

Die Seiches des Schwarzen und Asowschen Meeres und die dortigen Hubhöhen der Gezeiten.

Von Oberstudienrat Dr. A. Endrös, München.

(Hierzu Tafel 70.)

Zahlreiche Seen der verschiedensten Größe und Beckenform sind seit Forels Untersuchungen am Genfer See auf ihre Seiches eingehend untersucht worden, und die wesentlichen Fragen können heute als gelöst gelten. Wenn ich im folgenden diese Erscheinungen am Schwarzen und Asowschen Meere einer Untersuchung unterziehe, so geschieht dies einmal, weil die dortigen Ergebnisse das vorliegende Beobachtungsmaterial nicht unwesentlich ergänzen; das Schwarze Meer steht nämlich mit seiner Größe und Tiefe an der Spitze aller Seen und das Asowsche ist das seichteste Becken von so großer Ausdehnung. Dann bilden die Schwingungsverhältnisse der beiden so benachbarten Becken einen merkwürdigen Gegensatz zueinander, indem das Schwarze Meer verwickelte Schwingungen, ungewöhnlich kleine Amplituden und eine starke Dämpfung aufweist, das Asowsche dagegen ausgeprägte Bewegungen mit den größten bis jetzt beobachteten Amplituden. Endlich bringen die Ergebnisse Aufklärung für die dortigen Hubhöhen der Gezeiten, die im Schwarzen Meere bei sehr regelmäßigem Verlauf zu klein sind gegenüber den nach der Theorie berechneten, im Asowschen Meer aber bei einer seltenen Unregelmäßigkeit ungewöhnliche Größe erreichen.

1. Die Seiches des Schwarzen Meeres.

Das Schwarze Meer kann hinsichtlich seiner Seichesbewegungen als vollkommen abgeschlossenes Wasserbecken betrachtet werden, da seine Verbindung mit dem Mittelmeere im Verhältnis zu seiner großen Fläche zu eng ist. Mit seiner größten Tiefe von 2600 m und seiner Wassermasse von 500 000 ebkm steht das Meer weitaus an der Spitze aller Seen und in seiner Länge von 1200 km und seiner Fläche von 417 000 qkm wird es nur vom Kaspisee um weniges übertroffen. Dabei hat es eine verhältnismäßig regelmäßige Becken- und Umrissform. Man konnte demnach bei ihm entsprechend den Ergebnissen an den Seen ausgesprochene Seichesbewegungen mit bedeutenden Hubhöhen vermuten.

Sehr auffällig war es daher, als R. v. Sterneck¹⁾, der i. J. 1912 zur Aufdeckung der Gezeiten des Schwarzen Meeres mit seinem transportablen Mareographen Wasserstandsaufnahmen in Constanza, der Mitte des Westufers, machte, und auch die seit Jahren in Odessa, Sewastopol und Feodosia arbeitenden Mareographen einsehen konnte, wohl die verhältnismäßig kleinen Gezeitenbewegungen nachweisen, aber die Eigenschwingungen des Meeres nicht aufdecken konnte, wo er dazu noch die Hauptschwingungsdauer zur Berechnung der Gezeitengrößen benötigte. Nur lokale Buchtenschwingungen von wenigen Minuten bis zu zwei Stunden Dauer fand er aus den Aufzeichnungen, die er auch theoretisch als solche deutete.

Auch J. W. Kurtschatoff²⁾, der an der Hand der Mareogramme von sechs verschiedenen Punkten die Wasserbewegungen verfolgte und auch die Seichesbewegungen in seine Untersuchungen einbezog, konnte nur starke örtliche Bucht- und Uferschwingungen finden. Er gibt nun seiner Arbeit Ausschnitte aus den benutzten Mareogrammen bei, und zwar gleichzeitige Aufzeichnungen von den beiden Enden des Beckens, Odessa am Westende und Poti am Ostende, die sich auf neun Tage erstrecken (7. bis 16. X. 1924), ferner solche von Odessa, Feodosia, der Mitte des Nordufers, Noworossjisk und Tuapse, beide am Nordostufer gelegen (vom 3. bis 10. V. 1924). Leider ist der Zeitmaßstab sehr klein — $1^h = 0.92$ mm. Der Höhenmaßstab ist $1 \text{ cm} = 1 \text{ mm}$.

¹⁾ Sterneck, R. v., Schematische Theorie der Gezeiten des Schwarzen Meeres. S. B. d. math. phys. Kl. d. Ak. d. Wiss. in Wien, Bd. 131, 2. H. (1922), S. 81 ff.
²⁾ J. W. Kurtschatoff, Die Seiches des Schwarzen und Asowschen Meeres. Nachr. d. Zentralbl. f. Hydrometeor., Bd. 4, S. 149 ff., Leningrad 1925.

Ein Blick auf die Mareogramme schon läßt sofort ersehen, daß das Schwarze Meer ein schlecht abgestimmtes schwingendes Becken darstellt. An den beiden Enden Odessa und Poti, wo die Seichesbewegungen am größten sein sollten, verdecken die schwachen, aber regelmäßigen Gezeitenbewegungen von 6 bis 12 cm Hubhöhe die Eigenschwingungen des Meeres fast vollkommen. Entsprechend der Ausdehnung des Meeres und den Ergebnissen an anderen Seen sollten zeitweise Hubhöhen bis zu 1 m und mehr auftreten. Nur an den Zwischenpunkten Feodosia, Noworossjisk und Tuapse, wo die Gezeitenbewegungen viel kleiner sind, treten ständig wellenförmige Störungen deutlicher auf, aber nur in wenigen Zentimetern Höhe und mit höchstens drei aufeinanderfolgenden Wellen gleicher Periodendauer. Dabei sind die Wasserbewegungen durch lokale Schwingungen öfters gestört und erschweren dadurch den Vergleich.

Um nun die auftretenden Periodendauern näher zu bestimmen, wurden die Gezeitenbewegungen aus den Mareogrammen eliminiert. In den so erhaltenen Restkurven treten deutlicher Wellen von bestimmter Periodendauer hervor. Solche Stellen wurden in größerem Maßstab gezeichnet und dazu die Amplituden durch Addition mehrerer aufeinanderfolgender Wellen verstärkt. Da die Periodendauer dadurch unverändert bleibt, konnte diese angenähert daraus bestimmt werden. Auf diese Weise wurden folgende Periodendauern gefunden:

$T_1 = 7.4^h$. Die Schwingung hat in Odessa und Poti deutlich entgegengesetzte Phase, tritt aber nur in höchstens vier aufeinanderfolgenden Wellen auf.

