

Die Sauerstoffprobleme der Ostsee und das Wetter

Von Sebastian A. Gerlach

Einleitung

»Die Ostsee stirbt, und alle stellen sich tot«, so lautete das Thema einer Veranstaltung auf dem 25. Deutschen Evangelischen Kirchentag 1993 in München, welche mehr als zweitausend meist jugendliche Teilnehmer anlockte. Heute sind viele Menschen besorgt um das Schicksal der Ostsee. Sie wissen, daß der Mensch die Ostsee seit Jahrzehnten durch die Einleitung von Stickstoff und Phosphor überdüngt. Sie fordern die Politiker auf, etwas dagegen zu tun, ebenso gegen die Einleitung von Schadstoffen. Die Ostsee soll wieder so werden, wie sie zum Beispiel vor vierzig oder vor neunzig Jahren war. Aber wie waren die Ostseeverhältnisse in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts und früher? Welchen Zustand sollen wir anstreben?

Die Öffentlichkeit war bereits 1969 beunruhigt, weil schon damals auf einer Fläche von 55000 Quadratkilometern das »Bodenwasser« unmittelbar über dem Meeresboden keinen Sauerstoff mehr enthielt. Man begann, von den »toten« Flächen am Ostseeboden zu reden. Ich setze »tot« in Anführungsstriche. Denn auch in den »toten« Gebieten gibt es noch Leben am Meeresboden. Für die »Sulfatreduzierer« genannten Bakterien ist Sauerstoff sogar giftig. Diese Bakterien »atmen«, biochemisch nicht ganz korrekt ausgedrückt, mit dem Sauerstoff, der im Sulfat (SO_4) gebunden ist, und verwandeln dabei das Sulfat in das giftige Gas Schwefelwasserstoff (H_2S). Durch die Lebenstätigkeit der Sulfatämer kommt so zum Sauerstoffmangel im Wasser über dem Meeresboden noch die Giftwirkung des Schwefelwasserstoffs hinzu. Die sauerstofflosen und schwefelwasserstoffhaltigen Tiefenzonen der Ostsee sind deshalb extrem lebensfeindlich für alle Tiere und für solche Bakterien, die zum Leben Sauerstoff brauchen.

Ich werde ausführen, daß die tiefen Ostseegebiete bereits in der ersten Hälfte des Jahrhunderts zeitweise von Sauerstoffmangel bedroht waren und daß sich schon 1948 eine drastische Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse anbahnte. Ich werde erläutern, daß nicht nur die vom Menschen verursachte Überdüngung der Ostsee dabei eine Rolle spielt, sondern daß auch Veränderungen im Salzgehalt der Ostsee, welche vom Wetter gesteuert werden, auf die Sauerstoffverhältnisse einwirken.

Die Ostsee – ein geschichtetes Brackwassermeer

Die Ostsee ist kein Ozean, auch wenn sie in manchen Atlanten als »The Baltic Ocean« bezeichnet wird. Snobs unter den Hochseeseglern bezeichnen die Ostsee abwertend

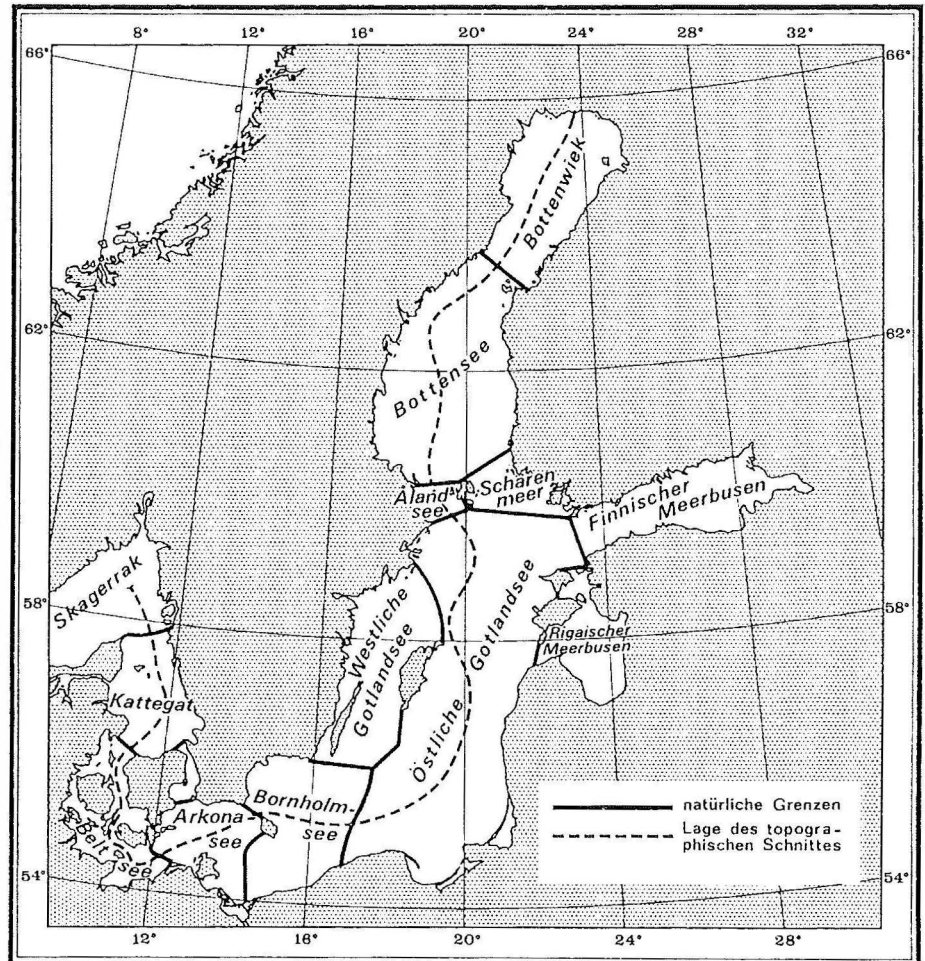


Abb. 1: Die natürliche Gliederung der Ostsee und die Lage des in Abb. 2 dargestellten Längsschnitts (aus DIETRICH & KÖSTER 1974).

als einen See, »den Ostsee«. Denn die Ostsee steht nur durch Meerengen mit dem Weltozean in Verbindung, sie ist geographisch gesehen ein Mittelmeer, rundum vom Land umgeben und von Natur her vielfältigen Landeinflüssen ausgesetzt (Abb. 1).

Die Ostsee kann man aber auch als einen großen Fjord oder als ein Flußmündungsgebiet (wissenschaftlich: als ein Ästuar) definieren, in welches die Oder, die Weichsel, die Memel, die Düna, die Nawa und viele andere Flüsse einmünden. In diesem »Flußmündungsgebiet Ostsee« vermischt sich das süße Flußwasser mit dem salzigen Nordseewasser, welches durch Kattegat, Öresund und Beltsee in die Ostsee eindringt. Diese Meerengen sind flach (Abb. 2). Einfließendes Salzwasser muß entweder zwischen Dänemark und Schweden die acht Meter flache Drogden-Schwelle im Öresund überwinden oder die 18 Meter flache Darß-Schwelle zwischen dem Darß und der dänischen Insel Falster. Dann gelangt es in die etwa 50 Meter tiefe Arkonasee nördlich von Rügen und

anschließend in die etwa 100 Meter tiefe Bornholmsee. In 60 Metern Wassertiefe trennt die Stolper-Schwelle die Bornholmsee von den tieferen Becken der Zentralen Ostsee (Östliche Gotlandsee), zum Beispiel dem Danziger Tief mit etwa 100 Metern Wassertiefe und dem Gotlandtief östlich von Gotland mit über 200 Metern Wassertiefe.

In der Zentralen Ostsee gibt es zwei getrennte Wasserkörper: von der Wasseroberfläche bis in 50–70 Meter Tiefe das salzarme Oberflächenwasser mit 7–8 Promille Salzgehalt, darunter das Tiefenwasser mit etwa doppelt so hohem Salzgehalt. Das Tiefenwasser hat wegen dem höheren Salzgehalt eine höhere Dichte, es ist deshalb, volkstümlich ausgedrückt, schwerer als das Oberflächenwasser. Das leichtere Oberflächenwasser liegt wie ein Deckel über dem Tiefenwasser. Beide Wasserkörper werden durch eine Wassersicht getrennt, in welcher der Salzgehalt schnell mit der Tiefe zunimmt. Wegen dem sprunghaften Anstieg des Salzgehaltes in dieser Wassersicht

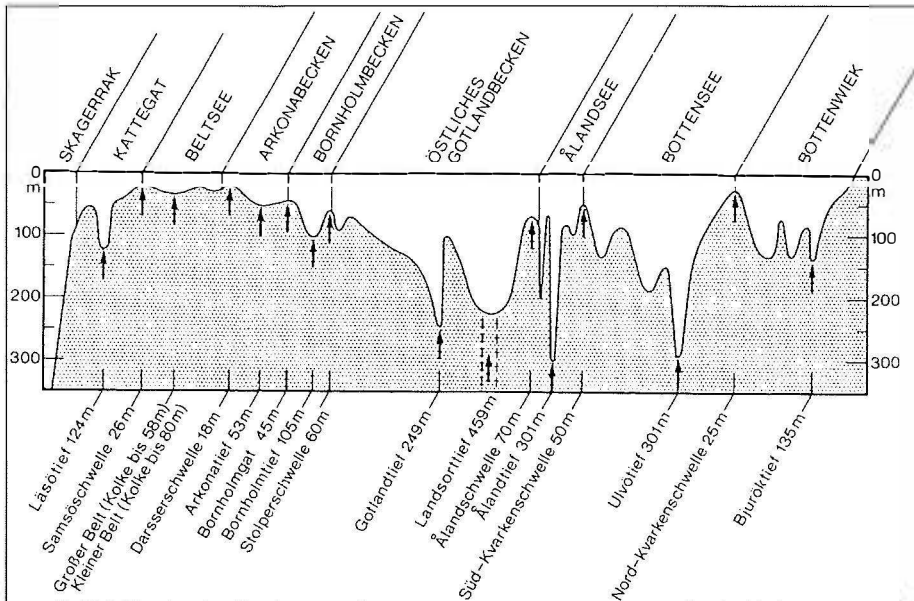


Abb. 2: Bodenprofil in der Längsachse der Ostsee mit Angaben der größten Tiefen in den Becken und der flachsten Tiefen auf den Schwellen zwischen den Becken. Lage des Schnittes siehe Abb. 1 (aus DIETRICH & KÖSTER 1974).

bezeichnet man sie als Salzgehalts-Sprungschicht (Abb. 3, oben).

