 5 m tief und wird von verhältnismässig grossen Seeschiffen befahren. (s. Taf. 2). Durch die Neuanlage des Abflusskanals wurde viel Platz gewonnen, der für die Erweiterungsbauten am Bahnhof, sowie an der Hafenanlage ausgenützt wurde. Durch die Kanalbauten wurde der Wasserstand des Sees auf ungefähr 1 m erniedrigt und wurde sein Wasser durch Einfließen von Meereswasser brackisch.

Zwei Jahre nach den Kanalausgrabungen, d. i. 1911, hat der russische Forscher Sernov einen Salzgehalt in ihm beobachtet, der dem heutigen vollkommen entspricht — ein Zeichen, dass die Versalzung des Sees sehr rasch vor sich ging. Auch wurde  $H_2S$  festgestellt — ein Gas, das heutzutage vorkommt („Der Schlamm stank sehr stark nach  $H_2S$ “). Die Versalzung hatte noch das Aussterben der meisten Süsswasserfische zur Folge, von denen sich nur ein Rest nach dem westlichen Teile des Sees, der noch schwach brackisch ist, zurückzog.

Bis 1923 waren beide Varna-Seen durch einen natürlichen, sich stark schlängelnden Kanal verbunden, der durch einen künstlichen 3·4 km langen, 30 m breiten, 2·5—3·5 m tiefen Kanal ersetzt wurde (s. Karte 7). Dadurch wurde der Wasserstand des oberen Sees auf 2·2 m erniedrigt und das Wasser schwach brackisch. Gleichzeitig wurde ca. 2000 ha Boden befreit, der jetzt zum Teil als Ackerland ausgenützt wird. Infolge der Trockenlegung der nahrungsreichsten Teile des Sees, sowie infolge der Versalzung seines Wassers hat der Fischbestand auch dieses Sees stark gelitten.

Hier will ich einiges über die Namen der beiden Varna-Seen erwähnen. Auf den bulgarischen und ausländischen Karten, sowie in der in- und ausländischen Literatur sind die Varna-Seen verschieden benannt. So ist z. B. der erste, der obere See, als Gebedže, Devna-, Oberer Gebedže-See, während der Untere unter den Namen Devna-, Gebedže-, Unterer Gebedže- oder Varna-See bekannt ist. Kassner bezeichnet den unteren Varna-See als „Devna-See“. Im Anschluss an ihn nannte Halbfass denselben See „Devno“. Wir werden die gebräuchlichsten und passendsten Namen gebrauchen, nämlich:

Gebedže-See für den Oberen Varna-See  
Varna-See für den unteren Varna-See.

**Erforschungsgeschichte.** 1. Die erste genaue Darstellung des Varna-Sees, finden wir auf der alten englischen Karte vom Jahre 1854. Diese Karte ist unter anderem auch deswegen wichtig, weil in ihr die einzigen zur Zeit vorhandenen Einzelzeichnungen über den alten natürlichen Kanal, der den See mit dem Meere verband, zu finden sind. Auf derselben Karte (jedenfalls neuerer Ausgabe) ist ein Teil des Sees mit genauen Isobathen wiedergegeben.

2. Die 1889 erschienene russische topographische Karte Bulgariens enthält genaue Umrisse beider Varna-Seen im Masstab 1:40,000

3. Leutnant Stoikov hat auf Grund von 3811 Lotungen eine genaue Tiefenkarte des Varna-Sees im Masstab 1:10,000 entworfen. Diese Karte ist auch noch heute für jeden, der sich mit den Seen beschäftigt, unentbehrlich.

4. Auf Grund dieser Karte hat der damalige Professor für Geographie an der Sofioter Universität, A. Ischirkoff, eine ausführliche morphometrische Studie veröffentlicht, der wir uns bedient haben.

5. Die Arbeit Ischirkoff's ist fast ohne Abänderungen und Abkürzungen von Kassner (1906) ins Deutsche übersetzt worden.

6. Der berühmte russische Zoologe Sernov, bekannt durch seine Untersuchungen über das Schwarze Meer, hat 1911 während einer Schwarz-Meer-Expedition die bulgarische Schwarz-Meer-Küste besucht. Unter anderem hat er den Varna-See untersucht, und zwar knapp nach dessen Verbindung mit dem Meere (s. o.). Die Resultate seiner Untersuchungen finden wir in der Arbeit Lebedinzev's (1912).

7. 1934 erschien die Arbeit des damaligen Direktors der biologischen Station Varna, Prof. G. Paspaleff, unter Mitarbeit des Chemikers N. Penneff, über die Hydrologie des Varna-Sees. Die Autoren haben mit Bestimmtheit Kathalinität und starke Anothermie, sowie  $H_2S$  in den tieferen Wasserschichten festgestellt.

8. 2 Jahre später erschien die Arbeit Paspaleff's „Über die Kritiken Valkanov's“, in welcher der Autor die Richtigkeit aller seiner, in seiner ersten Arbeit aufgestellten Behauptungen aufrecht hält.

9. In letzter Zeit kam eine kurze Arbeit Paspaleff's über das Fischsterben im Varna-See heraus, die für uns insofern von Interesse ist, als hier der Autor weitere neue Behauptungen über die Hydrologie des Sees ausspricht.

10. 1935 und 1936 erschien die zusammenfassende Arbeit Valkanov's (Teil I & II) über die Brackwasser-Bulgariens, in der die Hydrologie der beiden Varna-Seen ausführlich behandelt wird. Der Autor findet nach dreijährigen Untersuchungen ausserst komplizierte hydrologische Verhältnisse in beiden Seen, deren Erörterung an dieser Stelle sich nicht eignet, umso mehr, als ihnen in dieser Arbeit ein breiter Raum gewidmet wird. Jedenfalls möchte der Autor hier nur feststellen, dass soweit seine Befunde von späteren Autoren richtig verstanden wurden, diese auch immer bestätigt worden sind.

11. 1937 publizierte derselbe Autor eine kurze Arbeit über die Varna-Seen, die als Ergänzung seiner früheren Arbeit zu betrachten ist.

12. Frau Andreitscheva-Vankova hat eine Arbeit über die ph und K (elektrische Leitfähigkeit) des Wassers des Varna-Sees veröffentlicht. Die Resultate dieser Arbeit bedürfen einer ernsthaften Überprüfung.

13. Ing. L. Boschkow, einer der Leiter der Kanalausgrabungen, hatte die glückliche Idee, im Jahre 1937 verschiedene geschichtliche Angaben und Daten über die Aushebung des Kanals zu publizieren, die für jeden Untersuchenden des Varna-Sees von Interesse sind. Ausserdem enthält diese Arbeit Angaben über die Morphometrie des Sees, über seinen Salzgehalt u. s. w., die hier berücksichtigt sind.

14. 1937 erschien eine Arbeit von der bulgarischen Ichthyologischen Station über die Hydrologie des Varna-Sees, in der die Autoren — Netschaeff und Tcherneff — den Versuch machen, die ihrer Meinung nach noch strittigen Fragen zu beleuchten.

15. Von denselben Autoren sind mehrere kleine Publikationen über den Gebelze-See veröffentlicht worden, von denen sich nur eine ausführlich mit der Hydrologie desselben befasst (Netschaeff, 1934).

16. Der Wiener Hydrobiologe Stundl hat 1938 eine kurze, aber nichtsdestoweniger inhaltsreiche Arbeit geliefert, und zwar über den Chemismus der beiden Varna-Seen sowie über die Verteilung des Planktons in den verschiedenen Tiefen derselben. Ich erlaube mir hier, meine Überzeugung zum Ausdruck zu bringen, dass vorgenannte Arbeit noch um vieles wertvoller sein würde, hätte sich der Autor einer mehr einwandfreien Methodik der Wasserschöpfung bedient (s. u.). Es ist weiter sehr zu bedauern, dass dem Autor einige, und zwar die wichtigsten, Arbeiten über den Varna-See unbekannt geblieben sind.

**Methodik.** Bei der Erforschung der Seen haben sich verschiedene Autoren verschiedener Untersuchungsmethoden bedient, indem jeder in dem Bewusstsein beharrte, dass seine Methode die genaueste sei. Dass dadurch eine Reihe von unerwünschten Kontroversen und Auseinandersetzungen entstanden, versteht sich von selbst, doch wurden die erfolgreichen Weiteruntersuchungen durch diese Vorkommnisse nicht im geringsten beeinträchtigt.

So haben sich Netschaeff & Tcherneff des Richards'schen Wasserschöpfers bedient, während Paspaleff & Peneff den „verbesserten Wasserschöpfer“ nach Apstein<sup>1)</sup> gebrauchten. Da beim Absinken dieser Apparate das Wasser nicht mit derselben Schnelligkeit durchfliesst wie das Sinken des Apparate vor sich geht (die Öffnungen sind zu eng), so eignen sie sich nicht zur Erforschung von Seen mit so stark geschichtetem Wasser, wie es der Varna-See ist. Stundl hat den Spitta-Imhoff'schen Apparat gebraucht, der überhaupt vollkommen ungeeignet ist zur Wasserentnahme aus einer bestimmten Tiefe. Valkanov und Boschko<sup>ff</sup> haben mit der Meyerschen Schöpfflasche gearbeitet (die von Valkanov ist etwas modifiziert). In letzter Zeit arbeite ich mit der Ruttner'schen Flasche.

Bei der Salzgehaltbestimmung sind verschiedene Wege begangen worden. Netschaeff & Tcherneff rechnen die Chlorzahlen mittels der Knudsen'schen Formel direkt in Salzgehaltzahlen um. Dasselbe machen die genannten Autoren für die beiden Varna-Seen. Diese Formel ist für das Schwarze Meer, wie Knipowitsch hervorgehoben hat (Knipowitsch, 1933, p. 136), nicht ohne weiteres anzuwenden. Deswegen empfiehlt dieser Autor, die Ergebnisse der Salzgehaltanalysen bloss in Chlorzahlen auszudrücken. Dies ist umso mehr angebracht, wenn es sich um Seen handelt, deren Wasser viel reicher an Karbonaten und anderen Salzen ist als das Meerwasser selbst. Paspaleff & Peneff rechnen die gewonnenen Chlorzahlen direkt in Salzgehaltzahlen um, und zwar nicht mittels der Knudsen'schen Formel, sondern einfach durch das Ausdrücken der Gesamtmenge der Salze als Na Cl, bei welcher Umrechnung, nach der Ansicht der genannten Autoren, sich nur ein verhältnismässig kleiner Fehler ergeben soll, ein Verfahren,

<sup>1)</sup> s. die spezielle Arbeit Paspaleff's (1933) über diesen Apparat.

das bestimmt vollkommen neu für die Ozeanographie ist. — Bei meinen Untersuchungen fand ich es für zweckmässig, die gefundenen Werte in Chlorzahlen auszudrücken.

Von Stundl sind Untersuchungen auch über andere Salze unternommen worden, und zwar: Ammonium-jon, Nitrit-jon, Nitrat-jon, Phosphat-jon, Sulfat-jon und Kieselsäure.

Die von Paspaleff & Peneff und Netchaeff & Tcherneff angewandte Methode zur quantitativen Bestimmung des  $H_2S$  ist ein Mittel, durch das — wie meine eigene Nachprüfungen ergaben, jederzeit und in jeder Tiefe im Varna-See „ $H_2S$ “ festzustellen ist, also auch dort und dann, wo  $H_2S$  nicht existiert. Das sind die organischen Substanzen, die das J binden. Stundl ist diesem Fehler derart ausgewichen, indem er die organischen Substanzen durch Cd zur Fällung brachte. Bei meinen bis in die letzte Zeit fortgesetzten Untersuchungen habe ich mich begnügt, das *Vorhandensein* von  $H_2S$  nur nach dem Geruch und der Verteilung des Planktons festzustellen, unter Berücksichtigung einer Reihe weiterer Umstände, — eine wohl primitive, weil nicht analytisch-chemische, doch aber *vollkommen zuverlässige Methode*.

Für die  $O_2$ -Bestimmung ist bisher mit Erfolg die Winklersche Methode angewandt worden (Stundl, Paspaleff). Ich habe mich auch derselben bedient. Die von Alsterberg empfohlene Korrektur dieser Methode habe ich; Pilwat folgend, vermieden.

Die Temperatur ist auf verschiedene Art untersucht worden. Seitens einer staatlichen Behörde werden seit Jahren Oberwassertemperaturmessungen ausgeführt. Paspaleff & Peneff haben die Temperatur mittels eines, in ihren Wasserschöpfer eingebauten Thermometers gemessen. Netchaeff & Tcherneff und Valkanov verwendeten zu ihren Temperaturmessungen ein Umkippthermometer. In letzter Zeit habe ich mir ein elektrisches Thermometer angeschafft, mit dessen Hilfe man ein Temperaturprofil in 1—2 Minuten erhält. Dieses Thermometer eröffnet ganz neue Möglichkeiten zur genauen Untersuchung der Thermik des Sees.

Die Strömungen des Varna-Sees sind bisher sowohl direkt als auch indirekt bestimmt worden. Auf die erste Art sind dieselben von Netchaeff & Tcherneff mittels eines Merz'schen Strommessers untersucht worden. Valkanov hat die Tiefenströmungen an bestimmten Stellen durch Feststellung der Ablenkung des Fadens untergetauchter Gegenstände bestimmt. Eine wieder sehr einfache Methode, aber nichtsdestoweniger sehr brauchbar, auf Grund welcher die ersten Beobachtungen über die untere Bosphorusströmung schon 1681 von Marsigli ausgeführt wurden. Vollkommen befriedigende Resultate über die Strömungen gewann Valkanov auf indirektem Wege, nämlich durch Verfolgung der Verteilung der  $H_2S$  und  $O_2$ , sowie der ständigen Änderungen, denen diese Elemente unterworfen werden. Das im Folgenden dargestellte komplizierte System von Strömungen habe ich fast ausschliesslich auf diese Weise festgestellt.

**Morphometrie.** Hier möchte ich einige Daten über die Morphometrie der Seen geben, die verhältnismässig gut durchforscht ist. Bezüglich des Varna-Sees sind die hier beigegebenen Daten der Arbeit unseres verdienten Geographen, Prof. Ischirkoff's, entnommen.

1) Oberfläche . . . . .	18·91 km <sup>2</sup>
2) Grösste Länge in der Luftlinie gemessen	13·4 „
3) „ „ in der Mittellinie gemessen	14·7 „
4) Grösste Breite . . . . .	2·5 „
5) Mittlere Breite . . . . .	1·3 „
6) Grösste Tiefe . . . . .	20·0 „

7) Mittlere Tiefe . . . . .	9.7	m
8) Inhalt . . . . .	183,000,000	m <sup>3</sup>
9) Länge der Uferlinie . . . . .	33.4	km <sup>2</sup>
10) Die von der 20 m-Isobathe umgrenzte Fläche	0.3	"
11) " " " 15 m- " " "	6.26	"

Diese Daten beziehen sich auf die Zeit vor der Verbindung des Sees mit dem Meer und bedürfen deshalb einer Korrektur, und zwar hauptsächlich die Daten über die Tiefe und den Inhalt. Seine morphometrischen Untersuchungen hat Prof. Ischirkoff auf Grund der Tiefenkarte von Leutnant Stoikov ausgeführt. Diese Karte ist entstanden als Resultat von 3,811 Lotungen — einer Zahl, die nach Halbfass sonst sehr selten für eine entsprechende Wasserfläche erreicht wird.

Auf Grund der bathymetrischen Karte von Leut. Stoikov, wie auch auf Grund neuer Daten über den See, gab vor einigen Jahren Boschkow eine neue morphometrische Charakteristik desselben, die, wenn auch nicht so ausführlich so doch in mancher Hinsicht viel genauer ist.

Hier sind einige Auszüge aus seiner Arbeit wiedergegeben.

1) Oberfläche . . . . .	17.44	km <sup>2</sup>
2) Inhalt . . . . .	171,920,009	m <sup>3</sup>
3) Mittlere Tiefe . . . . .	9.86	m
4) Länge der Uferlinie . . . . .	32.850	km
5) " " Fahrwasserlinie . . . . .	15.200	"
6) Entfernung zwischen den äussersten Meridianen . . . . .	13.25	"
7) Entfernung zwischen den äussersten Parallelen . . . . .	2.98	"

Der Gebedze-See ist viel kleiner. Nachfolgend einige Daten über ihn:

1) Länge . . . . .	4	km
2) Breite . . . . .	1	"
3) Tiefe . . . . .	3.5	m
4) Oberfläche . . . . .	3.7	km <sup>2</sup>

### Der Varna-See (Abb.-1, Taf. 1, 2. Karte 6)

#### BULGARISCH: VARNENSKO ESERO.

Ich gehe nun zur Darstellung der Hydrologie des Varna-Sees über. Als Grundlage für diese meine Darstellung dienen mir meine eigenen Beobachtungen, darunter rund 2500 Salzgehaltbestimmungen und ungefähr 3500 Temperaturmessungen. Die Salzgehaltverhältnisse, resp. Temperatur- und O<sub>2</sub>-Verhältnisse im See, werde ich im Folgenden an Hand von ausgewählten S-, t<sup>0</sup>- und O<sub>2</sub>- Profilen erläutern.

Sowohl in Bezug auf die Salzgehaltverhältnisse als auch bezüglich seiner Thermik verhält sich der westliche, kleinere Teil

des Sees (Karte 6), der sich unter dem Einfluss des Zuflusses befindet, verschieden zu dem östlichen, grösseren Teile desselben. Aus diesem Grunde werde ich den kleineren Teil, den ich der Kürze halber mit dem bulgarischen Namen „Boas“ bezeichnen will, am Ende meiner Darstellung anhangsweise betrachten.

#### VON DER STATIK DES VARNA-SEES

**Salzgehalt.** Der Salzgehalt (S) des Varna-Sees und zwar in seinem östlichen, grossen Teile schwankt zwischen 8—10‰. Das Wasser ist stark katohalin geschichtet. Der S an der Ober-

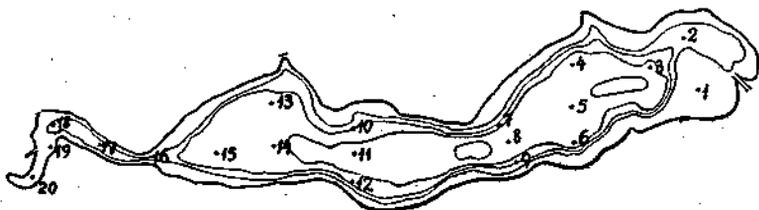


Abb. 1. Die Lage der gewöhnlichsten Beobachtungsstationen im Varna-See

fläche schwankt zwischen 8—12‰ und der der Bodenschicht zwischen 10—14‰. Im Frühjahr sinkt der S an der Oberfläche beträchtlich. Im Boas sinkt der S manchmal bis 2‰ an der Oberfläche. Die S-Kurve ist im Sommer von 0 bis 3 m fast vertikal; von 3 m an steigt der Salzgehalt langsam bis ungefähr 6—7 m Tiefe, dann nimmt er plötzlich sehr stark zu und zeigt dann von ungefähr 8 m bis zum Boden keine merklichen Veränderungen mehr. Die beschriebene Form der S-Kurve werde ich „gewöhnliche Sommerform“ nennen (Diagr. 2, 1). Sie weist auf eine sehr starke Schichtung des Wassers hin.

Im Winter ist die Schichtung nicht so stark ausgeprägt, besonders nach stattgefundenen starken Winden: dann weist das Wasser eine mehr oder weniger geradlinige S-Kurve auf. Dabei möchte ich auf folgenden Umstand besonders aufmerksam machen: je stärker die Winde sind, desto senkrechter wird die S-Kurve (Diagr. 18, 19).

Eine Isohalinität ist bisher sehr selten beobachtet worden. Sehr oft stellt man vertikale Abschnitte innerhalb der S-Kurve fest, was auf ein vollkommenes Durchmischen des Wasser in dem entsprechenden Tiefenabschnitt hindeutet. Am häufigsten ist dies zwischen 0—3 m zu beobachten, viel seltener geht es tiefer, sogar bis 8 m Tiefe. Zuweilen wird das Wasser mesohalin geschichtet, d. h. es weist den höchsten S in der Mitte auf—eine auf den ersten Blick anomale Situation, die dann aber durch die sonderbaren Temperaturverhältnisse ihre Erklärung findet (Diagr. 4). Diese Erscheinung ist auf eine Einschichtung des Meerwassers in

mittlerer Tiefe zurückzuführen. Der mesohaline Zustand des Wassers dauert nur kurze Zeit und verschwindet dann vollkommen durch Mischung des Wassers. Eine sehr häufige Erscheinung ist das Einschichten des Meereswassers am Boden (Diagr. 5). Auch dieser Zustand ist nur vorübergehend.

Wie verschieden die Salzgehaltverhältnisse auch sein mögen, immer verfolgt der Wasserkörper des Sees die Tendenz, in 2 Schichten zu zerfallen, und zwar in eine obere leichtere und in eine untere schwerere. Am deutlichsten ist dies während des Sommers ausgeprägt, also vor dem Eintritt der herbstlichen Durchmischung des Wassers (Diagr. 9).

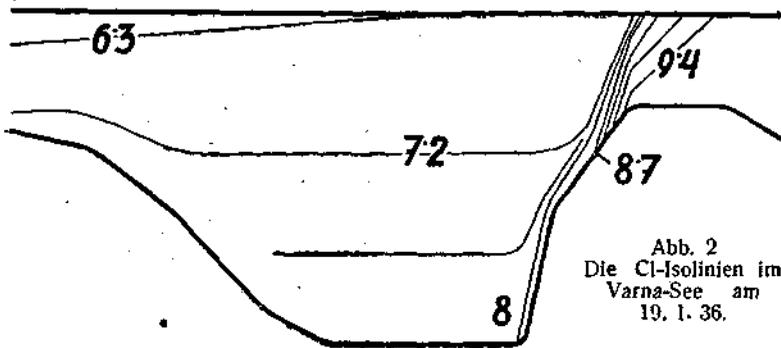


Abb. 2  
Die Cl-Isolinien im  
Varna-See am  
19. I. 36.

