

NÄHRSTOFFPROBLEME DER OSTSEE

Sebastian A. Gerlach

Einleitung

Jedes Schulkind hat inzwischen gelernt, daß alle Menschen, die um die Ostsee herum wohnen, sich gewaltig anstrengen müssen, damit die Ostsee gerettet wird. Die Regierungen der Ostseestaaten diskutieren die notwendigen Kläranlagen und was das kosten wird. Es geht darum, ob man durch vielfältige Umweltschutzmaßnahmen erreichen kann, daß die Ostsee wieder so wird, wie sie in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts war.

Unter Ostsee verstehe ich bei diesem Vortrag nicht etwa die Kieler oder die Mecklenburger Bucht, sondern die Zentrale Ostsee, englisch "The Baltic proper". Sie beginnt östlich von der Darßer Schwelle (Abb. 1). Ich behandle in diesem Vortrag nur die offene Ostsee und gehe nicht auf die Probleme der Küstengewässer ein. In erster Linie zitiere ich Meßwerte aus dem Gotlandtief, dem mehr als 200 Meter tiefen Becken, das östlich von der Insel Gotland liegt. Ich fuße vor allem auf Ergebnissen der von der Helsinki-Kommission veranlaßten zweiten Bewertung der Ostsee-Meßwerte, bei der ich als Vorsitzender mitwirkte (Gerlach, 1990 a).

Ich beginne diesen Vortrag mit einer Schilderung der Ostseeverhältnisse, so wie sie vermutlich in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts waren.

Die Ostsee in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts

Die oligotrophe Ostsee

Damals war das Wasser in der Ostsee klarer als heute. Nicht selten konnte man den Meeresboden auch noch in 10 - 13 Meter Tiefe erkennen (Abb. 2). Das hängt mit der geringen Planktondichte zusammen. Das Volumen der Planktonorganismen betrug damals nur 0,1 - 0,2 Milliliter pro Kubikmeter

Wasser. Bis Ende der sechziger Jahre vermehrte sich die Planktonmenge auf 0,2 bis 0,5 Milliliter pro Kubikmeter, schreibt P. Hupfer 1981 (S. 133) in dem Bändchen "Die Ostsee - kleines Meer mit großen Problemen". Er macht allerdings keine Angaben, woher diese Daten stammen. Wegen der höheren Planktondichte ist jetzt das Wasser der Ostsee viel trüber. Seit den siebziger Jahren beträgt die Sichttiefe meistens nur noch 5 - 7 Meter (Launiainen und Vihma, 1990).

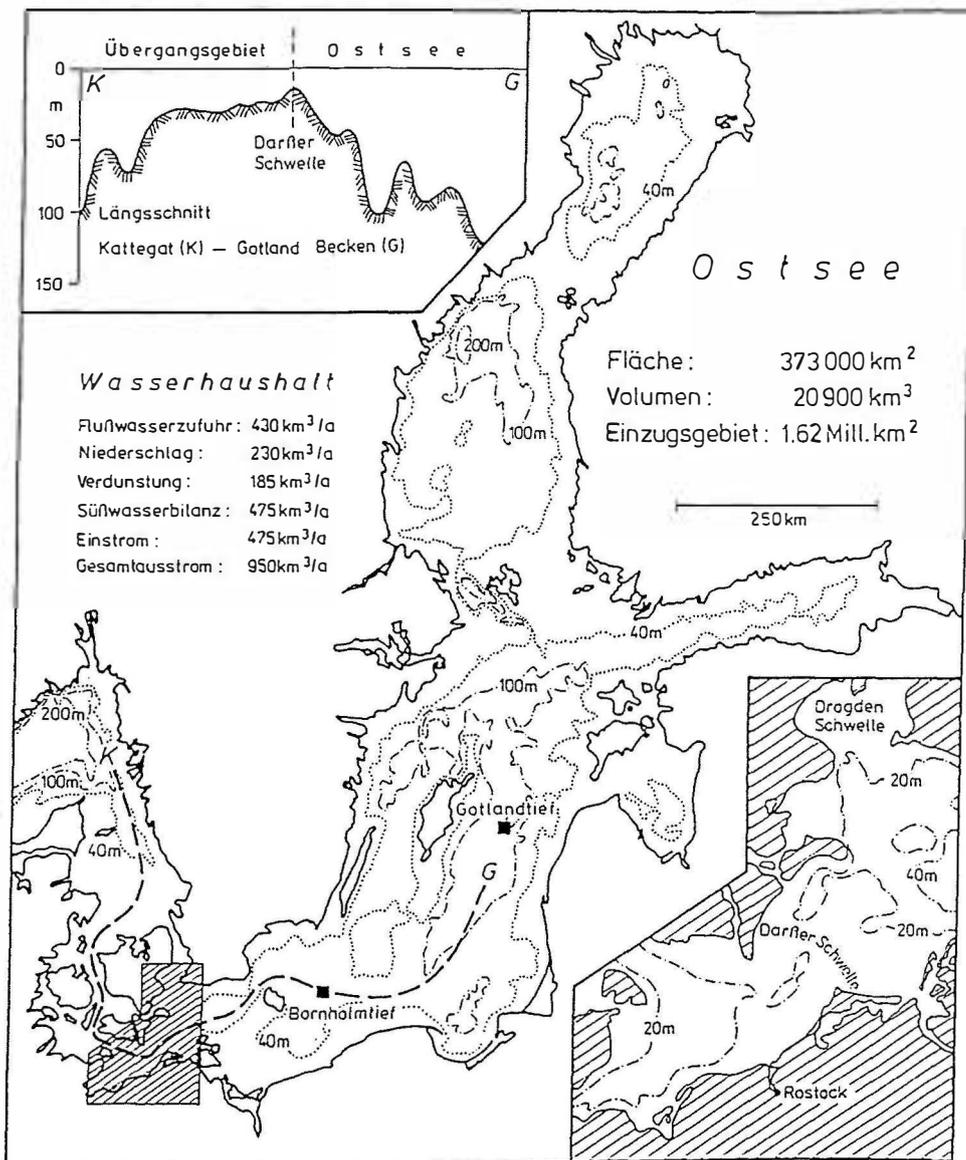


Abb. 1 Wassertiefen in der Ostsee und im Gebiet der Darßer Schwellen, sowie Angaben über die Süßwasserbilanz und den Wasseraustausch zwischen Beltsee und Ostsee. Aus Matthäus, 1992.

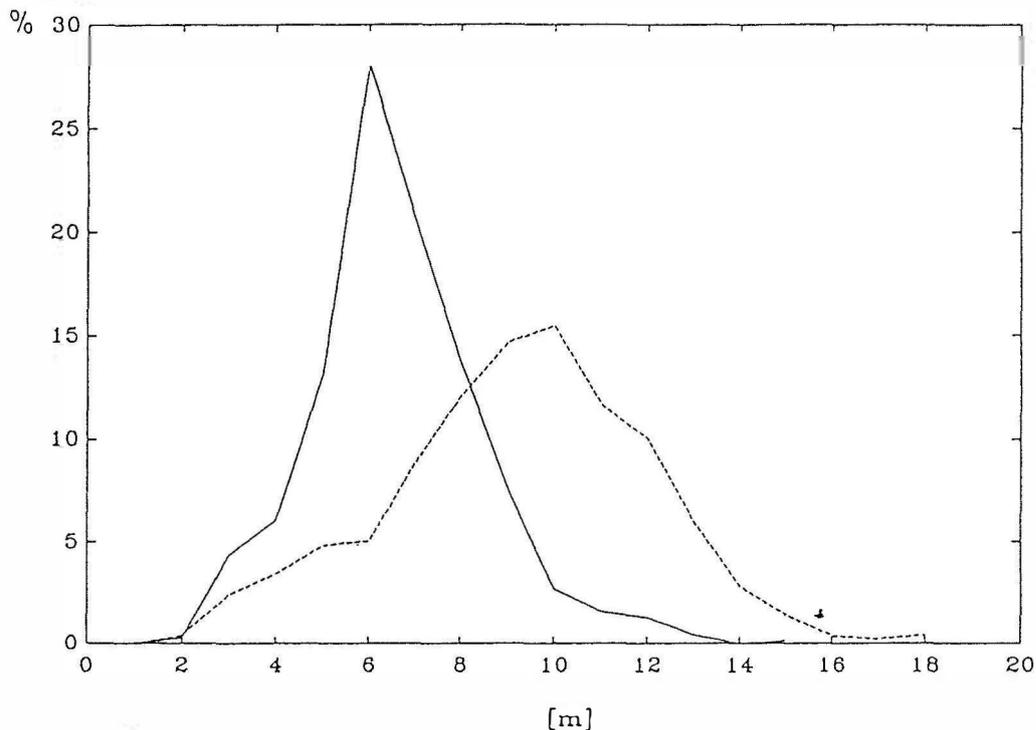


Abb. 2 Häufigkeitsverteilung der Sichttiefe (Secchi-Tiefe) im nördlichen Teil der Zentralen Ostsee in der Zeit 1914 bis 1939 (unterbrochene Linie) und in der Zeit 1969 bis 1986 (durchgezogene Linie). Aus Launiainen und Vihma, 1990.

Tab. 1 Winter-Nährstoff-Konzentrationen im Oberflächenwasser in der Zeit um 1960. Angaben in $\mu\text{mol/l}$: 1 μmol Phosphat entspricht 0,031 mg Phosphor; 1 μmol Nitrat entspricht 0,014 mg Stickstoff.

