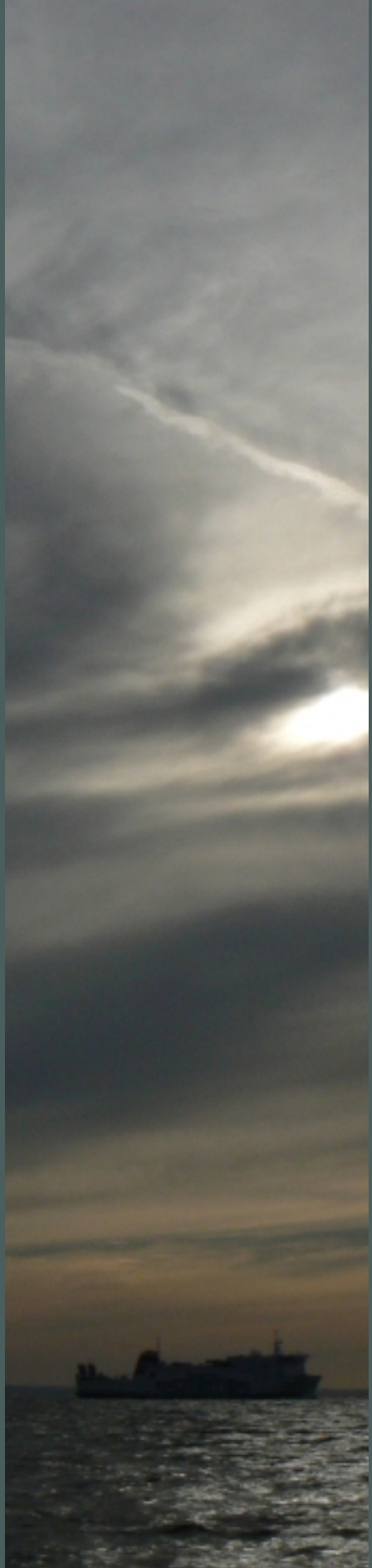
Morze Bałtyckie

– o tym warto wiedzieć



Elektroniczna wersja książki pt.:
„Zeszyty Zielonej Akademii"
Zeszyt nr 7: „Morze Bałtyckie – o tym warto wiedzieć" z 1998 roku

Redakcja serii zeszytów:
Jacek Herbich, Piotr Stępnowski, Ewa Podlesińska

Redakcja zeszytu nr 7:
Maria Szymelfenig (ocemas@ug.edu.pl), Jacek Urbański (oceju@ug.edu.pl)

Autorzy:
Eugeniusz Andrulewicz, Maria Szymelfenig,
Jacek Urbański, Jan Marcin Węsławski,
Stanisław Węsławski (ilustracje)

Wersja drukowana:
Wydawca:
Polski Klub Ekologiczny, Okręg Wschodnio-Pomorski
80-952 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12
tel. / fax (0-58) 347-24-58, email: pke@pg.gda.pl

Copyright by Polski Klub Ekologiczny

Druk:
Zakłd Usług Poligraficznych „Astra" Spółka z o.o.

Wydano dzięki finansowej pomocy:
Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki wodnej w Gdańsku,
Coalition Clean Baltic, Stichting Bescherning Milieu.

Nakład: 1000 egz.

ISBN 83-903702-2-0

Wersja elektroniczna:
Skład w systemie TEX:
Jakub Zdroik (ocejz@ug.edu.pl), Monika Barcikowska

Projekt okładki i fotografia z okładki:
Jakub Zdroik

Gdynia 2008

Spis treści

1 Położenie i historia **6**

2 Woda słonawa **28**

3 Współcześni mieszkańcy Bałtyku **38**
3.1 Ekosystem bałtycki . . . 38
3.1.1 Strefa toni wodnej otwartego morza . . . 44
3.1.2 Strefa przybrzeżna . . . 45
3.1.3 Strefa głębokiego, miękkiego dna . . . 48
3.2 Fitoplankton . . . 48
3.3 Zooplankton . . . 54
3.4 Fitobentos . . . 59
3.5 Zoobentos . . . 62
3.6 Ryby . . . 70
3.7 Ssaki . . . 76
3.8 Ptaki . . . 79

4 Zanieczyszczenia **84**
4.1 Eutrofizacja . . . 84
4.2 Trwałe substancje toksyczne . . . 93
4.2.1 Występowanie trwałych substancji toksycznych w środowisku morskim . . . 93
4.2.2 Metale śladowe . . . 95
4.2.3 Węglowodory chlorowane . . . 95
4.2.4 Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne . . . 97
4.2.5 Związki organiczne metali . . . 97
4.2.6 Źródła dopływu substancji toksycznych do morza . . . 97
4.2.7 Metody oceny szkodliwości związków toksycznych . . . 97
4.2.8 Skutki obecności związków toksycznych w morzu . . . 99
4.2.9 Zanieczyszczenia ropopochodne i katastrofy olejowe . . . 103
4.2.10 Metody ochrony środowiska morskiego . . . 108

4.3 Broń chemiczna 108
4.4 Pierwiastki promieniotwórcze 109
4.5 Skażenia mikrobiologiczne 111

Dodatek **112**

Spis rysunków

1.1 Geograficzne cechy Morza Bałtyckiego (na podstawie różnych źródeł) . . 8
1.2 Historyczne etapy formowania się Morza Bałtyckiego (na podstawie różnych źródeł) 12
1.3 Wartości temperatury maksymalnej gęstości i temperatury zamarzania dla wód o różnym zasoleniu 14
1.4 Dno Morza Bałtyckiego tworzy baseny oddzielone progami 16
1.5 Historia wlewów w latach 1900–1995 oraz mechanizm wymiany wody w najgłębszych warstwach morza (na podstawie różnych źródeł) 17
1.6 Sezonowa zmienność pionowego rozkładu temperatury wody (na podstawie różnych źródeł) 18
1.7 Podstawowe parametry falowania 19
1.8 Mechanizm powstawania upwellingu 20
1.9 Relikty arktycznego okresu historii Bałtyku (nie zachowano proporcji wielkości, na podstawie różnych źródeł) 23
1.10 Jeziora słodkowodne, w których notowano występowanie reliktowych gatunków fauny bałtyckiej (wg Segerstrale 1957, zmienione) 24
1.11 Różne pochodzenie zoogeograficzne fauny Bałtyku (nie zachowano proporcji wielkości, na podstawie różnych źródeł) 25
1.12 Główne czynniki powodujące zmiany w funkcjonowaniu ekosystemu Bałtyku 26

2.1 Rozkład zasolenia w wodach Bałtyku 29
2.2 Zjawiska lodowe na Bałtyku (na podstawie różnych źródeł) 30
2.3 Fauna denna i zasolenie (wg Zienkiewicza 1963, zmienione) 32
2.4 Liczba gatunków fauny dennej w Bałtyku w zależności od zasolenia wody (wg Zienkiewicza 1963, Sjöberga 1992, zmienione) 34
2.5 Przykłady submergencji – płytkowodne gatunki z Morza Północnego występują głębiej w Bałtyku, unikając wysłodzonej wody powierzchniowej (na podstawie różnych źródeł) 35
2.6 Schematyczne przedstawienie produkcji pierwotnej w Bałtyku (wg Hällforsa i in. 1981) 36

3.1 Podstawowy podział ekologiczny oceanu z uwzględnieniem specyfiki Morza Bałtyckiego (wg Demela 1974, uzupełnione) . . . 39
3.2 Schematyczne uporządkowanie życia w morzu (wg Łomniewskiego i in. 1975, uzupełnione) . . . 40
3.3 Przepływ energii i jej straty pomiędzy poszczególnymi poziomami troficznymi (wg Kautsky 1991) . . . 42
3.4 Związki troficzne w toni wodnej – łańcuch spasania i pętla mikrobiologiczna (wg Furmana i in. 1995, zmienione) . . . 43
3.5 Rośliny i zwierzęta skalistego wybrzeża Bałtyku Właściwego (nie zachowano proporcji wielkości, wg Perrsona i Selina 1994, zmienione) . . . 46
3.6 Rośliny i zwierzęta osłoniętej piaszczystej zatoki bałtyckiej (nie zachowano proporcji wielkości, wg Perrsona i Selina 1994, zmienione) . . . 47
3.7 Fitoplankton bałtycki (wg Pankowa i in. 1990) . . . 50
3.8 Fitoplankton bałtycki (wg Pankowa i in. 1990) . . . 51
3.9 Liczba gatunków fitoplanktonu w różnych rejonach Bałtyku (wg Sjöberga 1992) . . . 52
3.10 Średnia zawartość chlorofilu w powierzchniowych wodach Bałtyku, dane z lat 1989–1993 (wg HELCOM 1996) . . . 53
3.11 Zooplankton bałtycki (wg Needona i in. 1985, Thomsona 1992, Żmudzińskiego 1990) . . . 56
3.12 Zooplankton bałtycki (wg Needona i in. 1985, Thomsona 1992, Żmudzińskiego 1990) . . . 57
3.13 Średnia liczebność mezozooplanktonu w powierzchniowych wodach Bałtyku, dane z lat 1989–1993 (wg HELCOM 1996) . . . 58
3.14 Fitobentos bałtycki (wg Arndta 1969, Sjöberha 1992, Szafera i in. 1969) 60
3.15 Fitobentos bałtycki (wg Arndta 1969, Sjöberha 1992, Szafera i in. 1969) 61
3.16 Makrozoobentos bałtycki (wg Needona i in. 1985, Żmudzińskiego 1990) . 64
3.17 Makrozoobentos bałtycki (wg Needona i in. 1985, Żmudzińskiego 1990) . 65
3.18 Makrozoobentos bałtycki (wg Needona i in. 1985, Żmudzińskiego 1990) . 66
3.19 Przykładowa liczebność i biomasa makrozoobentosu w wybranych rejonach Bałtyku, dane z lat 1989–1993 (wg HELCOM 1996) . . . 68
3.20 Meiobentos bałtycki (wg Giere 1993) . . . 69
3.21 Ryby bałtyckie (wg Gąsowskiej 1962, Żmudzińskiego 1990) . . . 72
3.22 Ryby bałtyckie (wg Gąsowskiej 1962, Żmudzińskiego 1990) . . . 73
3.23 Ryby bałtyckie (wg Gąsowskiej 1962, Żmudzińskiego 1990) . . . 74
3.24 Połowy najważniejszych gatunków ryb bałtyckich, dane z 1996 roku (wg Raportu ICES 1998) . . . 75
3.25 Ssaki bałtyckie (wg Żmudzińskiego 1990) . . . 77
3.26 Rejony występowania fok bałtyckich (wg Kautsky 1991) . . . 78
3.27 Ptaki bałtyckie (wg Sokołowskiego 1972, Żmudzińskiego 1990) . . . 80
3.28 Ptaki bałtyckie (wg Sokołowskiego 1972, Żmudzińskiego 1990) . . . 81
3.29 Najważniejsze zimowiska ptaków bałtyckich (wg HELCOM 1996) . . . 82

4.1 Roczny cykl produkcji fitoplanktonu i zmiany stężenia substancji biogenicznych w powierzchniowych wodach Bałtyku (wg Perrsona i Sellina 1994) . . . 86

4.2 Ładunki azotu i fosforu dostarczane przez państwa nadbałtyckie, dane z 1992 roku (wg HELCOM 1993) 87
4.3 Zmiany w Morzu Bałtyckim spowodowane eutrofizacją (wg Forsberga 1991, wg Furman i in.1993, zmienione) 88
4.4 Obszary dna bałtyckiego okresowo bądź stale pozbawione tlenu, dane z 1990 roku (wg Sjöberga 1992) 90
4.5 Schemat łańcucha zanieczyszczeń chemicznych w środowisku morskim (wg Kihlströma 1991) 94
4.6 Zawartość metali śladowych w powierzchniowych wodach Bałtyku (wg Sjöberga 1992) 96
4.7 Bioakumulacja PCB $[\mu g\,kg^{-1}]$ w organizmach bałtyckich (wg Olssona i in. 1972) 98
4.8 Zawartość PCB i DDT w tkance mięśniowej śledzi bałtyckich (wg HELCOM 1996) 100
4.9 Zawartość ołowiu i rtęci w tkance mięśniowej śledzi bałtyckich (wg Backlunda i in. 1991, wg Furmana i in. 1995) 102
4.10 Rejony zatopienia amunicji chemicznej (wg HELCOM 1996) 110

Rozdział 1

Położenie i historia

Jacek Urbański, Jan Marcin Węsławski

Położenie geograficzne i historia formowania się Bałtyku wywarły decydujący wpływ na obecny klimat, hydrologię i skład fauny.

Uważne spojrzenie na mapę Morza Bałtyckiego pozwala uzmysłowić sobie szereg charakterystycznych cech tego obszaru. Morze Bałtyckie może być wpisane w prostokąt o bokach 1,1 tys. i 1,4 tys. kilometrów. Jest ono wyraźnie rozciągnięte w kierunku południkowym, czyli z południa na północ. Zwraca także uwagę wąskie połączenie z Morzem Północnym przez trzy cieśniny: Sund, Wielki Bełt i Mały Bełt. Bałtyk jest morzem z wieloma wyspami, z czego często nie zdajemy sobie sprawy, gdyż polska część Bałtyku jest ich pozbawiona. W wąskim połączeniu z Morzem Północnym leżą wyspy: Fionia, Zelandia i Lolland. W centralnej części morza znajdują się Bornholm, Olandia i Gotlandia. U wejścia do Zatoki Ryskiej znajduje się Hiuma i Sarema, a Morze Botnickie i Zatoka Botnicka są oddzielone od reszty Bałtyku archipelagiem Wysp Alandzkich. Bałtyk podzielony jest na szereg akwenów. Największą jego część zajmuje Bałtyk Właściwy, który na północy rozdziela się tworząc Zatokę Fińską i Morze Botnickie, zwężające się w Zatokę Botnicką. Na zachodzie Bałtyk Właściwy graniczy z obszarem zwanym Sundem i Morzem Bełtów. Jest to płytki obszar z urozmaiconą linią brzegową pomiędzy wybrzeżem Niemiec i wyspami duńskimi, stanowiącymi wyraźną barierę między wodami Morza Bałtyckiego i Północnego. Po drugiej stronie wysp znajduje się szeroka cieśnina Kattegat, którą także zalicza się do Morze Bałtyckiego. Średnia głębokość Morza Bałtyckiego wynosi 52 m. Oznacza to, że Bałtyk jest morzem płytkim, żadna jego część nie ma średniej głębokości większej od 70 m. Zwraca uwagę bardzo mała głębokość Sundu i Morza Bełtów z maksymalną głębokością 38 m. Stanowią one wyraźny próg utrudniający wymianę wody pomiędzy Morzem Północnym i Kattegatem a resztą Morza Bałtyckiego. Pomimo małej średniej głębokości maksymalne głębokości większości akwenów sięgają kilkuset metrów.

Tab. 1.1 Charakterystyka geograficzna Morza Bałtyckiego

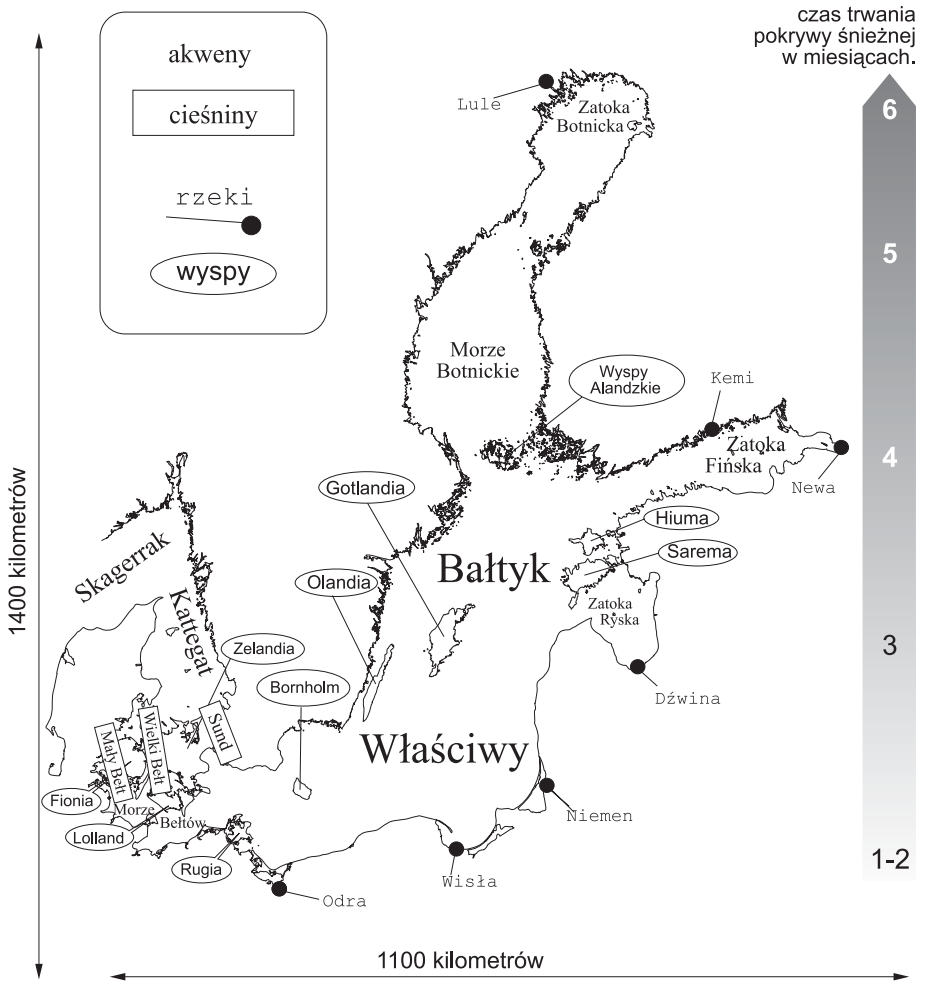
	Powierzchnia [km^2]	Objętość wody [km^3]	Maksymalna głębokość [m]	Średnia głębokość [m]
Zatoka Botnicka	36 260	1 481	156	40,8
Morze Botnickie	79 257	4 448	294	61,7
Zatoka Fińska	29 498	1 098	123	37,2
Zatoka Ryska	17 913	406	51	22,7
Bałtyk Właściwy	209 930	13 045	459	62,1
Sund i Morze Bełtów	20 121	287	38	14,3
Kattegat	22 287	515	109	23,1
Morze Bałtyckie	**415 266**	**21 721**	**459**	**52,3**

Południkowa rozciągłość Bałtyku w istotny sposób wpływa na różnice w klimacie pomiędzy jego południowymi brzegami a północnym krańcem, co dobrze obrazuje czas trwania pokrywy śnieżnej, zmieniający się od jednego miesiąca na południu do sześciu na północy. Na tak duże różnice klimatyczne mają wpływ Góry Skandynawskie, które stanowią barierę utrudniającą napływ znad Atlantyku mas powietrza, ogrzanych przez Prąd Zatokowy płynący wzdłuż zachodnich wybrzeży Norwegii.

Istotną cechę geograficzną Bałtyku jest różnorodność rodzaju brzegów. Obok wybrzeży piaszczystych, charakteryzujących się prawie prostoliniowym przebiegiem, zaznaczają się obszary o bardzo złożonym przebiegu linii brzegowej z charakterystycznymi drobnymi wysepkami. Są to skaliste wybrzeża szkierowe. Te dwa rodzaje brzegów występują najczęściej na Morzu Bałtyckim.

Zmienność klimatu w ciągu ostatnich 10 tysięcy lat kształtowała postać i hydrologię Bałtyku.

Ponad 40 milionów lat temu w miejscu dzisiejszego Morza Bałtyckiego rozciągał się ląd zwany Fennoskandią. Pokrywała go bujna roślinność. Wśród wielu gatunków sosen, występujących w tych puszczach, królowała sosna żywiczna *Pinus succinifera*, dzięki której ślady tamtego świata zalane żywicą przetrwały do naszych czasów w postaci bursztynowych inkluzji, czyli resztek organicznych zatopionych w bursztynie. Rosły tam także liczne drzewa liściaste, takie jak wiecznie zielone dęby, klony, kasztanowce, drzewa sandałowe i laurowe, magnolie i liczne gatunki palm. Panujący klimat odpowiadał obecnemu klimatowi strefy podzwrotnikowej. Świat istot żywych tej puszczy odznaczał się ogromną różnorodnością. Wśród drzew wędrowały potężne mastodonty, a później słonie, przebogaty był świat ptaków i owadów. Na południe od puszczy, na obszarze obecnej Polski, rozciągały się płytkie zatoki morskie i ogromne jeziora. Przez puszczę płynęła potężna rzeka niosąca wody z wyższych północnych obszarów na południe. Gdyby nie zatopione w bursztynie owady, pióra ptaków, strzępki sierści, a nawet cała prawie pięciocentymetrowa jaszczurka, niewiele wiedzielibyśmy o tym świecie, który zniknął około miliona lat temu w wyniku zmian klimatycznych. Następowało powolne ochładzanie klimatu. Wymarły ciepłolubne rośliny. Gromadzące się masy śniegu zaczęły tworzyć potężny lądolód, który osiągając grubość do 3 tys. m, potężnymi jęzorami kilkakrotnie nasuwał się na obszar Bałtyku i Polski, aby następnie cofać się z powrotem na północ.



Rys. 1.1 Geograficzne cechy Morza Bałtyckiego (na podstawie różnych źródeł)

Okresy kiedy lądolód posuwał się do przodu nazywamy glacjałami, okresy kiedy się cofał interglacjałami. Przed lodowcami pojawiała się roślinność tundrowa, która podczas interglacjałów ustępowała lasom iglastym i mieszanym. Świat zwierzęcy reprezentowały mamuty, nosorożce włochate, niedźwiedzie jaskiniowe. W końcu pojawił się także człowiek. W ciągu minionego miliona lat lądolód nie pokrywał obszaru Bałtyku przez cały czas. W kolejnych interglacjałach na obszarze tym odsłaniały się niecki, w których tworzyły się okresowe morza lub jeziora. Wiemy, że jedno z nich – Morze Eemskie – miało charakter morza ciepłego, łączącego się szerokimi cieśninami z Atlantykiem na zachodzie i Morzem Białym na północy. Niewiele śladów zostało po tych morzach i jeziorach kolejnych interglacjałów, choć mogły być większe i trwać dłużej niż obecny Bałtyk. Ostatni glacjał kończy się około 16 tys. lat temu. Minęły kolejne dwa lub trzy tysiące lat zanim rozpoczął się proces wycofywania się lądolodu z obszaru dzisiejszego Bałtyku. I tak około 13 tys. lat temu rozpoczyna się historia tworzenia współczesnego morza.

Aby zrozumieć procesy, które zachodziły w ciągu tych kilkunastu tysięcy lat, należy uświadomić sobie pewne mechanizmy, które je powodowały. Powstanie lądolodu było rezultatem zmian klimatycznych. Ta potężna masa lodu, o grubości trzech kilometrów, która pokryła ogromne obszary Ziemi na północy i południu, uwięziła ogromne ilości wody. W rezultacie o około 130 m obniżył się poziom oceanów i mórz. Kiedy lądolody topiły się, następowało podnoszenie się poziomu morza. Proces zmian poziomu morza wywołany zmianami ilości wody nosi nazwę eustazji. Intensywność tego procesu ma ścisły związek z panującym klimatem. Jednocześnie ogromne masy lodu wywierały potężny nacisk na skorupę ziemską, która pod ich wpływem zagłębiała się. Powierzchnia ziemi pod naciskiem lądolodu opadała względem poziomu oceanów. Kiedy lądolód wycofywał się, skorupa ziemska dążąc do stanu równowagi, podnosiła się. Dążenie skorupy ziemskiej do stanu równowagi nosi nazwę izostazji.

Ruchy izostatyczne i eustatyczne, skierowane w przeciwnych kierunkach, tworzyły obraz Bałtyku. Poziom oceanu, który znajdował się 16 tys. lat temu 130 m poniżej obecnego poziomu, podnosił się, powodując zalewanie lądu. Jednocześnie ruchy izostatyczne, podnoszące ląd, powodowały odsłanianie lądu. Ruchy izostatyczne występowały ze zmienną intensywnością w różnych obszarach Morza Bałtyckiego, w niektórych trwają do dzisiaj. W rezultacie okresy podnoszenia się poziomu morza (transgresje) przeplatały się z obniżaniem się poziomu morza (regresjami).

Lądolód cofał się powoli na północ. Na krawędzi cofającego się lądolodu tworzyły się jeziora powstałe w wyniku zatarasowywania odpływu wody. Łączyły się one ze sobą lub uzyskując odpływ, niknęły. Poziom wody tych zbiorników był znacznie wyższy niż obecny poziom morza. Po uwolnieniu z lodu terenu obecnej delty Wisły i części Zatoki Gdańskiej, uformowało się tam jezioro o poziomie wody wyższym o 60 metrów od obecnego. W miarę łączenia się z innymi jeziorami i dalszego cofania się lądolodu jego poziom obniżył się do 6–8 metrów od obecnego poziomu morza. W okresie tym panował klimat arktyczny, wody co roku pokrywała gruba warstwa lodu. Jeziora ówczesne, które zajmowały obszar obecnego Bałtyku Południowego, noszą nazwę Bałtyckich Jezior Lodowych. Okres ich istnienia trwał około 1 tys. lat. Powoli zaczęły się one łączyć, aż około 12 tys. lat temu utworzyły jedno wielkie jezioro zwane Bałtyckim Jeziorem Lodowym, które istniało przeszło tysiąc lat. Na północy granicę jego stanowił wycofujący się lądolód. Poziom tego zbiornika znajdował się około 50 metrów poniżej obecnego poziomu morza, a jednocześnie był on o ponad 20 m wyższy od ówczesnego poziomu oceanu. Odpływ

Tab. 1.2 Historia Morza Bałtyckiego

Czas w tys. lat	Klimat	Poziom wody u polskich brzegów [m]	Nazwa	Temperatura	Zasolnie	Uwagi
0	umiarkowany chłodny	0	współczesny Bałtyk			kontynuacja ruchów izostatycznych
1	wilgotny					
2	umiarkowany ciepły suchy					
3	umiarkowany					
4	ciepły wilgotny	+4	Morze Litorynowe	cieplejsze niż obecnie	bardziej słone (8–15 PSU)	eustazja powoduje transgresję
5	umiarkowany					
6	ciepły suchy		Jezioro Ancylusowe	brak zjawisk lodowych	0–3 PSU	zwiększona eustazja (transgresja)
7	umiarkowany chłodny suchy			porównywalna z obecną zjawiska lodowe		
8	subarktyczny suchy	−20				
9	umiarkowany wilgotny	−60	Morze Yoldiowe	zimne morze arktyczne	0–15 PSU	zanik lądolodu
10	subarktyczny		Bałtyckie Jezioro Lodowe	powszechne zjawiska lodowe	słodkie	
11	suchy	−50		zimne wody arktyczne		
12	umiarkowany chłodny		Bałtyckie Jeziora Lodowe	arktyczne	słodkie	początek ruchów izostatycznych
13	wilgotny	+6		zimne wody arktyczne		
14	zimny arktyczny	+60				
15						
16			lądolód			

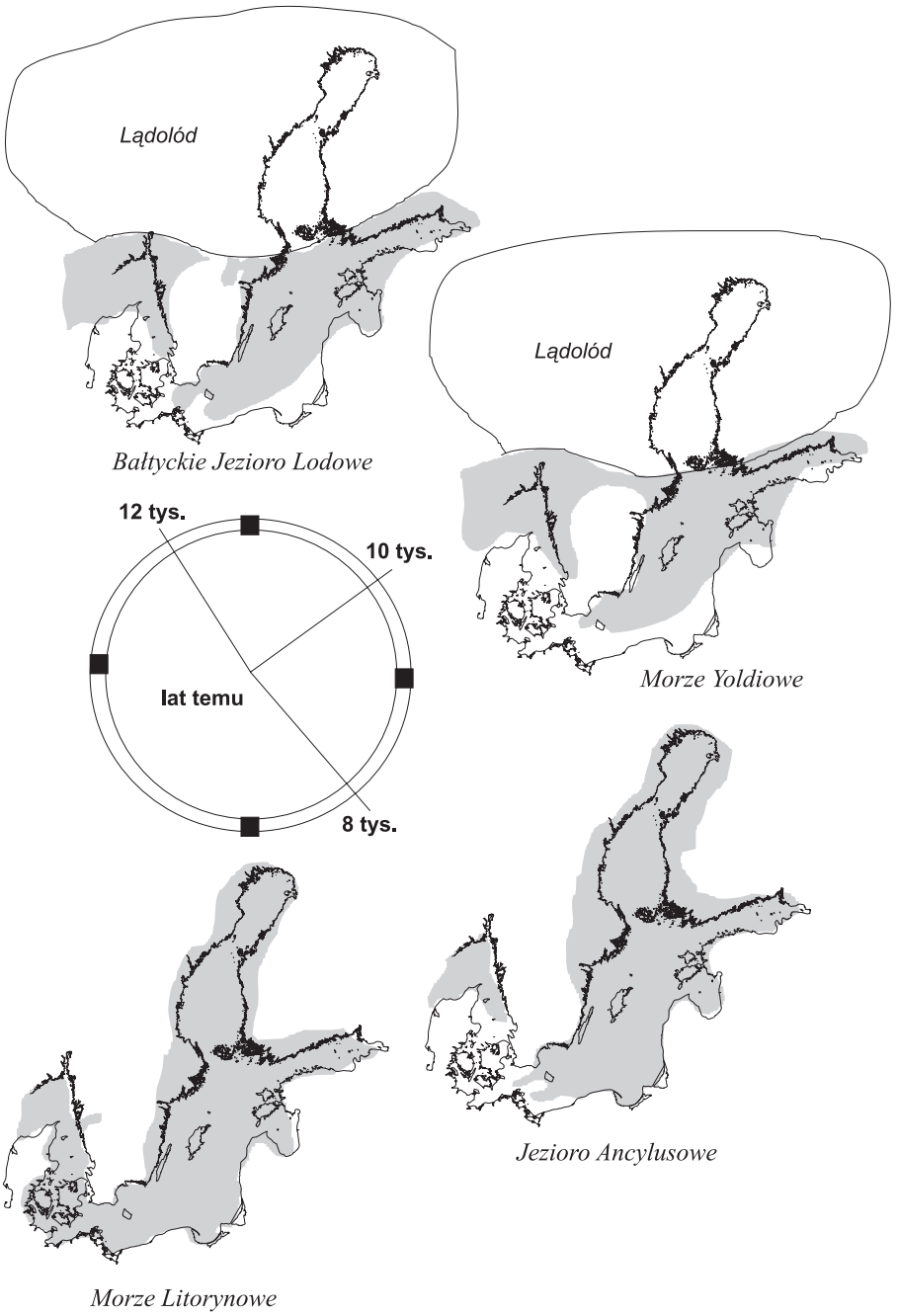
wód odbywał się najprawdopodobniej w kierunku północno-wschodnim do Morza Białego. W okresach zmniejszonego dopływu wód poziom jeziora mógł się obniżać na tyle, że dochodziło do epizodycznych wlewów wód od północy z Morza Arktycznego. Nie były one jednak na tyle duże, aby zmienić jego słodkowodny charakter.

W przeciwieństwie do powstawania Bałtyckiego Jeziora Lodowego, które odbywało się stopniowo, jego koniec nastąpił w wyniku katastrofy żywiołowej o ogromnych rozmiarach. Na obszarze południowej Szwecji pomost lądowy, oddzielający Bałtyk od oceanu, stopniowo wyłaniał się spod lądolodu. Pomost ten w pewnym momencie uległ przełamaniu. Nastąpiło to około 10,2 tys. lat temu. Rwąca rzeka ruszyła na zachód, rozmywając to połączenie doszczętnie, aż do wyrównania poziomu z oceanem. Nastąpiło gwałtowne obniżenie poziomu wody w jeziorze o 26 metrów. Po wyrównaniu poziomów słone wody wpłynęły do Bałtyku tworząc Morze Yoldiowe. Morze to było morzem arktycznym z arktyczną fauną. Jego nazwa pochodzi od małża morskiego *Yoldia arctica*. Morze to charakteryzowało się wyraźną strefowością zasolenia. Największe zasolenie występowało u wylotu powstałego połączenia w rejonie Sztokholmu. W rejonie Głębi Gdańskiej, która stanowiła zatokę morską, wody były prawie słodkie. Całkowity zanik lodowca na obszarze skandynawskim, który nastąpił około 8 tys. lat temu i miał związek z ociepleniem klimatu, spowodował przyspieszenie ruchów izostatycznych, zwłaszcza w części północnej. Cieśnina łącząca Morze Yoldiowe z oceanem, powoli ulegała spłyceniu w rezultacie podnoszenia się lądu. W końcu cieśnina przekształciła się w szereg rzek, którymi spływała woda do oceanu. Wobec braku wlewów wody oceanicznej następowało wysłodzenie morza, co doprowadziło do powstania słodkowodnego jeziora o zasoleniu od 0 do 3 PSU.

Zostało one nazwane Jeziorem Ancylusowym od ślimaka *Ancylus fluviatilis*, który zamieszkiwał jego przybrzeżne wody. Około 8,9 tys. lat temu dalsze ruchy izostatyczne spowodowały całkowite zahamowanie odpływu wód. Poziom jeziora podniósł się, osiągając maksimum około 8,5 tys. lat temu. Wskutek podnoszenia się poziomu wody, osiągniety został próg Darss na zachód od Rugii i została otwarta droga do Morza Północnego, do którego wody jeziora wpadały szeroką rzeką. Doprowadziło to do opadnięcia wody w Jeziorze Ancylusowym. Dodatkowym czynnikiem powodującym regresję było ostateczne stopienie się pokrywy lodowej na obszarze Skandynawii, które nastąpiło około 8,5 tys. lat temu, czemu towarzyszyło wyraźne ocieplenie się klimatu.

Wody Morza Północnego zaczęły przenikać do ówczesnego Bałtyku około 8 tys. lat temu przez cieśniny duńskie. Było to skutkiem eustatycznego podnoszenia się poziomu oceanu, który znajdował się wtedy około 20 m poniżej obecnego poziomu. W miarę podnoszenia się poziomu oceanu zwiększyło się połączenie z ówczesnym Bałtykiem i coraz więcej słonej wody wpływało do tego zbiornika. Spowodowało to wzrost zasolenia do około 15 PSU. Zbiornik ten został nazwany Morzem Litorynowym od ślimaka *Littorina littorea*. Transgresja litorynowa, czyli podnoszenie się poziomu tego morza, sięgnęła u wybrzeży polskich ponad 4 metry powyżej obecnego poziomu. Było ono cieplejsze od obecnego Bałtyku i zajmowało większą powierzchnię. Stopniowe podnoszenie się obszaru cieśnin duńskich było wynikiem wypłycania połączenia z oceanem i zmniejszenia dopływu wód słonych. W ten sposób powstawało współczesne Morze Bałtyckie.

Obecna faza historii Bałtyku zaczęła się około 2,5 tys. lat temu i nosi nazwę Morza Mya (od małża *Mya*). Przedostał się on tutaj, przyczepiony do dna okrętów, najprawdopodobniej w XVI i XVII wieku z Ameryki Północnej i szybko rozprzestrzenił się



Rys. 1.2 Historyczne etapy formowania się Morza Bałtyckiego (na podstawie różnych źródeł)

w morzu. Historia nazwy obecnej fazy Bałtyku ma znaczenie symboliczne, gdyż w naszych czasach o warunkach środowiska Morza Bałtyckiego, oprócz sił przyrody, zaczęła także decydować działalność człowieka.

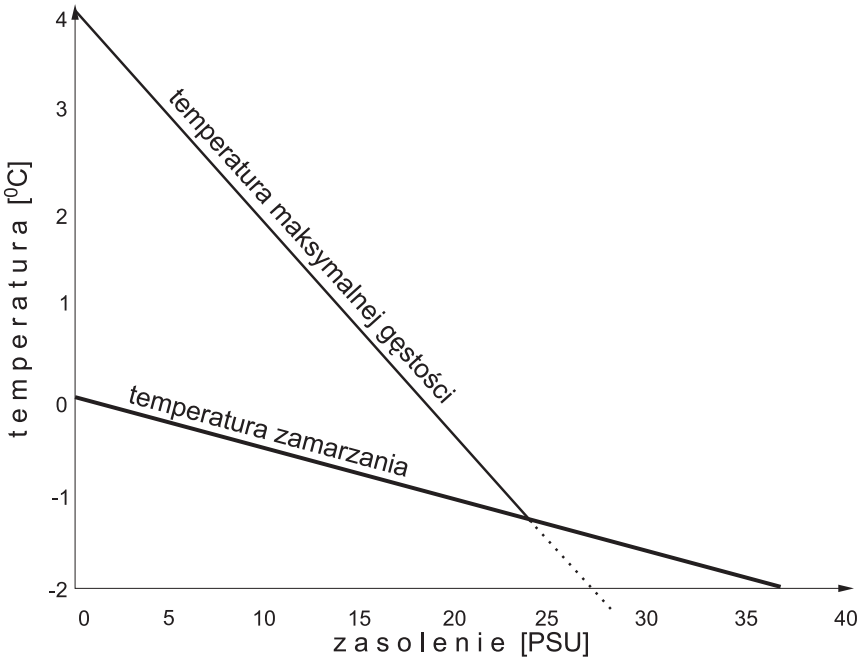
Obecny klimat i ukształtowanie dna Bałtyku mają decydujący wpływ na mechanizmy mieszania wód tego morza.

Bałtyk jest częścią wszechoceanu, który obejmuje zespół wszystkich oceanów i połączonych z nimi mórz, stanowiąc ogromną masę w miarę jednorodnej, słonej, czystej wody. Gdybyśmy chcieli porównać objętość wody Bałtyku i wszechoceanu, to przyjmując, że cała woda Bałtyku mieści się w wiadrze, wszechocean odpowiadałby basenowi pływackiemu średniej wielkości. Załóżmy, że woda w wiadrze, w przeciwieństwie do wody w basenie, nie zawiera soli. Gdybyśmy wiadro zanurzyli w basenie w taki sposób, aby istniało niewielkie połączenie, to o różnicy pomiędzy stężeniami soli w wodzie z wiadra i basenu decydowałaby intensywność wymiany wody pomiędzy tymi dwoma zbiornikami. Woda w Bałtyku posiada znacznie mniejsze zasolenie niż woda oceaniczna. Jest to rezultat dopływu wody słodkiej do morza z rzek i deszczu oraz utrudnionej wymiany wody bałtyckiej z oceanem.

Woda oceaniczna jest skomplikowanym roztworem różnych soli w wodzie, które średnio biorąc stanowią 3,5 % lub 35 ‰ całkowitej masy oceanu. Ponad 99 % masy soli stanowi sześć pierwiastków: chlor (55 %), sód (31 %), magnez (4 %), siarka w postaci $SO_4{}^{2-}$ (8 %), wapń (1 %) i potas (1 %). Do ilościowego opisu soli w wodzie morskiej używa się pojęcia zasolenia, które najprościej można zdefiniować jako ilość substancji stałych rozpuszczonych w 1 kg wody morskiej. Przez wiele lat zasolenie wyrażano w promilach. Obecnie podaje się je w umownej jednostce zwanej PSU (ang. Practical Sainity Unit), która pod względem wielkości prawie dokładnie odpowiada promilowi zasolenia.

Przeciętne zasolenie oceanów wynosi 34,7 PSU. Im większe zasolenie tym większa gęstość wody oraz niższa temperatura zamarzania, woda oceaniczna zamarza w temperaturze −1,9 °C. Gęstość, czyli ciężar wody, zależy także od temperatury. Woda słodka osiąga maksymalną gęstość w temperaturze 4 °C. Temperatura maksymalnej gęstości dla wody oceanicznej znajduje się poniżej temperatury zamarzania, oznacza to, że gęstość wody oceanicznej zawsze rośnie wraz ze spadkiem jej temperatury. Zmiany zasolenia (w PSU) wpływają około dziesięć razy mocniej na zmiany gęstości niż zmiany temperatury (w °C). Oznacza to, że zmiana zasolenia o 1 PSU może być zrekompensowana zmianą temperatury o 10 °C. Różnice gęstości wody decydują o procesach mieszania na głębokościach większych niż 40–80 m. Woda cięższa opada na dno, a woda lżejsza wypływa na powierzchnię.

Wspomniane powyżej procesy mieszania i wymiany wody z wszechoceanem mają decydujący wpływ na kształtowanie środowiska Bałyku. Dno Bałtyku nie jest równe, lecz składa się z szeregu basenów oddzielonych od siebie progami. Gdyby poziom morza obniżył się o 50 m, z Bałtyku powstałoby kilka oddzielonych od siebie jezior. Dno tych basenów znajduje się na głębokości od 50 do 200 m. Miejsca, w których głębokość przekracza 200 m, stanowią niewielki procent powierzchni basenów. Noszą one nazwę głębi, z których najgłębsza Głębia Landsorcka osiąga głębokość 459 m. W cieśninach



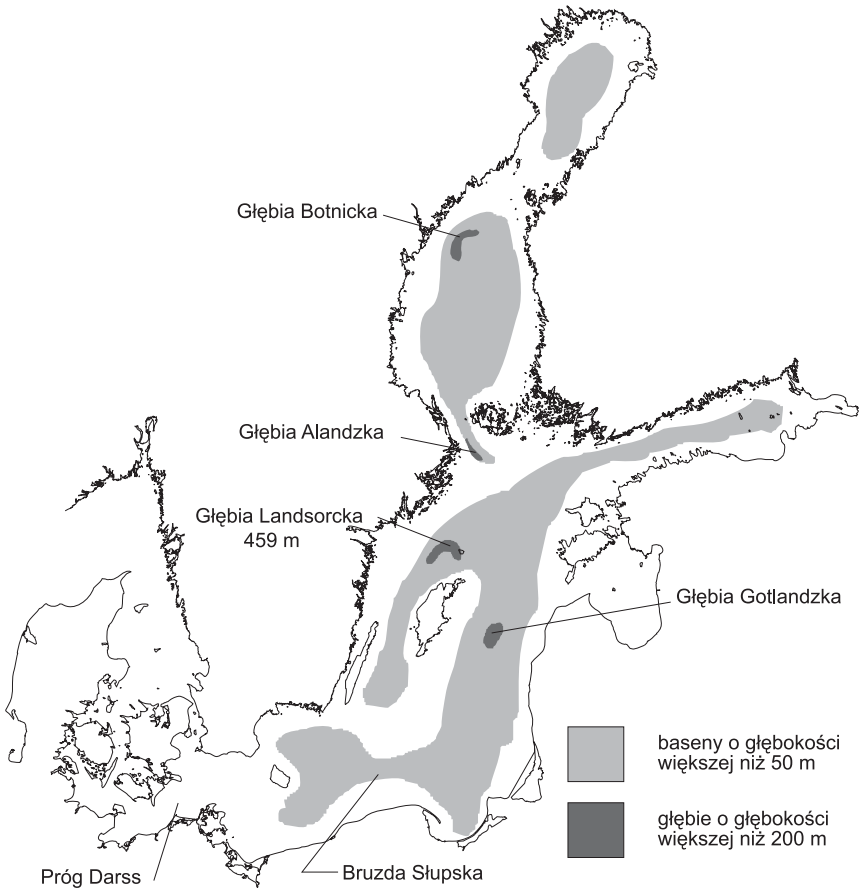
Rys. 1.3 Wartości temperatury maksymalnej gęstości i temperatury zamarzania dla wód o różnym zasoleniu

duńskich, stanowiących barierę pomiędzy słonymi wodami Morza Północnego i wodami Morza Bałtyckiego, głębokość nie przekracza 20 m. Gdyby Bałtyk został odcięty od oceanu, zamieniłby się w słodkowodne jezioro, gdyż dopływa do niego więcej wody słodkiej niż wyparowuje. Proces parowania jest najważniejszym procesem, powodującym wzrost zasolenia w morzach zamkniętych i jeziorach. To czy przeważa opad nad parowaniem zależy od warunków klimatycznych. Bałtyk położony jest w strefie klimatu umiarkowanego, znajdującego się okresowo pod wpływem oceanicznym, w którym zaznacza się niewielka przewaga opadów nad parowaniem. Liczne rzeki wpadające do Bałtyku są podstawową przyczyną dodatniego bilansu wody słodkiej, czyli przewagi dopływu wody słodkiej nad odpływem w rezultacie parowania. Nadmiar wody musi znaleźć ujście do morza, tak jak zdarzało się to w historii Bałtyku. Takim rodzajem „rzeki" są cieśniny duńskie. Jednak od czasu do czasu, w rezultacie działania zachodnich wiatrów sztormowych, poziom wody od strony Morza Północnego się podnosi. Rzeka zmienia kierunek i słona woda wpływa do Bałtyku. Woda ta jest cięższa od wody bałtyckiej i w związku z tym opada na dno, wypełniając dna basenów. Po paru dniach lub tygodniach poziom Morza Północnego obniża się i znowu przeważa wypływ wody z Bałtyku. Woda, która dostała się do Bałtyku, pozostaje jednak na dnie basenów. Powoduje to charakterystyczną dwuwarstwowość zasolenia i gęstości wody w Bałtyku Właściwym, co tworzy stałą granicę, pomiędzy wodami bardziej i mniej słonymi, zwaną halokliną. Znajduje się ona na głębokości 40–60 m w zachodniej i 60–80 m we wschodniej części Morza Bałtyckiego. Wlewy wody słonej do Bałtyku mają charakter epizodyczny. Trwają one od paru do kilkunastu dni i zdarzają się czasem co parę miesięcy, a czasem co parę lub kilkanaście lat. Jest to kluczem do zrozumienia tego, co dzieje się z masą wody

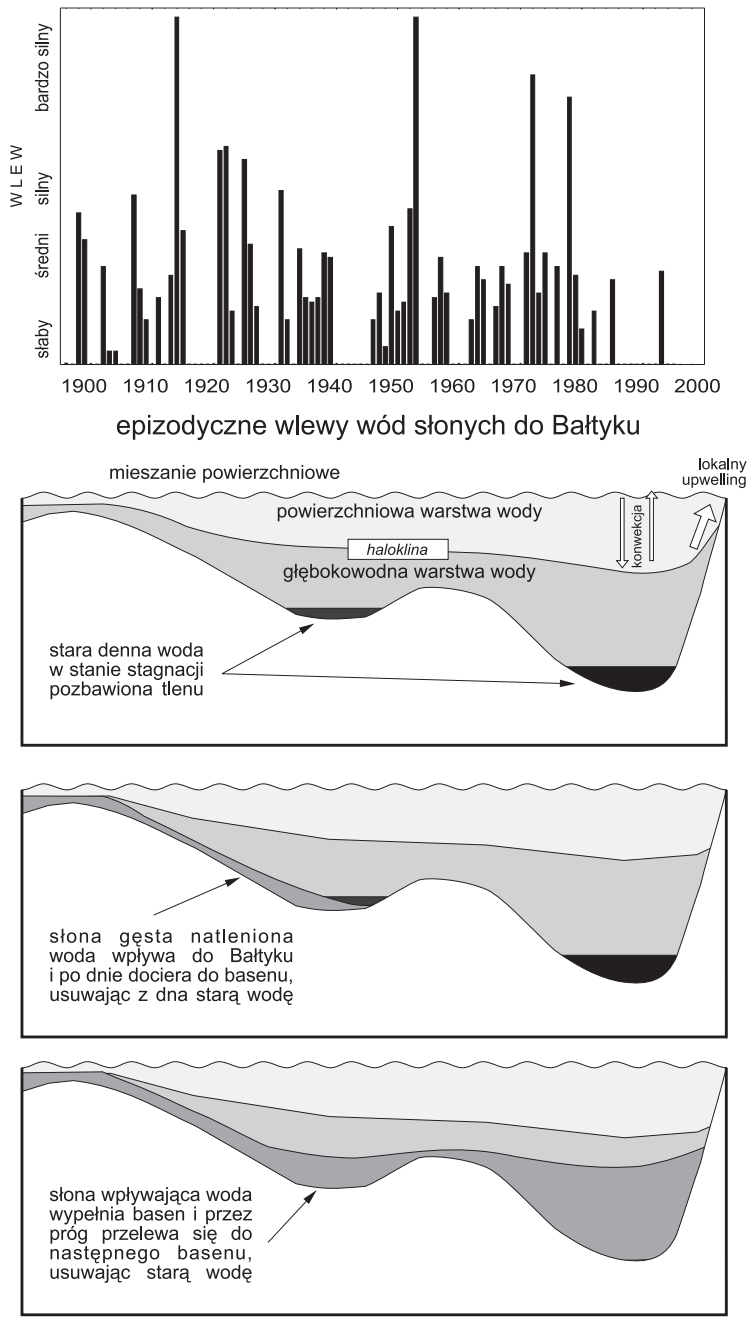
Bałtyku Właściwego. Słona woda, która wypełniła dna basenów, nie może wymieszać się z wodami powierzchniowymi, gdyż oddziaływanie silnych wiatrów, które powodują mieszanie, nie sięga tak głęboko. W okresie jesienno-zimowym, kiedy powierzchniowe wody oziębiają się, stają się one cięższe i opadają w kierunku dna. Ten proces mieszania pionowego nazywany jest konwekcją. Wody te są jednak ciągle lżejsze od zalegających w nieckach słonych wód pod haloklinę, toteż ich opadanie odbywa się wyłącznie do halokliny. W Morzu Botnickim ze względu na znacznie mniejsze zasolenie w głębszych warstwach wody, procesy konwekcyjne docierają do dna. W rezultacie na tym obszarze nie istnieje stała haloklina z zalegającymi pod nią słonymi wodami. W wodach przydennych w Bałtyku Właściwym, z upływem czasu, tlen rozpuszczony w wodzie ulega zużyciu. Tworzą się martwe obszary, w których życie jest niemożliwe. Dna basenów stają się martwe, a zanik tlenu prowadzi do pojawienia się siarkowodoru. Należy podkreślić, że jest to proces naturalny w morzach, a nawet wodach przybrzeżnych o charakterze półzamkniętym. Po pewnym czasie następuje nowy wlew, który usuwa beztlenową wodę z dna. Wlewy wód słonych do Bałtyku mają fundamentalne znaczenie dla środowiska morza. W ciągu ostatniego stulecia miało miejsce około 90 wlewów nierównomiernie rozmieszczonych w czasie. Jednym z dłuższych okresów stagnacji (bez wlewów) był 8 letni od 1985 do 1993 roku. W styczniu 1993 roku, w rezultacie 3 tygodniowego okresu silnych wiatrów zachodnich, wpłynęło do Bałtyku około 310 km^3 wody. Miała ona w połowie zasolenie większe od 17 PSU i zastąpiła przydenne wody pozbawione tlenu wodami natlenionymi. Dodatkowym rezultatem wlewów jest podniesienie się średniego zasolenia w morzu.