Im oberflächennahen Wasser ermöglicht das Sonnenlicht den Pflanzen die Photosynthese. Dabei produzieren die Planktonalgen Sauerstoff. Zusätzlich erhält das Oberflächenwasser Sauerstoff beim Kontakt mit der Atmosphäre. Durch Verwirbelung (Turbulenz) innerhalb der Oberflächenschicht erfolgt eine wirkungsvolle Vermischung der Wassermassen. Deswegen gibt es im gesamten Oberflächenwasser bis hinunter zur Salzgehalts-Sprungschicht hohe Sauerstoffkonzentrationen von mehr als 7 Milliliter pro Liter. Die Salzgehalts-Sprungschicht verhindert, daß sich die Verwirbelung in größere Tiefen fortsetzt und daß größere Sauerstoffmengen von oben nach unten in das Tiefenwasser gelangen. Aber im Tiefenwasser wird durch die Atmung der dort am Meeresboden lebenden Tiere und Bakterien ständig Sauerstoff verbraucht. Deshalb gibt es im Tiefenwasser unterhalb der Salzgehalts-Sprungschicht nur geringe Sauerstoffkonzentrationen von weniger als 3 Milliliter pro Liter, und am Meeresboden kommt es zu Sauerstoffmangel (Abb. 3, unten).

Sauerstoffimporte in die Ostsee mit Salzwater aus der Nordsee

Daß es im Gegensatz zum Schwarzen Meer im Tiefenwasser der Ostsee überhaupt Sauerstoff gibt, verdankt die Ostsee dem Sauerstoffimport mit salzigem Wasser aus Skagerrak und Kattegat, also letztlich aus der Nordsee. Um als Transportmittel für Sauerstoff zu dienen, muß das einströmende Wasser so salzig und damit so »schwer« sein, daß es nach Überwindung der flachen Beltseeschwellen der Schwerkraft gehor-

chend hangabwärts in die tiefen Becken der Ostsee fließt. Dort verdrängt es das »alte«, sauerstoffarme oder sauerstofflose Bodenwasser, sofern es salziger als dieses ist.

Öfter als 60mal pro Jahr kann es Perioden mit Wassereinstrom aus dem Kattegat in die Ostsee geben. Aber gewöhnlich ist dabei das einströmende Wasser nicht salzig genug, um als Transportmittel für die Erneuerung des Tiefenwassers in der Ostsee zu

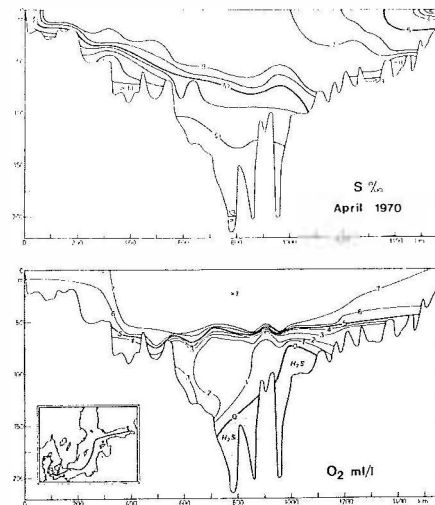


Abb. 3: Oben: Salzgehalt im Wasser der Ostsee im April 1970. Zwischen den Linien für 8 und für 11 Promille Salzgehalt liegt die Salzgehalts-Sprungschicht. Unten: Sauerstoffkonzentrationen im Wasser der Ostsee im August 1969, also vor dem Salzwassereintruch, der im November 1969 Salz und Sauerstoff in die Ostsee importierte. Dieser Längsschnitt durch die Ostsee liegt anders als der in Abb. 2 dargestellte Längsschnitt (aus GRASSHOFF 1974).

dienen. Nur wenn besondere Wetterlagen, wie sie nicht jedes Jahr auftreten, wochenlang auf Nordsee und Ostsee einwirken, fließt besonders viel besonders salziges Wasser zur Ostsee. Ozeanographen reden nur dann von einem »Salzwassereintruch«, wenn mehr als fünf Tage lang Wasser mit mehr als 17 Promille Salzgehalt über die Darßer Schwelle zur Ostsee strömt (MATTHÄUS 1992). »Salzwassereintruch« ist die sprachlich nicht ganz korrekte Bezeichnung für ein größeres Einstromereignis (englisch: major inflow). Zwischen 1897 und 1976 haben die täglich durchgeführten Beobachtungen des früher südwestlich von der Darßer Schwelle stationierten dänischen Feuerschiffes »Gedser Rev« nicht weniger als 90 solcher Salzwassereintrüche dokumentiert (Abb. 4).

Oft, aber nicht immer erfolgt ein solcher Salzwassereintruch, nachdem es zuvor kräftigen Ausstrom aus der Ostsee gegeben hat und nachdem dadurch der Meeresspiegel der Ostsee um etwa 30 Zentimeter abgesunken ist. Durch diesen Prozeß wird in der Ostsee Raum für einströmendes Wasser geschaffen. Zu Beginn des Einstromereignisses, in der Vorphase, ist das in die Ostsee einströmende Wasser noch nicht besonders salzig, denn es stammt aus der Beltsee und aus dem südlichen Kattegat. Aber es macht dort Platz für nachströmendes salzigeres Wasser. Als Hauptphase bezeichnet man den eigentlichen Salzwassereintruch, wenn das einströmende Wasser mehr als 17 Promille Salzgehalt hat. Der Meeresspiegel der Ostsee steigt während eines Einstromereignisses oft um einen halben Meter an. Die vorstehenden Angaben verallgemeinern den Ablauf bei einem größeren Salzwassereintruch. Aber bei jedem Ereignis sind die Veränderungen des Meeresspiegels anders, jedesmal wurde ein anderer zeitlicher Ablauf beobachtet (MATTHÄUS & FRANCK 1992).

Wenn das bei einem Salzwassereintruch einströmende Salzwater die etwa 50 Meter tiefe Arkonasee passiert hat, füllt es das Becken der etwa 100 Meter tiefen Bornholmsee auf. Die dann folgenden Salzwassermassen fließen aus der Bornholmsee in 60 Meter Wassertiefe über die Stolper Schwelle ab und strömen dann teilweise in das etwa 100 Meter tiefe Danziger Tief, hauptsächlich aber hangabwärts in die über 200 Meter tiefen Becken des Östlichen Gotlandbeckens (Abb. 2).

In typischen Fällen braucht das einströmende Salzwater nur 25 Tage für die 240 Kilometer von der Darßer Schwelle bis zum Bornholmstief, der tiefsten Stelle in der Bornholmsee (NEHRING & FRANCKE 1981). Über der Darßer Schwelle hat das einströmende Salzwater einen hohen Sauerstoffgehalt von 7–8 Milliliter pro Liter, und auch im Bornholmstief enthält das eingeströmte Wasser nicht selten noch hohe Sauerstoffkonzentrationen bis 6 Milliliter pro Liter. Bodentiere

und Bodenbakterien im Bornholmtief verbrauchen davon innerhalb eines Jahres 1,3 bis 2,4 Milliliter Sauerstoff pro Liter (NEHRING 1981). Der Sauerstoff reicht also für 2 bis 3 Jahre. Für den 640 Kilometer weiten Weg von der Darßer Schwelle bis zum Gotlandtief in der Zentralen Ostsee braucht das Wasser jedoch mindestens 4, im allgemeinen 8–9 Monate. Auf dieser langen Reise erniedrigt sich die Sauerstoff-Konzentration im Bodenwasser. Im Gotlandtief mißt man nach einem Salzwassereintrich in der Regel nur noch 1,5 bis 2 Milliliter Sauerstoff pro Liter. Bei diesen geringen Konzentrationen ist allerdings die Sauerstoffzehrung durch Lebensprozesse geringer. Sie wird auf jährlich 0,5 bis 1 Milliliter pro Liter geschätzt. Deshalb reicht nach dem Austausch des Bodenwassers auch hier der Sauerstoff für 2 bis 3 Jahre. Sauerstoffmangel ist also auf jeden Fall vorprogrammiert, wenn nicht mindestens alle zwei Jahre ein Salzwassereintrich stattfindet, der intensiv genug ist, um das stagnierende Bodenwasser auszutauschen.

WOLF (1972) hat vorgeschlagen, Salzwassereintriche mit einer Ordnungszahl zu bewerten, die sich aus der Dauer des Ein-

stroms und aus dem Salzgehalt beim Feuerschiff »Gedser Rev« ergibt. Diese Ordnungszahlen sind in Abb. 4 (unten) als Intensitätsindex Q dargestellt worden. Einen Überblick über die 24 intensivsten Salzwassereintriche im Zeitraum 1897 bis 1976 gibt Tab. 1. Sehr intensive Salzwassereintriche mit 3,3 und 4,9 Milliarden Tonnen Salzimport fanden 1913 und 1951 statt. Bei 7 weiteren großen Salzwassereintrichen war die Menge des während der Hauptphase einströmenden Salzwassers größer als 100 Kubikkilometer, und es wurden jeweils mehr als 2 Milliarden Tonnen Salz und mehr als 100000 Tonnen Sauerstoff in das Tiefenwasser der Ostsee importiert.

Voraussetzung für die Wirkung eines Salzwassereintrichs auf den Salzgehalt und auf die Sauerstoff-Konzentration im Wasser über dem Meeresboden ist, daß der Salzgehalt des einströmenden Wassers höher sein muß als der Salzgehalt des »alten« Wassers, welches bisher am Boden der Ostseebecken stagnierte. Nur wenn das einströmende Wasser dichter, also, volkstümlich ausgedrückt, schwerer als das »alte« Bodenwasser ist, nur dann kann dieses durch das ein-

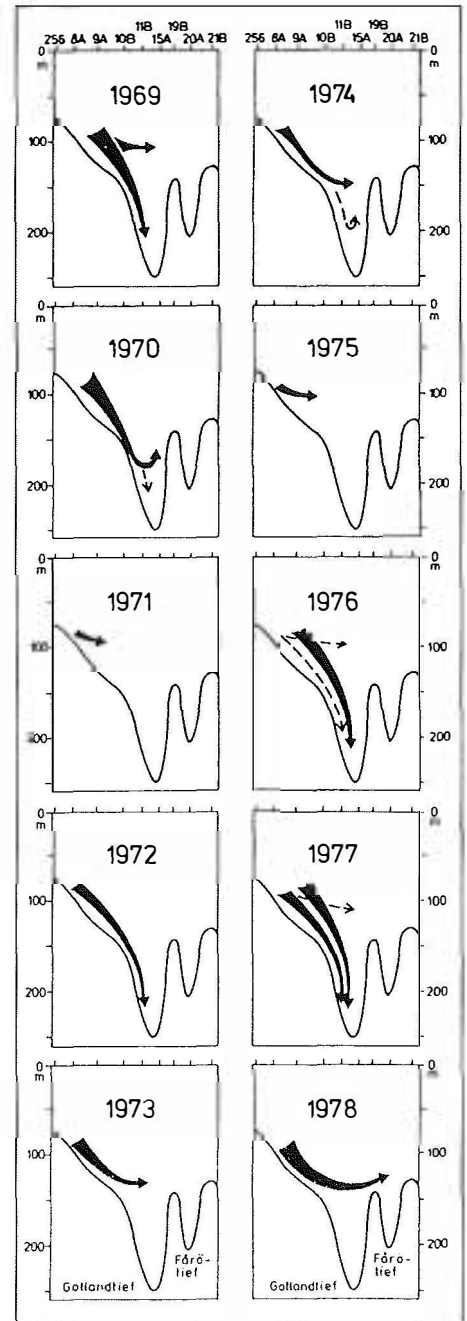


Abb. 5: Schematische Darstellung des Einstroms von salzreichem Wasser entweder in die bodennahe Wasserschicht oder in die Zwischenwasserschicht (in etwa 100 Meter Wassertiefe) in der Östlichen Gotlandsee. Dargestellt werden die Verhältnisse bei Salzwassereintrichen in den Jahren 1969 bis 1978 (aus NEHRING & FRANCKE 1981).