$T_2 = 6.4^h$. Auch diese Seiche hat in Odessa entgegengesetzte Phase gegenüber den Ostpunkten. Sie tritt einmal in fünf aufeinanderfolgenden Wellen auf.

$T_3 = 5.5^h$. Die Schwingung ist an allen Punkten anzutreffen, und zwar im Osten mit gleicher Phase, während in Odessa keine deutliche Phasenübereinstimmung zu beobachten ist.

Außer den genannten drei Seiches sind noch folgende deutlich zu messen: $T_4 = 4.3^h$, $T_5 = 3.7^h$, $T_6 = 3.2^h$, $T_7 = 2.7^h$, $T_8 = 2.2^h$ und solche kleinerer Dauer. Ein Phasenvergleich ist bei diesen wegen des kleinen Maßstabes nicht möglich. Einige davon treten häufiger auf als die ersten Schwingungen und in mehreren aufeinanderfolgenden Wellen.

Wir stellen zunächst als Ergebnis der Analyse die Verhältnisse der Periodendauern zu der größten zusammen und setzen daneben die regelmäßigen Verhältnisse eines parabolisch konkaven Längsprofils nach Chrystal³⁾:

	$T_n : T_1$					
Schwarzes Meer	0.87	0.74	0.58	0.50	0.43	0.37
Parabolisches Becken	0.58	0.41	0.32	0.26	0.22	0.19.

Wir sehen hieraus, daß die Periodendauern im Schwarzen Meer einander sehr nahe kommen. Daraus wird zunächst das Aussehen der Kurven verständlich; denn schon drei in der Dauer einander so nahe kommende Schwingungen machen bei gleichzeitigem Auftreten das Bild sehr verwickelt und es ist sehr schwierig, dieselben durch Analyse zu trennen.

Weiterhin folgt daraus, daß das Schwarze Meer zu den Becken mit größter Breitenentwicklung gehört, wie sie bis jetzt untersucht worden sind. An anderer Stelle habe ich gezeigt, daß in solchen Seen um so verwickeltere Schwingungsverhältnisse anzutreffen sind, je mehr sich die Breite der Längserschreckung nähert⁴⁾. Die Ausdehnung in nordsüdlicher Richtung beträgt hier im Westen 600 km, also die Hälfte der westöstlichen Ausdehnung. Dazu kommt noch, daß die Tiefenverhältnisse gegen die Bucht von Odessa ganz andere sind als im Hauptbecken. Der Meeresboden erhebt sich dort rasch von 2000 m auf 100 m und schon in 130 km Entfernung vom Nordufer treffen wir die Tiefenlinie von 50 m an (vgl. die Karte, Tafel 70). Wellenförmige Störungen des Wasserspiegels brauchen daher zu ihrer Fortpflanzung in nördlicher Richtung gegen Odessa länger als in der Ostwestrichtung des Hauptbeckens. Die Bucht von

³⁾ Chrystal, G., On the hydrodynamical theory of seiches. Trans. R. Soc. Edinb. 1905. 41, III, Nr. 25, S. 626.
⁴⁾ Endrös, A., Die Vibrationen der Seen. Progr. d. hum. Gymn. Freising. Freising 1908, S. 14 ff.

Odessa beeinflusst daher die Schwingungsunterteilung des Schwarzen Meeres sehr wesentlich.

Zur Aufdeckung eines so verwickelten Schwingungsbildes wären gleichzeitige Beobachtungen an möglichst vielen Punkten notwendig. Vom Schwarzen Meere fehlen aber gerade Aufzeichnungen von der Westküste. Ein weiteres Mittel sind Versuche an künstlichen Beckenmodellen, wie ich sie beim Chiemsee zum ersten Male mit Erfolg angewendet habe¹⁾ und später die Japaner sie für die Untersuchungen an Meeresbuchten und Seen erfolgreich ausgebildet haben²⁾. Aber auch dieser Weg ist für unser Becken nicht brauchbar, weil die Tiefenunterschiede zu groß sind. Gibt man dem künstlichen Becken eine größte Tiefe von 0,5 m, so werden die Tiefen in der Bucht von Odessa kleiner als 5 mm. Die Wasserbewegungen an so seichten Stellen befolgen aber dann nicht mehr die Gesetze wie im natürlichen Becken. Auch die Berechnung der Schwingungsdauern nach den exakten Methoden versagt hier, weil bei so breiten Seen die seitlichen Wasserbewegungen größer sein können als diejenigen in der Längsrichtung und erstere werden bei sämtlichen Berechnungsmethoden vernachlässigt. Eine exakte Theorie für breite Seen von unregelmäßiger Form besitzen wir noch nicht.

In solchen Fällen ist man auf Annäherungsformeln angewiesen. Als solche eignen sich besonders die von Chrystal für bestimmte Seentypen aufgestellten, wie ich sie schon früher mit Vorteil angewendet habe³⁾. Sie können einfach auf das Längsprofil des betreffenden Sees angewendet werden. Man erhält für langgestreckte Seen, deren Knotenlinien an breite Seestellen fallen, dann besonders für Querschwingungen, ferner für breite Seen und für Buchten- und Uferschwingungen sehr gute Annäherungen und besonders da, wo die immer noch häufig benutzte Meriansche Formel ganz versagt. Die drei am häufigsten passenden Formeln sind:

$$T = \frac{\pi l}{\sqrt{gh}} = 0,7091 : \sqrt{h} (\text{Sek}) = 0,1971 : \sqrt{h} (\text{Std.}) \dots \dots \dots \text{I,}$$

$$T = \frac{2\pi l}{\sqrt{6gh}} = 0,8191 : \sqrt{h} (\text{Sek}) = 0,2281 : \sqrt{h} (\text{Std.}) \dots \dots \dots \text{II,}$$

$$T = \frac{2\pi l}{2,405 \sqrt{gh}} = 0,8341 : \sqrt{h} (\text{Sek}) = 0,2321 : \sqrt{h} (\text{Std.}) \dots \dots \dots \text{III,}$$

wobei I für ein symmetrisch konkaves, parabolisches Profil, II für ein halbparabolisches und III für ein solches mit der Form eines gleichschenkligen Dreiecks paßt. Hierbei bedeutet „l“ die Länge des Profils in „km“ und „h“ die größte Tiefe bzw. die Tiefe in der Nähe des Knotens in „m“. Die Formeln passen weiterhin für die Berechnungen an einem Teil eines Seeprofiles, wie es durch die vermutete Knotenlinie abgeteilt wird, wobei dann für l die doppelte Länge dieses Teils zu setzen ist.