Z przedstawionego powyżej obrazu wynika, że zmienność warunków hydrologicznych pod haloklinę zależy głównie od epizodycznych wlewów słonych wód z Morza Północnego. Zupełnie odmienne przebiega kształtowanie hydrologii wód nad haloklinę. Decydującą rolę odgrywa sezonowa zmienność temperatury powietrza, wynikająca z wyraźnych pór roku w naszej strefie klimatycznej. Pod koniec zimy woda do halokliny jest bardzo dobrze wymieszana i tworzy jednorodną warstwę o temperaturze 1–2 °C. W okresie wiosennym powierzchniowe ogrzewanie powoduje wzrost temperatury w górnej warstwie wody. Podczas silniejszych wiatrów powierzchniowa warstwa wody ulega wymieszaniu. Powoduje to powstanie w miarę jednorodnej warstwy wody z wyraźnym ostrym skokiem temperatury na głębokości od kilkunastu do 20–40 m. Zjawisko to nosi nazwę termokliny i jest charakterystyczne w okresie lata zarówno w morzach, jak i jeziorach. W miarę upływu czasu termoklina znajduje się coraz głębiej. Jest ona jednocześnie warstwą wzrostu gęstości, co powoduje, że stanowi ona barierę dla mieszanie się wód głębszych z powierzchniowymi. Wraz z nastaniem jesieni powierzchnia wody zaczyna się ochładzać i jej wody stają się cięższe. Wody powierzchniowe zaczynają opadać, wypierając cieplejsze, niżej zalegające wody ku górze. W rezultacie dochodzi do konwekcji, która prowadzi do wyrównania profilu temperatury w warstwie wody aż do halokliny.

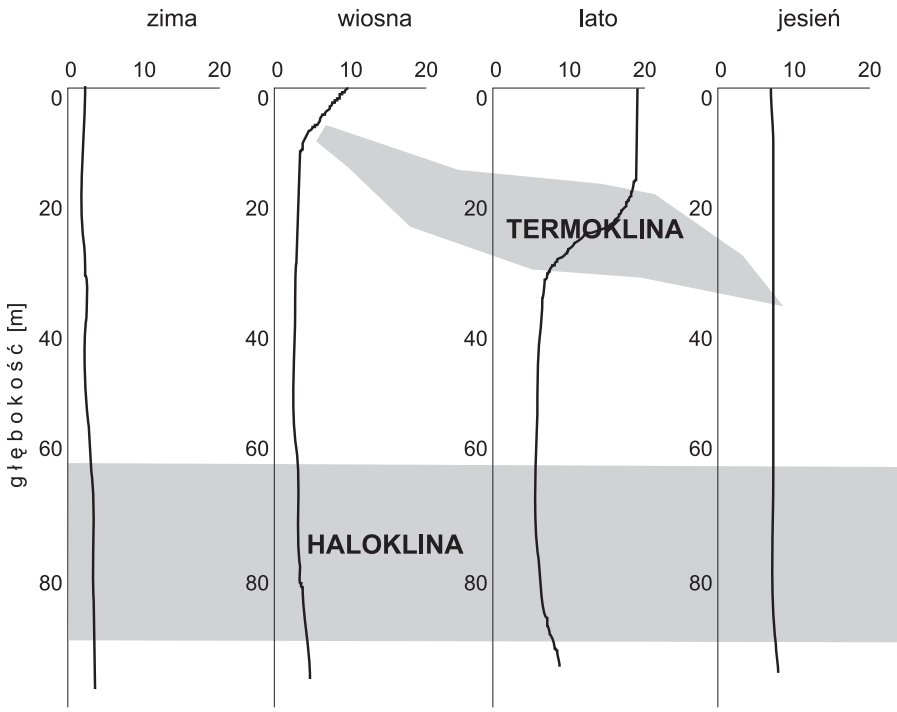
Mieszanie powierzchniowej warstwy wody jest powodowane głównie przez wiatr, który wiejąc nad powierzchnią morza, przekazuje wodzie energię. W rezultacie na powierzchni morza rozwija się falowanie wiatrowe oraz powstają prądy dryfowe. Sfalowana powierzchnia morza przedstawia dość chaotyczny obraz, a do jej opisu stosuje się takie parametry jak średnia lub maksymalna wysokość fali, jej długość i okres. Długość fali wiąże się z głębokością do jakiej następuje mieszanie wody powodowane przez to falowanie. Można przyjąć, że mieszanie następuje do głębokości równej połowie długości fali.



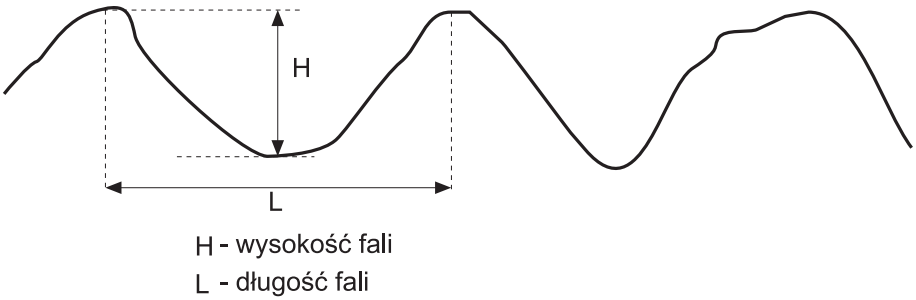
Rys. 1.4 Dno Morza Bałtyckiego tworzy baseny oddzielone progami



Rys. 1.5 Historia wlewów w latach 1900–1995 oraz mechanizm wymiany wody w najgłębszych warstwach morza (na podstawie różnych źródeł)



Rys. 1.6 Sezonowa zmienność pionowego rozkładu temperatury wody (na podstawie różnych źródeł)



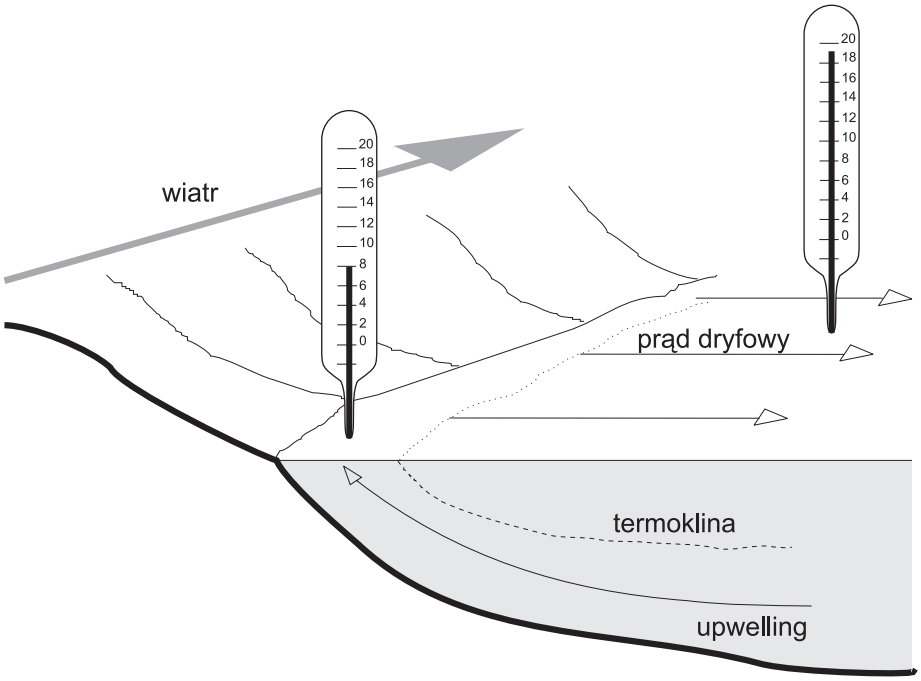
Rys. 1.7 Podstawowe parametry falowania

Tab. 1.3 Opis powierzchni morza odpowiadający różnym stopniom skali Beauforta i skali stanów morza

Stan morza	Stopnie Beauforta	Prędkość wiatru w [$m\,s^{-1}$]	Wygląd powierzchni morza	Maksymalna wysokość fali w [m]
0	0	0 – 0,2	lustrzana powierzchnia morza	0,0
1	1	0,2 – 1,5	pojawiają się na powierzchni morza najdrobniejsze fale	0,1
2	2 – 3	1,5 – 5,5	pojawia się fala bez białych grzyw	1,0
3	4	5,5 – 8	pojawiają się grzywy na falach	2,1
4	5	8 – 10,5	częste białe grzywy na falach	2,5
5	6	10,5 – 14	fale trójwymiarowe, tworzą się białe grzywacze	4,3
6	7	14 – 17	na falach piana układa się w pasma	5,9
7	8 – 9	17 – 25	grzbiety fal stają się strome i załamują się, morze bieleje, zaczyna się huczenie morza	9,4
8	10	25 – 30	tworzą się wysokie wały wodne, morze białe od piany	12,1
9	11 – 12	> 30	wały wodne osiągają potężne rozmiary, wiatr niesie pył wodny, całe morze białe od piany	> 12,1

Maksymalne długości fal występujących na Bałtyku wynoszą około 80 metrów. Oznacza to, że fale takie są w stanie wymieszać warstwę wody od powierzchni do głębokości około 40 m. Okresy sztormowe stanowią w sumie około 2 tygodni w roku. Zdecydowanie przeważają dni spokojne, których jest około 270. W czasie pozostałych 80 dni powierzchnia morza jest średnio sfalowana. Stopień sfalowania powierzchni morza opisuje skala stanów morza, mająca bezpośredni związek ze skalą prędkości wiatru, zwaną skalą Beauforta. W opinii żeglarzy i marynarzy Morze Bałtyckie ma falę przykrą i niebezpieczną. W porównaniu z długą falą oceaniczną jest ona krótka, stroma, szybko narastająca.

Typowym zjawiskiem w strefie brzegowej podczas falowania jest powstawanie tak zwanych prądów rozrywających. Są to wąskie, najczęściej kilkudziesięciometrowej szerokości, szybkie strumienie wody, płynące od lądu w kierunku morza. Czasem są one tak szybkie, że pływak nie ma możliwości powrotu do lądu. Znajomość tego zjawiska jest niezbędna przy pływaniu po sfalowanym morzu. Zamiast tracić siły na płynięcie pod prąd, należy popłynąć równolegle do brzegu, aby wyjść ze strefy prądu rozrywającego.



Rys. 1.8 Mechanizm powstawania upwellingu

Oprócz falowania wiatry wiejące nad powierzchnią morza powodują ruchy wody zwane prądami dryfowymi lub wiatrowymi. Woda nie porusza się zgodnie z kierunkiem wiatru, ale pod wpływem siły Coriolisa[1] jest odchylana w prawo (na półkuli północnej) od kierunku, w którym wieje wiatr. Prądy dryfowe są odpowiedzialne za zjawisko, którego świadkami są co roku wczasowicze na wielu plażach polskiego wybrzeża od Półwyspu Helskiego po Kołobrzeg. W słoneczne, gorące dni temperatura wody, która poprzedniego dnia wynosiła około 20 °C, spada gwałtownie do 8–10 °C. Zjawisko to nosi nazwę upwellingu i jest spowodowane przez wypływanie spod termokliny zimnych wód przy brzegu. Występuje ono, gdy wieje wiatr wzdłuż brzegu z kierunków wschodnich: od północno-do południowo-wschodniego. Powoduje on odpływ wód powierzchniowych od brzegu. W miejsce tych wód napływają zimne wody spod termokliny. Zjawisko to może trwać kilka a nawet kilkadziesiąt dni i ustępuje po zmianie kierunku wiatru.

Silne wiatry powodują podniesienie wody w strefie brzegowej zwane spiętrzeniami sztormowymi. W rezultacie podnosi się poziom wody w morzu, co grozi zalaniem przybrzeżnych obszarów. Zakres zmian poziomu morza wynosi około 3 metrów, czyli po półtora metra w dół i w górę od stanu średniego, określanego umowną wartością 500 centymetrów. Największy dotychczasowy poziom morza zanotowano 10 lutego 1874 roku w Kołobrzegu. Wyniósł on 716 cm, a więc ponad 2 metry powyżej stanu średniego. Obecnie, ze względu na globalne ocieplenie, prognozuje się podniesienie średniego poziomu oceanów, w tym i Bałtyku, o około 40 centymetrów w ciągu następnych 100 lat. Może to spowodować zwiększone zagrożenie zalewania strefy brzegowej i wzmożone niszczenie brzegów (erozję) w czasie silnych sztormów.

[1] Siła Coriolisa jest rezultatem wirowego ruchu Ziemi.

Funkcjonowanie ekosystemu Bałtyku jest kontrolowane przez położenie i historię formowania się tego morza.

W ciągu ostatnich 10000 lat, Bałtyk przechodził co najmniej 6 dużych i kilka mniejszych zmian zasolenia i temperatury. Dla zilustrowania znaczenia tych faz rozwojowych dla ekosystemu dzisiejszego Bałtyku warto przedstawić krótką charakterystykę funkcjonowania ekosystemu w dwóch skrajnych fazach – zimnej i słonawej (Morze Yoldia 10000–9000 lat temu) oraz ciepłej i słodkowodnej (Jezioro Ancylusowe 9000–8000 lat temu).

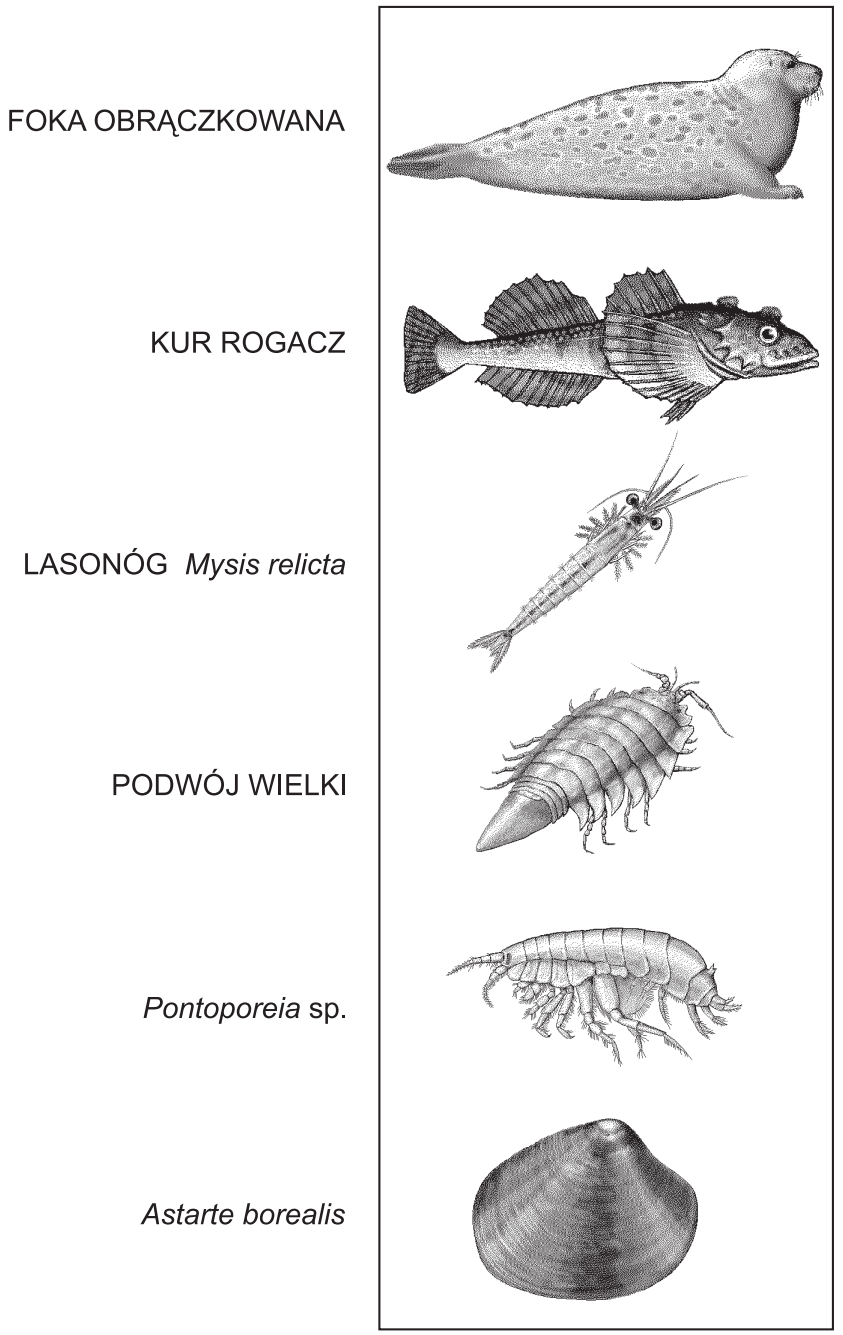
Bałtyckie Morze Yoldia miało charakter zbliżony do dzisiejszego, słonawego i oligotroficznego Morza Karskiego. W czasie jesieni, podczas formowania się zimowej pokrywy lodowej, następowało pionowe mieszanie (konwekcja) wody do warstwy skoku gęstości, a w płytkich akwenach aż do dna. W efekcie Morze Yoldia miało zimne, dobrze natlenione wody oraz zapewnione coroczne wynoszenie substancji biogenicznych z dna do powierzchni. Możemy sądzić, że podobnie jak w dzisiejszych morzach arktycznych występował bardzo intensywny, wiosenny zakwit fitoplanktonu, poprzedzający pojawienie się nowej generacji zooplanktonu. Rozwój fitoplanktonu regulowany jest przede wszystkim cyklem oświetlenia. Przy pewnej długości dnia (charakterystycznej dla poszczególnych gatunków i grup glonów), wiosną ilość światła jest już wystarczająca do efektywnej fotosyntezy. Komórki glonów dzielą się szybko, wykorzystując bogate, po okresie zimowym, zapasy soli biogenicznych. Wiosenne nasłonecznienie ogrzewa powierzchniową warstwę wód, a topniejące lody dodają warstwę słodkich wód na powierzchni morza i powodują powstanie uwarstwienia (stratyfikacji) gęstościowego. Dzielące się komórki glonów opadają powoli w kolumnie wody (sedymentują). Nie opadają one jednak na dno, ponieważ zatrzymują się na warstwie skoku gęstości. Taki jest przebieg zakwitu, który trwa aż do wyczerpania substancji biogenicznych w górnej warstwie wody. Organizmy zwierzęce (zooplankton) podlegają jednak innemu mechanizmowi regulacyjnemu. Dla nich ważniejsza niż światło jest temperatura wody. Wczesną wiosną, gdy światła jest już dużo, ale woda ma wciąż niską temperaturę, rozwój jaj i larw skorupiaków planktonowych jest bardzo powolny (20 dni trwa inkubacja jaja widłonoga w temperaturze około 1 °C). Późną wiosną, kiedy wzrasta temperatura wody, tempo rozwoju zooplanktonu również wzrasta (inkubacja jaja widłonoga trwa 5 dni w temperaturze 6 °C). W tym czasie fitoplankton zbliża się już do wyczerpania zapasów soli biogenicznych i zakwit ma się ku końcowi. Tak więc szczyt rozwoju zooplanktonu w morzach zimnych przypada po szczycie rozwoju fitoplanktonu. To rozminięcie się w czasie powoduje opadanie na dno (sedymentację) wielkiej ilości nieskonsumowanego w toni wodnej planktonu roślinnego i dostarcza pokarmu dla żyjących na dnie organizmów filtrujących i mułożernych. Dzięki zimowej konwekcji nie groziło powstanie deficytu tlenowego przy dnie. Bałtyk nie leży w strefie polarnego cyklu oświetlenia, a światło dostępne do fotosyntezy występuje przez cały rok, więc zakwit fitoplanktonu w Morzu Yoldia mógł wystąpić jeszcze raz późnym latem i wczesną jesienią, w oparciu o zregenerowane substancje biogeniczne po pierwszym wiosennym kwitnieniu. Lód morski występował wówczas przez wiele miesięcy w roku, dodatkową produkcję pierwotną zapewniała flora lodowa – wyspecjalizowane gatunki okrzemek, które rozwijają się na dolnej warstwie lodu. Morze zimne nie oznacza morza ubogiego, strefy subarktyczne z sezonowo występującym lodem morskim należą do najbardziej produktywnych obszarów morskich na świecie. Po arktycznej fazie

Bałtyku pozostały do dziś nieliczne reliktowe gatunki małży, skorupiaków i ryb. Współczesne rozmieszczenie takich reliktów polodowcowych jak podwój *Saduria entomon* czy lasonóg *Mysis relicta* obejmuje również wody słodkie – polodowcowe jeziora w Szwecji i Finlandii. Dawniej morskie polodowcowe gatunki reliktowe można było spotkać również w naszych jeziorach przybrzeżnych, ale zanieczyszczenia doprowadziły do wymarcia tych wrażliwych i mało licznych gatunków na terenie Polski. Poza reliktowymi populacjami w Bałtyku, podwoje, lasonogi i obunogi występują dziś w słonawych rejonach mórz Arktyki, głównie Morza Białego, Barentsa i Karskiego.

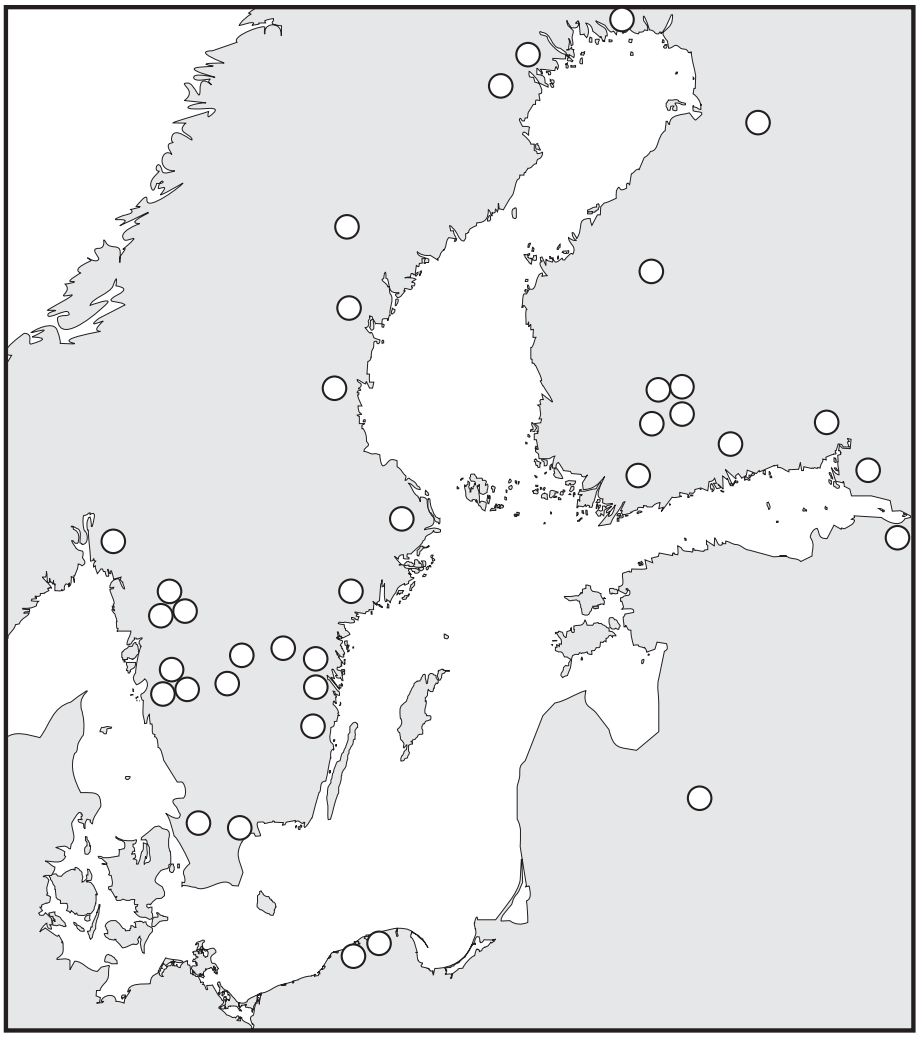
Drugą skrajnością w rozwoju Bałtyku była faza Jeziora Ancylusowego. Bałtyk stał się wówczas wielkim jeziorem o śladowej ilości soli w wodzie. W tym okresie dominowała słodkowodna fauna małży i ślimaków. Do dziś pozostały w Bałtyku takie gatunki jak *Ancylus fluviatilis*, *Lymnaea peregra* i inne. Przez analogię z podobnymi zbiornikami (wielkie jeziora kanadyjskie) można przypuszczać, że Bałtyk był oligotroficznym (mało produktywnym) zbiornikiem ze znacznym udziałem zielenic w produkcji pierwotnej. Występowały wówczas rozległe płycizny porośnięte szuwarami, na których później odkładał się torf. W porównaniu z fazą Yoldia, podstawowe znaczenie w przepływie energii miał przepływ pelagiczny (od fitoplanktonu do ryb pelagicznych).

Współcześnie obserwuje się wzrost liczby gatunków morskich w faunie Bałtyku. Mogłoby to świadczyć o tym, że Bałtyk ewoluuje od słonawowodnego morza oligotroficznego do coraz bardziej słonego morza o charakterze eutroficznym. Ponieważ żadne dane hydrologiczne nie potwierdzają takiego stwierdzenia (zasolenie nie zwiększa się), należy przyjąć, że proces oceanizacji naszej fauny jest po prostu efektem czasu. W miarę upływu lat coraz więcej eurytopowych (konformistycznych) gatunków przedostaje się z Morza Północnego do Bałtyku. Niektóre z nich pozostają tu tylko na okres swego życia nie rozmnażając się, inne na kilka lub więcej pokoleń znajdują dogodne warunki. Proces ten trwa od dawna. Szereg gatunków typowych dla dzisiejszej fauny to przybysze, którzy znaleźli się w naturalny sposób bądź zostali nieświadomie przetransportowani przez ludzi w czasie ostatniego tysiąca lat. Np. piaskołaz *Mya arenaria* został przywieziony do Europy z wybrzeży Ameryki Północnej. Kraby (*Rhithropanopeus harrisii*, *Eriocheir sinensis* oraz *Carcinus maenas*) przywleczone zostały z wodami balastowymi z Ameryki i Azji podobnie jak wieloszczet *Marenzelleria neglecta*. W podobny sposób znalazł się tutaj ślimak *Potamopyrgus jenkinsi*, który przybył w XIX w. z Nowej Zelandii. Trzeba też pamiętać o gatunkach słonawowodnych i słodkowodnych importowanych współczesnie do Bałtyku z rejonu Morza Czarnego i Kaspijskiego (babka bycza *Neogobius melanostomus*, racicznica *Dreissena polymorpha*, okazjonalnie pojawiające się skorupiaki obunogie i szczeponogie).

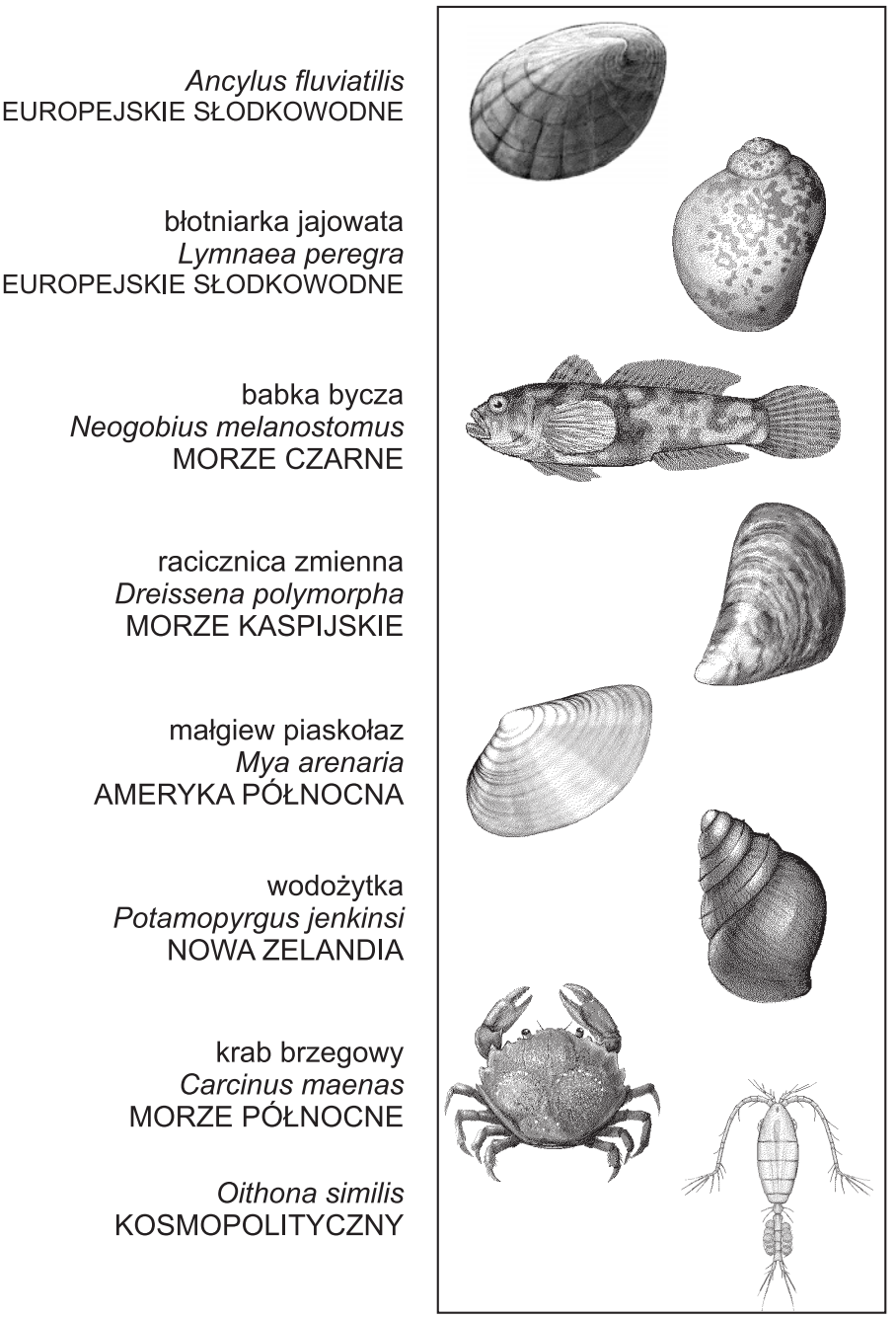
Charakterystyczną cechą fauny dennej Bałtyku jest mały udział zwierząt przechodzących w rozwoju stadium larwy planktonowej (pelagicznej) – w Morzu Północnym jest ich około 33 %, a w Bałtyku tylko 10 %. Prawdopodobnie zjawisko to wiąże się z mniejszą i mniej przewidywalną produkcją pierwotną Bałtyku w porównaniu z Morzem Północnym oraz z jego niskim zasoleniem. Stadium larwalne zwierzęcia bentosowego żyjące w planktonie pozwala lepiej wykorzystać zasoby środowiska, zmniejsza konkurencję pomiędzy pokoleniem rodzicielskim a potomstwem oraz sprzyja rozprzestrzenianiu się gatunku. Larwy planktonowe są jednak wrażliwe na zmiany środowiska i brak pokarmu, a ich przeżycie często wymaga specjalnych, kosztownych energetycznie przystosowań.



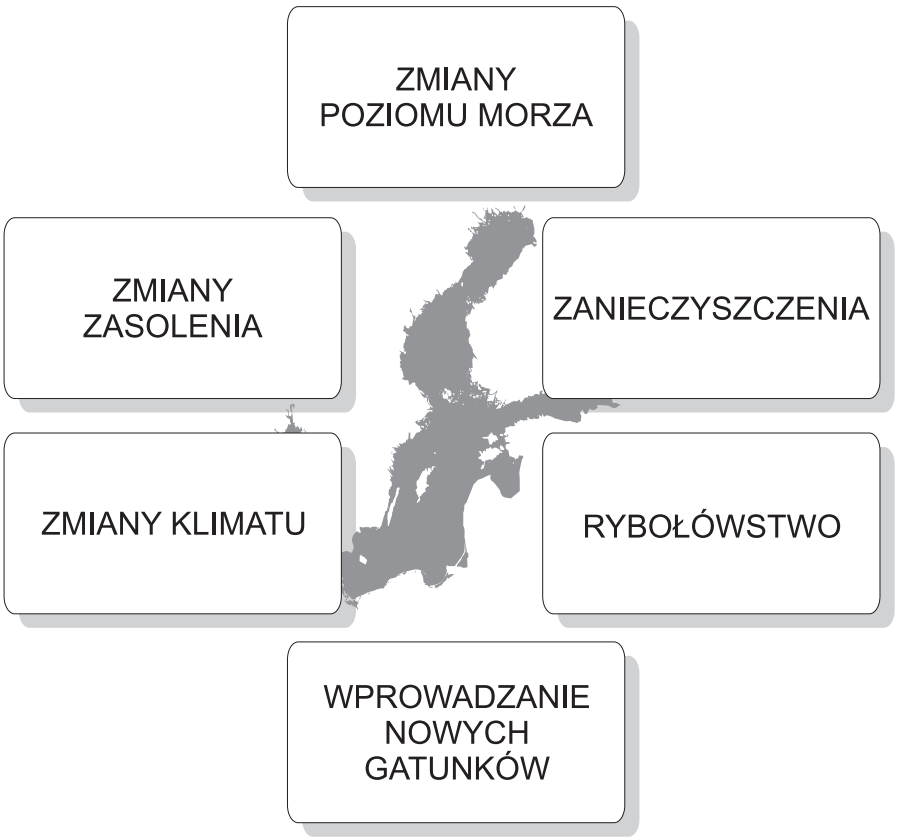
Rys. 1.9 Relikty arktycznego okresu historii Bałtyku (nie zachowano proporcji wielkości, na podstawie różnych źródeł)



Rys. 1.10 Jeziora słodkowodne, w których notowano występowanie reliktowych gatunków fauny bałtyckiej (wg Segerstrale 1957, zmienione)



Rys. 1.11 Różne pochodzenie zoogeograficzne fauny Bałtyku (nie zachowano proporcji wielkości, na podstawie różnych źródeł)



Rys. 1.12 Główne czynniki powodujące zmiany w funkcjonowaniu ekosystemu Bałtyku

Zoogeografia fauny bałtyckiej wskazuje wyraźnie na jej przejściowy charakter. Najwięcej gatunków to formy borealne pochodzące z szelfu Atlantyku (Morza Północnego). Udział gatunków arktycznych jest niewielki i mniej więcej podobny procent stanowią gatunki pochodzenia południowoeuropejskiego (pontokaspijskiego). Spory jest też udział gatunków kosmopolitycznych, które spotkać można we wszystkich niemal morzach świata.

Bałtyk, jaki dziś obserwujemy, jest tylko jednym z kolejnych stadiów rozwoju i zmian tego morza. Na ten mały zbiornik wodny działają zmiany klimatu, poziomu wód oceanicznych, koncentracje zanieczyszczeń, rybołówstwo, wprowadzanie (introdukcja) nowych gatunków, zmiany linii brzegowej. W oceanie oddziaływanie podobnych czynników jest buforowane przez ogrom mas wodnych, ale mały Bałtyk znajduje się w stanie ciągłego rozchwiania.

Rozdział 2

Woda słonawa

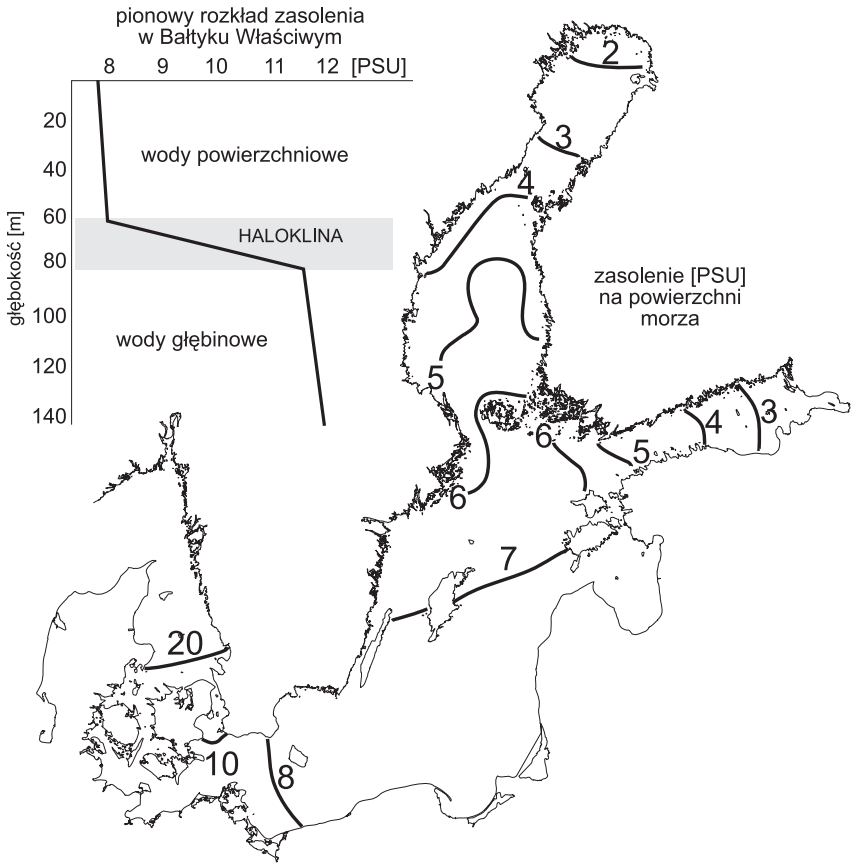
Jacek Urbański, Jan Marcin Węsławski

Podstawowym źródłem wody słodkiej w Bałtyku jest dopływ wód rzekami oraz przewaga opadu nad parowaniem.

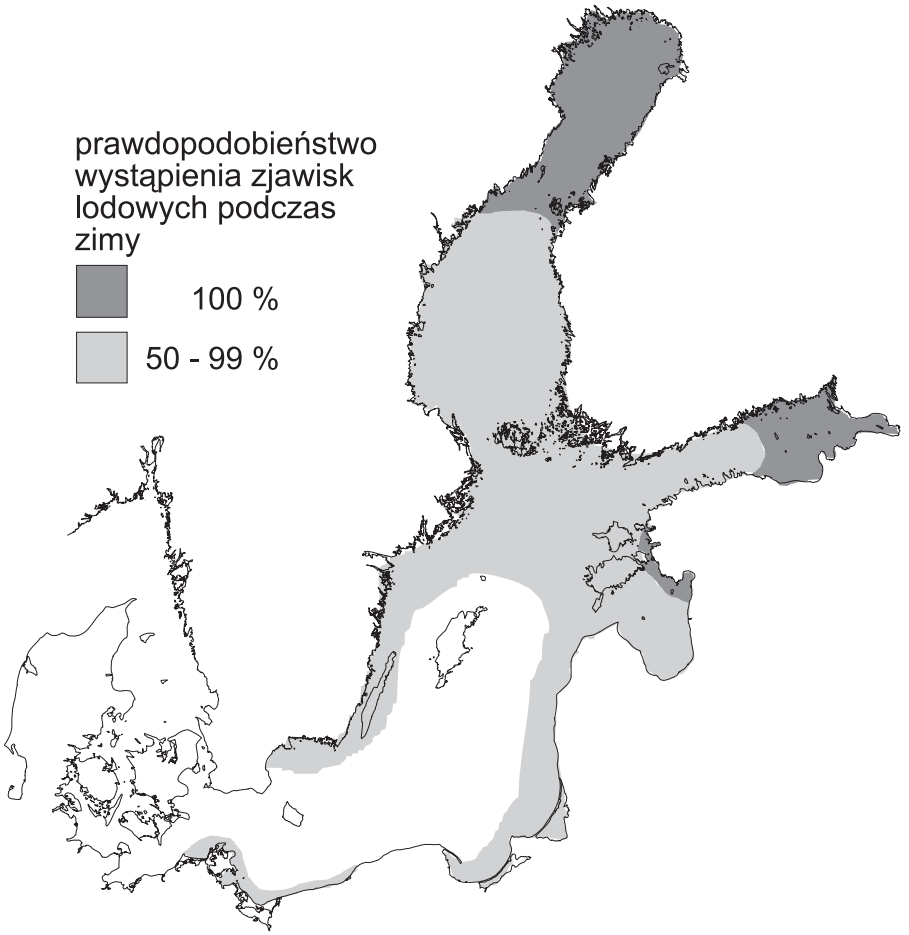
Szczególną cechą wód Bałtyku, w porównaniu z wodami oceanów i większości mórz, jest ich wyraźnie mniejsze zasolenie. W powierzchniowej warstwie zmniejsza się ono w miarę oddalania od Kattegatu z 20 do 2 PSU u północnych krańców Zatoki Botnickiej i wschodnich krańców Zatoki Fińskiej. Jest to spowodowane dopływem wód słodkich do Bałtyku. Źródłem tego dopływu jest przewaga opadów nad parowaniem oraz dopływ wody rzekami. Ilość wody, która wpływa do Bałtyku rzekami, jest dziesięć razy większa niż nadwyżka opadu nad parowaniem. Poziom wody w Bałtyku jest wyższy od poziomu w Morzu Północnym. Średni poziom w Kattegacie jest o około 10 cm wyższy od poziomu wody w Morzu Północnym. Średni poziom wody Bałtyku Właściwego znajduje się 18 cm, a Zatoki Botnickiej 36 cm wyżej. W rezultacie następuje wypływ wody z Bałtyku, który jest średnio dwa razy większy od masy wód wpływających do Bałtyku. Podkreślić tu należy rolę rzek, które są głównym źródłem wody słodkiej. Ze względu na wnoszone substancje biogeniczne i zanieczyszczenia rola rzek w kształtowaniu środowiska Morza Bałtyckiego jest ogromna.

Tab. 2.1 Największe rzeki oraz objętości wody wnoszone przez nie do morza

Rzeka	Odpływ [$km^3\,rok^{-1}$]
Newa	82,0
Wisła	30,0
Dźwina	21,7
Niemen	21,3
Kemi	18,3
Odra	15,0
Lule	15,9



Rys. 2.1 Rozkład zasolenia w wodach Bałtyku



Rys. 2.2 Zjawiska lodowe na Bałtyku (na podstawie różnych źródeł)

Przewaga wypływu wody z Bałtyku, wynikająca z jego wyższego poziomu, z jednoczesnymi wlewami słonej wody przy dnie, przypomina typową cyrkulację w ujściach rzecznych, która nosi nazwę cyrkulacji estuariowej. Stąd często spotkać można stwierdzenie o estuariowym charakterze Morza Bałtyckiego.