	Nitrat	Phosphat	N:P (molar)
Zentrale Ostsee	1	0,2	5:1
Zentrale Nordsee	8	0,6	13:1
Nordatlantik	11	0,8	13:1

Wie hoch waren in der ersten Hälfte des Jahrhunderts die Nährstoff-Konzentrationen im Oberflächenwasser der Ostsee? Das wissen wir nicht, denn damals gab es keine hinreichend genauen Analysenmethoden. Vermuten kann man, daß die Konzentrationen im Winter meistens niedriger als 1 $\mu\text{mol/l}$ Nitrat und niedriger als 0,2 $\mu\text{mol/l}$ Phosphat waren.

Diese Konzentrationen sind viel geringer als die Nährstoff-Konzentrationen im Winterwasser des offenen Nordatlantiks und der zentralen Nordsee (Tab. 1). Die Ostsee war also in der ersten Hälfte des Jahrhunderts oligotroph, war ein schlecht mit Nährstoffen versorgtes Meer mit geringer Primärproduktion.

Nährstoff-Einträge vom Land in der ersten Hälfte des Jahrhunderts

Für die als Pflanzennährstoffe wirksamen Phosphor- und Stickstoff-Verbindungen im Ostseewasser gibt es naturgegeben drei Quellen: 1) das salzige und nährstoffreiche Nordseewasser, welches durch das Kattegat und durch die Beltsee einströmt, 2) das Flußwasser, welches Nährstoffe vom Land einträgt, und 3) die Atmosphäre, die ebenfalls vom Land stammende Nährstoffe transportiert.

Die schwedischen Meereskundler Ulf Larsson, Ragnar Elmgren und Fredrik Wulff wagten 1985 eine Abschätzung der historischen Einträge. Sie errechneten, daß vor 1900 die jährlichen Einträge mit Flußwasser in die gesamte Ostsee 6800 t Phosphor und 150 000 t Stickstoff ausmachten. Dazu kommen 2800 t Phosphor und 83 000 t Stickstoff aus der Luft. Auch noch 1950 waren die Flußfrachten viel geringer als heute, weil die Belastungen durch häusliche und industrielle Abwässer geringer waren und weil die Abschwemmung von stickstoffhaltigem Minereraldünger und Gülle von den landwirtschaftlich genutzten Flächen keine Rolle spielte. Wulff und Stigebrandt (1989) rechnen bis 1950 mit einer Verdoppelung der Einträge. Für die Zentrale Ostsee (einschließlich Finnischer Meerbusen) ergeben sich 1950 als Summe von Flußeinträgen und atmosphärischen Einträgen 15 000 t Phosphor und 450 000 t Stickstoff.

Nährstoff-Einträge mit Nordseewasser

Den Wasseraustausch zwischen Kattegat und Ostsee erläutere ich mit einem Diagramm, welches der Däne A. J. C. Jensen 1940 entwickelte (Abb. 3). In dieses Diagramm könnte man die Zahlen für den mittleren Wasseraustausch in der ersten Hälfte des Jahrhunderts eintragen. Damals flossen jährlich 472 Kubikkilometer Wasser mit 17,4 Promille Salzgehalt über die Darßer Schwelle und über die Drogden-Schwelle zur Ostsee (Brogmus, 1952). An der Oberfläche strömte doppelt soviel Wasser mit halb so hohem Salzgehalt in entgegengesetzter Richtung aus der Ostsee heraus. In diesem ausfließenden Brackwasser waren die 472 Kubikkilometer Süßwasser enthalten, welches die Flüsse in die Ostsee brachten. Niederschläge und Verdunstung wurden jeweils mit 172 Kubikkilometer Wasser pro Jahr gerechnet und heben sich auf. Inzwischen gibt es neuere Zahlen für den Zeitraum 1951 bis 1970 (Mikulski, 1986), die in Abb. 1 eingetragen sind und die auch von Wulff und Stigebrandt (1989) für die Modellierung der Ostsee verwendet werden. Danach strömen im Mittel 475 Kubikkilometer Salzwasser aus der Beltsee in die Ostsee ein.

Aus der Multiplikation von jährlich 475 Kubikkilometer in die Ostsee einströmendem Salzwasser mit 17,4 Promille Salzgehalt ergibt sich ein Salzimport von 8,3 Milliarden Tonnen Salz pro Jahr. Der schwedische Ozeanograph Anders Stigebrandt (1983) kommt bei seinen Modellrechnungen auf 9 Milliarden Tonnen Salz.

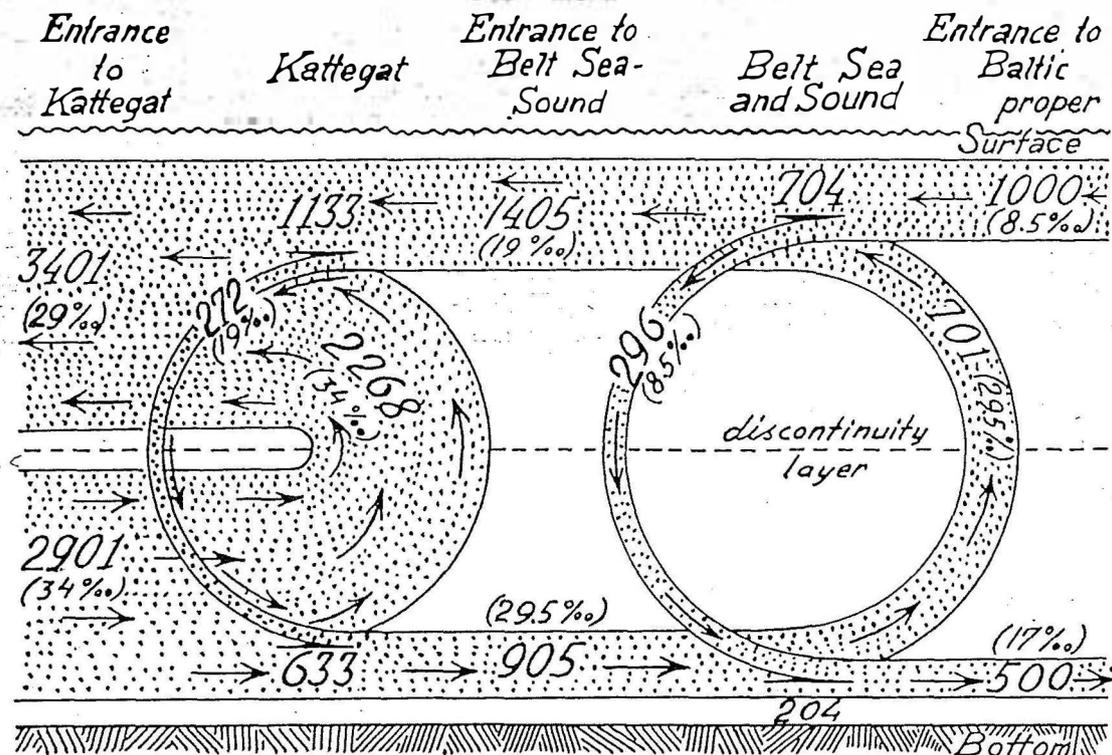


Abb. 3 Schematische Darstellung des Wasseraustausches zwischen Nordsee und Ostsee. Oberflächenwasser und Tiefenwasser werden durch eine Salzgehalts-Sprungschicht (discontinuity layer) getrennt. Die Menge des aus der Ostsee (Baltic proper) zur Beltsee und zum Öresund ausfließenden Oberflächenwassers (rechter Bildrand) ist gleich 1000 gesetzt worden. In diesem ausfließenden Wasser beträgt der Salzgehalt 8,5 Promille. Das Volumen des aus der Beltsee in die Ostsee einströmenden Tiefenwassers ist halb so groß wie das Volumen des ausströmenden Oberflächenwassers, aber der Salzgehalt ist mit 17 Promille doppelt so hoch. Die beiden Kreise verdeutlichen, welche Mengen salzreichen Tiefenwassers jeweils in der Beltsee und im Kattegat dem ausfließenden brackigen Oberflächenwasser beigemischt werden. Aus Jensen, 1940.

Tatsächlich sind die Verhältnisse viel komplizierter als im Schema dargestellt wurde. Im Winter kann es bei entsprechenden Wetterlagen zu regelrechten "Salzwassereinbrüchen" kommen, also zum Einstrom großer Mengen von ungeschichtetem salzigem Wasser. Der größte bisher beobachtete Salzwassereinbruch vom 25. November bis zum 19. Dezember 1951 brachte 218

Kubikkilometer (einschließlich der Vorphase 317 Kubikkilometer) Wasser und 4,9 Milliarden Tonnen Salz in die Ostsee (Matthäus und Franck, 1992). Weil die Großwetterlagen sich unterscheiden, sind die Verhältnisse von Jahr zu Jahr und von Jahrzehnt zu Jahrzehnt verschieden. Wenn mehr Salz importiert als exportiert wird, steigt der Salzgehalt im Ostseewasser, umgekehrt sinkt der Salzgehalt, wenn der Export zur Beltsee überwiegt.

Das einströmende Wasser ist nicht nur salziger, es ist in der Regel auch nährstoffreicher als das überwiegend nährstoffarme Oberflächenwasser, welches aus der Ostsee ausströmt. Wenn der Einstrom von Salzwasser stark ist, dann werden also auch mehr Nährstoffe importiert als in Zeiten abnehmenden Salzgehalts.