Bei der Aufdeckung der Schwingungsunterteilung des Schwarzen Meeres kommt uns der Umstand zu Hilfe, daß die östliche Hälfte des Meeres eine ausgesprochene Längsrichtung hat. Da die größte Breite bei Feodosia 420 km mißt, so kann eine eventuelle Querseiche nach unserer Formel II für halbparabolischen Querschnitt höchstens eine Schwingungsdauer von 2,5 bis 3^h haben, wenn man die Verlängerung der Dauer durch die seichte Ausbuchtung bei Feodosia berücksichtigt. Schwingungen von mehr als 3^h Dauer müssen daher im Ostbecken Längsschwingungen sein und am Ostende einen gemeinsamen Schwingungsbauch haben. Für die Schwingungsrichtungen im westlichen Teile kommen drei Möglichkeiten in Betracht. Einmal kann die Wassermasse längs des tiefen Hauptbeckens gegen Südwesten schwingen. Für ein solches Profil paßt die Formel I, welche für l = 1200 km und für die Tiefe h am Knoten = 2300 m T

¹⁾ Endrös, A., Seeschwankungen (Seiches), beobachtet am Chiemsee. Traunstein 1903, S. 8.
²⁾ Honda, K., Secondary Undulations of Oceanic Tides. Journ. of the Coll. of Science, Tokyo 1908, Bd. 24 und Bd. 28, 5, Tokyo 1911.

³⁾ Endrös, A., Vergleichende Zusammenstellung der Hauptseichesperioden usw. Pet. Mitt. 1908, H. 2, 3, 4. S. auch Krümmel, Handb. d. Ozeanogr. II., Stuttgart 1911. S. 162.

= 4,9^h ergibt. Da der Knoten sehr nahe mit der Spitze der Krimhalbinsel zusammenfällt und das Becken hier sich verengt, so ist dadurch die Vergrößerung der Dauer um 10% vollständig begründet. In der Schwingung von 5,5^h Periodendauer muß also die einknotige Längsschwingung des Hauptbeckens in der Richtung Poti-Burgas erblickt werden. R. v. Sterneck¹⁾ hat berechnet und A. Defant²⁾, der seine neue Berechnungsmethode auch auf das Schwarze Meer angewandt hat, findet 5,1^h. Bei beiden ist aber die Odessaer Schwingung des Schwarzen Meeres haben, wenn dasselbe etwa in der Richtung des 45. Breitengrades gegen Norden abgegrenzt wäre. Diese müßte dann in langen Reihen und zeitweise mit großen Amplituden auftreten, da die Krimhalbinsel die Schwingung nicht behindern würde. In Wirklichkeit muß sich aber die Schwingung auch quer zur Haupttrichtung gegen Norden fortsetzen. Sie tritt auch in Odessa deutlich auf, doch besteht dort keine Phaseneinstimmung mit den Ostpunkten, woraus man schließen muß, daß das Querbecken nicht auf diese Dauer abgestimmt ist. Für die Querschwingung berechnet sich auch eine merklich größere Schwingungsdauer, wie wir unten sehen werden. Die Bewegung kommt also in Odessa als fortschreitende Welle an und wird dort wieder zurückgeworfen. Dadurch stört sie die Schwingung des Hauptbeckens, die so rasch nach wenigen Schwingungen vernichtet wird.

Als weitere Schwingungsrichtung im Westen kommt für die 6,4-Stundenseiche diejenige gegen die Mitte des Westufers in Betracht, das bei seiner geradlinigen Nord-Südrichtung die ostwestlich gerichtete Bewegung der Wassermasse reflektiert und so den westlichen Schwingungsbauch bildet. Da das Meer dort bedeutend seichter ist — in 130 km Entfernung vom Ufer trifft man nur noch eine Tiefe von 100 m an —, so muß die Schwingungsdauer gegenüber derjenigen von 5,5^h merklich verlängert werden. Da ferner der westliche Schwingungsbauch eine bedeutende Breitenausdehnung besitzt, wie die Beobachtungen in Odessa zeigen, wo die Schwingung deutlich entgegengesetzte Phase mit den Ostpunkten aufweist, ist hierin ein weiterer Grund für die Verlängerung der Periodendauer zu erblicken. Der Knoten der Schwingung muß merklich westlich der Südspitze der Krimhalbinsel fallen, so daß die unsymmetrische Lage zum Knoten wie ein auf eine Seite aufgelegter Finger wirkt und die rasche Dämpfung der Schwingung verursacht.

Für die weitere Schwingung von der beobachteten größten Dauer von 7,4^h bleibt nun nur die Richtung gegen die seichte Bucht von Odessa selbst. Dort treffen wir die 50 m-Isobathe bereits in einem Abstand von 130 km vom Nordende an. Das Profil dieses seichten Teiles ist konkav parabolisch, wofür nach Formel I sich eine Schwingungsdauer T = 7,3^h berechnet. Sie kann daher zunächst als Buchtenschwingung angesehen werden, wie wir sie in anderen Seen und in Meeren finden. Weil ferner die Schwingungsrichtung zunächst eine rein südliche ist, könnte man in ihr auch die Querschwingung des westlichen Beckens vermuten. Die Bewegung muß sich aber gleichzeitig in der halben Schwingungsdauer von 3,7^h in der tiefen Hauptrinne auch nach Osten fortsetzen und da die Ostpunkte mit Odessa entgegengesetzte Phase haben, müssen wir in ihr die einknotige Schwingung Odessa-Südufer — Ostufer suchen. Die Schwingungsrichtung kniet sich hier also fast unter einem spitzen Winkel gegen Osten um, wobei ein Teil der Bewegung am Südufer direkt gegen Odessa reflektiert wird. Darin ist wohl auch der Grund zu suchen, warum die Schwingung nicht stabil ist. Der Schwingungsknoten muß sich dabei mehr gegen Süden verlagern, wie man aus der halben Schwingungsdauer von 3,7^h und dem großen Abstand derselben vom Ostende schließen muß.