W okresie zimy na Bałtyku pojawia się lód. Ze względu na duże zróżnicowanie klimatyczne od północnych do południowych krańców morza, prawdopodobieństwo wystąpienia zjawisk lodowych na morzu zmienia się w znaczącym stopniu w miarę przesuwania się z północy na południe. Występowanie pokrywy lodowej w północnej części Bałtyku jest znaczącym elementem środowiska, ze względu na długi czas jej występowania. W Zatoce Botnickiej corocznie lód pokrywa powierzchnię wody przez cztery do pięciu miesięcy. Okres występowania zjawisk lodowych zmniejsza się z północy na południe. Intensywność zjawisk lodowych na Bałtyku zmienia się z roku na rok. W czasie ostrych zim zjawiska lodowe występują na całym Bałtyku, w czasie zim łagodnych na Bałtyku Właściwym lód nie występuje.

Fauna i flora Bałtyku odzwierciedla skromne możliwości, które stwarza środowisko młodego, izolowanego morza.

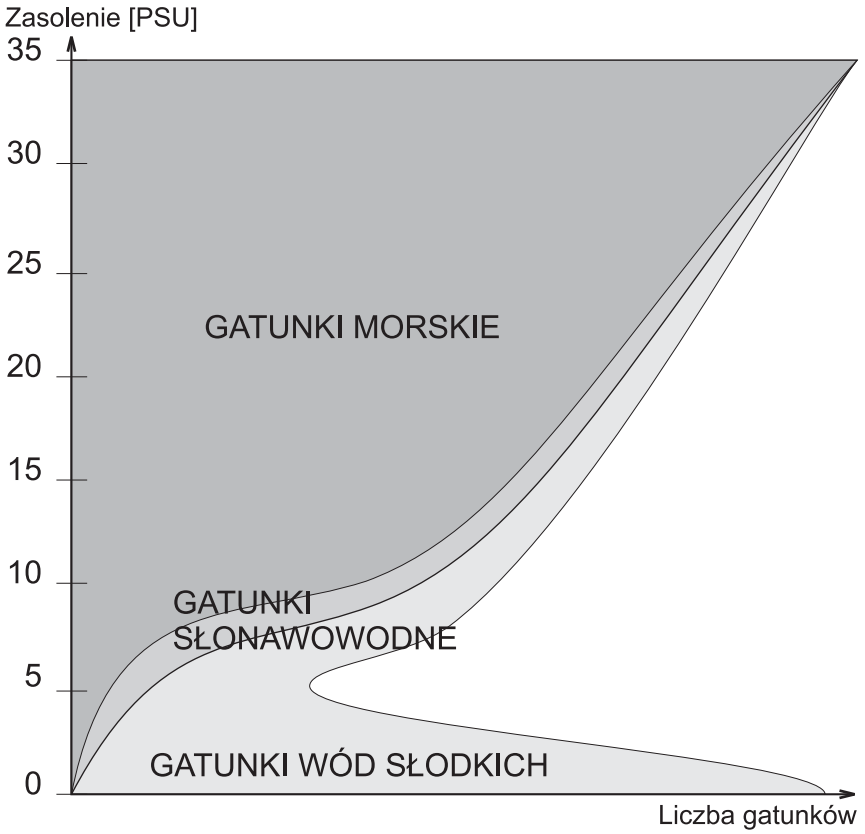
Dlaczego zasolenie jest problemem dla organizmów wodnych?

Przejście ze środowiska morskiego do słonawowodnego, jak i przejście organizmów słodkowodnych do morza, wymaga pokonania różnicy gęstości środowiska wodnego. Płynące z wodą rzeczną do morza ryby i bezkręgowce mają płyny ustrojowe o wysokiej gęstości, ich błony komórkowe działają w kierunku zatrzymania koncentracji soli wewnątrz ustroju. Po wpłynięciu do morza, następuje odwrócenie sytuacji – środowisko jest bardziej nasycone solami niż wnętrze organizmu i konieczne jest przestawienie funkcjonowania na powstrzymanie wody przed wypływaniem z komórek. Osmoza, czyli selektywne przepuszczanie soli przez błony komórkowe w kierunku wyrównania ciśnienia hydrostatycznego, może być regulowana na rozmaite sposoby. Pod względem reakcji na zmiany zasolenia organizmy wodne dzieli się zwykle na osmokonformistyczne (regulacja płynów ustrojowych do stężenia w środowisku) oraz osmoregulujące (utrzymujące gęstość płynów ustrojowych inną niż w środowisku zewnętrznym). Organizmy euryhalinowe to takie, które mogą żyć w bardzo szerokim przedziale zasolenia od wody słodkiej do morskiej. Wśród nich są zarówno osmokonformiści, jak i osmoregulatorzy. Organizmy stenohalinowe to takie, które wytrzymują bardzo niewielki zakres zmian zasolenia. Do tej grupy należą wyłącznie gatunki osmoregulacyjne, ale ich zdolności do osmoregulacji są bardzo słabe.

W dzisiejszym Bałtyku, gdzie znaczna większość obszaru morskiego ma zasolenie pomiędzy 5 a 8 PSU, środowisko jest zbyt wysłodzone dla prawdziwie morskiej fauny i zbyt słone dla organizmów słodkowodnych. Zakres 5–8 PSU określany jest często w literaturze jako „strefa minimum gatunkowego". We wszystkich niemal morzach świata, gdzie można zaobserwować przejście od wód słodkich do pełnomorskich, najmniej gatunków znajduje się właśnie w tym przedziale zasolenia. Oznacza to, że Bałtyk, ze względu

Tab. 2.2 Zmiany liczby gatunków makrofitów w zależności od zasolenia wody w Bałtyku

Takson	Cieśniny 27-33 PSU	Bałtyk Zachodni 17-24 PSU	Bałtyk Właściwy < 8 PSU
zielenice	69	29	15
brunatnice	102	45	20
krasnorosty	99	56	16
razem	**269**	**130**	**51**

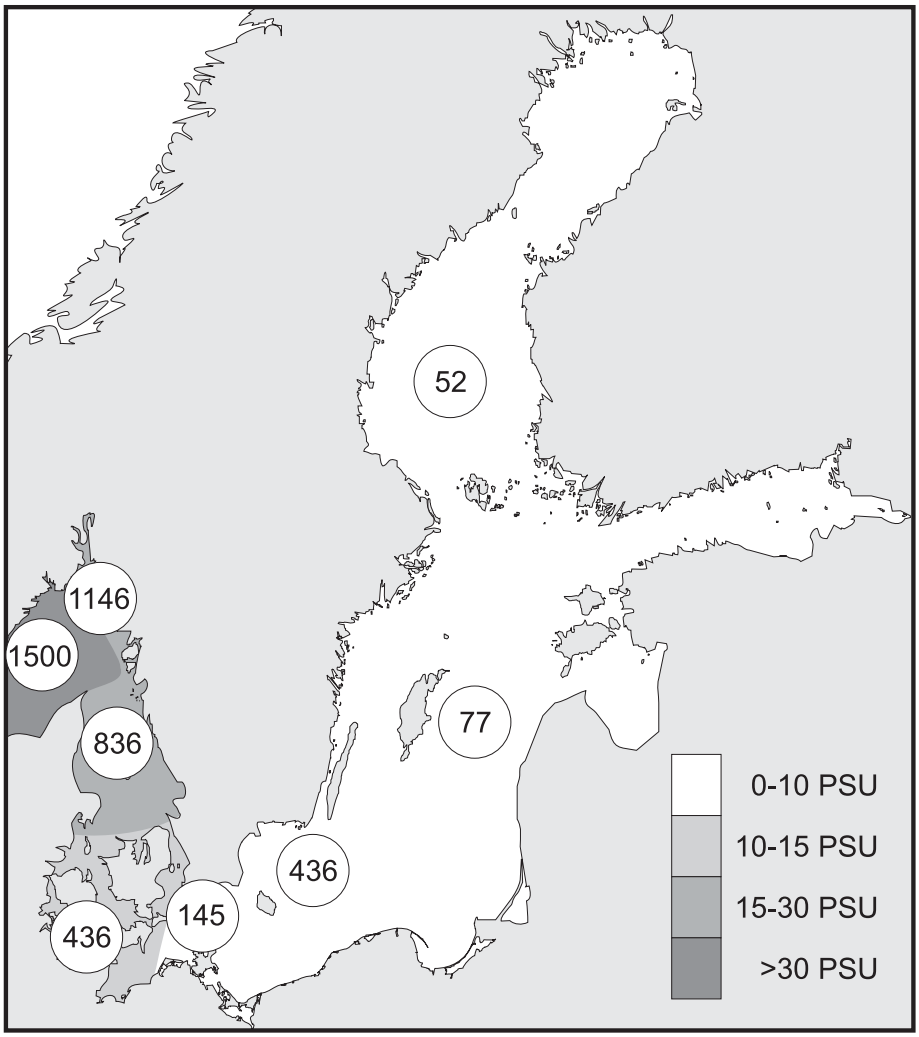


Rys. 2.3 Fauna denna i zasolenie (wg Zienkiewicza 1963, zmienione)

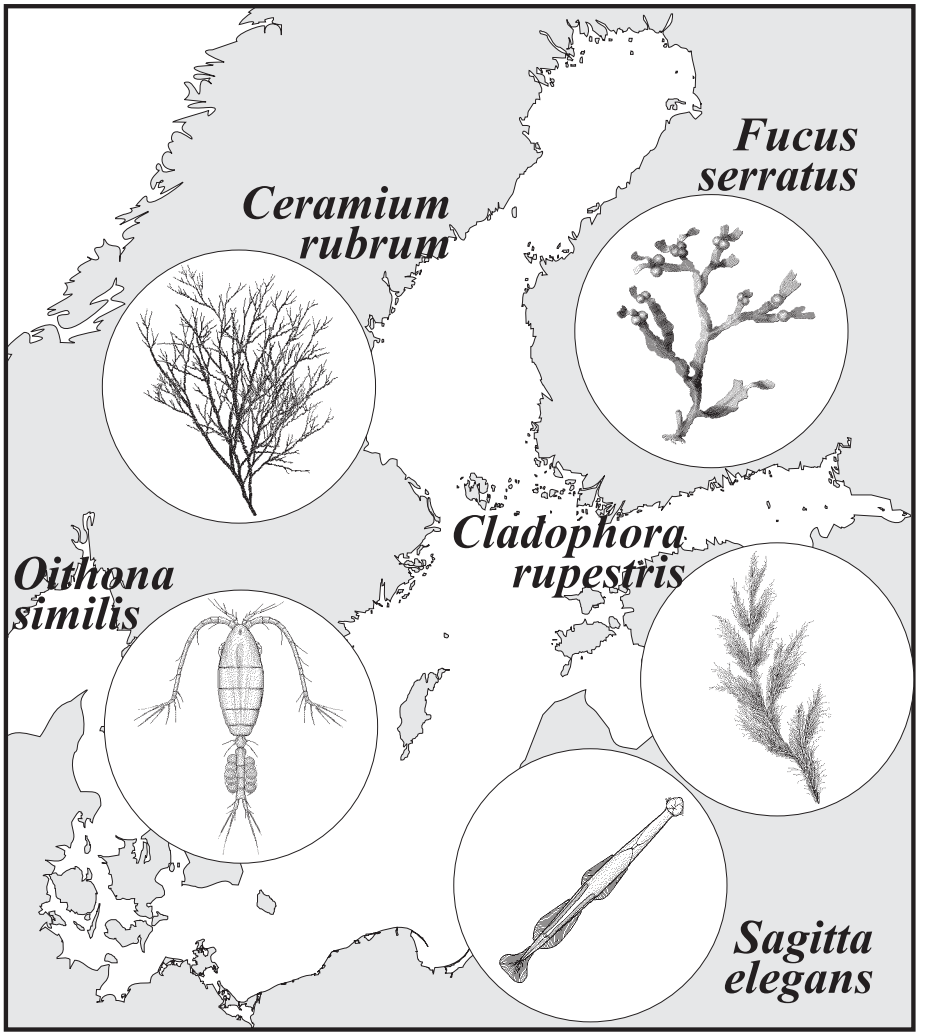
na swoje zasolenie, skazany jest w obecnym czasie na niską różnorodność gatunkową. Dobrym przykładem zależności liczby gatunków od wzrastającego zasolenia są makrofity (duże osiadłe glony). Bardziej szczegółowo można tę zmianę prześledzić na mapie rozmieszczenia fauny dennej, gdzie od 1500 gatunków występujących w Skagerraku, dochodzi się do 52 gatunków w Zatoce Botnickiej. Pojęcie bioróżnorodności po konferencji w Rio de Janeiro w 1992 roku (zwanej Szczytem Ziemi) jest jednym z kluczowych zagadnień nauk przyrodniczych. Jego istota oparta jest na hipotezie, że bogate w gatunki, zróżnicowane ekosystemy są bardziej produktywne, bardziej stabilne i łatwiej regenerują się po katastrofalnych wydarzeniach.

Bioróżnorodność może być rozpatrywana w różnych kategoriach:

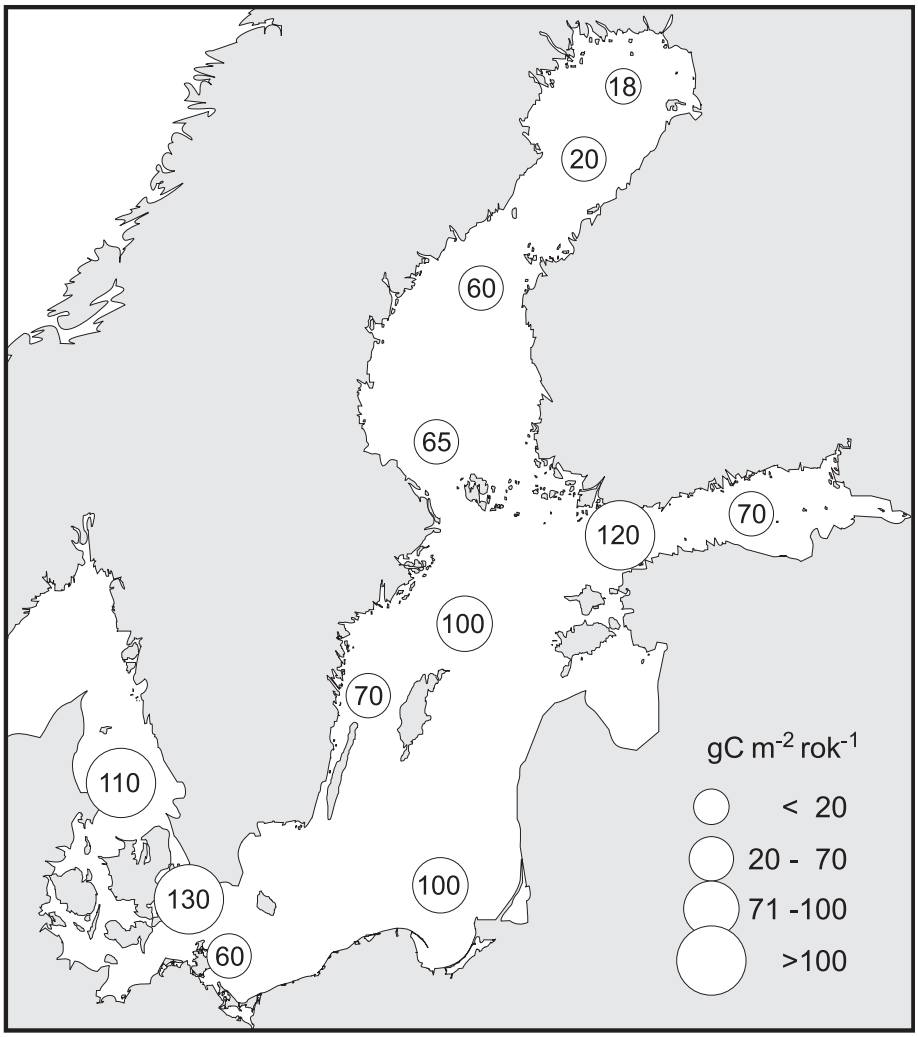
– Zróżnicowanie genetyczne wewnątrz populacji (poziom heterozygotyczności populacji). Zazwyczaj heterozygotyczność populacji morskich jest wyższa niż słodkowodnych, ponieważ gatunki morskie mają szersze areały, większe populacje i łatwiejszą zdolność rozprzestrzeniania się (dyspersji). Z tych powodów populacje zamieszkujące półzamknięte Morze Bałtyckie mają niższy stopień różnorodności genetycznej w porównaniu do analogicznych populacji z Morza Północnego.
– Różnorodność gatunkowa, tj. liczba gatunków, które można znaleźć na danym terenie. Najczęściej przedstawia się ją w stosunku do liczby osobników, czyli np. ile gatunków znajduje się w 100 losowo zebranych osobnikach z danego terenu. Całkowita liczba gatunków nie jest w Bałtyku wysoka. Dodatkowo, wiele gatunków reprezentowanych jest przez bardzo liczne populacje, co obniża wskaźniki bioróżnorodności.
– Bioróżnorodność filetyczna, która określa, ile na danym terenie występuje dużych jednostek taksonomicznych, takich jak rzędy, gromady lub typy. Nowoczesne systemy oceny jakości środowiska opierają się coraz częściej na różnorodności filetycznej, ponieważ oznaczanie gatunków jest często bardzo pracochłonne i możliwe tylko przez nielicznych specjalistów. Bałtyk cechuje niski poziom różnorodności filetycznej, ponieważ wiele typów taksonomicznych występuje tylko w morzach pełnosłonych.
– Różnorodność siedlisk ekologicznych odzwierciedla zróżnicowanie fizyczne środowiska, takie jak uwarstwienie hydrologiczne toni wodnej, występowanie różnych rodzajów dna, typów wybrzeży itd. Pod tym względem Bałtyk nie jest wcale mniej zróżnicowany niż sąsiednie morza (Północne czy Białe). Trzeba jednak pamiętać, że niektóre siedliska w Bałtyku nie nadają się do zamieszkania (beztlenowe strefy głębi bałtyckich).
– Różnorodność nisz ekologicznych oznacza liczbę funkcji, które mogą pełnić organizmy w ekosystemie. Obrazowo przedstawia się to jako „rynek pracy i zawody" podejmowane przez poszczególne gatunki. W ten sposób określa się powiązania między organizmami, np. ile jest miejsc dla dużych drapieżników a ile dla żerujących na dnie roślinożerców. Im więcej jest możliwości „pracy" dla różnych gatunków, tym większa jest różnorodność nisz. Na pytanie „ile jest nisz w ekosystemie?" nie można odpowiedzieć przed jego zbadaniem. Dopiero analiza już istniejącego ekosystemu daje nam informację o występujących niszach. Zakłada się, że w naturalnych ekosystemach nie występują nie wykorzystane nisze ekologiczne. Na Bałtyku ten temat stanowi od lat kontrowersję – czy eliminacja wielu gatunków przez człowieka stworzyła miejsce dla innych gatunków? Czy miejsce szczupaka i łososia może zająć inny drapieżnik – foka? Bałtyk ma mniejszą różnorodność nisz w porównaniu z Morzem Północnym – np. liczba dużych drapieżnych ryb pelagicznych w Morzu Północnym przekracza 20 gatunków, podczas gdy w Bałtyku można do tej kategorii zaliczyć 1 lub 2 gatunki.
– Fragmentacja siedlisk jest ostatnio uznawana za jeden z najważniejszych czynników ograniczających bioróżnorodność. Problem ten opiera się na teorii biogeografii wysp McArthura i Wilsona, która mówi, że w danym regionie liczba gatunków zależy wprost proporcjonalnie od całkowitej powierzchni wyspy (obszaru nadającego się do zasiedlenia). Konsekwencją tego jest fakt, że bioróżnorodność nie może utrzymać się na niewielkich obszarach. Do jej utrzymania niezbędny jest pewien krytyczny areał. Istnienie 20 małych rezerwatów fauny morskiej utrzyma mniej gatunków niż jeden duży. Bałtyk jest szczególnie narażony na fragmentację siedlisk. Rozdzielają je strefy azoiczne na głębiach, a na wybrzeżach obszary zagospodarowane, refulowane itd.



Rys. 2.4 Liczba gatunków fauny dennej w Bałtyku w zależności od zasolenia wody (wg Zienkiewicza 1963, Sjöberga 1992, zmienione)



Rys. 2.5 Przykłady submergencji – płytkowodne gatunki z Morza Północnego występują głębiej w Bałtyku, unikając wysłodzonej wody powierzchniowej (na podstawie różnych źródeł)



Rys. 2.6 Schematyczne przedstawienie produkcji pierwotnej w Bałtyku (wg Hällforsa i in. 1981)

– Wiek eksosystemu jest również czynnikiem określającym poziom bioróżnorodności. Systemy starsze, dłużej ewoluujące, mają większą różnorodność niż systemy młode. Pod tym względem Bałtyk należy do rekordzistów – jest to najmłodsze tej wielkości morze na świecie.

Najbardziej zróżnicowane środowiska morskie liczą do 800 gatunków makrofauny na $10\,m^2$, natomiast w Bałtyku w najlepszym razie można liczyć na 30 gatunków makrofauny z takiej powierzchni. Poziom bioróżnorodności Bałtyku mogłaby poprawić dostawa organizmów napływających z Morza Północnego, jednak nie sprzyja temu rodzaj wymiany wód między tymi morzami. Cyrkulacja estuariowa przez cieśniny duńskie wnosi do Bałtyku tylko wody przydenne, wpływa z nimi mała ilość larw planktonowych, które najliczniej występują w wodach powierzchniowych. Wody powierzchniowe zasilające Bałtyk z rzek niosą tylko gatunki słodkowodne, które giną szybko po zmieszaniu wód rzecznych z morskimi. Gatunki morskie wrażliwe na obniżone zasolenie występują w Bałtyku w głębszej, przydennej warstwie wód nawet wówczas, jeśli ich naturalnym siedliskiem w Morzu Północnym są przybrzeżne płycizny. Zjawisko to nosi nazwę submergencji – czyli zagłębiania się – i pozwala na występowanie w Bałtyku wielu gatunkom, które nie przeżyłyby w wysłodzonych wodach powierzchniowych.

Wody rzeczne wnoszą do Bałtyku wielkie ilości zawiesin, co powoduje zmętnienie powierzchniowej warstwy wód. Oznacza to ograniczenie dopływu światła słonecznego i zmniejszenie grubości warstwy wód eufotycznych (strefy, gdzie jest wystarczająca ilość światła dla fotosyntezy). Między innymi z tego powodu ujścia rzek niosących duże ilości substancji biogenicznych, nie są wcale najbardziej produktywnymi obszarami w Bałtyku. Produkcja pierwotna w silnie wysłodzonej Zatoce Botnickiej jest bardzo niska, natomiast bardzo wysoka w wymieszanych wodach cieśnin duńskich. Na wielkość produkcji pierwotnej w Zatoce Botnickiej wpływa bardzo ograniczona przejrzystość wody oraz silna stratyfikacja gęstościowa, która uniemożliwia latem dostawę substancji biogenicznych z warstwy wód dennych.

Rozdział 3

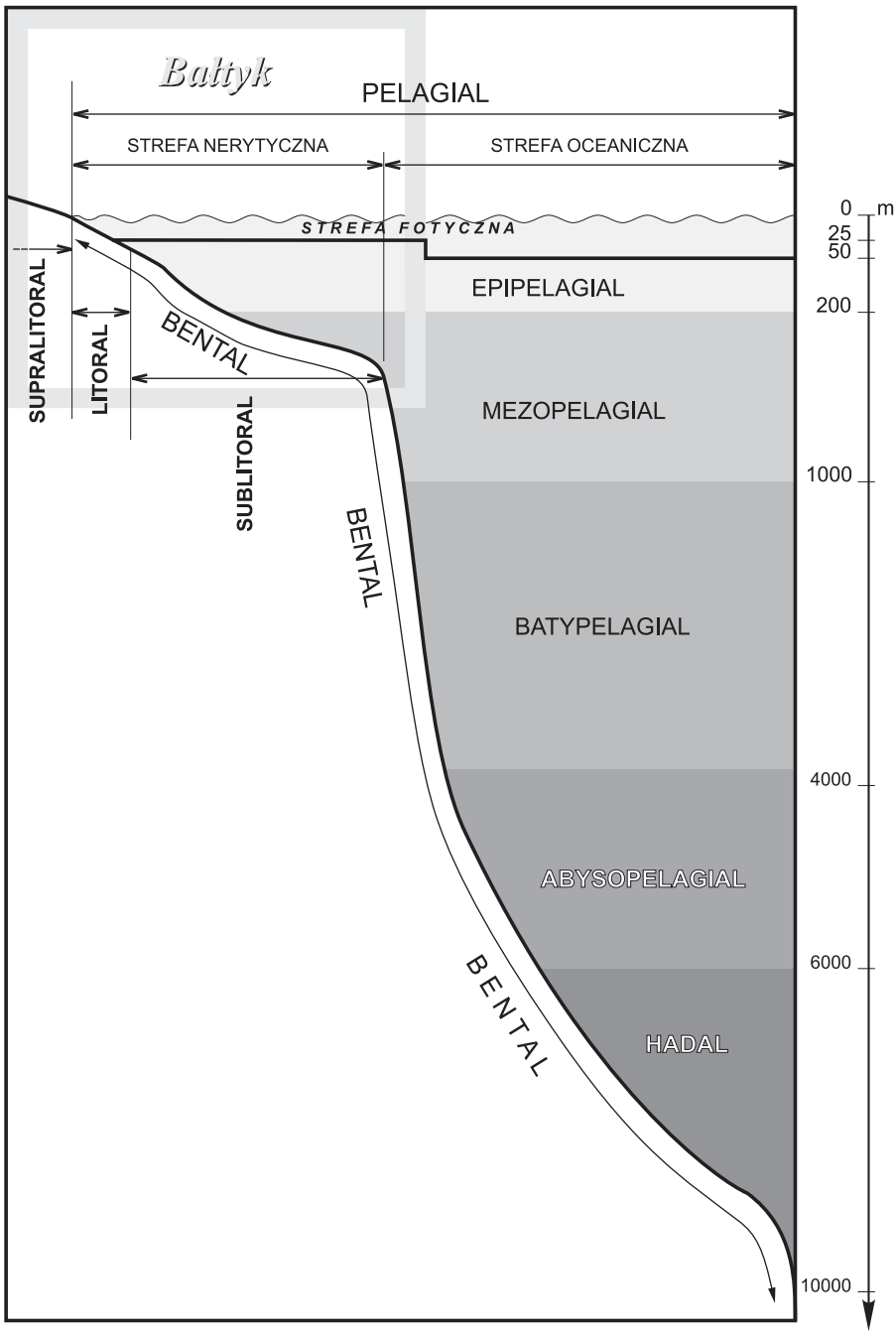
Współcześni mieszkańcy Bałtyku

Maria Szymelfenig

3.1 Ekosystem bałtycki

W ogromnych ekosystemach wodnych jakimi są oceany i morza wyodrębnia się szereg mniejszych jednostek strukturalnych, które ze względu na swe specyficzne cechy stanowią różne środowiska życia dla organizmów. Najbardziej podstawowy podział wyróżnia pelagial i bental. Pojęcie pelagialu odnosi się do całej toni wody, natomiast bentalu do dna, niezależnie czy jest to płytka strefa pływów, czy głęboki rów oceaniczny. Tak w pelagialu, jak i w bentalu wydziela się strefy, których klasyfikacja oparta jest na uwzględnieniu wielu czynników takich jak: głębokość, odległość od brzegu, ilość światła w toni wodnej, topografia dna i in. Pelagial dzieli się na strefę nerytyczną i strefę oceaniczną. Strefa nerytyczna obejmuje toń wodną nad szelfem kontynentalnym, który sięga do głębokości około 200–500 m. Strefa oceaniczna rozciąga się nad obszarami, na których dno usytuowane jest głębiej. Dno szelfowe dzieli się na supralitoral (strefę oprysku na granicy ląd-morze), litoral (obszar pomiędzy najwyższym a najniższym poziomem wody wyznaczającym granice pływów) i sublitoral (poniżej litoralu aż do końca szelfu). Fakt, że płytkie dno bałtyckie to obszar szelfu kontynentalnego, a największa głębia bałtycka osiąga niewiele ponad 450 m i zajmuje nieznaczną powierzchnię Bałtyku, powoduje, że praktycznie nie używa się tu pojęcia strefy nerytycznej, a mianem pelagialu określa całą bałtycką toń wodną. Litoral ma w Bałtyku bardzo ograniczony zasięg, gdyż różnice poziomu morza są bardzo małe i wywołane głównie spiętrzeniami wiatrowymi. Górna, płytsza część sublitoralu do głębokości około 20 m oraz warstwa toni wodnej znajdującej się nad nią określane są jako strefa przybrzeżna.

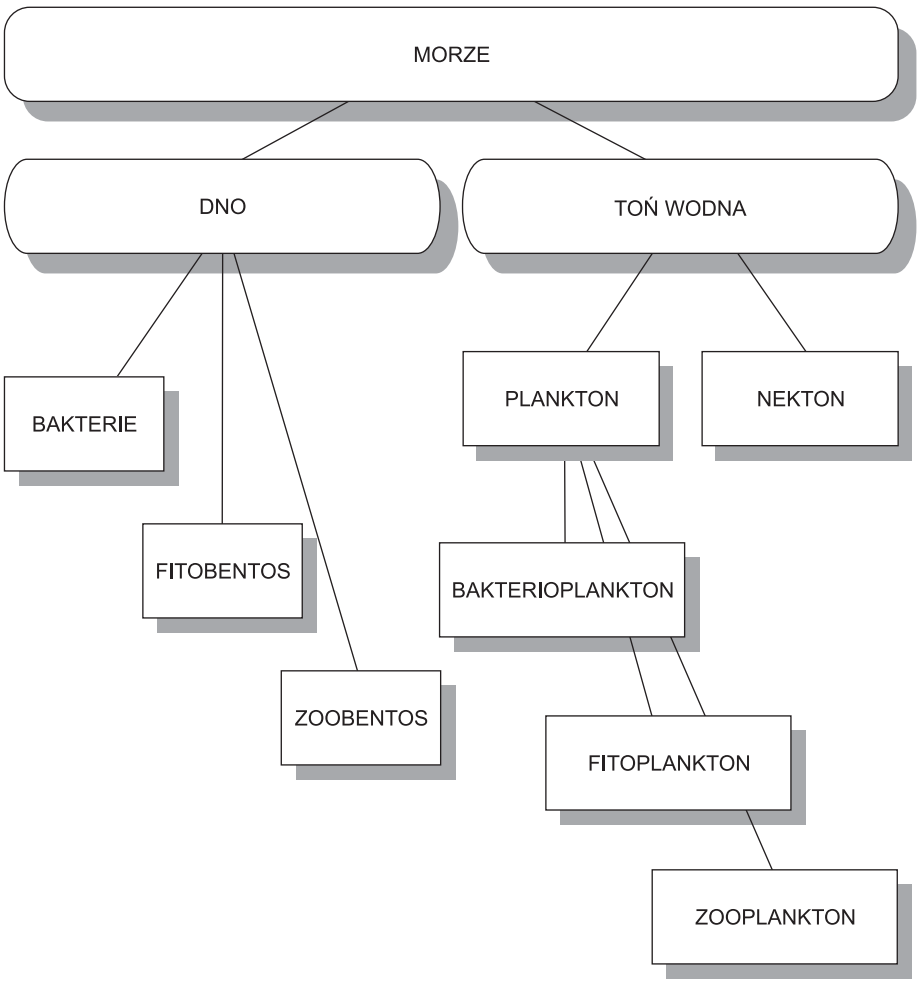
Światło jest czynnikiem, który dzieli wody morskie na dwie podstawowe warstwy: eufotyczną i afotyczną oraz występującą pomiędzy nimi warstwę przejściową – dysfotyczną. W odniesieniu do zjawisk biologicznych strefy te charakteryzowane są następująco:



Rys. 3.1 Podstawowy podział ekologiczny oceanu z uwzględnieniem specyfiki Morza Bałtyckiego (wg Demela 1974, uzupełnione)

– eufotyczna – posiada wystarczającą ilość światła, aby mógł odbywać się proces fotosyntezy;
– dysfotyczna – ilość światła wystarcza dla reakcji świetlnej zwierząt (np. wędrówki dobowe zooplanktonu);
– afotyczna – zupełny brak światła.

Prześwietlona warstwa wody ma decydujący wpływ na istnienie życia w morzu, w niej bowiem bytują rośliny, czerpiące energię świetlną do budowy swojego ciała i funkcji życiowych. Ilość światła dostępna w toni wodnej zależy nie tylko od szerokości geograficznej, pory roku, pory dnia, ale niestety coraz bardziej również od stopnia zanieczyszczenia akwenu. Wzrost ilości zawieszonej w wodzie i opadającej na dno materii organicznej, intensywne i długotrwałe zakwity fitoplanktonu, powodują ograniczenie głębokości strefy eufotycznej. Bałtyk jest morzem o małej przezroczystości wody. Głębokość, do której może się jeszcze odbywać fotosynteza to zwykle 20–25 m, chociaż są rejony, gdzie poniżej paru metrów nie ma już żadnych oznak wegetacji.



Rys. 3.2 Schematyczne uporządkowanie życia w morzu (wg Łomniewskiego i in. 1975, uzupełnione)

Hydrologiczne zjawisko, jakim jest haloklina, wprowadza w Morzu Bałtyckim specyficzną strefowość środowiska. Na obszarach występowania halokliny, leżące pod nią bardziej słone i cięższe wody są bardzo rzadko odnawiane i charakteryzują się tak niską zawartością tlenu, że ogranicza ona bądź nawet eliminuje życie biologiczne.

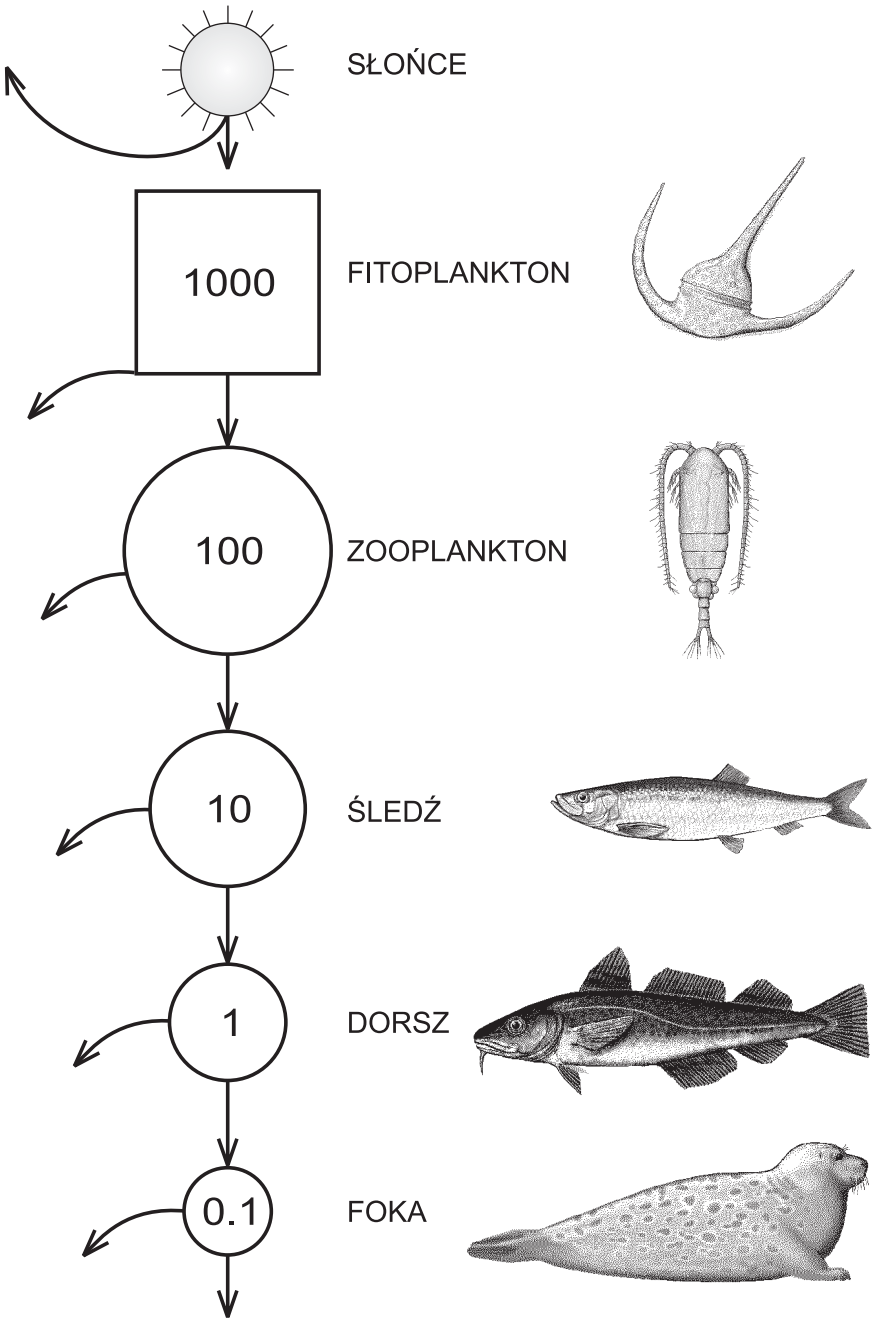
Każdy ekosystem obejmuje wszystkie żywe organizmy wraz ze środowiskiem, w którym one żyją, razem z jego fizycznymi i chemicznymi czynnikami. Stanowi on złożoną i skomplikowaną sieć interakcji między fizycznymi, chemicznymi i biologicznymi składowymi. W każdym ekosystemie istnieje wyraźnie określona struktura troficzna, która wyznaczona jest przez drogi przepływu energii oraz krążenia materii, tzn. drogi wymiany pierwiastków i związków chemicznych pomiędzy żywymi a nieożywionymi elementami ekosystemu. Dwie podstawowe jednostki tej struktury to:

– autotrofy, czyli organizmy samożywne, które wykorzystują energię świetlną (fotosynteza) lub energię chemiczną (chemosynteza) do budowy złożonych związków organicznych z prostych związków nieorganicznych;
– heterotrofy, czyli organizmy cudzożywne, które wykorzystują (przetwarzając i rozkładając) złożone związki organiczne; wśród heterotrofów znajdują się biofagi – organizmy zjadające inne żywe organizmy oraz saprofagi – organizmy odżywiające się martwą materią organiczną.

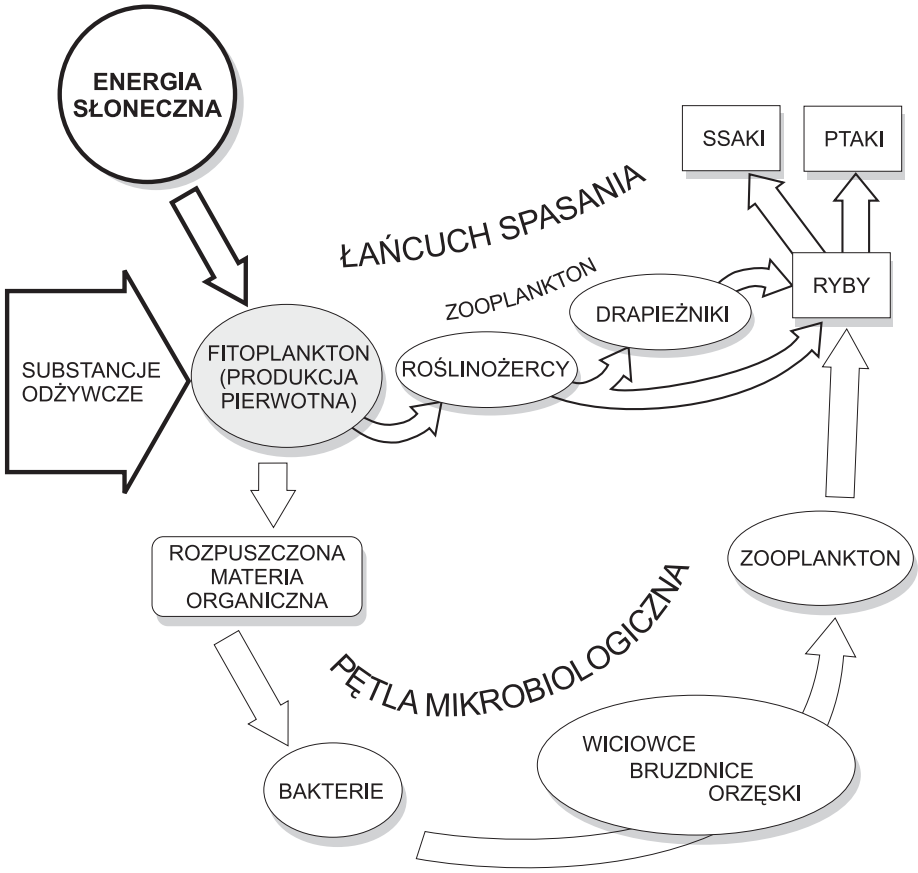
Efektywność funkcjonowania organizmów samożywnych decyduje o wielkości produkcji pierwotnej, a zatem wielkości biomasy autotrofów, która dostępna jest dla roślinożernych zwierząt. Wśród organizmów odżywiających się martwą materią organiczną znajdują się zarówno makroskopowe, wielokomórkowe zwierzęta stanowiące zoobentos, jak również niewidoczne gołym okiem grzyby czy jednokomórkowe wiciowce i bakterie zawieszone w toni wodnej lub bytujące na dnie. Organizmy te spożywają materię będącą na różnym stopniu dekompozycji. Są to martwe szczątki roślin i zwierząt, różnie zdegradowane fekalia zwierzęce oraz cząstki rozpuszczonej w wodzie materii organicznej wydzielonej przez fitoplankton. Łańcuch pokarmowy, od producentów do konsumentów znajdujących się na szczycie piramidy troficznej, ma zmienną długość. Może on różnić się liczbą kolejnych „ogniw konsumentów" zależnie od stopnia różnorodności i skomplikowania ekosystemu.

Wszystkie organizmy, tak samożywne jak i cudzożywne, mają swój udział w przepływie energii. Produkują i zużywają one energię do własnych procesów życiowych, ale też kumulują i przekazują ją na wyższy poziom troficzny. Na 10 jednostek energii pozyskanych z pokarmem 9 zużywanych jest na bieżące potrzeby fizjologiczne, a 1 zostaje zmagazynowana i może być przekazana na kolejny poziom troficzny. Oznacza to, że im bliżej poziomu autotrofów w piramidzie troficznej ulokowany jest organizm, tym większą ilością dostępnej energii dysponuje, bowiem każda przemiana pokarmu powoduje utratę energii chemicznej.

Przez każdy ekosystem energia przepływa w procesie jednokierunkowym ulegając stopniowo rozproszeniu (zużyciu na funkcje życiowe), natomiast materia krąży w ekosystemie, przechodząc z postaci nieorganicznej w organiczną i odwrotnie. Organizmy samożywne pobierają na swoje potrzeby budulcowe i energetyczne rozpuszczone w wodzie (w formie jonowej) pierwiastki i związki nieorganiczne (C, N, P, CO_2, H_2O i inne), przetwarzając je na białka, węglowodany, lipidy itp.



Rys. 3.3 Przepływ energii i jej straty pomiędzy poszczególnymi poziomami troficznymi (wg Kautsky 1991)



Rys. 3.4 Związki troficzne w toni wodnej – łańcuch spasania i pętla mikrobiologiczna (wg Furmana i in. 1995, zmienione)

Heterotroficzni konsumenci (wielokomórkowe zwierzęta) odżywiający się tak żywą, jak i martwą materią organiczną powstałą na kolejnych poziomach troficzych, budują z niej swoje ciało, ale też usuwają ją z organizmu jako niestrawione resztki pokarmu i produkty przemiany materii. Drobne, mikroskopijne organizmy, głównie bakterie, dokonują rozkładu martwej materii organicznej (szczątki roślin i zwierząt oraz fekalia) do postaci prostych związków nieorganicznych. Odzyskane w ten sposób substancje biogeniczne wchodzą, w procesie produkcji pierwotnej, w kolejny cykl obiegu materii.

Podczas sezonu wegetacyjnego wydajność produkcji pierwotnej fitoplanktonu jest zwykle bardzo wysoka. Krótki czas życia tych mikroskopijnych roślin przy wysokiej produktywności warstwy eufotycznej tak w rejonie otwartego morza, jak i w strefie nerytycznej powoduje, że fitoplankton jest głównym źródłem energii dla pozostałych elementów ekosystemu. Część fitoplanktonu spożywana jest bezpośrednio przez roślinożerny zooplankton, ale też nie zużyta, ogromna jego ilość opada na dno. W toni wodnej istnieją dwie drogi konsumpcji produkcji pierwotnej: łańcuch spasania i pętla mikrobiologiczna. W łańcuchu spasania fitoplankton zjadany jest przez roślinożerny zooplankton, który z kolei jest pokarmem dla większych drapieżnych organizmów zooplanktonowych i ryb. Na końcu łańcucha znajdują się ssaki i ptaki. Pętla mikrobiologiczna rozpoczyna się od rozpuszczonej w wodzie materii organicznej wydzielanej przez fitoplankton. Ma-

teria ta jest pokarmem dla bakterii, które wraz z najdrobniejszymi sinicami stanowią pokarm dla pierwotniaków: orzęsków, heterotroficznych wiciowców i bruzdnic. Pierwotniaki zjadane są przez zooplankton i na tym poziomie pętla mikrobiologiczna włącza się w łańcuch spasania.

W przybrzeżnych akwenach dodatkowe źródło produkcji pierwotnej stanowi fitobentos, na który składają się osiadłe mikro– i makroglony oraz rośliny kwiatowe. Ich produktywność nie jest tak wydajna jak jednokomórkowego fitoplanktonu, ale często stanowią one dużą biomasę. Są one pokarmem głównie dla zwierząt bentosowych. Martwe ich szczątki wraz z materią organiczną opadłą z toni wodnej, stanowią początek łańcucha detrytusowego – od martwej materii organicznej, poprzez saprofagiczne mikroorganizmy i detrytusożerne organizmy wielokomórkowe do zjadających je drapieżników. Łańcuchy pokarmowe nie są izolowanymi szeregami kolejnych konsumentów, ale łączą się. Układ takich powiązań tworzy sieć troficzną. W biocenozie – organizmy, do których pokarm trafia poprzez tę samą liczbę ogniw, liczonych od autotrofów, należą do tego samego poziomu troficznego. Wynika to z przyjętej zasady, że podstawą klasyfikacji troficznej jest funkcja, a nie przynależność gatunkowa. Zatem zgodnie z tą zasadą w środowisku bałtyckim podstawowy poziom troficzny stanowią rośliny zielone, głównie fitoplankton, a kolejne, w mniejszym lub większym stopniu przenikające się, poziomy troficzne tworzą konsumenci należący, w zależności od swoistego sposobu odżywiania, do roślinożerców, drapieżników lub detrytusożerców.