Frederik Wulff und Anders Stigebrandt haben 1989 errechnet, daß um 1950 der Import von Phosphor mit dem zur Ostsee fließenden Salzwasser 8 200 t pro Jahr war, während der Phosphor-Export mit dem aus der Ostsee zur Beltsee abfließenden Oberflächenwasser 7 100 t betrug. Netto ergeben sich daraus 1 100 t mehr Import als Export. Für 1960 hat der in Schweden arbeitende Meereschemiker Stig Fonselius (1969) 9 900 t Phosphor-Import bei 11 400 t Phosphor-Export errechnet. Daraus ergibt sich netto ein Export von 1 500 t Phosphor. Der Warnemünder Meereschemiker Dietwart Nehring (1981) rechnet mit 10 000 t Import und Export von Phosphor. Wichtig ist, daß die Phosphor-Atome, die mit einströmendem Wasser importiert wurden, nicht notwendigerweise auch mit ausströmendem Wasser exportiert werden. Große Phosphormengen sinken mit Partikeln an den Meeresboden und werden im Sediment deponiert.

Grob gesehen waren in der ersten Hälfte des Jahrhunderts die Phosphor-Importe mit Salzwasser ungefähr ebensogroß wie die Phosphor-Einträge mit Flußwasser. Für Stickstoff gibt es keine historischen Daten.

Den Meereskundlern war schon vor 50 Jahren bekannt, daß die Ostsee erhebliche Nährstoff-Mengen aus dem Kattegat erhält. 1941 veröffentlichte der schwedische Meeresbiologe Thorsten Gislén den Vorschlag, den Öresund auszubaggern und dadurch die Menge des in die Ostsee einströmenden nährstoffreichen Salzwassers zu steigern: das würde letztlich zu einer beträchtlichen Erhöhung der Fischproduktion in der Ostsee führen. Allerdings würde diese Baggerung doppelt so viel kosten wie der Bau des Panamakanals (zitiert nach dem Buch "Meer und Strand" von F. Gessner, 1957, S. 313).

1941 klagte man also nicht über zu viel, sondern über zu wenig Nährstoffe in der Ostsee. Niemand kam damals auf die Idee, die Ostsee mit vom Menschen produzierten Nährstoffen zu düngen. Inzwischen wurde die unfreiwillige Düngung zur Realität. Wir aber sind mit dieser Entwicklung keineswegs zufrieden

und wünschen uns den alten nährstoffarmen Zustand zurück. Es ist plausibel, dieses Ziel durch Verringerung der Nährstoff-Einträge anzustreben, und das ist ja auch gegenwärtig das Ziel der Umweltpolitik.

Ich möchte in diesem Vortrag zeigen, daß es vielfältige Zusammenhänge zwischen den Nährstoff-Mengen im Ostseewasser und den vom Wetter gesteuerten hydrographischen Prozessen in der Ostsee gibt. Diese Zusammenhänge sollte man in Zukunft besser kennen lernen, um die beobachteten und die angestrebten Veränderungen der Nährstoff-Konzentrationen in der Ostsee richtig zu beurteilen.

Anstieg der Nährstoff-Konzentrationen im Oberflächenwasser der Ostsee zwischen 1969 und 1988

Die Veränderungen der Phosphat- und Nitrat-Konzentrationen im Oberflächenwasser der südöstlichen Gotlandsee in den zwei Jahrzehnten zwischen 1969 und 1989 wurden von dem Warnemünder Meereschemiker Dietwart Nehring untersucht. Sie wurden zum Beispiel 1991 von Nehring und Matthäus zusammengestellt (Abb. 4). Die Analysen betreffen das Oberflächenwasser im Winter, wenn es kaum Phytoplankton gibt und wenn die Nährstoff-Konzentrationen am höchsten sind. Während der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons werden die Nährstoffe in die Algenzellen aufgenommen und die Nährstoff-Konzentrationen im Wasser sinken. Da in der offenen Ostsee Stickstoff relativ knapper ist als Phosphor (Tab. 1), bleibt Phosphat nach der Frühjahrsblüte im Wasser zurück. Stickstoff limitiert also die Frühjahrsblüte in der küstenfernen offenen Ostsee.

In den Jahren 1969 bis 1978 verdreifachte sich die Winterwasser-Konzentration des Phosphats von 0,2 auf 0,6 $\mu\text{mol/l}$ und verdoppelte sich die Winterwasser-Konzentration des Nitrats von 2 auf 4 $\mu\text{mol/l}$, sodaß 1978 die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons theoretisch doppelt so intensiv sein konnte wie 1969. In den Jahren nach 1978 blieben die Phosphat- und Nitrat-Konzentrationen auf dem hohen Niveau (Nehring und Matthäus, 1992). Kann man diese Entwicklung der Nährstoff-Konzentrationen mit veränderten Einträgen von Land erklären ?

Larsson, Elmgren und Wulff (1985) schätzen, daß Ende der siebziger Jahre aus häuslichen Abwässern, Industrie-Abwässern und über die Flüsse jährlich 60 700 t Phosphor und 661 500 t Stickstoff in die Ostsee (ohne Kattegat und Beltsee) gelangten, dazu jährlich 5 800 t Phosphor und 3 14 000 t Stickstoff über die Atmosphäre. In den Flußfrachten sind auch solche Stickstoff-Verbindungen enthalten, die in Humusstoffen gebunden und für das Phytoplankton nicht nutzbar

sind. Bisher wurde auch noch nicht abgeschätzt, welcher Anteil der eingetragenen Nährstoff-Mengen über die unmittelbaren Küstengebiete hinaus in das Oberflächenwasser der offenen Ostsee gelangt.

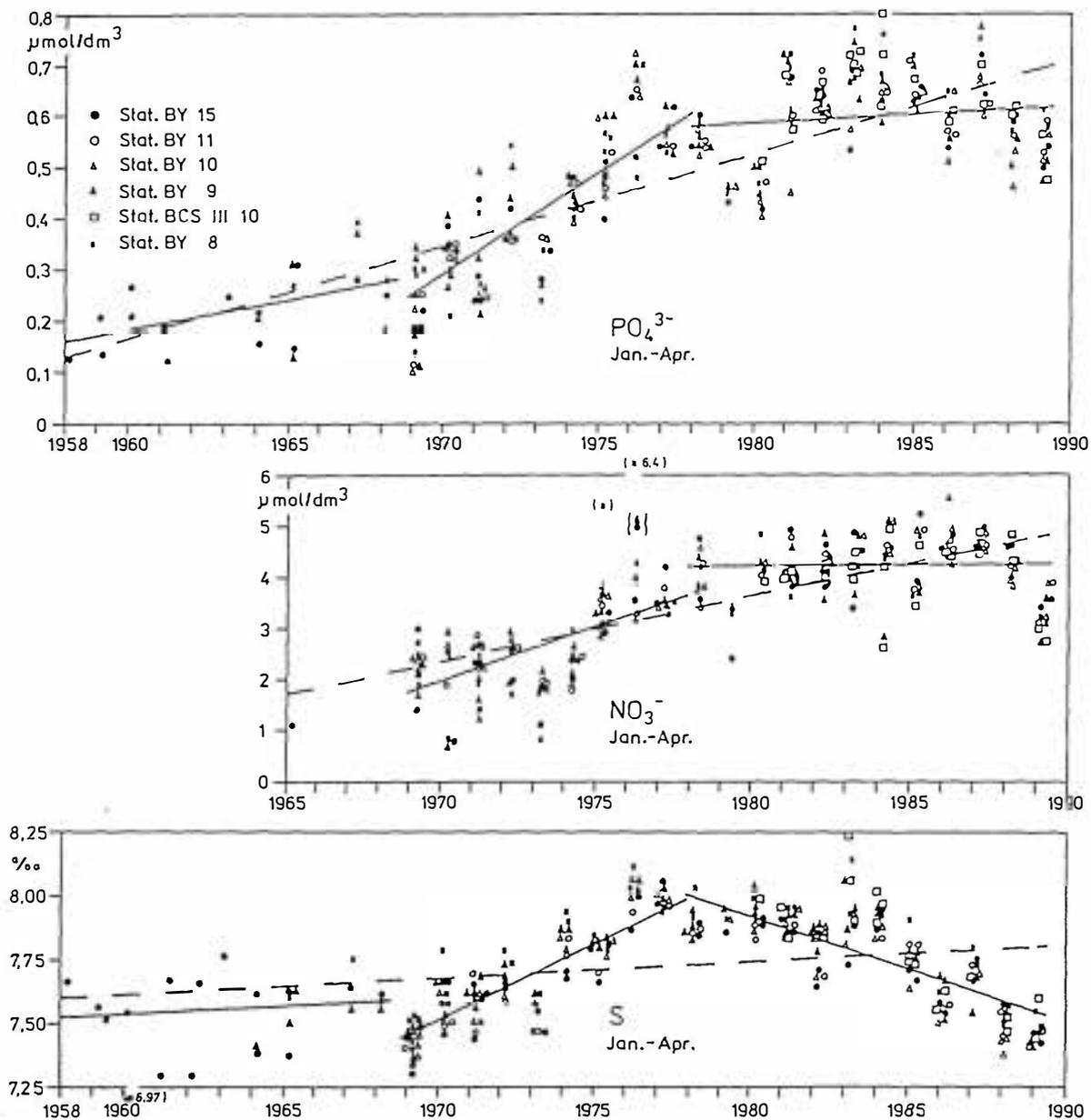


Abb. 4 Phosphat-Konzentrationen, Nitrat-Konzentrationen und Salzgehalt im Winterwasser an der Oberfläche der südöstlichen Gotlandsee 1958 bis 1989. Aus Nehring und Matthäus, 1991.

