

Copyright ©

Es gilt deutsches Urheberrecht.

Die Schrift darf zum eigenen Gebrauch kostenfrei heruntergeladen, konsumiert, gespeichert oder ausgedruckt, aber nicht im Internet bereitgestellt oder an Außenstehende weitergegeben werden ohne die schriftliche Einwilligung des Urheberrechtlichsinhabers. Es ist nicht gestattet, Kopien oder gedruckte Fassungen der freien Onlineversion zu veräußern.

German copyright law applies.

The work or content may be downloaded, consumed, stored or printed for your own use but it may not be distributed via the internet or passed on to external parties without the formal permission of the copyright holders. It is prohibited to take money for copies or printed versions of the free online version.

Über den biochemischen Stoffwechsel in der Ostsee.

Von Kurt BUCH¹⁾

Die Entdeckung der Nährsalze und Ausarbeitung quantitativer Methoden zu deren Bestimmung hatten eine rasche und erfolgreiche Entwicklung der Forschung über die Produktion im Meere zur Folge. In allen ozeanographischen Instituten der Welt wurden Untersuchungen über mineralische Stickstoffverbindungen sowie von Phosphaten in Gang gesetzt, deren Bedeutung als produktionsbegrenzende Faktoren im Sinne des Minimumgesetzes von LIEBIG schon vorher von K. BRANDT erkannt und später auch bestätigt worden war. Im Ostseebecken wurden die ersten umfangreicheren Untersuchungen auf den Terminfahrten des Meeresforschungsinstitutes in Helsingfors (Finnland) in den Jahren 1928, 1929, 1930 und 1931 ausgeführt. Dieselben umfaßten die Gebiete des Finnischen und Bottnischen Meerbusens und die zentrale Ostsee. Die Bornholmsee, Arkonasee und die westlichen Buchten wurden von KALLE, GESSNER und vor allem auch von WATTENBERG [15] in Angriff genommen. Von ihm wurde auch die Kieselsäure in die Untersuchungen einbezogen. Außerdem wurden sowohl in Kiel wie in Helsingfors nach gemeinschaftlichem Beschluß regelmäßige über ein Jahr ausgedehnte Nährsalzuntersuchungen, kombiniert mit entsprechenden Beobachtungen hydrographischer Art an festen Stationen, nämlich von WATTENBERG [14] außerhalb Kiel, vom Verf. gemeinschaftlich mit S. GRIPENBERG [5] bei Hangö nahe Helsingfors durchgeführt. Später wurde finnländischerseits noch eine längere hydrographische-chemische biologische Untersuchung des Schärenhofes des Ålandsarchipels in Gang gesetzt.

I. Der Stoffkreislauf im Ostseebecken.

Die Ergebnisse der ersten Nährstoffuntersuchungen, besonders die der genannten finnischen Terminfahrten 1928—1931, kombiniert mit früheren Kenntnissen über die Planktonverteilung, allgemeine Hydrographie und geographische Gestaltung des Ostseebeckens, führten zur Erkenntnis, daß ein selbständiger stofflicher Kreislauf Ostsee — Finnischer Meerbusen existiert: die in den Tiefenschichten der Ostsee angereicherten Nährsalze werden vom einwärts gerichteten Tiefenstrom in die innersten Teile und deren Randgebiete transportiert und hier zutage befördert, wo sie dann als Nahrungsunterlage der verschiedenen Generationsfolgen von lebenden Organismen dienen, beginnend mit einer im Frühling nach erfolgter Eisschmelze einsetzenden reichen Vegetation hauptsächlich von Kieselalgen. Der nach außen gerichtete Oberflächenstrom verfrachtet von hier alles lebende Material gegen die zentrale Ostsee, wo nach Beendigung des Lebenszyklus die Reste in die Tiefe sinken, wo unter Zersetzung und oxydativer Mineralisierung Nitrate und Phosphate gebildet werden, welche hier erneut ihren Kreislauf beginnen. Das Leben wird also zum Hauptteil von ein und demselben beständig kreisenden Nährsalzkapital aufrechterhalten. Von diesem Kreislauf ist der Bottnische Meerbusen zufolge der Schwellenwirkung der Ålandsinseln und des nördlichen Kvark abgeschnitten, durch

¹⁾ Nach einem Vortrag, gehalten in Kiel am 3. 12. 1941 auf Einladung des Instituts für Meereskunde der Universität.

welche die Einströmung von Tiefenwasser aus der Ostsee verhindert wird, was sich, verglichen mit dem Finnischen Meerbusen, in bedeutend kleineren Nährsalzmengen und entsprechend viel ärmerer Planktonproduktion zu erkennen gibt. Infolge einer ähnlichen Schwellenwirkung der Dänischen Inseln sind nach GESSNER auch die Gewässer der Bornholm- und Arkonasee durch Produktionsarmut gekennzeichnet. Von diesem Kreislaufe in weitem Maße unabhängig ist wahrscheinlich auch der in den Tiefenschichten des Bottnischen Meerbusens verhältnismäßig reichlich vertretene NH_3 -Stickstoff, welcher offenbar zum größten Teil den Zuflüssen des Festlandes entstammt. Gleichfalls vom Kreislauf weniger abhängig ist nach den Erfahrungen WATTENBERGS [15] und nach neuesten noch nicht veröffentlichten Untersuchungen des Verfassers die Kieselsäure.

II. Quantitative Beziehungen.

Die erwähnte Kenntnis des stofflichen Kreislaufes konnte an Hand des älteren Materials nur qualitativ sein. Es besteht aber naturgemäß das Bedürfnis, die Verhältnisse auch auf quantitativer Basis kennen zu lernen. Etwa folgende Fragen können gestellt werden: Wie groß sind die Nährsalzmengen, die von dem vorhandenen Kapital in der Tiefe der Ostsee jährlich zu Tage befördert und zur Bildung von lebender Substanz umgesetzt werden? In welcher Weise und mit was für einem Maß können sie gemessen werden? Hiermit verknüpft ist auch die Frage nach der quantitativen Beziehung der Nährsalzelemente zueinander und zu den übrigen die Lebewelt aufbauenden Grundstoffen. Kennen wir diese, so können wir auch die Hauptmasse der lebenden Substanz berechnen. Bei unseren Bemühungen, in diese Fragen einzudringen, sind wir indessen noch ziemlich am Beginn des Weges, und unser Bild wird wohl noch recht lange ein mehr oder weniger qualitatives Gepräge behalten. Im folgenden seien zunächst einige frühere Untersuchungen berührt, die bereits Versuche zur quantitativen Behandlung dieser Probleme enthalten.