Die Auslösung der einen oder anderen Schwingung läßt sich dabei

¹⁾ Sterneck, R. v., Zur Theorie der Gezeiten des Mittelmeeres. S. B. d. A. d. W. in Wien, math.-phys. Kl., Bd. 122, 1913, S. 319.

²⁾ Defant, A., Neue Methode zur Ermittlung der Eigenschwingungen (Seiches) in abgeschlossenen Wassermassen. Diese Ztschr., Febr. 1918, S. 78 ff.

so erklären, daß die einwirkenden Kräfte von verschiedenen Richtungen an die Wasserfläche herankommen. Nähert sich zum Beispiel ein Luftdruckgradient von Südwesten dem Meere, so wird die Wassermasse längs der tiefen Rinne gegen Osten gedrängt und kehrt von dort nach 2.7^h wieder zurück, wo durch die 5.5-Stundenschwingung entsteht. Erreicht eine Störung das Meer von der Mitte des Westufers aus, so kehrt die Wasserbewegung nach 3.2^h an diese Stelle zurück, und das Meer schwingt mit der 6.4^h-Seiche weiter. Kommt endlich die Störung von Nordwesten oder Norden an die Odessaer Bucht, so muß sie die 7.4^h-Seiche auslösen. Als Ursache dieser Schwingung kommt auch das dort durch den Wind angestaute Wasser in Betracht, das bei plötzlichem Nachlassen des Windes sich gegen das Hauptbecken ausgleicht.

Am Schwarzen Meere haben wir also das merkwürdige Ergebnis, daß dort drei verschiedene Hauptschwingungen auftreten und die Schwingungsrichtungen, die am Ostende zusammenfallen, im Westteile sich nach drei Richtungen verzweigen (vgl. Tafel 70). Für eine Zweiteilung der Schwingungsrichtung finden sich in der Literatur schon Beispiele, besonders in breiten Seen wie beim Chiemsee¹⁾. Aber auch in langgestreckten Seen wie am Neuenburger See²⁾, Gardasee³⁾ und Simssee treffen wir solche an. Ein weiteres besonders passendes Beispiel für unser Meer finde ich in neuester Zeit am Traunsee in Oberösterreich, der eine ausgesprochene Längsrichtung besitzt und dennoch zwei binodale Seiches hat. K. Schuh⁴⁾ hatte dort bereits im Jahre 1899 die einknotige Schwingung von 12 Minuten Dauer gefunden, berichtete aber auffälligerweise nichts von einer binodalen. Nun erhielt ich in neuester Zeit Einblick in die Pegeldiagramme von Gmunden am Nordende des Sees⁵⁾, die sich auch auf die Zeit von Schuhs Beobachtungen erstrecken. Dort findet sich fast immer sehr deutlich die bekannte Erscheinung der Schwebungen, wobei neun Schwingungen von 6.5 Min. auf acht solche von 7.3 Min. kommen. Die Erklärung hierfür ist in der Breitenausdehnung am Nordende zu suchen, wo sich die tiefe Hauptrinne gegen Gmunden hinzieht, während sich gegen Nordwesten die seichte Ausbuchtung von Altmünster befindet, genau so wie am Schwarzen Meere die 5.5-Stundenschwingung in Richtung der südwestlichen Hauptrinne und die von 6.4 Stunden gegen das seichte Westufer schwingt.

Nachdem wir am Schwarzen Meere allein drei Hauptschwingungen und dazu drei verschiedene Schwingungsrichtungen antreffen, werden die Möglichkeiten bei den übrigen Schwingungen kürzerer Dauer so mannigfaltig, daß das weitere Schwingungsbild kaum je entziffert werden wird. Von den Schwingungen von 4.3^h, 3.7^h und 3.2^h läßt sich nur so viel sagen, daß auch sie Längsschwingungen im östlichen Becken sein müssen, wie wir aus Formel I, angewendet auf die Querschwingungen, schließen können. Ein Knoten dieser Schwingungen muß also östlich der Krimhalbinsel liegen, die westliche Schwingungsunterteilung aber hat viele Möglichkeiten.

Zum Schlusse sei noch kurz die Frage erörtert, warum das Schwarze Meer wenigstens nicht zeitweise größere Seiches-Amplituden der Hauptschwingungen aufweist. Nach einer statistischen Zusammenstellung der größten Amplituden, wie sie bis jetzt an den Seen beobachtet wurden, sollten diese mit der Längserstreckung der Wasserfläche zunehmen⁶⁾. Rechnet man nur mit der kleinsten Maximalamplitude von 1 mm pro km, wie sie dort zu finden ist, so ergibt sich für das Schwarze Meer eine größte Hubhöhe von 2.4 m. Die größte in Odessa in der Beobachtungszeit bei unruhigstem Wetter auftretende Welle hatte aber nur eine Hubhöhe von 0.15 m.

Wenn auch die starke Dämpfung mit einer Ursache kleinerer Amplituden ist, so sollten doch die ersten Schwingungen einer Reihe entsprechend der Aus-

¹⁾ Endrös, A., Seeschwankungen (Seiches), beobachtet am Chiemsee. S. B. d. math.-phys. Kl. d. K. Bayer. Ak. d. W., München 1906. 36. Heft 2. — ²⁾ Sarasin, Ed., Les Seiches du lac de Neuchâtel. Arch. Genève XXVII, 356, 1892. — ³⁾ Defant, A., a. a. O., S. 84. — ⁴⁾ Schuh, K., Beiträge zur Kenntnis des Gmünder Sees. Gmunden 1899. — ⁵⁾ Ich verdanke dies Herrn Oberbaaurat F. Rosenauer, Vorstand der hydrographischen Landesanstalt in Linz, der mir die sämtlichen Pegelaufzeichnungen in entgegenkommender Weise überließ. — ⁶⁾ Diese Ztschr. 1931, S. 214.

dehnung des Meeres weit höhere Hubhöhen aufweisen. Als Hauptursachen der Seiches in tieferen Seen kommen ausschließlich die meteorologischen Störungen in Betracht, die bei Böen und Gewittern auftreten. Diese bedecken aber, in der Fortpflanzungsrichtung gemessen, nur Tiefen bis 100 km und besitzen eine der halben Schwingungsdauer der Hauptschwingungen auf einen zu kleinen Teil der Wasserfläche ein und können dort nur lokale Buchten- und Uferschwingungen und mehrknotige Seiches auslösen.