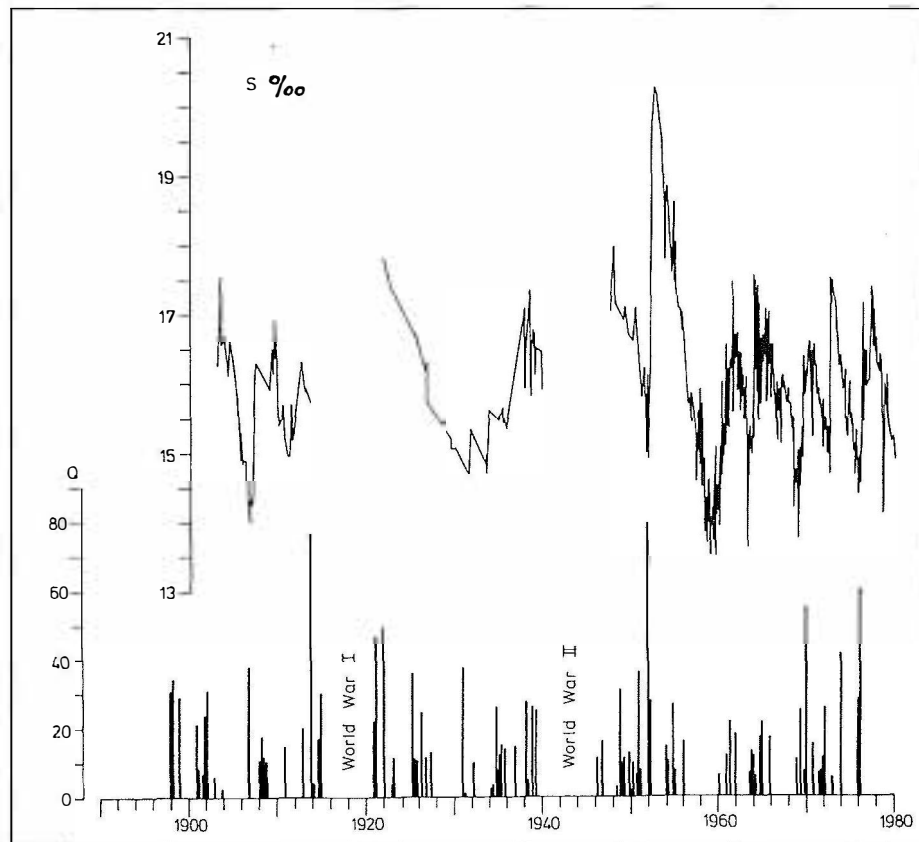


Abb. 4: Salzwassereintriche, die 1897 bis 1977 am Feuerschiff Gedser Rev registriert wurden, und ihre Auswirkung auf den Salzgehalt im Tiefenwasser des Bornholmtiefs. Obere Darstellung: Salzgehalt im Bornholmtief in 80 Meter Tiefe. Untere Darstellung: Häufigkeit der Salzwassereintriche und ihre Intensität, ausgedrückt durch den empirisch definierten Intensitätsindex Q:

$$Q = 50 \left(\frac{k-5}{25} + \frac{S-17}{7} \right); k = \text{Dauer des Einstroms (Tage); } S = \text{Salzgehalt (Promille),}$$

gemittelt über die Wassersäule beim Feuerschiff Gedser Rev (aus MATTHÄUS & FRANCK 1988).

strömende »frische« Wasser verdrängt werden. Im Laufe der Jahre veränderte sich der Salzgehalt am Boden der Ostseebecken erheblich (Abb. 4, oben). Deshalb ist der Intensitätsindex Q allein genommen kein sicheres Kriterium für die Wirkung eines Salzwassereintrichs auf die Salz- und Sauerstoff-Verhältnisse am Meeresboden. Q bezieht sich im übrigen nur auf die Messungen in der Gegend der Darßer Schwelle. Dabei wird nicht

Tab. 1: Die 24 intensivsten Salzwassereintritte in die Ostsee, beobachtet am Feuerschiff Gedser Rev (Darßer Schwelle) in den Jahren 1897 bis 1976 (69 Beobachtungsjahre; Beobachtungslücken in Kriegsjahren und in Eiswintern). Aufgenommen wurden alle Einstromereignisse mit einem Intensitätsindex Q größer als 25. Angaben zu Salzgehalt und Temperatur des einströmenden Wassers (in der Hauptphase) nach FRANCK & al. (1987). Wassermengen (errechnet aus dem Anstieg des Meeresspiegels in der Ostsee) und jeweils importierte Salz mengen (Wassermenge multipliziert mit dem Salzgehalt bei Gedser Rev) ergänzt nach MATTHÄUS & FRANCK (1992).

Jahr	Datum	Dauer Tage	Salz Prom.	Temperatur Grad/Celsius	Volumen (km ³) Vor-/Hauptphase	Salz 10 ⁹ t	Index Q	Rang
1897	(20.11.- 4.12)	15	18,5	7,2			31	15
1898	(20. 1.- 7. 2.)	19	17,9	3,6			34	12
1898	(7.12.-22.12.)	16	18,0	6,3			29	17
1902	(7. 1.-22. 1.)	16	18,3	3,2			31	13
1906	(26.11.-13.12.)	18	18,7	6,8	125 120	2,2	38	8
1913	(18.11.-16.12.)	29	21,0	7,7	194 157	3,3	77	2
1914	(2.12.-15.12.)	14	18,7	5,7			30	16
1921	(17. 1.-31. 1.)	15	20,7	3,4	228 99	2,0	47	6
1921/2	(16.12.- 6. 1.)	22	19,2	4,0	77 235	4,5	49	5
1925	(3. 1.-13. 1.)	11	20,3	5,1			36	11
1930	(10.11.-20.11.)	11	20,5	8,4	144 107	2,2	37	9
1934	(12.10.-21.10.)	10	19,2	12,7			26	22
1938	(24. 1.- 6. 2.)	14	18,3	3,1			27	20
1938	(12.10.-22.10.)	11	19,0	12,4			26	23
1948	(18. 9.-26. 9.)	9	20,2	13,4			31	14
1950	(28. 9.-15.10.)	18	18,4	13,3	153 31	0,6	36	10
1951	(25.11.-19.12.)	25	22,5	7,5	99 218	4,9	79	1
1952	(10. 1.-20. 1.)	11	19,2	4,0			28	19
1954	(20. 9.- 3.10.)	14	18,2	12,8			27	21
1969	(29.10.-25.11.)	28	18,2	9,4	78 151	2,7	55	4
1971	(13.12.-29.12.)	17	17,2	5,3			25	24
1973	(13.11.-29.11.)	17	19,4	6,6	95 112	2,2	41	7
1975	(6.12.-20.12.)	15	18,1	5,2			28	18
1975/6	(22.12.-14. 1.)	24	20,1	4,1	117 115	2,3	60	3

berücksichtigt, daß bei Salzwassereintritten regelmäßig auch sehr salziges Wasser den kurzen Weg vom Kattegat durch den Öresund zur Arkonasee nimmt.

Am Boden des Bornholmtiefs bewirkten sieben Perioden mit starken Salzwassereintritten (1904, 1923, 1939, 1949, 1965, 1974, 1978) einen Anstieg des Salzgehalts auf mehr als 17 Promille (Abb. 4, oben). Nach einem solchen Anstieg des Salzgehaltes hätte jeweils nur ein Salzwassereintritt, der noch salzigeres Wasser importiert, zu einem Austausch des Bodenwassers geführt. Dafür war jedoch das Wasser bei späteren Salzwassereintritten nicht salzig genug. Es erreichte den Meeresboden nicht, sondern schob sich in geringeren Wassertiefen dort in die Sprungschicht ein, wo der entsprechende Salzgehalt, genauer gesagt: wo die entsprechende Dichte gegeben war. Für die Östliche Gotlandsee und für den Zeitraum 1969 bis 1978 wird das schematisch in Abb. 5 erläutert. Nur 1969, 1972, 1976 und 1977 gab es einen Wasseraustausch am Boden des Gotlandtiefs.

Nach jedem Wasseraustausch vermischt sich das salzige Bodenwasser allmählich mit den weniger salzigen darüber liegenden Wassermassen. In Perioden ohne starke Salzwassereintritte wie zwischen 1903 und 1906, zwischen 1922 und 1931, zwi-

schen 1952 und 1958 und zwischen 1976 und 1992 erniedrigte sich der Salzgehalt am Boden des Bornholmtiefs bis auf 14–15 Promille (Abb. 4, oben). Danach würde sogar ein unbedeutender Salzwassereintritt, der Wasser mit weniger als 16 Promille Salzgehalt in das Bornholmtief bringt, gereicht haben, damit dort das »alte« stagnierende Bodenwasser verdrängt wird.

Extrem waren die Verhältnisse nach dem größten bisher beobachteten Salzwassereintritt vom 25. November bis zum 19. Dezember 1951. Der Salzgehalt am Boden des Bornholmtiefs stieg daraufhin auf über 20 Promille. Sieben Jahre lang (von 1952 bis 1959) erniedrigte sich anschließend der Salzgehalt fast kontinuierlich. Erst 1960 und 1961 sorgten einige nicht sehr intensive Salzwassereintritte erneut für einen Anstieg des Salzgehaltes (Abb. 4).

Intensität und Häufigkeit der Salzwassereintritte waren wohl in der ersten Hälfte des Jahrhunderts nicht wesentlich anders als in den letzten vierzig Jahren, auch wenn es von Jahrzehnt zu Jahrzehnt große Unterschiede gibt. Bemerkenswert ist jedoch, daß noch nie eine so lange Periode ohne größere Salzwassereintritte beobachtet wurde wie zwischen 1977 und 1993. In acht aufeinanderfolgenden Jahren zwischen 1983 und 1991 gab es überhaupt keine Salzwasser-

einbrüche, abgesehen von einem ungewöhnlichen Ereignis im September 1988, als sauerstoffarmes Tiefenwasser aus der Beltsee in die Ostsee vordrang. Ein richtiger Salzwassereintritt wurde erst wieder im Januar 1993 beobachtet. Die Entwicklung der Sauerstoff- und Schwefelwasserstoff-Verhältnisse in den vergangenen 15 Jahren muß deshalb vor dem Hintergrund ungewöhnlicher Wetterverhältnisse betrachtet werden.