Zuerst einige Worte über die schon genannten Untersuchungen von BUCH und GRIPENBERG bei Hangö, welche sich über ein Jahr erstreckten. Ende März bis Anfang April 1935 entstand hier eine enorme Diatomeenblüte von im Maximum 1,6 Millionen Zellen pro Liter unter gleichzeitigem Verbrauch eines Lagerbestandes an gelöstem Phosphor von 11 mg je m^3 , vermehrt um die mutmaßliche Zufuhr von etwa $5\text{--}6 \text{ mg}$ während der Vegetationsperiode, also insgesamt etwa $16\text{--}17 \text{ mg Phosphor je m}^3$ oder etwa $10\text{--}8 \text{ mg pro Zelle}$. Aller Phosphor war schon Anfang April verbraucht. Da aber die Vegetation bis in den Mai hinein fort dauerte, hatte allem Anschein nach derselbe Phosphor mehreren Generationen nacheinander als Nahrung gedient. Wie bekannt, kann organisch gebundener Phosphor in bedeutendem Maße durch Autolyse in Form von Phosphation freigelegt werden. Bei Beachtung dieses Umstandes ist der gefundene Phosphorverbrauch etwa von gleicher Größe wie ihn andere Forscher (ATKINS, SCHREIBER, BRAARUD und FOYN) z. T. an Kulturversuchen gefunden haben.

Infolge der außerordentlichen Verschiedenheit der Masse des Zellenkörpers verschiedener Arten ist man sich naturgemäß der Unzulänglichkeit, die Zellenzahl als Maß einer Produktionsgröße anzugeben, bewußt gewesen. Einen Fortschritt bedeutet der Versuch H. W. HARVEYS, als physiologisches Maß der produzierten Phytoplanktonmenge die in ihr enthaltene Chlorophyllmenge zu benutzen, beson-

ders nach Ausarbeitung einer brauchbaren Methode zu ihrer Bestimmung durch J. KREY. In größerem Ausmaß sind solche Bestimmungen noch nicht ausgeführt.

Am rationellsten wäre es naturgemäß, die Masse der lebenden Substanz pro Volumeneinheit Wasser in Gewichtsmaß angeben zu können oder die am Körperaufbau beteiligte Menge der einzelnen Grundstoffe zu bestimmen. Direkte analytische Methoden hierzu, die praktischen Wert besitzen, gibt es leider zur Zeit nicht. Statt dessen hat man bekanntlich einen Weg eingeschlagen, welcher auf dem Gedanken fußt, daß eine gewisse Produktionsmasse, welche aus den verschiedenen Elementen in bestimmten Verhältnissen aufgebaut ist, nach Vernichtung des Lebens und Abbau der Körpermasse diese Elemente in denselben Gewichtsverhältnissen als einfach gebaute mineralische Verbindungen dem Wasser in gelöster Form abgeben muß, und daß wir somit nur das Wasser zu analysieren hätten, um die Zusammensetzung der ehemals darin lebenden Substanz zu erfahren. Die Richtigkeit dieses Grundgedankens kann nicht abgeleugnet werden, es kommt nur darauf an, wie stark das Bild z. B. durch Vorgänge verschoben wird, wie sie WATTENBERG [15] in einer Arbeit von 1939 erwähnt, daß nämlich die verschiedenen Abbauprodukte mit verschiedenen Geschwindigkeiten freigelegt werden können und dann in räumlich verschiedenen Konzentrationen im Meer auftreten. Das zuverlässigste Bild würde erhalten werden, wenn in einem räumlich begrenzten Produktionsgebiet wie der Ostsee nur mit den Mittelwerten der Nährstoffkonzentrationen in der die Abbauprodukte aufnehmenden Tiefe des ganzen oder eines möglichst großen Gebietes gerechnet wird. Auf diesem Wege wurden zahlenmäßige, obgleich bis auf weiteres noch recht unsichere Beziehungen zwischen gewissen Grundstoffen gefunden, wie zwischen Phosphat und Nitrat, $P : N \sim 1 : 7$ (COOPER, WATTENBERG). WATTENBERG hat auch in den Ostseegewässern die Beziehung $P : Si$ untersucht, welche in verschiedenen Gebieten jedoch verschieden ist.

Mit denselben Gedanken vor Augen hat der Verf. einen Versuch gemacht, die Kohlen säureproduktions als Abbauprodukt des Kohlenstoffs der lebenden Substanz in der Tiefe der Ostsee zu berechnen, um sie einerseits dem Sauerstoffverbrauch, andererseits dem Phosphatgehalte gegenüberzustellen und so diese beiden Grundstoffe in Beziehung zum Kohlenstoff zu bringen. Ein kurzer Abriss dieser Besprechungen wird in den nächsten Abschnitten gegeben.

III. Kohlen säureüberschuß und Sauerstoffdefizit.

Als Material zu den unten angeführten Berechnungen dienten die bei den alljährlichen Terminfahrten des Meeresforschungsinstitutes in Helsingfors ausgeführten Bestimmungen des Sauerstoffgehaltes sowie von pH und der Titrationsalkalinität. Mit Hilfe der beiden letzten Faktoren kann bekanntlich das ganze Kohlen säuregleichgewichtssystem berechnet werden. Für den vorliegenden Zweck sind die Totalkohlensäure und die CO_2 -Tension die wichtigsten Konstituenten. Die erste Größe ist zusammengesetzt aus den natürlichen Karbonaten und Bikarbonaten des Meerwassers sowie aus der durch Oxydation des organischen Kohlenstoffs entstandenen Kohlen säure. Jede, auch die kleinste Menge CO_2 , welche in irgendeiner Weise hinzukommt, verteilt sich dem Massenwirkungsgesetze gemäß sofort auf alle Konstituenten. Wir wollen den gefundenen Totalkohlensäure-

gehalt in der Tiefe auf einen Totkohlensäuregehalt beziehen, er sei Normalgehalt genannt, der vorhanden wäre, wenn keine Oxydationsvorgänge stattgefunden hätten. Die Differenz dieser beiden Werte wäre die durch Oxydation gebildete Kohlensäure. Als Normalgehalt wird in Analogie mit der gebräuchlichen Art, die Sauerstoffzehrung in Prozenten auszudrücken, derjenige Totalkohlensäuregehalt bezeichnet, welcher im Wasser von gleicher Temperatur und