Daß in der oben erwähnten Tabelle der Eriesee mit seiner großen Ausdehnung von 400 km noch eine Maximalamplitude von 5 mm pro km aufweist hat seinen Grund darin, daß in der ungewöhnlich großen halben Periodendauer der Grundschwingung von 7.1 Stunden die genannten Störungen die halbe Seelänge und mehr bedecken können. Dort kommen außerdem die Stauwirkungen des Windes dazu, da die Tiefe des Eriesees so gering ist, während beim Schwarzen Meer wegen seiner großen Tiefe diese nur auf einen schmalen Uferstreifen sich beschränken und nur in der seichten Bucht von Odessa bei der Auslösung der 7.4-Stundenschwingung mitwirken können.

Bei der großen Ausdehnung des Schwarzen Meeres sollten die Druckunterschiede der großen Depressionen, die bis 35 mm Quecksilber betragen können, größere Hubhöhen erzeugen. Da aber die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten derselben im Durchschnitt nur 30 km pro Stunde betragen, können sie bei der kurzen Schwingungsdauer der Hauptschwingung gewöhnlich nur statische Gleichgewichtsstörungen hervorbringen, nur selten dynamische.

2. Die Hubhöhen der Gezeiten im Schwarzen Meere.

Die starke Dämpfung der Hauptschwingungen, wie sie sich aus den Beobachtungen ergeben hat, bringt, wie ich glaube, Aufklärung in der Frage der Hubhöhen der halbtägigen Gezeiten dieses Meeres, die merklich unter den nach der Theorie zu erwartenden zurückbleiben.

v. Sterneck¹⁾ hat als erster das Problem der Gezeiten dieses Meeres durch Rechnung zu lösen versucht und dazu ein rechteckiges Becken von 1000 km Länge, 500 km Breite und 1259 m Tiefe angenommen. Letztere Tiefe ist deshalb gewählt, weil die Eigenschwingungsdauer den von ihm errechneten Betrag von 5^h haben sollte. Er erhält unter Berücksichtigung der Ostwest- und Südnordschwingung, wobei er auch die beiden durch die Erdrotation verursachten kleinen Schwingungen noch berücksichtigt, eine Amphidromie im Sinne der Uhrzeigerbewegung. Die erhaltenen Hafenzeiten stimmen dabei verhältnismäßig gut mit den von ihm beobachteten überein. Die gefundenen Hubhöhen dagegen bleiben stark unter den von ihm berechneten Werten. Dabei erhält man aber unter Berücksichtigung der wirklichen Ausdehnung des Meeres und der neugefundenen größeren Periodendauern der Hauptschwingungen noch merklich größere Hubhöhen der Gezeiten.

Zur Berechnung derselben können wir die von Sterneck ermittelte Tangente des maximalen Neigungswinkels der Niveaulfläche benutzen, die durch die zur Zeit der Syzygien zusammenfallenden Flut erzeugenden Kräfte der beiden Halbtagskomponenten M_2 und S_2 in der mittleren geographischen Breite $\varphi = 43^\circ$ den Betrag erreicht²⁾:

$$\operatorname{tg} \alpha = 8.16 \times 10^{-8}$$

Die Knotenlinie der Ost—Westschwingung fällt dabei fast genau an die Südspitze der Krimhalbinsel, da der tidenlose Punkt nach meiner Berechnung sehr nahe mit dem Mittelpunkt der dortigen Meeresbreite zusammenfällt. Der Abstand des Westendes von der Knotenlinie beträgt danach 540 km und der des Ostendes 630 km, so daß wir nach der reinen Gleichgewichtstheorie folgende maximale Hubhöhen erhalten:

$$\begin{aligned} \text{Im Osten } 2\eta &= 8.16 \times 10^{-8} \times 630 \text{ km} = 10.3 \text{ cm,} \\ \text{Westen } 2\eta &= 8.16 \times 10^{-8} \times 540 \text{ km} = 8.8 \text{ cm.} \end{aligned}$$

¹⁾ A. a. O., S. 87 ff. — ²⁾ A. a. O., S. 93.

Nach der verbesserten Gleichgewichtstheorie sind die Werte noch mit dem sogenannten Trägheitsfaktor β zu multiplizieren, der in der Form, wie sie ihm Sterneck gibt¹⁾, lautet:

$$\beta = \frac{tg}{arc} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{T}{\tau} \right),$$

wobei die Periode der vereinigten Sonnen- und Mondtide $\tau = 12,3^h$ und $T = 6,4^h$ bzw. $5,5^h$ beträgt. Für den ersten Wert von T errechnet sich $\beta = 1,31$, für den zweiten Wert $\beta = 1,22$. Sonach ist

für $T = 5,5^h$, $2\eta = 10,7$ cm und $12,3$ cm,

„ $T = 6,4^h$, $2\eta = 11,5$ cm und $13,5$ cm.

Zum Vergleich der berechneten Werte mit den Beobachtungen stelle ich im folgenden zunächst die von Sterneck selbst beobachteten und aus den Mareogrammen entnommenen²⁾ und die von mir aus den vorliegenden Mareogrammen ermittelten Werte zusammen.

Gezeitenbeobachtungen im Schwarzen Meere.

Beobachtungsort	Zeit	Hubhöhe in cm	Hafenzeit	Anzahl der Beobachtungen
Konstanza	26. IX. 1912	7,2 ³⁾	3,05 ^h	1
Odessa	1909—1912	8,6 ± 0,8	3,46 ± 0,10 ^h	8
Odessa	4. V. 1924	10,5	—	1
Sewastopol	1913	3,2 ± 0,2	4,15 ± 0,21 ^h	4
Feodosia	1913	2,2	7,79 ± 0,30 ^h	1
Feodosia	4. V. 1924	1,5	7,79 ± 0,30 ^h	1
Noworossijsk	4. V. 1924	4,3	ungefähr 9 ^h	1
Tuapse	4. V. 1924	5,6	„	1
Poti	13. X. 1924	8,5	„	1