Hervorheben will ich hier eine weitere Feststellung. Seit 1938 weist das Oberflächenwasser im Sommer und besonders im Frühjahr viel niedrigere Cl-Zahlen als früher. Ob das rein meteorologisch bedingt wird oder aber irgend wie in Zusammenhang mit der Anlage der neuen grossen Brücke steht, bleibt vorläufig eine ungelöste Frage.

Im westlichen Teile des Sees findet man insofern sonderbare Salzgehaltverhältnisse vor, als hier am Boden (7 m) der Salzgehalt oft höher ist als bei derselben Tiefe im östlichen Teile des Sees (Abb. 2; vergl. die Tabellen in der Arbeit Valkanov's, 1936); die oberste Schichte befindet sich unter dem Einflusse des Zuflusses und weist manchmal sehr niedrige S-Werte auf.

**Temperatur.** Im Sommer erlangt die Oberflächenwassertemperatur 25°. Bei lange andauerndem ruhigen Wetter fällt sie von oben nach unten sehr langsam ab, bis sie im Bereiche der starken S-Knickung, also in 9—10 m Tiefe, plötzlich einem sehr starken Abfall unterliegt. Von dieser Tiefe angefangen bis zum Boden sind dann keine nennenswerten Veränderungen zu beobachten. Diese Form der Temperaturkurve, die bis zu einem gewissen Grade das Spiegelbild der Sommer S-Kurve darstellt, nenne ich Sommer-t°-Kurve (Diagr. 22). Hier ist die t° zu dieser Jahreszeit 10—15°. Bei der herbstlichen Abkühlung des Wassers

ensteht gewöhnlich eine sehr unregelmässige Temperaturkurve, die dann auch katothermen (Diagr. 21, 23) oder sogar isothermen Aufbau bekommen kann. Rapide Abnahme der Temperatur im Herbst, die von mässig starken Winden begleitet wird, führt zu einer stark ausgesprochenen Kathermie (Diagr. 1). Eine Einschichtung von warmem Meerwasser am Boden führt im Winter zu Kathermie, im Sommer aber zu Dichothermie (Diagr. 5, 18). Eine Dichothermie kann auch im Winter zustandekommen und zwar bei gleichzeitiger Erwärmung des Oberflächenwassers von der Sonne und des Bodenwassers vom Boden her (s. u.; s. auch Tabelle I). Mesothermie ist nur im Herbst zu beobachten und zwar als Rest der sommerlichen Anothermie (Diagr. 1, 17). Im Winter beobachtet man nicht selten eine sehr schwache Erwär-

**Tabbelle I**  
Temperatur des Varna-Sees am 12. II. 1941.

Tiefe in m	Stationen						
	11	14	13	13a	13b	4	3
0	3					3·9	4·1
2				3·2			
3					2·3		2·8
5	1·54				1·6		1·8
7	1·76				2·7		2·1
9	2·23		2·3				2·81
11							3
12							3·28
13	3·32		3·32				3·4
14	3·57	3·4					3·4
15	3·32						3·3
17							3·45
18							3·75

Die fetten Ziffern bezeichnen die  $10^{\circ}$  des Bodenschlammes.

mung des Bodenwassers vom Boden her, und zwar nur in Bruchteilen eines Grades. Dass diese Erwärmung nicht auf Einschichtung von Meerwasser am Boden zurückzuführen ist, beweist die

Tatsache, dass sie nicht an bestimmte Horizonte oder an die grösste Tiefe gebunden ist, sondern überall in der Nähe des Grundes beobachtet werden kann. Zieht man in Betracht, dass während des Winters der Bodenschlamm ständig eine höhere Temperatur aufweist als das Wasser, so ist als erwiesen anzunehmen, dass die erwähnte Erwärmung auf Wärmeausstrahlung des Bodenschlammes zurückzuführen ist (Tabelle I). Diese Erscheinung ist um so augenfälliger, je ruhiger das Wetter und je kälter das Wasser ist. Bei stärkeren Winden verschwindet diese  $t^0$ -Inversion sehr schnell.

Vom Jahr zu Jahr oder sogar von Tag zu Tag zeigen die  $t^0$ -Verhältnisse nicht geringfügige Abweichungen. Wenn wir aber alle diese so mannigfaltigen Verhältnisse zusammenfassen, so könnten wir folgendes von der Thermik des Sees sagen: Im Frühjahr weist die Wärme des Wasserkörpers eine schwache bis mässige und im Sommer eine starke Anothermie auf. Im Herbst nach den starken Winden und im Winter weist die Wärme die Tendenz zu kathermer Schichtung auf.

Die Vereisung des Sees, und zwar seines östlichen breiten Teiles, ist eine nur seltene Erscheinung. So z. B. ist er zum letzten Mal 1934 zugefroren. Der westliche ausgesüsstete Teil aber gefriert alljährlich.

Der westliche Teil des Sees verhält sich in thermischer Hinsicht ganz sonderbar. Ist seine oberste Schicht thermisch vor allem von dem Zuflusswasser abhängig, so entspricht die Temperatur seiner Bodenschichte der des östlichen Teiles des Sees. Am Boden sind hier während der herbstlichen Abkühlungsperiode die höchsten  $t^0$ -Werte im See überhaupt zu beobachten.

**Sauerstoffverteilung.** Die  $O_2$ -Verteilung ist sehr charakteristisch: im Sommer nimmt die Menge dieses Gases von etwa 3 m Tiefe langsam ab, um bei der Knickung der S- und  $t^0$ -Kurve gleich Null zu werden. Im Winter ist  $O_2$  auch tiefer festzustellen, und zwar fast immer bis zum Boden. Bemerkenswert ist nun die Tatsache, dass die  $O_2$ -Menge in der Unterschicht im Winter fortwährend wächst, selten aber Werte von mehr als 70% erreicht. Im östlichen Teile der Seemulde, viel seltener in der westlichen, bekommt man zu dieser Jahreszeit  $O_2$ -Kurven, die unter 10 m Tiefe Steigerungen aufweisen. Man erhält manchmal  $O_2$ -Kurven, die vollkommen unregelmässigen Verlauf, und zwar mit einem oder mehreren Maxima, zeigen. Dies ist auf Einschichtungen von  $O_2$ -reicherem Wasser in bestimmten Horizonten zurückzuführen. Manchmal ist das der Unterstrom, der diese Unregelmässigkeiten in der  $O_2$ -Schichtung verursacht. Besonders lehrreich sind die Fälle, bei denen die  $O_2$ -Schwankungen von  $t^0$ -Schwankungen begleitet sind: Man bekommt dann  $O_2$ -Kurven, deren Vorbuchtungen den Einbuchtungen oder Vorbuchtungen der  $t^0$ -Kurve entsprechen (Diagr. 11--14).

**Schwefelwasserstoffverteilung.** In der unteren Schichte reichert sich  $H_2S$  während des Sommers an, ein Gas das im

Winter verschwindet.  $H_2S$  und  $O_2$  verhalten sich antagonistisch, d. h. ist eines der beiden Gase vorhanden, fehlt das andere. Vollzieht sich eine Durchmischung von  $H_2S$ - und  $O_2$ -haltigem Wasser, so bleibt nur eines der beiden Gase übrig, während das andere verschwindet. Und zwar verbleibt jenes Gas, welches in grösserer Menge vorhanden war. Dies beobachten wir während der herbstlichen Durchmischung des Wassers.

Die Bildung des  $H_2S$  beginnt noch im Frühjahr, und zwar zuerst am Boden, sodann pflanzt es sich nach oben fort. Wie entsteht nun das Gas?

Es sind bisher drei Entstehungsarten des  $H_2S$  in den natürlichen Gewässern bekannt: 1. durch Zersetzung der organischen Substanzen, 2. durch Spaltung der Sulfate und 3. durch Hydrogenisation von Schwefel. Der erste Fall ist überall da zu beobachten, wo Pflanzen- und Tierleichen unter anaeroben Bedingungen verfaulen. Der zweite Fall ist weit verbreitet in Meeresbuchten, Strandseen u. s. w. und verlangt ebenso anaerobe Bedingungen. Nach Issatschenko & Egerova entstehen 99,4% des im Schwarzen Meer vorhandenen  $H_2S$  auf diese Weise. — Es bestehen Anzeichen dafür, dass in unserem Falle die Fäulnisprozesse, wenn nicht eine ausschlaggebende, so doch eine wesentliche Rolle bei der Entstehung des  $H_2S$  spielen. So fand ich bei vorsichtigem Sondieren im Boden im Februar 1941 eine 2—3 cm dicke Schichte von abgestorbenen Planktonorganismen, vor allem Diatomeen (*Chaetoceras* u. a.). Im Sommer ist nichts von dieser Schichte zu finden, sie ist verfault. Dass auch im Sommer und Herbst absterbende Planktonorganismen als materielle Grundlage zur Bildung des  $H_2S$  dienen können, ist von vornherein anzunehmen. Nach den herbstlichen Durchmischungen des Wassers verliert die oberste Schlammschichte ihren  $H_2S$ -Geruch. Gleichzeitig bekommt sie anstatt der schwarzen eine graue Farbe. Je tiefer man mit der Sonde einbohrt, desto dunkler wird der Schlamm. Wenn man vorsichtig mit einem Glasrohr sondiert, so bekommt man Proben, in welchen alle Abstufungen, von grauem bis zu schwarzem Schlamm, zu beobachten sind.

Hier ist es am Platze, folgende wichtige Bemerkung über die Schichtung des Wassers im Varna-See zu machen: Bedingt allein die Thermik in den weitaus meisten Fällen die Schichtung eines Süswassersees, d. h. die Schaffung von Epi- und Hypolimnion in ihm, so sind das die Salzgehaltverhältnisse die diese Rolle in Varna-See spielen. Die Rolle der  $t^{\circ}$  ist in diesem Falle eine untergeordnete; eher können wir sagen, dass die Thermik sich an die bereits geschaffene Salzgehaltsschichtung anpasst. Die untere schwere Wasserschichte verhält sich genau so, wie das Hypolimnion der Süswasserseen: sie wird von der allgemeinen Wasserzirkulation des Sees während des Sommers vollkommen ausgeschlossen, sie behält niedrige Temperatur zu dieser Jahreszeit.

Alle oben aufgezählten Besonderheiten des Gashaushaltes des Sees knüpfen auf das engste an seine Salzgehaltsverhältnisse an, und zwar vor allem an die Absonderung beider Wasserschichten in ihm. In der isolierten Unterschicht eines Süßwassersees nimmt im Sommer die  $O_2$ -Menge mehr oder weniger ab. Bei sehr lange andauernde Isolierung der Unterschicht eines Bassins oder aber bei sehr regen Lebensvorgängen in dieser Schichte ist ein völliger Schwund des  $O_2$  zu beobachten, was gewöhnlich dann eine Anreicherung von  $H_2S$  zur Folge hat (Rotsee u. a.). Gerade das letztere liegt in unserem Falle vor.

Nicht selten stellt man von Jahr zu Jahr gewisse Abweichungen in dem jahreszeitlichen Gang der hydrographischen Verhältnisse fest. Trotzdem aber tritt in allen Fällen, so verschieden diese auch sein mögen, ein einheitlicher Plan im hydrographischen Aufbau des Sees hervor.

Die Wsaserfarbe des Sees schwankt zwischen graugrün und olivengrün und hängt vollkommen von dem Grad der Planktonentwicklung ab. Diese ist am stärksten im Winter und in den ersten Frühjahrsmonaten. Davon hängt auch die Sichttiefe des Wassers ab, die nie grösser als 6 m und nie kleiner als 1 m wird.

Im Herbst ist folgende sonderbare Erscheinung zu beobachten. Das Wasser zwischen 8—10 m Tiefe wird schwach bräunlich gefärbt, was auf das Vorhandensein von Limonitflöckchen zurückzuführen ist. Die Farbintensität nimmt von Osten nach Westen allmählich ab, d. h. die Limonitflöckchen werden von dem Mittelstrom mitgeschleppt und allmählich an das Wasser der Oberschicht verteilt. In diesen Flöckchen sind Spaltpilzkolonien zu beobachten. Sind das syderophile Organismen? Und wie entstehen eigentlich diese Flöckchen? Das sind Fragen, die ich vorläufig vollkommen unberührt lasse.

Die Angaben Stundls über die vertikale Verteilung verschiedener Salze des Seewassers mögen hier aus Gründen der weiter oben geäußerten Bedenken über seine Methode der Wasserschöpfung nicht näher behandelt werden.

#### VON DER DYNAMIK DES VARNA-SEES

Der Varna-See bekommt ungefähr 4 cbm/S Süßwasser und trotzdem ist sein Salzgehalt ziemlich hoch — er beträgt durchschnittlich 10‰; der Varna-See bekommt demnach irgendwie und ständig Meereswasser. Der Varna-See ist ein katohaliner See: Das Oberflächenwasser hat 8—12‰ Salzgehalt; die Unterschicht von 10 m Tiefe bis zum Boden hat im Sommer 14‰ S. Im Bodenwasser reichert sich im Sommer  $H_2S$  an — ein Gas, das im Winter verschwindet. Ausserdem ändern sich zu dieser Jahreszeit die Salzgehaltsverhältnisse im See grundsätzlich. Bei der Betrachtung des Hauptproblems, nämlich wie die sonder-

bare vertikale Schichtung und die periodische Änderung des Salzgehaltes entstehen, gehe ich hier von einer Vorstellung aus, die sich mir schon bei meiner ersten Beobachtung aufdrängte. Der See bekommt 4 cbm/S Süßwasser und trotzdem schwankt sein S ständig um 10‰, d. h. er besitzt  $\frac{3}{5}$  des S des Meeres. Hieraus kann man schliessen, dass in den See durchschnittlich 8 cbm/S Meerwasser einströmt: Das macht pro Tag rund 750,000 cbm, oder pro Jahr 260,000,000 cbm. Östlich vom „Boas“ ist der Salzgehalt des Wassers der Oberfläche fast überall der gleiche: Das Wasser fliesst aus dem Boas selbst mit schon ziemlich hohem Salzgehalt aus. Dieses Verhalten ist nicht durch die durch die Winde verursachten Zirkulationsströmungen zu erklären. Eher müssen wir annehmen, dass das in den See eingedrungene Meerwasser bis in den Boas hineingelangt und sich hier mit dem Süßwasser des Zuflusses mischt. Dass tatsächlich das Meerwasser bis zum Boas gelangt und sogar in den Boas eindringt, dafür spricht folgende Tatsache: In der Mündung des Boas ist stets ein landeinwärts gerichteter Bodenstrom nachzuweisen, dessen Wasser salziger ist als das Obeflächenwasser des Sees irgendeines seiner anderen Teile — das ist das Meereswasser. Das aus dem Boas ausströmende Wasser hat ungefähr 5—10 ‰ S, daraus ergibt sich, dass ca. 2—6 cbm Meerwasser bis in den Boas hineingelangt. Wie gelangt dieses Meerwasser bis hierher? Wo bewegt es sich? Es ist durchaus möglich, dass das Meerwasser im Winter sich dem Boden entlang westwärts bewegt, im Sommer aber ist das unmöglich — das zeigt das Verhalten des Bodenwassers im zentralen, tiefen Teile des Sees: Das Bodenwasser behält hier die Wintertemperatur und in ihm reichert sich  $H_2S$  an. Also das Meerwasser, das wir in der Mündung des Boas immer feststellen können, muss im Sommer irgendwie über dem Bodenwasser der Seemulde fließen. Alle späteren Beobachtungen haben diese Schlussfolgerungen bestätigt. Beginnen wir mit dem Eindringen des Meerwassers.

Die meist vertretene Meinung ist, dass die Ostwinde das Meerwasser in den See hineintreiben, was ja sehr oft zu beobachten ist, besonders in Nachmittagsstunden. Genauere Beobachtungen machen jedoch eine andere Deutung der Erscheinung notwendig: nicht der Wind selbst treibt das Wasser im Kanal landeinwärts, sondern der durch den Wind verursachte Unterschied der Wasserstände beider Bassins. Die durch die draussen im offenen Meer wehenden Winde verursachte Steigerung des Wasserstandes des Meeres, die ca. 10—30 cm beträgt, reicht vollkommen aus, um bei der geringen Länge des Kanals — nur 2.5 km — einen kanaleinwärts gerichteten Strom zu bewirken. Dass die Winde gleichzeitig eine gegensinnige Änderung des Wasserstandes im See (NB. in seinem östlichen Teile) bewirken, die dann das Strömen des Wassers im Kanal begünstigen könnte, ist von vornherein anzunehmen. Beobachtungen darüber habe ich aller-

dings noch nicht angestellt. Mehrmals bisher habe ich eine landeinwärts gerichtete Strömung bei Nord-, Nordwest- oder Westwinden beobachtet. In allen diesen Fällen aber ist der Wasserstand des Meeres (wegen des draussen am Meer wehenden Ostwindes?) ziemlich hoch gewesen. Es ist durchaus nicht ausgeschlossen, dass die direkt auf den Kanal zu wehenden Winde an der Strömung des Wassers in demselben mitbeteiligt sind — verhindernd oder begünstigend. Die Ursache der Strömung selbst aber liegt in dem Unterschied der Wasserstände, was letzten Endes wieder auf die Winde zurückzuführen ist. Wir können das Gesagte folgendermassen formulieren: Die östlichen Winde verursachen indirekt durch Windstau eine Strömung im Kanal, gerichtet vom Meer nach dem See.

Ausser auf die geschilderte Weise dringt aber Meerwasser in den See auch auf Grund eines anderen Prinzips ein, nämlich auf Grund des Prinzips der Dichte-Ausgleichsströmungen: Am Boden im Kanal ist stets ein kanaleinwärts gerichteter Bodenstrom nachzuweisen. Das ist wie direkt durch Beobachtung der Ablenkung des Fadens untergetauchter Gegenstände, so auch indirekt durch die Änderung des Salzgehaltes in der Tiefe festzustellen. Wir haben es hier mit einer Erscheinung zu tun, die stets in Meerengen, die zwei Meere mit verschiedenem Salzgehalt verbinden, zu beobachten ist (Bosporus, Gibraltar, Belt, Babel-Mandeb u. a.).

Fragen wir jetzt nach der Bedeutung dieser beiden Strömungsarten — Stauströmung und Dichte-Ausgleichsströmungen — für die Wasser- und Salzgebhaltsbilanz des Sees, so müssen wir der ersten Art, nämlich der Stauströmung eine untergeordnete Bedeutung zuschreiben und zwar aus folgenden Gründen: 1. Diese Strömung ist nicht alltäglich zu beobachten. So z. B. ist sie im Januar 1939 16 mal beobachtet, im Februar 13 mal, im März 22 mal, im April 23 mal, im Mai 31 mal.<sup>1</sup> 2. Die Zeitdauer ihrer Wirkung ist immer sehr bescheiden 3—6 Stunden täglich. Ihre durchschnittliche Schnelligkeit ist ungefähr 20 cm/S; die Strömung — d. h. das Meerwasser, braucht also 3 Stunden, um bis in den See hineinzugelangen. — Im Vergleich mit jener Wassermenge, die der See vom Meer bekommt, stellt die, die der Staustrom ihm zuführt, kaum  $\frac{1}{10}$  dar. Folglich müssen wir den Dichte-Ausgleichsströmungen eine grössere Bedeutung für den Haushalt des Sees zubilligen.

Hier sei am Platze zu erwähnen, dass die Stärke des Unterstroms von der des Oberstroms abhängt. Fliesst gewaltig Wasser aus dem See aus, was z. B. beim starken Sinken des Wasserstandes des Meeres zu beobachten ist, so gelangt der Unterstrom nicht bis zu dem See: In diesem Falle wird der Bodenstrom verdrängt vom Oberstrom.

<sup>1</sup> Die Steigerung der Zahl im Spätfrühjahr hängt mit der Erhöhung des Wasserstandes des Meeres zu dieser Zeit zusammen (s. o., S. 2).

Die beiden gegeneinander fließenden Ströme verhalten sich nicht bloss als Gegner, sondern greifen ineinander, was an der Änderung der Eigenschaften ihres Wassers zu erkennen ist. An der Grenze zwischen den beiden Strömen entsteht eine Mischung, wodurch das Wasser des Unterstroms von dem des Oberstroms beeinflusst wird und umgekehrt. So ist zu erklären, dass das Wasser des Unterstroms an Salzgehalt abnimmt, während das des Oberstroms kanalabwärts an Salzgehalt zunimmt. So verhalten sich im übrigen immer die beiden gegeneinander fließenden Dichte-Ausgleichsströmungen in einer Meerenge. Diese Erscheinungen sind sehr genau studiert an den Strömungen des Bosphorus von Makaroff (1885) und während des Krieges von Merz (s. A. Merz u. L. Möller), sowie an den Strömungen anderer Meerengen (s. Defant, 1931).