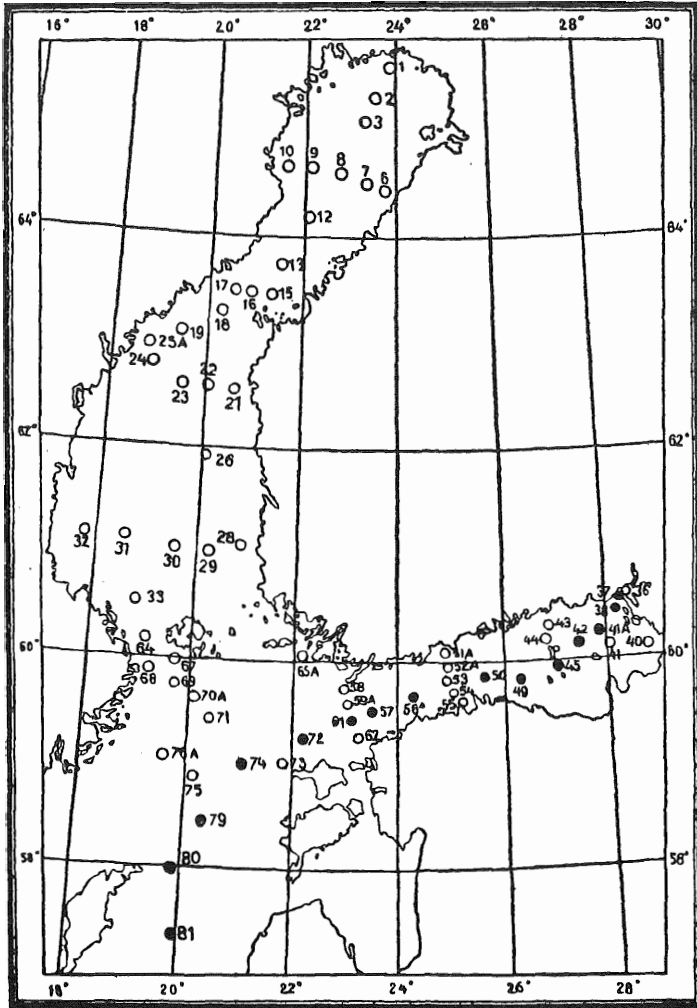


Abb. 1. Beobachtungsstationen der Finnländischen Terminfahrten.

Salinität vorhanden wäre, wenn das Wasser im Gleichgewicht mit der Atmosphäre, also mit Luft von einem CO_2 -Gehalt von 3,1 Teilen auf 10 000 Teile Luft wäre.

Die Differenz des aus pH und Titrationsalkalinität *in situ* berechneten und dem „Normalwert“ sei als CO_2 -Zuwachs oder -Überschuß ΔCO_2 bezeichnet²⁾. Eine Stütze für die Berechtigung solch einer Art der Berechnung wurde durch Vergleich mit entsprechenden Sauerstoffzahlen gefunden, die auch als Differenzen ΔO_2 statt wie üblich in Prozenten ausgedrückt wurden. Wenn im Wasser die Respirationstätigkeit die Assimilationstätigkeit überwiegt, entsteht bekanntlich ein CO_2 -Überschuß und ein Sauerstoffdefizit. Herrscht Assimilationsübergewicht, so ist es umgekehrt. Im Normalzustande, also bei Gleichgewicht mit der Atmosphäre, sollten beide Differenzen definitionsgemäß den Betrag Null annehmen und für kleinere Abweichungen beiderseitig von Null die algebraische Summe auch gleich Null sein. Eine vorgenommene Addition sämtlicher Werte des benutzten analytischen Materials in der Oberflächenschicht ergab einen mittleren Wert von $\Delta\text{O}_2 - \Delta\text{CO}_2 = 0,01 \text{ mMol/L}$ mit einer Fehlerbreite von $\pm 0,014$. Der Betrag $0,01 \text{ mMol/L}$ wäre also der systematische Fehler, der entweder in der Kohlensäure, dem Sauerstoff oder in beiden liegen kann; er verkleinert sich noch etwas infolge des Umstandes, daß das Sauerstoffdefizit theoretisch stets größer als der CO_2 -Zuwachs sein muß, da der respiratorische Quotient im Meere < 1 ist.

Von den genannten Terminfahrten wurde nun das Material von neun Fahrten, nämlich 1927—1935 gewählt, welche alle im Hochsommer (Juli—August) stattfanden. Die späteren Fahrten waren zu anderen Zeiten ausgeführt. Ein Jahr fiel aus. Die älteren vor 1927 wurden als weniger exakt nicht bewertet. Das angewandte Material wurde vollständig neu gerichtet, sämtliche pH-Bestimmungen wurden umgerechnet, indem sie mit neuerdings elektrometrisch bestimmten Korrekturen versehen wurden (vgl. BUCH und NYNÄS [6]). Mit den so erhaltenen Werten wurden sowohl CO_2 -Tensionen, Totalkohlensäuregehalte, Normalgehalte sowie auch Sauerstoffdefizitzahlen berechnet und von allen Bestimmungen die 9-Jahres-Mittel gebildet.

Von diesem Material sei einiges herausgegriffen. Eine ausführliche Darstellung an dem ganzen Material folgt an anderer Stelle. Zuerst zur Orientierung ein Profilbild einer typischen Ostseestation (Abb. 2). Alle übrigen sind dieser sehr ähnlich. Es ist die Station F 80 am Nordende von Gotland. Die Lage derselben und aller übrigen Stationen geht aus der Karte (Abb. 1) hervor.

Für die Temperatur typisch und allen Ostseehydrographen wohlbekannt ist das Minimum bei etwa 60 m und von da an abwärts ein schwacher Anstieg mit praktischer Konstanz in der ganzen Tiefenschicht. Der Salzgehalt nimmt anfangs bis 60 m nur schwach zu. Von da abwärts folgt die Sprungschicht, nach welcher der Salzgehalt jedoch ohne deutliche Diskontinuität — man könnte fast sagen asymptotisch — gegen einen Tiefenwert ansteigt. Ausgeprägter als bei diesen Größen gibt sich die Sprungschicht bei den Kohlensäurefaktoren pH, Kohlensäuretenston, pCO_2 und ΔCO_2 zu erkennen. Dasselbe sehen wir am Sauerstoffdefizit. Leider besitzen wir hier keine Analysenwerte zwischen 50 und 100 m. Der Verlauf in der Sprungschicht ist deshalb unsicher angedeutet. Aus der vertikalen Verteilung von ΔO_2 und ΔCO_2 ersieht man übrigens, daß diese beiden Größen nicht ganz genau äquivalent sind, wie man erwarten sollte, sondern daß der Sauerstoffver-

²⁾ Vgl. hierüber auch die Ausführungen von BR. SCHULZ [13] und H. WATTENBERG [16].

braucht etwas größer ist als der Kohlensäurezuwachs. Auf diese Frage kommen wir noch zurück.