Morze Bałtyckie jest płytkim, półzamkniętym, słonawym zbiornikiem o ograniczonej wymianie wody z sąsiadującym z nim Morzem Północnym. Można wydzielić w nim trzy wielkie jednostki strukturalne, które, pomimo że stanowią różne środowiska życia, są ze sobą ściśle powiązane:
– strefa toni wodnej otwartego morza,
– strefa przybrzeżna,
– strefa głębokiego, miękkiego dna.

W Morzu Bałtyckim, jak w każdym zbiorniku wodnym, nie ma ostrych granic pomiędzy poszczególnymi strefami i obszarami. Z drugiej jednak strony istnieje duże zróżnicowanie siedlisk. Dotyczy to szczególnie mieszkańców dna i rejonów o urozmaiconej linii brzegowej z intensywnym dopływem rzecznym. Mimo że w Bałtyku nie ma imponującej liczby gatunków roślin i zwierząt, stanowi on interesujący, różnorodny ekosystem, gdzie ścierają się oceaniczne i kontynentalne wpływy.

3.1.1 Strefa toni wodnej otwartego morza

Wielkie przestrzenie wód morskich cechuje stosunkowo duża jednorodność warunków fizyczno-chemicznych. Organizmy zasiedlające pelagial to albo biernie poddający się ruchom wody – plankton, albo aktywnie przemieszczający się w toni wodnej – nekton.

Wody dobrze naświetlone (górną warstwę epipelagialu do około 20 m głębokości) zasiedla fitoplankton, decydujący o wielkości produkcji pierwotnej Bałtyku. Zooplankton w zależności od wrażliwości na oświetlenie oraz preferencji pokarmowych (roślinożercy trzymają się bliżej powierzchni morza) zasiedla toń wodną do głębokości, na której spełniane są jego wymagania tlenowe. W całej toni wodnej unosi się bakterioplankton, od bakterii tlenowych do żyjących najgłębiej bakterii beztlenowych. Zasadniczą grupę

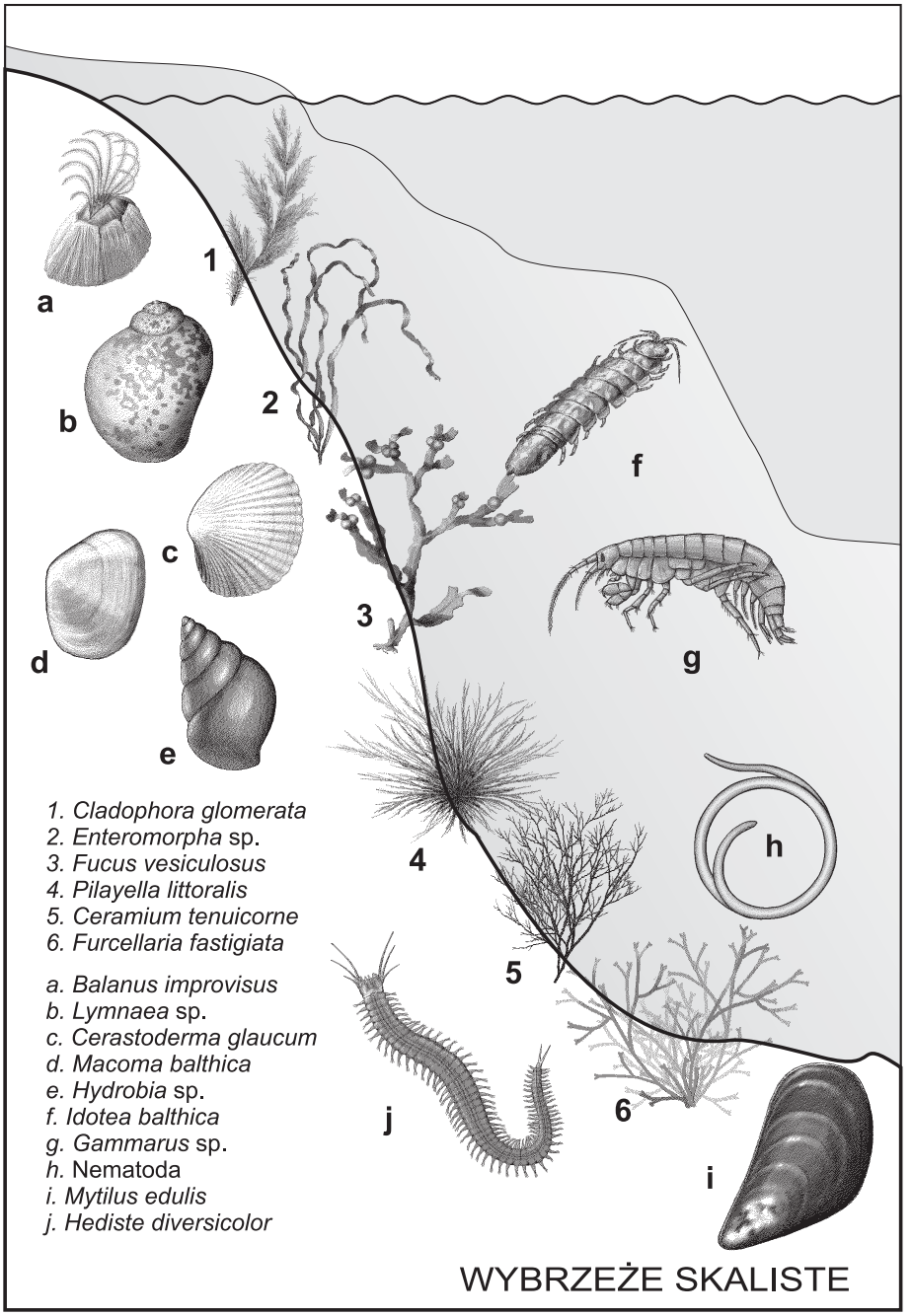
nektonu bałtyckiego stanowią ryby, mające niczym nie skrępowaną swobodę poruszania się w toni wodnej. Ssaki morskie: morświn i foki są obecnie niewielką grupą tak pod względem liczebności, jak i biomasy.

3.1.2 Strefa przybrzeżna

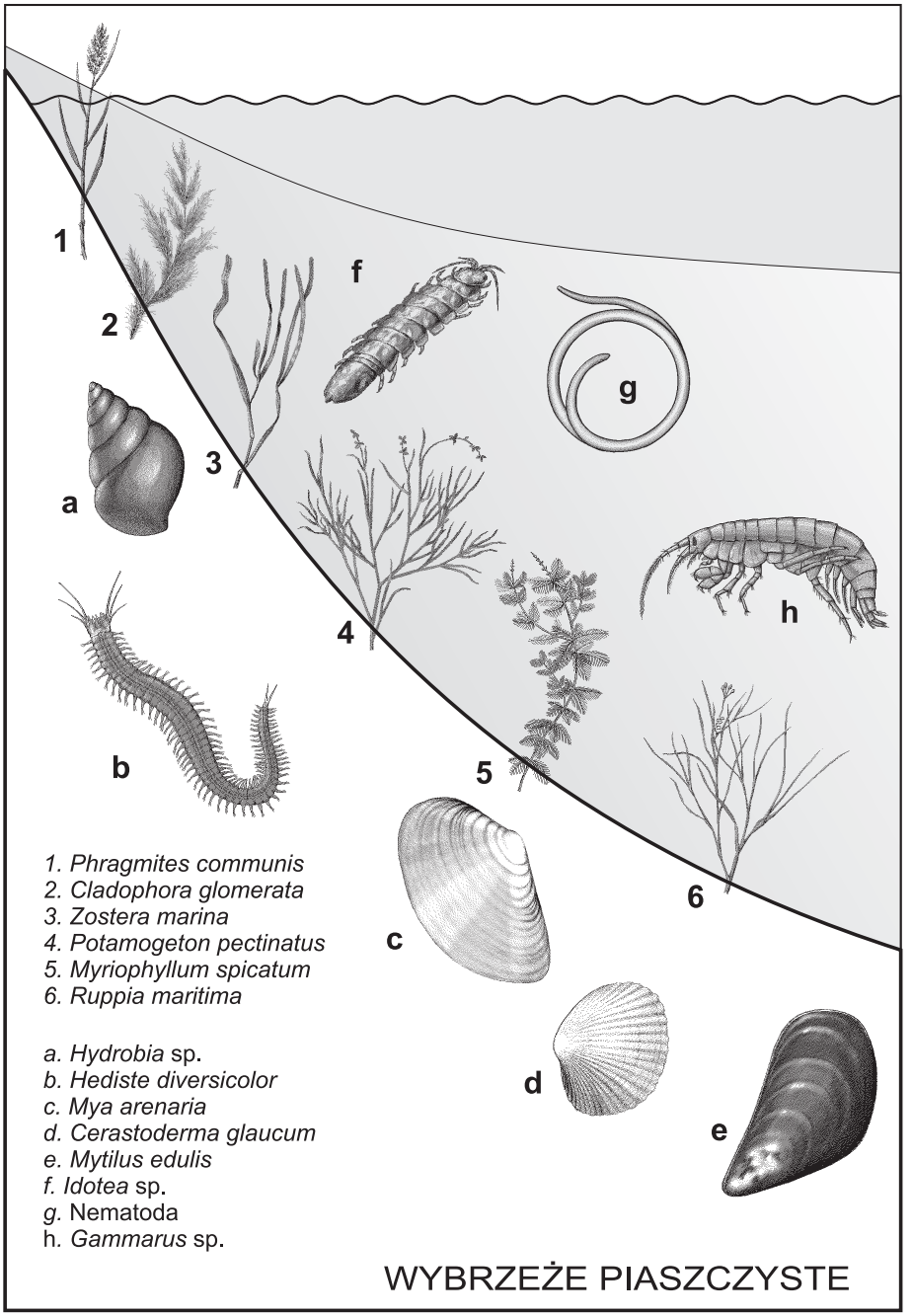
Strefa przybrzeżna, nie tylko bałtycka, jest najbardziej różnorodnym obszarem morza. Posiada nie tylko większą liczbę gatunków flory i fauny w stosunku do sąsiadującej z nią strefy otwartego morza, ale charakteryzuje się też wysoką produktywnością. O urozmaiceniu zespołów roślinnych i zwierzęcych w obrębie tej strefy decydują warunki lokalne takie jak: urozmaicenie linii brzegowej, głębokość akwenu, sąsiedztwo dopływów rzecznych, rodzaj dna itp.

Dno twarde – skaliste bądź kamieniste oraz dno miękkie – piaszczyste czy piaszczystomuliste stanowią w ekosystemie przybrzeżnym dwa podstawowe podłoża do bytowania roślin i zwierząt bentosowych. Oczywiście istnieje między nimi szereg form przejściowych bez wyraźnych granic. Podłoże twarde sprzyja rozwojowi przytwierdzonych do niego makroglonów oraz osiadłej fauny. Ten typ podłoża występuje głównie w północnej i wschodniej części Bałtyku. Mimo że w Bałtyku ułożenie pionowe roślin nie jest wyraźne, to w rejonach o stosunkowo dobrej przezroczystości wody można zaobserwować strefy roślinności mniej lub bardziej zachodzące na siebie. Najwyżej, bo tuż pod powierzchnią wody, występują różne gatunki zielenic, niżej zamieszkują brunatnice z najważniejszym dla Bałtyku morszczynem, następnie pojawiają się krasnorosty. Zwierzęta twardego dna to zarówno ruchliwe, jak i osiadłe skorupiaki, preferujące twarde podłoże gatunki małży a także ślimaki. Przestrzeń pomiędzy skałami i kamieniami wypełniona jest piaskiem, który zamieszkują wieloszczety, skąposzczety i meiobentos (drobne, rzędu kilkuset mikrometrów zwierzęta). Różnorodność i obfitość pokarmu sprzyja obecności małych ryb. Swego rodzaju „twarde podłoże" stanowi również morszczyn. Rosną na nim drobne glony (epifity) i mieszkają drobne zwierzęta. Strefa morszczynu to najobfitsze pod względem zróżnicowania gatunkowego siedlisko w Bałtyku. Poniżej, gdzie mała ilość światła znacznie ogranicza rozwój glonów osiadłych, główną rolę odgrywa omułek. Pas występowania tego filtrującego małża rozpoczyna się zwykle na głębokości około kilku metrów i sięga tak daleko, dokąd istnieje wystarczająco twarde podłoże, pozwalające mu na przyczepienie się (głębokość około 30–35 m).

Dno piaszczyste występuje głównie w południowej części Bałtyku. Charakteryzuje się ono dużą niestabilnością, ponieważ powierzchniowa warstwa osadu podlega ciągłemu przenoszeniu z miejsca na miejsce. Nie sprzyja to rozwojowi roślinności osiadłej i powoduje także, iż wśród makrozoobentosu przeważają zwierzęta zagrzebujące się w osadzie (infauna) i bardzo drobne zwierzęta należące do meiobentosu. Otwarte piaszczyste wybrzeża są prawie pozbawione makroskopowej roślinności. Na tym piaszczystym dnie jedynymi producentami są jednokomórkowe osiadłe glony tworzące mikrofitobentos. Natomiast w osłoniętych zalewach i zatokach pojawiają się rośliny kwiatowe. Korzystne warunki do rozwoju znajduje tam szereg gatunków makrofauny.



Rys. 3.5 Rośliny i zwierzęta skalistego wybrzeża Bałtyku Właściwego (nie zachowano proporcji wielkości, wg Perrsona i Selina 1994, zmienione)



Rys. 3.6 Rośliny i zwierzęta osłoniętej piaszczystej zatoki bałtyckiej (nie zachowano proporcji wielkości, wg Perrsona i Selina 1994, zmienione)

Podobnie jak na skalistych stokach, także na piaszczystym dnie organizmy żywe zasiedlają mniej lub bardziej wyraźnie zachodzące na siebie strefy. Jednakże zdecydowanie łagodniejsze nachylenie wybrzeży piaszczystych powoduje, że strefowość zasiedlenia dna jest tam znacznie słabiej zaznaczona, niż na stromo wchodzących w morze skałach.

Strefa przybrzeżna stwarza korzystne warunki do rozwoju szeregu gatunków ryb. Szczególnie płytkie, osłonięte i wysłodzone zatoki są sprzyjającym miejscem rozrodu, kryjówek i żerowania stosunkowo licznych w Bałtyku gatunków słodkowodnych. W strefie przybrzeżnej bytuje również młodzież ryb typowo morskich, takich jak dorsz i płastugi. Tam także znajdują się tarliska śledzia.

3.1.3 Strefa głębokiego, miękkiego dna

Obszaru głębokiego, miękkiego dna nie można uznać za samodzielnie funkcjonującą jednostkę strukturalną, ponieważ nie ma tam roślin, podstawowej grupy autotrofów. Większość miękkiego, głębokiego dna rozciąga się między izobatami 50–150 m. W Bałtyku poniżej głębokości 80 m stale bądź okresowo występują rejony deficytu tlenowego praktycznie pozbawione makrofauny. Główne, zamieszkałe obszary bałtyckiego dna klasyfikowane są jako zespół *Macoma* od żyjącego tam, dominującego małża *Macoma balthica*. Tam też ważną rolę odgrywa meiobentos, wypełniając w znacznym stopniu miejsce makrozoobentosu.

Fauna głębokiego dna jest pod względem pokarmowym uzależniona od pelagialu i strefy przybrzeżnej. Martwa materia organiczna z ekosystemu przybrzeżnego i ekosystemu toni wodnej otwartego morza opada i gromadzi się na dnie. Część jej stanowi pokarm dla zamieszkałych tam organizmów i ulega dalszej dekompozycji. Jednakże podczas tlenowego rozkładu nadmiaru materii organicznej dochodzi do wyczerpania tlenu i uruchomienia beztlenowych procesów rozkładu materii organicznej, co przyczynia się do powstawania obszarów pozbawionych życia.

3.2 Fitoplankton

Fitoplankton stanowią jednokomórkowe, samożywne organizmy o rozmiarach od kilku tysięcznych milimetra do około 2 mm. Te mikroskopijne organizmy mają bardzo krótki czas życia jednego pokolenia – od kilku godzin do kilku dni. W zależności od gatunku występują jako pojedyncze komórki, bądź tworzą wielokomórkowe kuliste, nitkowate lub łańcuszkowate kolonie.

Fitoplankton Morza Bałtyckiego stanowią głównie okrzemki (Diatomophyceae) i bruzdnice (Dinophyceae). W ostatnich latach coraz większą liczebność i biomasę osiągają sinice (Cyanobacteria). Planktonowe kryptofity (Cryptophyceae) oraz zielenice (Chlorophyceae) są mniej znaczącymi grupami tak pod względem liczebności, jak i biomasy.

Zabarwione na żółto lub brązowo okrzemki występują jako pojedyncze komórki lub są połączone, tworząc różnorodne kolonie. Komórki tych glonów otacza ornamentowana, nasycona krzemionką ściana, która składa się jak pudełeczko z dwóch części: wieczka i denka. Żółtobrązowe albo brunatne, jajowate, kuliste lub wrzecionowate bruzdnice występują prawie zawsze jako pojedyncze komórki. Posiadają one dwie bruzdy, okrężną i brzuszną, w których znajdują się wici. Komórki często okryte są błoną celulozową, tworzącą charakterystyczny pancerzyk. Zielenice, na tle innych glonów, odznacza-

ją się wyraźnym zielonym zabarwieniem, dzięki posiadaniu takich samych barwników, które występują w podobnych proporcjach jak u roślin wyższych. Wśród planktonowych zielenic spotyka się zarówno organizmy jednokomórkowe, jak i tworzące wielokomórkowe kolonie o bardzo zróżnicowanym kształcie. Kryptofity żyją w postaci pojedynczych, zabarwionych na brązowo lub żółto, komórek. Są one bocznie lub grzbietobrzusznie spłaszczone i posiadają dwie wici osadzone z przodu skośnie ściętej komórki. Sinice, zwane też cyjanobakteriami, w zakresie budowy i sposobu funkcjonowania, są bardzo blisko spokrewnione z bakteriami. W systematyce organizmów nie są zaliczane do roślin, lecz wyodrębnione razem z bakteriami w osobną grupę taksonomiczną.

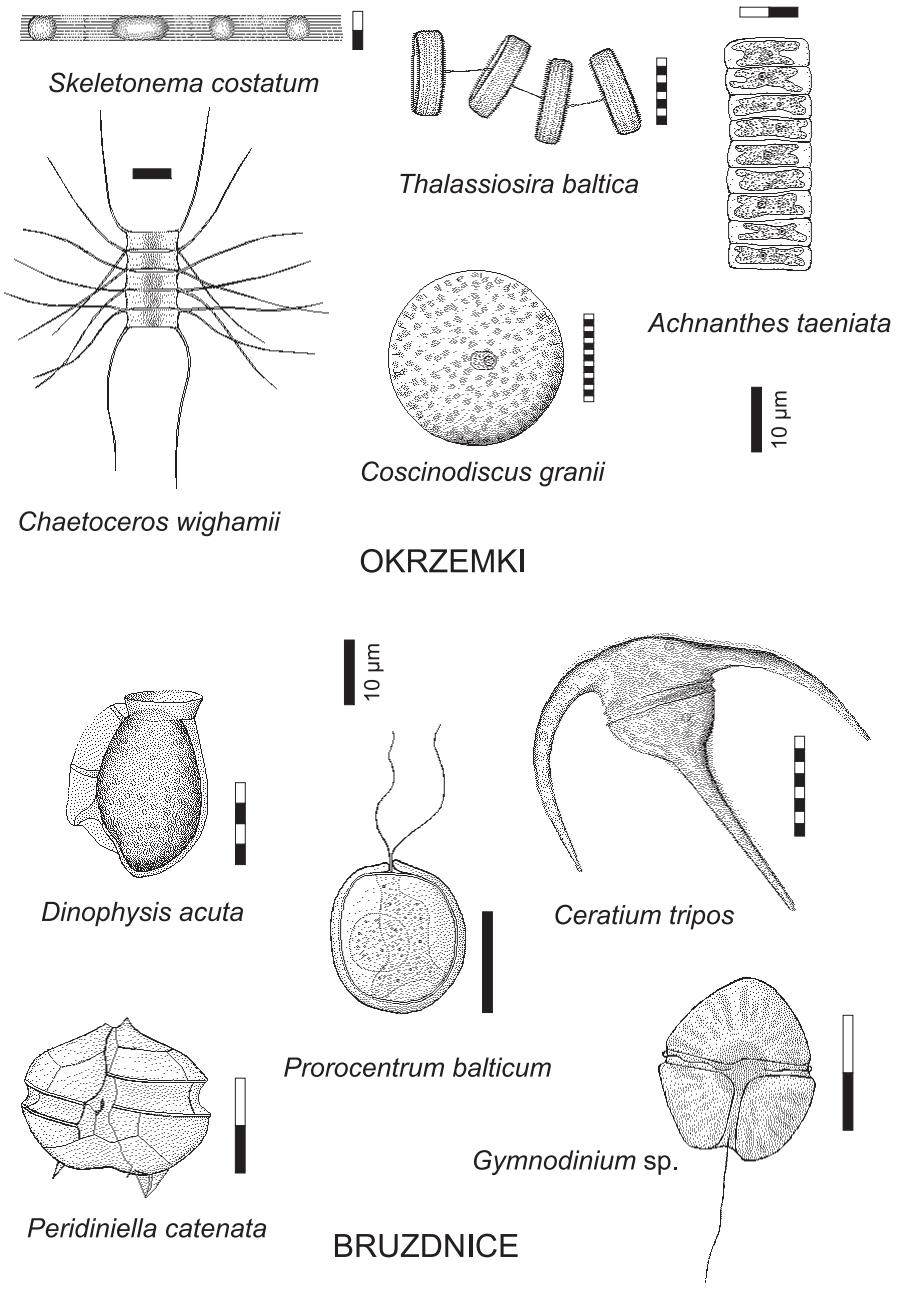
W Bałtyku stwierdzono obecność ponad 700 gatunków wchodzących w skład fitoplanktonu. W miarę posuwania się z zachodu na wschód zanikają stopniowo gatunki morskie, a miejsce ich zajmują formy typowe dla wód słonawych. W mocno wysłodzonych wodach, takich jak: zalewy, zatoki, rejony przybrzeżne i przyujściowe rzek, przewaga gatunków słodkowodnych jest bardzo wyraźna. Skład gatunkowy i liczebność fitoplanktonu zmieniają się jednak nie tylko geograficznie, ale także ze zmianą pór roku. Wśród tej stosunkowo dużej liczby gatunków fitoplanktonu tylko kilka występuje w ilościach, które wskazują na ich dominację na obszarze całego Bałtyku.

Wiosną powszechnie spotka się okrzemki *Achnanthes taeniata* i *Chaetoceros wighamii* oraz bruzdnicę *Peridiniella catenata*, latem sinice *Aphanizomenon flos-aquae* i *Nodularia spumigena* wraz z różnymi kryptofitami, a jesienią okrzemki *Coscinodiscus granii* i *Thalassiosira baltica* oraz kryptofita *Rhodomonas minuta*. Zimą liczebność glonów jest bardzo niska, a ich rozmnażanie bardzo słabe lub żadne. Wiosną, kiedy jest coraz więcej światła słonecznego a woda ociepla się i znajduje się w niej wystarczająco dużo substancji biogenicznych, rozpoczyna się zakwit okrzemek a zaraz po nim bruzdnic oraz różnych drobnych wiciowców. Latem w fitoplanktonie dominują sinice, a jesienią znowu okrzemki.

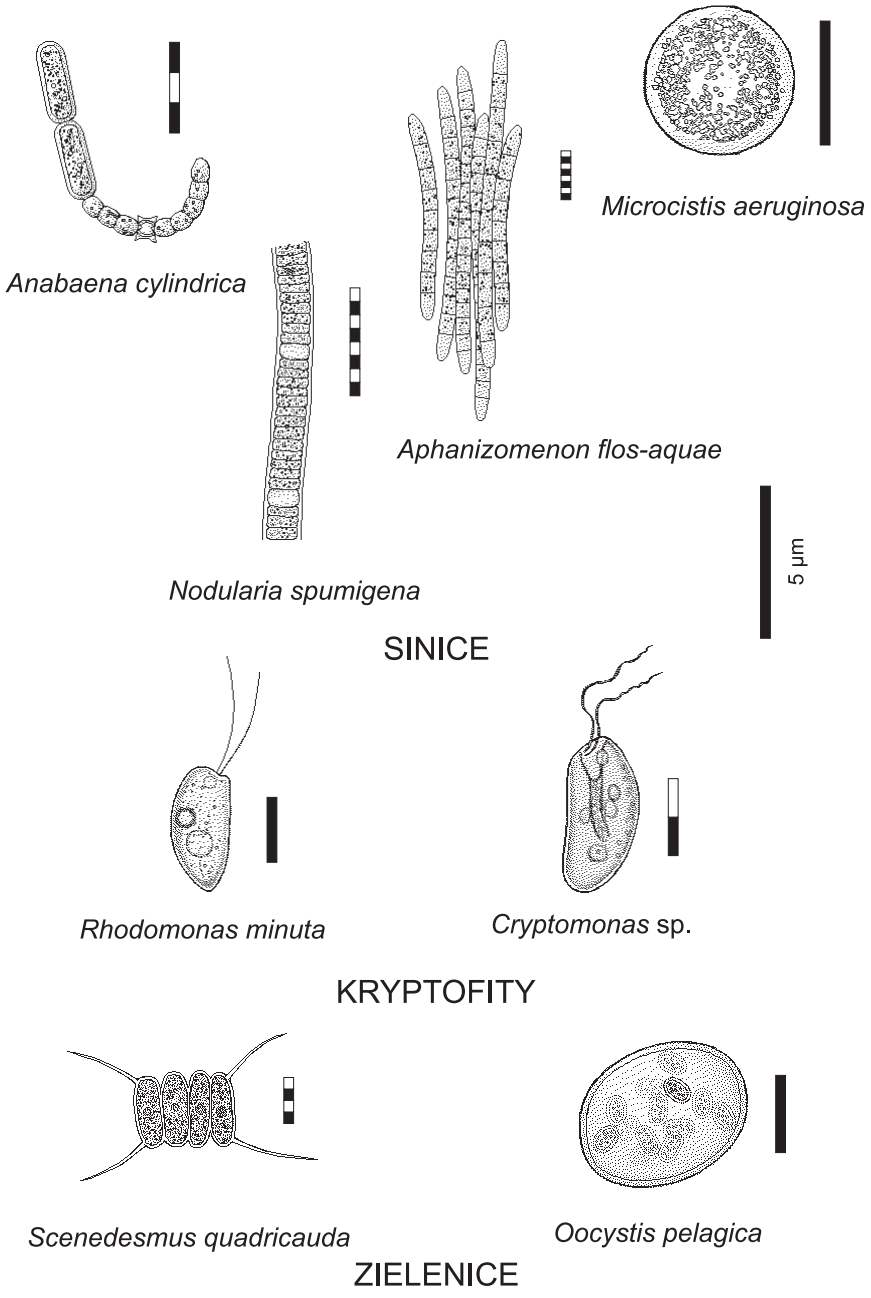
Te trzy szczyty liczebności fitoplanktonu są charakterystyczne dla całego Morza Bałtyckiego. Regionalne różnice, głównie w temperaturze wody, powodują jednak, że wiosenny zakwit okrzemkowy w Kattegacie i Morzu Bełtów może pojawić się już pod koniec lutego, w Basenie Gdańskim od marca do maja, natomiast na Głębi Gotlandzkiej dopiero w maju. Terminy pozostałych szczytów są bardziej ustabilizowane: letni występuje na przełomie lipca i sierpnia, a jesienny – października i listopada.

Zwykle najbardziej intensywnym zakwitem jest zakwit wiosenny, a najsłabszym jesienny. W ostatnich jednak latach, w różnych rejonach Bałtyku, obserwuje się coraz częściej bardzo intensywne letnie zakwity sinic. Niektóre znich, w przeciwieństwie do innych glonów, mogą pobierać azot z atmosfery, co pozwala im rozwijać się także wtedy, gdy podczas gorącego lata zmniejsza się ilość dostępnych jonów azotu pochodzących z jego związków rozpuszczalnych w wodzie. Zjawisko to jest szczególnie niepokojące, gdyż właśnie wśród sinic znajduje się wiele gatunków toksycznych i potencjalnie toksycznych.

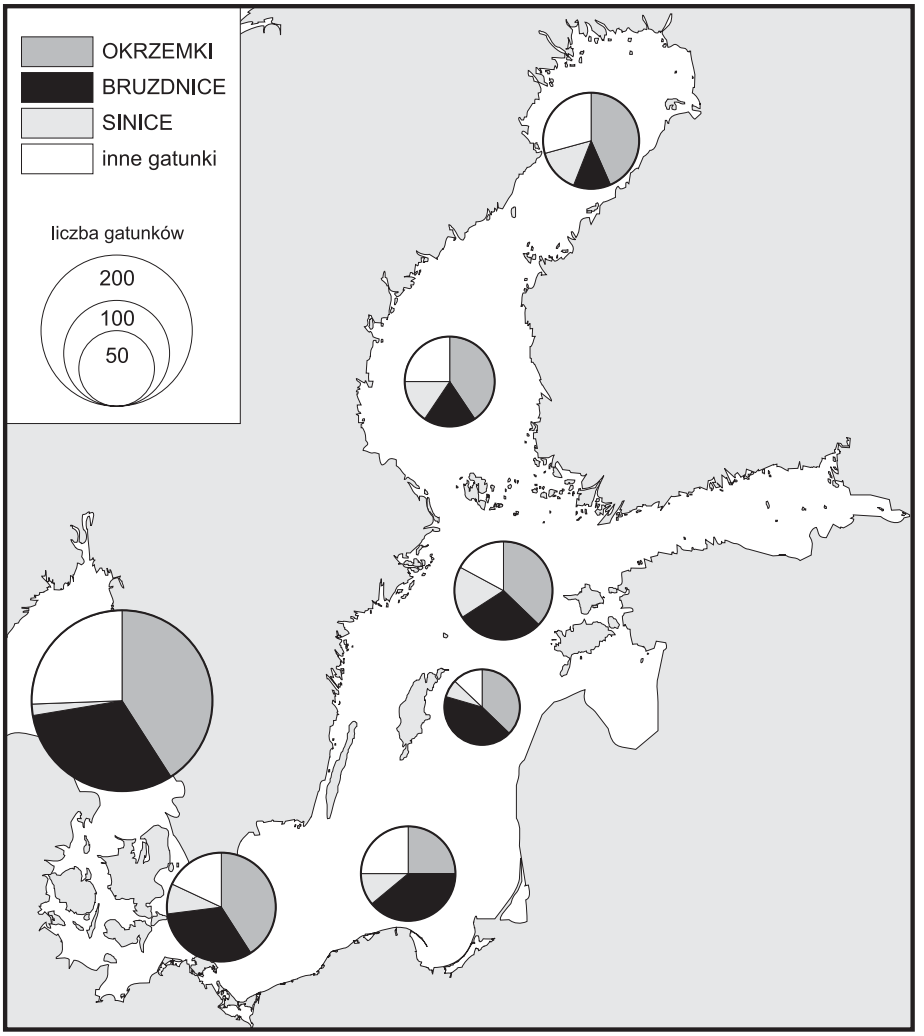
Biomasę fitoplanktonu określa się poprzez obliczenie ilości węgla organicznego ($C_{org.}$) zawartego w komórce, wartości charakterystycznej dla poszczególnych grup glonów. Jako wskaźnik wielkości biomasy stosuje się także podawanie koncentracji chlorofilu *a* w wodzie. Nie jest to jednak wielkość reprezentatywna, ponieważ zaniża biomasę sinic, które mają niską zawartość chlorofilu w żywej komórce w stosunku do jej masy.



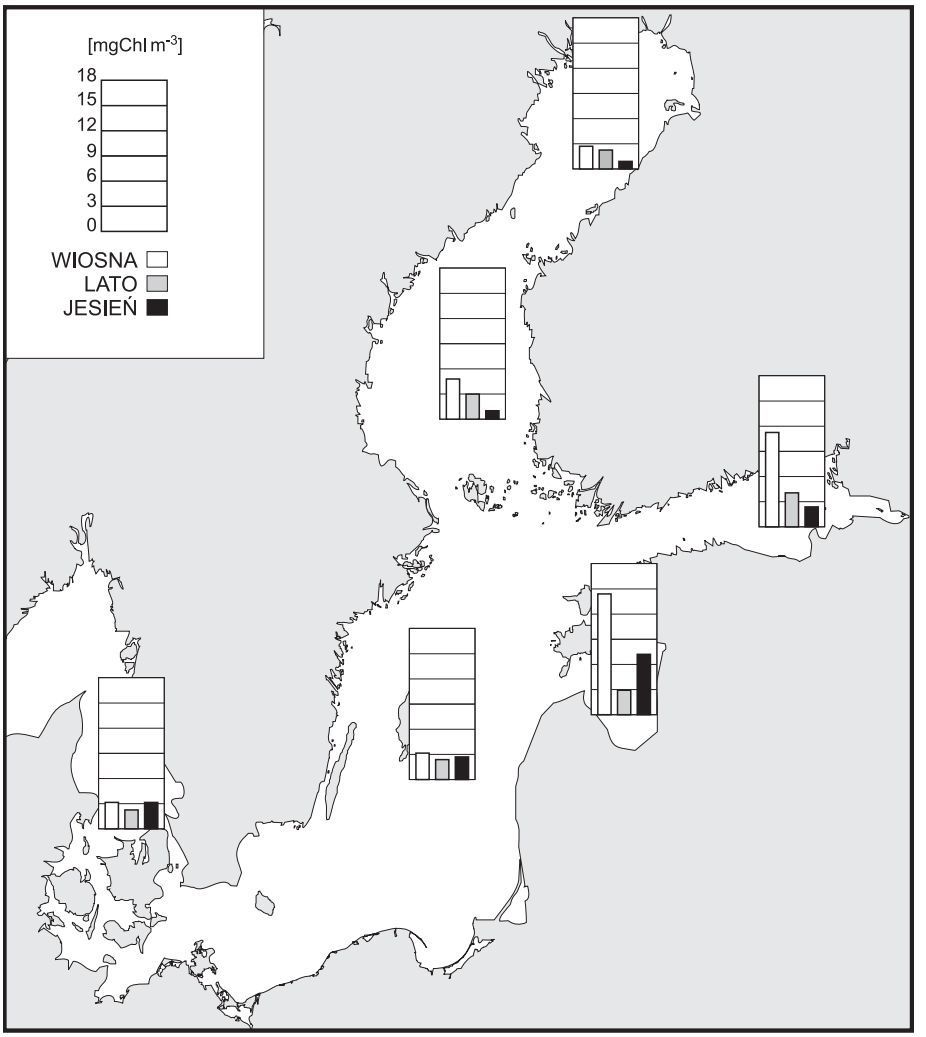
Rys. 3.7 Fitoplankton bałtycki (wg Pankowa i in. 1990)



Rys. 3.8 Fitoplankton bałtycki (wg Pankowa i in. 1990)



Rys. 3.9 Liczba gatunków fitoplanktonu w różnych rejonach Bałtyku (wg Sjöberga 1992)



Rys. 3.10 Średnia zawartość chlorofilu w powierzchniowych wodach Bałtyku, dane z lat 1989–1993 (wg HELCOM 1996)

Okresy występowania poszczególnych grup glonów związane są z ich wymaganiami środowiskowymi. Okrzemki dominują w czasie, gdy woda jest stosunkowo chłodna, ale bogata w substancje biogeniczne (wiosna i jesień). Bruzdnice pojawiają się, kiedy temperatura wody jest wyższa, jednak zawiera już znacznie mniej substancji odżywczych. Bardzo ciepła woda podczas pełni lata sprzyja zakwitom sinic, których rozwoju, jak już wspomniano, nie ogranicza niska koncentracja nieorganicznych związków azotu w wodzie.

3.3 Zooplankton

Do zooplanktonu zaliczane są zwierzęta zarówno jednokomórkowe (protozooplankton), jak i wielokomórkowe o złożonej budowie (metazooplankton). Rozmiary organizmów zooplanktonowych mieszczą się w granicach od kilku mikrometrów (drobne pierwotniaki) do kilkudziesięciu centymetrów, a nawet około metra (meduzy). Te organizmy, których całe życie toczy się w toni wodnej zwane są holoplanktonem. Wiele zwierząt prowadzących denny tryb życia posiada planktonowe formy larwalne. Tworzą one meroplankton. Jaja i stadia larwalne ryb określane są jako ichtioplankton. Stosując kryterium wielkości można wyróżnić makro–, mezo–, mikro– i nanozooplankton.

Zooplankton Bałtyku jest taksonomicznie ubogi. Składają się nań głównie skorupiaki, wrotki, stadia larwalne ryb, wieloszczetów i mięczaków oraz pierwotniaki. Wśród dużych organizmów zooplanktonowych (makrozooplankton) występują najczęściej: należąca do jamochłonów (Coelenterata), chełbia modra (*Aurelia aurita*) oraz trzymająca się bardziej zasolonych i chłodniejszych wód bełtwa (*Cyanea capillata*). Do grupy tej zaliczane są również szczeponogi (Mysidaceae), będące największymi bałtyckimi skorupiakami (Crustacea) planktonowymi, oraz larwy ryb. Znacznie liczniejszy mezozooplankton tworzą głównie wrotki (Rotifera), a spośród skorupiaków przede wszystkim widłonogi (Copepoda) i wioślarki (Cladocera). Organizmy klasyfikowane jako mikrozooplankton w Bałtyku praktycznie nie występują. Jeszcze drobniejsze planktonowe organizmy stanowią nanozooplankton. Są to należące do pierwotniaków (Protozoa) orzęski (Cilliata) oraz heterotroficzne wiciowce i bruzdnice. Okres rozwoju meroplanktonu, sezonowego składnika planktonu, przypada głównie na ciepłe miesiące: lipiec i sierpień, kiedy w toni wodnej przebywają stadia larwalne wieloszczetów i mięczaków.

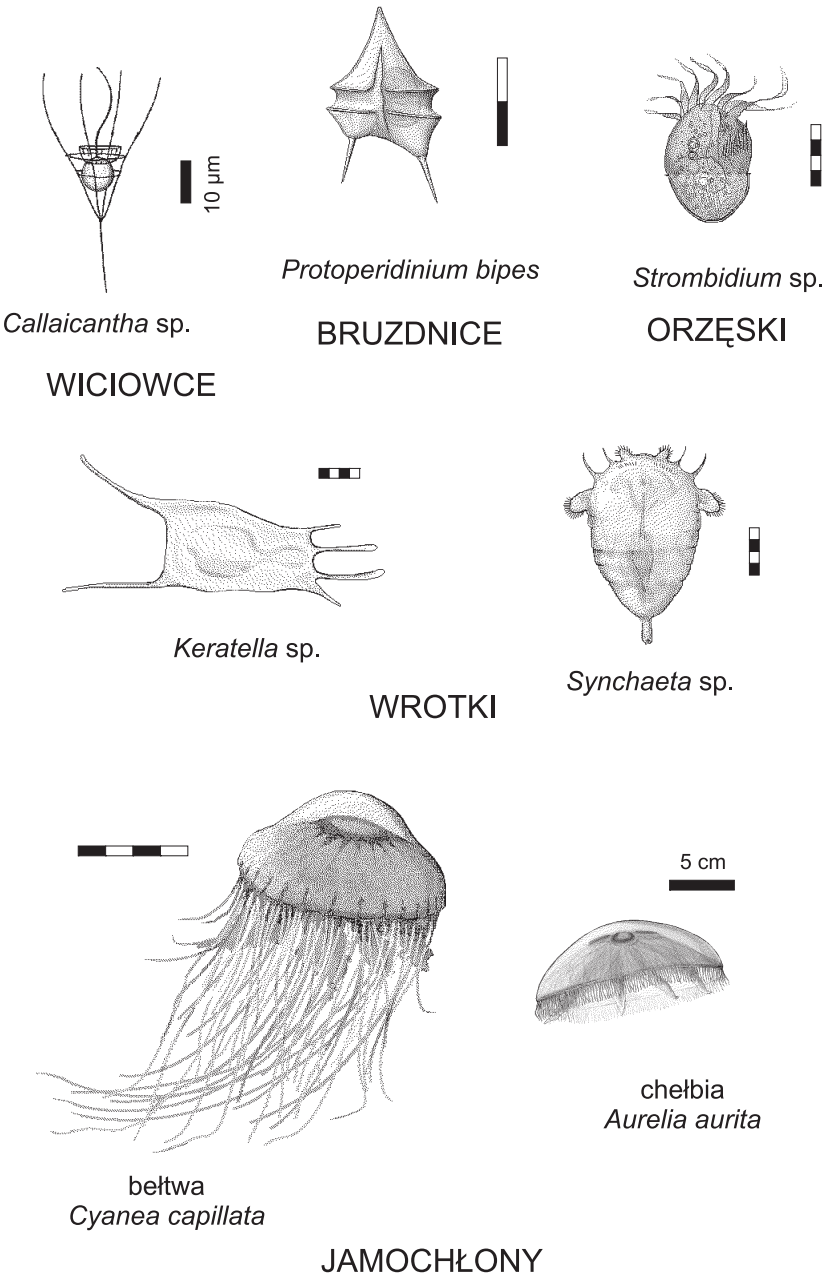
Zmniejszające się w kierunku północno-wschodnim zasolenie jest nadrzędną przyczyną regionalnego zróżnicowania składu gatunkowego zooplanktonu. W rejonie cieśnin duńskich morskie gatunki Copepoda takie jak *Oithona similis* i *Paracalanus parvus* wyraźnie dominują w zespołach mezozooplanktonu. Natomiast w kierunku wschodnim, a następnie północnym coraz powszechniej pojawiają się gatunki słonawo– i słodkowodne. Dominującymi stają się kolejno: *Pseudocalanus elongatus*, *Acartia* spp., *Eurytemora affinis*, *Limnocalanus macrurus*. Ten ostatni gatunek jest zimnowodnym, stenohalinowym reliktem. Dominuje wiosną w Zatoce Botnickiej i latem w Bałtyku Właściwym. Wioślarka *Bosmina coregoni maritima*, będąca typowym słonawowodnym gatunkiem rozwijającym się najlepiej w temperaturze powyżej 15 °C, przeważa wyraźnie w powierzchniowych warstwach wody. W Zatoce Fińskiej, do której wpływa Newa, największa z rzek uchodzących do Bałtyku, słodkowodne wioślarki (*Daphnia* spp., *Bythotrephes*

longimanus) i wrotki (*Keratella* spp., *Polyarthra* spp.) spotyka się najliczniej i najczęściej.

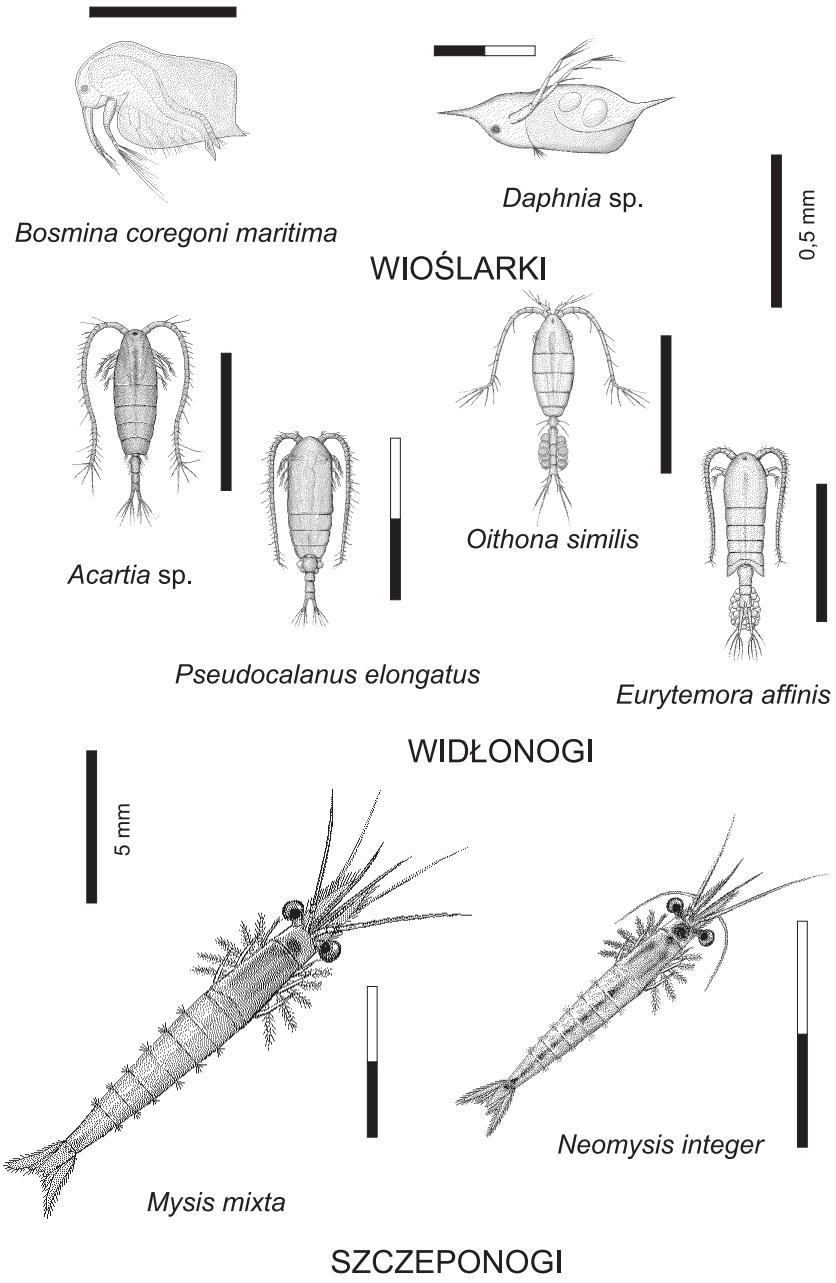
Obserwowana prawidłowość obniżania się liczby gatunków w miarę posuwania się w kierunku obszarów słonawych, znajduje potwierdzenie w fakcie, że najmniej licznie notowane są w rejonach o zasoleniu 5–7 PSU. Najniższa liczba gatunków (13–20) występuje w rejonie centralnym Bałtyku Właściwego, natomiast wzrasta w rejonach morskich i słodkowodnych. Najwięcej gatunków, około 28–32, spotyka się w południowozachodniej części Bałtyku Właściwego, będącej pod najsilniejszym wpływem Morza Północnego. W północnej części Bałtyku Właściwego i Zatoce Fińskiej dzięki napływowi, wraz z wodami rzecznymi, gatunków słodkowodnych jeszcze dobrze znoszących podwyższone zasolenie, notuje się 16–34 gatunki zooplanktonu. W Zatoce Botnickiej im dalej na północ, tym woda jest bardziej wysłodzona, jednak jej stosunkowo niska temperatura nie sprzyja rozwojowi napływającemu z cieplejszych rzek słodkowodnemu zooplanktonowi. Obszar ten charakteryzuje się zatem niższą i o stosunkowo dużej rozpiętości liczbą gatunków zooplanktonu (9–27).