Die obigen Zahlen für die Hubhöhen stellen natürlich nur angenäherte Werte dar; denn die Bestimmung erfolgte direkt aus den Hubhöhen der drei Gezeitenwellen in der Nähe der Syzygien. Wie unsicher die Werte sein können, ersieht man besonders aus den abweichenden Messungen, wie sie Sterneck in Odessa findet. Die Werte schwanken zwischen 6,6 und 12,3 cm. Aus dem Mareogramm von Odessa vom 7. X.—16. X. 1924, das Kurtschatoff mitteilt, ersieht man besonders deutlich, wie sehr sich die Hubhöhen bei unruhigem Wetter von Tag zu Tag ändern, so daß zwei aufeinanderfolgende Hochwasser 20 cm und 8 cm messen. Solche Aufzeichnungen sind natürlich für Messungen nicht brauchbar; man darf nur ruhig verlaufende Aufzeichnungen verwenden, bei denen die Hubhöhen sich regelmäßig ändern, wie das zweite Mareogramm von Odessa vom 5. V. 1924 und die übrigen vom gleichen Datum es sind. Ich habe außerdem die erhaltenen Werte noch dadurch erprobt, daß ich die resultierende Welle von drei aufeinanderfolgenden Tagen durch Addition der einzelnen Wellen gebildet habe. Diese Art der Bestimmung habe ich auch in Feodosia, Noworossijsk und Tuapse angewendet, wo sonst die Hubhöhen wegen der größeren Amplituden der freien Schwingungen nicht direkt zu messen waren.

Ziehen wir zunächst nur die Werte vom westlichsten und östlichsten Punkte zum Vergleich heran, so erhalten wir:

	Beobachtet	Gleichgewichtstheorie	Verbesserte Theorie
Konstanza	7,2	8,8	11,6 cm
Poti	8,5	10,3	13,6 cm

Die Werte bleiben also weit hinter dem nach der verbesserten Gleichgewichtstheorie berechneten zurück, woraus wir schließen dürfen, daß das Schwarze Meer wegen der beobachteten starken Dämpfung der freien Schwingungen mit den Gezeitenkräften nicht mitschwingen kann und sich daher dort nur die reinen erzwungenen Schwingungen zeigen.

¹⁾ A. a. O., S. 88. — ²⁾ A. a. O., S. 85 ff. — ³⁾ Sterneck hat an der oben zitierten Stelle 7,7 statt 7,2 cm. Es dürfte ein Druckfehler sein, da in der ersten Mitteilung (S. B. d. K. A. d. Wiss. in Wien vom 17. X. 1912, Ak. Auc. Nr. XIX) die Berechnung aus $(8,6 + 5,5 + 6,2 + 8,8) : 4 = 7,2$ angegeben ist.

Daß auch die Hubhöhen noch unter den nach der reinen Gleichgewichtstheorie berechneten bleiben, läßt sich wohl damit begründen, daß das Meer kein Becken von gleichmäßiger Breite und Tiefe ist, wie die Theorie voraussetzt und auf alle Querschnitte synchron wirken.

Die übrigen Beobachtungen im Ostteile des Meeres erweisen sich sehr nahe proportional dem Verhältnis der Abstände der betreffenden Beobachtungspunkte von der Knotenlinie, wie die folgende Zusammen-

Hubhöhe	Feodosia	Noworossijsk	Tuapse	Poti
Entfernung	1,5	4,3	5,6	8,5 cm
	1,4	3,5	6,1	7,2 × 87 km.

Die von Sterneck in Feodosia gemessene Hubhöhe beträgt das doppelte der von mir gefundenen und ist sichtlich zu groß, da er die einzelnen Wellenhöhen zu messen suchte, was bei den vorhandenen anderweitigen Wellen nicht möglich ist. Auch die von ihm für Sewastopol gefundene Hubhöhe von 3,2 cm ist ganz unverständlich, da der Punkt sehr nahe der Knotenlinie liegt.

Die größte Hubhöhe wurde mit 10,5 cm in Odessa beobachtet. Bei den verwickelten Beckenverhältnissen des Westteiles läßt sich dieselbe schwer mit der Theorie vergleichen. Jedenfalls kommt zur westöstlichen Schwingung hier noch eine süd-nördliche Komponente, welche einen Phasenunterschied von 90° gegenüber der ersteren besitzt. Bei der süd-nördlichen Ausdehnung von 600 km erhält man unter Berücksichtigung des Trägheitsfaktors eine Hubhöhe von ungefähr 4 cm. Diese kann die ostwestliche Hubhöhe nur um etwa 1 cm erhöhen und wirkt sich mehr in einer Verschiebung der Hafenzeit um etwa $\frac{3}{4}$ Stunden aus. Wie es scheint, kommt dort noch eine westöstliche Teilschwingung der Odessaer Bucht selbst dazu, die bei einer Ausdehnung von 200 km etwa 1,6 cm beträgt.

Auch eine deutliche ganztägige Gezeitenwelle konnte an allen Punkten durch Subtraktion der halbtägigen Welle gefunden werden. Ich füge die erhaltenen Hubhöhen hier noch an; darunter stehen wieder die gleichen Entfernungen wie oben. Bis jetzt liegen nämlich keine derartigen Beobachtungen vor. Sterneck selbst betont, daß keine ganztägige Welle zu beobachten sei.

Hubhöhe	Odessa	Feodosia	Noworossijsk	Tuapse	Poti
Entfernung	2,3	0,4	2,0	2,6	3,5 cm
	—	1,4	3,5	5,1	7,6 × 87 km.

Man sieht auch hier wieder nahezu proportionale Hubhöhen zu den Abständen der einzelnen Punkte von der Knotenlinie, wie es die reine Gleichgewichtstheorie verlangt, die hier wegen des kleinen Wertes von $T : \tau$ tatsächlich gilt.

Die obigen Untersuchungen gründen sich nur auf einzelne Messungen der Hubhöhen zur Zeit der Syzygien. Es dürfte sich verlohnen, die Gezeiten-größen des Schwarzen Meeres durch harmonische Analyse genau zu bestimmen, um die obigen Ergebnisse an der Hand der exakten Theorie, wie sie A. Defant auch für Becken mit wechselnder Breite und Tiefe aufgestellt hat³⁾, nachzuprüfen. Es liegen jahrelange Aufzeichnungen des Wasserstandes von mehreren Punkten vor und aus denselben könnten solche mit ruhigem Verlaufe ausgesucht werden. Die Ergebnisse wären für die Frage der Gezeiten in Binnenseen von besonderem Werte.