Es ist übrigens bemerkenswert, daß man eine wohldefinierte Kurve mit geringe Streuung erhält, wenn man sämtliche pH- und ΔCO_2 -Werte unabhängig von

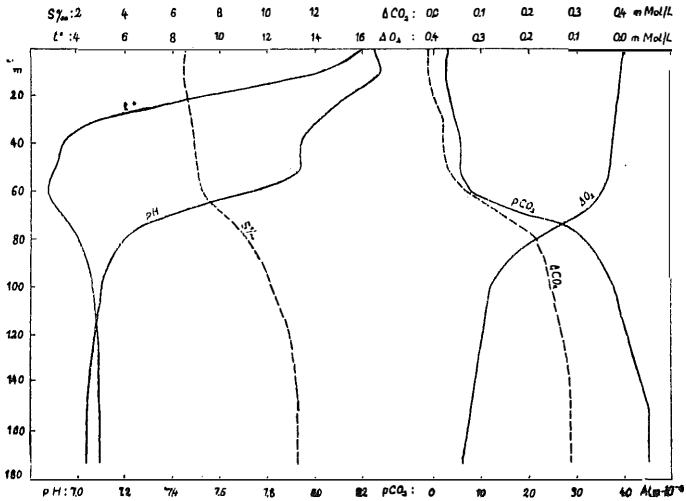


Abb. 2. Vertikale Verteilung von Temperatur (t°), Salzgehalt ($S\text{‰}$), Wasserstoffionenkonzentration (pH), Kohlensäuretennung ($p\text{CO}_2$), Sauerstoffdefizit (ΔO_2) und Kohlensäureüberschuß (ΔCOb_2) an Stat. F 80 (Mittel 1927—1935).

Ort und Tiefe gegeneinander aufrägt (Abb. 3). Man kann somit — für unser Gebiet — den Kohlensäurezuwachs einfach unmittelbar aus dieser Kurve entnehmen, wenn man pH kennt, und ist der umständlichen Berechnung enthoben. In Wirklichkeit ist die Beziehung ja sehr kompliziert. Als Variablen treten sämtlich mit Salzgehalt und Temperatur veränderliche Konstanten auf. Deshalb ist die Kurve natürlich nur für das begrenzte Salzgehaltgebiet der Ostsee bis wenig unter 5‰ und bei niedrigen Temperaturen gültig.

Die Vertikalkurven für die Kohlensäuretennung ($p\text{CO}_2$) und den Totalkohlensäure-Zuwachs (ΔCO_2) haben einen fast gleichartigen Verlauf. Zwischen ihnen besteht also in diesem Fall eine fast lineare Beziehung.

Nun wollen wir das Verhalten des CO_2 -Zuwachses von der Ostsee bis hinein in die innersten Teile des Finnischen Meerbusens verfolgen. Zu dem Zwecke wurde für einige in etwa gleicher Entfernung voneinander liegende Stationen die vertikale Verteilung des CO_2 -Überschusses gezeichnet, und zwar nicht nur, wie in Abb. 3, lediglich die der Mittelwerte, sondern für sämtliche einzelne Stationen aller neun Jahre. So können wir uns auch eine Vorstellung über die jährlichen Variationen machen (Abb. 4). Die Lage der Stationen geht aus Abb. 1 hervor. Der prinzipielle Verlauf ist, wie wir sehen, in jedem Jahr der gleiche. Die Streuung ist für alle Punkte etwa gleich mit Ausnahme der Station

F 81, wo zwei Jahre, 1934 und 1935, mit besonders kleinen Tiefenwerten 0,15 bzw. 0,16 mMol/L eine etwas größere Variationsbreite als bei den anderen Stationen veranlassen, nämlich zwischen den Grenzen 0,15 und 0,32. Diese Variation bekundet sich, obgleich nicht so stark ausgeprägt, auch in den entsprechenden Sauerstoffzahlen. Es ist anzunehmen, daß die stärkere Variabilität an dieser Station

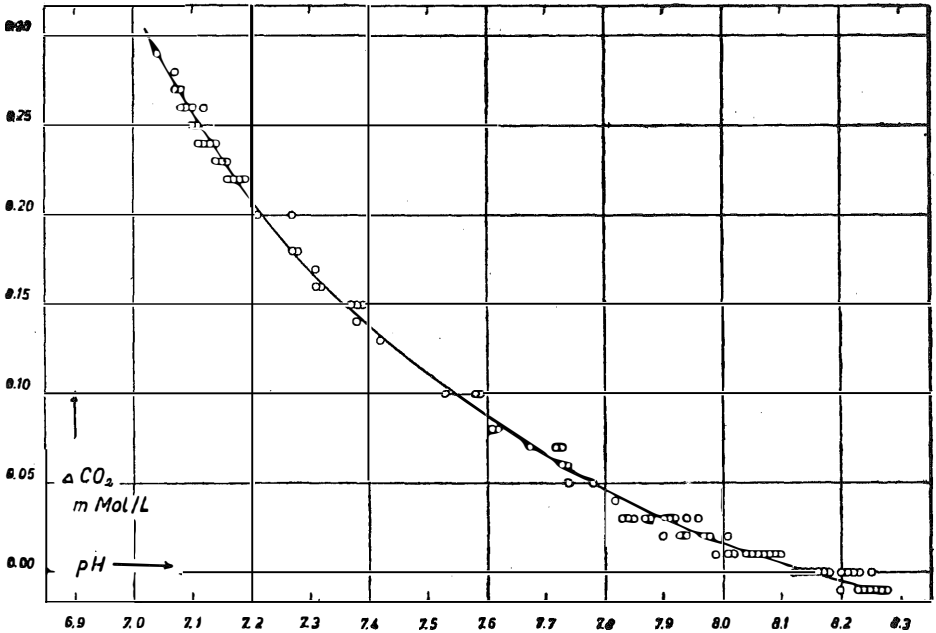


Abb. 3. Beziehungen zwischen pH und ΔCO_2 im Tiefenwasser der Ostsee und des Finnischen Meerbusens.

durch ihre Lage in der Nähe der etwas über 60 m tiefen Schwelle zwischen der Bornholm- und der Gotlandmulde bedingt ist, wo das über die Schwelle absinkende frische Wasser nicht immer Zeit gefunden hat, den vollständigen „Alterszustand“ zu erreichen. Auch meteorologische Verhältnisse mehr südlich können die Richtung des herabsinkenden Wassers beeinflussen haben.