Latem na całym obszarze Bałtyku notuje się największą liczebność mezozooplanktonu. Różnica pomiędzy zimnym a ciepłym okresem roku szczególnie wyraźnie zaznacza się w północnych i wschodnich rejonach Bałtyku, co spowodowane jest krótkim okresem ciepłego lata, sprzyjającym intensywnemu rozwojowi zooplanktonu. Wtedy też największą liczebnością mezozooplanktonu w warstwie powierzchniowej morza charakteryzują się Zatoka Ryska, Morze Botnickie, rejon Wysp Alandzkich, Zatoka Fińska i północna część Bałtyku Właściwego.

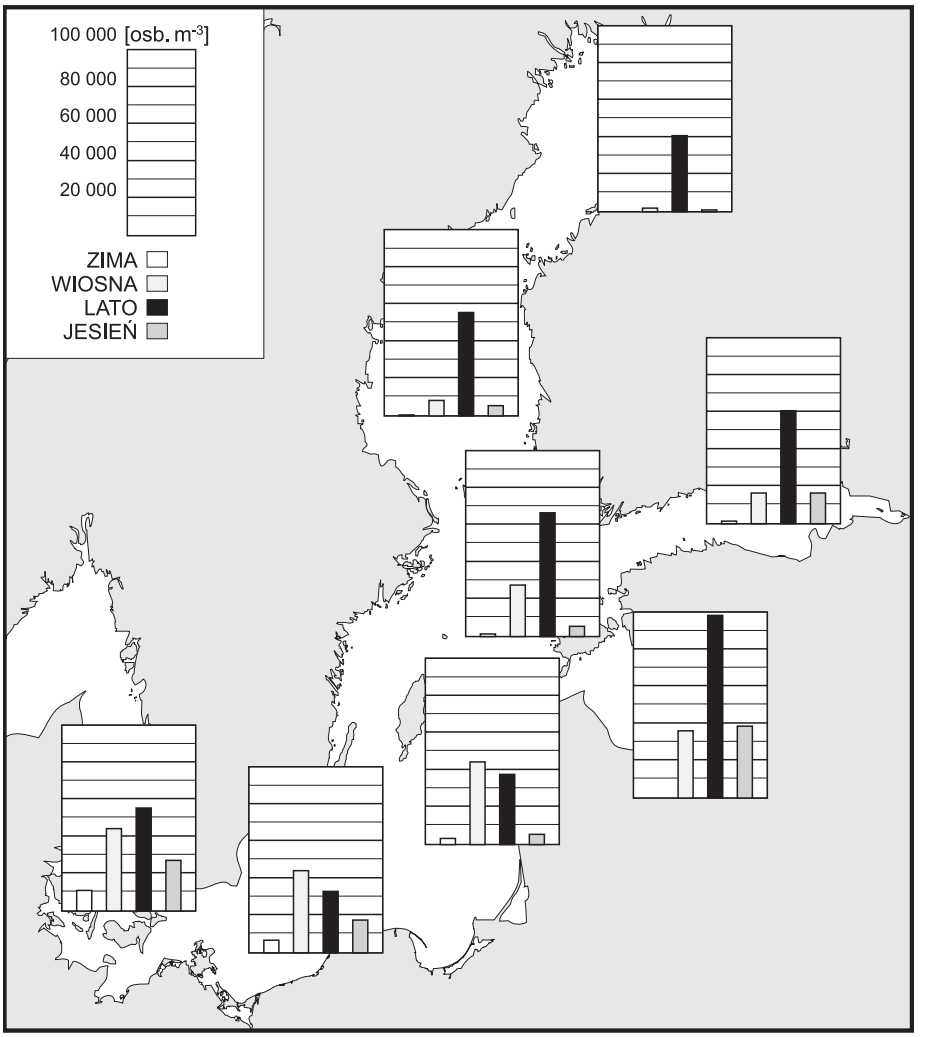
Skład i liczebność zooplanktonu w poszczególnych warstwach kolumny wody zmienia się zasadniczo w ciągu doby. Na powierzchni morza plankton zwierzęcy jest najobfitszy w nocy, natomiast w ciągu dnia jest go tam stosunkowo niewiele. Zjawisko to jest efektem pionowych wędrówek zooplanktonu podczas doby. Organizmy ujemnie fototropiczne, jakimi są przeważnie przedstawiciele planktonu zwierzęcego, unikają zbyt intensywnego, szkodzącego im naświetlenia i dążą do znalezienia się z dala od stref silnie naświetlonych. Za dnia przebywają z reguły w głębszej, ciemniejszej warstwie wód. Pod wieczór wędrują aktywnie ku nieoświetlonej już powierzchni w poszukiwaniu pokarmu, którym jest zwykle plankton roślinny. Przed świtem opuszczają się z powrotem w ciemniejsze, głębsze warstwy wody. W Bałtyku amplituda dobowych wędrówek zooplanktonu może dochodzić do 30 metrów. Powszechnie uważa się, iż wędrówka dobowa sprowadza się do ruchów dyktowanych potrzebą odżywiania i zapewnieniem bytowania w korzystnych warunkach środowiska.



Rys. 3.11 Zooplankton bałtycki (wg Needona i in. 1985, Thomsona 1992, Żmudzińskiego 1990)



Rys. 3.12 Zooplankton bałtycki (wg Needona i in. 1985, Thomsona 1992, Żmudzińskiego 1990)



Rys. 3.13 Średnia liczebność mezozooplanktonu w powierzchniowych wodach Bałtyku, dane z lat 1989–1993 (wg HELCOM 1996)

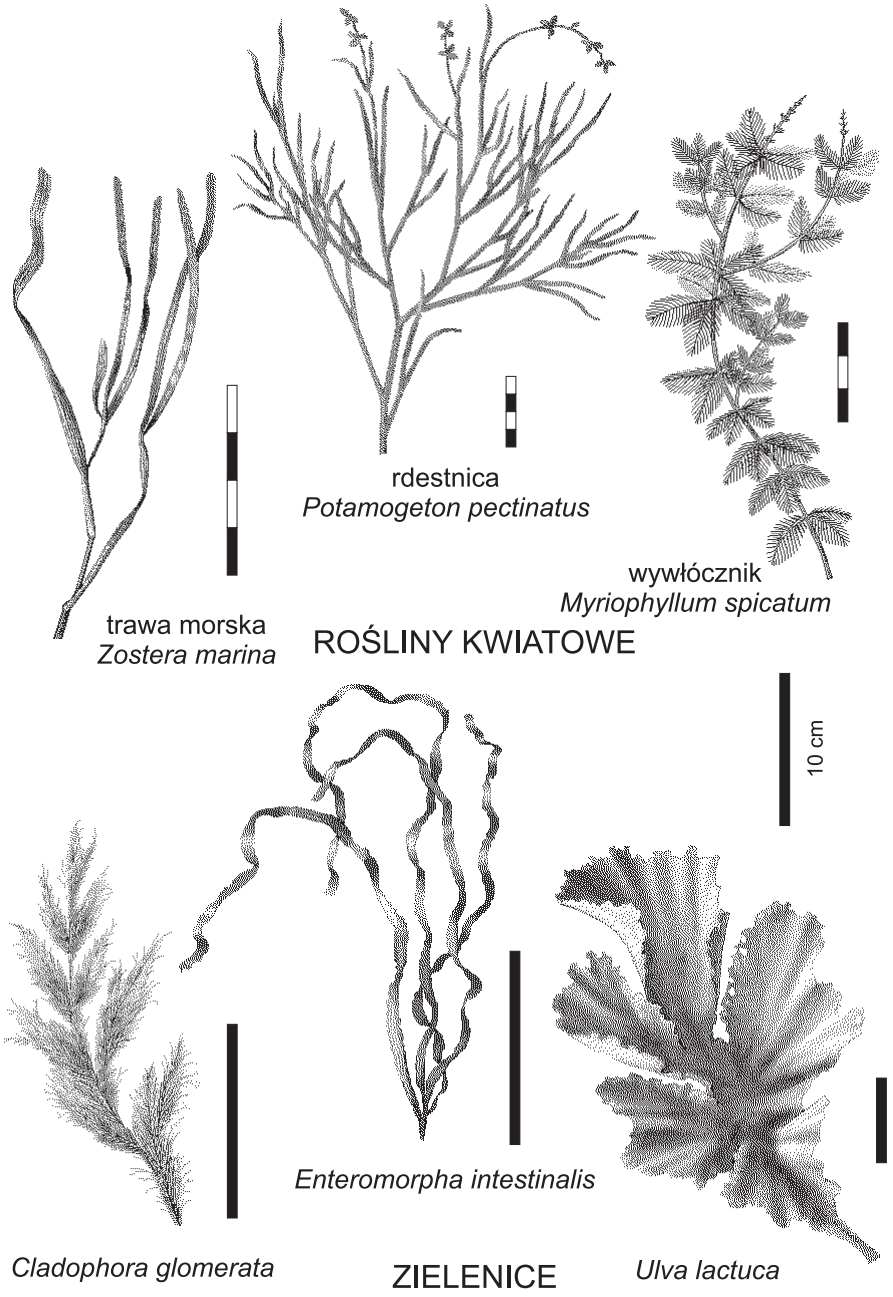
3.4 Fitobentos

Morskie rośliny osiadłe mogą zamieszkiwać tak głęboko, jak głęboko dochodzi minimalna ilość światła potrzebna im do procesu fotosyntezy. Są to więc głównie organizmy strefy przybrzeżnej. Przytwierdzoną do dna roślinność morską stanowią mikro– i makroglony oraz rośliny kwiatowe. Morskie rośliny kwiatowe rosną na dnie, ukorzeniając się w miękkim, piaszczysto-mulistym gruncie. W skład mikrofitobentosu wchodzą jednokomórkowe glony: okrzemki, zielenice, sinice i krasnorosty. Szczególnie licznie występują w strefie przybrzeżnej do głębokości 1 m, osadzając się na ziarenkach osadów dennych, kamieniach lub roślinach i zwierzętach. Makroglony morskie wymagają twardego, skalistego bądź kamienistego podłoża, do którego przytwierdzają się za pomocą przylg bądź chwytników.

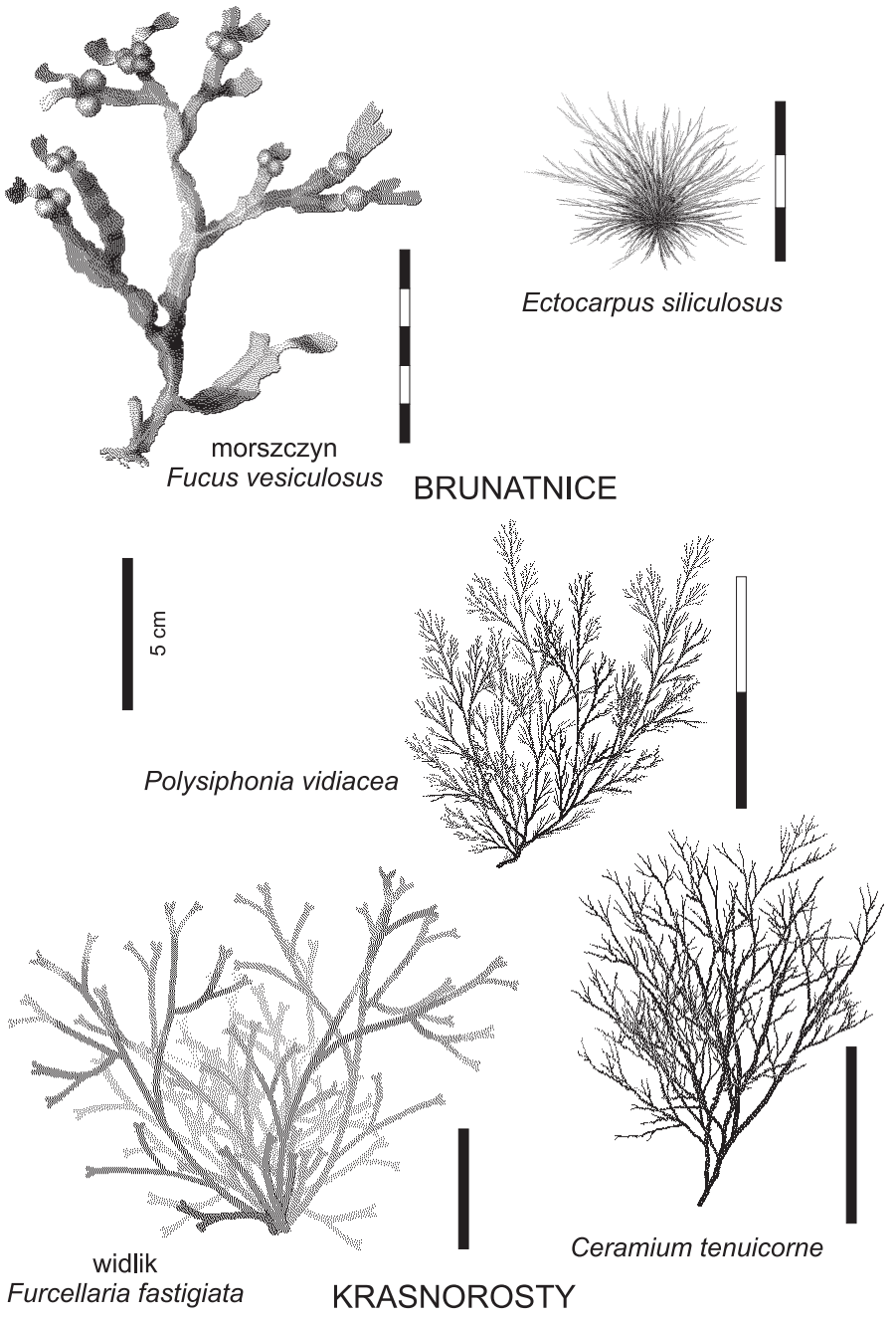
Zielenice (Chlorophyceae), brunatnice (Phaeophyceae) i krasnorosty (Rhodophyceae) różnią się zawartością i rodzajem barwników fotosyntetyzujących wymagających do fotosyntezy światła o specyficznej długości fali. Barwniki zielone absorbują głównie pasmo czerwone i pomarańczowe, barwniki żółte – niebieskie, a barwniki czerwone – pasmo zielone światła białego. W wodzie promieniowanie o długości fali odpowiadającej barwie czerwonej i pomarańczowej pochłaniane jest w cienkiej warstwie powierzchniowej. Najgłębiej przedostaje się promieniowanie niebieskie i zielone. Skutkiem tego jest pionowe rozmieszczenie gatunków fitobentosu w morzu. Najbliżej powierzchni wody występują rośliny kwiatowe i zielenice wyposażone głównie w chlorofile (barwniki zielone), niżej brunatnice wzbogacone w umożliwiające fotosyntezę ksantofile (barwniki żółte – fukoksantyna), a najgłębiej bytują krasnorosty, posiadające jeszcze, oprócz wymienionych, fikobiliny (barwniki czerwone – fikoerytryna). W Morzu Bałtyckim ten klasyczny układ został mocno zaburzony. Wywołane różnymi czynnikami zmętnienie wody powoduje znaczne osłabienie przenikania wszystkich długości fal światła w głąb zbiornika, a tym samym ograniczenie zasięgu występowania roślinności dennej i skupienie się wszystkich jej typów bliżej powierzchni, często nawet do głębokości tylko kilku metrów. Pogorszenie warunków świetlnych, tlenowych i napływ różnych zanieczyszczeń objawiły się także zmianą proporcji ilościowych pomiędzy poszczególnymi grupami fitobentosu. Organizmy bardziej wrażliwe i wymagające ustąpiły miejsca łatwo i licznie rozwijającym się niewrażliwym „chwastom".

Morskie rośliny kwiatowe, mimo że popularnie nazywane trawami morskimi, należą do rodziny rdestnicowatych. W mniej słonych, płytkich wodach, występuje kilka gatunków rdestnicy (*Potamogeton* spp.), zostera morska (*Zostera marina*), zmętnica (*Zannichellia palustris*) i rupia (*Ruppia* spp.). Największa z nich, zostera morska, może osiągać w południowym Bałtyku do 2 m wysokości i tworzy na piaszczystym dnie, na głębokości 2–6 m, mniej lub bardziej rozległe łąki podwodne. Niestety, niekorzystne zmiany warunków środowiska spowodowały zmniejszenie obszarów jej występowania. W wysłodzonych zatoczkach, głównie w pobliżu ujść rzecznych, często obecne są typowo słodkowodne gatunki: wywłócznik (*Myriophyllum* sp.) i trzcina (*Phragmites communis*).

Zamieszkujące dobrze prześwietlone wody zielenice reprezentowane są przez kilka gatunków krzaczkowatej gałęzatki (*Cladophora* spp.), wstęgowatej taśmy (*Enteromorpha* spp.) i liściokształtnej sałaty morskiej (*Ulva* spp.). Rozprzestrzeniona w całym Bałtyku jednoroczna, nitkowata gałęzatka *Cladophora glomerata* osiąga kilkadziesiąt centymetrów długości. Równie powszechna, nierozgałęziona *Enteromorpha intestinalis* może



Rys. 3.14 Fitobentos bałtycki (wg Arndta 1969, Sjöberha 1992, Szafera i in. 1969)



Rys. 3.15 Fitobentos bałtycki (wg Arndta 1969, Sjöberha 1992, Szafera i in. 1969)

formować plechy o szerokości nawet do około 10 cm, choć jest także spotykana w postaci nitkowatej. Nazywana sałatą morską *Ulva lactuca* występuje głównie u zachodnich i południowych wybrzeży Bałtyku.

Najważniejszą bałtycką brunatnicą jest morszczyn *Fucus vesiculosus*. Obszar zasiedlany przez niego wyraźnie zmniejszył się w ostatnim dwudziestoleciu. W niektórych rejonach gatunek ten w ogóle zaniknął, ustępując całkowicie bardzo szybko rozwijającym się wiosną nitkowatym brunatnicom z rodzaju *Ectocarpus* i *Pilayella*. Żyjąca kilka lat brunatnica, należąca do listownic – grupy największych glonów morskich – *Laminaria saccharina*, występuje na skalistych rafach w Kattegacie na głębokości 16–25 m.

W Bałtyku zamieszkuje kilkanaście gatunków nitkowatych, rurkowatych, rozgałęzionych bądź liściokształtnych krasnorostów. Najpowszechniej występujące to gatunki rurecznicy (*Polysiphonia* spp.), rozróżki (*Ceramium* spp.) i kraśnicy (*Rhodomela* spp.). W różnych rejonach spotyka się ponadto przedstawicieli widlika (*Furcellaria* spp.) i liściaka (*Phyllophora* spp.). Bałtyckie krasnorosty, w bardziej zasolonych wodach, osiągają maksymalną wielkość rzędu 30–40 cm. Rosną na nieznacznie większych głębokościach niż pozostałe rośliny osiadłe, chociaż kilka gatunków bytuje blisko powierzchni. Najgłębiej, bo na głębokości 19–25 m w Kattegacie zanotowano obecność *Phycodrys rubens* i *Dilsea carnosa*, a na Ławicy Słupskiej na głębokości około 20 m spotyka się jeszcze kilka gatunków krasnorostów (m.in. *Delesseria sanguinea*).

Makroglony bałtyckie nie osiągają imponujących rozmiarów. Przedstawiciele największych z nich rzadko osiągają wielkość powyżej 50 cm. Makrofitobentos odgrywa stosunkowo małą rolę w ogólnej produkcji pierwotnej morza. Stanowi jednak ważne środowisko życia dla bezkręgowców (skorupiaków, małży, wieloszczetów, ślimaków). Bogactwo pokarmu przyciąga ryby na żerowisko, a dla niektórych fitofilnych gatunków jest miejscem rozrodu. Tego typu habitaty są jednym z najbogatszych i najbardziej zróżnicowanych siedlisk w Morzu Bałtyckim.

Osiadłe, lecz słabo przytwierdzone, a więc łatwo odrywające się od podłoża nitkowate, szybko rozwijające się glony(*Ectocarpus siliculosus*, *Pilayella littoralis*, *Enteromorpha* spp., *Cladophora glomerata*), formują leżące na dnie bądź dryfujące maty, o grubości 5–20 cm i rozmiarów kilku metrów. Postępujące w tych matach szybkie procesy rozkładu przyczyniają się znacznie do obniżenia zawartości tlenu w osadzie i w wodzie przydennej, oddziałując w ten sposób negatywnie na zoobentos i ryby. Zjawisko to, będące skutkiem eutrofizacji, nasila się, stanowiąc coraz większy problem dla ekosystemu.

3.5 Zoobentos

Warunki, które decydują o tym jaka fauna zasiedla dno Bałtyku, to przede wszystkim zasolenie, temperatura, rodzaj osadu oraz dostępność pokarmu. Dno bałtyckie, w zależności od miejsca i głębokości, może być: piaszczyste, kamieniste, żwirowate, ilaste, mieszane, a największe głębie wypełnia muł organiczny (szlam). Podstawowym czynnikiem ograniczającym występowanie zoobentosu na dnie wydaje się być dostępność tlenu. W strefie płytkowodnej, woda poddana falowaniu, silniejszym prądom powierzchniowym, dużym różnicom temperatury powodującym mieszanie konwekcyjne, jest zwykle dobrze natleniona. W rejonach głębszych zasolenie jest większe, latem woda ma niższą,

a w ciągu roku bardziej stabilną temperaturę, lecz często głównym problemem staje się okresowy bądź stały brak tlenu. Zróżnicowanie pokarmu na dnie morza spowodowało wykształcenie różnych sposobów odżywiania się wśród bytującej tam fauny. Są zatem wśród niej filtratory, detrytożercy, nekrofagi, roślinożercy, drapieżniki oraz wszystkożercy. Główny pokarm większości makrozoobentosu (detrytożerców i filtratorów), zamieszkującego strefę denną, niezależnie od jej głębokości, stanowi materia organiczna spadająca na dno w postaci martwego fito– i zooplanktonu oraz fekaliów. Zoobentos odgrywa więc ważną rolę w oczyszczaniu wody (filtratory) oraz osadu (detrytożercy) z martwej materii organicznej.

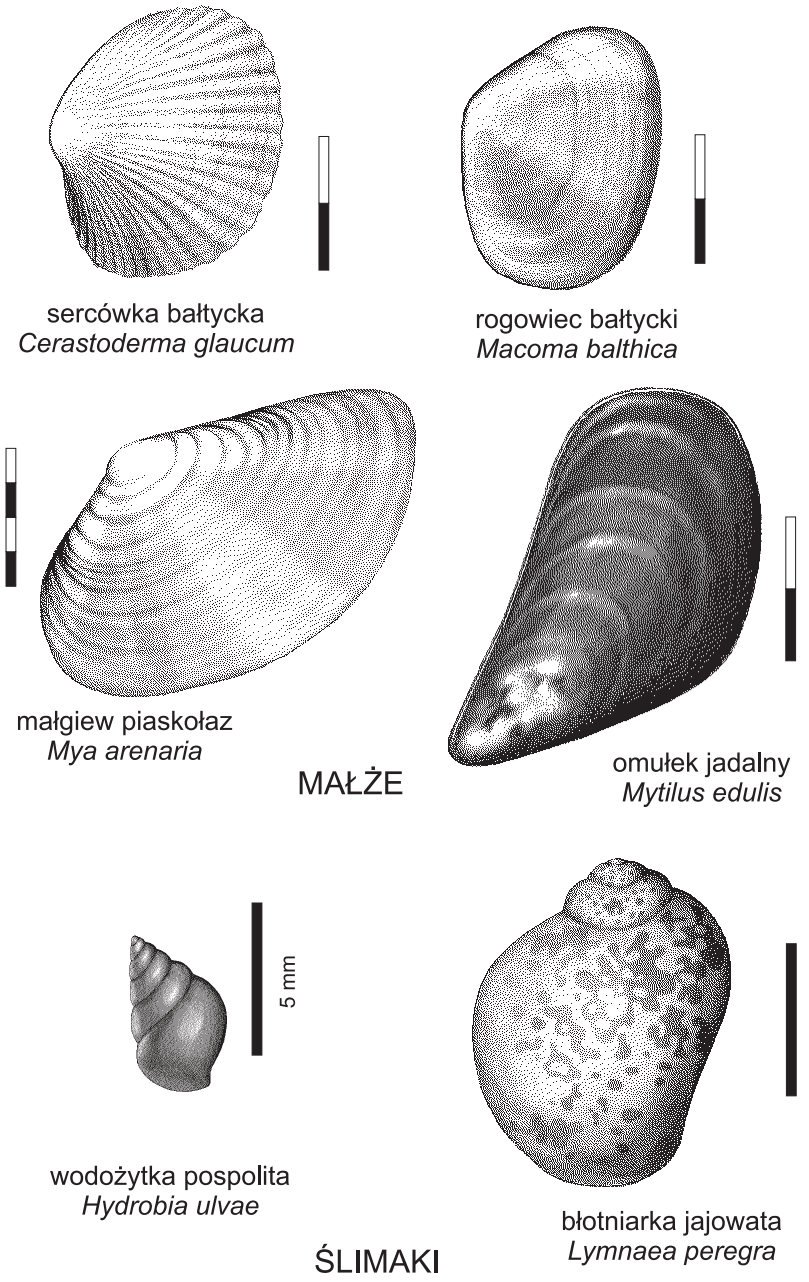
Strefa płytkowodna Bałtyku (mniej więcej do izobaty 40 m) jest generalnie bogatsza w gatunki niż obszary leżące głębiej, chociaż wyjątkiem jest np. Bruzda Słupska (głębokość do 95 m). O bogactwie gatunkowym decyduje nie tylko zróżnicowanie podłoża, ale również fakt, że w warstwie eufotycznej, wśród roślinności przytwierdzonej do dna, zwiększającej różnorodność siedliskową, szereg gatunków zwierząt należących do różnych grup troficznych, znajduje dogodne warunki do zaspokojenia swoich wymagań życiowych. Monotonia głębszych, zwykle ilastych obszarów, a także okresowy brak tlenu nie sprzyjają temu i umożliwiają życie tylko detrytożercom oraz, odżywiającymi się nimi, drapieżnikom.

Fauna denna żyje na powierzchni dna (epifauna) bądź zagrzebana w osadzie (infauna). Ze względu na wielkość wyróżnia się makrozoobentos (>1 mm) i meiobentos (<1 mm). Makrozoobentos tworzą głównie małże (Bivalvia), skorupiaki (Crustacea), wieloszczety (Polychaeta), skąposzczety (Oligochaeta) i ślimaki (Gastropoda). Podstawowymi grupami wchodzącymi w skład meiobentosu są nicienie (Nematoda), Harpacticoida, wirki (Turbellaria), brzuchorzęski (Gastrotricha) i małżoraczki (Ostracoda).

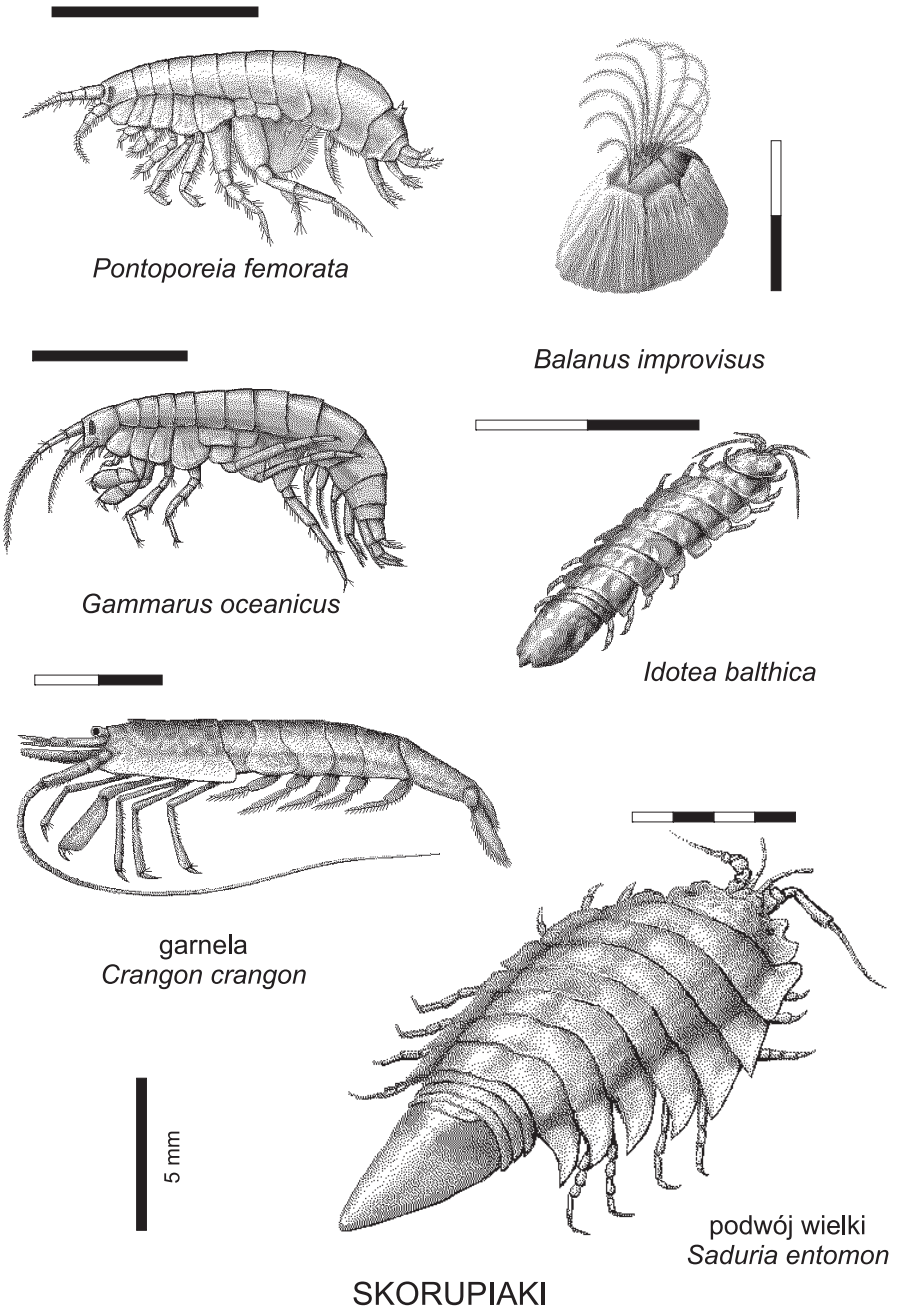
W Bałtyku można spotkać tylko kilka gatunków morskich małży, a zasięgi ich występowania są wyznaczone spadkiem zasolenia wody. Najbardziej odporny na spadek zasolenia rogowiec bałtycki (*Macoma balthica*) zasiedla prawie cały Bałtyk. Pospolite w tym morzu, ale mające mniejsze zasięgi występowania, są: omułek (*Mytilus edulis*), małgiew piaskołaz (*Mya arenaria*) oraz sercówki (*Cerastoderma glaucum* i *Cardium hauniense*). Znacznie gorzej znoszące obniżenie zasolenia *Astarte borealis* i *A. elliptica*, najdalej na wschód, można napotkać jeszcze tylko w Bruździe Słupskiej, a *Arctica islandica* w Głębi Arkońskiej. W najbardziej wysłodzonych rejonach ujść rzecznych notuje się około 15 gatunków małży słodkowodnych.

Bałtyk zamieszkuje około 40 gatunków ślimaków (w tym 20 gatunków ślimaków słodkowodnych). Występują wśród nich roślinożercy, drapieżcy, filtratory, detrytożercy i pasożyty. Są to głównie słodko– i słonawowodne gatunki bytujące w strefie przybrzeżnej. Ślimaki z rodziny Hydrobiidae spotykane są także głębiej, nawet do głębokości 50 m.

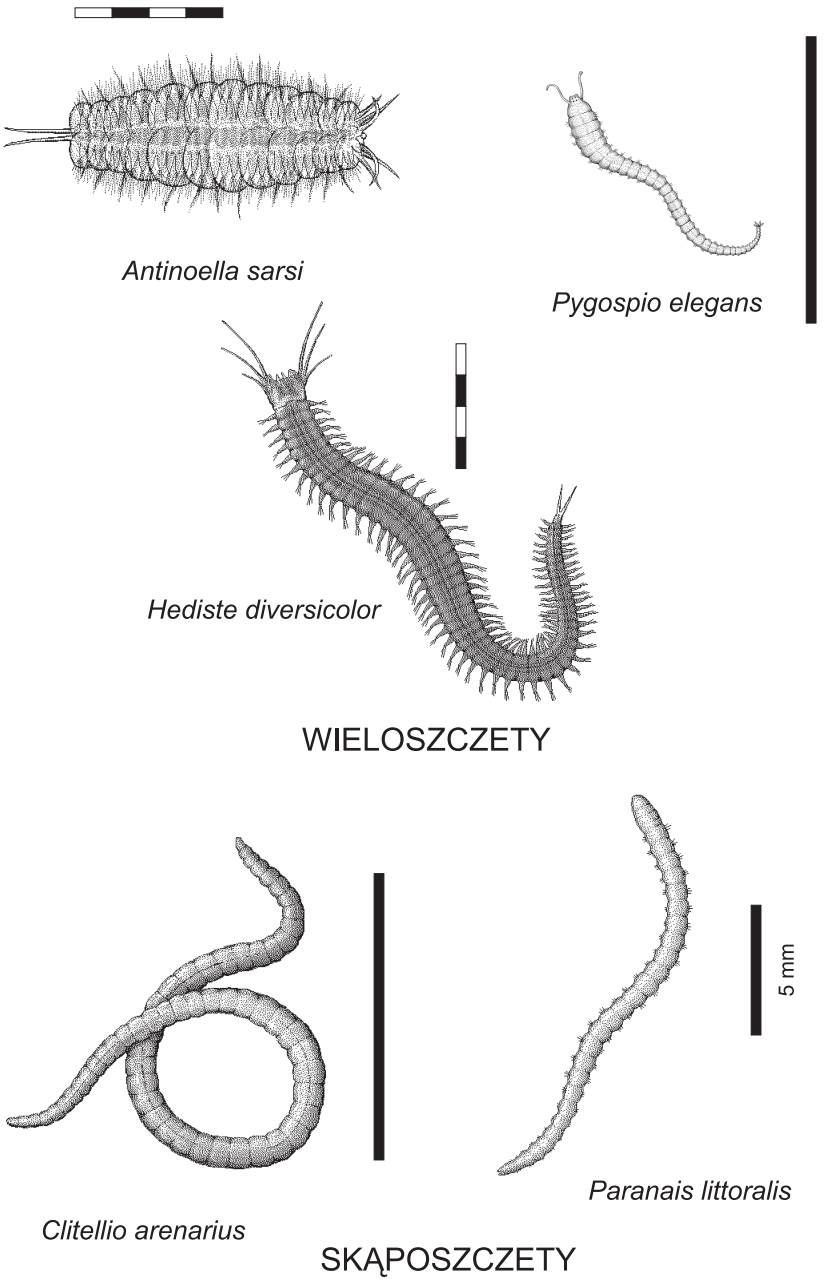
Stosunkowo bogate w gatunki są skorupiaki. Prowadzą one mniej lub bardziej ruchliwy tryb życia, a jedynym osiadłym gatunkiem filtrującym wodę jest pąkla (*Balanus improvisus*), należąca do wąsonogów (Cirripedia). Dwie grupy drobnych skorupiaków: Amphipoda (bocznie spłaszczone o wyglądzie przecinków) i Isopoda (spłaszczone grzbieto-brzusznie) mierzą zwykle od 0,5 cm do 2 cm w zależności od gatunku. Wśród Isopoda największe rozmiary (do 9 cm) osiąga reliktowy, polodowcowy podwój wielki (*Saduria entomon*) preferujący głębsze, chłodniejsze wody. W rejonie Wysp Alandzkich jest on notowany aż do głębokości 290 m, chociaż w Zatoce Botnickiej i Gdańskiej wystę-



Rys. 3.16 Makrozoobentos bałtycki (wg Needona i in. 1985, Żmudzińskiego 1990)



Rys. 3.17 Makrozoobentos bałtycki (wg Needona i in. 1985, Żmudzińskiego 1990)



Rys. 3.18 Makrozoobentos bałtycki (wg Needona i in. 1985, Żmudzińskiego 1990)

puje także w wodach płytkich. Inne szeroko spotykane Isopoda to *Jaera* spp., *Idotea* spp., *Sphaeroma* spp., *Asellus aquaticus*. Najpopularniejsze Amphipoda to *Monoporeia affinis*, *Pontoporeia femorata* i liczne gatunki Gammaridae. Generalnie wszystkie gatunki skorupiaków występujące w Bałtyku mają niewielkie rozmiary. Największe z nich, Decapoda, nie są ani często, ani licznie spotykane. Krewetka bałtycka (*Palemon adspersus*) osiągająca długość 5–7 cm preferuje przebywanie wśród morszczynu. Na płytkich piaszczystych obszarach powszechnie spotyka się nieco mniejsza garnelę *Crangon crangon*). Największy z *Decapoda* krab wełnistoręki (*Eriocheir sinensis*) osiąga stosunkowo dużą liczebność w zachodniej, słonej części Bałtyku, a krabik amerykański (*Rhithropanopeus harrisii*) oraz krab brzegowy (*Carcinus maenas*) pojawiają się również w przyujściowych wodach południowego wybrzeża Bałtyku.

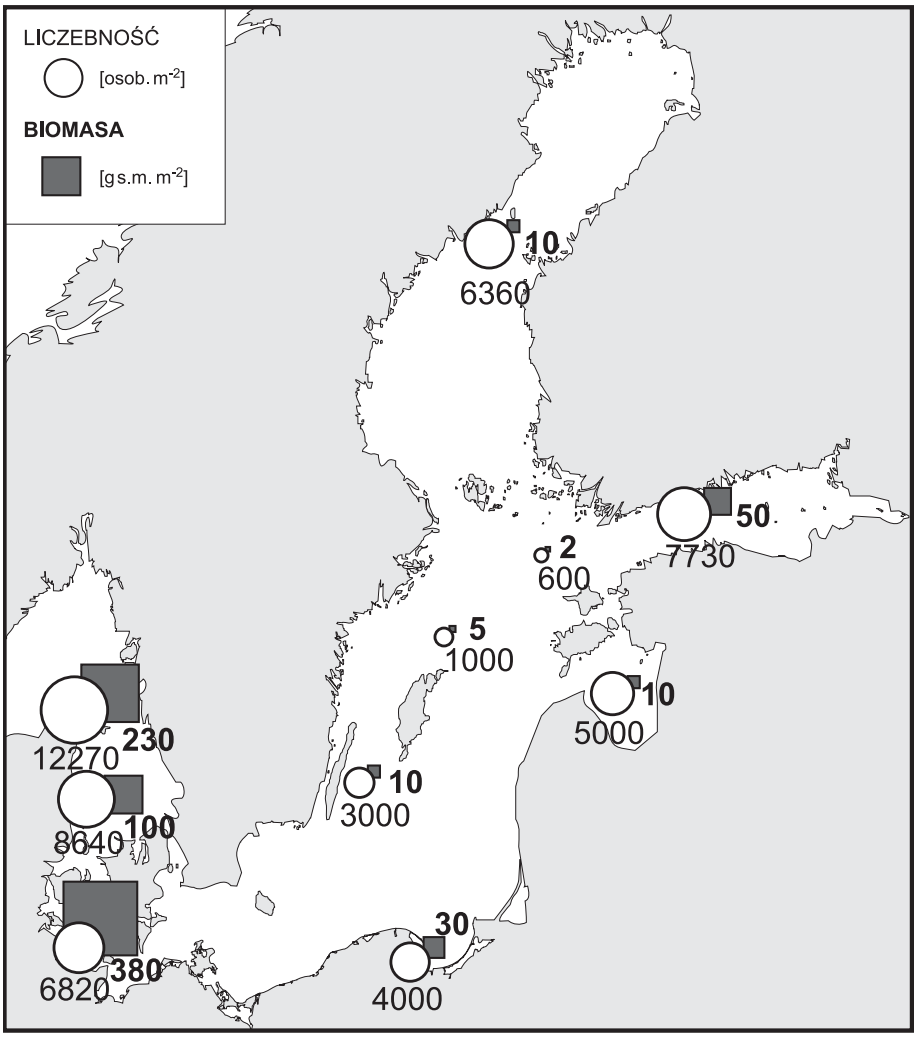
Wśród około 20 gatunków bałtyckich wieloszczetów są zarówno swobodnie poruszające się (*Antinoella sarsi*, *Hediste diversicolor*, *Arenicola marina*, *Marenzelleria neglecta*), jak i osiadłe (*Fabricia sabella*, *Manayunkia aestuarina*). Zakres wielkości wieloszczetów ma dużą rozpiętość: od około 2 mm *Fabricia sabella* do ponad 10 cm *Hediste diversicolor* czy *Arenicola marina*. Najpospolitszym wieloszczetem bałtyckim, żyjącym głównie w płytkich wodach i piaszczystym dnie, jest drobny (ok. 6 mm), osiadły *Pygospio elegans*. Głębsze wody zasiedla *Terebellides ströemi*, który jest w stanie wytrzymać krótkotrwały brak tlenu, a najbardziej odporny *Scoloplos armiger* jest spotykany jeszcze przy tak niskiej zawartości tlenu w wodzie, której nie mogą znieść żadne inne gatunki makrozoobentosu. Tylko 3 gatunki, spośród wieloszczetów występujących w Bałtyku, bytują w wysłodzonych wodach Zatoki Botnickiej.

Powszechnymi mieszkańcami miękkiego dna strefy przybrzeżnej Bałtyku są drobne (do około 2 cm) skąposzczety. Niektóre gatunki mogą bytować głębiej, tolerując gorsze warunki tlenowe (*Clitellio arenarius*) lub mocno wzbogacone w detrytus, zanieczyszczone miejsca (*Tubifex costatus*).

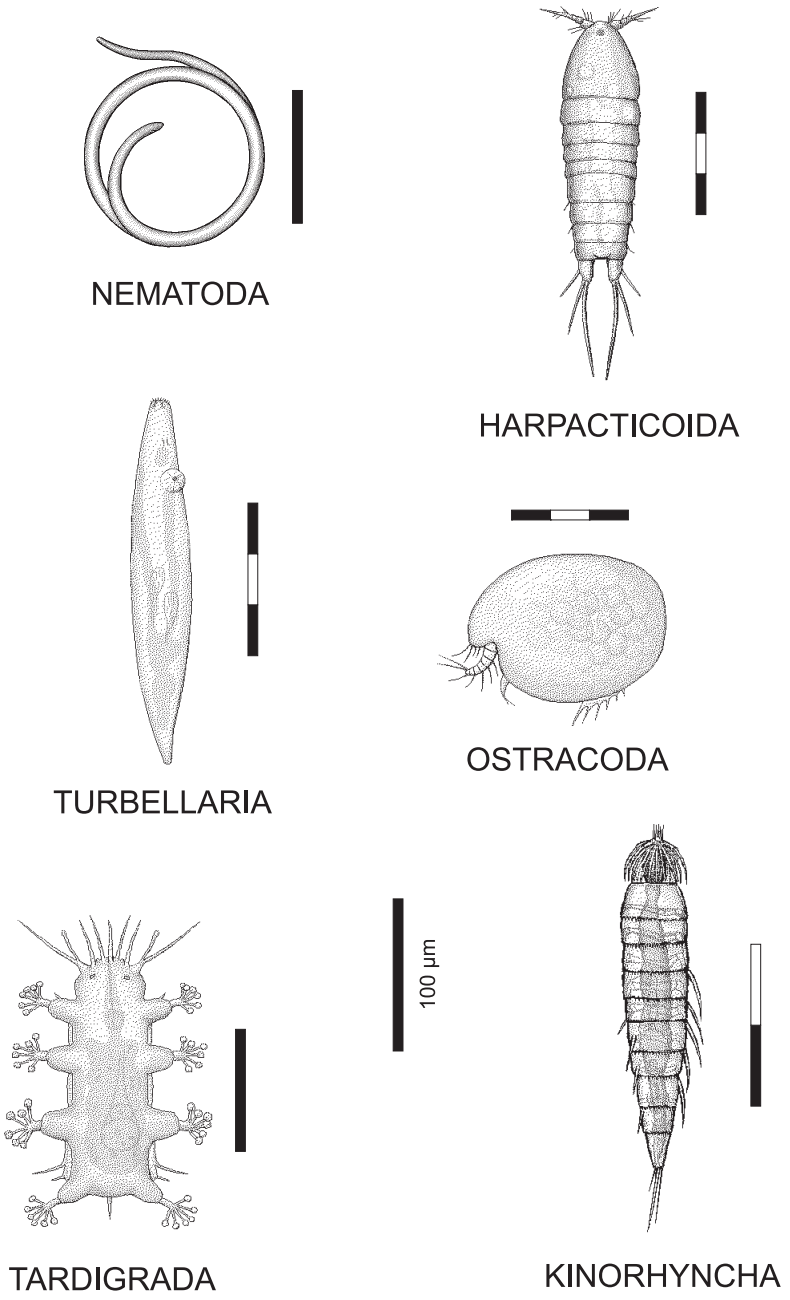
W zależności od możliwości przystosowania się organizmów do określonych warunków fizycznych i zasobów pokarmowych siedliska, tworzą one swoiste zespoły o dość specyficznym ilościowym i jakościowym składzie gatunkowym. Gatunkiem, który najczęściej wchodzi w skład różnych zespołów makrozoobentosu jest *Macoma balthica* (np.: *Macoma balthica – Saduria entomon*, *Scoloplos armiger – Macoma balthica*, *Macoma balthica – Mya arenaria*, *Mytilus edulis – Gammarus salinus*, ze znacznym udziałem *Macoma balthica*).