Die Helsinki-Kommission (Baltic Marine Environment Protection Commission) hat 1987 geringere Werte ermittelt, nämlich 34 463 t Phosphor und 398 261 t Stickstoff (Tab. 2). Die Unterschiede werden von Elmgren (1989) diskutiert. Danach sind die Einträge zu gering angesetzt. Eine "Second Baltic Pollution Load Compilation" ist für 1993 angekündigt und wird hoffentlich zuverlässigere Angaben machen.

Tab. 2 Geographische Daten für die Ostsee und Nährstoff-Frachten. Die Abflußmengen sind das Mittel der Jahre 1951 bis 1970. Nährstoff-Daten nach Baltic Marine Environment Protection Commission, 1987. Aus Gerlach, 1990 b.

	Sea area km ²	Water volume km ³	River inflow km ³ /y	Catchment area km ²	Country	Population persons	Nitrogen t/y	Phosphorus t/y
Bothnian Bay	36 260	1 500	105.0	277 000	SE	472 000	22 386	1 645
					FI	241 000	31 110	1 909
Bothnian Sea	79 257	4 889	85.0	219 000	SE	1 045 000	34 250	1 851
					FI	430 000	14 952	1 048
Archipelago Sea			2.6		FI	240 000	7 160	614
Total		about						
Gulf of Bothnia	115 517	6 370	192.6	505 000		2 428 000	109 858	7 067

Gulf of Finland	29 600	1 100	11.0	50 000	FI	1 961 000	16 295	862
			100.0	374 000	SU	10 000 000	57 700	3 990
Gulf of Riga	13 839	408	27.0	117 550	SU	4 000 000	47 838	1 060

Total Gulfs of Finland and Riga	43 439	1 508	138.0	541 550		16 000 000	121 833	5 912

Baltic Proper					SU	5 500 000	24 775	829
					PL	32 800 000	109 940	19 100
					SE	4 244 000	28 040	1 130
					GD	906 000	1 215	125
					DK	78 000	2 600	300

Total Baltic Proper	211 096	13 045	100.3	515 868		44 000 000	166 570	21 484

Western Baltic and Belts	18 273	262		25 641	GD	1 060 000	2 430	250
					GE	1 100 000	16 380	2 371
					DK	1 600 000	39 200	5 800
The Sound	1 848	25		4 400	DK	1 682 000	9 300	1 510
					SE	724 000	9 250	1 030

Total Belt Sea	20 121	287	7.9	30 041		6 166 000	76 560	10 961

Kattegat					DK	465 000	18 000	1 900
					SE	2 200 000	35 530	1 195

Total Kattegat	22 387	421	28.9	77 000		2 665 000	53 530	3 095

Total Baltic Sea	412 560	21 631	468	1 669 459		71 000 000	528 351	48 519

Wulff und Stigebrandt (1989) beziehen sich auf die Daten von Larsson et al. (1985) und rechnen für den Zeitraum von 1962 bis zum Ende der siebziger Jahre mit einer Steigerung der Phosphor-Einträge auf das 2,1 fache und mit einer Steigerung der Stickstoff-Einträge auf das 1,6 fache. Der starke Anstieg der Nährstoff-Konzentrationen im Oberflächenwasser der Ostsee zwischen 1969 und 1978 würde dazu passen.

Seit den siebziger Jahren gibt es Umweltschutzmaßnahmen im Ostseeraum. Hat die Ostsee mit seit 1978 nicht weiter steigenden Nährstoff-Konzentrationen darauf reagiert? Ausschließen kann ich diese Deutung nicht. Allein in Schweden waren ja bis 1982 nicht weniger als 186 Kläranlagen gebaut worden, womit die Abwässer von 2,8 Millionen Schweden gereinigt werden. Auch Finnland hat viel für die Abwasserreinigung getan, und die Bemühungen werden fortgesetzt. Aber ist diese Deutung richtig? Wahrscheinlich stammt mehr als die Hälfte der Nährstoff-Einträge in die Ostsee aus den großen Flüssen, die von Osten in die Ostsee münden. Von dort gibt es noch keine Hinweise auf eine wirkungsvolle Verringerung der Nährstoff-Frachten. Es lassen sich noch keine verlässlichen Trendberechnungen über den Nährstoff-Eintrag in die Ostsee 1969 bis 1988 anstellen. Dafür aber gibt es klare Korrelationen zwischen den Nährstoff-Konzentrationen und dem Salzgehalt.

Veränderungen des Salzgehaltes und der Wasserschichtung in der Ostsee zwischen 1969 und 1988

In den 10 Jahren zwischen 1969 und 1978 stieg der Salzgehalt im Oberflächenwasser der Ostsee um 0,5 Promille an, zum Beispiel in der südöstlichen Gotlandsee von 7,5 auf 8 Promille (Abb. 4). Damit setzte sich ein Trend fort, den man schon seit der Jahrhundertwende, klarer seit 1930 verfolgen kann, als der Salzgehalt nur 6,5 Promille betrug. Bis 1978 redeten die Meereskundler von einer "Ozeanisierung" der Ostsee, also von einem Trend zu höheren Salzgehalten. In den Jahren zwischen 1978 und 1989 hat sich dann jedoch dieser Trend umgekehrt, denn der Salzgehalt im Oberflächenwasser ist schnell wieder auf 7,5 Promille gesunken. Der Salzgehalt im Tiefenwasser ist jetzt extrem niedrig.

Wenn der Salzgehalt sinkt, bedeutet das mehr Süßwasserzufuhr oder weniger Salzwasserzufuhr. Beides trifft für die Zeit nach 1978 zu. In den Jahren 1981 bis 1988 lag die Süßwasserzufuhr immer über dem zwanzigjährigen Mittel 1951-1970 von 15 000 Kubikmeter pro Sekunde (475 Kubikkilometer pro Jahr, siehe

Abb. 1), es gab also in den vergangenen Jahren mehr Regen und Schnee als normal im Einzugsgebiet der Ostsee. Die Salzwasserzufuhr war dagegen in diesen Jahren viel geringer als normal. 1975/76 wurde zum letztenmal ein größerer "Salzwassereinbruch" in die Ostsee beobachtet. Seit 1983 gab es keine nennenswerten Salzwassereinbrüche mehr, nur noch gelegentlichen Einstrom geringerer Mengen von nicht sehr salzigem Wasser aus dem Kattegat. 17 Jahre lang stagnierte das Tiefenwasser der Ostsee und der Salzgehalt wurde deshalb auch dort Jahr für Jahr geringer.

In der Zeit zwischen 1930 und 1978, als der Salzgehalt der Ostsee anstieg, dehnte sich das salzige Tiefenwasser auf Kosten des salzarmen Oberflächenwassers nach oben aus (Abb. 5). In der südöstlichen Gotlandsee wurde die 8 Promille-Isohaline bis auf 50 Meter, wurde das Zentrum der Salzgehalts-Sprungschicht bis auf 70 Meter Wassertiefe angehoben. Als sich nach 1978 der Salzgehalt der Ostsee wieder verringerte, verlagerte sich innerhalb von zehn Jahren das Zentrum der Salzgehalts-Sprungschicht wieder um etwa 10 Meter nach unten (Matthäus, 1990).

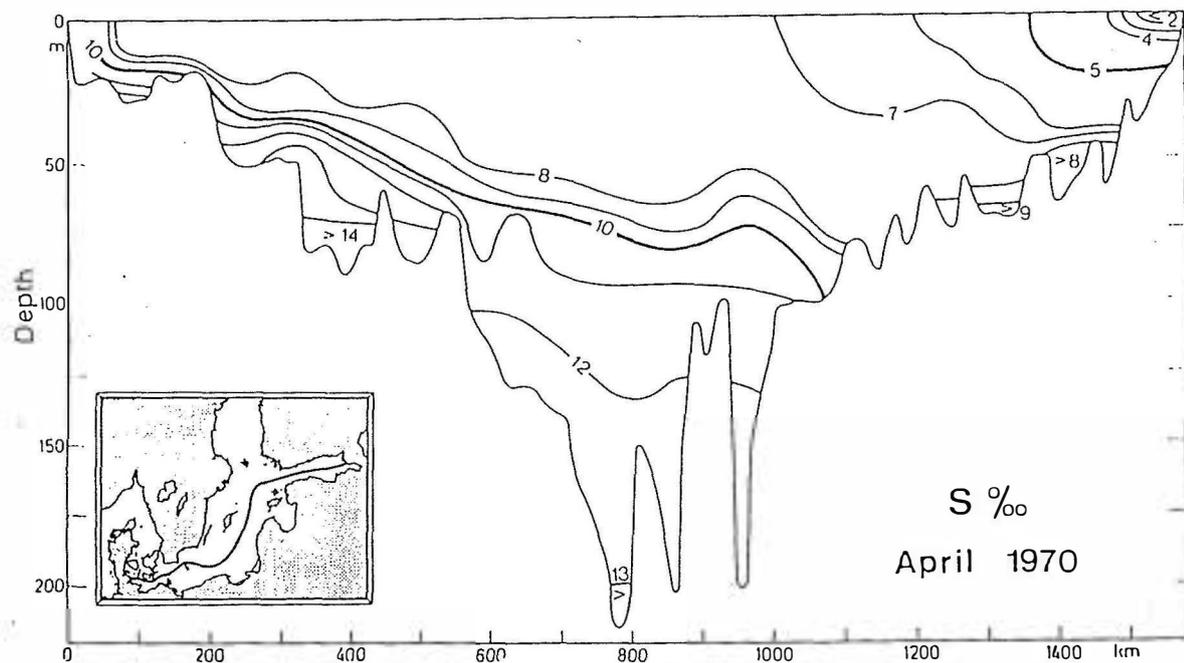


Abb. 5 Salzgehalt im Wasser der Ostsee im April 1970. Zwischen den Isohalinen 8 und 11 Promille liegt das Zentrum der Salzgehalts-Sprungschicht. Aus Grasshoff, 1974.