Sauerstoffprobleme im Bornholmtief: Dort lebten früher Muscheln am Meeresboden

Das 100 Meter tiefe Becken der Bornholmssee östlich von Bornholm wird am häufigsten von Salzwassereintritten erreicht und hat von daher gute Chancen für eine regelmäßige Erneuerung des Tiefenwassers. Leider lassen sich die Umweltbedingungen im Bornholmtief in der ersten Hälfte des Jahrhunderts nur bruchstückhaft aus Sauerstoffmessungen, aus Untersuchungen der Bodenfauna und aus sedimentologischen Befunden rekonstruieren. Es gibt keine kontinuierlichen Aufzeichnungen.

ANDERSIN et al. (1978) haben zusammengestellt, wie früher die Sauerstoff- und Bodenfauna-Verhältnisse im Bornholmtief waren. Schon in den Jahren 1905 und 1906 gab es im Bodenwasser nur null bis 1 Milliliter Sauerstoff pro Liter. Niedrige Sauerstoffwerte um 2 Milliliter pro Liter wurden auch in einigen Jahren nach 1933 gemessen. Aber dazwischen liegen lange Perioden, die nicht durch Messungen abgedeckt werden. Es läßt sich deshalb aus Sauerstoffmessungen allein kein vollständiges Bild der Sauerstoffverhältnisse in der ersten Hälfte des Jahrhunderts entwerfen.

Gut dokumentiert ist dagegen, daß in der ersten Hälfte des Jahrhunderts im Bornholmtief in 65 bis 95 Metern Tiefe eine Bodentiergemeinschaft lebte, die von den Muscheln *Macoma calcarea* und *Astarte borealis* dominiert wurde (Tab. 2–3). Beide Muschelarten wurden schon 1908 gefunden. 1921 wurden 30 Individuen von *Macoma calcarea* pro Quadratmeter gemeldet, die Biomasse der Bodenfauna insgesamt betrug 13 g pro Quadratmeter. Untersuchungen 1925 bis 1931 sind von HAGMEIER in einem nachgelassenen Manuskript zusammengefaßt worden (in RUMOHR 1987). HAGMEIER definiert eine »*calcarea-Scoloplos*-Variante der *Macoma calcarea* Endobiose«, welche in Tiefen größer als 65 Meter den Meeresboden im Bornholmtief besiedelt. Die Biomasse der Bodenfauna insgesamt betrug bis zu 126 g pro Quadratmeter. Häufig war der Polychaet *Scoloplos armiger* (Tab. 2).

HAGMEIER schreibt ausdrücklich, daß 1931 *Macoma calcarea* auch im Danziger Tief vorgekommen sei, wenn auch nicht regelmäßig und nicht in größeren Mengen. Aber bei den 1948 bis 1950 durchgeführten Untersu-

Tab. 2: Häufigkeit der Bodenfauna (Individuen pro Quadratmeter) und Gesamtbiomasse der Bodenfauna im Bornholmbecken tiefer als 63 Meter, Beprobung 1929. Insgesamt wurde eine Fläche von 3 Quadratmetern beprobt (nach HAGMEIER 1930).

Stationsnummer	29	14	28	32	27	16-17
Geogr. Breite ca.	55°27	55°12	55°21	55°51	55°36	55°00
Geogr. Länge ca.	14°50	15°32	15°40	15°15	15°41	16°20
Wassertiefe (Meter)	69-79	94-96	95	69-76	67-72	63-70
Aktinie: <i>Edwardsia</i> sp.			5			2
Würmer: Nemertinen	++	5	33	14	2	8
<i>Priapulus caudatus</i>	+		3			
<i>Halicryptus spinulosus</i>	++	5	8	13	43	23
Polychaeten: <i>Harmothoe sarsi</i>	+					
<i>Scoloplos armiger</i>	205	78	40	39	40	50
<i>Aricidea suecica</i>				21	5	2
<i>Terebellides stroemi</i>	+			10		8
Krebse: <i>Pontoporeia femorata</i>	27	3	15	16	22	12
<i>Pontoporeia affinis</i>				3		
<i>Bathyporeia pilosa</i>				6		
<i>Diastylis rathkei</i>		23	78		2	
Muscheln: <i>Astarte borealis</i>		5	48	237	3	288
<i>Macoma calcarea</i>	346	160	28	61	268	55
<i>Macoma balthica</i>	33			1		
Summe Individuen pro m ²	>611	279	258	421	385	448
Biomasse (Feuchtgew. pro m ²)	193 g	103 g	34 g	43 g	79 g	42 g

Was lehren uns diese Ergebnisse von Bodengreiferuntersuchungen? Die gefundenen Muscheln waren bis zwei Zentimeter groß. Wir wissen nicht, wie schnell sie bei den niedrigen Wassertemperaturen am Boden der Bornholmsee wuchsen. Aber vermutlich dauerte es Jahrzehnte, bis sie so ansehnliche Schalengrößen erreichten. Einige Monate Sauerstoffmangel können diese Muscheln überstehen, indem sie ihre Schalen verschließen und auf einen Ruhestoffwechsel ohne Sauerstoff umschalten. Aber auf Dauer können sie nicht ohne Sauerstoff leben. Grundsätzlich zeigen also langlebige Muscheln an, daß langfristig günstige Sauerstoffbedingungen geherrscht haben. Zweifel, daß die Sauerstoffbedingungen in der ersten Hälfte des Jahrhunderts langfristig überall im Bornholmtief günstig waren, kommen jedoch von sedimentologischen Untersuchungen an sogenannten »Sedimentkernen« vom Ostseeboden, das sind Sedimentsäulen, in denen man Schicht für Schicht die Verhältnisse in der Vergangenheit rekonstruieren kann.

chungen von DEMEL & MANKOWSKI (1951) wurde *Macoma calcarea* im Danziger Tief nicht mehr gefunden (Abb. 6). Der nördliche Teil des Bornholmtiefs, also die Gegend östlich der Insel Christiansö, wird von den Autoren mit einem Friedhof verglichen, denn nur leere Schalen von *Macoma calcarea* und *Astarte borealis* wurden dort gefunden. Die Autoren vermuten eine Vergiftung der Gegend durch die Versenkung von Giftgasmunition, doch reicht vermutlich die Verschlechterung der Sauerstoff-Verhältnisse aus, um das Verschwinden der Muscheln zu erklären. Aus dem Bornholmtief wurde die »*Macoma calcarea*-Gemeinschaft« zuletzt 1951-1952 gemeldet (Tab. 3). Dabei wur-

den auch zahlreiche lebende Muscheln mit Schalengrößen über 10 Millimeter gefunden (DEMEL & MULICKI 1954). Vier Jahre später, 1956, war zwar die Biomasse der Bodenfauna insgesamt noch hoch, aber die Muschel *Macoma calcarea* wurde nicht mehr lebend gefunden. 1958 waren auch die *Astarte*-Muscheln im Bornholmtief ausgestorben. Allenfalls wurden später hin und wieder winzige Exemplare gefunden, deren Ansiedlungsversuche scheiterten.

JONSSON & et al. (1990) stachen mit besonders dafür geeigneten Geräten an vielen Stellen der Ostsee solche Sedimentsäulen aus dem Meeresboden aus und gingen dabei sehr vorsichtig vor, damit in den schlammigen Sedimenten die feinen Schichten erhalten bleiben sollten. An vielen Stellen der tieferen Ostseegebiete fanden sie eine Feinschichtung von abwechselnd grauen und schwarzen Sedimentlagen. Jede grauschwarze Doppelschicht war etwa zwei Millimeter dick. Vermutlich hatte sich jedes Jahr nach der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons

Tab. 3: Häufigkeit der Bodenfauna (Individuen pro Quadratmeter) und Gesamtbiomasse der Bodenfauna im Bornholmbecken tiefer als 80 Meter, nach der Beprobung 1951 (7 Stationen) und 1952 (4 Stationen). Daten von DEMEL & MULICKI (1954) zusammengestellt von ANDERSIN & al. (1978).

Jahr	1951	1952
Würmer: Nemertinen	3	17
<i>Priapulus caudatus</i>		1
<i>Halicryptus spinulosus</i>	1	
Polychaeten: unbestimmt		1
<i>Harmothoe sarsi</i>	1	
<i>Scoloplos armiger</i>	23	45
<i>Pygospio elegans</i>		+
Krebs: <i>Diastylis rathkei</i>	1	3
Muscheln: <i>Astarte borealis</i>	61	85
<i>Macoma calcarea</i>	10	15
Summe Individuen pro m ²	100	174
Biomasse (Feuchtgew. pro m ²)	15 g	13 g

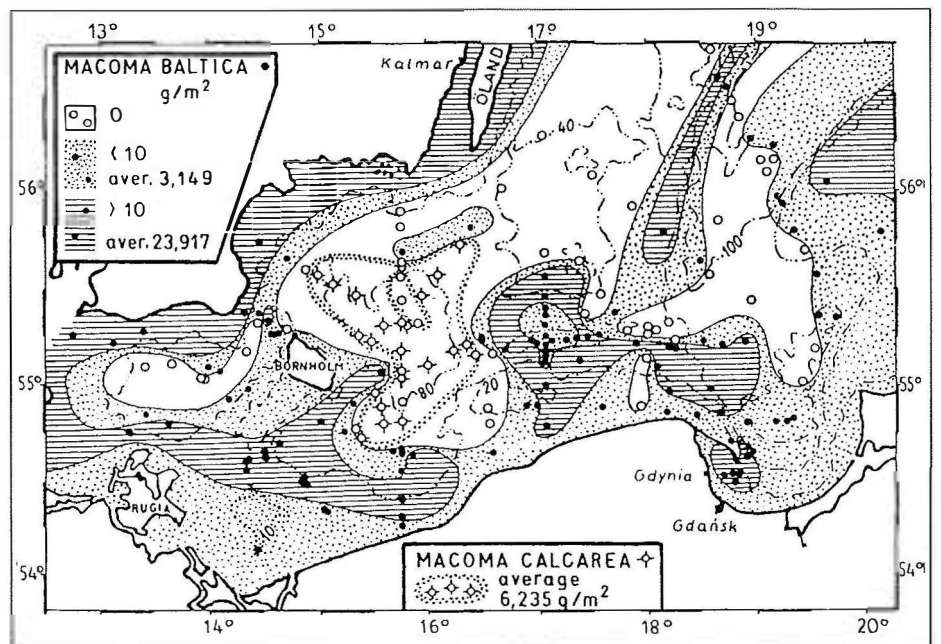


Abb. 6: Verbreitung der Muschel *Macoma calcarea* im Bornholmtief (Sternchen innerhalb einer punkterasterten Linie) und Verbreitung der Muschel *Macoma baltica* in der südlichen und südöstlichen Ostsee (Flächen mit Querstreifung: über 10 g Biomasse pro Quadratmeter). Zusammenfassung von Daten aus den Jahren 1948 bis 1952 (aus DEMEL & MULICKI 1958).

eine solche Schicht am Meeresboden abgelagert. Die ungestörte Schichtenfolge ist der Beweis, daß es dort keine Besiedlung mit solchen Bodentieren gegeben hat, die wie Muscheln den Boden durchwühlen. Daraus schließt man auf schlechte Sauerstoffverhältnisse. Zwei der von JONSSON et al. (1990) untersuchten Sedimentsäulen stammen aus dem Bornholmtief. Auch in diesen beiden Sedimentsäulen vom Meeresboden in 88 und 92 Metern Wassertiefe wurde eine ungestörte Feinschichtung bis in 40 Zentimeter Sedimenttiefe angetroffen. Mindestens 200 Sedimentlagen wurden gezählt. Das spricht für einige hundert Jahre ungestörter Sedimentation. An diesen Stellen im Bornholmtief können also auch früher keine großen *Macoma calcarea* und *Astarte borealis* gelebt haben, denn diese Muscheln hätten die Feinschichtung zerstört. Das spricht für langfristigen oder häufig auftretenden Sauerstoffmangel.