Weiter zeigen die Profile folgendes: 1. Die Sprungschicht liegt in der Ostsee und den äußeren Stationen des Finnischen Meerbusens etwa zwischen 60 und 80 m. Die obere, thermische Sprungschicht kommt hier nicht zum Vorschein. 2. Unterhalb der Sprungschicht folgt eine fast unveränderliche Tiefenschicht mit ΔCO_2 im Mittel = 0,26 mMol/L. 3. Weiter einwärts im Finnischen Meerbusen setzt die Sprungschicht nach innen zu in immer höherem Niveau ein, in der Wiborger Bucht fast schon von der Oberfläche beginnend, eine deutliche Illustration des Auftriebs.

Vielleicht noch deutlicher werden diese Tatsachen aus den Mittelwerten ersichtlich (Tab. 1). Der obere Teil enthält die 9-Jahres-Mittel der CO₂-Überschüsse, der untere die entsprechend abgerundeten Salzgehalte für sämtliche in einer Linie liegende Stationen von Gotland bis Wiborg in 20 m Tiefenintervallen; in Abb. 5 ist die vertikale Verteilung von ΔCO₂ und S[‰] wiedergegeben. Besonders auffällig bei den ersteren ist die praktisch absolut horizontale Schichtung von Gotland bis Hogland (Station 42). Erst von da an einwärts gibt sich der Auftrieb zu erkennen. Der konstante Tiefenwert wird bei etwas über 80 m erreicht. Eine kleine Tendenz zur Zunahme der Tiefenwerte nach dem östlichen Teil ist zu erkennen. Im wesentlichen die gleiche Schichtung zeigen auch die Salzgehalte an, im Anfang der Sprungschicht bei 60 m z. B. mit fast genau gleichem Salzgehalt bei Gotland und Hogland. Die horizontale Schichtung geht praktisch durch alle Stationen. Der Auftrieb ist an den Salzgehalten nur daran zu erkennen, daß dieselben in den inneren Teilen erhöht sind im Verhältnis zu denen, die zu erwar-

Tabelle 1

Vertikale Verteilung von Kohlenensäureüberschuß (mMol/L × 100) und Salzgehalt vom Gotlandbecken bis zum Inneren Finnischen Meerbusen. Mittel über die Jahre 1927 bis 1935

(Lage der Stationen in Abb. 1)

Stat.	Kohlenensäure-Überschuß mMol/L × 100														
	81	80	79	74	72	61	57	56	50	49	45	42	41A	38	37
m															
0	—1	—1	—1	—1	0	0	0	0	—1	—1	—2	—1	—1	1	2
90	1	0	0	0	0	1	1	1	2	2	1	2	5	11	11
40	2	2	2	2	3	4	3	3	6	7	9	11	16		
60	6	7	7	8	7	10	10	12	15	16	16	18			
80	22	22	24	24	22	24	24	25	23	26					
100	23	25	24	25	27	25									
125	24	28	—	25											
150	26	29	—	26											
175	26	29													
200	25														
	Salzgehalt ‰														
0	6,8	6,7	6,4	6,3	6,2	5,8	5,7	5,5	4,6	4,3	4,2	3,8	3,4	2,9	2,8
20	7,0	6,7	6,6	6,6	6,6	6,3	6,2	6,1	5,4	5,0	4,7	4,7	4,7	4,6	4,4
40	7,1	7,0	6,9	6,9	6,9	6,8	6,7	6,7	6,4	6,4	6,2	6,1	6,4		
60	7,3	7,3	7,3	7,3	7,2	7,5	7,4	7,5	7,6	7,7	7,3	7,0			
80	9,1	9,2	9,4	9,3	9,0	9,1	9,2	9,4	8,7	8,5					
100	10,3	10,3	10,1	10,0	9,9	9,7									
125	11,1	11,0	—	10,3											
150	11,6	11,3	—	10,5											
175	11,7	11,4													
200	11,4														

ten wären, wenn kein Auftrieb stattfände. In der Wiborger Bucht z. B. wäre der Salzgehalt in diesem Falle praktisch Null infolge Aussüßung.

Zugleich mit dem Aufsteigen von Kohlensäure geht natürlich auch der vertikale Transport der Nährsalze vor sich. Besonders fördernd wirkt hier, wie schon erwähnt, die herbstliche Konvektion.

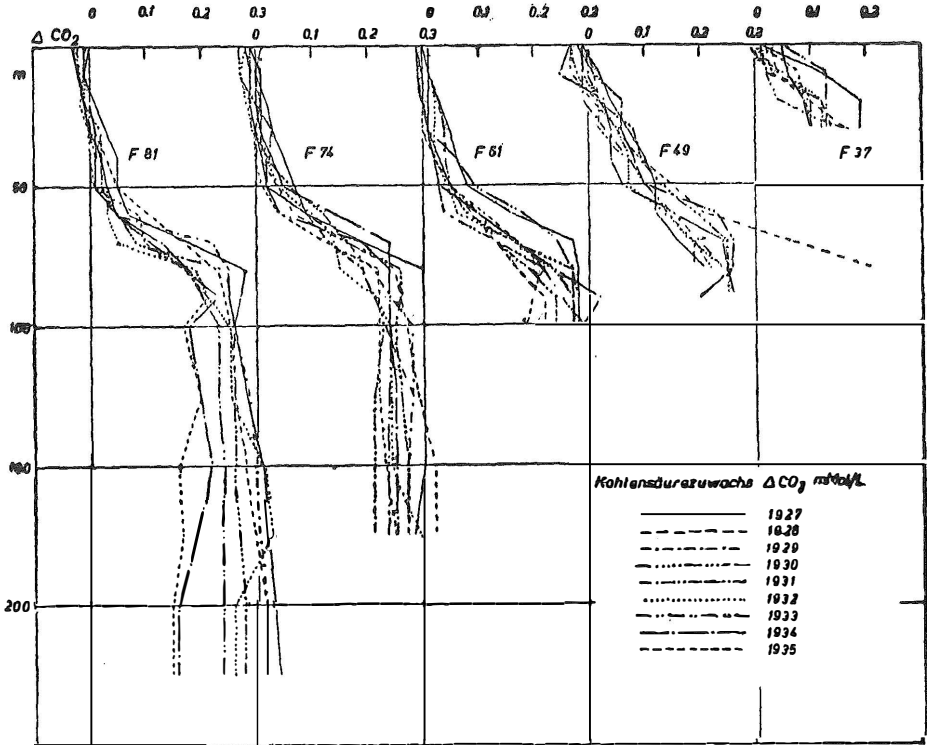


Abb. 4. Vertikale Verteilung von ΔCO_2 an Stationen der Ostsee und des Finnischen Meerbusens 1927—1935.