3. Die Seiches des Asowschen Meeres und dessen Gezeiten.

Im Gegensatz zum Schwarzen Meer, das mit seiner Tiefe an der Spitze der Seen steht, gehört das Asowsche Meer zu den seichtesten Becken von so großer Ausdehnung. Bei einer Längserstreckung von 390 km beträgt seine größte Tiefe nur 15 m, bei einer mittleren Tiefe von 10 m. Wegen seiner Seichtheit ist dasselbe als Schauplatz der größten Winddenivellationen bekannt. In der seichten Bucht von Taganrog wurden Stauhöhen bis zu 5 m beobachtet; auch

³⁾ Defant, A., Untersuchungen über Gezeitenbewegungen in Mittel- und Randmeeren, in Buchten und Kanälen. Denkschriften d. A. d. W. in Wien 1919, math.-naturw. Kl., Bd. 96, S. 18 ff.

kann der Wasserspiegel dort in wenigen Stunden um 3 m sich senken¹⁾. Durch eben diese Denivellationen werden dort auch Seiches von ungewöhnlicher Amplitude erzeugt, so daß das Meer auch hierin im Gegensatz zum Schwarzen Meere steht. Über die Seiches dieses Meeres berichtet auch I. W. Kurtschatoff zum ersten Male. Er findet dort eine uninodeale Schwingung von 24,5^h zum ersten Male. Hierin ist die größte in einem abgeschlossenen Becken bis jetzt beobachtete Periodendauer gefunden. Zu seinen Untersuchungen standen ihm die gleichzeitigen Aufzeichnungen zweier Mareographen zur Verfügung, und zwar von Jeisk, am südlichen Ufer der Taganroger Ausbuchtung, und von Temrjuk, am südlichsten Uferpunkte des breiten Hauptbeckens gelegen. Die Hauptschwingung hat an diesen beiden Punkten entgegengesetzte Phase; die Knoten ist daher an dem Eingang in die genannte Bucht zu suchen. Kurtschatoff berechnet die Dauer derselben nach der japanischen Formel, indem er die Seiche als Buchtenschwingung der Taganroger Bucht auffaßt und findet 23^h, was in guter Übereinstimmung mit der Beobachtung steht.

An der gleichen Stelle teilt er auch Mareogramme von beiden Beobachtungspunkten mit, und zwar zwei gleichzeitige Aufzeichnungen vom 20.—25. VI. 1924 und von Temrjuk allein eine solche vom 7.—11. VIII. 1924. Obwohl die Mareogramme sich nur auf fünf Tage erstrecken, konnten doch zahlreiche Schwingungen daraus angenähert bestimmt werden, da diese dort mit großen Amplituden und in längeren Reihen auftreten. Zur Analyse derselben wurde die sogenannte Restbildung angewendet und immer wieder andere Schwingungen eliminiert, so daß die einzelnen nur mehr allein vorhanden waren.

Zur Bestimmung der Hauptschwingungsdauer waren die Aufzeichnungen von vier Tagen zu kurz, weil nur vier ganze Wellen enthalten sind. Dagegen war ein deutlicher Phasen- und Amplitudenvergleich beider Punkte möglich. In Übereinstimmung mit Kurtschatoff findet sich an beiden Punkten bei der 24,5-Stundenschwingung entgegengesetzte Phase, und die Amplitude in Temrjuk verhält sich zu der von Jeisk wie 2:3. Aus der Entfernung der letzteren Station von dem am Eingange der Taganroger Bucht gelegenen Knoten berechnet sich für das Ende der Bucht die dreifache Amplitude, so daß sich für dort ungefähr die fünffache Amplitude von derjenigen in Temrjuk ergibt. Das Verhältnis 1:5 entspricht ungefähr dem Verhältnis der schwingenden Flächen beiderseits des Knotens. Aus der größten in Temrjuk von Kurtschatoff gemessenen Amplitude von 80 cm berechnet sich für Taganrog, dem Ende der Bucht, eine maximale Hubhöhe von 2,5 m. Damit ist die größte bis jetzt in Seen beobachtete Schwankung gefunden. Das Ende des westlichen Schwingungsbauches ist dabei nicht am Westufer zu suchen, sondern in der Mitte des Südufers, wie man aus der verhältnismäßig großen Amplitude in Temrjuk schließen kann.

Zur Berechnung der Periodendauer der Hauptschwingung können wir am besten die Formel II für halbparabolische Becken benutzen, wobei man aus $l=390$ km und $h=14$ m²⁾ $T=23^h$ erhält. Da aber der Knoten an eine Einengung fällt, wird die Dauer dadurch verlängert, so daß wir den ungefähren Wert von 24,5^h erhalten, wie sie Kurtschatoff gemessen hat. Aus seinen kurzen Mitteilungen läßt sich allerdings nicht ersehen, inwieweit die Periodendauer aus den Aufzeichnungen genau ermittelt werden konnte. Nach den Erfahrungen an anderen Seen muß man annehmen, daß sich dieselbe dort wegen der geringen Tiefe des Beckens durch die Änderungen des Wasserstandes auch merklich ändert. Da außerdem die Periodendauer der freien Schwingung denjenigen der ganztägigen Gezeitenkomponenten so nahe kommt, müssen dort, wie wir unten sehen werden, ungewöhnlich große Amplituden dieser Gezeiten auftreten. Diese überlagern die Wellen der freien Schwingungen; die gefundene Periodendauer kann daher nur diejenige der Interferenzkurven der freien und erzwungenen Schwingungen sein.

Um eine Vorstellung von der Größe des dortigen Gezeitenhubes zu erhalten, stelle ich in folgender Tabelle die Berechnungen für die einzelnen ganz-

¹⁾ Krümmel, O., Handbuch der Ozeanographie, Bd. II, S. 534.

²⁾ Die größte Tiefe von 15 m kommt nur isoliert in der Nähe der Straße von Kertsch vor.

tägigen Komponenten nach der verbesserten Gleichgewichtstheorie zusammen, und zwar unter der Annahme, daß T genau 24,5^h beträgt. In der Tabelle bedeutet $\alpha l \cdot \cos \varphi$ die Größe des Gezeitenhubes nach der reinen Gleichgewichtsgeographische Breite = 46° gesetzt ist. β ist wieder der sogenannte Trägheitsfaktor (vgl. S. 448).

Ganztägige Gezeitenkomponenten im Asowschen Meer bei $T=24,5^h$.