Da aber von anderen Stationen im Bornholmtief das Vorkommen von großen Muscheln dokumentiert ist, muß es dort in der ersten Hälfte des Jahrhunderts ein Mosaik von Flächen mit verschiedenen Umweltbedingungen gegeben haben. Vielleicht befand sich über kleinen Mulden längere Zeit sauerstoffloses Wasser und verhinderte, daß langlebige Muscheln dort lebten. Es gab aber vielleicht auch kleine Erhebungen mit besseren Sauerstoffverhältnissen, wo über Jahrzehnte hin gute Lebensmöglichkeiten für Muscheln bestanden. Diese Deutung ist spekulativ und kann gegenwärtig nicht abgesichert werden. HAGMEIER (1930 und in RUMOHRE 1987), DEMEL & MANKOWSKI (1951) und DEMEL & MULICKI (1954) sammelten die Bodenfauna nur jeweils an weniger als zehn Stationen. JONSSON et al. (1990) berichten nur über zwei Sedimentsäulen aus dem Bornholmtief. Die sich widersprechenden Ergebnisse von punktförmigen benthokundlichen und von punktförmigen sedimentologischen Untersuchungen dürfen gegenwärtig nicht jeweils auf das gesamte Bornholmtief extrapoliert werden.

Auch die Sauerstoffmessungen, die von ANDERSIN et al. (1978) referiert werden, zeigen, daß ab 1949 die Verhältnisse im Bornholmtief schlecht wurden. Nach einem Salzwassereintrich im September 1948 wurden im Bodenwasser des Bornholmtiefs zwar überwiegend noch 1–3 Milliliter Sauerstoff pro Liter gemessen, aber manchmal wurde auch kein Sauerstoff im Bodenwasser gefunden. Auch wenige Jahre nach dem großen Salzwassereintrich vom November/Dezember 1951 lagen die Sauerstoffkonzentrationen im Bodenwasser des Bornholmtiefs nicht höher als 3 Milliliter pro Liter. Bis 1958 sanken die Sauerstoffkonzentrationen auf weniger als 2 Milliliter pro Liter ab. Oft wurde bei den Messungen auch kein Sauerstoff angetroffen.

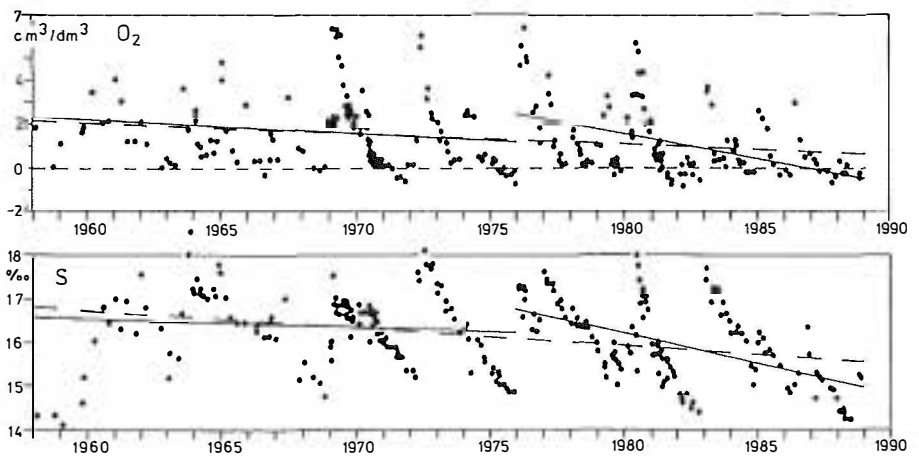


Abb. 7: Lebensbedingungen im Bodenwasser des Bornholmtiefs 1958 bis 1989. Oben: Sauerstoffkonzentration ($\text{cm}^3/\text{dm}^3 = \text{Milliliter pro Liter}$) und Schwefelwasserstoff-Konzentrationen (werden als negative Sauerstoff-Äquivalente dargestellt). Unten: Salzgehalt (aus NEHRING & MATTHÄUS 1991).

FONSELIUS (1981) hat registriert, daß zwischen 1958 und 1979 nicht weniger als 16mal im Bornholmtief Wasseraustausch stattfand, was jedesmal eine Erhöhung der Sauerstoffkonzentrationen im Bodenwasser bewirkte. Die wichtigeren Ereignisse lassen sich in Abb. 7 erkennen. Mindestens 1961, 1965, 1967, 1969, 1973, 1979 und noch einmal 1985 kam es im Bornholmtief zur Wiederbesiedlung von vorübergehend »toten« Flächen. Aber bald danach starb jedesmal die Fauna wegen des Sauerstoffmangels wieder ab. Mindestens dreimal (1971, 1975, 1979) trat Schwefelwasserstoff im Bodenwasser auf. Nach 1981 war Schwefelwasserstoff die Regel. Nach 1987 gab es so gut wie keine Bodenfauna mehr. Erst im Februar und März 1991 fand wieder ein schwacher Salzwassereintrich statt, der das stagnierende »alte« Tiefenwasser verdrängte. Sauerstoffkonzentrationen von 5 Milliliter pro Liter wurden gemessen (NEHRING & MATTHÄUS 1992), ebenso nach einem größeren Salzwassereintrich im Januar 1993 (MATTHÄUS 1993).

Diese deprimierende Zusammenstellung über den Sauerstoffmangel am Boden der Bornholmsee zeigt, daß gegenüber der ersten Hälfte des Jahrhunderts die Lebensbedingungen im Bornholmtief nach 1948 schlechter geworden sind. Die Perioden mit Sauerstoff im Bodenwasser sind kürzer geworden, die Stagnationsperioden länger. Langlebige Tiere wie die Muscheln *Macoma calcarea* und *Astarte borealis* kommen nicht mehr vor. Seit 1958 leben im Bornholmtief nur noch sporadisch einige wenige Arten kleiner Würmer und Krebse, die als Pioniere immer dann die ehemals »toten« Flächen besiedelten, wenn dort die Lebensbedingungen vorübergehend besser wurden. Es handelt sich um eine »Wiederbesiedlungsgemeinschaft«, die von LEPPAKOSKI (1975) als »*Scoloplos*-Gemeinschaft« bezeichnet wurde (Tab. 4). Sie besteht in erster Linie aus

dem Polychaeten *Scoloplos armiger*, dem schwimmfähigen Polychaeten *Harmothoe sarsi* und dem ebenfalls schwimmfähigen Krebs *Diastylis rathkei*. Diese Tiere sind kurzlebig und können innerhalb weniger Monate Nachkommen erzeugen.

Im Gotlandtief war der Meeresboden auch früher schon »fast tot«

Statistisch gesehen ist nur jeder zweite Salzwassereintrich, der das Bodenwasser im Bornholmtief austauscht, so intensiv, daß einige Monate später auch das Bodenwasser im über 200 Meter tiefen Gotlandtief von salzreichen und sauerstoffhaltigen Wassermassen erreicht wird. Deshalb waren schon immer dort die Sauerstoffverhältnisse schlechter als im Bornholmtief. Schon 1893 und ebenfalls in den Jahren 1902 bis 1907 wurden am Boden des Gotlandtiefs Sauerstoffkonzentrationen von nur 1 bis 2 Milliliter pro Liter gemessen. Aus den Jahren 1924 bis 1933 gibt es Meßwerte, die noch geringer sind, manche liegen fast bei Null. 1931 wurde erstmalig über das Auftreten von Schwefelwasserstoff im Bodenwasser berichtet. 1933 gab es dann nach einem Wasseraustausch aber auch wieder Sauerstoffkonzentrationen von 1 bis 4 Milliliter pro Liter (KALLE 1943).

HAGMEIER (in RUMOHRE 1987) fand 1925 im Gotlandtief eine grünbraune Schicht an der Oberfläche des Sedimentes, die auf Sauerstoff im Bodenwasser hindeutet. Die Bodenfauna bestand aus den Würmern *Scoloplos armiger*, *Harmothoe sarsi* und *Halicryptus spinulosus* (8,7 g Biomasse pro Quadratmeter) und aus Krebsen (5,3 g pro Quadratmeter). 1931 jedoch war das Sediment bis an die Oberfläche grau. Stellenweise wurde gar keine Fauna gefunden, an anderen Stellen gab es im Mittel nur 1,74 g Biomasse pro Quadratmeter. In dem Buch »Biology of the Seas of the U.S.S.R.« faßt ZENKEWITCH (1963)

zusammen, es handele sich beim Meeresboden der Östlichen Gotlandsee um eine »greatly impoverished zone« (Abb. 8). Es stand also auch schon in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts nicht gut um die Bodenfauna in diesen Ostseetiefen.

Nach 1954 wurde kaum noch Bodenfauna in Tiefen unterhalb von 130 Metern gefunden (ANDERSEN et al., 1978). Nach 1956 gab es am Boden des Gotlandtiefs keinen Sauerstoff mehr, nach 1957 wurde Schwefelwasserstoff registriert. Auch später waren zwar noch einige Salzwassereintrüche intensiv genug, um Sauerstoff bis an den Boden des Gotlandtiefs zu bringen: FONSELIUS (1981) registrierte elf solche Ereignisse bis 1980. Aber sechsmal kam es anschließend zum völligen Sauerstoffschwund und zum Auftreten von giftigem Schwefelwasserstoff. Deshalb konnte sich seit 1956 keine Bodenfauna mehr ansiedeln. Nach 1979 stiegen die Schwefelwasserstoffkonzentrationen

Tab. 4: Häufigkeit und Biomasse der Bodenfauna unterhalb von 75 Meter Wassertiefe im Bornholmtief. Mittel aus 42 Bodengreiferproben, die 1970 gesammelt wurden, nachdem 1969 eine Wiederbesiedlung stattgefunden hatte (nach LEPPÄKOSKI 1975).