Der Haupteindruck der betrachteten Verhältnisse ist, daß die Tiefenschicht der Ostsee einen mächtigen, scharf abgegrenzten Block darstellt, dessen Zusammensetzung in vertikaler und horizontaler Richtung sehr wenig veränderlich ist. Für den Kohlensäureüberschuß können wir für das ganze Gebiet den schon angeführten mittleren Gehalt von 0,26 mMol angeben, wenn wir die konstante Schicht von 90 m abwärts rechnen.

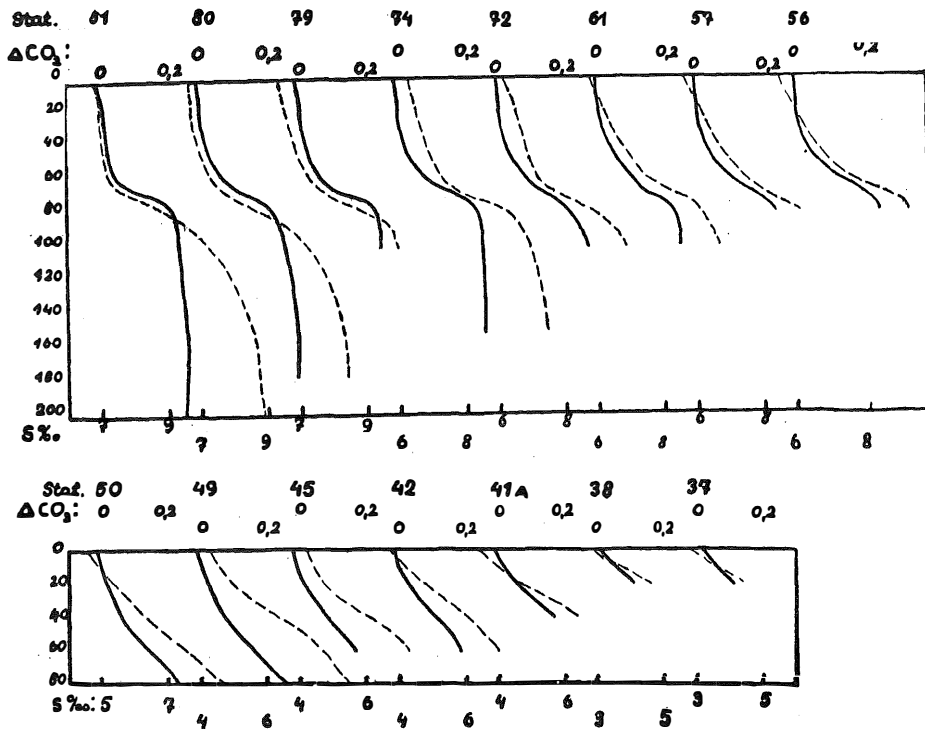


Abb. 5. Vertikale Verteilung von Kohlensäureüberschuß (ΔCO_2 feste Linien) und Salzgehalt (S‰ gestrichelte Linien) vom Gotlandbecken bis zum Finnischen Meerbusen. Mittel 1927—1935. Lage der Stationen vgl. Abb. 1.

IV. Kohlensäureumwandlungsfaktor und Respiratorischer Quotient.

Die Sauerstoffdefizitzahlen entsprechen den Kohlensäureüberschußzahlen, wie schon erwähnt, bemerkenswert gut. Zwar ist der Sauerstoffverbrauch etwas größer als die Kohlensäureproduktion, aber das Verhältnis der beiden Zahlen $\Delta CO_2 / \Delta O_2$ ist in der Tiefe konstant. Der Mittelwert des gesamten Materials ist 0,83 (Minimum 0,75, Maximum 0,90 mit einer einzigen Ausnahme von 0,96). Solch eine Verhältniszahl hat seinerzeit schon BR. SCHULZ berechnet und für sie die Benennung „Sauerstoffumwandlungsfaktor“ vorgeschlagen. Seine Werte waren als Einzelbeobachtungen naturgemäß mehr gestreut. Wir operieren ja hier mit einem aus fertigen Mittelwerten bestehendem Material. Außerdem hat sich die Analysetechnik verbessert. Sein Wert war etwas höher als 0,9. Auch H. WATTENBERG [16] hat Umwandlungsfaktoren aus dem umfangreichen Sauerstoff- und Kohlensäurematerial der Deutschen Atlantischen Expedition 1925—1927 berechnet.

Der Kohlensäureumwandlungsfaktor steht in naher Beziehung zum physiologischen Begriff „Respiratorischer Quotient“, welcher das Volumenverhältnis von abgegebenem Kohlendioxyd und verbrauchtem Sauerstoff angibt. Für Kohlehydrate ist dieser RQ = 1,0, Fette = 0,71, Eiweiß etwa 0,80. Da RQ sich eigentlich auf Verbrennungsprozesse im Zusammenhang mit der Atmungstätigkeit bezieht, wir im Meere aber auch sehr wesentlich mit Zersetzungsprozessen toten Materials zu rechnen haben, hat man RQ hier etwas anders bewertet, obgleich der prinzipielle Unterschied letzten Endes nicht so groß ist, denn das tote organische Material ist ja eigentlich nur Nahrung für die Bakterien und die durch Zersetzung der organischen Substanz entstandene Kohlensäure und der dazu verwendete Sauerstoff registrieren den Stoffwechsel dieser Organismen. Für die Eiweiß-Stoffe müssen wir bei der Zersetzung mit einer vollständigen Oxydation rechnen, also z. B. auch des NHs-Stickstoffes zu NOs' und des Phosphors zu PO4'". Bei dieser Art der Verbrennung ergäbe sich als Verhältnis produziertes CO₂ / verbrauchter O₂ ~ 0,50. Die im Meer gefundene hohe Zahl 0,83 deutet auf ein sehr starkes Überwiegen in der organischen Substanz von Stoffen mit Kohlehydratzusammensetzung, was auch SCHULZ betont hat.