Das durch den Unterstrom in den See gelangte Meerwasser ist immer wieder stärker konzentriert als das Wasser des Sees selbst und deswegen mischt es sich nicht mit dem letzteren, sondern bleibt am Boden, bildet hier einen Bodenstrom, der, wie zu erwarten ist, dem grössten Gefälle des Bodens folgt, d. h. der Richtung der Fahrwasserlinie. Was geschieht nun, wenn Meerwasser durch die Staustromung in den See hineingetrieben wird? Gelangt das Wasser in den See, so fällt es ebenfalls zu Boden und folgt wieder der Richtung des grössten Bodengefalles. Wir könnten also sagen, dass das in den See eingedrungene Meerwasser, gleichgültig ob es durch den Staustrom oder durch die Dichte-Ausgleichsströmungen ihm zugeführt ist, einen Bodenstrom bildet, der der Richtung des grössten Bodengefalles folgt. Hier am Boden (Abb. 1, bei St. 2 u. 3) ist dieser Strom stets nachzuweisen. Das habe ich bisher nur indirekt—durch  $t^0$ - und S-Messungen ausgeführt. Man findet an dieser Stelle (St. 2) die grössten S-Werte überhaupt im See (s. Diagr. 14). Für diesen Strom ist alles das gültig, was wir über den Unterstrom im Kanal gesagt haben: Der Bodenstrom verliert hier im See fortwährend durch Mischung mit dem darüber sich befindenden Seewasser von seinem Salzgehalt und wird von diesem Wasser auch thermisch beeinflusst, wenn positive oder negative  $t^0$ -Unterschiede bestehen. So strömt der Bodenstrom, indem sein Wasser ständig leichter und leichter wird, und gelangt zunächst bis zur Isobate 10 m. Von hier an ist sein Schicksal verschieden, je nach der Jahreszeit. Wir gehen von der Situation im Winter aus. — Der Bodenstrom fliesst weiter den Boden entlang bis zur grössten Tiefe hin, dann fliesst er horizontal und steigt in dem westlichen Teil des Sees auf und dann dringt er in den Boas ein, also folgt immer dem Boden. Über dieses auf den ersten Blick absurd erscheinende Aufsteigen des Bodenstroms werden wir später sprechen. Besonders lehrreich zum Verständnis der Wintersituation ist der Fall vom Januar 1936, als die  $t^0$  des Meerwassers ungefähr  $7^0$  höher war als die  $t^0$  des Sees. Es lässt sich in diesem Falle

folgendes feststellen: Die Temperatur des Bodenstroms nimmt von der Mündung des Kanals allmählich und ununterbrochen bis in den westlichen Teil des Sees ab. Trotzdem aber bleibt die Temperatur des Bodenwassers immer höher als die Temperatur

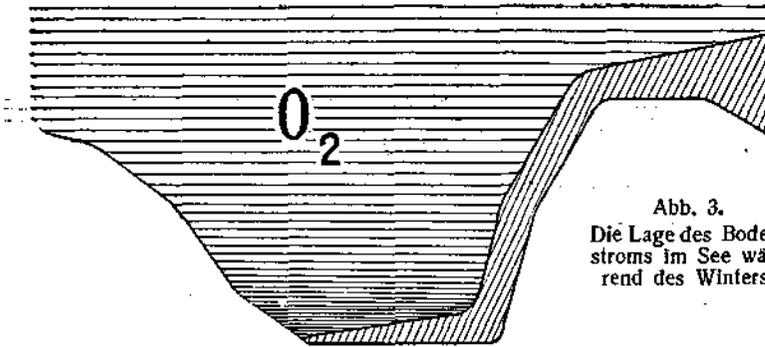


Abb. 3.  
Die Lage des Bodenstroms im See während des Winters.

des Oberflächenwasser desselben (Diagr. 7). Diese Tatsache reicht fast vollkommen aus, um mit Recht von einem ununterbrochenen Strömen des Bodenstroms bis zu dem westlichen Teil der Seemulde zu sprechen. Zu demselben Schluss kommt man, wenn man den Verlauf der Salzgehaltlinien desselben Falles verfolgt. Wohin geht nun die verlorene Wärme des Unterstroms? Offensichtlich in die darüber liegenden Wassermassen. Dafür sprechen die  $t^{\circ}$ -Kurven: Sie sind in diesem Moment überall im See katotherm und gleichmässig geneigt. So verhalten sich auch die Salzgehaltkurven. Sie sind katohalin und gleichmässig geneigt. — Der Unterstrom fließt also im Winter am Boden entlang oder in seiner Nähe; durch ihn wird dem See während dieser Jahreszeit eine grosse Menge schweres, und gleichzeitig kaltes Wasser zugeführt, das dann am Boden liegen bleibt.

Es kommt der Frühling. Der Salzgehalt des Meerwassers, wie schon am Anfang erwähnt, sinkt von 18 auf 16‰. Dadurch einerseits, andererseits durch die Erhöhung der Temperatur des Meerwassers nimmt die Dichte des Unterstroms wesentlich ab. Er gelangt bis zur Isobathe 10 m mit wesentlich niedrigerer Dichte als die Dichte des schweren während des Winters hier abgelagerten Wassers. Deswegen hebt sich der Bodenstrom vom Boden ab und schiebt sich über die untere kalte, schwere Wasserschicht. Dadurch verwandelt er sich von einem Boden- in einen Zwischenstrom. In dieser Tiefe (8—10 m) läuft dieser Strom bis in den westlichen Teil des Sees. Auch jetzt ist ein Aufsteigen des Stromes vor der Mündung des Boas festzustellen (s. u.). Dieses Einschleichen des Bodenstroms in mittlere Tiefe vollzieht sich nicht auf einmal. Zuerst sondert sich eine kalte Wassermasse in dem westlichen Teil der Seemulde ab. Diese Erscheinung ist

alljährlich zu beobachten, verläuft aber nicht so schematisch, wie aus dem Obigen zu erschliessen wäre. Auf ihr Zustandekommen kehren wir weiter unten zurück.

War das Vorhandensein eines Zwischenstroms im Sommer sozusagen nur theoretisch abgeleitet und zwar durch die Bewertung des sonderbaren Verhaltens der Bodenschicht (sie ist im Sommer vollkommen isoliert von den Wasserbewegungen der Ober-

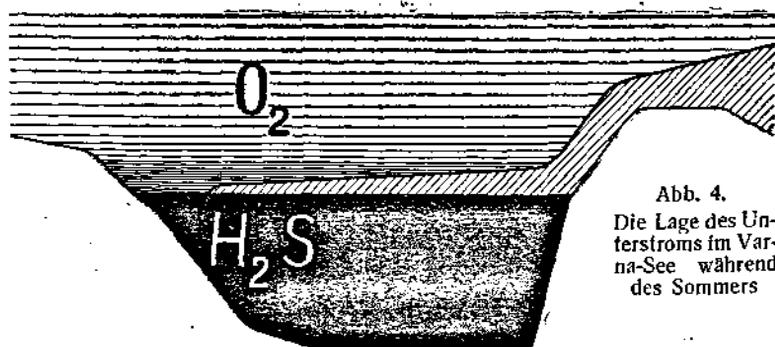


Abb. 4.  
Die Lage des Unterstroms im Varna-See während des Sommers

schicht, ihr  $O_2$  verschwindet vollkommen und in ihr reichert sich  $H_2S$  an), so brachten die Beobachtungen einiger späterer Daten glänzende Beweise dafür. Ich bespreche hier den Fall vom Juni 1935. In der östlichen Hälfte des Sees war das Wasser *mesohalin* geschichtet — d. h. der höchste Salzgehalt fand sich gerade in der Mittelschicht. Es liess sich ein ununterbrochener Übergang des Bodenstroms in einen Mittelstrom feststellen, der somit der Mittelschicht die höchste Salzkonzentration verlieh. Ist es möglich, dass das salzreichste Wasser sich in der Mitteltiefe hält, ohne auf den Boden zu sinken? Das ist durchaus möglich, aber nur dann, wenn die Temperatur der darunter liegenden Schicht entsprechend niedriger ist. Die Situation vom Juli 1935 ist auf dem Diagr. 4 dargestellt. Berechnen wir die Dichten einzelner Wasserschichten, so gewinnen wir auch in diesem Falle eine normal gebogene Dichtenkurve.

So verhält sich der einwärts gerichtete Strom bis zum Spätherbst. Dann ändern sich grundsätzlich jene Verhältnisse, die die Abhebung des Bodenstroms vom Boden in die Zwischenschicht bedingten, und infolgedessen strömt von jetzt ab der Strom von neuem immer den Boden entlang. Das geschieht auf folgende Weise: Die starken Winde im Herbst verursachen eine Durchmischung des Wassers im See; die so stark im Sommer ausgeprägte Schichtung wird jetzt stark herabgesetzt, so dass die Dichte der Unterschicht kleiner ist im Verhältnis zu der Dichte des Bodenstroms. Andererseits, wie schon am Anfang erwähnt, steigt die Dichte des Bodenstromwassers, was mit der Erhöhung des

Salzgehalts des Meerwassers im Winter, sowie auch mit dem Sinken der Temperatur desselben zusammenhängt. Durch diese zwei zusammenwirkenden Umstände ist es zu erklären, dass der Bodenstrom nicht mehr in der Zwischenschicht sondern von neuem den Boden entlang sich bewegt, bis im nächsten Frühjahr sich der Kreislauf von neuem wiederholt.

Eine zeitweilige Verlagerung des Zwischenstroms von seiner normalen Sommerlage und ein Eindringen desselben in tiefere Schichten ist ab und zu auch im Sommer zu beobachten und zwar dann, wenn gewaltige Massen Meerwasser in den See hineingelangen. In solchen Fällen gelangt der Bodenstrom bis zur Isobathe 10 m, ohne beträchtlich an Salzgehalt verloren zu haben. Infolgedessen strömt er jetzt noch weiter den Boden entlang. Das dauert kurze Zeit, nachher schiebt sich der Unterstrom wieder in seine normale Tiefe ein. Da die Unterschicht nicht homohalin, sondern immer wieder mehr oder weniger geschichtet ist, so ist zu erklären, dass der Unterstrom während solcher Verlagerung in verschiedenen Tiefen sich einschichtet — zuweilen in der Mitte der Unterschicht, viel öfter aber am Boden (Abb. 5, 6). Alle diese Verhältnisse, so kompliziert sie auch sein mögen, sind an den Temperaturkurven abzulesen: In solchen Fällen sind diese dichotherm — man beobachtet dann ein Temperaturmaximum am Boden (Diagr. 5). Einmal habe ich eine Temperaturkurve mit 3 Max. und 2 Min. bekommen, was so zu erklären ist, dass der Bodenstrom 2 mal nacheinander sich verlagert hat — einmal den Boden entlang, einmal aber mitten in die Unterschicht eingedrungen ist. Noch deutlicher sind diese Verhältnisse an den  $O_2$ -Kurven abzulesen

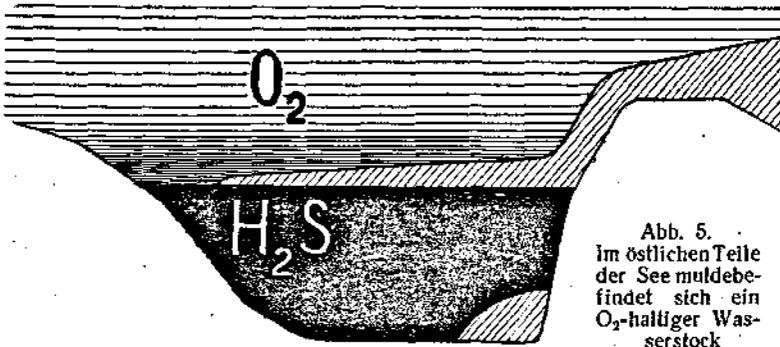


Abb. 5.  
Im östlichen Teile  
der See muldebe-  
findet sich ein  
 $O_2$ -haltiger Was-  
serstock

(Diagr. 10, 17). — Diese komplizierten Verhältnisse sind nur im östlichen Teil der Seemulde festzustellen — dort wo der Bodenstrom bis zur Isobathe 10 m gelangt. Sie sind von einer sonderbaren Erscheinung begleitet. Wie wir sehen werden, ist das Plankton der Unterschicht während des Sommers grundsätzlich verschieden von dem der Oberschicht was mit dem Vor-

handensein von  $H_2S$  zusammenhängt. In den Fällen der zeitweiligen Verlagerung des Bodenstroms beobachtet man auch eine kompliziertere Schichtung des Planktons. — Fragen wir uns jetzt nach anderen Umständen, die die Ausbildung einer Zwischenströmung ermöglichen, so können wir mit vollem Recht folgendes sagen: wäre das Gefälle der Boderinne viel kleiner gewesen, so hätte der Bodenstrom der grössten Tiefe, die in diesem Falle viel weiter entfernt gewesen wäre, noch mehr verdünnteres Wasser zugeführt. Es wäre also nicht dazu gekommen, dass sich im Win-

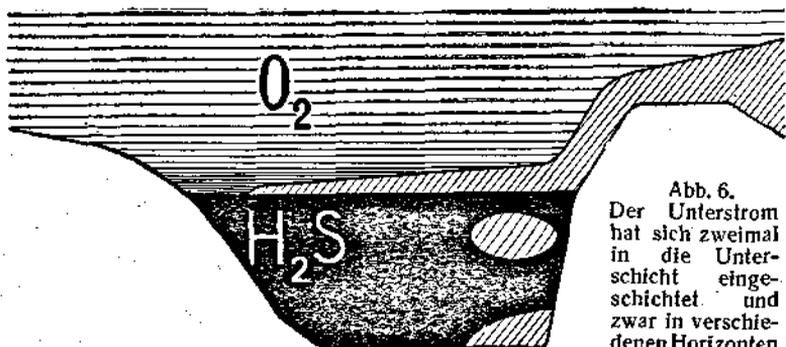


Abb. 6.  
Der Unterstrom hat sich zweimal in die Unterschicht eingeschichtet und zwar in verschiedenen Horizonten

ter in der Tiefe schweres Wasser abgelagert hätte. Infolgedessen hätte der Unterstrom im Sommer nicht die Möglichkeit gehabt, sich abzuheben, und in eine Zwischenschicht einzudringen. Demnach spielt das Bodentiefenrelief, an der Ausgestaltung der sonderbaren hydrographischen Verhältnisse eine ausschlaggebende Rolle.

Zusammenfassend können wir folgendes über die Lage des Unterstroms im See sagen: Von Isobathe 10 m gelangt der Unterstrom in jene Tiefe, die seiner Dichte entspricht. In dieser Tatsache mögen wir eine Äusserung jenes hydrodynamischen Prinzips erblicken, das überall dort zum Vorschein kommt, wo das Gleichgewicht zwischen Wassermassen verschiedener Dichte hergestellt sein muss — vor allem also in den katohalinen Seen und Meeren. Wie empfindlich die Wassermassen selbst auf eine schwache Dichtenschichtung reagieren, zeigen die Beobachtungen über den Stromverlauf des Rheinwassers im Bodensee: Das Rheinwasser fließt entweder am Boden oder an der Oberfläche, oder aber in einer Zwischenschicht. Dieses verschiedene Benehmen des Rheinstroms ist durch Dichteunterschiede der Wassermassen bedingt, was letzten Endes nur auf die Temperaturunterschiede derselben oder z. T. auch auf die unterschiedlichen Mengen der aufgelösten Elektroliten zurückzuführen ist (N ü m a n n, 1937, p. 527). Umso stärker wird sich dieses Prinzip auswirken in den katohalinen Bassins, wo die Dichteunterschiede, verursacht durch Unterschiede

des Salzgehalts, viel beträchtlicher sind als jene, die lediglich durch die Temperatur hervorgerufen sind. Gerade das haben wir im Varna-See verwirklicht.

Durch die Ausbildung einer Zwischenströmung erinnert der Varna-See bis zu einem gewissen Grade an andere Bassins (manche norwegische Fjorde, Nebenmeere u. s. w.). Hierzu einige Beispiele. So kommt B. Schulz beim Betrachten der Bewegung des Nordseewassers in dem Ostseebecken zu folgendem Schluss: „Überhaupt gewinnen wir die Anschauung, dass sich in der Ostsee die lebhafteste Bewegung von aussen nach innen in den infolge dessen gut durchlüfteten, mittleren Tiefen vollzieht, in der s. g. Zwischenschicht“ (1931, p. 85). Nicht weniger lehrreich in dieser Beziehung ist die Bewegung des durch Gibraltar in den Atlantischen Ozean hineinfließenden Mittelmeerwassers. Es breitet sich, entsprechend seiner Dichte, in einer Tiefe von 1000 m aus und gelangt so bis zu den englischen Inseln. Sehr interessant im Zusammenhang mit dieser Frage ist das Schicksal des in das Schwarze Meer einströmenden Mittelmeerwassers. Wie bekannt, bekommt das Schwarze Meer durch den unteren Bosphorusstrom 5000 cbm/S Mittelmeerwasser. Diese Wassermenge wird zur Unterhaltung des niedrigen aber konstanten Salzgehaltes des Schwarzen Meeres verbraucht. Nun, wie verteilt sich das Wasser des unteren Bosphorusstromes im Schwarzen Meer-Becken? Die meist vertretene Erklärung hierfür ist die, dass das Wasser, da es schwer ist, in die Tiefe des Meeres einfließt und sich dort lagert. Wäre das der Fall, so müsste man eine Anreicherung von  $O_2$  am Boden, zumindest aber ein Abnehmen der  $H_2S$ -Menge zum Boden hin, erwarten. Man findet aber überall von oben nach unten eine allmähliche Zunahme der  $H_2S$ -Menge. Diese Tatsache zeigt uns mit genügender Klarheit, dass das Unterstromwasser nicht in die Tiefe der Meeresmulde einströmt. Spezielle Untersuchungen zur Lösung dieser Frage sind noch nicht unternommen, doch sind aber im Laufe der letzten russischen Schwarz-Meer-Expedition gewisse Tatsachen festgestellt worden, die etwas Licht in das uns interessierende Problem bringen. So wurde an der Station 267, die sich unweit des Bosphorus befindet<sup>1)</sup>, bei 300 m Tiefe plötzlich eine Zunahme des  $O_2$  festgestellt, ein klarer Beweis dafür, dass der untere Bosphorusstrom sich in einer mittleren Tiefe ausbreitet. Somit ist auch die alte Hypothese Skalovsky's, dass der untere Bosphorusstrom sich in 200 m Tiefe ausbreitet und so in dieser Tiefe bis zur Krim gelangt, zum Teil bestätigt.

Ich gehe zur Betrachtung der Mischungen des Wassers über. Ist das Einfließen von Süß- und Meerwasser in den See die materielle Grundlage seiner sonderbaren Hydrologie, so sind es die Durchmischungen dieser beiden Wasserarten, die Art und Weise wie sie sich vollziehen, dasjenige, was die spezifische Physionomie seiner hydrologischen Ganzheit prägt. Zwei Kategorien solcher kann man im Varna-See unterscheiden: Mischungen, die durch die entgegengesetzte Bewegung des See- und Meerwassers verursacht sind, und Mischungen, die durch die Winde hervorgerufen werden. Im ersten Falle ist der Vorgang der Mischung in einer fast horizontalen Fläche ausgebreitet; im zweiten Falle ist die Mischung ein Vorgang, der von oben nach unten sich fortpflanzt. Wie wir aber demnächst ausführen werden, besteht kein prinzipieller Unterschied zwischen den beiden Mischungsarten: In beiden Fällen haben wir eine Mischung zwischen horizontal gegeneinander sich bewegenden Wassermassen.

<sup>1)</sup> Die Lage der Station:  $41^{\circ}27'N$ ,  $29^{\circ}16'O$ .

Eine Durchmischung verschiedener Wassermassen durch ihre entgegengesetzte Bewegung beobachtet man am deutlichsten und klarsten im Kanal. Wie erwähnt, ist die Folge davon eine ständige Abnahme des Salzgehaltes des Unterstroms, begleitet von einer ständigen Zunahme des Salzgehaltes des Oberstroms. Dieselbe Erscheinung ist auch im See festzustellen, jedoch schwächer oder richtiger gesagt andersartig ausgeprägt, da der Bodenstrom hier, im See, sehr breit wird und infolgedessen die Schnelligkeit seiner Bewegung stark abnimmt. Ein besonders günstiger Fall zur Betrachtung dieser Erscheinung ist der vom Januar 1936, wo die Temperatur des Meeres ungefähr  $7^{\circ}$  höher war als die Temperatur des Sees: Ist die Temperaturschichtung im Kanal jetzt durch eine starke Knickung ausgeprägt, was auf eine beginnende Durchmischung der Wassermassen beider Strömungen hinweist, so ist sie im See durch eine ununterbrochene und allmähliche Steigerung der Temperatur dargestellt: Von 4 m ab steigt die Temperatur allmählich ununterbrochen auf, was von einer gleichzeitigen Steigerung des Salzgehalts begleitet ist (Diagr. 7). Diese Tatsache ist so zu erklären: Im See pflanzt sich die Mischung bei der maximalen Verlangsamung der Bewegung der Wassermassen und bei der grossen Abnahme des Unterschiedes der Dichte der beiden Ströme in allen Tiefen fort. Dass den Winden dabei ein wesentliches Anteil an dem Prozess beizumessen ist, wird uns erst weiter unten klar.

Höchst interessant und wichtig sind die durch die Winde verursachten Durchmischungen des Seewassers. Sie bringen den Schlüssel zum Verständnis einer ganzen Reihe von Tatsachen. — Wie wir demnächst ausführen werden, vermögen die Winde eine gründliche Durchmischung des Seewassers und zwar manchmal bis zum Boden hervorzurufen; das dürfen wir uns aber keinesfalls so vorstellen, dass die oberste Schicht direkt und auf einmal mit den darunter liegenden Schichten resp. mit der Bodenschicht durcheindergemischt wird: Eine gründliche Durchmischung des Ober- und Unterwassers kann wohl das Endresultat des Vorgangs sein, stellt aber keinesfalls seinen Anfang dar.