	Häufigkeit Individuen pro m ²	Biomasse Feuchtgewicht pro m ²
Würmer: Nemertinen	+	+
<i>Priapulus caudatus</i>	2	0,09 g
<i>Halicryptus spinulosus</i>	1	+
Polychaeten: <i>Harmothoe sarsi</i>	79	0,95 g
<i>Scoloplos armiger</i>	1028	7,50 g
<i>Terebellides stroemi</i>	+	+
<i>Trochochaeta multisetosa</i>	24	0,15 g
<i>Heteromastus filiformis</i>	19	0,15 g
<i>Capitella capitata</i>	4	0,02 g
<i>Nephtys ciliata</i>	2	0,01 g
<i>Pholoe minuta</i>	1	+
Krebse: <i>Pontoporeia femorata</i>	1	0,01 g
<i>Diastylis rathkei</i>	4	0,01 g
Muscheln: junge <i>Macoma</i> sp.	9	0,02 g
Bodenfauna insgesamt	1174	9 g

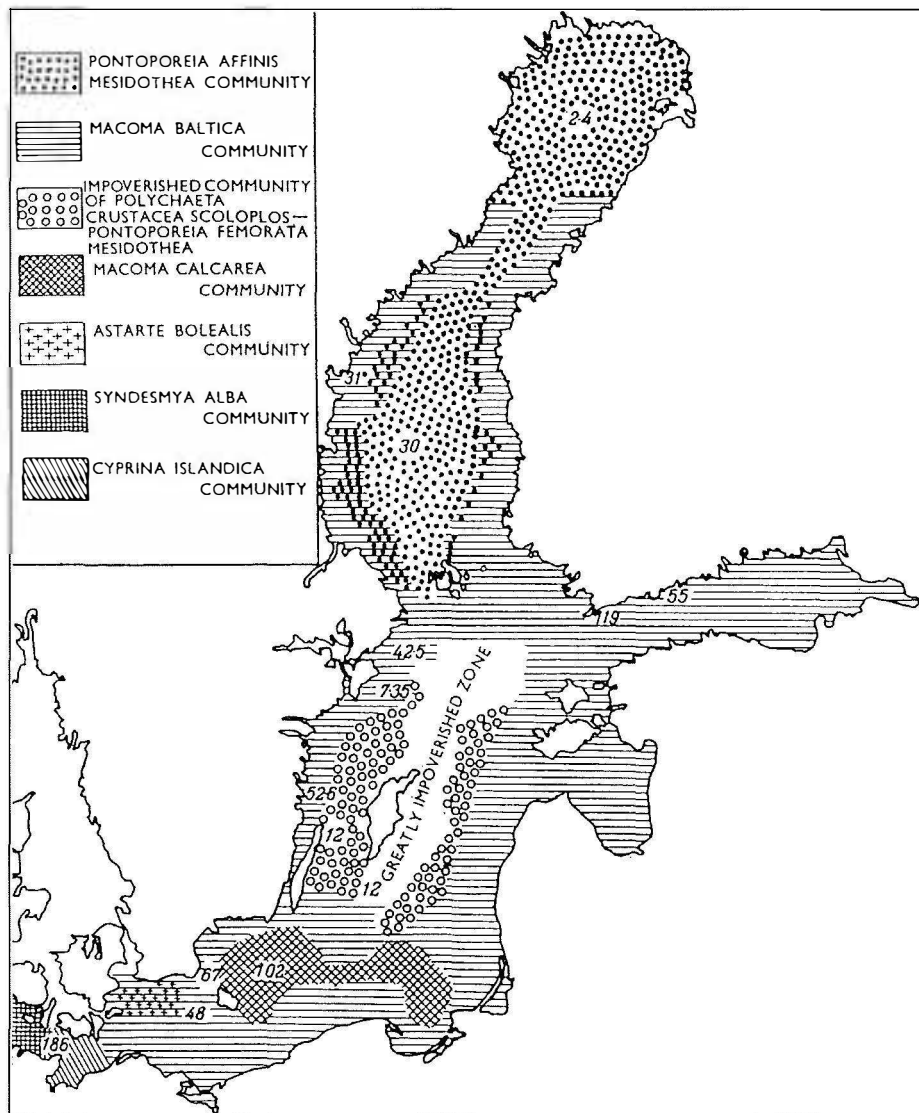


Abb. 8: Bodenfauna-Gemeinschaften der Ostsee, wie sie bis 1948 bekannt waren. Zahlen beziehen sich auf die Biomasse in g Feuchtgewicht pro Quadratmeter. *Mesidothea* = *Saduria*; *Astarte borealis* = *borealis*; *Syndesmya* = *Syndosmya* = *Abra*; *Cyprina* = *Arctica* (aus ZENKEVITCH 1963).

nicht nur im Bodenwasser. Die lebensfeindliche Schwefelwasserstoffzone im Tiefenwasser reicht vom Meeresboden nach oben bis 130 Meter Wassertiefe.

Flächenmäßig wurden dadurch die »toten« Meeresgebiete aber nicht viel größer, denn der Meeresboden fällt zu den tiefen Becken hin verhältnismäßig steil ab. Die Flächen am Ostseeboden, wo giftiger Schwefelwasserstoff im bodennahen Wasser auftritt, waren im Mittel der Jahre 1963 bis 1987 18 500 Quadratkilometer groß (ANDERSIN & SANDLER 1989). Ihre Ausdehnung schwankt von Jahr zu Jahr. Die Flächen haben sich, entgegen einer weit verbreiteten Meinung, seit 1969 kaum vergrößert (Abb. 9).

Im Januar 1993 fand nach 16 Jahren Stagnation wieder ein Salzwassereintruch statt, der das Gotlandtief erreichte. Gegenwärtig (im Sommer 1993) wird im Gotlandtief das »alte« sauerstofflose Bodenwasser gegen »frisches« Wasser ausgetauscht. Sauerstoffkonzentrationen zwischen 0,5 und 1,8 Milliliter pro Liter wurden gemessen (MATTHÄUS 1993).

In der Zentralen Ostsee verbessern sich in 80 bis 90 Metern Tiefe die Sauerstoffverhältnisse, wenn der Salzgehalt sinkt, und sie verschlechtern sich bei steigendem Salzgehalt

In der ersten Hälfte des Jahrhunderts wurde der Meeresboden der Zentralen Ostsee in 80 bis 90 Metern Wassertiefe von einer Bodentiergemeinschaft bewohnt, für die der Polychaet *Scoloplos armiger*, der Flohkrebs *Pontoporeia femorata* und die Assel *Saduria entomon* (früher *Mesidothea*) kennzeichnend waren, in den flacheren Bereichen auch die Muschel *Macoma baltica* (Abb. 6, Abb. 8). In den dreißiger Jahren war der Salzgehalt der Ostsee geringer als heute. 80 bis 90 Meter Wassertiefe gehörten damals

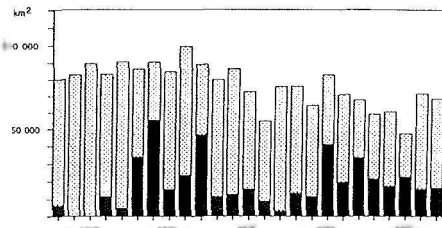


Abb. 9: Flächenausdehnung von Ostseegebieten mit Schwefelwasserstoff im Wasser über dem Meeresboden (schwarze Balken, Mittelwert 1963 bis 1987 = 18 500 Quadratkilometer) und Flächenausdehnung von Ostseegebieten, wo das Wasser über dem Meeresboden weniger als 2 Milliliter Sauerstoff pro Liter enthält (gerasterte Balken) (aus ANDERSIN & SANDLER 1989).

zum unteren Bereich der Salzgehalts-Sprungschicht, nicht wie später zum Bereich des sauerstoffarmen Tiefenwassers (Abb. 10). Wegen der Nähe zur Sprungschicht kam es in diesen Wassertiefen zu häufigem Wasserwechsel. Deshalb konnten sich dort auch langlebige Bodentiere halten. Solange diese Bodenfauna mit ansehnlicher Biomasse auftrat, verwühlte sie das Sediment, und es konnte sich keine Feinschichtung ausbilden.

Seit den dreißiger Jahren nimmt der Salzgehalt in der Ostsee zu. Das Tiefenwasser dehnte sich in dieser Zeit nach oben aus. Dadurch wurde zunehmend der Tiefenbereich zwischen 80 und 90 Metern vom sauerstoffarmen Tiefenwasser beeinflusst (Abb. 10). In den Jahren nach 1958 begann für diese Flächen eine Periode, in der abwechselnd etwas Sauerstoff vorhanden war und anschließend Sauerstoffmangel das Bodenleben wieder vernichtete. In den kurzen Perioden mit Sauerstoff konnten sich am Boden der Zentralen Ostsee, ähnlich wie im Bornholmtief, jeweils nur wenige kleine schnelllebige Tiere ansiedeln.

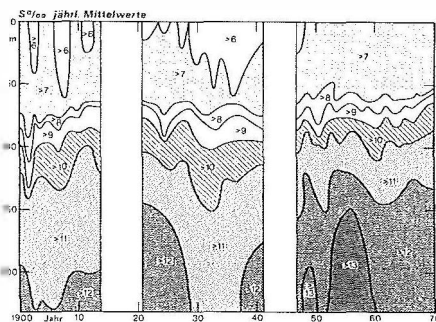


Abb. 10: Veränderungen im Salzgehalt der Östlichen Gotlandsee zwischen 1900 und 1970. Die Salzgehalts-Sprungschicht (zwischen 8 und 11 Promille Salzgehalt) verlagerte sich sowohl in der Zeit vor 1914 als auch zwischen 1931 und 1955 nach oben (nach FONSELIUS aus GRASSHOFF 1974).

Die Messungen der Umweltverhältnisse in der Ostsee, die von der Helsinki-Kommission seit 1979 koordiniert werden (GERLACH 1990; TRZOSINSKA et al. 1990), haben allerdings gezeigt, daß sich nach 1987 die Sauerstoffverhältnisse im Tiefenbereich 80 bis 90 Meter in der Östlichen Gotlandsee nicht weiter verschlechtert haben. Sie sind sogar in 100 Metern Wassertiefe etwas besser geworden (Abb. 11). Es gibt inzwischen möglicherweise erste Anzeichen dafür, daß sich in diesem Tiefenbereich erneut eine Bodenfauna ansiedelt. Genaueres werden wir erst erfahren, wenn auch die dritte Bewertung der Ostseeverhältnisse durch die Helsinki-Kommission vorliegt, die den Zeitraum 1989 bis 1993 umfassen soll.