Hydrographische Prozesse als Ursache für Veränderungen der Nährstoff-Konzentrationen

Mit mehr Salzwasser gelangen auch mehr Nährstoffe in die Ostsee

Man kann die Zunahme der Nährstoff-Konzentrationen im Ostseewasser teilweise dadurch erklären, daß bis 1978 mit mehr Salzwasser auch mehr Nährstoffe in die Ostsee importiert wurden, und man kann das Stagnieren der Nährstoff-Konzentrationen nach 1978 damit erklären, daß die Salzwasser-Zufuhr nach dem letzten Salzwassereinbruch 1975/76 nur noch gering war, so daß auch nur geringe Nährstoff-Mengen mit einfließendem Salzwasser importiert wurden.

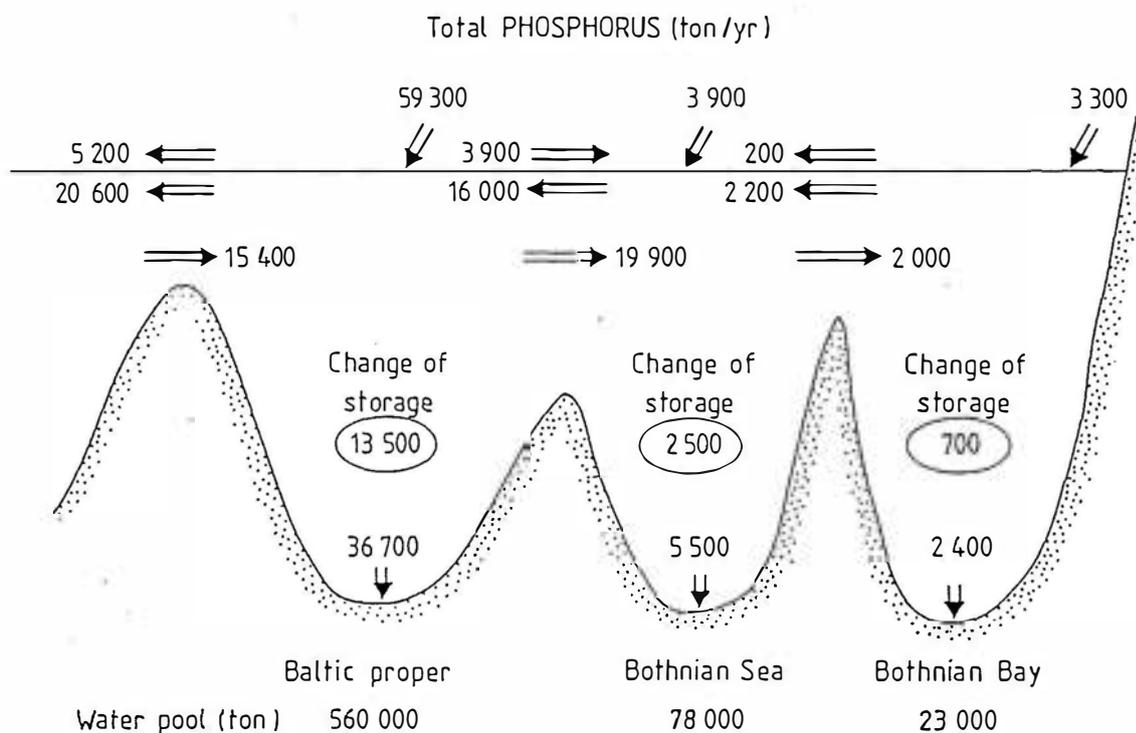


Abb. 6 Bilanz für Gesamt-Phosphor nach dem Modell von Wulff und Stigebrandt (in Tonnen Phosphor pro Jahr). Es wird unterschieden zwischen der Zentralen Ostsee (Baltic proper, einschließlich Finnischer Meerbusen) und dem Bottnischen Meerbusen (Bothnian Sea und Bothnian Bay). Mit Pfeilen werden 1) die Einträge von Land und aus der Atmosphäre, 2) die Transporte mit ausfließendem Oberflächenwasser und einströmendem Tiefenwasser und 3) die jährlich in den Sedimenten des Meeresbodens deponierten Phosphor-Mengen angegeben. Als "storage" wird die jährliche Zunahme der Phosphor-Menge im Wasser der Ostsee bezeichnet. Die Angaben beziehen sich auf die Zeit um 1980. Aus Wulff und Stigebrandt, 1989.

Nach Larsson et al. (1985) waren um 1980 die jährlichen Phosphor-Einträge in die Zentrale Ostsee (einschließlich Finnischer Meerbusen) 55 500 t aus Einleitungen und Flüssen und 3800 t über die Atmosphäre (Abb. 6). 581 100 t Stickstoff kamen aus Einleitungen und Flüssen, 253 300 t über die Atmosphäre und 130 00 t durch die Stickstoff-Fixierung der pelagischen Cyanobakterien. Nach den Modellvorstellungen von Wulff und Stigebrandt (1989) machten die Nährstoff-Importe mit in die Ostsee einströmendem Salzwasser (jährlich 15 400 t Phosphor und 166 300 t Stickstoff) um 1980 grob gerechnet also nur ein Viertel der Flußeinträge aus. Netto ergab sich ein beträchtlicher Nährstoff-Export. Jedes Jahr gelangten nach dieser Modellrechnung 5 200 t Phosphor und 102 400 t Stickstoff mit ausströmendem Ostseewasser in die Beltsee und in das Kattegat und trugen dort zur Eutrophierung bei.

Vergleichsweise spielen also heute die Nährstoff-Importe mit Salzwasser gegenüber den viel höheren Einträgen von Land und über die Atmosphäre nicht mehr die Rolle wie in der ersten Hälfte des Jahrhunderts. Grundsätzlich ist es aber nach wie vor plausibel, daß sich die Nährstoff-Einträge erhöhen, wenn viel Salzwasser einströmt, und daß sie sich verringern, wenn zehn Jahre lang nur wenig Einstrom von Salzwasser erfolgt, wie nach 1976. Leider geht das von Stigebrandt und Wulff (1987) entwickelte Ostsee-Modell von unveränderten hydrographischen Gegebenheiten Jahr für Jahr aus. Das Modell gibt deshalb keine Auskunft, was mit den Nährstoff-Konzentrationen im Ostseewasser geschieht, wenn sich die Hydrographie verändert.

Die Tiefenlage der Sprungschicht beeinflußt die Mobilisierung von Phosphor aus dem Sediment

In den Jahren vor 1978, als der Salzgehalt der Ostsee anstieg, verlagerte sich die Salzgehalts-Sprungschicht nach oben. Dadurch gelangten solche Tiefenzonen des Meeresbodens in den Einflußbereich des sauerstoffarmen Tiefenwassers, die vorher im Bereich der Sprungschicht gelegen hatten und dort von sauerstoffhaltigem Wasser bedeckt gewesen waren. Bei sauerstoffarmen Verhältnissen wird Phosphat aus dem Sediment mobilisiert und gelangt in das Wasser über dem Meeresboden, sodaß sich dort die Phosphor-Konzentrationen erhöhen.

Als sich dann aber nach 1978 die Salzgehalts-Sprungschicht wieder nach unten verlagerte, gelangte der Meeresboden in 80 bis 90 Meter Wassertiefe, der vorher deutlich unterhalb der Sprungschicht gelegen hatte, in den Einflußbereich der Sprungschicht. Die Sauerstoff-Verhältnisse wurden dadurch besser. Ende der

achtziger Jahre konnten sich Würmer und Krebse dort wieder ansiedeln. Im Wasser gelöstes Phosphat wurde als Eisenphosphat an das Sediment des Meeresbodens gebunden. Dieser Prozeß kann dazu beigetragen haben, daß die Phosphor-Konzentrationen im Ostseewasser nach 1978 nicht weiter stiegen.

Der Austausch zwischen Tiefenwasser und Oberflächenwasser hängt von der Tiefenlage der Sprungschicht und vom Wetter ab

Trotz der Salzgehalts-Sprungschicht gibt es in der Ostsee immer auch einen Austausch zwischen Tiefenwasser und Oberflächenwasser. Wenn das nicht so wäre, könnte sich nicht großräumig und über längere Zeiträume im Oberflächenwasser der Ostsee ein Salzgehalt von 7-8 Promille einstellen. Nicht nur Salz, auch die Nährstoffe sind im Tiefenwasser höher konzentriert als im Oberflächenwasser. Jeder Austausch zwischen Tiefenwasser und Oberflächenwasser erhöht deshalb nicht nur den Salzgehalt, sondern auch die Nährstoff-Konzentrationen im Oberflächenwasser. Maßgebend dafür sind physikalische Prozesse, welche Turbulenz (Verwirbelung) im Bereich der Sprungschicht erzeugen.