Aus den allwöchentlichen Temperaturmessungen in der Mitte des Sees, die von den Meteorologen der dortigen Meteorologischen Station auf meine Bitte im Verlaufe von 2 Jahren ausgeführt wurden, ist zu ersehen, dass der Wind wirklich das Wasser durchmischen kann. Je nach der Stärke und Dauer des Windes reicht diese Durchmischung entweder bis zum Boden oder bis zu einer bestimmten Tiefe. Das ist an Hand der gegebenen Tabellen (III) und Diagramme A—D zu ersehen. Dass bei dieser Durchmischung des Wassers eine Homohalinität hergestellt werden kann, ist vollkommen denkbar. Ein solcher Fall ist von mir in allerletzter Zeit beobachtet worden. Eins ist jedoch klar, dass, wenn auch eine solche gründliche Durchmischung des Wassers stattfindet, trotzdem die dadurch verursachte

Homohalinität nicht lange erhalten bleibt, da durch den Bodenstrom, der ständig schwere Wassermassen in die tiefsten Teile des Sees zuführt, die Kathalinität, d. h. die Schichtung, bald wieder hergestellt wird. Gerade das beobachtete ich kürzlich: Nach einer gründlichen Durchmischung des Wasser nämlich, die Homohalinität und Homothermie nach sich gezogen hatte, schichtete sich am Boden salzhaltigeres und wärmeres Wasser, das auch weniger O<sub>2</sub> enthielt, und das dem Unterstrom entstammte (Diagr. 18, 19). Während der herbstlichen Abkühlung findet man sehr oft Homothermie oder aber einen Zustand, der der Homothermie sehr nahe kommt. In diesen Fällen weist das Wasser eine mehr oder weniger starke S-Schichtung auf. Eine Homothermie lässt also

Tabelle III

Die 1<sup>o</sup>-Messungen sind an der Station 8 (Abb. 1) ausgeführt

Die hinter dem Monatsnamen stehende Zahl bezeichnet die mittlere Monatstemperatur. Die Zweite Reihe enthält die Tagesdaten. Unter jedem Datum steht die mittlere tägliche 1<sup>o</sup> für den betreffenden Tag. Unter jedem Tabellenabschnitt stehen Angaben über die stärkeren als 8 m/s während der entsprechenden Periode stattgefundenen Winde und zwar: Die linke Reihe enthält das Tagesdatum, die mittlere Reihe enthält die mittlere tägliche 1<sup>o</sup> für den betreffenden Tag und die rechte Reihe enthält die Schnelligkeit des Windes in Meter.

März 1935, 3·4				April 1935, 10·5							
m	14	18	25	1	5	9	12	16	23	m	30
	2·8	4·2	5·2	6·4	14·4	6·6	9·9	8·3	12·4		12·1
0	5·6	4·1	5·9	8·4	9·2	10·2	11·6	10·9	11·9	0	13·2
6	3·7	3·3	3·5	6·0	6·5	8·6	8·6	10·9	10·6	5	13·1
8	3·7	3·1	3·5	5·3	5·4	6·9	6·1	9·5	8·7	8	10·5
9	3·6	3·2	3·5	5·3	6·6	5·9	5·1	7·4	7·9	9	9·6
10	3·7	3·2	3·6	5·3	5·5	5·0	5·0	5·9	6·8	10	9·2
11	3·8	3·2	3·7	5·4	5·1	5·8	5·0	5·6	6·5	11	8·0
12	3·0	3·5	3·8	4·7	4·8	4·9	5·1	5·1	5·6	12	7·6
13	4·0	3·8	4·0	4·5	4·5	4·8	4·7	5·1	5·7	15	7·1
17	4·4	4·4	4·2	4·3	4·4	4·6	4·7	5·0	6·0	17	8·3

März 1935

April 1935

1—10·5—9	10—0·8—17	6—10·0—8	15—10·0—10
2—8·5—10	15—0·1—17	7—8·8—8	16—8·3—10
5—2·2—8	16—0·6—9	9—6·6—10	17—8·2—14
8—1·7—15	25—5·6—9	12—9·9—8	27—17·2—13
9—1·8—19	31—5·8—14	14—9·6—9	28—15·6—10

Mai 1935, 14·2				Juni 1935, 19·9				
7	14	21	29	4	11	15	19	27
8·1	18	13·8	17·1	17·5	20·3	19·2	18·4	21·2
12·7	15·0	17·4	19·8	20·3	24·3	23·9	—	—
11·6	14·0	16·5	19·2	20·2	21·3	—	—	—
11·0	11·7	12·3	14·1	15·5	16·0	16·2	16·4	18·2
10·7	10·0	11·8	12·9	13·3	14·4	13·3	13·7	14·4
9·8	9·6	10·0	11·1	11·8	13·7	11·6	12·6	12·7
9·2	9·0	9·4	10·6	10·8	10·5	10·8	11·1	11·5
8·0	8·7	9·2	9·8	10·6	10·3	10·4	10·4	11·1
8·4	8·6	9·2	9·2	9·4	9·6	9·8	9·8	10·0
8·7	8·5	9·0	9·1	9·3	9·6	9·7	9·7	9·9

Mai 1935		Juni 1935	
1—13·2—9	18—14·3—8	6—18·6—9	
3—7·0—9	20—15·5—8	7—20·0—8	
8—10·4—9	21—13·8—8	13—21·0—9	
10—10·2—8	22—16·6—8	14—19·1—9	
14—18·0—9	26—21·8—9	21—21·0—8	
15—13·4—8	27—22·2—11	22—22·0—9	

Juli 1935, 21·3							August 1935, 21·8				
m	3	5	10	17	19	26	2	8	14	23	31
	20·2	25·0	18·2	21·7	21·3	21·6	18·6	21·1	23·2	20·5	22·5
0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	17·7	17·7	17·5	19·1	17·8	21·4	20·7	19·6	20·1	20·8	21·3
9	15·3	15·9	15·2	16·2	14·4	18·8	18·5	17·3	17·8	19·8	19·7
10	13·4	14·5	14·2	13·8	13·3	17·2	14·7	14·6	14·0	17·5	16·5
11	12·2	12·5	12·7	12·6	12·6	14·5	13·4	12·5	12·9	15·7	16·7
12	11·3	11·5	11·3	11·6	11·7	12·7	12·1	11·8	11·7	14·0	13·3
15	10·0	10·2	11·2	10·3	10·3	10·7	10·5	10·6	10·7	11·4	11·9
17	10·0	10·0	10·1	10·2	10·3	10·1	10·1	10·4	10·6	10·9	11·5

Juli 1935	
14—20·2—11	
23—22·1—9	
25—19·8—12	
30—23·8—8	
31—22·6—8	

August 1932	
4—21·2—8	20—20·3—10
11—21·7—8	21—23·5—14
16—23·9—10	23—20·5—8
19—20·4—9	26—22·4—8

Sept. 17-5		Oktober 1935, 15-6				November 1935, 7-3				
10	16	10	12	22	31	<i>m</i>	5	12	17	27
16	17	17-3	17-4	19	19-5		6-7	10-6	7-2	5
—	—	20-0	19-9	18-4	15-1	0	12-0	11-8	10-6	8-3
21-5	20-5	19-7	19-9	18-2	15-1	5	12-2	11-8	10-6	8-7
21-2	20-1	18-3	18-8	18-9	15-2	8	12-2	12-1	10-8	8-7
20-6	19-3	17-8	18-6	18-7	15-2	9	12-1	12-1	10-9	8-6
19-0	17-8	17-6	18-4	18-3	15-1	10	12-1	12-1	10-8	8-6
17-2	16-7	17-5	17-5	17-8	15-2	11	12-1	12-2	10-8	8-7
14-9	14-7	15-5	16-7	16-3	15-1	12	11-8	12-1	10-9	8-7
12-7	12-5	14-3	14-4	15-0	15-4	15	11-9	12-2	11-3	8-7
12-0	12-7	—	14-4	14-7	14-0	17	11-9	12-2	12-1	9-0

September 1935

2-19-0-9  
 5-23-0-9  
 6-24-2-9  
 7-22-2-15  
 9-15-9-9  
 10-16-0-8  
 16-17-0-9  
 17-17-9-8  
 19-18-0-8  
 21-19-2-8  
 26-19-8-17  
 27-10-4-10  
 28-12-9-9  
 29-11-1-8

Oktober 1935

1-14-4-9  
 4-18-3-8  
 5-18-1-8  
 6-19-4-9  
 20-16-0-9  
 21-16-1-9  
 24-18-4-9  
 27-12-1-14  
 28-11-2-11  
 29-9-0-15  
 30-9-1-16

November 1935

3-3-8-22  
 12-10-6-9  
 13-8-1-10  
 14-8-6-10  
 15-8-0-13  
 16-7-4-12  
 19-10-1-10  
 20-1-9-20  
 21-0-9-10  
 24-7-3-8  
 26-6-0-10  
 28-6-1-10  
 29-4-0-10

Dezember 1935, 6					Jan. 6-4			Februar 1936, 4				
3	13	19	25	30	11	17	28	7	15	<i>m</i>	19	27
8-6	1-1	6-2	3-2	6-6	8-4	8-3	9-2	3-7	1-6		3-3	5-7
7-3	5-8	6-3	5-9	6-9	6-1	6-2	6-6	7-1	3-6	0	3-6	4-1
8-2	7-1	6-5	6-0	6-6	6-7	6-4	6-8	7-2	3-7	3	3-5	4-2
8-2	7-3	6-5	6-1	6-6	6-7	6-8	6-8	7-2	3-6	5	3-6	4-1
8-2	7-3	6-4	6-1	6-6	6-7	6-8	6-8	7-2	3-5	8	3-5	7-2
8-3	7-3	6-5	5-4	6-7	6-7	6-8	6-9	7-3	3-6	9	3-7	4-3
8-4	7-3	6-5	6-6	6-7	6-7	6-9	6-9	7-3	3-5	10	3-8	4-2
8-5	7-3	6-8	6-8	6-6	6-8	6-9	7-0	7-4	3-5	11	4-0	4-1
8-7	7-6	7-6	6-4	6-7	7-0	7-2	7-2	7-7	3-6	12	4-1	4-2
8-8	8-4	7-6	6-8	7-0	7-1	7-3	7-5	8-0	4-0	15	3-9	4-4

Dezember 1935		Jan. 1935		Februar 1936	
6-11.4-13	16-6.4-9	11-8.4-10	4-11.0-11	11- -7.7-20	
9-9.6-10	17-2.6-10	12-9.6-17	6-4.9-9	12- -8.4-16	
10-9.0-16	18-2.6-9	20-6.0-9	7-3.7-17	13- -3.3-16	
11-3.4-10	19-6.2-9	23-10.8-15	8-2.8-17	14-1.8-10	
13-1.1-13	22-4.5-11	24-3.9-17	9-1.6-11	28-8.4-8	

März 1936, 7.6					April 1936, 11.3				
<i>m</i>	5	14	20	24	3	13	18	25	30
	6.6	9.2	6.2	10.6	9	11	13.3	11.2	13.2
0	7.4	8.4	8.0	9.1	10.1	10.9	12.6	12.8	15.0
3	7.3	8.2	7.9	8.7	9.6	11.1	12.6	12.8	14.4
5	5.9	7.8	7.6	8.4	9.8	10.9	12.0	12.6	13.7
8	4.8	6.0	7.2	7.5	8.2	9.9	10.5	12.3	12.8
9	4.5	5.8	7.0	7.0	8.1	8.8	9.5	10.7	12.0
10	4.7	5.6	6.9	6.9	7.8	7.8	9.4	10.4	10.9
11	4.7	5.5	6.5	7.3	7.3	8.9	9.3	9.3	10.8
12	4.5	5.3	6.3	6.0	7.1	7.0	8.2	9.0	9.1
15	4.9	5.2	5.5	5.8	6.5	6.7	7.1	8.0	8.6
17	5.2	5.3	5.6	6.0	6.8	6.7	8.3	11.6	8.7

März 1936				April 1936			
4-8.0-8	19-7.6-9	3-9.0-9	15-11.6-3				
5-6.6-8	21-5.2-10	7-6.7-9	16-11.1-8				
6-7.4-9	25-11.2-8	8-11.9-13	19-10.4-13				
17-8.6-9	26-10.3-9	12-12.2-10	20-10.5-10				
18-7.2-11	28-9.1-8	14-10.7-9					

Mai 1936, 14.7					Oktober 1936, 12.4			
<i>m</i>	9	16	23	28	10	16	23	30
	11.4	15.3	15.4	17.3	10.6	10.1	10.9	12.8
0	15.6	17.2	16.8	18.7	16.9	15.3	14.7	13.9
3	15.2	17.2	16.6	18.5	16.8	15.1	14.4	13.9
5	14.6	16.7	16.6	17.5	16.8	15.3	14.6	13.9
8	13.9	15.1	15.1	15.1	17.0	16.2	14.6	13.9
9	13.8	13.6	13.5	14.2	17.0	16.6	15.1	13.8
10	13.3	12.0	12.9	12.6	17.0	16.5	15.7	14.1
11	12.8	11.3	11.7	11.4	16.9	16.3	15.9	15.5
12	11.5	10.1	10.6	10.5	16.5	15.9	15.8	15.7
15	8.9	9.4	9.6	10.0	15.9	15.9	15.6	15.1
17	8.9	9.6	9.6	9.9	16.0	15.9	15.3	14.9

Mai 1936		Oktober 1936	
1—12·6—8		2—11·0—13	19—11·6—8
12—16·8—9		4—14·8—11	25—10·2—11
13—17·8—16		5—12·0—9	28—13·0—8
18—10·9—9		10—10·6—9	29—13·6—9
24—16·8—9		17—12·9—8	31—15·4—8

November 1936, 8·1					Dezember 1936, 3·2				
m	6	11	19	28	4	10	18	23	30
	15·3	12·4	11·9	—0·6	2·6	5·8	5·2	1·1	—2·9
0	14·0	14·3	12·9	8·0	7·2	6·9	7·1	5·8	4·3
3	14·0	14·2	13·5	8·0	7·1	6·9	7·0	5·9	4·3
5	14·0	14·4	13·0	8·2	7·1	6·8	6·9	6·0	4·3
8	14·8	14·7	13·8	8·2	7·1	6·7	6·9	6·2	4·3
9	15·1	14·8	14·2	8·1	7·1	7·1	6·9	6·3	4·4
10	15·3	15·1	14·4	8·5	7·1	7·2	6·9	6·3	4·5
11	15·3	15·3	14·9	8·6	7·1	7·5	7·3	6·5	4·4
12	15·2	15·3	14·9	9·2	7·1	7·9	7·7	6·5	4·5
15	14·9	14·8	14·5	14·2	8·1	9·9	8·6	8·2	5·7
17	14·5	14·3	14·3	14·2	14·3	8·8	8·4	8·3	5·8

## November 1936

5—12·3—8  
6—15·3—9  
12—8·6—15  
20—11·9—9  
22—5·3—8  
23—2·2—10  
24—1·8—9  
25—0·6—9  
36—0·1—20  
27—0·2—14

## Dezember 1936

2—4·8—10  
3—2·3—13  
4—2·6—9  
5—2·6—11  
6—2·8—11  
18—5·2—11  
19—4·1—9  
20—3·2—9  
21—3·2—14  
24—4·0—11  
25—3·3—17  
26—3·0—9  
27—2·6—20  
28—0·4—12

auf eine vorhergegangene oder noch andauernde Homohalinität schliessen. Nicht immer aber fällt die Homothermie mit einer Homohalinität zusammen; als Beispiel hiefür kann ich die Feststellung vom März 1935 (Diagr. 2, 3) und Oktober 1940 (Diagr. 10) anführen. In beiden Fällen war die  $t^{\circ}$ -Kurve fast isotherm, aber der S wies eine ausgesprochene katohaline Schichtung auf. Das schwere Wasser stellt offenbar Meerwasser dar, das zu jener Zeit dieselbe Temperatur hatte wie das Wasser des Sees selbst.

Viel öfter wird eine gründliche winderzeugte Durchmischung des Wassers bis zu einer bestimmten Tiefe hervorgerufen; darüber belehren uns die Beobachtungen vom Dezember 1934;

Die  $t^0$ - und S-Kurven sind bis zu 8 m Tiefe vertikal, während nur 2 Monate vorher die S-Kurve die gewöhnliche „Sommerform“ zeigte. Dass die Winde nicht tiefer eingegriffen haben, zeigt das Intaktbleiben der Unterschicht. — Auch im März 1935 haben wir eine ideale vertikale S-Kurve bis zu 9 m Tiefe.

Der Fall vom Dezember 1934 belehrt uns noch darüber, dass die Abkühlung der Unterschicht, genau so wie seine Erwärmung im Sommer, fast vollkommen unabhängig von dem  $t^0$ -Gang der Oberschicht ist. Jetzt haben wir am Boden eine schwere, warme Wasserschicht, die als Restwasser vom Sommer her zu deuten ist (Diagr. 1). Das erhellt auch aus der Tatsache, dass dieses Wasser das  $H_2S$  behielt. Drei Monate später finden wir wieder eine schwere Wassermasse, die jedoch, da sie kein  $H_2S$ , sondern  $O_2$  enthält, als neues aus dem Bodenstrom entstandenes Wasser zu deuten ist (Diagr. 3). Inzwischen also hat eine Durchmischung des Wassers stattgefunden.

Die Beobachtungen vom September 1938 werfen etwas Licht auf die Frage über die Art und Weise, auf die der Wind in die Statik des Sees eingreift und den Gleichgewichtszustand des Wassers stört. — Die Grenze des  $H_2S$  war Mitte September in der östlichen Hälfte des Sees bei 11 m Tiefe. Infolge eines starken Windes, der am 17. IX. mit einer Schnelligkeit von 15 m/S ausbrach, musste ich meine Arbeit unterbrechen und die Milderung des Wetters abwarten. Ich hoffte, ich würde endlich das Eingreifen des Windes in die untere Schicht selbst und direkt feststellen, was vor allen Dingen sich darin äussern müsste, dass die  $H_2S$ -Grenze mehr oder weniger herabgedrückt würde. Zu meinem Erstaunen aber konnte ich nun feststellen, dass die  $H_2S$ -Grenze, die vor dem Winde bei 11 m Tiefe war, nach dem Winde 2 m höher erschien. Eine weitere wichtige Feststellung war die, dass das Plankton dieser sozusagen neuen Schicht, zwischen 9 und 11 m, gemischt war — zusammengesetzt aus dem Plankton der beiden Schichten, d. h. es enthielt Oxybionten- und Sapropelplanktonen, was sonst nicht vorkommt. — Der Verlauf der S-Kurve blieb derselbe wie vorher — war nicht vertikal, sondern normal gebogen. Man kann also nicht von einer gründlichen Durchmischung des Wassers von 0 bis 11 m Tiefe sprechen. Wäre das der Fall gewesen, dann hätte man eine gleichmässige vertikale Verteilung von  $t^0$  und S von der Oberfläche ab bis zu 11 m Tiefe erwarten müssen. Es ist aber doch klar, dass inzwischen eine teilweise Durchmischung des Wassers von der Oberfläche bis zu 11 m Tiefe stattgefunden hat — dafür spricht wenigstens die Entstehung einer neuen Mittelschicht mit gemischtem Plankton. — Alle bei dieser Beobachtung festgestellten Tatsachen: 1. Die Erhöhung der  $H_2S$ -Grenze, 2. die Entstehung einer neuen Schicht und 3. der Verlauf der S-Kurve — machen folgende Schlussfolgerung zwingend: Durch den Wind entstehen mehrere übereinander liegende, einander sich bedingende Strömungen. Die unterste derselben hat offensichtlich die  $H_2S$ -

haltige schwere Wasserschicht angegriffen und dadurch einen Teil des Gases und des Planktons derselben in sich aufgenommen. Nur so ist das Sichfortpflanzen des  $H_2S$  und des Sapropelplanktons nach oben bis zu 9 m Tiefe zu erklären. Nur so ist weiterhin die Entstehung einer neuen Schicht mit gemischtem Plankton und auch das sonderbare Verhalten der S-Kurve zu erklären.

Ist der beschriebene Fall auch so instruktiv, dass er an der Richtigkeit der gezogenen Schlüsse betreffs der Windwirkung bei der Durchmischung des Wassers keinen Zweifel mehr aufkommen lässt, erbringen die Analysen der  $t^0$ , S- und  $O_2$ -Angaben für einen jeden anderen Fall weitere, bekräftigende Beweise dafür. Alle diese Analysen zeigen auf eine unzweideutige Weise, dass der winderzeugte *Ab- und Aufbau des Wasserkörpers einen stockwerkartigen Vorgang darstellt*. Wir beginnen mit der Betrachtung einzelner dieser Eigenschaften des Wassers.

Eine Abkühlung der Unterschicht auf Grund thermischer Konvektion ist vollkommen ausgeschlossen. Wie wir aus beigegebenen Tabellen sahen, wird der Vorgang der Durchmischung dynamisch durch die Winde hervorgerufen. Das Wasser wird nicht auf einmal von der Oberfläche bis zum Boden durchgemischt, und zwar auch dann nicht, wenn sichere Anzeichen vorliegen, dass die Abkühlung auch die Bodenschicht berührt hat. Bemerkenswerterweise sind manche der  $t^0$ -Kurven zu dieser Zeit *treppenartig* gebaut, was unzweideutig auf einen stockwerkartigen, oder richtiger gesagt treppenartigen, Abbau der Wärme des Sees hindeutet.

Die Idee von dem stockwerkartigen Abbau des Wasserkörpers während der herbstlichen Durchmischungen findet eine weitere Unterstützung in dem  $O_2$ -Haushalte des Sees. Nach dem ersten Sturm im Herbst, der zum vollständigen Schwund des  $H_2S$  führt, findet man sehr niedrige  $O_2$ -Werte in den tieferen Schichten. Dieser Fund erlaubt aber noch keine bestimmteren Schlüsse, da man immer mit einer Abnahme der ursprünglichen, in die Tiefe eingedrungenen  $O_2$ -Menge infolge der Oxydation des  $H_2S$  rechnen muss. Nach dem zweiten Sturm findet man höhere  $O_2$ -Werte, die aber kaum 50% übersteigen. Hätte der Wind das Wasser also gleichmässig bis zum Boden durchgemischt, so hätten wir eine gleichmässige Verteilung des Gases erwarten müssen. Die Menge des  $O_2$  in den tieferen Schichten nimmt nach jedem Sturm zu, erlangt aber äusserst selten 100%. Das letztere ist nur bei gründlicher und vollkommener Durchmischung des Wassers zu beobachten und ist von Isothermie und Isohalinität begleitet. Eine solche Verteilung des  $O_2$  ist genau so wie die Isohalinität, eine vorübergehende. In den weitaus meisten Fällen finden wir im Winter von 10 m ab eine allmähliche Abnahme des  $O_2$  (Diagr. 12, 16), abgesehen von jenen Fällen, wo der Unterstrom  $O_2$ -reichere Wassermassen in die Unterschicht bringt (Diagr. 15).