Wielkości biomasy i liczebności makrozoobentosu na obszarze Bałtyku są bardzo zróżnicowane. Obok pustyń pozbawionych makrofauny występują miejsca o bardzo wysokiej liczebności (powyżej 20 tys. osobników na m^2) i biomasie (powyżej 350 g suchej masy na m^2). Różnorodność siedlisk powoduje także, że liczebność i biomasa różni się znacznie (kilka bądź kilkanaście razy) nawet w obrębie tego samego akwenu. Generalną prawidłowością jest jednak obniżanie się biomasy z zachodu na wschód i z południa na północ Morza Bałtyckiego (ponad 100-krotny spadek biomasy). Spowodowane jest to przede wszystkim zmniejszeniem liczebności, a ostatecznie brakiem małży w rejonach o bardzo niskim zasoleniu wody (np. w Zatoce Botnickiej 2–3 PSU).

Ważnym elementem zoobentosu jest meiobentos. Te bardzo małe organizmy są szeroko rozprzestrzenione we wszystkich rodzajach dna, gdzie bytują tak w przestrzeni między ziarnami, jak i na powierzchni osadu. Liczebność ich sięgać może 1–10 mln osobników na m^2. Biomasa meiobentosu zmienia się w takim samym układzie geograficznym



Rys. 3.19 Przykładowa liczebność i biomasa makrozoobentosu w wybranych rejonach Bałtyku, dane z lat 1989–1993 (wg HELCOM 1996)



Rys. 3.20 Meiobentos bałtycki (wg Giere 1993)

jak makrozoobentosu. Wielkość biomasy meiobentosu jest jednak zdecydowanie bardziej stabilna niż makrozoobentosu i w północnej części Bałtyku sięga około $0,5\,\mathrm{g}$ suchej masy na m^2, a w południowej około $1,5\,\mathrm{g}$ na m^2. Mimo że, oprócz Zatoki Botnickiej, biomasa meiobentosu jest zwykle znacznie niższa niż makrozoobentosu, to dzięki jego bardzo dużej liczebności, odgrywa on bardzo ważną rolę w przepływie energii i obiegu materii w ekosystemie. Ponadto niektóre gatunki nicieni zasiedlają te środowiska, gdzie ze względu na bardzo niską zawartość tlenu, nie może już żyć makrozoobentos.

3.6 Ryby

W Bałtyku żyje niewiele gatunków ryb. Zanotowane 26 gatunków ryb typowo morskich w południowej jego części w porównaniu ze 120 w sąsiadującym Morzu Północnym to liczba mało imponująca. Jeszcze mniej jest gatunków mających bezpośrednie znaczenie użytkowe. Należą do nich pelagiczne: śledź (*Clupea harengus*) i szprot (*Sprattus sprattus*); przydenne: dorsz (*Gadus morrhua*) i płastugi – głównie stornia (*Platichthys flesus*); wędrowne: łosoś (*Salmo salar*), troć (*S.trutta*) i węgorz (*Anguilla anguilla*). Spośród płastug poławia się także, choć w znacznie mniejszych ilościach, gładzicę (*Platessa platessa*), skarpia (*Scophthalmus maximus*) oraz bardzo rzadko zimnicę (*Limanda limanda*) i niegładzicę (*Hippoglossoides platessoides*). Lokalnie niewielkie znaczenie użytkowe mają: belona (*Belone belone*), węgorzyca (*Zoarces viviparus*), motela (*Enchelyopus cimbrius*), ostropłetwiec (*Pholis gunnellus*), sieja (*Coregonus lavaretus*), sielawa (C. albula) i stynka (*Osmerus eperlanus*). W połowach, rzadko i niezbyt licznie, znaleźć można ryby napływające z Morza Północnego: sardelę (*Engraulis encrasicolus*), ostroboka (*Trachurus trachurus*), witlinka (*Odontogadus merlangus*), a nawet, choć sporadycznie, pływającą w ławicach makrelę (*Scomber scombrus*).

Ryby nieużytkowe bytują głownie w strefie przybrzeżnej, aczkolwiek zasiedlają miejsca o różnych głębokościach. Należą do nich głowaczowate: kur rogacz (*Myxocephalus quadricornis*), kur diabeł (*M. scorpio*) i kur głowacz (*Taurulus bubalis*); dobijakowate: tobiasz (*Ammodytes tobianus*) i dobijak (*Hyperoplus lanceolatus*); kilka gatunków babek: mała (*Pomatoschistus minutus*), piaskowa (*P. microps*) i babka czarna (*Gobius niger*); ciernikowate: ciernik (*Gasterosteus aculeatus*), cierniczek (*Pungitius pungitius*) i pocierniec (*Spinachia spinachia*) a z innych: tasza (*Cyclopterus lumpus*), dennik (*Liparis liparis*), taśmiak (*Lumpenus lampretaeformis*), wężynka (*Nerophis ophidion*) i iglicznia (*Syngnathus typhle*).

Specyficznym zjawiskiem w Morzu Bałtyckim jest występowanie ryb słodkowodnych. Pojawiają się one w rejonach przyujściowych rzek, wysłodzonych zalewach i zatokach, mając często istotne znaczenie dla lokalnego rybołówstwa. Wzdłuż wybrzeży Bałtyku, wśród słodkowodnej ichtiofauny, spotyka się zwykle podobne gatunki. Od północy są to głównie: okoń (*Perca fluviatilis*), płoć (*Rutilus rutilus*) i jazgarz (*Gymnocephalus cernua*). Ponadto ku południu pojawia się sandacz (*Stizostedion lucioperca*), szczupak (*Esox lucius*) oraz karpiowate m.in. leszcz (*Abramis brama*) i krąp (*Blicca bjoercna*).

W Bałtyku żyją również typowe gatunki ryb dwuśrodowiskowych. Ryby anadromiczne – łosoś i troć – swe dorosłe życie, a więc czas intensywnego wzrostu i nabierania masy ciała, spędzają w morzu, gdzie spotykają sprzyjające im warunki pokarmowe. Na tarło udają się w górne biegi nadbałtyckich strumieni i rzek, powtarzając tę czynność

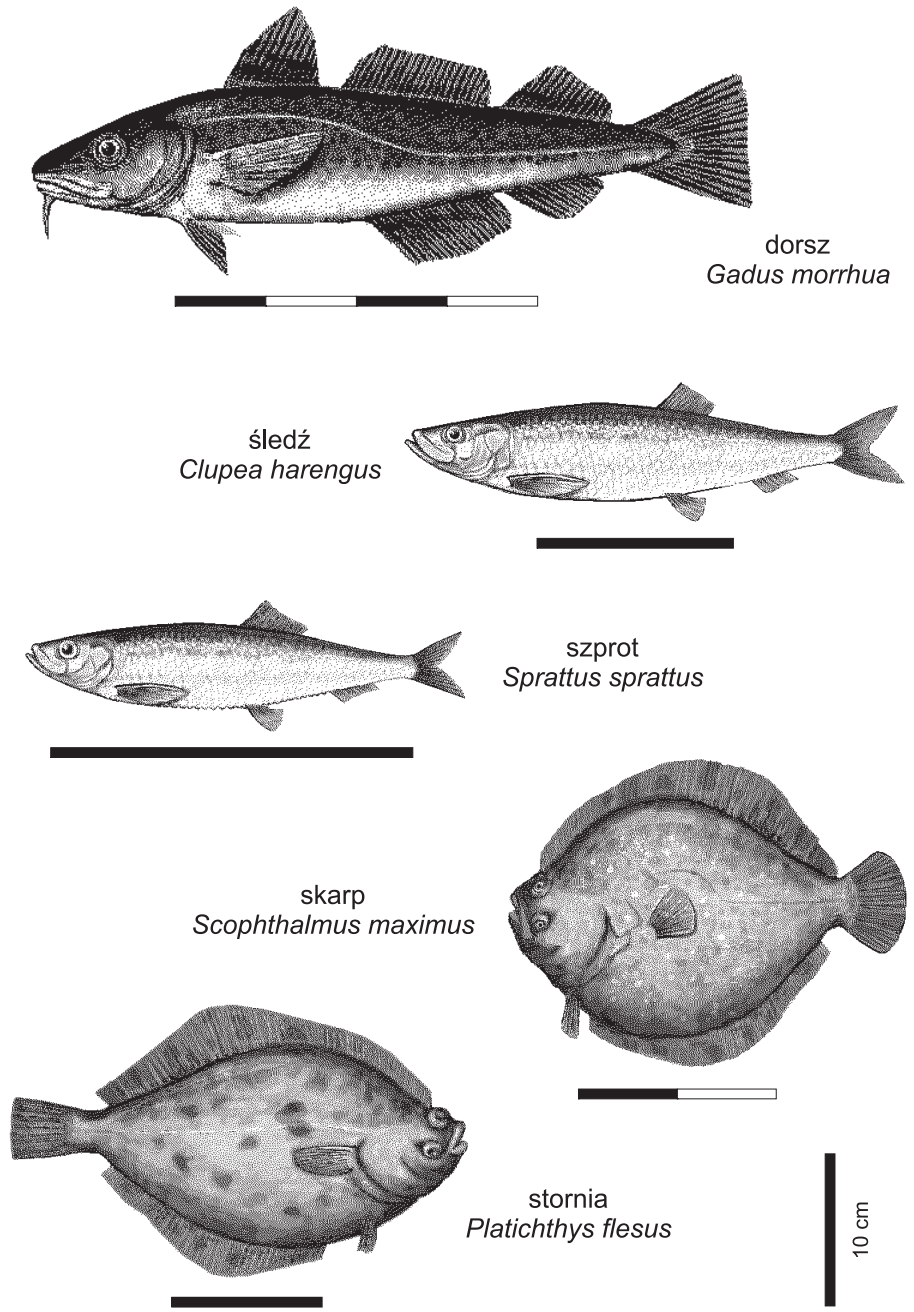
kilkakrotnie w ciągu życia. Węgorz jest rybą katadromiczną, tzn. że na tarło wędruje do morza, a całe dorosłe życie spędza w zbiornikach słodkowodnych. Przezroczyste, szkliste larwy węgorza (montée), biernie unoszone z Morza Sargassowego przez Prąd Zatokowy, po około 3 latach jako młode węgorzyki docierają do brzegów Europy Zachodniej, skąd część z nich przedostaje się do Bałtyku, a stamtąd do rzek, strumieni i jezior, gdzie spędzają większość życia. Powrotna wędrówka do Morza Sargassowego dorosłych już ryb na tarło jest kresem ich życia. Do ryb wędrownych, choć już bardzo rzadko spotykanych, należą słodkowodne certa (*Vimba vimba*) i ciosa (*Pelecus cultratus*). Na żerowiska wpływają do wysłodzonych partii morza, chociaż mogą zapuszczać się i dalej, ale na tarło wracają do rzek.

Głównym czynnikiem decydującym o składzie gatunkowym ichtiofauny strefy przybrzeżnej jest zasolenie wody, której temperatura także może odgrywać znaczną rolę. Ryby słodkowodne są raczej stacjonarne, a ponadto preferują cieplejszą wodę, co umożliwia im przebywanie w wodach przybrzeżnych przez cały rok. Jednakże gatunki słodkowodne, takie jak sieja czy stynka wymagające wody zimniejszej, unikają latem wód przybrzeżnych, wracają zaś ku brzegom, w okresach chłodniejszych, na tarło i zimowanie.

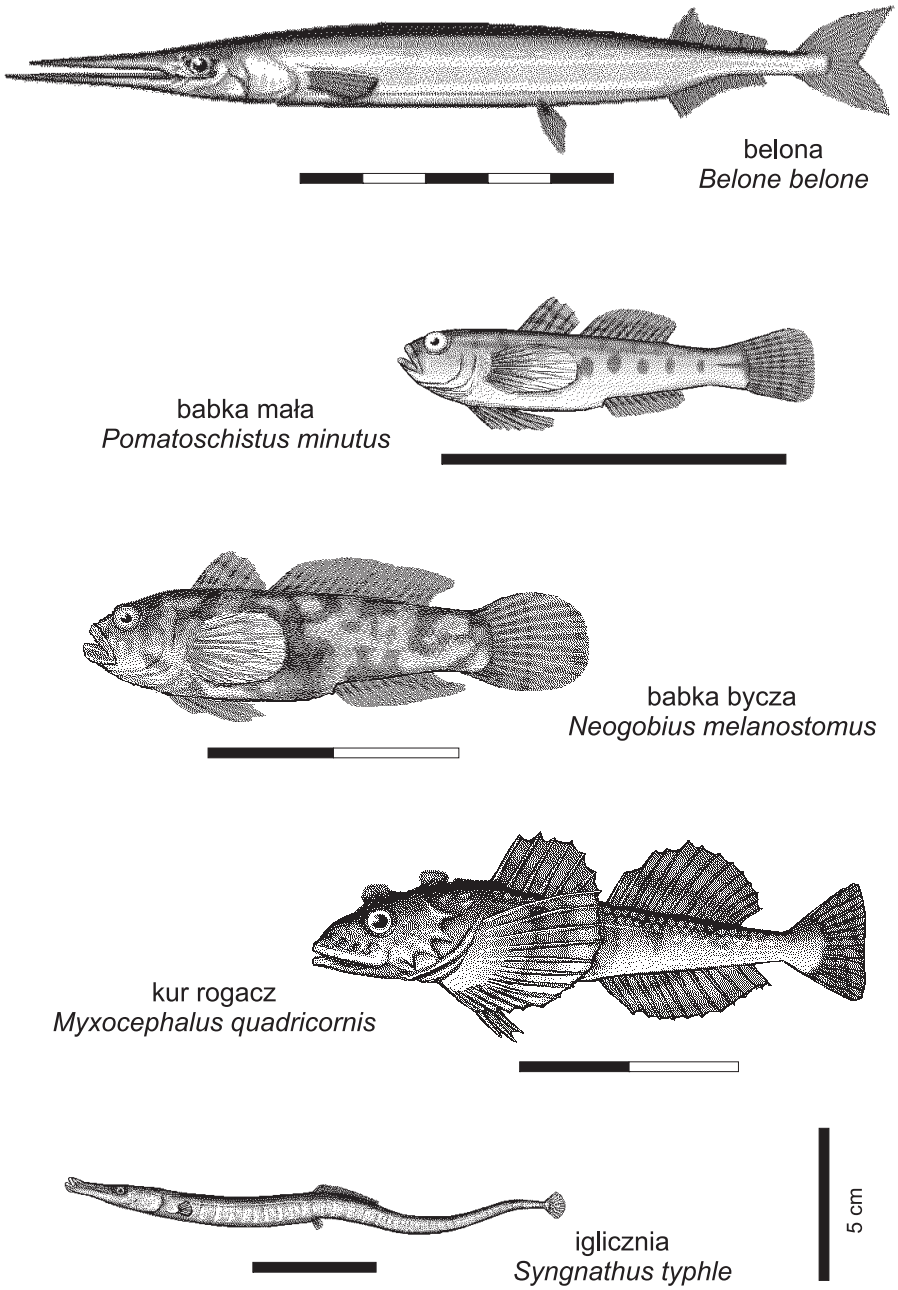
Generalnie ryby morskie wędrują. Są to wędrówki żerowiskowe i tarłowe. Niewiele jest w Bałtyku gatunków ryb osiadłych, takich jak np. węgorzyca, iglicznia, wężynka czy głowaczowate. Szprot nie ma specjalnych wymagań co do warunków tarła. Jego pelagiczna ikra po prostu unosi się w toni wodnej. Śledź już jednak do złożenia ikry potrzebuje płytkich wód o dnie piaszczystym lub kamienistym, gdyż jego ciężka ikra spada i przykleja się do podłoża. Dorsz, mimo że jest rybą przydenną, posiada ikrę pelagiczną, która do swego rozwoju wymaga wody dobrze natlenionej i zasolonej powyżej 11 PSU. Na okres tarła ściąga więc do głębi, a potem wraca do bogatszych w pokarm obszarów przybrzeżnych. Podobnie zachowują się w Bałtyku płastugi. Na tarło także dążą do głębi, by tam złożyć pelagiczną ikrę. Wylęgające się larwy płastug, podobnie jak i larwy dorsza, unoszone są ku górze, skąd rozprzestrzeniają się do strefy przybrzeżnej.

Ryby, w tym również bałtyckie, zasadniczo nie opiekują się potomstwem. Jednakże u kilku gatunków możemy zaobserwować różne formy opieki nad młodym pokoleniem. Wszystkie ciernikowate budują gniazda i następnie je pilnują. Samice ostropłetwca składają ikrę w postaci sklejonej grudki, owijają się dookoła niej i tak pozostają aż do wylęgu larw. Samiec wężynki nosi ikrę przyklejoną wzdłuż brzucha, a samiec igliczni pomiędzy dwoma fałdami skórnymi tworzącymi swego rodzaju torbę lęgową. Węgorzyca rodzi około kilkadziesięciu małych 5–6 mm ryb, które wylęgają się z jaj umieszczonych w jej jamie brzusznej.

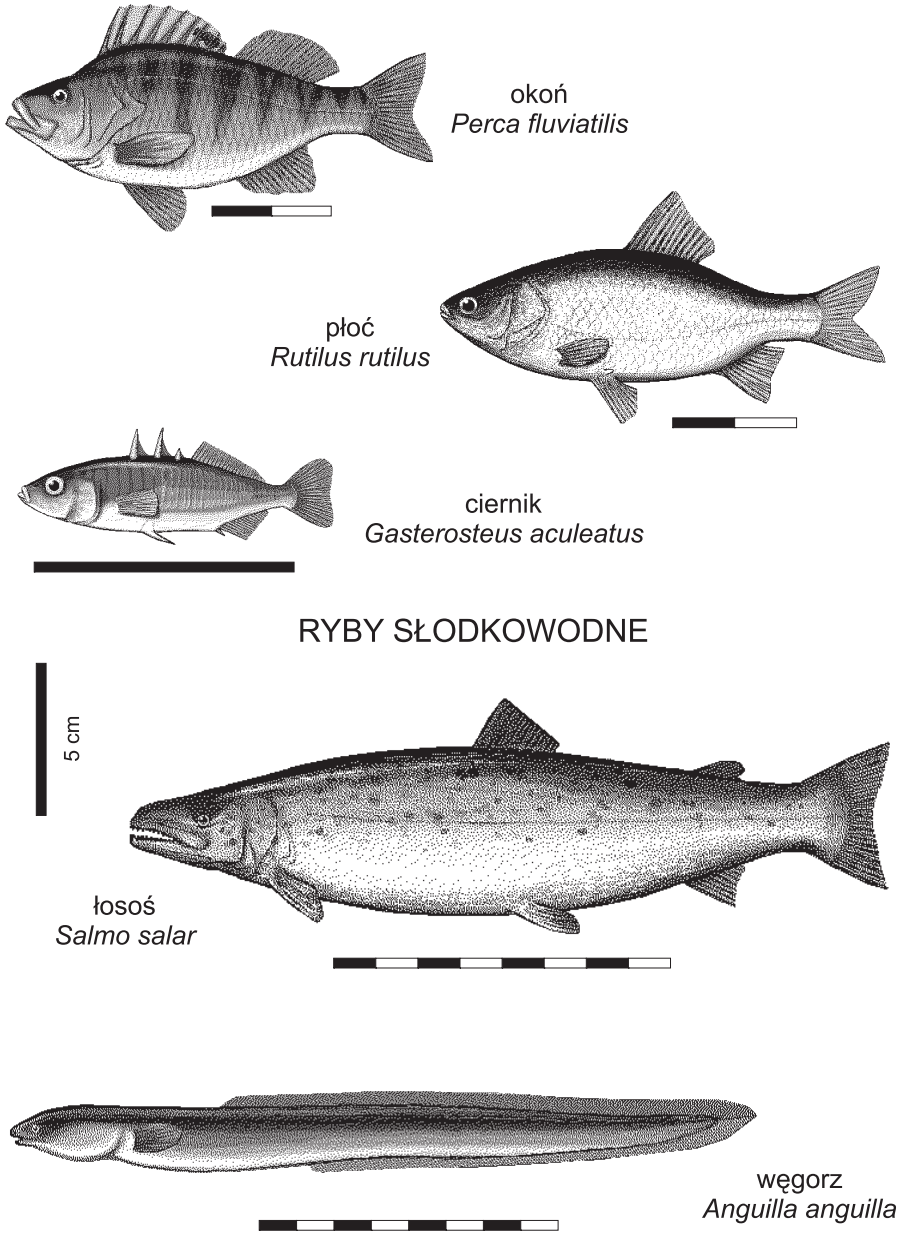
Skład gatunkowy ichtiofauny bałtyckiej jest stosunkowo stabilny. W ostatnich jednak latach, najprawdopodobniej z wodami balastowymi statków, przybyła z Morza Kaspijskiego i Morza Czarnego babka bycza (*Neogobius melanostomus*). Znalazła tu ona warunki sprzyjające jej rozwojowi i prawdopodobnie stanie się trwałym elementem fauny.



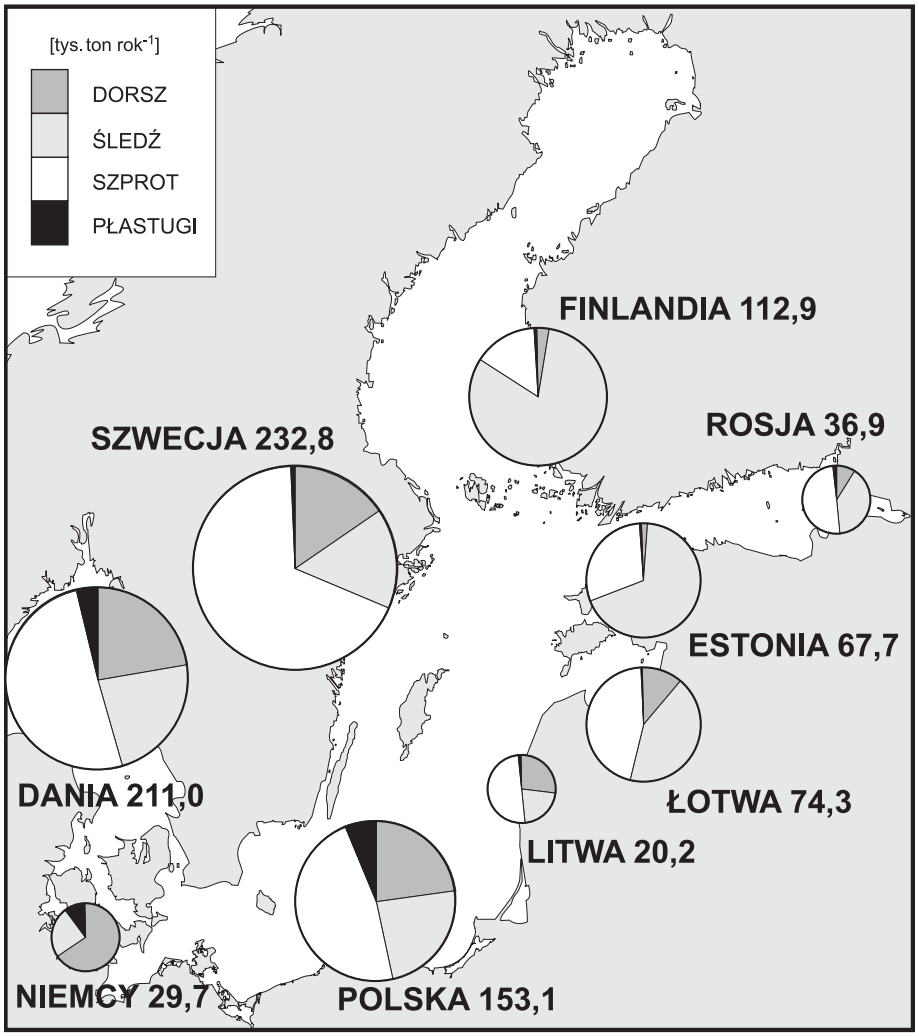
Rys. 3.21 Ryby bałtyckie (wg Gąsowskiej 1962, Żmudzińskiego 1990)



Rys. 3.22 Ryby bałtyckie (wg Gąsowskiej 1962, Żmudzińskiego 1990)



Rys. 3.23 Ryby bałtyckie (wg Gąsowskiej 1962, Żmudzińskiego 1990)



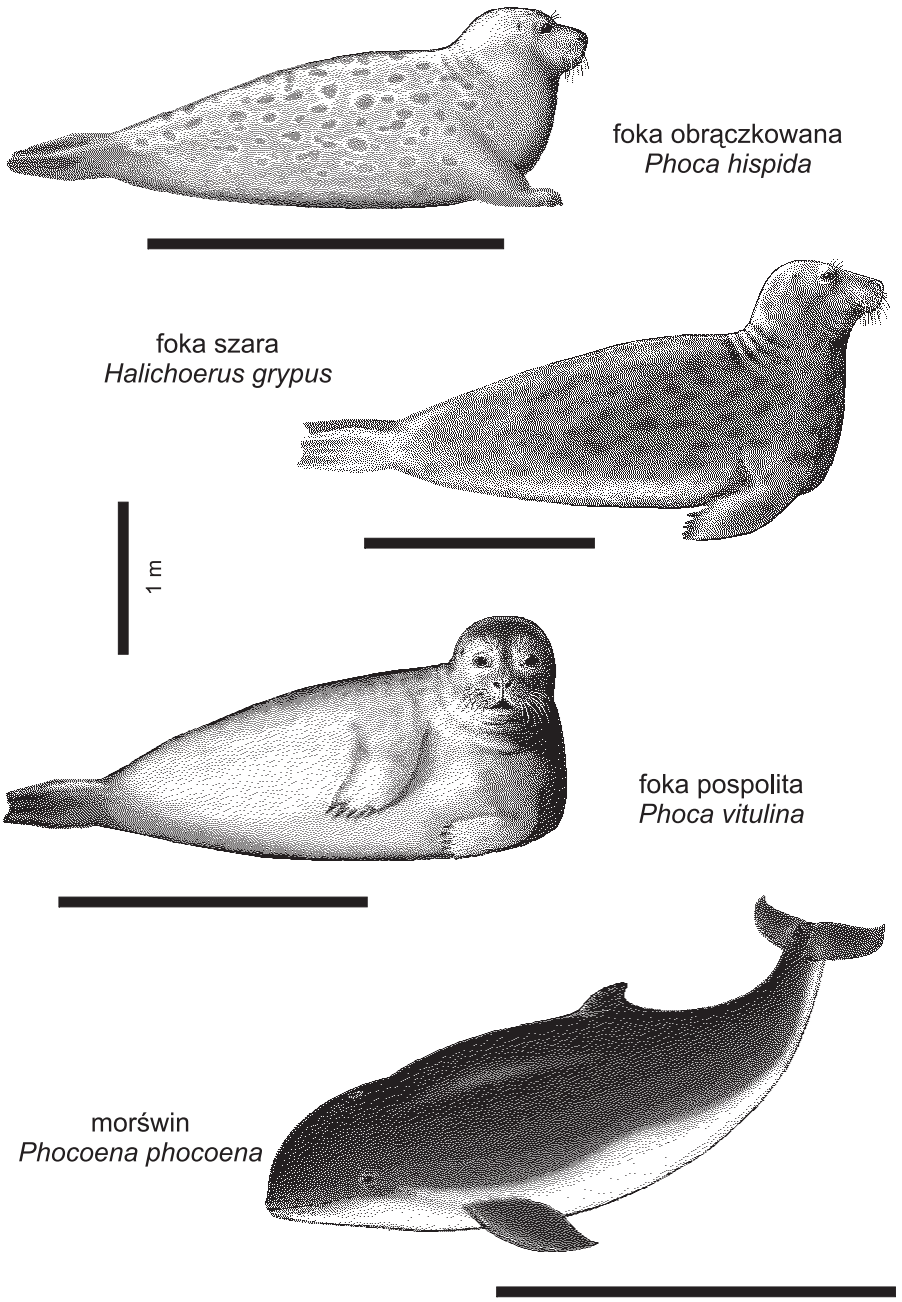
Rys. 3.24 Połowy najważniejszych gatunków ryb bałtyckich, dane z 1996 roku (wg Raportu ICES 1998)

3.7 Ssaki

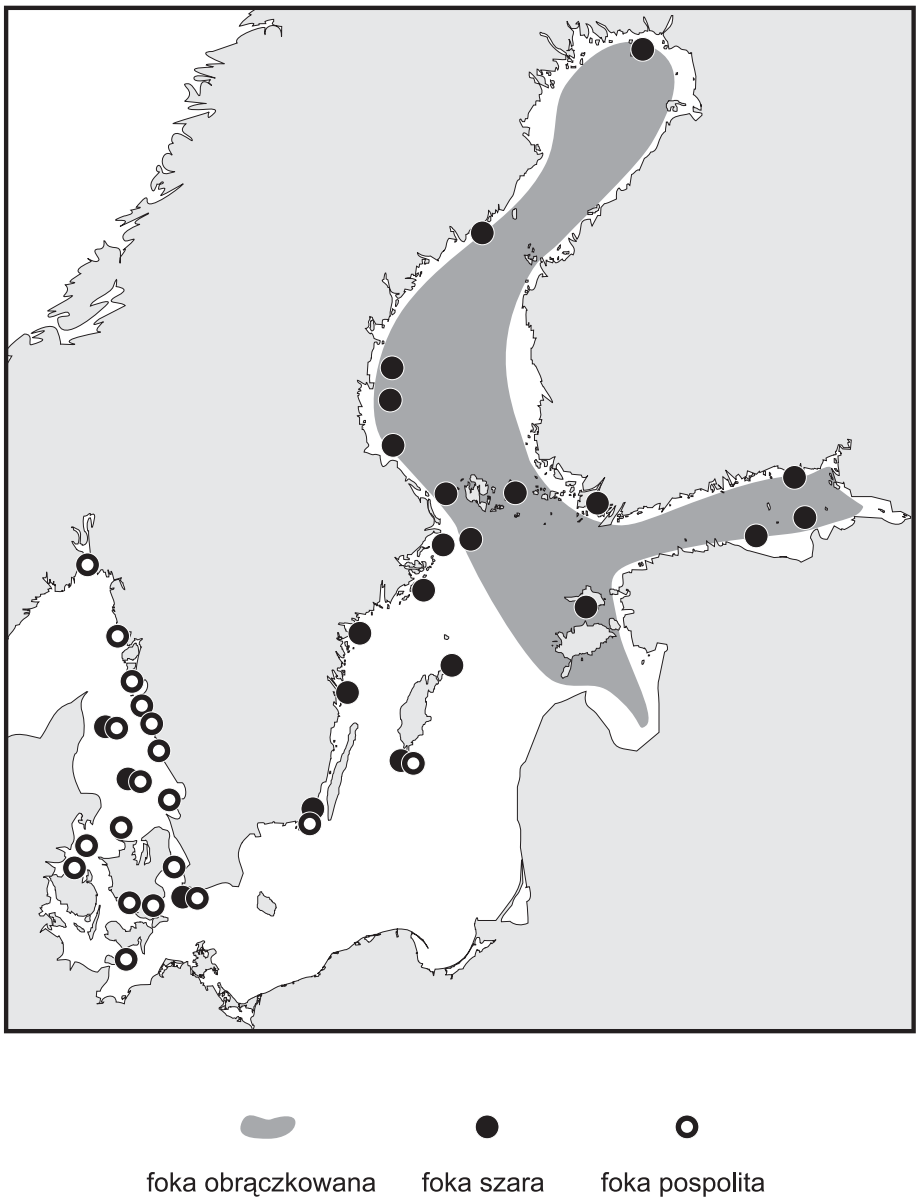
W Morzu Bałtyckim żyją tylko cztery gatunki ssaków morskich. Są to: foka szara (*Halichoerus grypus*), foka obrączkowana (*Phoca hispida botnica*) i foka pospolita (*Phoca vitulina*) oraz przedstawiciel rodziny delfinów – morświn (*Phocoena phocoena*).

Najbardziej północne, a zatem najzimniejsze rejony Bałtyku zamieszkuje foka obrączkowana, będąca reliktem arktycznego pochodzenia. Jest ona spotykana przede wszystkim w Zatoce Botnickiej, Fińskiej i Ryskiej. Bardzo rzadko, tylko podczas wyjątkowo srogich zim, zapuszcza się ona w cieplejsze, południowe rejony Bałtyku. Foka obrączkowana jest najmniejszą z bałtyckich fok. Największą, bo mogącą osiągać około 2 m długości i około 2 t masy ciała, jest foka szara. Zamieszkuje ona również północną część Bałtyku, lecz główny obszar jej występowania to Morze Botnickie aż po Wyspy Alandzkie. Można ją również spotkać w całym południowym Bałtyku, lecz im dalej na południe tym jej skupiska są coraz mniej liczne. Na polskim wybrzeżu pojawia się sporadycznie. Foka pospolita zamieszkuje cieplejsze rejony, głównie Kattegat i Morze Bełtów, gdzie preferuje, dobrze ukryte wśród archipelagów, piaszczyste i skaliste brzegi. Wzdłuż wschodnich wybrzeży Szwecji małe grupki tych fok można spotkać aż do wybrzeży Gotlandii. Potomstwo foki pospolitej przychodzi na świat późnym latem i już kilka godzin po urodzeniu razem z matką przebywa w wodzie. Młode foki obrączkowanej i foki szarej rodzą się na lodzie pod koniec zimy (przełom lutego i marca), a dopiero po kilku tygodniach wchodzą do morza. Ciąża u fok trwa około 11 miesięcy i zwykle rodzi się jedno szczenię. Pokarm fok stanowią głównie ryby, chociaż nie gardzą one również skorupiakami i mięczakami. Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat liczebność fok w Bałtyku zmniejszyła się tak drastycznie, że zagroziło to istnieniu gatunków zamieszkujących to morze. Populacja foki szarej, która jeszcze na początku XX wieku liczyła około 100 tys. osobników, została ograniczona do około 2000. Przyczyną tego była zdecydowana walka wydana fokom przez rybaków, którzy widzieli w nich zagrożenie dla połowów ryb oraz zanieczyszczenie morza, wywołujące choroby i zaburzenia w rozmnażaniu. Obecnie sytuacja ulega nieznacznej poprawie i liczebność fok powoli, ale stale wzrasta. Populacja bałtyckiej foki szarej oceniana jest na około 6 tys., foki obrączkowanej na około 8 tys., a foki pospolitej na około 400 osobników.

Żyjący w Bałtyku morświn jest jednym z najmniejszych waleni (do około 180 cm długości i 65 kg masy ciała). Jak każdy morski ssak oddycha powietrzem atmosferycznym, zatem podczas srogich zim migruje w kierunku wolnych od lodu Morza Bełtów i Kattegatu. W rejonie cieśnin duńskich stwierdzono obecność ponad 8000 morświnów, podczas gdy na pozostałym, a więc prawie całym obszarze Bałtyku liczebność tego gatunku oszacowano na około 1000 osobników. Wydaje się jednak, że są to genetycznie izolowane populacje, zatem zagrożenie wyginięcia populacji związanej z Morzem Bałtyckim jest bardzo poważne.



Rys. 3.25 Ssaki bałtyckie (wg Żmudzińskiego 1990)



Rys. 3.26 Rejony występowania fok bałtyckich (wg Kautsky 1991)

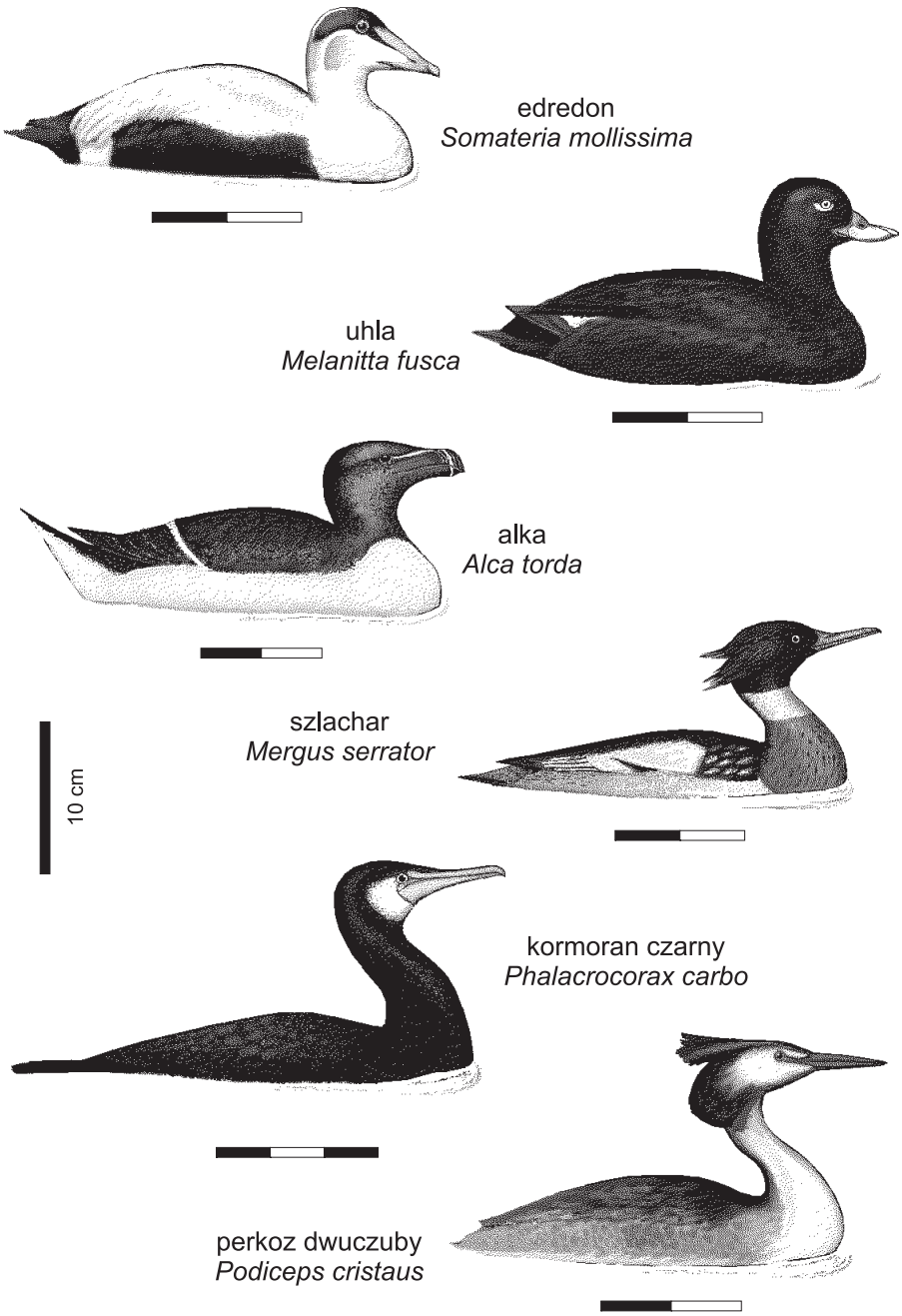
3.8 Ptaki

Wzdłuż wybrzeży Morza Bałtyckiego zamieszkuje ponad 30 gatunków ptaków wodnych. Charakterystycznymi mieszkańcami tych obszarów są:
– alki: alka krzywonosa (*Alca torda*), nurnik białoskrzydły (*Cepphus grylle*), nurzyk podbielały (*Uria aalge*);
– kaczki: edredon (*Somateria mollissima*), czernica (*Aythya fuligula*), ogorzałka (*A. marila*), lodówka (*Clangula hyemalis*), markaczka (*Melanitta nigra*), uhla (*M. fusca*), bernikla białolica (*Branta leucopsis*);
– tracze: szlachar (*Mergus serrator*), bielaczek (*M. albellus*);
– rybitwy: popielata (*Sterna paradisaea*), zwyczajna (*S. hirundo*), wielkodzioba (*S. caspia*), czubata (*S. sandvicensis*);
– mewy: srebrzysta (*Larus argentatus*), żółtonoga (*L. fuscus*), siodłata (*L. marinus*), pospolita (*L. canus*), śmieszka (*L. ridibundus*);
– siewkowce: krwawodziób (*Tringa totanus*), brodziec piskliwy (*Actitis hypoleucos*), biegus zmienny (*Calidris alpina*);
– nury: rdzawoszyi (*Gavia stellata*), czarnoszyi (*G. arctica*);
– perkozy: rogaty (*Podiceps auritus*);
– pełnopłetwe: kormoran czarny (*Phalacrocorax carbo*).

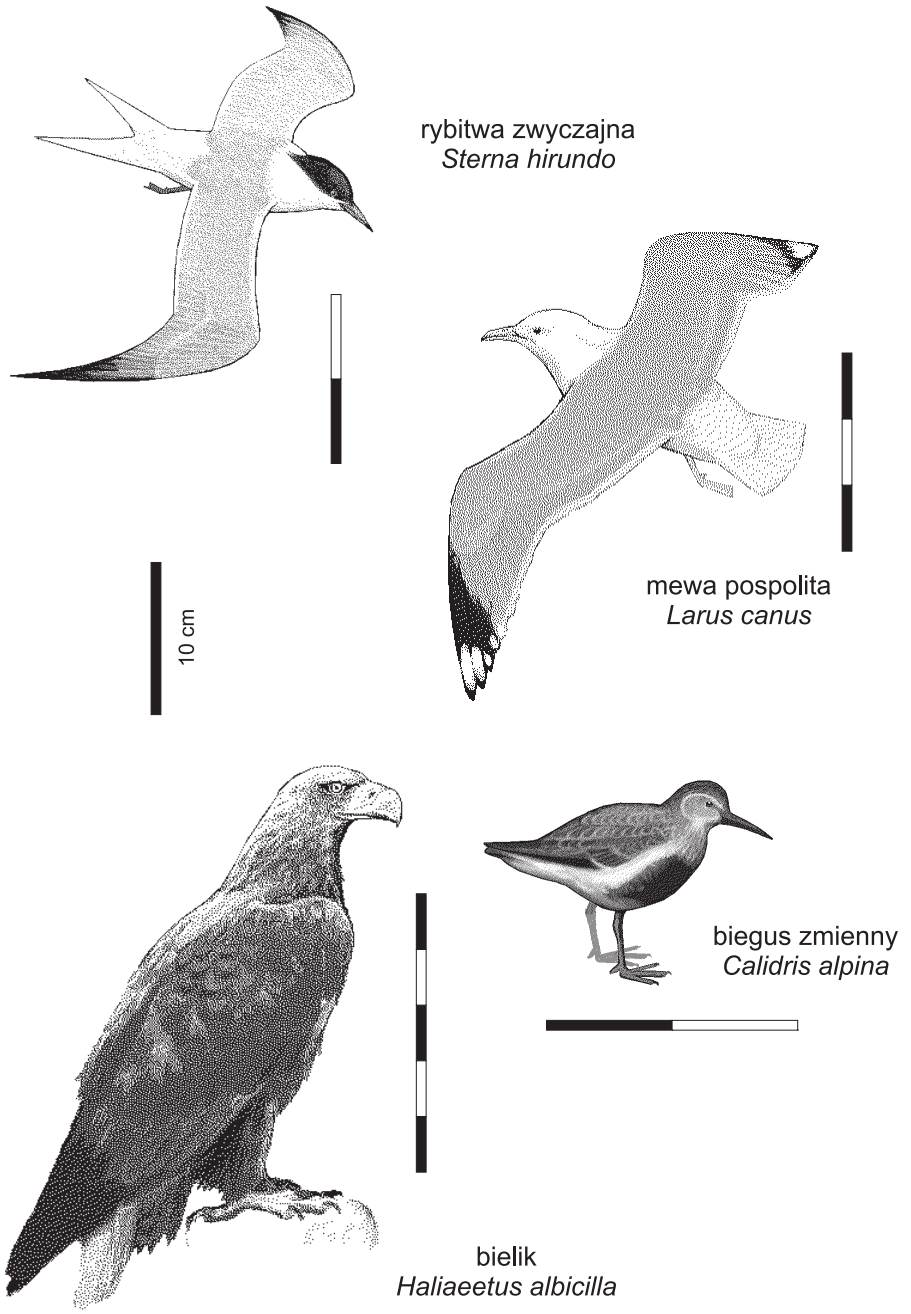
Za najbardziej morskie wśród bałtyckich ptaków uważane są alki gnieżdżące się na małych wyspach i stromych skałach Bałtyku. Szereg gatunków morskich kaczek gnieździ się na wybrzeżach morskich i w rejonach ujść rzecznych (edredon, markaczka, uhla), czy też na wybrzeżach nadbałtyckich jezior i innych zbiorników wód słodkich (czernica, ogorzałka, lodówka). Mewy gnieżdżą się bądź na wybrzeżu, bądź jak mewa śmieszka w dużych koloniach w głębi lądu. Większość nadbałtyckich ptaków to wędrowcy (kaczki, rybitwy). Gnieżdżą się zwykle na północy Europy (uhla, markaczka) lub nawet dalej, na obszarach arktycznych (lodówka, bielaczek), na zimę kierując się w cieplejsze rejony Bałtyku.

Zakres wędrówek ptaków częściowo osiadłych (alki, mewy) jest znacznie mniejszy. Skaliste, niedostępne wybrzeża i przybrzeżne akweny to miejsca, gdzie bytują pojedyncze pary (nurnik białoskrzydły), ale i kilkutysięczne kolonie (alka krzywonosa, rybitwa popielata). Ptakami pojawiającymi się na plaży, głównie podczas przelotów są, przede wszystkim biegus zmienny, krwawodziób i brodziec piskliwy oraz wiele innych gatunków również należących do siewkowców. Największymi ptakami gnieżdżącymi się nad Bałtykiem są kormoran czarny (*Phalacrocorax carbo*), bielik (*Haliaeetus albicilla*) i łabędź niemy (*Cyngus olor*). Po okresie drastycznego spadku liczebności bielika i kormorana, wywołanego tak skutkami zanieczyszczenia środowiska, jak i świadomym tępieniem, ścisła ochrona spowodowała, że liczba tych ptaków wyraźnie wzrosła. Nowym gatunkiem, gniazdującym nad Bałtykiem, który w ostatnich latach znalazł tu korzystne warunki rozwoju jest gęś – bernikla białolica.

Pokarm bałtyckich ptaków morskich zależny jest od ich umiejętności nurkowania. Ptaki doskonale nurkujące (kaczki i alki) posiadają szeroki wachlarz pokarmowy. W zależności od gatunku odżywiają się mięczakami, skorupiakami, wieloszczetami, także rybami i roślinami. Ptaki nienurkujące (mewy i rybitwy) odżywiają się głównie rybami, chociaż owady, skorupiaki, jaja innych ptaków urozmaicają ich dietę, a mewy nie gardzą także odpadkami.