V. Berechnung einer Relationszahl Kohlenstoff-Phosphor.

Wir können nun weiter fragen, in wie weit es möglich ist, den als CO₂ an das Wasser abgegebenen Kohlenstoff außer mit Sauerstoff auch mit anderen biologisch wichtigen Grundstoffen, z. B. Stickstoff und Phosphor, in zahlenmäßige Beziehung zu bringen. Der Stickstoff mußte leider fallen gelassen werden wegen der Unzuverlässigkeit der Analysenzahlen, die nur qualitativ verwertbar sind. Die Methodik bedarf noch stark der Verbesserung. Der Phosphor bietet die erwähnte Schwierigkeit, daß ein Gradient bis zur größten Tiefe vorhanden ist, während der CO₂-Überschuß in der Tiefe nahezu konstant ist. Wir können immerhin mit einem Mittelwert für die Tiefen des ganzen Ostseebeckens eine Versuchsberechnung ausführen. Das vorhandene Phosphormaterial umfaßt die vier Jahre 1928, 1929, 1930 und 1931. Entsprechend wäre das CO₂-Material derselben Jahre zu entnehmen. Auf Station 80 und 81 wurde pH aber nur in dreien dieser Jahre bestimmt. Durch Vergleich der 3-Jahres- und 4-Jahres-Mittel der übrigen Stationen miteinander wurde indessen ein zuverlässiger 4-Jahres-Wert für CO₂ auch dieser Stationen ermittelt. Er fiel übrigens mit dem 9-Jahres-Wert zusammen. Als mittlerer Phosphorgehalt von 100 m abwärts in der Ostsee errechnete sich der Wert 48 mg/m³. Da der CO₂-Zuwachs 0,26 mMol/L oder $0,26 \times 12 \times 1000 = 3120$ mg C/m³ betrug, so folgt für das Verhältnis

$$C : P = 3120 : 48 = 65 : 1.$$

WATTENBERG fand 1939 in den großen Tiefen der Gotlandmulde 40 mg/m³ Phosphor. Aus der Sauerstoffsättigung von 20 % in dieser Tiefe können wir indirekt den CO₂-Zuwachs ermitteln (pH wurde nicht gemessen). Nach den vorliegenden Erfahrungen in der Ostsee entspricht 20 % O₂ ein pH zwischen 7,10 und 7,20. Der pH-CO₂-Kurve in Abb. 3 entnehmen wir für pH = 7,15 einen CO₂-Zuwachs von 0,23 mMol/L, der somit $0,23 \times 12 \times 1000 = 2760$ mg C/m³ entspricht. Dann wird

$$C : P = 2760 : 40 = 69 : 1.$$

Man kann diese Berechnung auch mit Hilfe des Respiratorischen Quotienten durchführen. Das Sauerstoffdefizit bei 20 % Sättigung war 6,7 cm³/L. Für RQ =

0,83 wird dann $\text{CO}_2 = 0,83 \times 6,7/22,4 = 0,248 \text{ m Mol}$ oder 2980 mg C/m^3 . Daraus folgt

$$\text{C} : \text{P} = 2980 : 40 = 74 : 1.$$

Die Werte erscheinen jedenfalls plausibel. Man rechnet ja mit $\text{C} : \text{N} \sim 10 : 1$, $\text{N} : \text{P} \sim 7 : 1$, also $\text{C} : \text{P} = 70 : 1$.

Mit Hilfe der Relationszahl C/P könnten wir aus dem zum Aufbau verbrauchten Phosphor, z. B. bei Hangö im Mai 1935 16 mg/m^3 , den zum Aufbau der Diatomeen nötigen Kohlenstoff angeben: $65 \cdot 16 = 1040 \text{ mg/m}^3$ oder rund 1 g/m^3 . Dieser Kohlenstoff als Kohlehydrat berechnet ergäbe $\frac{162}{72} \cdot 1040 = 2,3 \text{ g/m}^3$ Trok-

kensubstanz Kohlehydrat. Die Kartoffel enthält 25% Trockensubstanz. Als Kartoffel gerechnet hätten wir dann etwa 9 g/m^3 . Pro 1 ha Fläche mit einer 20 m mächtigen Assimilationsschicht gerechnet ergäbe sich eine als Kartoffel gerechnete Ernte von 1800 kg/ha , mit welcher ein Landwirt allerdings kaum zufrieden wäre.

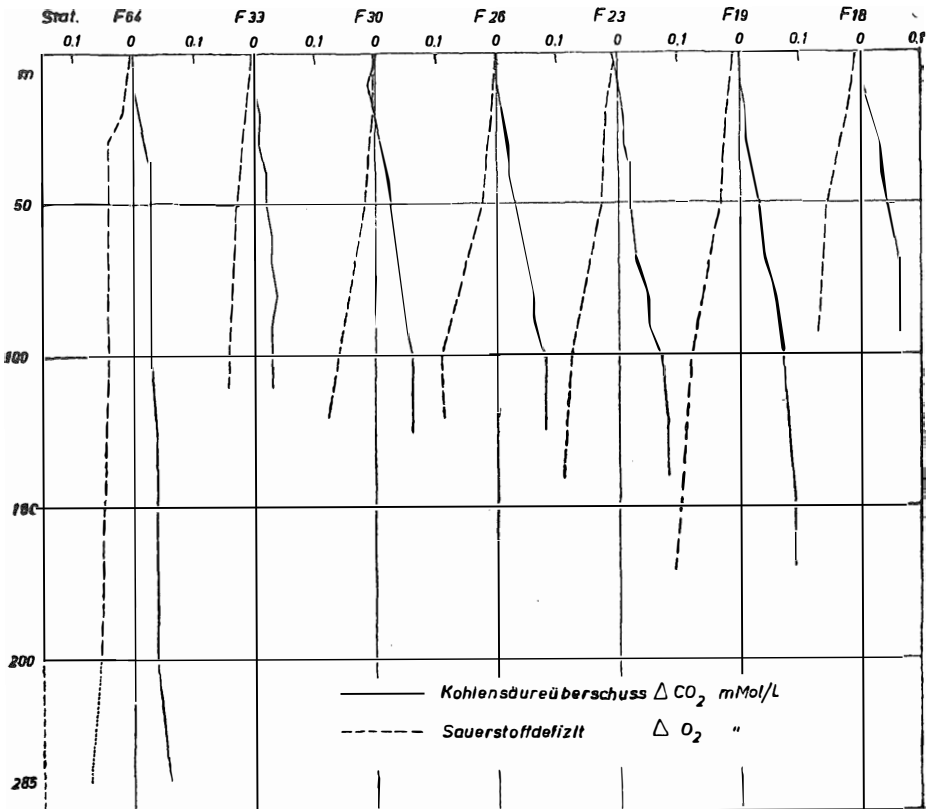


Abb. 6. Vertikale Verteilung von Sauerstoffdefizit (vom Nullpunkt nach links) und Kohlensäureüberschuss (nach rechts) an Stationen der Bottensee. Mittel 1927—1935.