Die aufgezählten Tatsachen und Erörterungen weisen darauf hin, dass der Wind tatsächlich niedrigere Temperaturen und  $O_2$  in die Tiefe hinabzuarbeiten vermag, dass er also im Stande ist, eine Durchmischung des Wassers bis zum Boden zu verursachen. Das letztere aber hat nichts mit einer *Vollzirkulation*, wie uns diese aus den meisten Lehrbüchern der Limnologie her bekannt ist, zu tun. Eher müssen wir annehmen, dass der Wind höchstens bis zu einer bestimmten Tiefe  $O_2$  oder niedere  $t^\circ$  direkt hinunterarbeiten kann, und dass dann die so angereicherten Schichten, wieder durch den Wind veranlasst, einen Teil des erworbenen Gases wie auch niederen Temperatur der darunter liegenden Schichte abgeben.

Nach den obigen Erörterungen ist uns vollkommen klar, dass es sich in allen Fällen der Hinabarbeitung von niederen Temperaturen in die Seetiefe eigentlich um Hinabarbeiten von Wassermassen handelt, die die niedere  $t^\circ$  mit sich bringen. Da aber der Wind seine mechanische Tätigkeit auch bei einer starken Anthermie ausüben würde, so könnten wir erwarten, dass im Sommer durch die Winde eine rapide Erwärmung des Bodengewässers unter Umständen erzielt würde. Das ist tatsächlich zu beobachten. So erschien z. B. nach dem am 26—28. IX. 35 gewehten Winden (9—17 m/s) die Bodenschicht plötzlich mit einer enorm erhöhten  $t^\circ$  (Tabelle III, vergl. die Prophilen von 16. IX. 35 und 10. X. 35), was unzweideutig darauf hinweist, dass ein Teil des wärmeren Oberschichtwassers mit der Unterschicht durchgemischt worden ist. Dass dabei ein Fortpflanzen des  $H_2S$  nach oben stattfände, wie im Falle vom Sept. 1938 (s. o. S 28), ist von vornherein anzunehmen. Die Folge einer solchen Situation wäre dann das Aussterben der Oxybionten (infolge der  $O_2$ -Abnahme? Oder infolge der  $H_2S$ -Vergiftung?). Über einen solchen Fall berichtet neuerdings Paspaleff (1941). In einem grossen Teile des Sees sind die Fische am 25. u. 26. VIII. 40 eingegangen und zwar knapp nach dem starken (17m/s) Winde vom 23. VIII.

Versuchen wir jetzt die Salzgehaltsverhältnisse unter diesem Gesichtspunkte zu analysieren, so bekommen wir eine weitere Stütze für die Idee des treppenartigen Abbaues des Wasserkörpers während der herbstlichen Durchmischungen.

Man findet nämlich in den weitaus meisten Fällen nach stattgefundenen Winden bei Vorhandensein sicherer Anzeichen, dass eine Durchmischung stattgefunden hat, *wieder eine Schichtung des Wassers*. Das Neue aber, was die Winde in solchen Fällen schaffen, ist das Ausstrecken der S-Kurven. Weist also das Wasser vor der Durchmischung eine stark ausgeprägte Schichtung auf, so zeigt sie in vielen Fällen *auch nach den Winden eine solche, jedoch nicht so stark ausgeprägt*.

Wenn man in einem jeden Fall alle aufgezählten Eigenschaften des Wassers—S,  $O_2$ , und  $t^\circ$ —ana-

lysiert, so kommt man unzweideutig zu der Idee des *stockwerkartigen*, richtiger gesagt, *treppenartigen* Ab- und Aufbaues der Schichtung während der herbstlichen Durchmischungen. Diese Erscheinung kann nur als die Folge eines Induktionsströmungssystems aufgefasst werden.

Wie erwiesen ist, veranlasst die Unterströmung einer wind-erzeugten Oberflächenwasserzirkulation durch Saugwirkung eine zweite Zirkulation, eine *Induktionsströmung*, deren Oberströmung die gleiche Richtung der Unterströmung der ersteren hat (Abb. 7). Die induzierte Zirkulation ist wesentlich schwächer; trotzdem aber ist sie im Stande, auf Grund desselben Prinzips eine dritte, noch schwächere Strömung hervorzurufen; diese erzeugt dann eine vierte usw. Die unbedingte Voraussetzung dafür ist das Vorhandensein zweier oder mehrerer Wasserschichten verschiedener Dichte. Eine jede Schichte bildet dann eine separate Zirkulation. Wie die Beobachtungen L. Möllers (1935, S. 208) gezeigt haben, reicht ein  $t^{\circ}$ -Gradient von  $\frac{1}{4}^{\circ}$  pro 1 m vollkommen aus, um eine Dichteschichtung in einem Süßwassersee

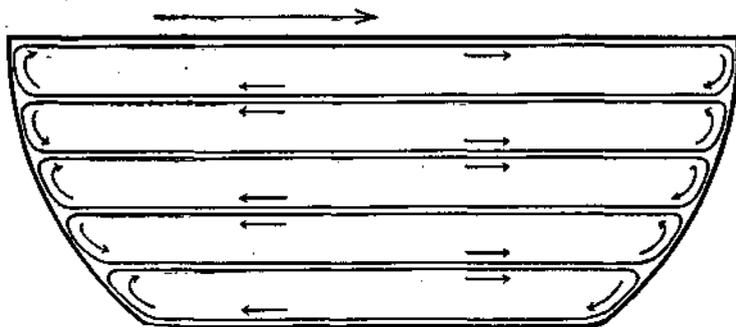


Abb. 7. Erklärung im Text.

hervorzurufen, die dann die Abgrenzung von zwei (oder bei mehreren Sprungschichten von mehreren) Windzirkulationen bilden würden. Der Varna-See mit seiner stark ausgeprägten thermohalinbedingten Schichtung ist ein ausgezeichnetes Substrat für Ausbildung mehrerer übereinander gelegener Wasserzirkulationen. Ein Wind kann ohne weiteres den Impuls dafür geben. Dass der Wind tatsächlich im Stande ist, in der Tiefe Strömungen zu erzeugen, und zwar von entgegengesetzter Richtung, darüber belehren uns die Beobachtungen von Netchaeff & Tcherneff. So haben diese Autoren bei einem starken Ostwind, der gewaltige Wassermassen in den Boas hineingetrieben hat, in einer Tiefe von nur 1 m eine schnelle Bewegung in entgegengesetzter Richtung feststellen können.

Die Bildung von mehreren übereinanderliegenden Induktionsströmungen ist experimentell untersucht worden und zwar von Sandström und Wedderburn (s. Krummel, Bd. II, p. 539). Die Ergebnisse dieser Experimente, die in einem nicht grossen Glastrog vorgenommen wurden, entsprechen vollkommen den in der Natur beobachteten Erscheinungen. Dass aber ein jeder Fall aus der freien Natur uns mannigfaltige Abweichungen darbieten würde, damit müssen wir immer rechnen.

Die einzelnen Zirkulationswalzen eines Induktionströmungssystems treten in Wechselwirkung zueinander, indem eine jede durch Mischung einen Teil ihres Wassers den benachbarten Walzen abgibt. Dauert dieser Vorgang sehr lange, dann kann eine vollkommene, gründliche Durchmischung bis zum Boden erzielt werden.

Nur durch die Annahme eines Stockwerkes von Induktionsströmungen ist das langsame Eindringen des  $O_2$  und der Oberflächentemperatur in die Tiefe, wie auch das langsame Fortpflanzen des  $H_2S$  nach oben zu erklären. Auch die Auf- und Abbauvorgänge des Salzgehaltes, die nach den starken Winden zu beobachten sind, finden ihre Erklärung nur in der oben-erwähnten Annahme.

Von Fall zu Fall sind immer gewisse Unterschiede in dem Auf- und Abbau der Wasserschichtung festzustellen. So z. B. erzielen die Winde in manchen Fällen eine fast geradlinige und mehr oder weniger geneigte S-Kurve, während sie in anderen Fällen eine vollkommene, gleichmässige Durchmischung des Wassers bis zu einer bestimmten Tiefe oder sogar bis zum Boden hervorrufen. Was kann die Ursache dafür sein?

Sind die Windstärke und die Winddauer jene Faktoren, von welchen das jeweilige Ausmass der Stabilität<sup>1)</sup> abhängt, so sind es andererseits eine ganze Reihe andere Faktoren (Windrichtung, Windstärke, Schichtung des Wassers, Temperatur des Wassers, Bodenrelief), die die Art und Weise, auf welche der Einfluss des Windes sich auswirkt, bestimmen.

Bei Seen mit unregelmässiger Form (wie es beim Varna-See der Fall ist), ist die Windrichtung von ausschlaggebender Bedeutung für die Form sowie für das Ausmass der winderzeugten Strömungen. Ich verweise diesbezüglich auf die Arbeit Müllner's (S. 370), wo er sagt: „Nach den erörterten Sachlagen scheint jedoch der ausschlaggebende Moment für das Ausmass der dem See zugeführten Windenergie nicht in der mittleren Tiefe, sondern in der Lage und Gestalt des Sees, sowie

<sup>1)</sup> Unter Stabilität der Schichten versteht Schmidt jene Energiemenge, die der Wind aufbringen muss, um geschichtetes Wasser in Mischung zu versetzen. Vermöge der inneren Reibung im Wasser ist sie um so grösser, je stärker sich die Schichten, die durchmengt werden sollen, in ihrer Dichte voneinander unterscheiden\* (Müllner, S. 363).

in der Eigenart der Windverhältnisse gelegen zu sein“. Ein noch krasserer Beispiet stellt der Sakrower-See dar, in welchem die Ausgestaltung des ganzen Systems von Strömungen auf das engste von dem Bodenrelief abhängt (Möller, 1935).

Auch die Schichtung des Wassers, die der Wind in einem gegebenen Falle zu verarbeiten hat, ist für das Endresultat der Durchmischung von grosser Bedeutung. Das ist eine Tatsache, die keiner weiteren Erörterung bedarf.

Für die Ausgestaltung des Induktionsströmungssystems scheint die Temperatur insoferne von Bedeutung zu sein, als verschieden temperierte Wasserschichten entsprechend verschiedene Viscosität haben und infolgedessen sich verschiedenartig bei der Strömungsbildung resp. der Mischung verhalten. So gewann ich den Eindruck, ohne dafür zahlenrässige Daten erbringen zu können, dass die Winde im Winter tiefer eingreifen als die Winde derselben Richtung, Stärke und Ausdauer im Sommer. Ein anderer Faktor, dessen ausschlaggebende Bedeutung in dieser Richtung hin nicht im geringsten angezweifelt werden kann, ist die Windstärke, und zwar nicht die durch den Wind dem See zugeführte Windenergie, sondern die Intensität dieses Vorganges: kurz andauernde aber stärkere Winde verursachen tiefer eingreifende Zirkulationen des Wassers als schwächere, aber entsprechend länger anhaltende Winde. So ist z. B. die durch die schwachen Winde dem See während des ganzen Sommers zugeführte Energie der dem See durch einen starken Herbstwind zugeführten weit überlegen. Und trotzdem bewirkt der letztere eine viel tiefer gehende Durchmischung des Wassers. Wo geht nun die Energie der schwächeren Sommerwinde verloren? Offensichtlich in der inneren Reibung innerhalb der Oberschichte.

Zuletzt will ich im Zusammenhang mit der Durchmischung des Wassers noch eine Frage streifen, und zwar bezüglich der Ausdehnung und räumlichen Beziehung der Induktionsströmungen. Zieht man die Tatsache in Betracht, dass nach stattgefundenen Winden die Isolinien stärker geschlängelten Verlauf aufweisen als vorher, so kommt man zu dem Schluss, dass die einzelnen Strömungen sich nicht durch die ganze gegebene Tiefe erstrecken. Andererseits aber erlaubt die Schichtung des Wassers nicht eine Ablenkung der Stromrichtung in vertikaler Richtung. Eher sollen wir annehmen, dass in einer bestimmten Tiefe mehrere, beziehungsweise viele Zirkulationswalzen entstehen, die dann jede für sich in Wechselwirkung mit den benachbarten eintreten.

Die durch den Wind einem See zugeführte Energie verursacht noch eine ganze Reihe Bewegungsformen; eine jede derselben nimmt — je nach dem Fall — mehr oder weniger an dem Durchmischungsvorgang teil. Die internen Wellen sowie das interne Seich gehören dazu.

Bei meinen wiederholten Versuchen, diese zwei Bewegungsformen nachzuweisen, stiess ich zuerst auf Tatsachen, die ihr Vorhandensein als wahrscheinlich erscheinen liessen. So fand ich sehr oft bei  $t^0$ -Lotungen an einer Station und bei einundderselben Tiefe verschiedene  $t^0$ -Werte. Eine genauere Untersuchung dieser Erscheinung mittels der zeitraubenden Urkippthermometer swar unmöglich, umso mehr als diese Schwingungen des Wassers, wenn solche überhaupt vorhanden waren, durch die stark ausgeprägte Schichtung bedingt, von verhältnismässig kurzen Perioden wären. Erst das neue elektrische Thermometer ermöglichte die Beantwortung der mich interessierenden Frage. So fand ich bei drei nacheinander ausgeführten  $t^0$ -Profilentnahmen, dass tatsächlich schnelle  $t^0$ -Schwankungen auftreten. Diese hatten aber nichts mit der wellenförmigen Schwingung des Wassers zu tun. So sieht man hie und da wärmere Wassermassen auftreten, die dann plötzlich verschwinden. Ich bin geneigt, diese Tatsache auf die horizontalen Strömungen zurückzuführen.

Tabelle IV.

Drei  $t^0$ -Profile, aufgenommen an der Station 6. in Zeitabständen von 15 Min.

Tiefe	I	II	III		I	II	III		I	II	III
0 m	13·7	13·5	13·0	6 m	13·4	13·4	13·4	12 m	13·6	13·6	13·6
1 „	13·6	13·5	13·8	7 „	13·6	13·6	13·6	13 „	13·0	13·1	12·25
2 „	13·4	13·4	13·4	8 „	13·7	13·7	13·6	14 „	12·9	13·0	12·9
3 „	13·4	13·25	13·3	9 „	13·8	13·8	13·8	15 „	12·9	12·7	12·8
4 „	13·4	13·2	13·2	10 „	13·95	13·9	13·9	16 „	12·6	12·65	12·8
5 „	13·4	13·2	13·25	11 „	13·8	13·8	13·8	17 „	13·25	13·0	12·9
								18 „	12·6	12·9	13·5

Eine analoge Feststellung machte Elster am Bodensee. Er fand, „dass die  $t^0$ -Kurven einer einzelnen Station und Tiefenstufe stets Veränderungen zeigten“, die „eine so grosse Verschiedenheit in Bezug auf Rhythmus und Richtung des Ausschlages“ aufweisen, dass vorläufig jeder Versuch, diese als periodisches internes Seich zu erklären, ihm problematisch erschien. Er ist eher geneigt, sie auf Passieren fortschreitender interner Wellen zurückzuführen, oder aber sie als „Kalt- und Warmwasserbrüche, vermutlich infolge von Wirbelbildung“ aufzufassen (p. 89).

In unserem Falle ist kein Grund vorhanden, anzunehmen, dass die festgestellten  $t^0$ -Schwankungen auf internen Wellen oder auf internem Seich beruhen: Dies beweist ihre Unregelmässigkeit. Eher finde ich für angebracht, sie in Zusammenhang mit den Tiefenströmungen, die sich in horizontaler Richtung bewegen, zu bringen. Von „Wirbelbildungen“ kann hier ebenfalls keine Rede

sein, denn der Ausdruck „Wirbel“ setzt eine Verschiebung von Wassermassen in allen, und vor allem in vertikaler Richtung voraus: in unserem Falle ist diese Verschiebung aber nur in horizontaler Richtung möglich.

Es scheint mir, dass eine weitgehende Analogie zwischen den katohalinen Seen wie der Varna-See ist, und den Süßwasserseen in Bezug auf die Art und Weise der Wasserdurchmischung besteht. So hat schon Murray, und zwar als erster, bei seinen Untersuchungen in den engen Fjorden des westlichen Skottland festgestellt, dass der Wind der Faktor ist, der das Wasser durchmischt, und so die Tiefenschichten mit  $O_2$  anreichert. Er hat dieselbe Feststellung auch an Binnenseen gemacht: nach seiner Ansicht reicht die auf diese Weise hervorgerufene Durchmischung bis 70 m Tiefe—eine Zahl, die nach den neueren Untersuchungen beträchtlich höher sein kann.

Die Auffassung, dass die Winde das Wasser der Binnenseen durchmischen, gewinnt immer mehr Anhänger, während der thermischen Konvektion an den Zustandekommen dieses Vorganges immer weniger Bedeutung zugeschrieben wird. Um eines der vielen Beispiele anzuführen, erwähne ich hier die Arbeit Müllner's. So kommt dieser Autor nach dreijährigen Temperaturmessungen im Achensee zu dem Schluss, dass „lediglich kräftigere Stürme tiefere Temperaturen weiter in den See hinabzuarbeiten im Stande sind“. — Zu sehr interessanten Schlussfolgerungen in Zusammenhang mit den durch den Wind verursachten Vorgängen kommt L. Möller nach langjährigen Temperaturmessungen im Sakrower-See. Die Autorin betrachtet es als erwiesen, dass unter Umständen die Winde zwei getrennte, übereinander liegende Zirkulationen verursachen, indem die erste in der Oberschicht, die zweite in der Unterschicht ausgebildet wird. In wieder anderen Fällen findet sie aber, dass innerhalb des Hypolimnion's mehrere indirekte Windzirkulationen entstehen können. So schreibt sie darüber Folgendes: „Diese Temperaturbeobachtungen lassen bereits vermuten, dass etwaige Windzirkulationen, die entlang der sommerlichen Sprungschicht in dem unterhalb gelegenen Wasserkörper ausgelöst werden, sich durch diese Sprungflächen innerhalb des Hypolimnion's (hier existieren mehrere Sprungschichten) in Teilzirkulationen auflösen können“ (p. 208). Die Ursache dafür sieht sie in der thermisch bedingten Dichteschichtung des Wassers in der Tiefe.

Dass diese Sachlage wenigstens in gewissen Fällen zu einer Ergänzung des  $O_2$ -Gehaltes im Hypolimnion führen kann, hält die Autorin für möglich.

Sie findet es aber für nicht ausgeschlossen, dass an dem Zustandekommen der chemischen Verschiedenheiten übereinander gelagerter Wassermassen auch andere Vorgänge mitbeteiligt sind, als welche sie die *stehenden Schwingungen* des Wassers anführt (p. 211).

Halbfass ist der Meinung, dass das interne Seich, von ihm Schaukelbewegung genannt, jenen Vorgang darstellt, dem die tieferen Wasserschichten der Süßwasserseen den grössten Teil ihres  $O_2$ -verdanken. Den Strömungen, als welche er mehrere solche flüchtig betrachtet, misst er in dieser Beziehung eine untergeordnete Bedeutung bei.

Ich finde keinen Grund anzunehmen, dass in einem so stark geschichteten See wie es der Varna-See ist, die stehenden Schwingungen des Wassers und das Seich — wenn diese Bewegungen hier überhaupt bestehen, eine ausschlaggebende Rolle bei der Anreicherung der tieferen Wasserschichten mit  $O_2$  spielen können.

Somit ist klar, dass die Winde ein kompliziertes System von Strömungen im Wasserkörper des Sees auslösen: Dem Gesetz der Kontinuitätsbedingung folgend, verursacht eine jede Versetzung von Wassermassen eine Kompensationsbewegung anderer Wassermassen desselben Dichtehorizonts in entgegengesetzter Richtung.

Die durch die Winde verursachte Durchmischung des Wassers schafft eine ganz neue Situation, die wie wir sahen, als Folge die Verlagerung des Mittelstroms und das Wiederverwandeln desselben in einen Bodenstrom hat. Diese Situation dauert bis zum nächsten Frühjahr, wo die Unterschicht von neuem isoliert wird. Bleibt aber im Sommer diese Schicht ruhig? Gewisse Tatsachen sprechen dafür, dass das Wasser der Unterschicht in ständiger wenn auch nur langsamer Bewegung sich befindet. Nach den  $t^0$ -Messungen zu urteilen, beginnt die Absonderung der Unterschicht im westlichen Teil der Seenulde (s. o.); dort sondert sich zuerst eine Masse kaltes und  $O_2$ -armes Wasser ab, die nachher durch Mischung mit der ganzen Masse der Unterschicht verschwindet. Das ist schon eine Tatsache, die für das Vorhandensein von Strömungen in der Unterschicht spricht. — Oben wurde auch darauf hingewiesen, dass der Bodenstrom von Zeit zu Zeit in die Unterschicht eindringt und frisches Meerwasser demselben zuführt. Dieses Wasser als gesonderter  $O_2$ -führender Stock verschwindet bald, denn es mischt sich mit der Wassermasse der Unterschicht; das ist wieder ein Zeichen für die hier vorhandenen Bewegungen. Weiter: Eine ganze Reihe Tatsachen spricht dafür, dass der  $H_2S$  im Boden und nicht im Wasser entsteht. Von hier kommt es heraus und verteilt sich nach oben in die Unterschicht: Zuerst treffen wir es dicht auf dem Boden, dann in einer Tiefe von 18 m, dann in einer Tiefe von 17 m, 16 m usw. Dieses Eindringen des  $H_2S$  schreitet mit solcher Schnelligkeit vorwärts, dass es nicht durch molekulare Diffusion des Gases zu erklären wäre: Wir müssen annehmen, dass das  $H_2S$  eher durch irgendwelche Strömungen aufgetrieben wird, und zwar verhältnismässig sehr langsam von unten nach oben. Stellen wir uns vor, dass diese Strömungen Konvektionsströmungen darstellen, d. h. dass sie in der ganzen Unterschicht direkt von oben nach unten und umgekehrt verlaufen, so können wir nicht die fortwährende und

langsame Verteilung des  $H_2S$  vom Boden her erklären. Wäre das wirklich der Fall, so hätten wir dann eine gleichmässige Verteilung des Gases schon von Anfang an erwarten müssen. Die Idee vom Vorhandensein solcher von oben nach unten durch die ganze Unterschicht ziehender Vertikalströmungen ist unvereinbar auch mit einer anderen Tatsache: Das Wasser der Unterschicht ist nicht homohalin, sondern wieder geschichtet und zwar so, dass die Isothermen und Isohalinen fast horizontal verlaufen. Eine vertikale Konvektion für diese Schicht könnten wir also nicht annehmen. Trotz alledem aber spricht vieles dafür, dass in der Unterschicht Bewegungen existieren, als deren Hauptresultat wir die gleichmässige Schichtung des Wassers (in Bezug auf S und  $t^0$ ) und das langsame Fortpflanzen des  $H_2S$  ansehen können. Versuchen wir alle diese Tatsachen zu erklären, so kommen wir zum einzigen möglichen Schluss, der darauf hinausläuft, dass in der Unterschicht horizontale Bewegungen, verbunden mit einer schwachen Mischung, existieren. Dadurch lassen sich alle in dieser Schicht im Sommer beobachteten Erscheinungen leicht erklären.