Rys. 3.27 Ptaki bałtyckie (wg Sokołowskiego 1972, Żmudzińskiego 1990)



Rys. 3.28 Ptaki bałtyckie (wg Sokołowskiego 1972, Żmudzińskiego 1990)

Rys. 3.29 Najważniejsze zimowiska ptaków bałtyckich (wg HELCOM 1996)

Ocenia się, że w rejonie Morza Bałtyckiego zimuje około 9 mln ptaków morskich przybywających tak z terenów arktycznych, jak i migrujących wzdłuż Bałtyku. Lodówki, edredony, uhle i markaczki stanowią około 70 % tej liczby. Zimowiska te nie są równomiernie rozmieszczone wzdłuż wybrzeży, ani też równomiernie zasiedlone. Zlokalizowano 39 ważnych obszarów zimowania z czego 10 daje schronienie aż 70 % ptaków. Najważniejsze i największe z nich to:

– płytkie zatoki i estuaria zachodnich wybrzeży Polski i wschodnich Niemiec – zimuje tam około 1 mln ptaków, głównie bielaczek, ogorzałka, czernica;
– płytkie wody Zatoki Pomorskiej pomiędzy Niemcami a Polską – obszar, gdzie zimuje około 1,3 mln ptaków, przede wszystkim uhla, perkoz rogaty, lodówka, nurnik białoskrzydły;
– piaszczyste i żwirowe ławice wzdłuż wybrzeży Estonii i Łotwy w Zatoce Ryskiej – zimuje tam około 1,5 mln ptaków, głównie nury (nur rdzawoszyi), lodówka, uhla, nurnik białoskrzydły;
– północno-zachodnia część Kattegatu – gdzie zimuje około 1,2 mln ptaków, z których najważniejsze to edredon, alka krzywonosa, perkoz rdzawoszyi, markaczka.

Wśród zimowisk jako szczególnie ważne, ze względu na obecność ptaków morskich, zakwalifikowano wzdłuż wybrzeży Danii – 42 rejony, Niemiec – 23, Polski – 15, Rosji – 2, Litwy – 2, Łotwy – 6, Estonii – 5 i Finlandii – 22 obszary.

Rozdział 4

Zanieczyszczenia

Eugeniusz Andrulewicz, Maria Szymelfenig, Jacek Urbański

Zanieczyszczenie to wprowadzenie do środowiska morskiego substancji lub energii szkodliwych dla żywych zasobów morza, stanowiących niebezpieczeństwo dla zdrowia człowieka, utrudniających prowadzenie działalności związanej z morzem, pogarszających jakość wody morskiej oraz pomniejszających walory rekreacyjne morza.

4.1 Eutrofizacja

Substancje biogeniczne są niezbędnym elementem w ekosystemie, a ich brak powoduje zahamowanie wzrostu i rozwoju roślin. Jednakże nadmierne lub niezbilansowane koncentracje któregoś z podstawowych pierwiastków lub związków biogenicznych wpływają na zachwianie równowagi ekosystemu. Zjawisko polegające na wzbogaceniu zbiornika wodnego w substancje odżywcze nazywane jest eutrofizacją. Może ona być wynikiem procesów naturalnych (np. pożar lasu i użyźnienie popiołem najbliższego akwenu) bądź skutkiem działalności człowieka (dopływ głównie związków azotu i fosforu jako rezultat aktywności gospodarczej). Obecnie termin eutrofizacja jest bardzo często używany w zawężonym znaczeniu w celu opisania przeżyźnienia wód, wywołanego jedynie działalnością człowieka.

Obecność substancji odżywczych sama w sobie nie decyduje o poziomie eutrofizacji. Relacje ilościowe pomiędzy podstawowymi pierwiastkami występującymi w żywych organizmach są mniej więcej stałe. W materiale roślinnym na 16 atomów azotu przypada 1 atom fosforu (N:P=16:1). Jeśli przedstawi się to w proporcji masy, to na 7 części wagowych azotu potrzeba 1 część fosforu. W morzu azot i fosfor występują w związkach organicznych stanowiących składnik martwej materii organicznej oraz w związkach nieorganicznych: azot w amoniaku, azotynach i azotanach, fosfor w fosforanach. Rośliny mogą pobierać te dwa pierwiastki głównie w postaci rozpuszczonych w wodzie jonów nieorganicznych związków azotu i fosforu. Jeżeli ich wzajemny stosunek nie jest optymalny (N:P = 16:1), to nawet przy ogromnej nadwyżce któregoś pierwiastka, następuje ograniczenie produkcji roślinnej.

Większość obszarów bałtyckich charakteryzuje się nadwyżką fosforu, zatem czynnikiem ograniczającym rozwój glonów i roślin naczyniowych jest azot. Jednakże niektóre sinice, przyswajając azot cząsteczkowy z atmosfery, potrafią kompensować brak rozpuszczonych w wodzie nieorganicznych związków azotu i rozwijać się bardzo dobrze w tych warunkach. Limitacja przez fosfor odgrywa bardzo ważną rolę w północnym rejonie Zatoki Botnickiej i wschodnim Zatoki Ryskiej oraz lokalnie na pozostałych obszarach. Krzem jak dotąd nie stanowi czynnika ograniczającego produkcję pierwotną, choć jest znacznie zużywany podczas intensywnych wiosennych zakwitów okrzemek.

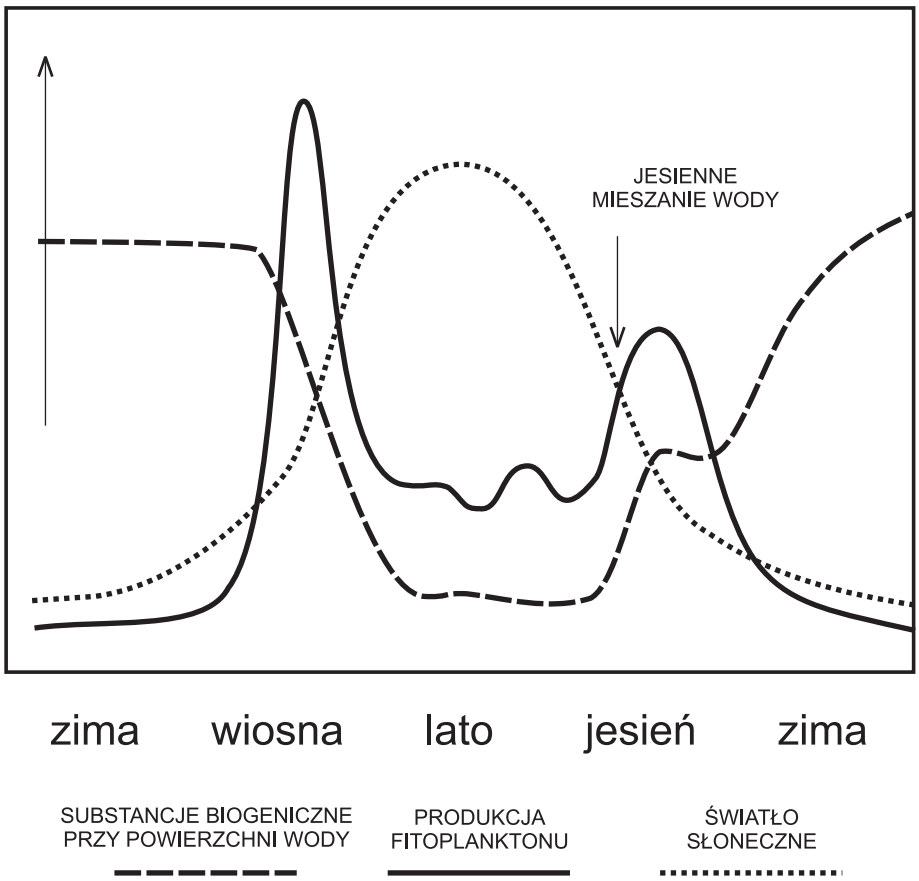
Poziome rozmieszczenie substancji biogenicznych w warstwie eufotycznej podczas okresu zimowego (tj. przed regionalnie zróżnicowanym początkiem wiosennego zakwitu) nie jest równomierne. Stężenie azotu z wysokiego poziomu 6–9 μmol dm^{-3} w Kattegacie i Morzu Bełtów spada wzdłuż przekroju przez Głębię Bornholmską i Basen Gotlandzki do około 4 μmol dm^{-3}, podczas gdy stężenie fosforu jest raczej jednakowe i wynosi 0,6–0,9 μmol dm^{-3}. Najwyższe koncentracje substancji odżywczych notuje się w estuariach, wodach przybrzeżnych i rejonach upwellingów.

Pionowy rozkład koncentracji substancji odżywczych zależy od regionalnych warunków hydrologicznych. Generalnie halokliny są także „biogenoklinami", oddzielającymi wody powierzchniowe z niższą koncentracją substancji biogenicznych od wód przydennych bogatych w te substancje. Z faktu, że dekompozycja i mineralizacja dużej części materii przebiegają głównie w głębszych, przydennych warstwach wody i osadu, środowiska te stanowią rezerwuar substancji odżywczych. Jednakże w warunkach beztlenowych, przy udziale bakterii, przebiegają reakcje chemiczne, których ostatecznym produktem jest azot cząsteczkowy. Pierwiastek ten, mimo że unosi się do warstwy eufotycznej, z powodu występowania w formie nieprzyswajalnej przez rośliny, jest dla nich bezużyteczny. Natomiast środowisko beztlenowe podnosi stężenie fosforanów w wodzie.

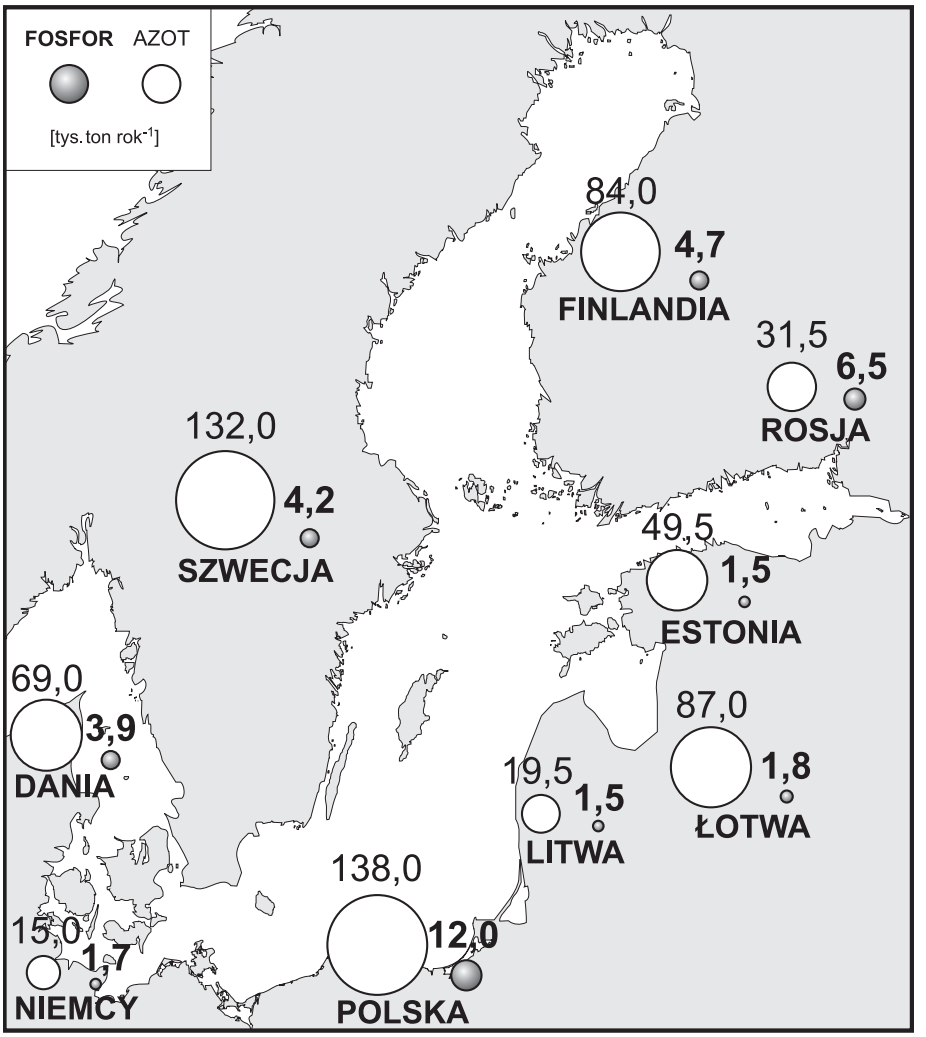
Sezonowe zróżnicowanie stężenia substancji odżywczych warunkuje roczny cykl rozwoju fitoplanktonu. Przebieg rozwoju fitoplanktonu jest podobny na całym obszarze Bałtyku. Charakteryzuje się on intensywnym, lecz krótkotrwałym wiosennym szczytem zakwitu okrzemek, po którym, poczynając od połowy lata aż do jesieni, następują zakwity innych glonów. Po wiosennym zakwicie stężenie substancji biogenicznych w wodzie znacznie spada. Ten niski poziom, z powodu letnich, słabych, pionowych ruchów wody, jest utrzymywany aż do jesieni. Jesienią, dzięki mieszaniu wody, wynoszone z jej przydennych warstw, zregenerowane substancje odżywcze wzbogacają strefę eufotyczną. Dopływ ten jest na tyle duży, że mniej intensywna niż wiosenna, jesienna produkcja nie powoduje wyczerpania substancji biogenicznych. Zimowe zahamowanie produkcji pierwotnej (za mało światła i zbyt niska temperatura) umożliwia pełne zregenerowanie zapasu substancji odżywczych w strefie eufotycznej.

Substancje odżywcze dostają się do Bałtyku z różnych źródeł, którymi są:
– lądowe źródła punktowe (kolektory zrzutowe z zakładów przemysłowych i rolniczych oraz oczyszczalni ścieków);
– lądowe źródła rozproszone (tereny rolnicze i leśne, odpływ z kanalizacji ulicznej miast);
– dopływ z atmosfery;
– uwalnianie z osadów morskich.

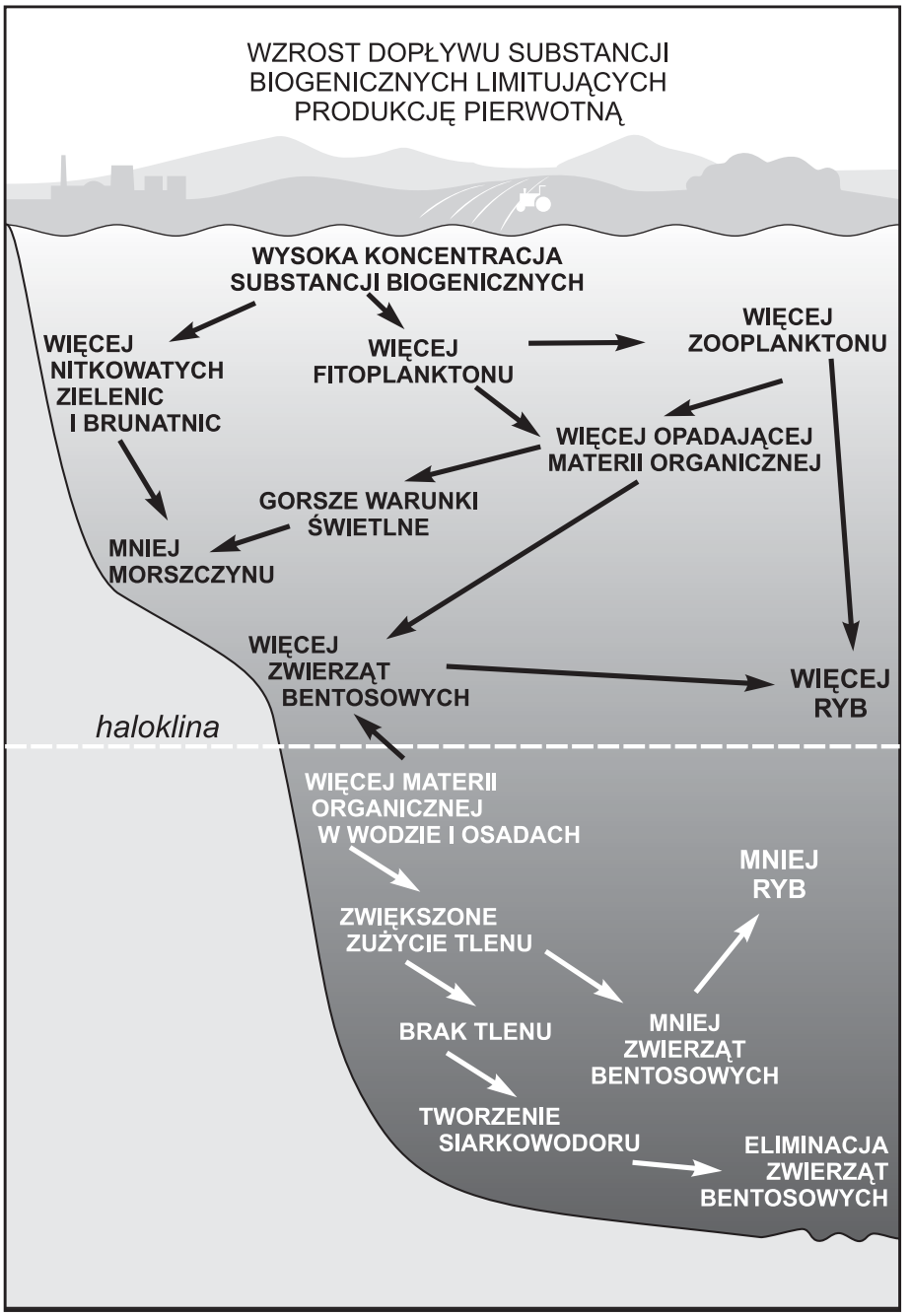
Około połowa całkowitej ilości azotu i około 10 % fosforu dostaje się do morza z atmosfery, a pozostała część drogą wodną. W bieżącym stuleciu wzrost ilości substancji biogenicznych w Morzu Bałtyckim nastąpił przede wszystkim z powodu nadmiernego:



Rys. 4.1 Roczny cykl produkcji fitoplanktonu i zmiany stężenia substancji biogenicznych w powierzchniowych wodach Bałtyku (wg Perrsona i Sellina 1994)



Rys. 4.2 Ładunki azotu i fosforu dostarczane przez państwa nadbałtyckie, dane z 1992 roku (wg HELCOM 1993)



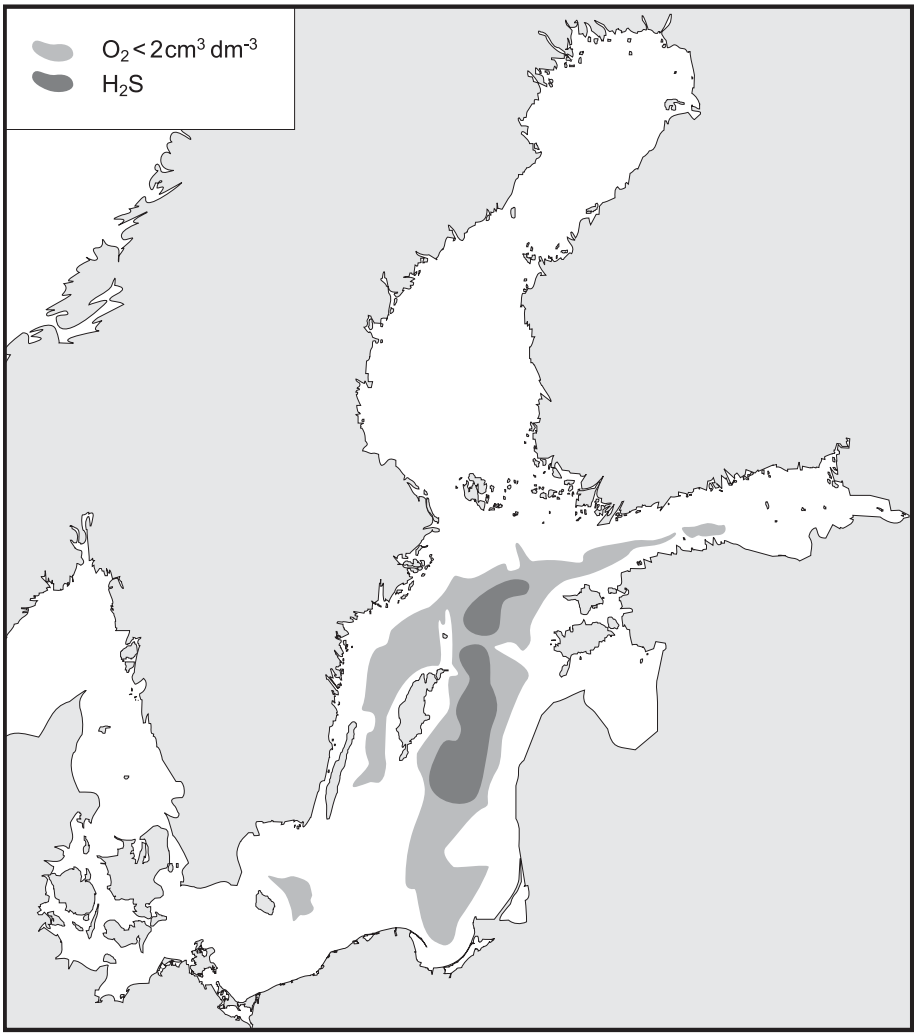
Rys. 4.3 Zmiany w Morzu Bałtyckim spowodowane eutrofizacją (wg Forsberga 1991, wg Furman i in.1993, zmienione)

– stosowania nawozów sztucznych,
– używania detergentów,
– spalania paliw organicznych (węgla, ropy naftowej, gazu, drewna).

Substancje biogeniczne dostające się z różnych źródeł do Bałtyku są związane przeważnie z działalnością człowieka. Z zakładów przemysłowych usuwane są powstające w procesie technologicznym produkty uboczne, z miast odprowadzane są mniej lub bardziej oczyszczone ścieki. Rolnictwo dostarcza substancji odżywczych poprzez stosowanie nawozów sztucznych, które nie zużyte przez rośliny lądowe, wypłukiwane z gleby przez deszcze, stale zasilają dopływ rzeczny. Również hodowla zwierząt (tak wielkie pastwiska, jak i ogromne gospodarstwa hodowlane) stanowi duży ładunek substancji odżywczych, a emitowany z pastwisk i gnojowników amoniak przenoszony jest z wiatrem w odległe rejony. Ingerencja człowieka na obszarach leśnych (nawożenie i wycinanie dużych zadrzewionych terenów) także powoduje zachwianie bilansu substancji biogenicznych, których nadmiar ostatecznie przechodzi do Bałtyku. Związki azotu wytwarzane są w czasie spalania paliw (węgiel, ropa naftowa, gaz, drewno) w fabrykach, elektrowniach, ciepłowniach. Również środki transportu (samochody, statki, samoloty) dostarczają azotu. Gromadzące się przez wiele lat w osadach dennych substancje biogeniczne mogą również zostać uwolnione do warstw przydennych wody i następnie wyniesione ku warstwom powierzchniowym. Aby wynoszenie substancji odżywczych wystąpiło na terenach poniżej halokliny, konieczne są wlewy cięższej, słonej wody z Morza Północnego. W akwenach płytszych proces ten uruchamiany jest przez silne i długotrwałe falowanie sztormowe.

Fakt, że głównym dostarczycielem substancji biogenicznych do morza jest ląd, powoduje, że najczęściej i najszybciej skutki eutrofizacji obserwuje się w strefie przybrzeżnej morza. Jednak strefa ta ze względu na możliwość dobrego natleniania (dzięki pełnemu mieszaniu wody przez sztormy) ma największe potencjalne możliwości neutralizowania negatywnych skutków eutrofizacji. Zalegające na większych głębokościach beztlenowe masy wody, stanowią stale uzupełniany magazyn w różnym stopniu zdegradowanej materii organicznej, produkujący coraz większe ilości siarkowodoru.

Rozważając problem eutrofizacji należy mieć na uwadze fakt, że jest to zjawisko wywołujące tak pozytywne, jak i negatywne skutki. W przyrodzie zmiany warunków sprzyjające jednym jej elementom bardzo często są szkodliwe dla innych. Ważne jest zatem zachowanie równowagi w środowisku, umożliwiającej harmonijny rozwój wszystkich jego mieszkańców. Pamiętać też należy, że wszystkie zjawiska przebiegają nie tylko w przestrzeni, ale również i w czasie. To co jest pożyteczne lokalnie i dzisiaj, może przy przekroczeniu progu bezpieczeństwa okazać się bardzo szkodliwe nawet dla całego zbiornika w nieodległej przyszłości.



Rys. 4.4 Obszary dna bałtyckiego okresowo bądź stale pozbawione tlenu, dane z 1990 roku (wg Sjöberga 1992)

Zmiany w środowisku spowodowane eutrofizacją to przede wszystkim:
– zwiększenie obszarów i intensywności zakwitów fitoplanktonu,
– wzrost produkcji pierwotnej,
– wzrost biomasy zooplanktonu,
– spadek przezroczystości wody,
– zmniejszenie zasięgu występowania glonów osiadłych i roślin kwiatowych,
– zwiększenie dopływu materii organicznej i jej depozycji w osadach dennych,
– zwiększenie produkcji wtórnej: zoobentosu i ryb na obszarach dna i w toni wodnej powyżej holokliny,
– wzrost częstotliwości i powiększanie się obszarów z okresowym lub stałym brakiem tlenu,
– obniżenie produkcji wtórnej: zoobentosu i ryb na obszarach dna i w toni wodnej poniżej holokliny,
– zmiana składu gatunkowego zbiornika – obniżenie stopnia jego bioróżnorodności.

Najszybciej na wzbogacenie w substancje odżywcze reaguje fitoplankton. Przy sprzyjających warunkach atmosferycznych (nasłonecznienie i temperatura) produkcja szybko wzrasta i obejmuje coraz rozleglejsze obszary morza. W efekcie uzewnętrznia się to w postaci pojawienia się na powierzchni morza „kożucha"– warstwy składającej się z żywych i obumierających glonów. Pozytywnym tego skutkiem jest obfity pokarm dla roślinożernego zooplanktonu. Zwiększenie biomasy zooplanktonu i zoobentosu stwarza z kolei korzystne warunki dla odżywiających się nimi ryb. Niestety zooplankton, tak jak i inni konsumenci, nie jest w stanie spożyć tej pojawiającej się gwałtownie obfitości pokarmu. Skutkiem tego ogromne ilości obumierającego fitoplanktonu opadają na dno, gdzie stanowią pokarm dla odżywiającego się martwą materią organiczną zoobentosu. Również ta grupa organizmów nie ma możliwości zużycia nadmiaru pokarmu, co powoduje, że niewykorzystana martwa materia organiczna zalega na dnie. W procesach bakteryjnego rozkładu materii organicznej zużywany jest tlen. W płytkich akwenach odbudowa zasobów tlenu możliwa jest dzięki jego dopływowi z atmosfery (intensywne natlenianie wody podczas sztormów), a także procesowi fotosyntezy, podczas którego jest on wytwarzany. Natomiast w rejonach głębszych, gdy zużycie tlenu w procesie oddychania i mineralizacji materii organicznej przeważa nad natlenianiem wody, mogą wystąpić okresowe bądź stałe deficyty tlenowe. Tam, gdzie z braku tlenu ustaje tlenowy rozkład materii organicznej, pojawiają się bakterie siarkowe. W przeprowadzanym przez nie procesie rozkładu ostatecznym produktem jest siarkowodór. Na skutek tego mieszkające na dnie zwierzęta giną z powodu braku tlenu i zatrucia siarkowodorem. Brak zwierząt dennych wyklucza z kolei zjawisko bioturbacji, tzn. przewietrzania osadu przez przemieszczające się organizmy zoobentosowe, które mieszają osad i drążą w nim kanały ułatwiając przenikanie tlenu do głębszych warstw. Te niekorzystne, wywołane brakiem tlenu, zjawiska występują głównie poniżej halokliny. Wlewy dobrze natlenionej, o większej gęstości oceanicznej wody z Morza Północnego są rzadkie i często nie dochodzą do największych głębi Morza Bałtyckiego. Zalegająca tam bardziej słona, „cięższa" woda ma niewielkie możliwości natlenienia. Ocenia się, że około $100000\,\mathrm{km}^2$ obszaru głębokiego dna jest okresowo całkowicie pozbawione tlenu.

Znaczny wzrost biomasy mikroglonów oraz wywołana tym zwiększona sedymentacja martwej materii powodują obniżenie przejrzystości wody. Na skutek tego zmniejsza się zasięg penetracji światła w toni wodnej. W szczególnie zanieczyszczonych miejscach

Tab. 4.1 Niektóre toksyczne i potencjalnie toksyczne gatunki fitoplanktonu występujące w Bałtyku

Sinice *Cyanophyceae* = *Cyanobacteria* = *Cyanoprokaryota*	*Nodularia spumigena*
	Aphanizomenon flos-aquae
	Anabaena cylindrica
	Anabaena lemmermannii
	Anabaena spiroides
	Planktothrix agardhii
	Microcystis aeruginosa
	Coelosphaerium kuetzingianum
Bruzdnice *Dinophyceae*	*Dinophysis acuminata*
	Dinophysis norvegica
	Dinophysis acuta
	Prorocentrum balticum
	Prorocentrum minimum
	Scrippsiella trochoidea
	Gyrodinium aureolum
	Alexandrium spp.
Okrzemki *Diatomophyceae*	*Chaetoceros danicus*
	Chaetoceros borealis
	Chaetoceros decipens
	Pseudonitzschia pungens
	Pseudonitzschia pseudodelicatissima
Złotowiciowce *Chrysophyceae*	*Chrysochromulina polylepis*
	Prymnesium parvum
	Dictyocha speculum

przezroczystość spada do kilku metrów a nawet mniej. W ten sposób zostaje ograniczona możliwość rozwoju osiadłych makorglonów i roślin kwiatowych. Podwodne łąki takich roślin jak popularny w Bałtyku morszczyn (*Fucus vesiculosus* i *Fucus serratus*) czy trawa morska (*Zostera marina*) zawsze stanowiły dogodne siedlisko dla wielu bezkręgowców, narybku i młodych ryb. Obecnie coraz częściej rośliny te wypierane są przez szybko rosnące, mniej wymagające, słabo przytwierdzone, a często swobodnie unoszone przez wodę nitkowate zielenice (*Chlorophyceae*) i brunatnice (*Ectocarpaceae*). Kilkumetrowe płaty tych gnijących glonów gęsto pokrywają dno i powodują powstawanie deficytów tlenowych i w konsekwencji obumieranie bentosowej fauny. Wyrzucone na brzeg, rozkładające się zwały glonów zanieczyszczają plaże.

Osobnym problemem jest coraz częstsze pojawianie się toksycznych zakwitów fitoplanktonu. W Bałtyku zanotowano około 30 gatunków glonów wytwarzających toksyny. Zakwity występują głównie latem. Tworzą je przede wszystkim sinice. Wysoka temperatura i zdolność wiązania azotu cząsteczkowego przez niektóre sinice (przy niedoborach azotu w postaci jonowej, ograniczającego rozwój glonów), umożliwiają im intensywny wzrost. Toksyny wywołują choroby i śmierć bałtyckich ryb, ptaków i ssaków oraz bezkręgowców. W rejonach wysłodzonych, gdzie wodę bałtycką piją dzikie i domowe zwierzęta, skutki toksycznego działania przenoszą się na ląd. Toksyny stanowią poważne zagroże-

nie dla zdrowia ludzi. Powodują choroby układu pokarmowego i nerwowego, bóle głowy, stany zapalne oczu i także alergie. Są niebezpieczne nie tylko podczas kąpieli, ale mogą oddziaływać również w rejonie plaży, gdyż są unoszone wraz z aerozolami.

Postępująca eutrofizacja powoduje zmiany w składzie gatunkowym zespołów organizmów zamieszkujących zbiornik. Powszechnym zjawiskiem jest zastępowanie gatunków wrażliwych na niekorzystne zmiany środowiska przez gatunki odporne na te zmiany. Można to wyraźnie zaobserwować właśnie wśród fitoplanktonu, gdzie toksyczne glony, do tej pory pojawiające się w niewielkich ilościach, ostatnio coraz częściej osiągają masowy rozwój. Również wśród fitobentosu glony nitkowate zastąpiły glony o plesze liściokształtnej. Wiele drobnych zwierząt i ryb wraz ze zniknięciem podwodnych łąk straciło swoje miejsca bytowania i rozrodu. Ograniczenie zasięgu występowania wielu gatunków roślin i zwierząt obniżyło także stopień bioróżnorodności poszczególnych rejonów Bałtyku. Nie jest to jednak równoznaczne z obniżeniem biomasy organizmów, ponieważ często mało zróżnicowane zespoły produkują dużą biomasę.

Szacuje się, że w XX wieku produkcja pierwotna w Bałtyku wzrosła o około 30–70 %, produkcja zooplanktonu o około 25 %, produkcja zoobentosu (na obszarach dna powyżej holokliny) podwoiła się, a wydajność połowowa ryb zwiększyła się 10-krotnie. Należy jednak stwierdzić, że o zwiększonej wydajności połowowej zdecydowały nie tylko pozytywne skutki eutrofizacji, lecz także doskonalsze techniki połowowe i drastyczny spadek liczebności fok. Niestety eutrofizacja wywołuje również negatywne skutki dla ryb. Szczególnie niekorzystnie przedstawia się sytuacja w przypadku dorsza, ryby cennej z gospodarczego punktu widzenia. Pelagiczna ikra tego gatunku potrzebuje do swego rozwoju dobrze natlenionej wody o zasoleniu powyżej 11 PSU. Niestety, jest już coraz mniej obszarów spełniających te warunki, ponieważ cięższa, słona woda ma bardzo niską koncentrację tlenu lub jest go wręcz pozbawiona. Również zagrożona brakiem tlenu jest ikra płastug składana w głębszych partiach dna. Nitkowate glony także nie sprzyjają usytuowanym na płyciznach tarliskom śledzi. Z kolei obniżenie biomasy makrozoobentosu w rejonach dna poniżej holokliny uszczupliło znacznie bazę pokarmową ryb bentosożernych.

Ostatecznie, mimo zwiększonej produktywności populacji ryb, skutki eutrofizacji Bałtyku należy uznać za zjawisko negatywne. Szczególny niepokój budzi stale zwiększający się obszar dna pozbawiony tlenu i powiększające się tereny, gdzie stale obecny jest siarkowodór.

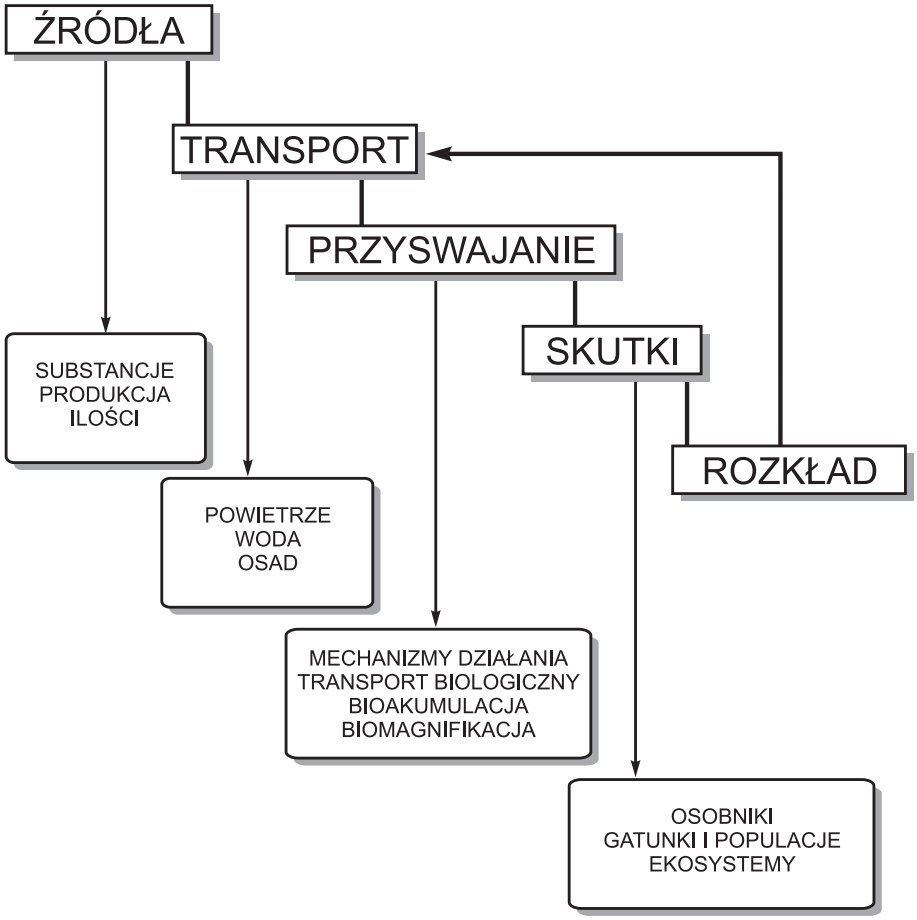
4.2 Trwałe substancje toksyczne

4.2.1 Występowanie trwałych substancji toksycznych w środowisku morskim

Spośród wielu substancji chemicznych, które przedostają się do środowiska morskiego, niektóre cechują się wysoką toksycznością i trwałością, a co za tym idzie, posiadają zdolność gromadzenia się w różnych składnikach środowiska. Wykazy tych substancji zazwyczaj obejmują:

– metale śladowe,
– węglowodory chlorowane,
– wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne,

– związki organiczne metali.



Rys. 4.5 Schemat łańcucha zanieczyszczeń chemicznych w środowisku morskim (wg Kihlströma 1991)

Zgodnie z wyżej przyjętą definicją, wykazy tych substancji nie obejmują wielu znanych związków toksycznych, takich jak siarkowodór (który powstaje w trakcie procesów beztlenowego rozkładu materii organicznej), lotne związki organiczne (chloroform czy czterochlorek węgla), lotne składniki ropy (benzen i jego pochodne), gazy bojowe zatopione w morzu, (które jednakże w większości ulegają rozkładowi do prostych związków nietoksycznych) i wiele innych substancji chemicznych.

Substancje toksyczne po przedostaniu się do morza podlegają wielu złożonym procesom natury fizycznej, chemicznej i biologicznej. Najprościej ujmując, podlegają one rozdziałowi pomiędzy wodę, osady i organizmy morskie. Trwałe substancje długo pozostają w środowisku i przenoszone są prądami na znaczne odległości.

Obecność trwałych związków chemicznych w morzu, według wielu ocen, stanowi główny problem w zanieczyszczeniu środowiska morskiego. Gromadzą się one w różnych tkankach roślin i zwierząt. Wraz z przyrostem masy ciała i starzeniem się organizmu ilość zmagazynowanych substancji szkodliwych wzrasta. Zjawisko to (określane mianem

„bioakumulacji") nie jest obojętne dla procesów życiowych organizmów i ekosystemów morskich.

4.2.2 Metale śladowe

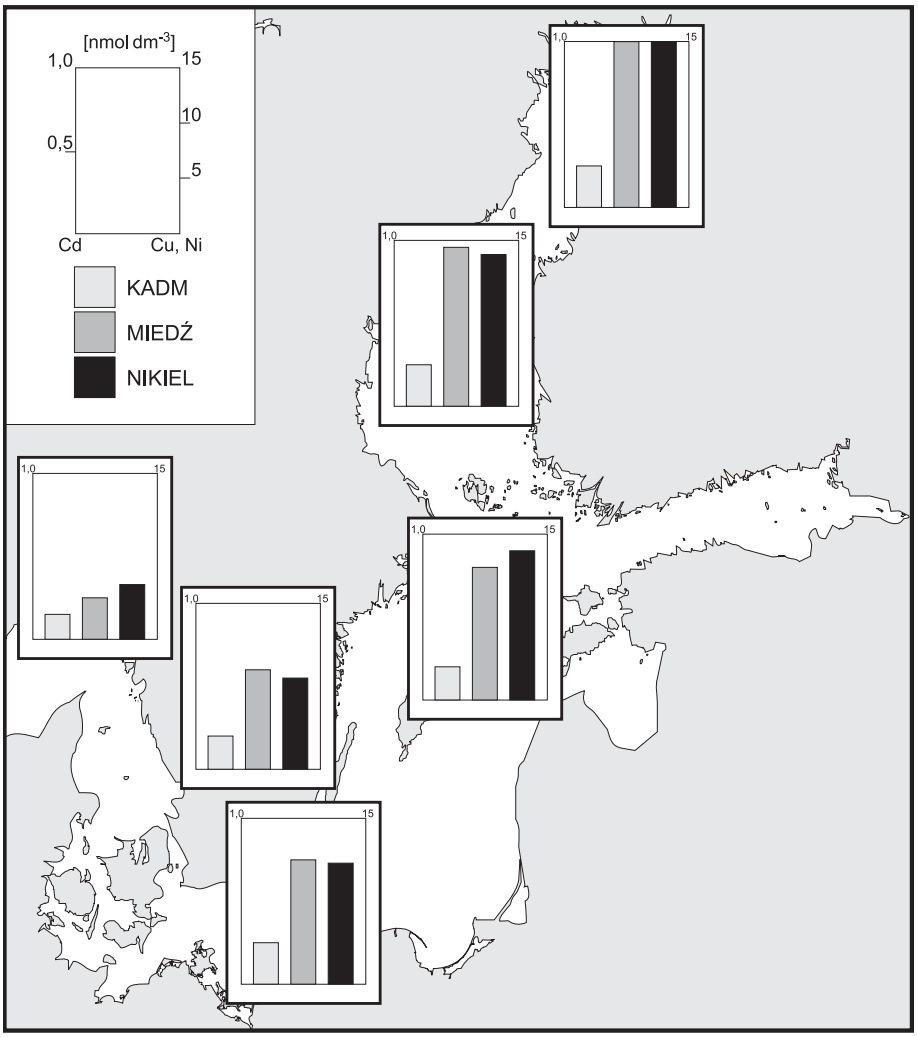
Wymienia się tu najczęściej: rtęć, ołów, kadm, cynk, miedź, nikiel, chrom. Metale śladowe są naturalnymi składnikami skorupy ziemskiej oraz wód morskich i śródlądowych. W wodach występują głównie w związkach chemicznych, rozpuszczonych lub zaadsorbowanych na zawiesinie, a także jako kompleksy metali. Poziom ich stężeń w wodach Bałtyku mieści się w dość szerokim zakresie, w zależności od rodzaju pierwiastka, od ułamków nanomola (np. w przypadku kadmu) do ponad dziesięciu nanomoli (w przypadku miedzi i niklu) w m^3. Dla organizmów wodnych najbardziej dostępną formą metali są ich postacie jonowe, jednakże niektóre organizmy mogą także przyswajać metale zaadsorbowane na cząsteczkach materii organicznej. Wpływ metali śladowych na życie w morzu jest zależny od wielu czynników: zasolenia, stężenia związków humusowych, a także od obecności innych metali. Im trwalej metal jest związany w kompleksach, tym trudniej jest dostępny, a tym samym mniej szkodliwy dla organizmów. Niektóre metale śladowe, takie jak cynk, miedź, kobalt, molibden i magnez są w małych ilościach konieczne do funkcjonowania organizmów, podczas gdy inne, takie jak rtęć, kadm i ołów, nie wydają się spełniać żadnej funkcjonalnej roli. Jednak wszystkie metale w wysokich stężeniach działają szkodliwie. Za szczególnie szkodliwe uważa się związki kadmu, rtęci, ołowiu, miedzi i cynku.

Głównymi źródłami emisji metali ciężkich do środowiska są: przemysł, spalanie śmieci, elektrownie i elektrociepłownie węglowe, a przypadku ołowiu również spalanie benzyny ołowiowej w silnikach samochodowych. Duże ilości metali w sposób naturalny wypłukiwane są z gleby. Intensywność wypłukiwania metali z gleby może być zwielokrotniona w wyniku zakwaszania gleby (jako skutek „kwaśnych deszczy"). Analizując osady laminarne (pochodzące z głębi bałtyckich, w których odbywa się niezakłócona akumulacja opadającej zawiesiny), stwierdzono, że wraz z intensyfikacją uprzemysłowienia nastąpiło systematyczne podwyższanie stężeń metali śladowych. Zawartości metali śladowych w osadach dennych są znacznie wyższe niż w wodzie. Wynika to z faktu, iż w osadach, szczególnie w osadach głębi bałtyckich, zachodzi ich akumulacja. Stężenia metali w osadach piaszczystych, zawierających mało materii organicznej, są znacznie niższe niż w osadach mulistych, zawierających dużo materii organicznej.

4.2.3 Węglowodory chlorowane

Węglowodory chlorowane to związki wytwarzane syntetyczne, które nie występują w sposób naturalny w środowisku przyrodniczym. Zazwyczaj są to związki zawierające w swej cząsteczce chlor lub brom. Poniżej wymienione są trudno rozkładalne węglowodory chlorowcopochodne, których obecność stwierdzono zarówno w wodzie i osadach, jak i w organizmach żywych:

– biocydy: DDT i pochodne, izomery heksachlorocykloheksanu (wśród nich najbardziej znany izomer γ-HCH–lindan), heksachlorobenzen (HCB), pentachlorofenol (PCP), chlorfenwinfos, endosulfan, atrazyna, symazyna, toksafen i inne;
– związki organiczne stosowane w przemyśle: polichlorowe bifenyle (PCB), polichlorowe trifenyle (PCT);



Rys. 4.6 Zawartość metali śladowych w powierzchniowych wodach Bałtyku (wg Sjöberga 1992)

– związki chemiczne powstające w trakcie różnych procesów przemysłowych i podczas spalania tworzyw sztucznych: pochodne chlorowcowe dibenzodioksyn, pochodne chlorowcowe dibenzofuranu, chlorowcowe pochodne naftalenu, chlorowcowe pochodne fenolu i inne.

Substancje te, z uwagi na swą trwałość, pozostają długo w środowisku morskim i wraz z prądami przenoszone są na duże odległości. Wraz z masami powietrza, dostają się w miejsca tak odległe od źródeł emisji, jak bieguny północny i południowy. Wieloletnie badania wykazały, że substancje te są rozmieszczone w wodach Bałtyku dość równomiernie i kumulują się we wszystkich składowych środowiska. W wodzie występują one w bardzo niskich stężeniach (rzędu 10^{-6}–10^{-15}g dm^{-3}), jednakże mogą osiągnąć stężenia niebezpieczne dla organizmów morskich, szczególnie tych, które znajdują się na szczycie piramidy troficznej. Ocenia się, że ich stężenia w organizmach z wyższych poziomów troficznych, mogą osiągać rząd wielkości 10^3–10^4 względem stężeń występujących na najniższych poziomach troficznych.