VI. Der Bottnische Meerbusen.

Neben der Ostsee im engeren Sinne verdient der Bottnische Meerbusen eine besondere Besprechung. Wir können dies an Hand der folgenden Sauerstoffdefizit- und ΔCO_2 -Profile von der Tiefenrinne zwischen Åland und Schweden (Station 64) bis zum nördlichen Kvarnön (Abb. 6). Auffällig sind hier die überaus niedrigen Werte in der Tiefe. In der Ostsee fanden wir ja $\Delta\text{CO}_2 \sim 0,26$ m Mol/L, hier als Höchstwert 0,09, im Mittel etwa 0,08. Das Sauerstoffdefizit ist hier im Mittel etwa 0,09, RQ also etwa 0,9, natürlich ein sehr unsicherer Wert.

Fragen wir nach der Ursache dieses geringen Oxydationsumsatzes, obgleich das sich langsam dem Boden entlang bewegende Wasser wenigstens eben so viel Zeit zum „Altern“ gehabt hat wie etwa Station 81 in der Ostsee, so müssen wir sie natürlich in der außerordentlichen Armut an Phosphor suchen, die wie erwähnt eine Folge der Abriegelung vom nährstoffreichen Tiefenwasser der Ostsee war. Wir sehen hier also in anderer Weise die Schwellenwirkung und die daraus folgende Produktionsarmut des Bottnischen Meerbusens illustriert. Auch hier können wir die Beziehung C/P schätzen. Phosphoranalysen in genügender Anzahl wurden indessen nur in einem Jahr, 1931, ausgeführt. Der mittlere P-Wert für die Tiefe in diesem Jahr betrug 15,8 mg/m³, $\Delta\text{CO}_2 = 0,08$, also

$$C/P = \frac{0,08 \cdot 12 \cdot 1000}{15,8} = \frac{61}{1}$$

in Anbetracht der Unsicherheit der Zahlen genügend übereinstimmend mit der Ostsee.

Es ist nicht möglich, die Umsatzmengen aller an der Produktion beteiligten Grundstoffe durch Analyse der im Wasser frei gelösten Mengen zu ermitteln. Grundsätzlich ist dies Verfahren eigentlich ja nur möglich für die Minimumstoffe, von denen wir annehmen, daß sie mit der ganzen im Meere vorhandenen Menge an der Produktion teilnehmen. Die Berechnung des Kohlenstoffs geschah gewissermaßen durch einen Kunstgriff, der die Aufteilung desselben in „mineralischen“ und biochemisch beteiligten erlaubte. Daß die Verhältniszahl C : P = 70 : 1 der Ostseetiefe ungefähr den auch anderwärts gewonnenen entspricht, kann umgekehrt vielleicht als Stütze dafür dienen, daß aller Phosphor der Ostseetiefe am Kreislauf wirklich biochemisch beteiligt ist. Vielleicht kann man dem Nitratstickstoffgehalt der Tiefe ähnlichen Wert beimessen, sicherlich aber nicht dem NH₃ und dem Si. Um den Stoffumsatz der Kieselsäure sowie anderer Elemente wie Schwefel, Jod und Eisen zu verfolgen, müßten neben den im Meerwasser gelösten Mengen auch ihre im Plankton verkörperten Mengen durch unmittelbare chemische Analyse ermittelt werden.

Literaturverzeichnis

1. ATKINS, W. R. G., The Phosphate Content of fresh and salt waters in its relationship to the Growth of the Algal Plankton Journ. Marine Biol. Assoc. XIII, 119—150 (1923) und weitere Arbeiten in derselben Zeitschrift.
2. BRAARUD, T. u. FOYEN, BIRGITHE, Beiträge zur Kenntnis des Stoffwechsels im Meere. Avh. utg. av det Norske Vidensk.-Akad. i. Oslo. I. Matem.-naturvid. Kl. No. 14 (1930).
3. BRANDT, K., Über den Stoffwechsel im Meere. Wissensch. Meeresunters. Kiel Bd. 4 (1899); 2 Abhandlungen *ibid.* Bd. 6 (1901).
4. BUCH, K., Unters. über gelöste Phosphate und Stickstoffverbindungen in den Nordbaltischen Meeresgebieten. Havsforskningsinstitutets Skrift No. 86, Helsingfors 1932.

5. BUCH, K. u. GRIPENBERG, STINA, Jahreszeitlicher Verlauf der chemischen und biologischen Faktoren im Meerwasser bei Hangö im Jahre 1935. Havsforsk. Inst. Skrift. No. 18, Helsingfors 1938.
6. BUCH, K. u. NYNÄS, O., Studien über neue pH-Methodik usw. Acta Acad. Aboensis, Math et Phys. XII, 3. Abo 1939.
7. COOPER, L. H. N., On the ratio of nitrogen to phosphorus in the Sea. Journ. Mar. Biol. Ass Bd. XXII, S. 177—182 (1937) und Bd. XXIII, S. 179 (1938).
8. GESSNER, F., Nitrat, Phosphat und Planktongehalt im Arkona-Becken. Journ. d. Cons. perm intern. p. l'exploration de la mer Bd. VIII, S. 181—194 (1933).
9. HARVEY, H. W., Measurement of Phytoplankton. Journ. Mar. Biol. Assoc. Plymouth, Vol. XIX (1934).
10. KALLE, K., Phosphatgehaltsunters. in der Nord- und Ostsee im Jahre 1931. Ann. d. Hydrographie usw. 1932, S. 5—17.
11. KREY, J., Die Bestimmung des Chlorophylls in Meerwasserschöpfproben. Journ. du conseil perm. internat. p. l'explor. de la mer Vol. XIV, Nr. 2, S. 201—209 (1939).
12. SCHREIBER, E., Die Reinkultur von marinen Phytoplankton und deren Bedeutung für die Erforschung der Produktionsfähigkeit des Meerwassers. Wissensch. Meeresunters. Helgoland XVI, Abh. Nr. 10 (1927).
13. SCHULZ, B., Hydrographische Untersuchungen besonders über den Durchlüftungszustand in der Ostsee im Jahre 1922. Aus dem Archiv der Deutschen Seewarte XLI. Jahrg. 1923.
14. WATTENBERG, H. u. MEYER, HELGA, Der jahreszeitliche Gang des Gehaltes des Meerwassers an Planktonnährstoffen in der Kieler Bucht im Jahre 1935. Kieler Meeresforschungen Bd. I, S. 264—278 (1936).
15. WATTENBERG, H., Der hydrographisch-chemische Zustand der Ostsee im Sommer 1939. Ann. d Hydrographie usw. 1940, S. 185—194.
16. WATTENBERG, H., Die Verteilung des Sauerstoffs und des Phosphats im Atlantischen Ozean. Wissensch. Ergebn. d. Deutschen Atl. Exped. auf dem Forschungsschiff „Meteor“ 1925—1927. Bd. IX. S. 65. Berlin 1938.