Die Wirkung von Orkanwellen reicht bis in die Tiefe der Sprungschicht hinab. Auftriebsprozesse betreffen zwar nicht direkt das Tiefenwasser der Ostsee, bewirken aber Turbulenz im Bereich der Sprungschicht. Auch horizontale Trägheitswellen, die beim Einsetzen oder beim Aufhören von Windschub entstehen, sorgen für Turbulenz, da sie oberhalb und unterhalb der Sprungschicht phasenverschoben sind. Nach einer klassischen Hypothese findet in der nördlichen Ostsee der Austausch zwischen Tiefenwasser und Oberflächenwasser vor allem zu Beginn des Winters statt, wenn das Oberflächenwasser auskühlt, dadurch dichter wird und bis zur Salzgehalts-Sprungschicht absinkt. Auch dabei entsteht Turbulenz im Bereich der Salzgehalts-Sprungschicht und die obersten Meter der Sprungschicht werden "erodiert" (Kullenberg, 1981, 1983).

Bisher wurde noch nicht berechnet, wie sich der Austausch zwischen Tiefenwasser und Oberflächenwasser verändert, wenn 1) sich die Tiefenlage der Salzgehalts-Sprungschicht verändert, wenn 2) sich die Temperatur des Tiefenwassers verändert, wenn 3) besonders warme oder besonders kalte Lufttemperaturen im Spätherbst eine verschieden intensive Abkühlung des Oberflächenwassers bewirken, und 4) wenn sich das Windregime ändert. Plausibel ist die Annahme, daß hydrographische und meteorologische Einflüsse ganz wesentlich die Austauschprozesse steuern und immer dann intensiver wirken, wenn die Salzgehalts-Sprungschicht flacher liegt.

Turbulenzen in der Sprungschicht entstehen aber auch, wenn nicht sehr salzige Wassermassen aus der Beltsee einströmen, welche sich dann horizontal in die passenden Isohalinen der Salzgehalts-Sprungschicht einschieben.

Ein Salzwassereinbruch verdrängt das Bodenwasser (Fallstudie 1961/62)

Im Januar 1962 maß man vom Forschungsschiff "Skagerak" aus im Oberflächenwasser der Gotlandsee dreifach höhere Phosphat-Konzentrationen als in den vorangegangenen Wintern, nämlich $0,7 \mu\text{mol/l}$ über dem Gotlandtief und bis $0,9 \mu\text{mol/l}$ an anderen Stationen aus der Zentralen Ostsee (Abb. 7).

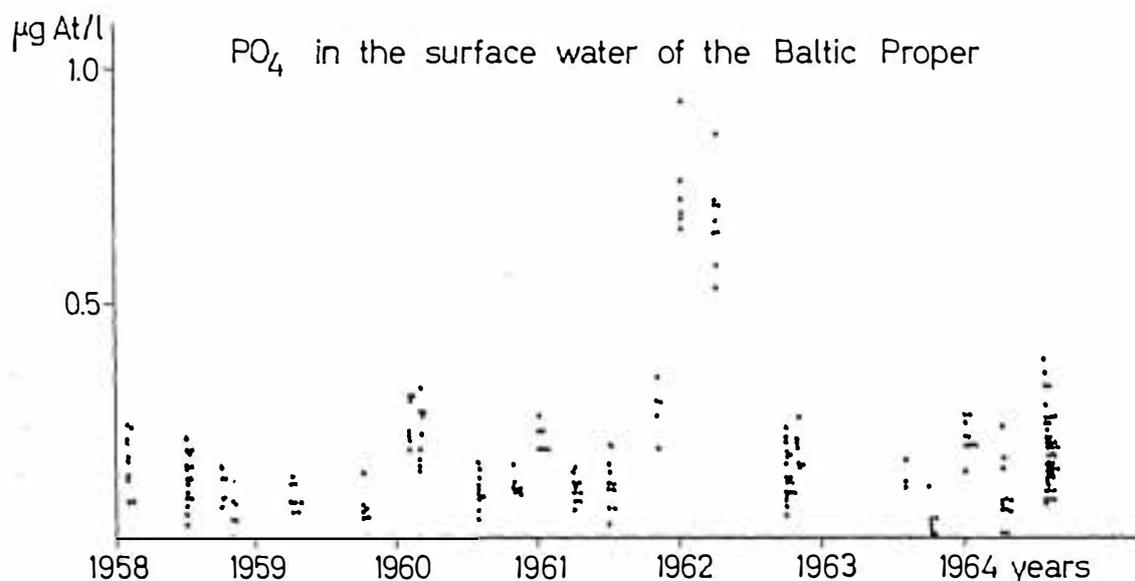


Abb. 7 Phosphat-Konzentrationen ($\mu\text{mol/l}$) im Oberflächenwasser an verschiedenen Stationen in der Zentralen Ostsee. Daten 1958 bis 1964. Aus Fonselius, 1967.

Für langfristige Trendanalysen sind diese Daten aus dem Jahr 1962 nicht berücksichtigt worden. Die Meßpunkte finden sich zwar (eingeklammert) noch in einer 1984 von D. Nehring gegebenen Zusammenstellung, sie werden aber zum Beispiel von Nehring und Matthäus 1991 (Abb. 4) und in anderen neuen Arbeiten (Nehring und Matthäus, 1992; Nehring, 1992) nicht mehr aufgeführt. Aber man sollte diese Beobachtungen nicht vergessen. Zwar können bei so schwierigen Analysen immer auch einmal Artefakte entstehen. Aber auch über dem Fårötief und in der Bornholmsee wurden im Januar 1962 erhöhte Phosphatwerte im Oberflächenwasser registriert. Und das hatte Auswirkungen auf das Plankton.

Im August 1962 fanden die polnischen Wissenschaftler I. I. Nikolajev, H. K. Krievs und S. O. Freimane-Apine (1964) um die Hälfte mehr Zooplankton in der Ostsee wie in anderen Jahren. Auch die Zooplanktondaten des Fischereiforschungs-Instituts Riga vom August 1962 fallen aus dem Rahmen (Abb. 8). V. Sjöblom (1965) schreibt, daß es im Sommer 1962 und auch noch 1963 besonders fette Heringe in der Ostsee gab, und zwar in allen Altersklassen. Die hohen Nährstoff-Konzentrationen im Januar 1962 hatten also Auswirkungen auf die Produktion des Zooplanktons in der Ostsee bis hin zur Fischqualität. Man kann daraus schließen, daß auch die Primärproduktion hoch war und daß die hohen Nährstoff-Konzentrationen vor Beginn der Frühjahrsblüte 1962 des Phytoplanktons diesen Prozeß ausgelöst haben.

Aber schon im folgenden Winter 1962/63 waren die Nährstoff-Konzentrationen wieder normal niedrig, enthielt das Oberflächenwasser wieder nur noch $0,2 \mu\text{mol/l}$ Phosphat. Die schnelle Rückkehr zur Normalität verwundert nicht, denn die in Planktonorganismen eingeschlossenen Nährstoffe sinken ab und verschwinden dadurch schnell aus der Oberflächenschicht.

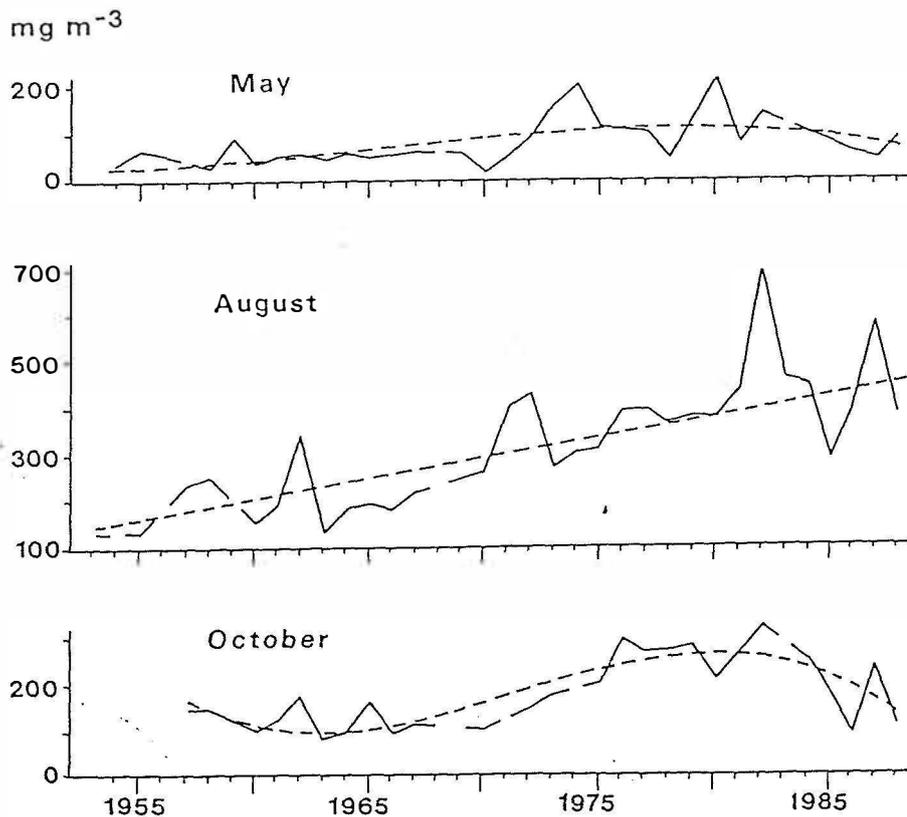


Abb. 8 Biomasse des Crustaceen-Zooplanktons in der südöstlichen und östlichen Ostsee 1953 bis 1988, ausgedrückt als Milligramm Feuchtwicht pro Kubikmeter bis 100 m Wassertiefe. Aus Behrends et al., 1990

Stig Fonselius (1967) macht einen Salzwassereinbruch für den Anstieg der Phosphat-Konzentrationen im Oberflächenwasser verantwortlich. Im Sommer 1961 verdrängte salziges Wasser mit einem Sauerstoffgehalt von 2 Milliliter pro Liter und mit einer Phosphat-Konzentration von 2 $\mu\text{mol/l}$ das Bodenwasser, welches über dem Boden des Gotlandtiefs seit Jahren stagniert hatte (Abb. 9). Dieses ehemalige Bodenwasser mit nur geringem Sauerstoffgehalt und mit mehr als 4 $\mu\text{mol/l}$ Phosphat fand sich am 22. Juli 1961 in 150 Meter Wassertiefe, das ist 70 Meter über dem Meeresboden. Stig Fonselius vermutet, daß dieses Wasser bis zum Januar 1962 dem Oberflächenwasser zugemischt wurde.