Fragen wir jetzt nach den Ursachen dieser Strömungen, so kommen wir theoretischerweise zu folgender Antwort: 1. Wir müssen das Vorhandensein von Induktionsströmungen in der Unterschicht annehmen, die durch die Bewegungen des Wassers der Mittelschicht (z. B. durch die Mittelströmung) hervorgerufen werden. 2. Als zweite Ursache dürfen wir die von Zeit zu Zeit stattfindenden Störungen im Gleichgewichtszustand der Unterschicht ansehen, die dadurch entstehen, dass in sie in unbestimmten Zeitabständen neue Wassermassen sich einschieben.

Im Varna-See sind also folgende Systeme von Horizontalströmungen festzustellen: 1. Im Sommer in der Unterschicht, 2. bei der Durchmischung im Herbst in allen Tiefen. — Es scheint aber, dass auch ein drittes System solcher Strömungen existiert, und zwar im Sommer in der Oberschicht (einschliesslich der Mittelschicht, d. h. der Mittelströmung). Wäre die Durchmischung des Wassers der Oberschicht lediglich durch die entgegengesetzte Bewegung der Ober- und Mittelströmung hervorgerufen, dann würde die S-Kurve andersartig ausgebildet sein, als dies gewöhnlich der Fall ist: Wir beobachten aber stets eine gebogene  $t^0$ -Kurve mit vertikalem oberen Teil. Diese Umbiegung der Kurve ist offensichtlich durch die schwachen Sommerwinde oder richtiger gesagt, durch die durch diese Winde verursachten Horizontalströmungen hervorgerufen.

Ist das Vorhandensein von thermischer Konvektion vollkommen abzulehnen? Durchaus nicht. Beim Vorhandensein einer so starken Schichtung des Wassers aber müssen wir ihr eine untergeordnete Bedeutung für die Hydrologie des Sees zuerkennen. Diese Art der Konvektion ist jedenfalls nicht nachzuweisen. Ob auch durch die Verdunstung Konvektionen ausgelöst werden können, bleibt vorläufig eine unbeantwortete Frage. Die Be-

deutung auch dieser Konvektion aber, wenn sie tatsächlich vorkommt, wäre dann wieder eine untergeordnete. Der weitaus grösste Teil der Mischungen des Wassers im Varna-See wird dynamisch durch die Winde hervorgerufen, wie auch durch die entgegengesetzte Bewegung der beiden Wasserarten.

Zusammenfassend können wir von der Dynamik des Varna-Sees Folgendes sagen.

Das dynamische Gleichgewicht im Varna-See wird durch zwei Arten von Vorgängen bedingt: 1. Durch horizontalen Gradientenströme, nämlich das Abfließen des salzarmen Oberflächenwassers und das Einströmen salzreichen Tiefenwassers durch den Kanal aus dem Schwarzen Meer. Dieses einströmende Wasser bildet in See je nach seiner Dichte einen Boden- oder einen Zwischenstrom. Im Sommer, wenn das einströmende Wasser verhältnismässig leicht ist, bildet es einen Zwischenstrom, so dass das Bodenwasser in dieser Jahreszeit nicht erneuert wird. Die Folge davon ist vollständige Zehrung des Sauerstoffs und Bildung von Schwefelwasserstoff. Im Winter fliesst dagegen das einströmende schwere Wasser meistens den Boden entlang und bewirkt eine gute Durchlüftung in der Tiefe. 2. Der zweite Komplex von Vorgängen wird durch den jahreszeitlichen Gang der Temperatur und der Windgeschwindigkeit hervorgerufen mit den bekannten Folgen einer thermischen und vor allem einer dynamischen Konvektion. Im Gegensatz zu den Süsswasserseen erfasst die thermische Konvektion wegen der Salzgehaltsschichtung möglicherweise nur eine wenige Meter dicke Oberflächenschicht. Tiefer greift die dynamische Wirkung starker herbstlicher und winterlicher Winde, so dass es vorübergehend zu einer vollständigen Durchmischung bis zum Boden kommen kann. Der grösste Teil der Durchmischungen des Wassers, die im Varna-See zu beobachten sind, ist auf die Winde zurückzuführen.

Die so komplizierte Hydrologie des Varna-Sees können wir folgenderweise zusammenfassen: *Der Varna-See ist ein katohaliner Brackwasserbassin mit periodischer Isolierung einer Unterschicht, die infolge mangelnder Durchlüftung mit  $H_2S$  angereichert wird.*

Wir haben gesehen, dass vom Fall zu Fall neue Situationen im thermohalinen Aufbau des Varna-Sees geschaffen werden, also, dass die Statik des Varna-Sees nicht etwas Starres, sich in derselben Form und Ausgestaltung immer Wiederholendes darstellt: trotzdem weist der See viele individuelle Eigentümlichkeiten auf, die ihn von allen bisher untersuchten Seen, unterscheiden.

Bevor ich die Betrachtung der Hydrologie des Varna-Sees abschliesse will ich hier kurz auf die sonderbaren im Boas zu beobachtenden Verhältnisse eingehen. Hier trifft man am Boden einen Salzgehalt, der stets höher ist als der Salzgehalt derselben Tiefe östlich vom Boas, sogar höher als in derselben Tiefe in der Nähe des unteren Kanals. Die Isohalinen steigen also in der Mündung des Boas etwas auf. Dass der Bodenstrom resp. Mittel-

strom bis in den Boas hineingelangt, das wurde schon oben aufgeklärt. Diese Tatsache, verknüpft mit der Tatsache des Aufsteigens der Isohalinen, zwingt zu folgender Erklärung: Der Boden- resp. der Mittelstrom steigt vor seinem Eindringen in den Boas. Ist ein solches Aufsteigen des schweren Wassers möglich? Das ist durchaus möglich, stellt eine nicht selten zu beobachtende Erscheinung in und vor den Mündungen grosser Flüsse dar<sup>1</sup> und vollzieht sich nicht von selbst, sondern wird von aussen her hervorgerufen: Das ausfliessende Oberflächenwasser saugt das schwere unter ihm sich befindende Wasser auf, Einnal aufgestiegen vor der Mündung des Flusses, in unserem Falle vor der Mündung des Boas, dringt dann das schwere Unterwasser in die Mündung selbst, was durch ein anderes Hydrodynamisches Prinzip bedingt wird. Ein besonders krasses Beispiel stellen die Beobachtungen vom VI. 35, bei denen in diesem Teile des Sees bei 5 m Tiefe  $Cl' = 7.38$  gefunden wurde, eine Zahl, die im östlichen Teile des Sees erst bei 7 m festgestellt wurde (s. Valkanov, 1936 Tab. XII, p. 224). Dieses Aufsteigen des Bodenstroms ist manchmal auch an den Isothermen abzulesen; sie steigen ebenso wie die Isohalinen auf. Das ist besonders klar im Falle vom Januar 1936 zu sehen. Man braucht aber nicht zu denken, dass im Winter gerade das Bodenwasser aus dem tiefsten Teil der Seemulde hinaufsteigt und in den Boas hineinströmt; diese Frage ist sehr kompliziert und ich fühle mich genötigt, nur zu erwähnen, dass allem Anschein nach nicht das eigentliche Bodenwasser aus der grössten Tiefe des Sees aufsteigt, sondern ein salzreiches Mischwasser aus mittleren Tiefen.

Gehen wir noch weiter westwärts in den Boas selbst, so stossen wir auf folgende Besonderheit. Hier und da treffen wir am Boden wärmeren Wassermassen. Alljährlich im Herbst treffen wir hier am Boden die höchsten Temperaturen in dem See überhaupt. Diese Anomalie hat gar nichts mit der schon besprochenen Erwärmung des Bodenwassers im Winter vom Boden her zu tun. In einigen Seen ist beobachtet, dass das Bodenwasser vom Boden her durch besondere Insulationsverhältnisse erwärmt wird. Unser Fall aber bedarf einer anderen Deutung: Bloss die Tatsache, dass solche warme Wassermassen nur in Perioden der Abkühlung des Sees zu beobachten sind, weist darauf hin, dass es sich um Restwasser handelt — d. h. um Wasser, das von früher her stammt, als die Temperatur des Seewassers überall höher gewesen ist. — Diese Tatsache spricht ihrerseits auch dafür, dass trotz des heftigen und ständigen Eindringens des Bodenstroms in den Boas die Erneuerung des Bodenwassers in einigen seiner Teile sehr langsam vor sich geht, obwohl diese

<sup>1</sup> Ich verweise in dieser Beziehung auf die Ozeanographie Krümmel's (Bd. II, p. 477), sowie auf die speziellen Arbeiten von Griesel (1934) und L. Möller (1937).

von dem Bodenstrom nicht berührten Wassermassen sich nicht in Mulden befinden, sondern auf flachem Boden liegen. Das spricht weiter dafür, dass der Bodenstrom sich im Boas nicht gleichmässig am Boden ausbreitet, sondern gewissen Bahnen folgt. Gewisse Tatsachen zeigen weiter, dass auch der Boden- resp. der Mittelstrom in dem breiten Teile des Sees nicht gleichmässig ausgebreitet ist, sondern immer wieder irgendwie seitwärts abgelenkt wird. Wodurch wird nun diese Erscheinung bedingt? Durch die orographischen Eigenschaften des Seebeckens oder durch die Erdrotation oder durch eine andere Ursache — das stellt eine der vielen unaufgeklärt gebliebenen Tatsachen dar.

Die räumliche Verteilung der Lebewesen im See hängt auf das engste mit seinen hydrographischen Besonderheiten zusammen und vor allem mit der Anhäufung von  $H_2S$  in ihm. Um das zu beleuchten, werde ich in Kürze die Verteilung der Biocoenosen im See besprechen.

Es versteht sich von selbst, dass diese Verteilung je nach der Jahreszeit, d. h. je nach dem Vorhandensein oder Fehlen von  $H_2S$  grundsätzlich verschieden sein muss. — Beginnen wir mit dem Benthos im Sommer. Von 0—5 m Tiefe herrschen im Sommer die *Chara*-, *Potamogeton*- und *Zostera*-Wiesen. Im Boas findet man üppige Schilfbestände längs der Ufer. Weiter bis 8 m Tiefe trifft man überall dichte Miesmuschelstiedlungen; von 10 m bis zur grössten Tiefe, d. h. im Bereich der  $H_2S$ -Schicht kommen nur solche Organismen vor, die das Fehlen des Sauerstoffs und das Vorhandensein des  $H_2S$  ertragen können — das sind gewisse Cyanophyceen, Diatomeen und Infusorien. — Es kommt der Winter. Das  $H_2S$  verschwindet. Das vagile Benthos, das bis dahin in den *Chara*- und *Potamogeton*-Wiesen wimmelte, wandert jetzt zum grössten Teil in die tiefsten Stellen des Sees. Es kommt wieder der Sommer. Dann wandert dieses Benthos wieder aufwärts nach der Peripherie. Diese Wanderungen wiederholen sich alljährlich mit einer ganz bestimmten Regelmässigkeit. Das ist den Fischern gut bekannt: sie wissen, dass im Sommer die Fische nur in den flachen Teilen des Sees zu fischen sind, während im Winter viele davon, ganz besonders die Plattfische, in die Tiefe eindringen. Während es klar ist, dass die Frühjahrs-Wanderungen der Bodentiere nach der Peripherie durch die Anhäufung des  $H_2S$  bedingt sind, ist die Frage nach der herbstlichen Wanderung derselben nach den Tiefen des Sees nicht so leicht erklärlich. Ich begnüge mich hier mit der Hervorhebung einiger Begleiterscheinungen, die vielleicht auf die möglichen Ursachen hinweisen könnten. 1. Die üppigen Wiesen des Litorals, wo das Benthos im Sommer unter sehr günstigen Ernährungsbedingungen sich befindet, fehlen im Winter fast vollkommen. 2. Die  $H_2S$  des Wassers der tiefsten Stellen ist im Winter nicht selten etwas höher als die  $H_2S$  des Litorals. — Zuletzt sei hier erwähnt, dass die meisten der im Winter in den tiefsten Stellen des Sees zu findenden Formen auch solche sind, die normalerweise grössere Tiefen als das Litoral des Sees bevorzugen; sie sind im Sommer von den grössten Tiefen des Sees bloss vertrieben.

Nicht weniger charakteristisch ist die vertikale Verteilung des Planktons und seine jahreszeitlichen Änderungen. Im Sommer findet man in der Ober-schicht allerlei Oxybiontenplankton: Dinoflagellaten, Silicoflagellaten, Tintinnoldeen, Hydromedusen, Copepoden, Larven usw. In der Unterschicht aber kommen nur Saproelciliaten vor und zwar in beträchtlichen Mengen. Im Winter findet man Oxybiontenplankton in allen Tiefen des Sees. Bei der Ausbildung der  $H_2S$ -Schicht im Frühjahr kommen die Saproelplanktonen nur soweit als  $H_2S$  vorhanden ist, d. h. zuerst kommen sie nur in der Boderschicht vor und mit Aufsteigen der  $H_2S$ -Grenze gehen sie mit nach oben, d. h. sie erscheinen später bei 17, 16, 15 usw. m Tiefe. — Sehr eigenartig ist die Verteilung der Saproelplanktonen selbst. Die Infusorien sind nicht gleichmässig in der

Unterschicht verteilt, sondern bevorzugen sie gewisse Abteilungen dieser Schicht (s. Valkanov, 1936, p. 260—263). In dieser Hinsicht benehmen sich die einzelnen Arten nicht gleich: während eine z. B. die Tiefe von 0—11 m. bevorzugt, hat eine andere ihr Optimum bei 9 m usw. Eine Art kam sogar nur bei 8 m Tiefe vor, d. h. dicht über der  $H_2S$ -Schicht. Bloss das Spektrum der Planktonverteilung weist auf deren Ursache hin: Die einzelnen Arten haben ihr Optimum bei einem bestimmten Partialdruck des  $O_2$ , oder des  $H_2S$  oder der beiden Gase zusammen. — Um dem Einwand zu begegnen, dass es sich in diesem Falle um eine negative Geotaxis handelt, und dass die nach oben strebenden Saproelinfusorien von der  $O_2$ -Schicht aufgehalten werden, habe ich folgenden einfachen Versuch angestellt: In einer Flasche mit  $H_2S$ -haltigem Wasser halten sich die Infusorien stets dicht am Boden. Genau so benehmen sich die Infusorien auch in einer Flasche mit durchlüftetem, d. h.  $H_2S$ -freiem Wasser und zwar im Licht wie auch im Dunkeln. Die Ciliaten weisen also eine typische positive und nicht negative Geotaxis auf und trotzdem sammeln sie sich im See nicht dicht am Boden, sondern bevorzugen jene Tiefe, deren  $H_2S$  resp.  $O_2$ -Menge ihnen zusagt.

Das Plankton der in die Unterschicht eingeschichteten Massen des Bodenstroms ist nicht aus Saproeliontplanktonen, sondern von Oxybiontplanktonen zusammengesetzt. Von oben nach unten findet man dann Oxybiontplankton, Saproeliontplankton, wieder Oxybiontplankton und zuweilen noch einmal Saproeliontplankton und Oxybiontplankton.

## 2. Gebedze-See (Taf. II, III, Kerte 7)

### BULGARISCH: GEBEDŽENSKO ESERO

Im Kanal zwischen den beiden Seen sind wieder Dichte-Ausgleichsströmungen zu beobachten. In diesem Falle aber verläuft die Erscheinung etwas eigenartig insofern, als hier der Kanal zu lang ist und infolgedessen der Unterstrom nicht bis zum oberen See, sondern fast immer nur bis zur Mitte des Kanals reicht. Wäre der Kanal also halb so lang wie er jetzt ist, dann würde — das können wir ruhig annehmen — der Bodenstrom bis in den

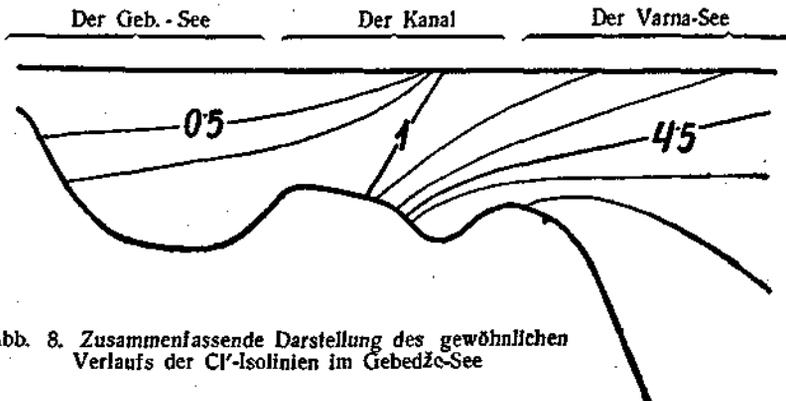


Abb. 8. Zusammenfassende Darstellung des gewöhnlichen Verlaufs der  $Cl^-$ -Isolinien im Gebedze-See

oberen See hineingelangen. Nur einmal bisher habe ich diesen Strom bis zum Anfang des Kanals festgestellt. Andererseits habe ich aber zweimal bisher am Boden des Gebedze-See schweres Wasser gefunden mit einem Salzgehalt von 5—9‰, das durch

eine recht scharf ausgesprochene thermo-haline Sprungschicht vom Oberwasser geschieden war. An der beigegebenen Figg. sieht man die gewöhnliche Verterlung der Cl'-Isolinien im Kanal und in dem See wie auch die am 5. XII. 34 festgestellte abweichende Verteilung derselben. Wahrscheinlich stammt am 5. XII. 34 in der Tiefe des Sees festgestellte schwere Wasser

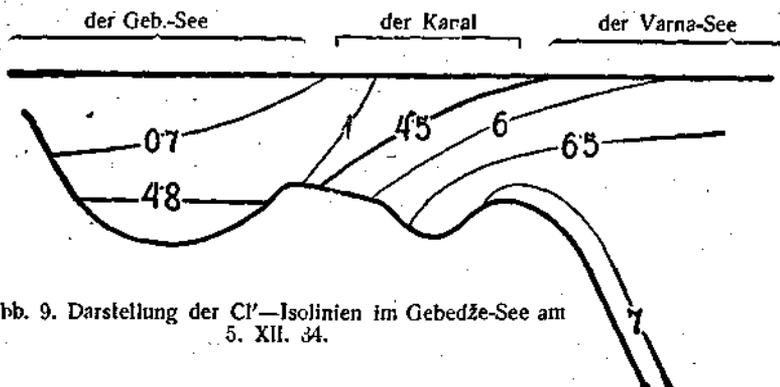


Abb. 9. Darstellung der Cl'-Isolinien im Gebedze-See am 5. XII. 34.

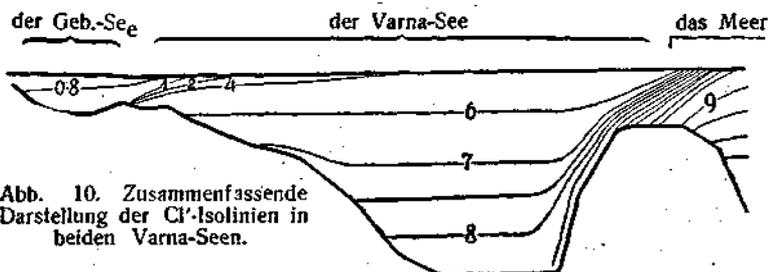


Abb. 10. Zusammenfassende Darstellung der Cl'-Isolinien in beiden Varna-Seen.

direkt vom Kanalaufwärtsgerichteten Bodenstrom, der unter gewissen Umständen (bei anhaltendem Windstau?) bis in den See hineingelangen kann. Wegen der geringen Tiefe lässt sich die zustandegekommene Schichtung des Wassers nicht länger erhalten.

Die Temperatur ist noch grösseren Amplituden unterworfen als im Varna-See. Die Vereisung ist eine alljährlich zu beobachtende Erscheinung. Nur jener Teil des Sees, der vor der Einflusmündung sich befindet, bedeckt sich im Winter nicht mit Eis.

In unserer Abb. 10 ist eine Zusammenfassende Darstellung der Cl'-Isolinien in beiden Seen sowie in den Kanälen, die sie miteinander resp. den unteren mit dem Meer verbinden, gegeben. Man sieht, dass dort wo die Ausgleichs-Strömungen dominieren, die Isolinien geneigt sind. In den Becken der Seen aber, wo die winderzeugten Durchmischungen des Wassers eine Ausschlaggebende Rolle spielen, sind die Isolinien horizontal. Hätte man das Profil durch das Schwarze-, Marmara- bis zum Mittelmeer verlängert, so hätte sich überall denselben Verlauf der Isolinien feststellen lassen.

## ХИДРОГРАФСКИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ВЪРХУ ВАРНЕНСКИТЪ ЕЗЕРА

Отъ А. Вълкановъ

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въ тази работа е разгледана хидрологията на Варненскитъ езера, по който въпросъ на български съмъ публикувалъ две работи до сега (Вълкановъ, 1936, 1937). Новото, което е изнесено тукъ, това сж наблюденията върху динамиката на Варненското езеро.

Постоянно прииждащитъ тукъ морска и сладка води се смесватъ както по протежение на канала, тъй и въ самото езеро. Това смесване не отива до своя край и заради туй водата въ езерото показва винаги стремежъ къмъ раздѣляне на два пласта: единъ горенъ — по-лекъ и единъ доленъ — по-тежъкъ.

Термична конвекция и конвекция, предизвикана отъ изпарението, не могатъ да бждатъ доказани въ Варненското езеро. Ако тѣ, обаче, сществуваатъ, то тѣхната роля е много ограничена и то само въ най-горния пластъ вода. Размесването на водата се предизвиква отъ вѣтроветъ (динамична конвекция).

Силнитъ вѣтрове могатъ да предизвикатъ размесване на тѣзи два пласта, което се извършва тъй: вѣтърътъ създава най-напредъ една циркулация въ повършиния пластъ вода. Долниятъ токъ на тази циркулация индуктира подъ себе си, въ по-долния пластъ, друга циркулация, която има обратна посока на ротация. Втората циркулация индуктира подъ себе си трета, третата — четвърта и т. н. (обр. 7). Всѣка една по-долна циркулация е по-слаба отъ горната. На границата между всѣки две съседни циркулации настѣпва смѣсване на воднитъ имъ маси. Така всѣко едно течение получава отъ водата на съседнитъ пластове. По такъвъ начинъ става предаването на качества на единъ пластъ вода на съседнитъ нему пластове. Така става, именно, предаването на  $O_2$  и низката  $t^{\circ}$  въ дълбочинитъ на езерото, презъ късна есенъ и презъ зимата. Ако вѣтърътъ е много силенъ и продължителенъ, то размѣсването може да доведе до изохалинитетъ и изотермия, при което дънниятъ пластъ вода се обогатява съ много кислородъ. Това състояние на изохалинитетъ не може да продължи много, тъй

като постоянно прииждащето морско течение вкърва на езерното дъно нова, прѣсна вода, която е и по-солена. Тѣй се възстановява нарушениятъ катохалинитетъ на езерото. Презъ лѣтото, когато нѣма силни вѣтрове, долниятъ, тежкиятъ пластъ вода остава интактенъ: кислородътъ въ него се изчерпва, а на негово мѣсто се натрупва сѣроводородъ.

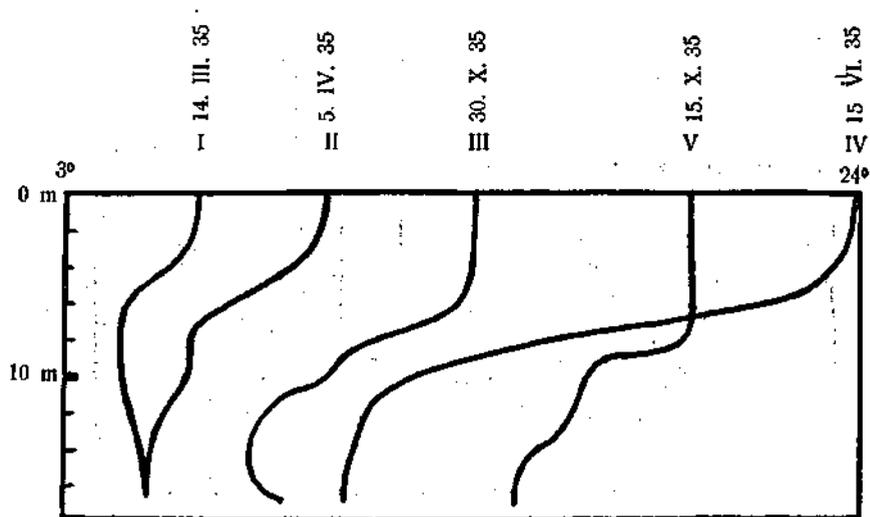
Значението на вѣтроветъ за конвекцията въ Варненското езеро се вижда много ясно отъ нашата таблица III (стр. 34), както и отъ диаграмитъ А—D. Подъ даннитъ за  $t^{\circ}$  на езерото въ табл. III сж дадени данни за пс-силнитъ отъ 7 m/s вѣтрове, а именно: първата колонка съдържа датитъ, втората колонка съдържа сръдната дневна температура, а третата — най-голѣмата скоростъ на вѣтъра презъ дена. Отъ тѣзи данни следва, че вѣтърътъ разбърква водата ту до известна дълбочина, ту до дъното. Отъ тѣхъ прозира сжщо тѣй, че понѣкога вѣтърътъ влияе динамически на дънния пластъ вода — безъ да го размесва направо съ повърхностната вода, значи косвено: това косвено влияние може да се обясни само съ сжществуването на междинни циркулации. Разбъркването на водата въ езерото и понижението на солеността на дънния пластъ има за последиствие отиѣстяне на леглото на обратното морско течение отъ междинната дълбочина (обр. 4) по самото дъно на езерото (обр. 3). Напролѣтъ, следъ като се напласти презъ зимата тежка вода на езерното дъно, обратното морско течени отново се вмѣква въ междинна дълбочина (обр. 4).

## LITERATURVERZEICHNIS

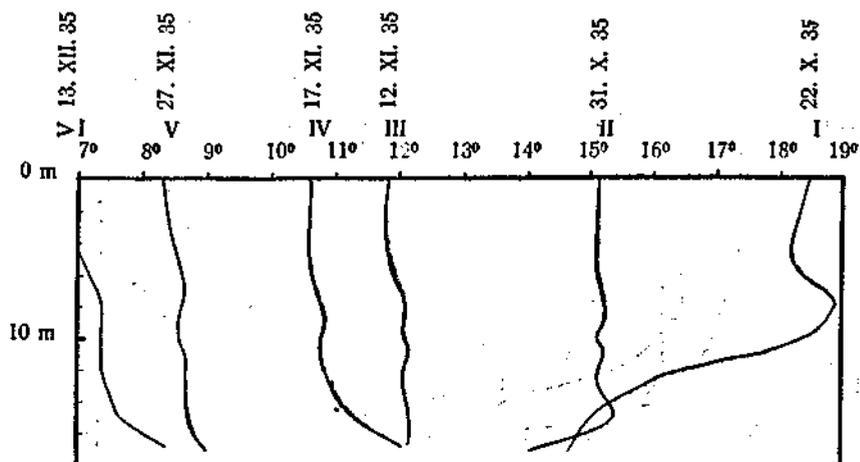
- Alsterberg, G. (1935): Die Dynamik des Stoffwechsels der Seen im Sommer. Lund 1935.
- Boschkow, L. (1915): Beiträge zur Kenntniss des Sees von Varna. Mitt. Bulg. Geogr. Ges., 4.
- Damas H. (1937): La stratification thermique et chimique de lacs Kivu Edouard et Ndalaga (Congo Belge). Verh. I. V. L. 8, III.
- Defant, A. (1930): Die Bewegungen und der thermo-haline Aufbau der Wassermassen in Meeresstrassen. Sitzb. Preuss. Akad. Wiss., Phys.-Math. Kl. 1930. XIV.
- Duggeli, M. (1924): Bakteriologische Studien an Ritonsee. Zeitschr. Hydrol. 2. (1917): Bakteriologische Studien am Wasser des Rotsees. Ibid., 6.
- Einsele, W. (1937): Physikalisch-chemische Betrachtung einiger Probleme des limnischen Mangan- und Eisenkreislaufs. Verh. I V L., 8, 3.
- Elster, H.-I. (1937): Einige Beobachtungen über hydrodynamische Vorgänge im Bodensee. Ibid., 8.
- Findenegg, I. (1933): Zur Naturgeschichte des Wörthersees. Mitt. d. Ver. Naturkundl. Landesmuseum f. Kärnten.
- Gočev, P. (1934): Übersicht der Stratigraphie der Umgebung von Varna. Zeitschr. Bulg. Geol. Ges., 6.
- Griesel, R. (1921): Physikalische und chemische Eigenschaften des Himmelsdorfer Sees bei Lübeck. Mitt. Geogr. Ges. Naturh. Mus. Lübeck. 2. Reihe, 28.
- (1934): Die Beziehungen zwischen Gezeiten, Strömungen und Salzgehalt in der Trave. Ibid. 57.
- (1935): Die Aussüßung des Himmelsdorfer Sees. Ibid. 38.
- Halbfass, W. (1922): Die Seen der Erde. Gotha, 1922.
- (1951): Wie geschieht die Anreicherung tieferer Wasserschichten von Seen und Meeren mit atmosphärischem Sauerstoff? Verh. I. V. L., 5.
- (1935): Der Begriff Strom oder Strömung in Binnenseen. Ibid. 7.
- Ischirkoff, A. (1.05): Der Gebedže-See. Jahrb. Univ. Sofia, 1.
- Kassner, C. (1906): Der Devna-See. P. M., 52.
- Knipovitsch, N. M. ( 914—23): Zur Hydrologie und Hydrobiologie des Schwarzen und Azowschen Meeres. Int. Rev., 12, 13 u 16.
- (1932): Hydrologische Untersuchungen über das Schwarze Meer. Arb. Asovsche-Schwarz-Meer-Expedition, 10.
- (1938) Hydrologie der Meere und der Brackwässer. Leningrad.
- KrümmeI, O. (1907—1911): Handbuch der Ozeanographie. Stuttgart.
- Lebedincev, A. & M. Tichil (1912): Materialien zur Hydrologie des Schwarzen Meeres vor der Bulgarischen und Rumänischen Küste S.-Ptbg.
- Liebmann, H. (1933): Biologie und Chemsismus der Bleilochsperre. Arch. f. Hydrob., 33.
- Masaki K. (1940): Limnological study of Lake Ocoresan-Ko. A remarkable acidotrophik Lake in Japan. Sci. Rep. Tōhoku Imp Univ., 15, 4.
- Merz, A. u. L. Möllner (1918): Hydrographische Untersuchungen in Bosphorus und Dardanellen. Berlin. I 28.
- Möller, L. (1931): Hydrographische Verhältnisse in den Norwegischen Fjorden P. M. 1931, 5/6.

- Möller, L. (1934): Der Sakrower See bei Potsdam. Verh. I. V. L., 6.  
 (1937): Zur Hydrographie des Frischen Haffes. Ibid. 8.
- Müller, I. (1939): Der jährliche Gang der Wasserwärme in den obersten fünfzig Meter des Achensees. Int. Rev., 39.
- Münster-Strom, K. (1936): Land-locked Waters. Skr. Norske Vid.-Akad. Oslo; Mat.-Naturv. Klasse, № 7.
- Netshaeff, A. (1935): Gebedge Lake as a fishing and Crayfish-Catching place. Trav. Stat. Ichthyol. Sozopol, 3.
- Netchaeff, A. & S. Tcherneff (1936): Quelques notes sur la Hydrologie du lac de Varna. Ibid., 5.
- Nümann, W. (1937): Die Verbreitung des Rheinwassers im Bodensee. Int. Rev., 36.
- Paspaleff, G. W. & N. Peneff (1934): Beitrag zur Kenntnis des Hydrologie des Varnaer Sees. Arb. Biol. Meeresst. Varna, 3.  
 (1936) Über die „Kritiken“ A. Valkanovs. Sofia.  
 (1941): Das Absterben der Fische im Varna-See am 24—26. VII. 1940. Fischerei-Rundschau, 11.
- Pilwat H. (1935): Ein Vergleich der Winklerschen und des Alsterbergschen Sauerstoffbestimmungsmethode in Bachwasser, Seewasser und einige Versuche mit destilliertem Wasser. Ang. Chemie, 48.
- Rossolimo, L. (1935): Die Bodengasausscheidung und das Sauerstoffregime der Seen. Verh. I. V. L., VII.
- Schulz, B. (1931): Einführung in die Hydrographie der Nord- und Ostsee. Grimpe & Wagler's Sammlung, Lief. 1.
- Stundl, K. (1937): Chemische-biologische Untersuchungen im Gebiet von Varna. Bulgarien. Ann. Hydrogr. marit. Meteorol., 5.
- Valkanov, A. (1935, 1936): Notizen über die Brackwässer Bulgariens. Jahrb. Univ. Sofia, 31, 32.  
 (1937): Die Varna-Seen. Mitt. Bulg. Geogr. Ges., 4.

Diagrammen A, B

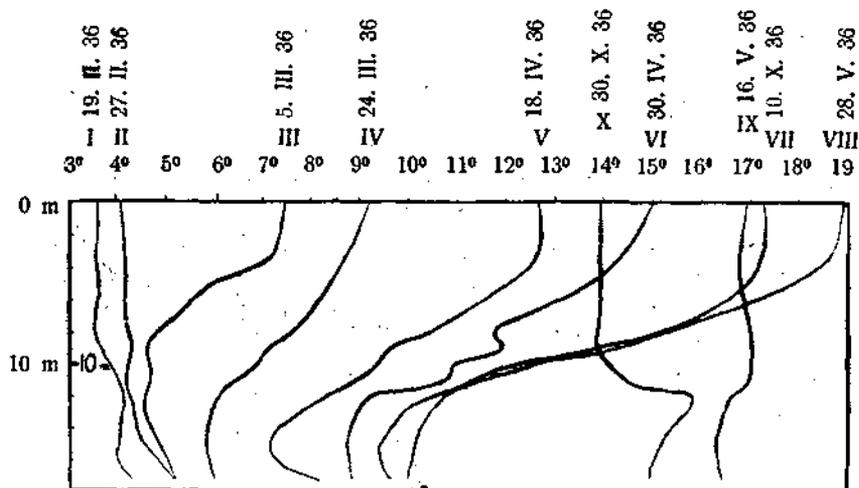


Diagr. A.

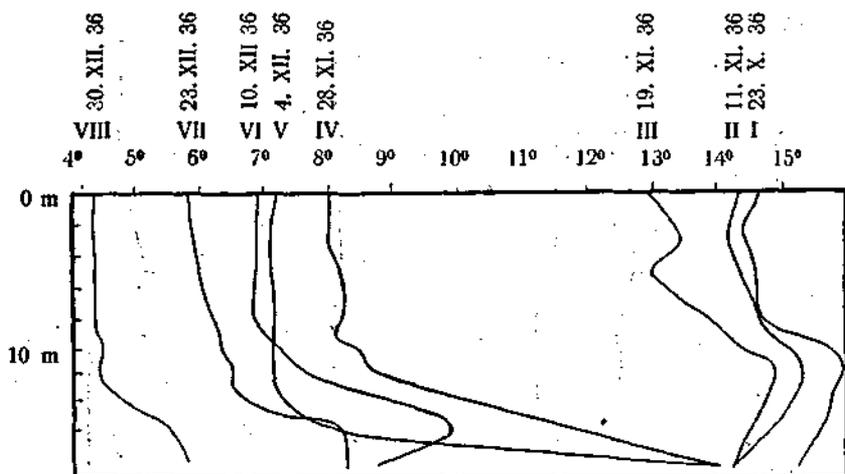


Diagr. B.

## Diagramme C, D

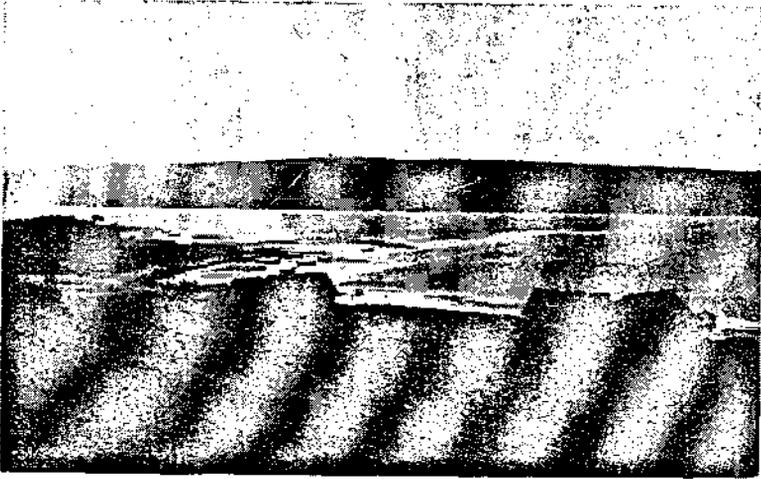


Diagr. C.



Diagr. D.

Tafel I



Blick auf den Varna-See von der Mitte seiner Nordküste aus.

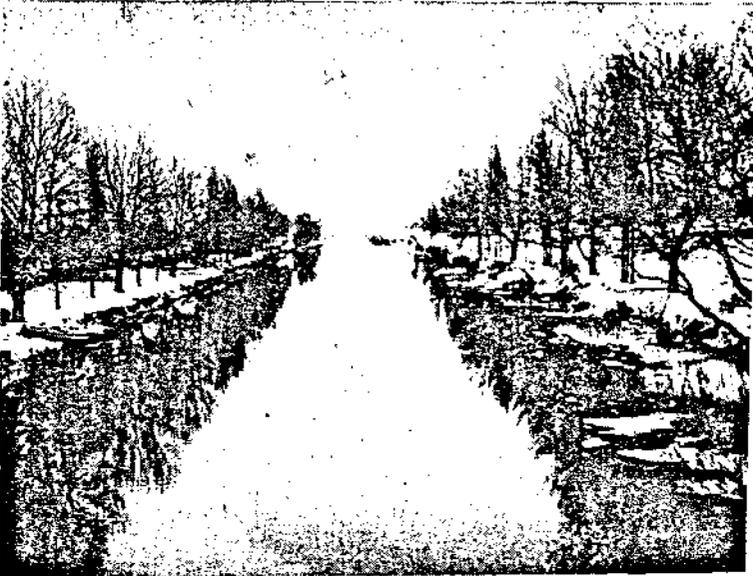


Blick auf das äusserste Ende des Boas (Varna-See). Der alte Kanal, sowie ein Teil des neuen Kanals.

Tafel II

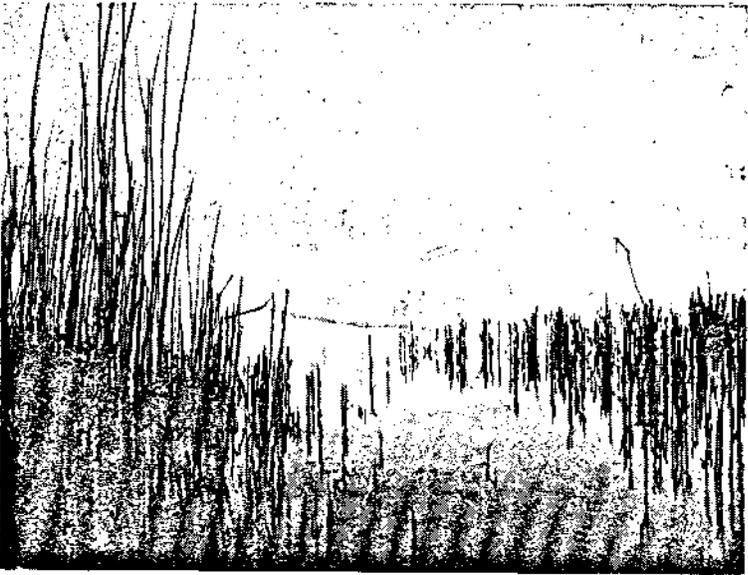


Der Kanal der den Varna-See mit dem Meer verbindet.



Der Kanal der die beiden Varna-Seen miteinander verbindet.

Tafel III



Blick auf den Gebedže-See.



Blick auf den vereisten Gebedže-See.