Ursache für die sich verbessernde Sauerstoffsituation ist der seit 1978 wieder sinkende Salzgehalt in der Ostsee. Er erniedrigte sich im Oberflächenwasser der Östlichen Gotlandsee um etwa 0,5 Promille. Parallel mit der Erniedrigung des Salzgehaltes veränderte sich die Tiefenausdehnung der für die Ostsee charakteristischen Wassermassen. In der Östlichen Gotlandsee verlagerte sich das Zentrum der Salzgehalts-Sprungschicht zwischen 1978 und 1988 um ungefähr 10 Meter nach unten, also ungefähr von 70 auf 80 Meter Wassertiefe (MATTHÄUS 1990). Damit dehnte sich der Einflußbereich des sauerstoffhaltigen Oberflächenwassers nach unten aus, der sauerstoffarme Tiefenwasserbereich schrumpfte. Nach vielen Jahren mit Sauerstoffmangel wurde in den achtziger Jahren der Meeresboden in 80 bis 90 Metern Wassertiefe wieder häufiger von sauerstoffhaltigem Wasser aus dem Bereich der Sprungschicht erreicht. Selbst in 100 Metern Wassertiefe scheinen sich die Verhältnisse zu bessern (Abb. 11).

Wie wird sich die Situation jetzt verändern, nachdem im Januar 1993 erstmalig seit dem Winter 1975/76 wieder ein Salzwassereinbruch erfolgte? Der Salzgehalt in der Ostsee

wird vielleicht wieder ansteigen. Die Sprungschicht wird sich vielleicht wieder etwas nach oben verlagern. Dadurch könnten die Sauerstoffverhältnisse in 80 bis 90 Metern Wassertiefe wieder schlechter werden. Aber wie sich längerfristig der Salzgehalt in der Ostsee entwickeln wird, das wissen wir nicht, das hängt vom Wetter ab.

Schlußfolgerungen

Aus historischen Ostseedaten über die Häufigkeit und Intensität von Salzwassereinbrüchen, über die Tiefenlage der Salzgehalts-Sprungschicht, über den Salzgehalt und die Sauerstoffkonzentrationen im Wasser über dem Meeresboden, über die Bodenfauna und über die Feinschichtung im Sediment ergibt sich:

1. Berichte über Sauerstoffmangel gibt es schon aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Gravierender Sauerstoffmangel trat erstmalig in der Zeit 1948 bis 1957 auf und bewirkte das Absterben von langlebigen Muscheln zunächst im Danziger Tief, dann auch im Bornholmtief. Seitdem haben sich die Sauerstoffverhältnisse weiter verschlechtert.
2. Sauerstoffmangel entsteht, wie grundsätzlich jeder Mangel, wenn mehr verbraucht wird als von außen her oder durch Produktion nachgeliefert wird. Mangel kann deshalb auf zweierlei Weise behoben werden: indem man weniger verbraucht oder indem man die Zufuhr steigert. Wenn allerdings die Nachlieferungen ganz ausbleiben, hilft auch größte Sparsamkeit nichts.
3. Die Nachlieferung von Sauerstoff in das Tiefenwasser der Ostsee erfolgt überwiegend bei Salzwassereinbrüchen. Salzwassereinbrüche werden von besonderen Wetterlagen verursacht. Der Austausch des über dem Meeresboden stagnierenden sauerstofflosen Bodenwassers durch das bei Salzwassereinbrüchen zuströmende sauer-

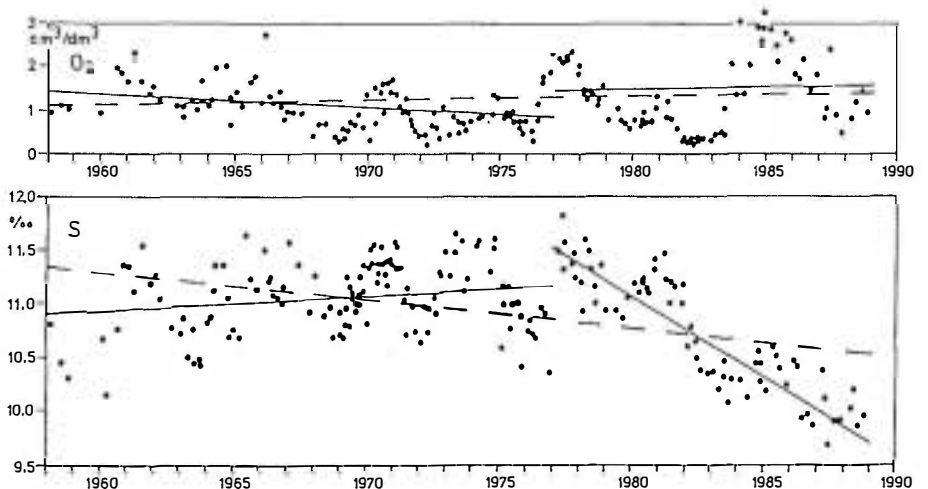


Abb. 11: Lebensbedingungen in der Zwischenwasserschicht in 100 Meter Wassertiefe in der Östlichen Gotlandsee (Station Gotlandtief) 1958 bis 1989. Oben: Sauerstoffkonzentration (Milliliter pro Liter). Unten: Salzgehalt (aus NEHRING & MATTHÄUS 1991).

stoffhaltige Wasser erfolgt grundsätzlich häufiger, wenn der Salzgehalt des Bodenwassers niedrig ist. Der Wasseraustausch wird erschwert, wenn der Salzgehalt des Bodenwassers hoch ist. Bis 1955 stieg der Salzgehalt des Bodenwassers schnell an. Dieser Prozeß begünstigte den Sauerstoffmangel am Meeresboden der tiefen Ostseebecken.

4. Mit dem allgemeinen Anstieg des Salzgehalts im Ostseewasser seit den dreißiger Jahren war eine Verlagerung der Salzgehalts-Sprungschicht in flachere Wassertiefen verbunden. Zwischen 1950 und 1980 lag der Tiefenbereich 70 bis 100 Meter im Einflußbereich des sauerstoffarmen Tiefenwassers.

5. In den Jahren 1977 bis 1992 gab es keine Wetterlagen, welche größere Salzwasser-einbrüche zur Folge hatten. Es gab also auch kaum Nachlieferungen von Sauerstoff in das Bodenwasser der tiefen Ostseebecken. Im Gotlandtief war die Folge, daß zwischen dem Meeresboden und 130 Metern Wassertiefe das Tiefenwasser Schwefelwasserstoff enthält.

6. Das Ausbleiben von Salzwassereinbrüchen hatte auch zur Folge, daß seit 1978 der Salzgehalt der Ostsee wieder sinkt und daß sich bis 1992 die Salzgehalts-Sprungschicht in der Östlichen Gotlandsee um etwa 10 Meter nach unten verlagert hat. Dadurch wurden inzwischen die Sauerstoffverhältnisse in 80 bis 90 Metern Wassertiefe besser, denn sie werden nun vom Oberflächenwasser beeinflusst.

7. Die Sauerstoffverhältnisse am Meeresboden der Ostsee sind also nicht nur mit der Überdüngung der Ostsee korreliert. Sie werden auch durch Veränderungen der Hydrographie, also vom Wetter gesteuert.

Könnte man einen tüchtigen Ingenieur mit der Aufsicht über die Ostsee beauftragen, dann arrangierte der jedes Jahr einen jedesmal gleich intensiven Salzwassereinbruch. Der Salzgehalt des einströmenden Wassers müßte jeweils nur geringfügig höher als der des stagnierenden Bodenwassers sein. Bei richtiger Dosierung könnte ein tüchtiger Ingenieur damit jeweils so viel Sauerstoff an den Meeresboden nachliefern, wie verbraucht wurde. Mit solchen regelmäßigen Sauerstoffimporten könnten auch in den tiefen Ostseebecken dauernd Bodentiere leben. Der Ingenieur müßte aber auch noch dafür sorgen, daß der Salzgehalt der Ostsee nicht steigt und daß die Schichtungsverhältnisse stabil bleiben. Jedoch nicht der Mensch, sondern das Wetter steuert die Sauerstoff- und Salzimporte in die Ostsee, und das Wetter ist unberechenbar.

Wissenschaftler und Politiker konnten sich bisher noch nicht darüber einigen, ob viele und starke Salzwassereinbrüche grundsätzlich gut für die Ostsee sind, oder ob man nicht auch mit weniger Salz bessere Sauerstoffbedingungen in der Ostsee erreichen

könnte. Wegen dieser Unsicherheit in der Beurteilung hat die dänische Regierung bei der Querung von Großem Belt und Öresund eine Null-Lösung angestrebt. Das heißt: Durch Brücken- und Tunnelbauwerke soll der Querschnitt des Gewässers nicht verkleinert werden, damit der Einstrom von Salzwasser unverändert bleibt. Ich meine: Für die Sauerstoffverhältnisse in der tiefen Ostsee wäre weniger Salz günstig, weil es dann häufiger zum Austausch des Bodenwassers kommt.

Die gegenwärtigen Ostseemodelle (WULFF & STIGEBRANDT 1989) zeigen uns noch nicht, welchen Anteil an den beobachteten langfristigen Veränderungen der Sauerstoffverhältnisse die Überdüngung mit Phosphor und Stickstoff, welchen Anteil das Wetter hat, nämlich die Veränderungen des Salzgehaltes im Tiefenwasser und die Veränderungen in der Tiefenlage der Sprungschicht.

Summary

Baltic Sea oxygen problems and the weather

Historical data on the deep basins of the Baltic Sea are summarized which refer to the frequency and intensity of salt water inflows, to the depth of the halocline, to salinity and to oxygen concentrations of the nearbottom water, to bottom fauna and to undisturbed microlayers in the sediment. There are already reports on oxygen deficiency from the first half of the 20th century but severe oxygen depletion started in the period 1948 to 1957. Oxygen is imported into the deep basins of the Baltic Sea via salt water inflows which are caused by special weather conditions. The replacement of stagnant oxygen-poor nearbottom water against oxygen-rich imported water is facilitated when the salinity of the stagnant water is low. Replacement occurs less frequently when the salinity of the stagnant water is high, as it was in 1955. The position of the halocline was deep in the thirties, but shallower between 1950 and 1980. As a consequence large areas at 70–100 m water depth were affected by oxygen-poor deep water. No major salt water inflows occurred between 1977 and 1992. Oxygen-deficient deep water with hydrogen sulphide extended upwards to 130 m water depth. Salinity decreased again between 1978 and 1992. The halocline went down by about 10 m. As a consequence, oxygen conditions improved at 80–90 m water depth. In conclusion: oxygen conditions in the nearbottom water of the deep basins of the Baltic Sea are influenced, partially, by hydrographic changes which are controlled by the weather. At present one cannot say to what extent hydrography, to what extent eutrophication is responsible.