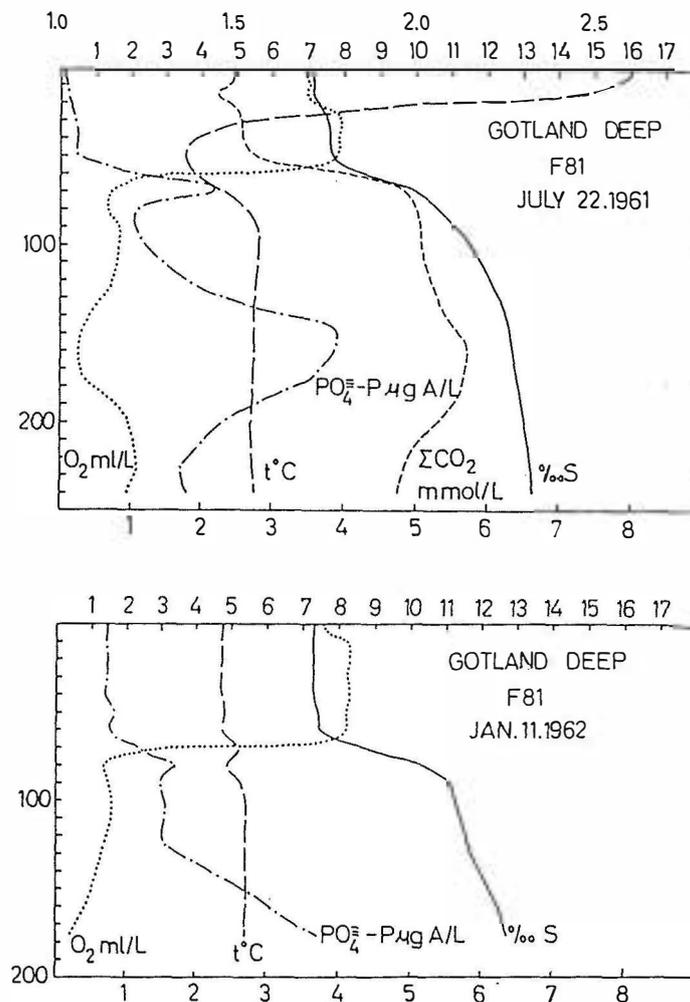


Abb. 9 Hydrographische Verhältnisse, Sauerstoff- und Phosphat-Konzentrationen im Wasser über dem Gotlandtief am 22. Juli 1961 und am 11. Januar 1962. Die untere Skala bezieht sich auf die Phosphat-Konzentration ($\mu\text{mol/l}$), die obere Skala bezieht sich auf die übrigen Meßgrößen. Aus Fonselius, 1967.

Was immer im Einzelnen die hydrographischen Ursachen waren: Das Ereignis 1961/62 zeigt, sofern die Analysen richtig waren, daß unabhängig von den langfristigen Trends kurzfristig große Nährstoffmengen in das Oberflächenwasser gelangen können. Möglicherweise hat sich der Prozeß, der 1961/62 zur Eutrophierung führte, nach 1969 häufiger abgespielt und ist mitverantwortlich für die nach 1969 steigenden Nährstoff-Konzentrationen im Oberflächenwasser der Ostsee.

Perspektive

Zwischen 1900 und 1950 haben sich die Nährstoff-Einträge in die Ostsee verdoppelt, anschließend haben sich die Phosphor-Einträge noch einmal vervierfacht und die Stickstoff-Einträge noch einmal verdoppelt, wenn die Annahmen von Larsson et al. (1985) und von Wulff und Stigebrandt (1989) richtig sind. Das Ostsee-Monitoring hat gezeigt, daß in den Jahren zwischen 1969 und 1988 sich die Phosphat-Konzentrationen im Ostseewasser verdreifacht, die Nitrat-Konzentrationen verdoppelt haben. Nach dem Vorsorge-Prinzip reicht diese Erkenntnis aus, um Umweltschutz-Maßnahmen zu fordern.

Die Umweltschutzpolitik kann im Fall der Ostsee guten Gewissens nach dem Vorsorgeprinzip handeln und sollte auch ohne besser gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse die Nährstoff-Elimination durchsetzen. Das Geld für die Phosphor-Elimination ist auf jeden Fall gut angelegt, denn die zu bauenden Kläranlagen helfen ja in erster Linie den verschmutzten Küstengebieten und damit den Menschen, die dort leben. Ob sich aber dadurch auch etwas in den zentralen Gebieten der offenen Ostsee ändert ?

Ich habe in den vorstehenden Abschnitten gezeigt, wie die meteorologisch-hydrographischen Faktoren auf die Nährstoff-Konzentrationen im Oberflächenwasser der Ostsee einwirken. Ich vermute, daß die drastischen Unterschiede zwischen den beiden Dekaden 1969 bis 1978 und 1979 bis 1988 überwiegend auf Wetterwirkung zurückzuführen sind, also auf Veränderungen im Wasser- und Salzhaushalt der Ostsee. Diese relativ kurzfristigen Veränderungen werden jedoch von einem Langzeit-Trend zu höheren Nährstoff-Mengen in der Ostsee überlagert, den man mit anthropogenen Nährstoff-Einträgen erklären kann. Möglicherweise spielen aber auch dabei längerfristige Klimaänderungen eine Rolle.

Dank der Messungen von Stig Fonselius ab 1959, von Dietwart Nehring ab 1969 und dank des intensiven "Monitorings" der Ostseeverhältnisse, welches die Helsinki-Kommission seit 1978 organisiert, wissen wir zwar inzwischen viel

über Veränderungen in der offenen Ostsee, aber leider weiß die Wissenschaft noch zu wenig über die steuernden Prozesse, über die Nährstoff-Flüsse zwischen Beltsee und Ostsee, zwischen Sediment und Wasser und zwischen Tiefenwasser und Oberflächenwasser.

In den kommenden Jahren werden wir jedoch viel Neues über die Ostsee erfahren. In Warnemünde hat das Institut für Ostseeforschung neue Möglichkeiten und Impulse bekommen. Im Institut für Meereskunde in Kiel hat Andreas Lehmann (1992) ein dreidimensionales numerisches Ostseemodell entwickelt, welches es gestatten wird, das Schicksal der Flußfrachten und anderer Wassermassen zu klären.

Aber auch die Ostsee selbst hat inzwischen ein Naturexperiment gestartet: Vom 18. bis 26. Januar 1993 gab es bei orkanartigen Stürmen einen Salzwassereinbruch in die Ostsee, der insgesamt 310 Kubikkilometer Wasser in die Ostsee transportierte. 80 Kubikkilometer Kattegatwasser mit bis zu 25 Promille Salzgehalt strömten im Öresund über die Drogden-Schwelle, und 230 Kubikkilometer Wasser, davon rund 100 Kubikkilometer mit Salzgehalten zwischen 17 und 22 Promille, strömten über die Darßer Schwelle in die Arkonasee. Die schwedischen Wissenschaftler Björn Sjöberg und Lotta Fyrberg (1993) schätzen, daß Anfang März 1993 bereits 40 bis 60 Kubikkilometer salziges, sauerstoffreiches Wasser in das Bornholmbecken vorgedrungen waren und dort das alte, sauerstoffarme Wasser vom Boden verdrängt hatten. Am 28. April 1993, als ich diesen Vortrag hielt, war noch unsicher, ob Wassermenge und Salzgehalt hinreichend sein würden, damit auch noch das Bodenwasser im Gotlandtief erneuert wird. Der Warnemünder Ozeanograph Wolfgang Matthäus (1993) vergleicht das Ereignis mit dem Salzwassereinbruch vom März/April 1961, bei dem insgesamt 320 Kubikkilometer Wasser, davon rund 100 Kubikkilometer salzreiches Wasser mit durchschnittlich 19,2 Promille Salzgehalt einströmten. Dieser Salzwassereinbruch hatte, wie ich zeigte, möglicherweise im Jahr 1962 die Ostsee eutrophiert. Ob wir etwas ähnliches 1994 erleben werden ?

Das ist nicht unwahrscheinlich, denn mit 320 Kubikkilometer einfließendem Salzwasser könnten im Januar 1993 größenordnungsmäßig nicht nur einige Milliarden Tonnen Salz, sondern auch 10 000 t Phosphat-Phosphor und 32 000 t Nitrat-Stickstoff in die Arkonasee importiert worden sein. Die Wissenschaftler werden aus diesem Naturexperiment lernen. Die Ostsee ist ein gutes Objekt für die Klimawirkungsforschung.

Zusammenfassung

In der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts war die Planktondichte in der Ostsee gering und war deshalb das Wasser der Ostsee klar. Die Nährstoff-Konzentrationen waren gering und die Ostsee war ein oligotrophes Gewässer. Damals stammte vermutlich nur die Hälfte der Phosphor-Einträge vom Land, die andere Hälfte kam mit Salzwasser aus der Nordsee.