Komponenten	K_1	O	P
τ -Periodendauer in h	23,93	25,82	24,07
$\alpha l \cdot \cos \varphi$ in cm	1,05	0,71	0,35
$T : \tau$	1,024	0,955	1,018
Trägheitsfaktor β	-18	+9,8	-24
Hubhöhen 2η in cm	-19,0	+6,9	-8,2

Aus der Tabelle ersieht man, daß bei einer Periodendauer von 24,5^h die ganztägigen Gezeiten im Asowschen Meere eine maximale Hubhöhe von 34 cm erreichen können, ein Betrag, wie er in den Ozeanen nur selten vorkommt. Dabei setzt die Formel ein Becken von konstanter Breite und Tiefe voraus. Bei der Gestalt des Asowschen Meeres müssen aber die Amplituden am Ende der Taganroger Bucht noch merklich höhere Beträge erreichen.

Die ganztägigen Gezeiten müssen dort außerdem eine seltene Unregelmäßigkeit aufweisen. Bei der angenommenen Dauer von 24,5 h haben wir bei den Komponenten K_1 und P indirekte Gezeiten, bei der O-Tide direkte. Wenn nun die Dauer der freien Schwingung mit dem Wasserstande sich ändert — bei einer Zu- oder Abnahme des Wasserstandes von $\frac{1}{2}$ m errechnet sich nahezu eine Ab- oder Zunahme von einer halben Stunde¹⁾ —, ändern sich die Hubhöhen der Gezeiten sehr stark; nähert sich z. B. die Dauer der freien Schwingung derjenigen der K_1 - und P-Tide, so werden die Amplituden derselben nach der Theorie unendlich groß, um bei weiterer Abnahme in ebenso große direkte Gezeiten umzuschlagen. Nimmt T aber zu, so nehmen die Höhen der genannten Komponenten sehr rasch ab, während die der O-Tide zunimmt. (Vgl. die Tabelle der Amplitudenverteilung für verschiedene Werte von $T : \tau$ von A. Defant, a. a. O., S. 16.)

Den ungewöhnlich großen Höhen der ganztägigen Gezeiten stehen dort minimale Hubhöhen der halbtägigen Gezeiten gegenüber. Je mehr sich nämlich das Verhältnis $T : \tau$ dem Werte 2 nähert, um so näher kommt der Trägheitsfaktor dem Werte 0.

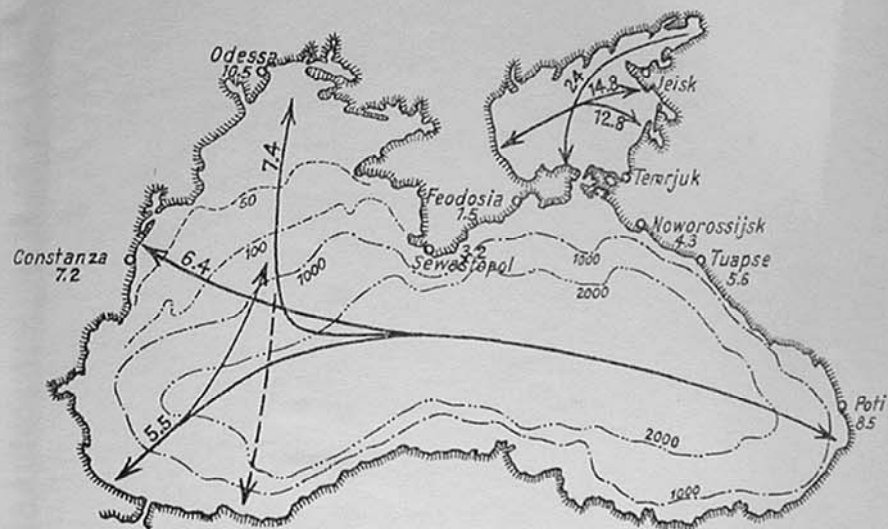
Die Analyse der Mareogramme gibt noch eine größere Anzahl weiterer ausgeprägter Schwingungen, die besonders in Temrjuk zahlreich sind. Folgende Seiches sind dort noch zu finden: $T_2=14,8^h$, $T_3=12,8^h$, $T_4=9,1^h$, $T_5=6,4^h$, $T_6=5,6^h$, $T_7=4,9^h$ und solche kürzerer Dauer. In Jeisk sind zu messen $T_2=14,8^h$, $T_4=9,7^h$ und $T_5=7,0^h$.

Die große Anzahl Seiches in Temrjuk, von denen sich zwei wieder an Dauer sehr nahe kommen, hat ebenfalls ihren Grund darin, daß das Hauptbecken eine starke Ausdehnung in der Breite besitzt. Die westöstliche Länge nämlich mißt 262 km und die südöstliche Breite 170 km. Wir haben daher in diesem Becken wieder verschiedene Schwingungsrichtungen. Bei so breiten Becken paßt besonders gut unsere Formel I für konkavparabolische Profile, und da die größte Tiefe für sämtliche Schwingungsrichtungen sehr nahe 14 m beträgt, sind die Periodendauern sämtlich proportional der Länge der Profile, und unsere Formel erhält die einfache Form: $T=0,05261$ (Std.), wobei „l“ in „km“ gemessen ist.

Bei der Gestalt des Beckens muß einmal eine ostwestliche und eine südöstliche Schwingung auftreten. Für erstere berechnet sich bei $l=262$ km $T=14,0^h$ und für letztere bei $l=170$ km $T=9,2^h$. Wir können daher in der gemessenen 14,8-Stundenschwingung die einknotige Längsseeiche des Hauptbeckens suchen. Da sie in Jeisk mit gleicher Phase und Amplitude zu beobachten ist, schwingt auch die Taganroger Bucht mit; dabei ist ein weiterer Knoten innerhalb derselben, so daß die Schwingung eine binodale des Asowschen

¹⁾ Starke Änderungen des Wasserstandes bringt der Abfluß durch die Straße von Kertsch nach dem Schwarzen Meere, der durch Windstau längere Zeit stark gesteigert werden kann.

Die Seiches des Schwarzen und Asowschen Meeres und die dortigen
Hubhöhen der Gezeiten.



Mareographenstationen am Schwarzen und Asowschen Meere
mit den Hubhöhen der Halbtagsgezeiten.
Schwingersrichtungen der Hauptseiches.