Literatur

ANDERSIN, A.-B., J. LASSIG, L. PARKKONEN & H. SANDLER (1978): The decline of macrofauna in the deeper parts of the Baltic proper and the Gulf

of Finland. – Kieler Meeresforschungen Sonderheft 4: 23–52

ANDERSIN, A.-B. & H. SANDLER (1989): Occurrence of hydrogen sulphide and low oxygen concentrations in the Baltic deep basins. – Proc. 16. Conf. Baltic Oceanographers, 5–9 September 1988 in Kiel: 102–108

DEMEL, K. & W. MANKOWSKI (1951): Quantitative investigations on the bottom fauna in the Southern Baltic (polnisch). – Prace Morskiego Instytutu Rybackiego W Gdyni (Reports Sea Fisheries Institute Gdynia) 6: 57–82

DEMEL, K. & Z. MULICKI (1954): Quantitative investigations on the biological bottom productivity of the South Baltic (polnisch). – Prace Morskiego Instytutu Rybackiego W Gdyni (Reports Sea Fisheries Institute Gdynia) 7: 75–126

DEMEL, K. & Z. MULICKI (1958): The zoobenthic biomass in the Southern Baltic. Journal du Conseil ICES 24: 43–54

DIETRICH, G. & R. KÖSTER (1974): Bodengestalt und Bodenbedeckung. S. 11–18 in: Meereskunde der Ostsee, Herausgeber L. MAAGARD & G. RHEINHEIMER. Springer-Verlag Berlin usw.

FONSELIUS, S. (1981): Oxygen and hydrogen sulphide conditions in the Baltic Sea. – Mar. Pollution Bull. 12: 187–194

FRANCK, H., W. MATTHÄUS & R. SAMMLER (1987): Major inflows of saline water into the Baltic Sea during the present century. – Gerlands Beitr. Geophysik 96: 517–531

GERLACH, S. A. (1990): Introduction. S. 3–20 in: Baltic Marine Environment Commission – Helsinki Commission. Second periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea, 1984–1988. Background document. Baltic Sea Environment Proceedings 35 B

GRASSHOFF, K. (1974): The hydrochemistry of landlocked basins and fjords. S. 455–597 in: Chemical oceanography, 2. Auflage Band 2 (Herausgeber J. P. RILEY & G. SKIRROW). Academic Press, London.

HAGMEIER, A. (1930): Die Bodenfauna der Ostsee im April 1929. – Berichte deutsche wiss. Kommission für Meeresforschung (N.F.) 5: 156–173

JONSSON, P., R. CARMAN & F. WULFF (1990): Laminated sediments – a tool for evaluating nutrient mass balances. – Ambio 19: 152–158

KALLE, K. (1943): Die große Wasserumschichtung im Gotland-Tief vom Jahre 1933/34. – Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie 71: 142–146

LEPPÄKOSKI, E. (1975): Macrobenthic fauna as indicator of oceanization in the Southern Baltic. – Havforskningsinst. Skr. 239: 280–288

MATTHÄUS, W. (1990): Langzeittrends und Veränderungen ozeanologischer Parameter während der gegenwärtigen Stagnationsperiode im Tiefenwasser der zentralen Ostsee. – Fischerei-Forschung Rostock 28: 25–34

MATTHÄUS, W. (1992): Der Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee. – Geogr. Rundschau 44: 626–631

MATTHÄUS, W. (1993): Auswirkungen des Salzwassereintruchs vom Januar 1993 in der zentralen Ostsee. – Mitteilungen Deutsche Gesellschaft für Meeresforschung 2/93: 22

MATTHÄUS, W. & H. FRANCK (1988): The seasonal nature of major Baltic inflows. – Kieler Meeresforschungen Sonderheft 6: 64–72

MATTHÄUS, W. & H. FRANCK (1992): Characteristics of major Baltic inflows – a statistical analysis.

- Continental Shelf Research 12: 1375–1400
- NEHRING, D. (1981): Hydrographisch-chemische Untersuchungen in der Ostsee von 1969 bis 1978. II. Die chemischen Bedingungen und ihre Veränderungen unter besonderer Berücksichtigung des Nährstoffregimes. – Geod. Geoph. Veröff. Reihe IV 35: 39–220
- NEHRING, D. & E. FRANCKE (1981): Hydrographisch-chemische Untersuchungen in der Ostsee von 1969 bis 1978. I. Die hydrographischen Bedingungen und ihre Veränderungen. – Geod. Geoph. Veröff. Reihe IV 35: 5–38
- NEHRING, D. & W. MATTHÄUS (1991): Current trends in hydrographic and chemical parameters and eutrophication in the Baltic Sea. – Int. Rev. ges. Hydrobiol. 76: 297–316
- NEHRING, D. & W. MATTHÄUS (1992): Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1991. – Deutsche hydrogr. Z. 44: 217–238
- RUMOHR, H. (1987): Der Beitrag A. HAGMEIERS zur Kenntnis des Benthos der Ostsee. Anhang: A. HAGMEIER: Die Bodenfauna der Ostsee. Unveröffentlichtes Manuskript 1932/52. – Mitteilungen aus dem Zool. Museum Univ. Kiel 2 (5): 1–32
- TRZOSINSKA, A., M. PERTILLÄ, V. BERZINS, B. CYBERSKA, S. FONSELIUS, H. P. HANSEN, D. KÖRNER, W. MATTHÄUS, D. NEHRING, H. RUMOHR & G. AERTEBJERG (1990): Oxygen, hydrogen sulphide, alkalinity and pH. S. 69–152 in: Baltic Marine Environment Commission – Helsinki Commission. Second periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea, 1984–1988. Background document. Baltic Sea Environment Proceedings 35 B
- WOLF, G. (1972): Salzwassereinträge im Gebiet der westlichen Ostsee. – Beiträge zur Meereskunde 29, 67–77
- WULFF, F. & A. STIGEBRANDT (1989): A time-dependent budget model for nutrients in the Baltic Sea. – Global biogeochemical Cycles 3 (1): 63–78
- ZENKEVITCH, L. (1963): Biology of the seas of the U.S.S.R. George Allen and Unwin, London, 955 S.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Sebastian Gerlach
Institut für Meereskunde
an der Universität Kiel
Düsternbrooker Weg 20
D-24105 Kiel

Buchbesprechungen

EPPLÉ, Wolfgang (1993):

Eulen

Die geheimnisvollen Vögel der Nacht. Kennenlernen und erleben.

127 S., zahlreiche Farbfotos und Zeichnungen. ISBN 3-7742-1790-4. Gräfe und Unzer Verlag GmbH, München. Preis: DM 29,80.

Dieser Band der GU Reihe »Tier-Erlebnisse« stellt in sehr informativen Texten mit außergewöhnlichen Farbfotos und anschaulichen Zeichnungen unsere Eulen vor. Fundiertes biologisches Wissen wird so erzählt, daß es auch für Jugendliche und Kinder spannend ist.

Der Teil »Eulen Biologie« bringt alles Wissenswerte über diese nächtlichen Jäger. Wußten Sie, daß Eulen Blitzstart, Senkrechtstart und sogar Rückwärtsflug beherrschen? Daß sie ein phänomenales Gedächtnis für Töne und Geräusche haben und längere Strecken sogar im Blindflug zurücklegen? – Der Teil »Eulen Geschichte« läßt den Leser teilhaben an einem Jahr im Leben eines Uhus. Er begleitet ihn bei der Jagd, bei der Partnersuche, beim Aufziehen der Jungen.

Die »Eulen Steckbriefe« stellen die 13 europäischen Eulenarten ausführlich mit Angaben zu besonderen Merkmalen, Gewicht, Stimme, Verhalten, Brut und Verbreitung, einem Farbfoto und Verbreitungskarte vor. – Der abschließende »Eulen Ratgeber« macht auf die Gefährdung der Eulen aufmerksam und zeigt auf, was für ihr Überleben getan werden kann: von gesetzlichen Schutzbestimmungen bis zu

Maßnahmen zur Rettung ihrer Lebensräume. Ferner werden Tips und Ratsschläge zum Beobachten von Eulen genannt.

Dieses Buch vermittelt Wissenswertes und Entzückendes aus dem Eulenleben als ein unterhaltsames Lesevergnügen, auch für Kinder und Jugendliche. Hinzuweisen wäre noch, daß in einer zweiten Auflage zwei Bildkorrekturen zu machen wären: Bei dem Foto auf Seite 61 (oben rechts) handelt es sich nicht, wie in der Legende angegeben, um eine Spurbereule, sondern um eine Sumpfbereule, und auf Seite 90 ist kein Steinkauz, sondern eine Kanincheneule abgebildet.

Eike Hartwig

GIERE, Olav (1993):

Meiobenthology

The Microscopic Fauna in Aquatic Sediments

328 S., 103 Abb., 20 Tab., Hardcover. ISBN-3-540-56696-1. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York. Preis: DM 128,-

Was ist »Meiofauna« oder »Meiobenthos«? Hierunter werden biologisch und ökologisch definierte Gruppen von Organismen zusammengefaßt, die klein genug sind, um ein Sieb der Maschenweite 500 µm zu passieren, die aber von 42 µm weiten Maschen zurückgehalten werden. Sie leben weltweit in aquatischen Sedimenten: u. a. im Flußbett, im Meeresstrand und im Meeresboden der Tiefsee.

Das vorliegende Buch ist das erste »Lehrbuch«, das sich umfassend mit meiobenthischen Tiergruppen befaßt. Es ist entstanden aus einer Reihe von Vorlesungen und Seminaren des Autors für Studenten höherer Semester an der Universität Hamburg. Nach einem Überblick über die Lebensraumbedingungen, die biologischen Eigenschaften der Organismen und die wichtigsten Untersuchungsmethoden werden die einzelnen Taxa in ihrer systematischen Abfolge, von den Einzellern (Protista) bis zu den Manteltieren (Tunicata), behandelt. Der Leser wird feststellen, daß alle Stämme des Tierreiches vertreten sind, nur in mikroskopischer Größe. Es folgen phylogenetische Aspekte, ein Kapitel über die Verbreitung der Meiofauna mit ihren verschiedenen Mechanismen und die Beschreibung der verschiedenen Lebensräume mit ihren ökologischen und faunistischen Eigenarten. Das Buch schließt mit einem Kapitel über synökologische Aspekte (z. B. Abundanz, Biomasse und Produktion der Meiofauna und Stellung im Nahrungsnetz), über Fragen und Probleme zukünftiger Forschung auf dem Gebiet der Meiobenthologie sowie mit einem Glossar und einer umfangreichen Zusammenstellung der wichtigsten Literatur (bis 1993).

Diese übersichtliche und klar gegliederte Buch, reich ausgestattet mit Abbildungen und Tabellen aus Originalarbeiten zu einem Thema, ist die aktuelle Grundlage zu einer Beschäftigung mit dem Meiobenthos. Es sollte in keiner meeresbiologischen Institutsbibliothek fehlen.

Eike Hartwig