Diagramme 1—10

— bezeichnet den Cl'

— bezeichnet die t°

- - - bezeichnet den O<sub>2</sub>

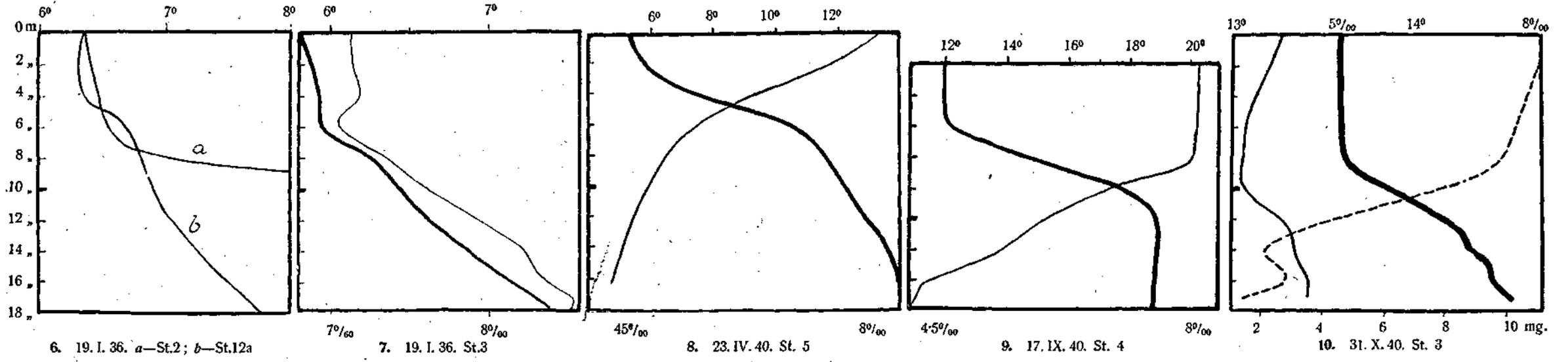
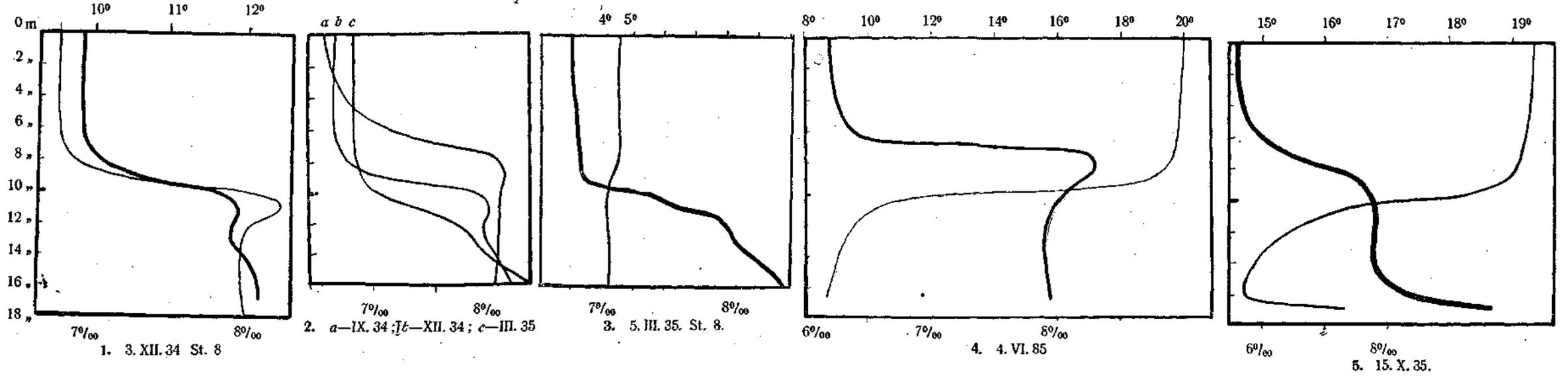
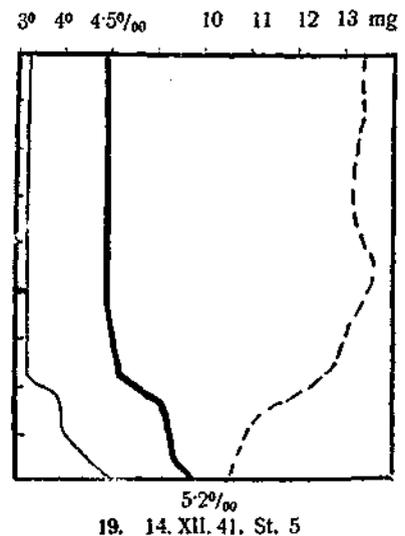
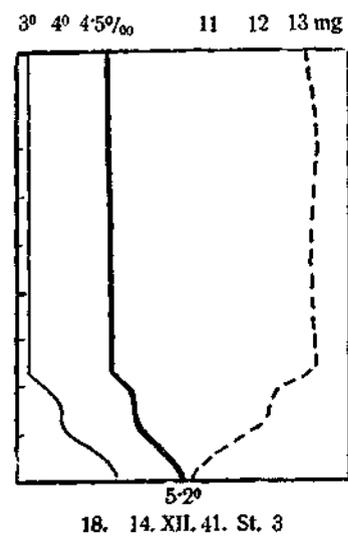
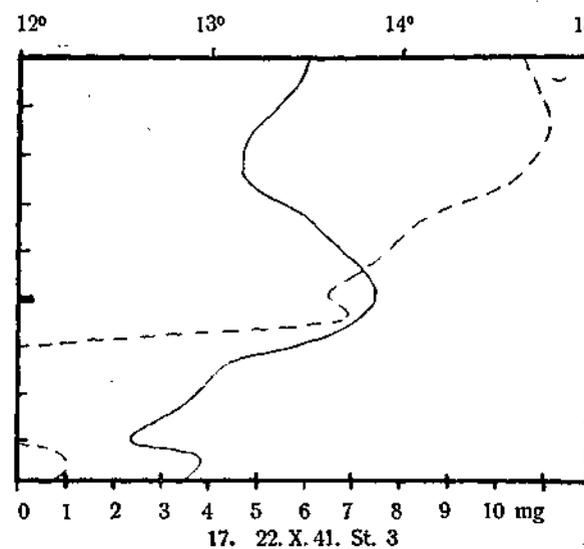
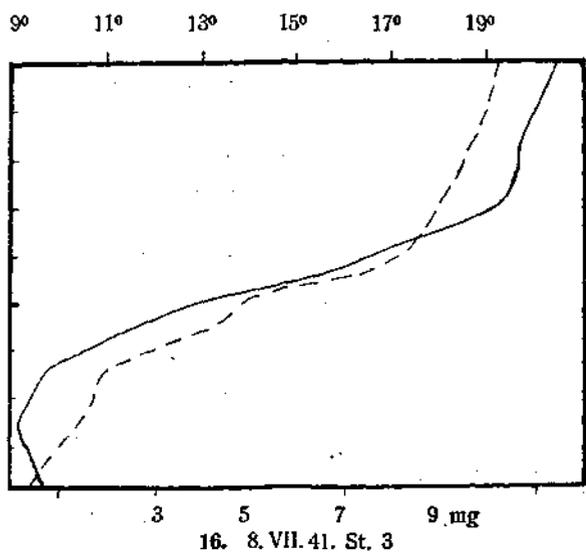
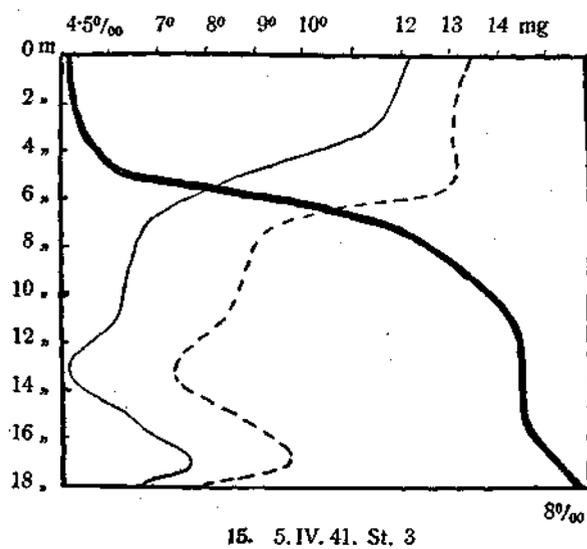
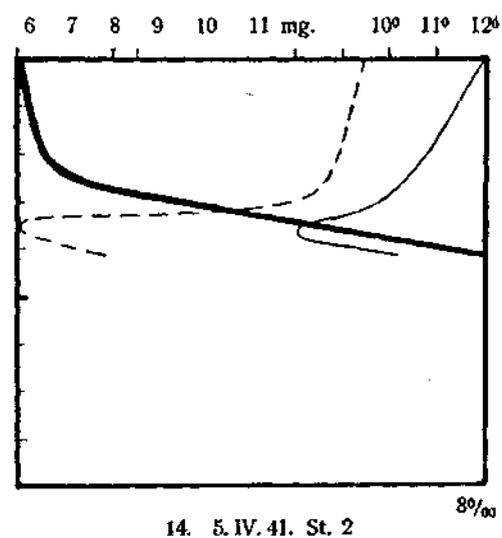
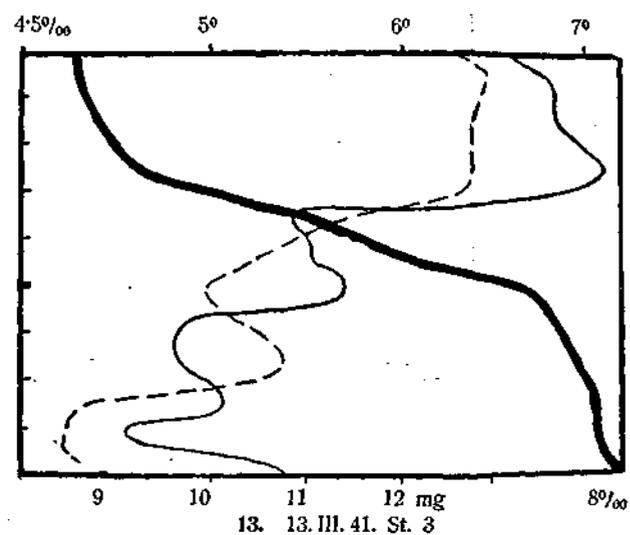
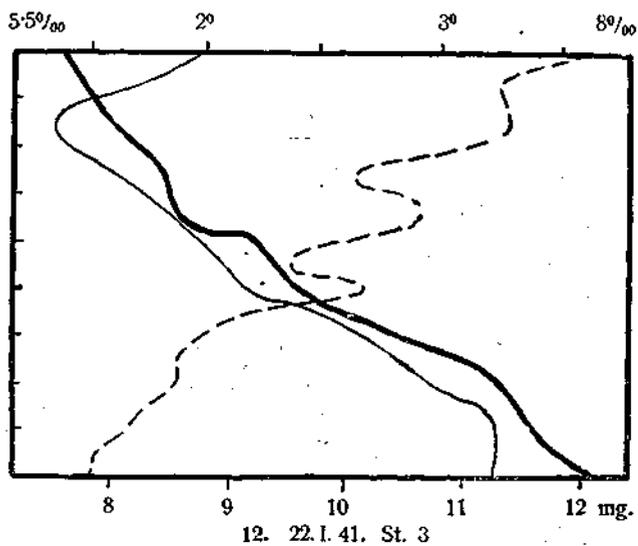
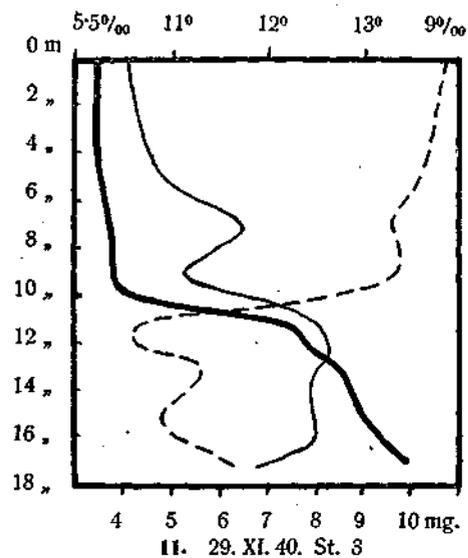


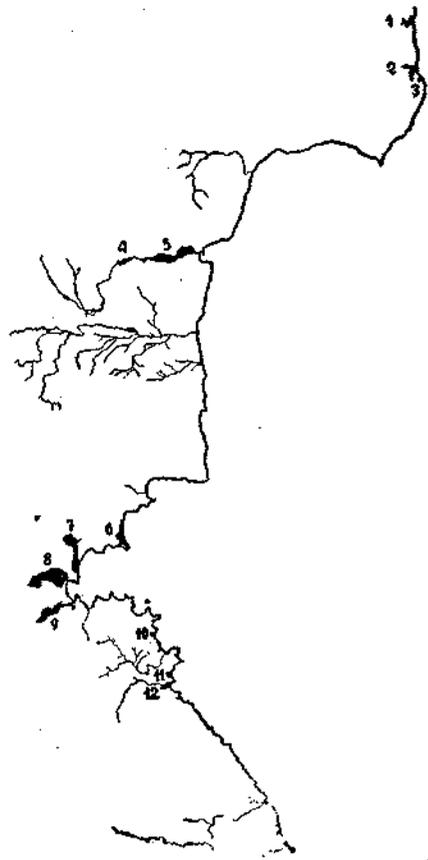
Diagramme 11-19

— bezeichnet den Cl'

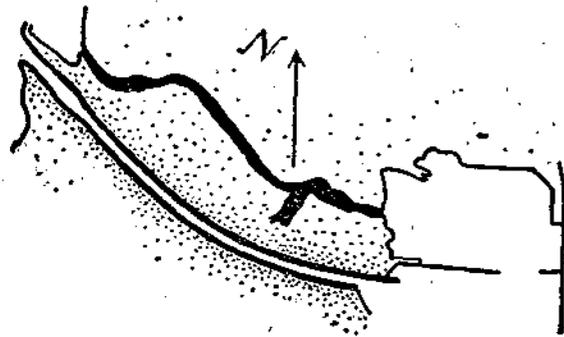
— bezeichnet die t°

- - - bezeichnet das O<sub>2</sub>

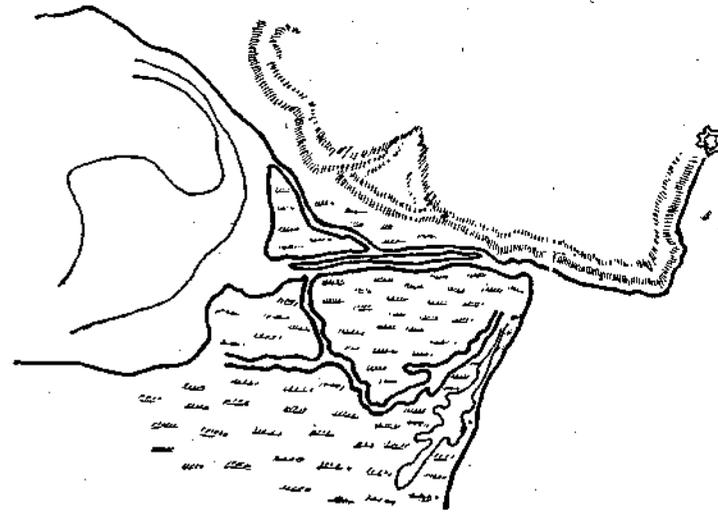




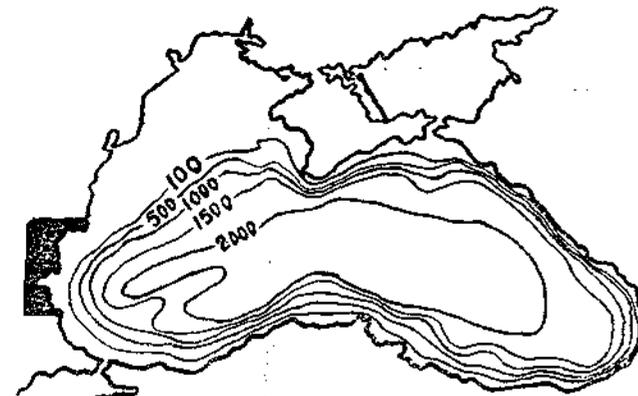
Karte 1. Die bulgarische Schwarz-See-Küste  
(1 : 1,800,000).



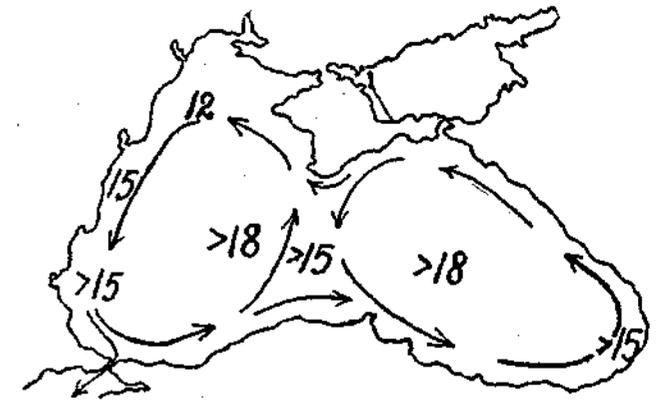
Karte 2. Der alte, bereits regulierte (oben) und der neue Kanal des Varna-Sees.



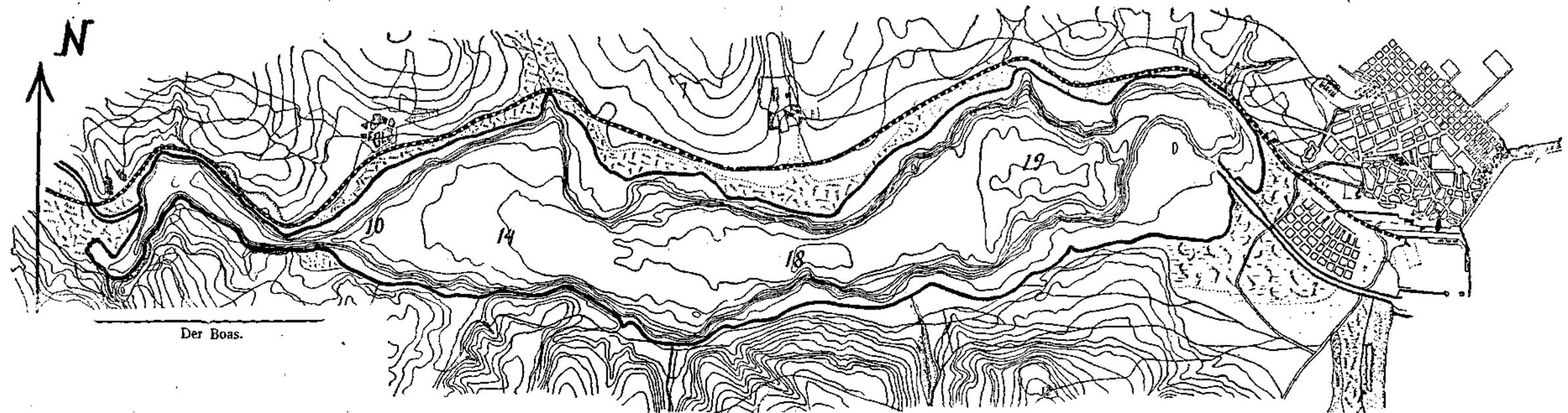
Karte 3. Der älteste Kanal des Varna-Sees.



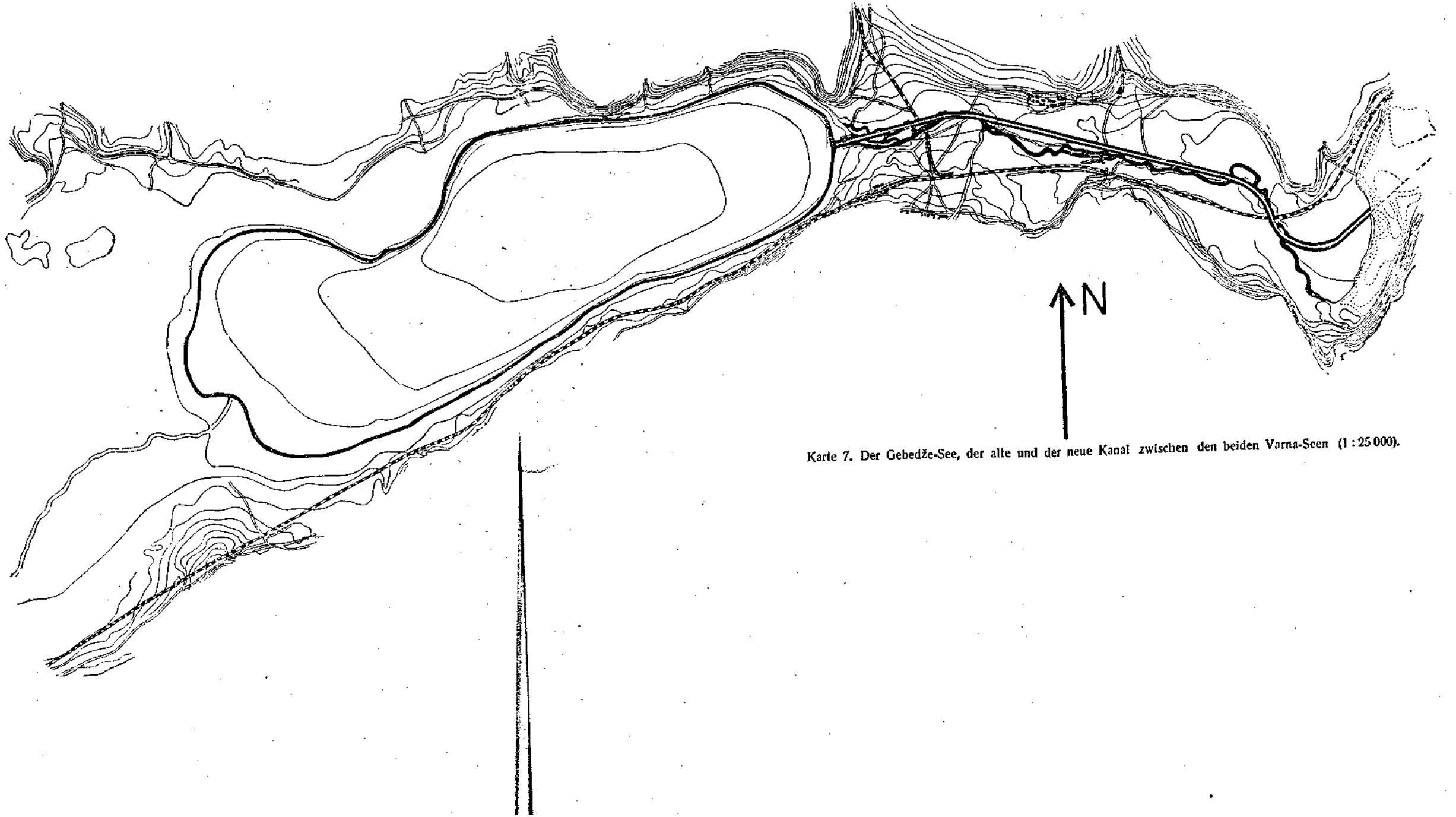
Karte 4. Tiefenkarte des Schwarzen Meeres. Die schwarze Fläche begrenzt die bulgarische Küste (1 : 13,140,000).



Karte 5. Die Hauptströmungen des Schwarzen Meeres. Die Zahlen bezeichnen den Salzgehalt in ‰ (1 : 13,140,000).



Karte 6. Trefenkarte des Varna-Sees. Die Isobalthen sind in 2 m gehalten (2 : 50,000).



Karte 7. Der Gebedže-See, der alte und der neue Kanal zwischen den beiden Varna-Seen (1 : 25 000).