Seit Beginn der Messungen um 1950 stiegen die Nährstoff-Konzentrationen im Ostseewasser zunächst langsam, dann ab 1969 schnell an, bei Phosphat auf das Dreifache, bei Nitrat auf das Doppelte. Seit 1978 steigen sie jedoch nicht weiter an.

Für diese Veränderungen der Nährstoff-Konzentrationen im Winter-Oberflächenwasser der Ostsee sind einerseits die vom Menschen verursachten Einträge (Eutrophierung), sind andererseits aber auch die sich verändernden hydrographischen Prozesse ursächlich. Der Salzgehalt stieg bis 1978 an und die Salzgehalts-Sprungschicht verlagerte sich nach oben. Wegen stärkerer Süßwasserzuflüsse und wegen dem nur noch geringen Salzwasser-Einstrom verringerte sich nach 1978 der Salzgehalt und senkte sich die Salzgehalts-Sprungschicht um 10 Meter ab.

Mit mehr Salzwasser gelangen mehr Nährstoffe aus der Nordsee in die Ostsee. Wenn sich die Salzgehalts-Sprungschicht nach oben verlagert, dann gelangen in den entsprechenden Tiefen Gebiete des Meeresbodens in den Einflußbereich sauerstoffarmen Wassers und Phosphat wird mobilisiert. Bei einer flacheren Lage der Sprungschicht nimmt das Wetter stärkeren Einfluß auf die Austauschprozesse zwischen dem nährstoffreichen Tiefenwasser und dem nährstoffarmen Oberflächenwasser. Nach Salzwassereinbrüchen wird das in den tiefen Ostseebecken stagnierende nährstoffreiche Bodenwasser angehoben und gelangt in flachere Wasserschichten.

Nach dem Salzwassereinbruch 1961 gab es 1962 im Oberflächenwasser der Zentralen Ostsee dreifach höhere Phosphat-Konzentrationen, mehr Zooplankton und fettere Heringe. Möglicherweise kann man eine ähnliche Entwicklung 1994 erwarten, da nach 17 Jahren Stagnation im Januar 1993 ein kräftiger Salzwassereinbruch erfolgte.

Literatur

- Baltic Marine Environment Protection Commission - Helsinki Commission,
First Baltic Sea pollution load compilation. Baltic Sea Environm. Proc.
20, 1-56, 1987
- Behrends, G., M. Viitasalo, G. Breuel, E. Kostrichkina, O. Sandström, F.
Möhlenberg, P. Ciszewski, Zooplankton. S. 181-198 in: Baltic Marine
Environment Protection Commission, Second periodic assessment of the
state of the marine environment of the Baltic Sea, 1984 - 1988; Background
document. Baltic Sea Environm. Proc. 35 B, 1990
- Brogmus, W., Eine Revision des Wasserhaushaltes der Ostsee. Kieler
Meeresforschungen 9, 15-42, 1952
- Elmgren, R., The eutrophication status of the Baltic Sea: input of nitrogen and
phosphorus, their availability for plant production, and some management
implications. S. 12-31 in: Baltic Marine Environment Protection
Commission, Second seminar on wastewater treatment in urban areas, Visby,
Sweden, September 6-8, 1987. Baltic Sea Environment Proc. 30, 1989
- Fonselius, S., Hydrography of the Baltic deep basins II. Rep. Fishery Board of
Sweden, Series Hydrography 20, 31 S., 1967
- Fonselius, S., Hydrography of the Baltic deep basins III. Rep. Fishery Board of
Sweden, Series Hydrography 23, 97 S., 1969
- Gerlach, S. A., Introduction. S. 3-20 in: Baltic Marine Environment Protection
Commission, Second periodic assessment of the state of the marine
environment of the Baltic Sea, 1984 - 1988; Background document. Baltic
Sea Environm. Proc. 35 B, 1990 a
- Gerlach, S. A., Stickstoff, Phosphor, Plankton und Sauerstoffmangel in der
Deutschen Bucht und in der Kieler Bucht. Berichte Umweltbundesamt 4/90,
Erich Schmidt Verlag, Berlin, 22+357 S., 1990 b (engl. Übersetzung: Kieler
Meeresforschungen Sonderheft 7, 341 S., 1990)
- Gessner, F., Meer und Strand. 2. Auflage. VEB Deutscher Verlag der
Wissenschaften, Berlin, 426 S., 1957
- Gislén, T., Problem kring Östersjön. Svensk geogr. Årsbok (Lund), 1941
- Grasshoff, K., The hydrochemistry of landlocked basins and fjords. S. 455-597
in: Chemical oceanography, 2. Auflage, Band 2 (J. P. Riley und G.
Skirrow, Herausgeber). Academic Press, London usw., 1974
- Grasshoff, K. und A. Voipio, Chemical oceanography. S. 183-218 in: A. Voipio
(Herausgeber), The Baltic Sea. Elsevier, Amsterdam usw., 1981
- Hupfer, P., Die Ostsee - kleines Meer mit großen Problemen. 3. Auflage.
Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 152 S., 1981
- Jensen, A. J. C., The influence of the currents in the Danish waters on the surface
temperature in water, and on the winter temperature of the air. Medd.
Kommiss. Danmarks Fiskeri- og Havunders. Ser. Hydrografi 3 (2), 1-52,
1940

- Kullenberg, G., Physical oceanography. S. 135-181 in: A. Voipio (Herausgeber), The Baltic Sea. Elsevier, Amsterdam usw., 1981
- Kullenberg, G., The Baltic Sea. S. 309-335 in: B. H. Ketchum (Herausgeber), Ecosystems of the world 26, Estuaries and enclosed seas. Elsevier, Amsterdam usw., 1983
- Larsson, U., R. Elmgren und F. Wulff, Eutrophication and the Baltic Sea: causes and consequences. *Ambio* 14, 9-14, 1985
- Launiainen, J. und T. Vihma, Meteorological, ice and water exchange conditions. S. 22-33 in: Baltic Marine Environment Protection Commission, Second periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea, 1984 - 1988; Background document. *Baltic Sea Environm. Proc.* 35 B, 1990
- Lehmann, A., Ein dreidimensionales baroklines wirbelaflösendes Modell der Ostsee. *Berichte Institut für Meereskunde Kiel* 231, 1992
- Matthäus, W., Langzeittrends und Veränderungen ozeanologischer Parameter während der gegenwärtigen Stagnationsperiode im Tiefenwasser der zentralen Ostsee. *Fischerei-Forschung (Rostock)* 28, 25-34, 1990
- Matthäus, W., Der Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee. *Geogr. Rundschau* 11/1992, 626-631, 1992
- Matthäus, W., Salzwassereinbruch in die Ostsee. *Geogr. Rundschau*, im Druck, 1993
- Matthäus, W. und H. Franck, Characteristics of major Baltic inflows - a statistical analysis. *Continental Shelf Res.* 12, 1375-1400, 1992
- Mikulski, Z., Water balance of the Baltic Sea and five of its subbasins. 20-year averages. Tafel 11 in: Baltic Marine Environment Protection Commission, Water balance of the Baltic Sea. *Baltic Sea Environm. Proc.* 16, 1986
- Nehring, D., Hydrographisch-chemische Untersuchungen in der Ostsee von 1969-1978. II. Die chemischen Bedingungen und ihre Veränderungen unter besonderer Berücksichtigung des Nährstoffregimes. *Geodät. Geophys. Veröff. (Reihe 4)* 35, 39-220, 1981
- Nehring, D., The further development of the nutrient situation in the Baltic proper. *Ophelia Suppl.* 3, 167-179, 1984
- Nehring, D., Hydrographisch-chemische Langzeitveränderungen und Eutrophierung in der Ostsee. *Wasser und Boden* 10/1992, 632-638, 1992
- Nehring, D. und W. Matthäus, Current trends in hydrography and chemical parameters and eutrophication in the Baltic Sea. *Int. Rev. ges. Hydrobiol.* 76, 297-316, 1991
- Nehring, D. und W. Matthäus, Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1991. *Deutsche hydrogr. Z.* 44, 217-238, 1992
- Nikolajev, I. I., H. K. Krievs, S. O. Freimane-Apine, Quantitative characteristics of zooplankton (mainly Crustacea) in the Central Baltic and in the Gulf of Riga in 1962. *Ann. Biol.* 19 (1962), 71-73, 1964

- Sjöberg, B. und L. Fyrberg, Rapport fran oceanografisk expedition med U/F Argos 2.-5. 3. 1993. SMHI SeO 92/93-132, 9 S. (vervielfältigt), 1993
- Sjöblom, V., Baltic herring in the seas around Finland in 1962 and 1963. Ann. Biol. 20 (1963), 225-229, 1965
- Stigebrandt, A., A model for the exchange of water and salt between the Baltic and the Skagerrak. J. phys. Oceanogr. 13, 411-427, 1983
- Stigebrandt, A. und F. Wulff, A model for the dynamics of nutrients and oxygen in the Baltic proper. J. mar. Res. 45, 729-759, 1987
- Wulff, F. und A. Stigebrandt, A time-dependent budget model for nutrients in the Baltic Sea. Global Biogeochemical Cycles 3 (1), 63-78, 1989

Anschrift des Verfassers:
Prof. Dr. Sebastian A. Gerlach
Institut für Meereskunde
Düsternbrooker Weg 20
D-2300 (ab 1.7.93: 24105) Kiel