4.2.4 Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne

Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) są składnikami ropy naftowej, a także powstają w trakcie spalania paliw kopalnych – węgla kamiennego, ropy naftowej i produktów ropopochodnych. Najczęściej do środowiska morskiego dostają się wraz z gazami spalinowymi emitowanymi do atmosfery. Niektóre z nich są syntetyzowane podczas procesów biochemicznych, a niektóre (jak np.: pochodne dibenzotiofenu) są wytwarzane wyłącznie przez człowieka. Wśród tych związków najczęściej wymienia się: naftalen i jego pochodne alkilowe (np: 2-metylonaftalen, 2,6-dimetylonaftalen), antracen i jego pochodne benzenowe (np.: benzo(a)antracen), fenantren, fluoranten (np.: benzo(b)fluoranten), chryzen, piren i jego pochodne benzenowe (np.: benzo(a)piren). W środowisku występują one jako mieszaniny substancji o zróżnicowanym zachowaniu i stopniu toksyczności. Skład mieszanin jest bardzo zmienny, jako że substancje te podlegają ciągłym procesom biodegradacji (przez bakterie) i fotoutlenianiu.

Nie wszystkie WWA podlegają bioakumulacji. Najwięcej przypadków wysokich stężeń, stwierdzono w organizmach filtrujących zawiesinę. Ocenia się, że ryby mają zdolność metabolizowania niektórych WWA. Największy niepokój budzą właściwości mutaganne i kancerogenne wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych.

4.2.5 Związki organiczne metali

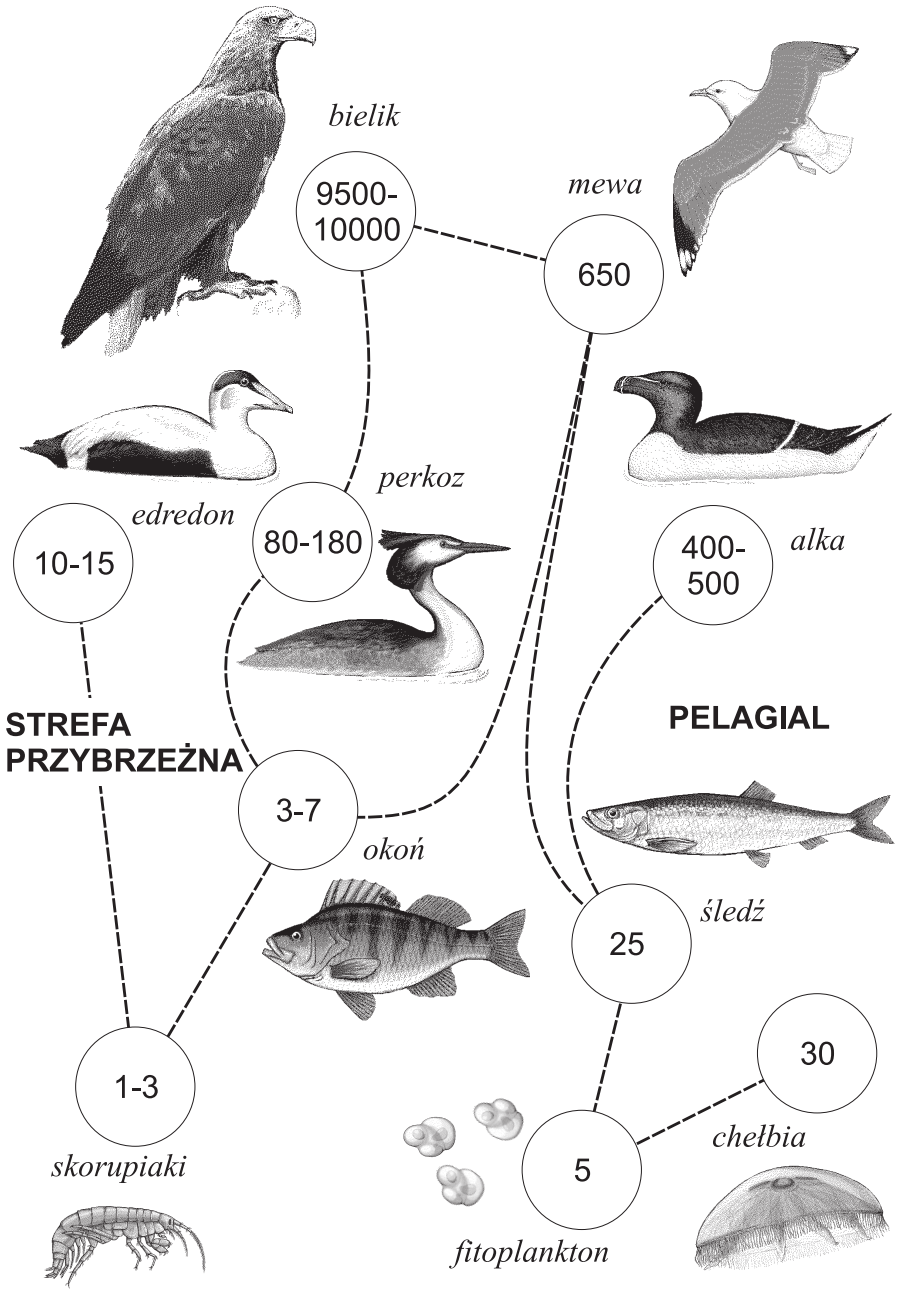
Najczęściej wymienia się tu związki organiczne rtęci (metylek rtęci) i związki organiczne cyny: trójbutylocyna (TBT) i trójfenylocyna (TFT). Związki organiczne cyny stosowane są w farbach i impregnatach, przede wszystkim jako związki antyporostowe.

4.2.6 Źródła dopływu substancji toksycznych do morza

Źródła dopływu substancji toksycznych do morza można podzielić na źródła punktowe (kolektory ścieków, kominy fabryczne) i źródła rozproszone (rolnictwo, transport). Rzeki dostarczają związków toksycznych pochodzących przede wszystkim z chemizacji rolnictwa (stosowania tzw. biocydów). Ścieki przemysłowe i komunalne, gazy fabryczne i spaliny samochodowe są głównym źródłem metali ciężkich oraz wielu toksycznych związków organicznych. Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne pochodzą z rozlewów olejowych na lądzie i morzu oraz z opadu atmosferycznego, głównie jako produkty spalania węgla kamiennego i paliw wyprodukowanych na bazie ropy naftowej. Skażenie Bałtyku następuje głównie na skutek dopływu substancji toksycznych z wodami rzecznymi, ściekami przemysłowymi i komunalnymi oraz poprzez atmosferę.

4.2.7 Metody oceny szkodliwości związków toksycznych

W warunkach laboratoryjnych można określić toksyczność ostrą substancji chemicznej. W odniesieniu do organizmów wodnych używa się wskaźników LC-50, co oznacza stężenie letalne (śmiertelne) dla 50 % badanych organizmów i LC-0, oznaczające stężenie maksymalne, nie wywołujące skutków śmiertelnych w czasie specyficznym dla poszczególnych gatunków. Skutków działania trucizny w warunkach laboratoryjnych nie można w sposób prosty i jednoznaczny przenieść na skutki działania w środowisku naturalnym.



Rys. 4.7 Bioakumulacja PCB $[\mu g\,kg^{-1}]$ w organizmach bałtyckich (wg Olssona i in. 1972)

Toksyczne działanie może być zmodyfikowane przez różne czynniki środowiskowe, takie jak temperatura, zasolenie, zawartość tlenu w wodzie czy inne warunki lokalne, zależy również od stadium rozwojowego organizmu oraz jego kondycji. Istotne jest, że substancje w stężeniu obecnym w środowisku nie powodują toksyczności ostrej, przez co ich działanie jest rozciągnięte w czasie, a zewnętrzne efekty są bardzo trudne do zaobserwowania. W wielu też przypadkach trudno jest ocenić toksyczność badanego czynnika, ponieważ niektóre substancje działają wspólnie (synergizm) lub też przeciwdziałają (antagonizm). Często też różne substancje wywołują podobne objawy. Zróżnicowana jest również podatność różnych tkanek i organów na kumulację substancji toksycznych.

Metody oceny toksyczności przewlekłej podobne są do metod oceny toksyczności ostrej, z tą różnicą, że stosuje się tu mniejsze stężenia i dłuższe czasy ekspozycji na działanie związku toksycznego oraz bardziej skomplikowane układy eksperymentalne zwykle w systemie przepływowym lub w tzw. „mesokosmosach" (sztucznych zbiornikach, w których odtwarza się fragment środowiska wodnego).

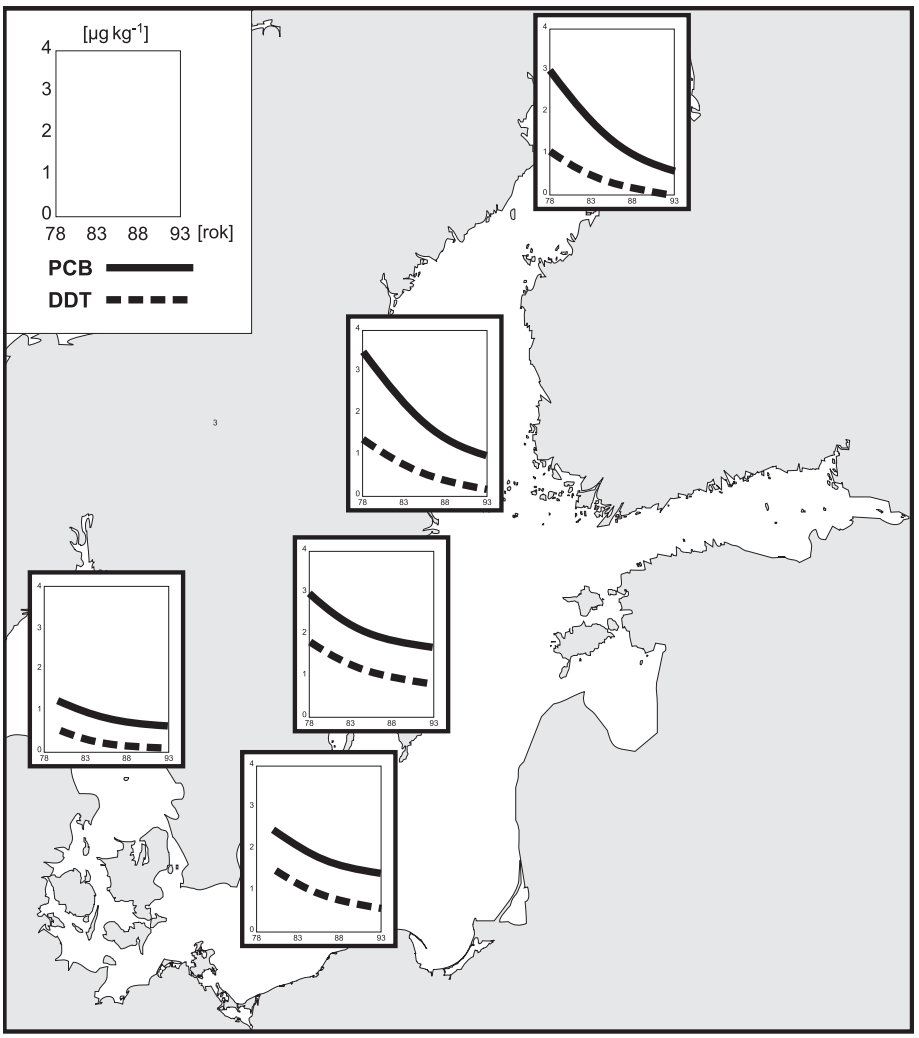
Metody oceny wpływu substancji chemicznych w bardzo wysokim rozcieńczeniu – jak w środowisku morskim – są bardzo skomplikowane i wymagają bardzo dobrej znajomości biochemii i fizjologii organizmów morskich. Skutki biologiczne trzeba też badać na różnych poziomach – funkcjonowania pojedynczego organizmu i całego ekosystemu.

4.2.8 Skutki obecności związków toksycznych w morzu

Działanie związków toksycznych obecnych w morzu jest ciągle słabo rozpoznane, głównie z uwagi na zróżnicowane reakcje organizmów na te zanieczyszczenia oraz trudności analityczne w ich oznaczaniu. Dotychczas wiadomo, że zespoły morskiej fauny dennej, mimo że zawierają pewne ilości tych związków, są w dobrej kondycji, a ryby bałtyckie nadają się do konsumpcji. Natomiast stopień bioakumulacji substancji toksycznych u zwierząt żywiących się głównie rybami, takich jak bielik czy foki, jest bardzo wysoki. Największe stężenia występują w tkankach zawierających dużo tłuszczu oraz w wątrobie, która jest „laboratorium detoksykacyjnym" każdego organizmu.

Wchłanianie substancji toksycznych przez organizmy żywe następuje w różny sposób. Glony jednokomórkowe pobierają je całą powierzchnią ciała, z kolei makrofity (glony wyższe i rośliny kwiatowe) przez organy pełniące funkcje korzeni, ale także ze względu na stałe zanurzenie w wodzie, również całą powierzchnią ciała. Zwierzęta pobierają substancje chemiczne głównie przez układ pokarmowy, oddechowy i skórę. Organizmy oddychające powietrzem atmosferycznym (ssaki i ptaki) adsorbują w płucach drobniutkie cząstki zanieczyszczeń. Generalnie jednak najwięcej substancji chemicznych dostaje się wraz ze spożywanym pokarmem.

Tylko te substancje, które są zdolne przeniknąć przez błony komórkowe są biologicznie dostępne. Biologiczna dostępność substancji chemicznych jest zatem bardzo ważną cechą i podnosi się ona wraz ze wzrostem rozpuszczalności substancji w wodzie lub w lipidach. Po wniknięciu do organizmu, część substancji toksycznych jest w procesach biochemicznych rozkładana do mniej szkodliwych metabolitów i wydalana. Niestety niektóre z nich, bardzo trwałe i trudne do usunięcia, gromadzą się w różnych tkankach i narządach.



Rys. 4.8 Zawartość PCB i DDT w tkance mięśniowej śledzi bałtyckich (wg HELCOM 1996)

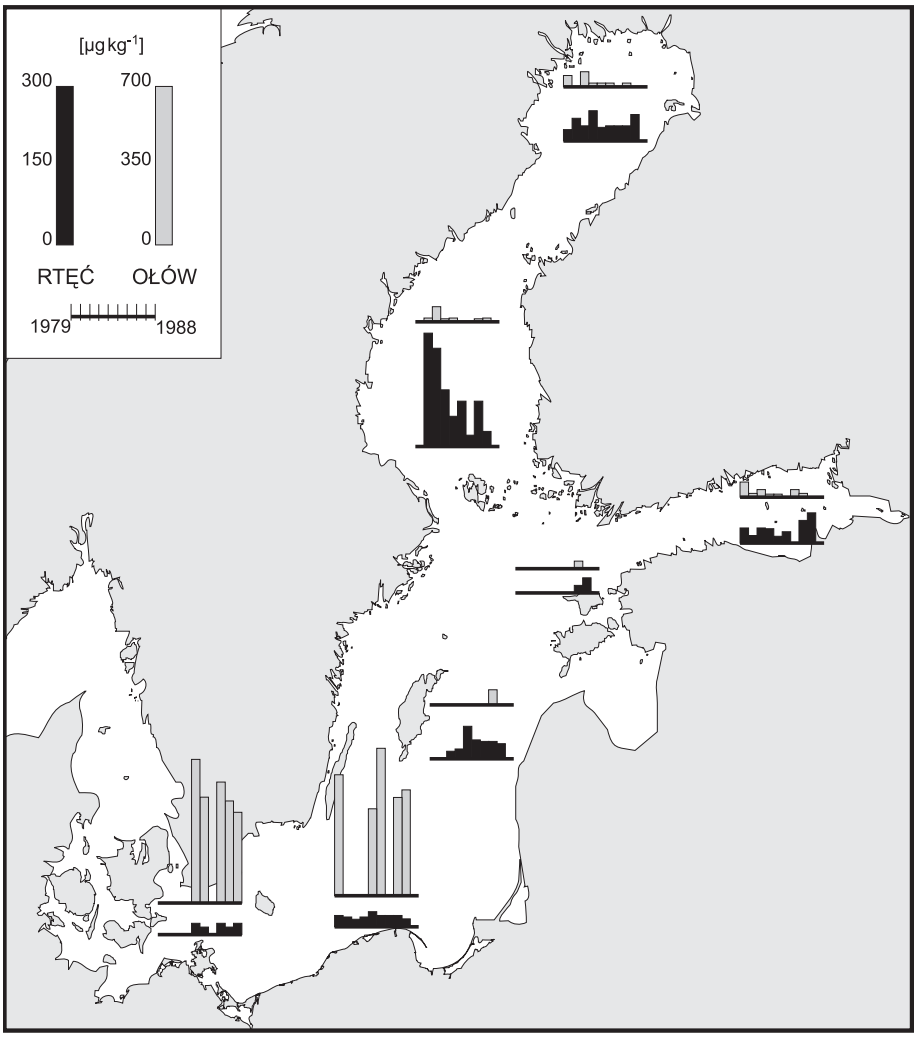
Substancje toksyczne mogą być adsorbowane na powierzchni różnych roślin wodnych: komórek fitoplanktonu, plech glonów, liści roślin wyższych. Utrudniają one przebieg naturalnych procesów zachodzących pomiędzy organizmami a środowiskiem. Niektóre substancje toksyczne, po przeniknięciu do wnętrza komórki, negatywnie wpływają na proces fotosyntezy hamując wytwarzanie chlorofilu lub opóźniając przyrost biomasy. Nawet jeśli nie wywołują one bezpośrednio widocznych szkodliwych efektów u fitoplanktonu, to właśnie te mikroskopijne, ale bardzo liczne organizmy intensywnie, biernie (adsorpcja na powierzchni komórki) bądź czynnie (wbudowywanie w struktury komórki) usuwają z wody największe ilości substancji toksycznych. Krótkożyjący (kilka godzin bądź kilka dni) fitoplankton przekazuje więc swoim konsumentom pewien ładunek trucizn, których działanie objawia się niekorzystnie dopiero na wyższych poziomach troficznych.

Różne sposoby odżywiania się zwierząt i zajmowane przez nich miejsce w sieci troficznej decydują o potencjalnym ładunku substancji toksycznych, jaki zwierzęta mogą otrzymać. Roślinożercy, filtratory, detrytożercy znajdujące się na niższych poziomach piramidy troficznej, pobierają bezpośrednio ze środowiska szkodliwe związki i gromadzą je w sobie, a następnie przekazują dalej swoim konsumentom. W ten sposób drapieżniki stojące na szczycie piramidy otrzymują wszystko to, co zostało pochłonięte przez kolejne ogniwa łańcucha pokarmowego. Ocenia się, że przy przejściu na wyższy poziom sieci troficznej ilość nagromadzonych substancji toksycznych zwiększa się 3–5 razy. Zjawisko takie nazywane jest biomagnifikacją.

Substancje toksyczne są przenoszone nie tylko z jednego gatunku do drugiego, ale również w obrębie tego samego gatunku z jednego pokolenia na drugie. Ciężarne samice morskich ssaków, poprzez krew, przekazują płodowi związki chemiczne. Również mleko ssaków stanowi istotną drogę transportu i przyczynia się do podwyższania poziomu trucizn w tkankach karmionych dzieci. U zwierząt składających jaja, ptaków i ryb, rozwijający się zarodek, który czerpie pokarm z wytworzonych przez samicę zapasów zmagazynowanych w postaci woreczka żółtkowego, może otrzymać tą drogą ładunki substancji toksycznych przekazanych z organizmu macierzyńskiego.

Osobnym problemem są zaburzenia związane z rozmnażaniem organizmów. Procesy reprodukcji i wzrostu są tak wrażliwe, że w wielu przypadkach nawet bardzo niska koncentracja substancji toksycznych wywołuje poważne komplikacje. Zazwyczaj wczesnym rezultatem zatrucia jest obniżenie wytwarzania, a nawet zanik hormonów płciowych. U ssaków (foki) powoduje to różne patologiczne zmiany narządów rodnych, zaburzenia ciąży lub bezpłodność. U niektórych gatunków ryb i ptaków koncentracja trucizn w jajach jest wystarczająco wysoka, aby spowodować śmierć zarodka. Przypuszcza się, że DDT i PCB, wpływając na gospodarkę wapniową ustroju, wywołują komplikacje podczas formowania się skorupek jaj ptaków. Skorupki stają się cieńsze i łamliwe, co kończy się rozbiciem jaj podczas wysiadywania. Nasilenie tego zjawiska stwierdzono u bielika, w wyniku czego istnienie jego populacji w rejonie Morza Bałtyckiego zostało zagrożone.

Bardzo niebezpieczne dla zwierząt są zaburzenia w funkcjonowaniu mięśni spowodowane obecnością substancji toksycznych. Zaobserwowano, że ptaki, u których stwierdzono wysokie stężenia DDT, PCB czy organicznych związków rtęci, mają trudności z lataniem. Wiąże się to osłabieniem zdolności zdobywania pokarmu, co nie tylko stanowi bezpośrednie zagrożenie ich życia, ale także rzutuje na możliwość wykarmienia przez nich potomstwa. Zaburzenia w przyswajaniu pokarmu, a zatem w prawidłowym budo-



Rys. 4.9 Zawartość ołowiu i rtęci w tkance mięśniowej śledzi bałtyckich (wg Backlunda i in. 1991, wg Furmana i in. 1995)

waniu mięśni u ptaków migrujących, objawia się utratą energii koniecznej do wędrówki, co nierzadko kończy się niemożliwością dotarcia na miejsce docelowe i ostatecznie śmiercią.

Wiele związków chlorowcopochodnych, np. dioksyny, PCB oraz przypuszczalnie i DDT, posiada właściwości obniżające odporność immunologiczną organizmu. Efektem ich działania był wyraźny spadek odporności ptaków na choroby bakteryjne i wirusowe, których przebieg był zwykle łagodny. Obniżenie lub zanik odporności jest, jak się wydaje, jedną z przyczyn spadku liczebności bałtyckich fok.

Objawiające się u kręgowców (ryb, ptaków i ssaków) zmiany chorobowe w postaci deformacji układu kostnego, zwyrodnień skóry, narządów wewnętrznych, zaburzeń funkcjonowania systemu odpornościowego i rozmnażania, zakłóceń pracy szeregu układów: pokarmowego, oddechowego, mięśniowego, nerwowego, nie mają charakteru lokalnego lecz obserwowane są w różnych rejonach Bałtyku. Mało ruchliwe, denne zwierzęta bezkręgowe mogą kumulować substancje toksyczne w bardzo dużych ilościach. Jak dotąd, wydaje się jednak, że zwierzęta bezkręgowe oraz rośliny są znacznie mniej wrażliwe na działanie substancji toksycznych niż kręgowce.

Biologiczne skutki działania związków toksycznych są obserwowane na różnych poziomach: komórek, organów, osobników, populacji, zespołów i ekosystemów. Zaburzenia biochemicznych i fizjologicznych procesów objawiają się w patologicznych zmianach budowy poszczególnych części ciała i funkcji życiowych. W krańcowych sytuacjach prowadzi to do znacznego zmniejszenia liczebności populacji, a nawet wyginięcia niektórych szczególnie wrażliwych gatunków. Ostatecznie może to objawić się nie tylko obniżeniem bioróżnorodności akwenu, ale narusza także bazę pokarmową gatunków znajdujących się na wyższych poziomach troficznych.

4.2.9 Zanieczyszczenia ropopochodne i katastrofy olejowe

Wody Bałtyku wykazują podwyższony poziom zanieczyszczeń substancjami ropopochodnymi. Średni poziom stężeń zanieczyszczeń ropopochodnych w wodach otwartego Bałtyku od wielu lat nie zmienia się i utrzymuje w zakresie od $0,2$ do $2{,}5\,\mathrm{g\,dm^{-3}}$.W strefie brzegowej i zatokach odnotowano stężenia do $20{,}9\,\mu\mathrm{g\,dm^{-3}}$. Na podstawie różnego rodzaju szacunków okazało się, że ze wszystkich źródeł do Bałtyku dostaje się od 21 do 66 tys. ton substancji ropopochodnych w ciągu roku. W przeliczeniu na jednostkę objętości wody jest to dopływ dwa razy większy, niż do Morza Północnego i trzy razy większy niż do Północnego Atlantyku.

Największym źródłem zanieczyszczeń są rzeki. Wynika to przede wszystkim z dużej liczby mieszkańców żyjących w zlewisku Morza Bałtyckiego. Istotnym, a często w ogóle nie branym pod uwagę źródłem zanieczyszczeń, jest dopływ z atmosfery. Ścieki miejskie i katastrofy statków stanowią następne istotne źródła. Charakterystyczne dla katastrof statków jest bardzo duża zmienność wprowadzanej do morza masy ropy w czasie. Obok lat, w których zdarzały się tylko małe katastrofy lub awarie, zdarzają się lata bardzo złe jak na przykład rok 1981.

Ze względu na masowy transport substancji olejowych drogą morską i duże objętości oleju napędowego na każdym statku, prawie każda katastrofa morska jest przyczyną zanieczyszczenia środowiska setkami lub tysiącami ton ropy. Taka ilość zanieczyszczeń

Tab. 4.2 Źródła zanieczyszczeń ropopochodnych Bałtyku

Źródło zanieczyszczeń	Masa w tonach w ciągu roku
ścieki miejskie	3000 – 9000
wody burzowe	1000 – 5000
rafinerie	163
huty	307
pozostały przemysł	400 – 1000
terminale olejowe	100 – 200
przewozy morskie	160 – 6500
katastrofy statków	200 – 9000
platformy wydobywcze	< 5
rzeki	14000 – 25000
dopływ z atmosfery	1000 – 10000
w sumie:	21000 – 66000

Tab. 4.3 Katastrofy statków na Bałtyku i ilość rozlanej ropy

Rok	Statek	Masa rozlanej ropy w tonach
1969	Palva	200
1969	Raphael	250
1970	Esso Nordica	600
1970	Pensa	500
1979	Antonio Gramcsi	5500
1980	Furenas	200
1981	Jose Marti	1000
1981	Globe Asimi	16000
1984	Eira	200
1986	Thuntank 5	150 – 200
1987	Antonio Gramsci	600 – 700
1990	Volgoneft	800
1993	Kihnu	70 – 90

doprowadza do całkowitego lub poważnego zniszczenia środowiska przyrodniczego w danym miejscu. Podobne skutki powodują także awarie urządzeń służących do wydobywania ropy. Miejscem tych dramatów jest głównie strefa przybrzeżna. Zniszczeniu ulega roślinność porastająca dno oraz zwierzęta zamieszkujące tę strefę. Ginie ogromna liczba ptaków zamieszkujących strefę brzegu. Rozmiary i dynamika (intensywność ruchów wody) zbiornika, w którym nastąpił rozlew, rodzaj brzegu, klimat, wszystko to w istotny sposób wpływa na zachowanie się rozlanej ropy. Już od kilkudziesięciu lat człowiek stara się walczyć z katastrofalnymi rozlewami ropy. Ropa dostająca się do wody może być zbierana, spalana lub rozpraszana. Olej rozpraszany jest w wodzie przy pomocy dyspergentów (substancji chemicznych powodujących zwiększanie tempa jego rozpuszczania się w wodzie). Stosuje się też różne metody mechanicznego zbierania ropy przy pomocy różnego rodzaju łapaczek i zapór pływających. Dokonywane są próby opracowania biologicznych metod zwiększenia tempa rozkładu ropy w wodzie. W przypadku, gdy ropa dostanie się na brzeg stosuje się zbieranie mechaniczne, spłukiwanie zimną lub gorącą wodą, używa się detergentów oraz sorbentów, czyli substancji stałych, które wchłaniają płynną ropę, a następnie są wywożone i spalane. Przygotowując się do walki z rozlewem olejowym należy zrozumieć, co dzieje się z ropą w wodzie, a następnie nauczyć się modelowania i prognozowania przebiegu rozlewu olejowego. Pozwala to na

Tab. 4.4 Procesy zachodzące po dostaniu się oleju do wody

Rodzaj procesu	Opis procesu
rozprzestrzenianie na powierzchni	olej rozprzestrzenia się, tworząc cienką powierzchniową warstwę, która pokrywa duże obszary wody
parowanie	lżejsze frakcje oleju ulegają szybkiemu odparowaniu, w sumie może odparować do 60 % masy oleju (w przypadku benzyn znacznie więcej)
rozpuszczanie	część oleju ulega rozpuszczeniu w wodzie morskiej
adwekcja	rozlana plama oleju ulega przemieszczaniu wraz z przemieszczającą się wodą (prądy morskie), jednocześnie oddziałowuje na nią wiatr, powodujący dryf wiatrowy plamy w kierunku działania wiatru
emulsyfikacja	w wodzie podlegającej silnemu mieszaniu olej tworzy emulsję, emulsję stanowią małe krople wody zawieszone w oleju lub krople oleju zawieszone w wodzie
sedymentacja	do kropli oleju zawieszonego w wodzie mogą przylepić się zawarte w wodzie zawiesiny, utworzony zlepek opada na dno
biodegradacja	składają się na nią reakcje fotochemicznej i mikrobiologicznej degradacji oleju w wodzie

przygotowanie ochrony brzegu w odpowiednim miejscu i czasie. Bardzo istotna jest także znajomość wrażliwości różnych miejsc brzegu na rozlew olejowy, zależnej od rodzaju brzegu, porastającej dno roślinności, zamieszkujących tę strefę organizmów zwierzęcych i występujących na tym obszarze ptaków.

Rozprzestrzenianie się oleju jest pierwszym procesem, z jakim mamy do czynienia, gdy olej znajduje się w wodzie. Przy małych ilościach ropy lub produktów ropopochodnych bardzo szybko tworzy się cienki film (bardzo cienka warstwa) na powierzchni wody, którego jedynym śladem istnienia jest wygaszanie drobnego falowania wiatrowego i zmiana kolorów powierzchni wody. Fizyka całego procesu jest opisana przez teorię Faya, w której rozprzestrzenianie się oleju jest efektem działania i wzajemnego równoważenia się sił ciężkości, napięcia powierzchniowego i lepkości. Zgodnie z tą teorią rozprzestrzenianie się oleju na powierzchni wody zachodzi w trzech etapach. W etapie pierwszym, który ma miejsce tuż po dostaniu się oleju do wody, znacząca jest tylko siła ciężkości. W etapie drugim istotne jest równoważenie się sił ciężkości i lepkości. W etapie trzecim podstawową rolę odgrywają siły napięcia powierzchniowego, które równoważone są przez siły lepkości. Olej nie rozlewa się w nieskończoność. Obserwacje terenowe wykazały, że istnieje maksymalna powierzchnia rozlewu, którą może osiągnąć olej o zadanej masie. Sto ton ropy może utworzyć plamę o maksymalnej o powierzchni $3\,\mathrm{km}^2$, tysiąc ton plamę o powierzchni $18\,\mathrm{km}^2$, a dziesięć tysięcy ton spowoduje powstanie plamy o powierzchni ponad $100\,\mathrm{km}^2$.

Drugim bardzo istotnym procesem zachodzącym po rozlaniu się ropy lub substancji ropopochodnych na powierzchni morza jest parowanie. Proces parowania powoduje bardzo istotne zmniejszenie masy rozlanego oleju. Jest on szczególnie intensywny w ciągu pierwszych dwóch dni po rozlewie, kiedy to odparowuje średnio około 20 % masy ole-

ju. W przypadku substancji ropopochodnych składających się z lżejszych frakcji ilość odparowanej substancji może dochodzić nawet do 60 %, a w przypadku benzyn do ponad 90 %. Ilość oleju, która wyparuje, zależy nie tylko od rodzaju rozlanej substancji, ale także od warunków panujących w środowisku, takich jak temperatura wody i powietrza oraz prędkość wiatru. W czasie odparowywania oleju zmieniają się jego właściwości, zwłaszcza gęstość i lepkość. Proces ten nosi nazwę „starzenia oleju". Rezultatem tego jest powstanie po kilku dniach innej substancji niż ta, która uległa rozlaniu. Cały proces parowania oleju z powierzchni wody i jego konsekwencje wpływające na właściwości fizyczne oleju opisuje model Mackaya.

Kolejny proces fizyczny zachodzący w wyniku powstania rozlewu olejowego, powoduje bardzo niewielkie zmniejszenie masy rozlanego oleju, ma jednak bardzo istotne konsekwencje ze względu na zanieczyszczenie środowiska. Procesem tym jest rozpuszczanie się oleju w wodzie. Rozpuszczony olej rozprzestrzenia się łatwo wraz z ruchami wód w morzu lub oceanie, stanowiąc toksyczny składnik wody morskiej oddziałujący w rozmaity sposób na żywe organizmy.

Proces adwekcji jest rezultatem przemieszczania się wód powierzchniowych mórz i oceanów oraz bezpośredniego oddziaływania wiatru na plamę oleju. Prądy powierzchniowe występujące w morzu mogą mieć bardzo różną genezę. Mogą być powodowane przez wiatr, różnice w poziomie wody lub zasolenia, mogą także towarzyszyć przypływom i odpływom morza. Ten ostatni rodzaj prądów, nieobecny na Bałtyku, jest szczególnie istotny w wielu miejscach strefy brzegowej oceanów. Dzięki temu, że rozlany olej, posiada mniejszą gęstość od wody, zachowuje się on jak pływający po wodzie materac. Oddziałuje na niego wiatr, pchając go w kierunku, w którym wieje. Ten rodzaj ruchu nosi nazwę dryfu wiatrowego i przy silnym wietrze jest istotną składową adwekcji.

Emulsyfikacja opisuje proces zachodzący wtedy, gdy rozlany olej znajdzie się na sfalowanej wodzie. Fale wiatrowe powodują burzliwe przepływy w powierzchniowej warstwie wody. W rezultacie kropelki wody są wtrącane w masę oleju, a jednocześnie kropelki oleju wtrącane są w masę wody. Część z wtrąconych kropelek wody tonie w masie oleju i powraca do wody. W miarę kontynuowania tego procesu coraz więcej kropelek wody zostaje wtrącona do oleju i odwrotnie. Ta mieszanina oleju z wodą zwana emulsją zaczyna powoli zmieniać swoje właściwości fizyczne, zwłaszcza lepkość, która powoli wzrasta. Kiedy mieszanina oleju z wodą zawiera około 50 % wody, jej lepkość gwałtownie wzrasta i tworzy ona postać określaną jako „mus czekoladowy". Starzenie się tej postaci zanieczyszczeń olejowych prowadzi do powstawania charakterystycznych pozostałości rozlewu znanych pod angielską nazwą „tar balls". Są to smoliste, lekko plastyczne, owalne w kształcie, kilku – lub kilkunastocentymetrowej wielkości grudki ropopochodnej substancji, znajdywane często na plażach leżących w rejonach zanieczyszczania morza przez ropę.

Kolejnym procesem, istotnym z punktu widzenia zanieczyszczenia środowiska morskiego, jest sedymentacja. Polega ona na opadaniu zawieszonych w masie wodnej drobnych cząsteczek organicznych i nieorganicznych, zwanych zawiesinami, na dno morskie. Przyczyną opadania jest większa gęstość tych cząsteczek niż otaczającej je wody. Olej posiada mniejszą gęstość od wody i w związku z tym sam nie może opadać na dno. Kiedy do zawieszonych w wodzie kropel oleju zaczynają przyklejać się cząsteczki zawiesiny, utworzone zlepki opadają na dno. Opadający olej jest toksyczny dla zamieszkujących dno roślin i zwierząt.

Ostatni z wymienionych procesów jest naturalną obroną środowiska morskiego przed zanieczyszczeniem ropą. Proces biodegradacji polega na fotochemicznej i mikrobiologicznej degradacji związków ropy i substancji ropopochodnych do naturalnych dla środowiska morskiego elementów. Szczególną rolę odgrywają tu mikroorganizmy powodujące rozkład oleju. W różnych rejonach oceanów znajdują się różne gatunki mikroorganizmów rozkładających olej. W związku z rolą jaką one pełnią, pojawiły się dwie koncepcje wykorzystania tej drogi oczyszczania morza. Pierwszy sposób polega na zwiększeniu efektywności działania mikroorganizmów przez dodanie do wody substancji biogenicznych, głównie związków azotu i fosforu. Drugi sposób polega na dostarczeniu do wody mikroorganizmów szczególnie efektywnych w oczyszczaniu morza ze związków ropopochodnych.

W strefie potencjalnego zagrożenia katastrofalnym rozlewem olejowym są także wybrzeża polskie. W Zatoce Gdańskiej znajduje się Port Północny, do którego przypływają tankowce z ładunkiem i przeładowuje się tam ropę. Zwiększa to możliwość wystąpienia rozlewu olejowego w tym rejonie. Czy możemy sobie wyobrazić jak wyglądałby taki rozlew na Zatoce Gdańskiej? W tym celu należy przeprowadzić symulację rozlewu przy pomocy modelu. Obecnie naukowcy posiadają szereg modeli komputerowych, które symulują historię potencjalnych rozlewów. Uwzględniają one warunki panujące w środowisku i za pomocą równań fizycznych opisujących ruch wody, powietrza i zachowanie się oleju w wodzie pozwalają na śledzenie zmienności i ruchu plamy oleju w czasie. Trudniej jest przewidzieć reakcję i efektywność działań ludzi odpowiedzialnych za zwalczanie rozlewów olejowych. W przedstawionym poniżej scenariuszu rozlewu możliwości służb ratowniczych zostały ocenione na podstawie referatów przedstawionych na sympozjum w listopadzie 1993 roku.

Zakładamy, że do Portu Północnego zmierza tankowiec zawierający 40 tysięcy ton ropy. W trakcie podchodzenia do portu następuje awaria silników i steru, która powoduje, że tankowiec osiada na mieliźnie w rejonie ujścia Wisły. Z uszkodzonego kadłuba zaczyna się wydobywać ropa. Po upływie około pół godziny od rozlewu tworzy ona plamę o masie 3800 ton, długości 200 do 300 metrów i grubości około 1 cm. Wieje wiatr z kierunku południowo-wschodniego o prędkości rzędu 6–7 ms^{-1}, który zaczyna spychać plamę ropy w kierunku Trójmiasta. Zawiadomione zostaje Polskie Ratownictwo Okrętowe, którego jednostki powinny w ciągu 2 godzin wyjść w morze. Plama jest jeszcze bardzo skoncentrowana, można użyć dyspergentów i ewentualnie podpalić olej. Mijają dwie godziny od rozlewu. Plama powiększa się znacznie, choć część lżejszych frakcji ropy odparowało. Jej grubość wynosi obecnie 4,5 mm i nadal nadaje się ona do użycia dyspergentów i podpalenia. Po kolejnych dwóch godzinach, czyli czterech godzinach od rozlewu, pierwsze jednostki ratunkowe docierają na miejsce rozlewu. Warunki falowania, stan morza wynosi od 3 do 4[1], uniemożliwiają stosowanie jakichkolwiek zapór. Masa plamy wynosi obecnie 3 tysiące ton ropy. Jej grubość spadła do 2,9 mm, postępuje proces emulsyfikacji. Praktycznie nie nadaje się ona już do zastosowania dyspergentów lub podpalenia. Rozmiary plamy dochodzą do 3 kilometrów. Statki ratunkowe rozpoczynają mechaniczne zbieranie ropy z wydajnością około 20 ton na godzinę. Przez następne 20 godzin uda się im zebrać około 300 ton czystego oleju. Coraz bardziej staje się oczywiste, że jeżeli wiatr nie zmieni kierunku, ropa może zanieczyścić brzegi Zatoki Puc-

[1] taki stan morza odpowiada sfalowaniu z pojawiającymi się białymi grzywami załamujących się fal

kiej. W którym miejscu znajdzie się na brzegu i kiedy, trudno jest jeszcze określić. Mija czternaście godzin od katastrofy. Plama ropy osiągnęła długość 6 kilometrów i szerokość 3 kilometrów. Zbieranie ropy staje się coraz mniej efektywne, gdyż utworzyła ona mieszaninę z wodą. Można już przewidzieć, że plama zmierza do plaży pomiędzy Sopotem a Gdynią. W osiemnaście godzin od momentu rozlewu pierwsze plamy ropy docierają do Przylądka Redłowskiego. W przeciągu tych 18 godzin nie udało się uruchomić żadnej akcji ochrony brzegów. Dwadzieścia cztery godziny od rozlewu ponad 2 tysiące ton ropy zostaje wyrzucone na odcinku około 8 kilometrów od Orłowa do Portu Gdynia. Plaże pokryte są grubą warstwą oleju. Ekolodzy i przyrodnicy zbierają pobrudzone ropą ptaki i usiłują je ratować. Ministerstwo Ochrony Środowiska powołuje specjalną komisję. Wojewoda Gdański zamyka dostęp do plaż na odcinku Sopot–Gdynia. Rozpoczynają się próby mechanicznego zbierania ropy z plaż i przy pomocy sorbentów.

4.2.10 Metody ochrony środowiska morskiego

Metody ochrony środowiska morskiego przed zanieczyszczeniami toksycznymi są takie same jak w odniesieniu do środowiska lądowego. Jedynym skutecznym sposobem jest ograniczenie ich dopływu poprzez zmniejszenie emisji. W drastycznych przypadkach konieczny jest zakaz stosowania niebezpiecznych substancji. W przypadku Morza Bałtyckiego, po wprowadzeniu zakazu stosowania DDT i PCB w latach siedemdziesiątych, dopiero po dwudziestu latach, odnotowano obniżenie stężenia tych związków w tkankach ryb bałtyckich oraz stopniowy wzrost liczebności populacji bielika i fok. Stwierdzono również, że eutrofizacja Morza Bałtyckiego sprzyja oczyszczaniu się toni wodnej ze związków toksycznych. Po zakwitach fitoplanktonu obumarłe organizmy, opadając na dno, usuwają z toni wodnej zaadsorbowane na nich substancje. Powoduje to jednak wzrost stężenia tych związków w osadach dennych, dlatego częściej obserwuje się objawy zakłócenia funkcji życiowych wśród organizmów dennych niż pelagicznych. Generalnie istnieje więc potrzeba wprowadzania takich technologii produkcji, które zmniejszają emisję substancji toksycznych do środowiska.

4.3 Broń chemiczna

Szacuje się, że przed i podczas II wojny światowej Niemcy wyprodukowały i zmagazynowały około 300 tys. ton amunicji chemicznej. Na mocy porozumień konferencji w Poczdamie, odnoszących się do demilitaryzacji Niemiec, alianci przeprowadzili akcję zatapiania broni chemicznej w Bałtyku. Broń topiono w latach 1945–1947. Prawdopodobne jest również, że Związek Radziecki dokonywał zatopień także po 1947 roku. Oceniono, że w ten sposób dostało się do Morza Bałtyckiego od 42 tys. do 65 tys. ton amunicji chemicznej. Była to głównie amunicja artyleryjska, granaty, bomby lotnicze, beczki zawierające BST, czyli bojowe środki trujące, a także inne środki chemiczne. Przy założeniu, że bojowe środki trujące stanowią średnio około 15 % ciężaru amunicji, można oszacować, że w Bałtyku zatopiono od 6 tys. do 15 tys. ton BST.

Głównymi miejscami, gdzie dokonano zatopień broni są: wschodnia część Głębi Bornholmskiej i południowo-wschodnia część Głębi Gotlandzkiej. Faktycznie jednak za rejon, gdzie istnieje prawdopodobieństwo napotkania amunicji, należy uznać cały południowy Bałtyk, gdyż wiele ładunków topiono już podczas transportu a te, które znajdowały się

w drewnianych skrzyniach, utrzymywały się na powierzchni i mogły dryfować na znaczne odległości.

Ustalono, że wśród niebezpiecznych substancji zatopionych w Bałtyku znajdują się: chloroacetofenon, Clark I, Clark II, adamsyt, fosgen, iperyt, luizyt, tabun oraz cyklon B. Wszystkie te związki reagują z wodą morską, ale ich rozpuszczalność w wodzie morskiej waha się od dobrej (tabun) do bardzo złej (adamsyt, iperyt w postaci utwardzonej). W wyniku hydrolizy powstają nowe związki o właściwościach różniących się od bojowych środków trujących. Produkty te, z wyjątkiem BST zawierających arsen, są nietoksyczne i na ogół dobrze rozpuszczalne w wodzie.

Różne warunki fizyczno-chemiczne panujące w miejscach składowania (głębokość dna, rodzaj osadu, zawartość tlenu, temperatura, pH, zasolenie), jak również specyficzna podatność poszczególnych materiałów chemicznych na rozkład, a także stopień skorodowania metalowych płaszczy broni powodują, że trudno jest obecnie ocenić faktyczne zagrożenie. Ocenia się, że jest to raczej zagrożenie lokalne bez tendencji rozprzestrzeniania się na cały Bałtyk. Przydenne prądy w rejonie zrzutów są zbyt małe, aby przemieszczać zatopioną broń, która w zależności od głębokości i charakteru osadu może być zupełnie odsłonięta lub przykryta warstwą mułu o różnej grubości.

Większość zatopionych substancji chemicznych ma ciężar właściwy większy od $1\,\mathrm{g\,cm^{-3}}$, zatem nie mogą one samoistnie wydostać się na powierzchnię lub zagrozić wybrzeżom. Najbardziej narażeni na bezpośredni kontakt są rybacy. Amunicja i bryły iperytu mogą być wyciągane przez nich sieciami pracującymi na dnie. Najwięcej przypadków wyłowienia bojowych środków trujących (kilkaset) zanotowali Duńczycy, łowiący w rejonie na wschód od Bornholmu. Znacznie mniej BST wyławiają rybacy innych państw nadbałtyckich. Najczęstsze schorzenia, którym ulegli ludzie podczas zetknięcia się z tymi substancjami, stanowiły oparzenia skóry, podrażniania dróg oddechowych i oczu.

Dotychczasowe badania nie wskazały, by istniało zagrożenie dla rozwoju flory i fauny bałtyckiej. Jak dotąd, nie zaobserwowano także, by składniki tworzące bojowe środki trujące kumulowały się w tkankach ryb użytkowych.

4.4 Pierwiastki promieniotwórcze

Oprócz występujących w przyrodzie naturalnych pierwiastków promieniotwórczych, w wyniku przeprowadzania przez człowieka reakcji jądrowych, dostają się do środowiska sztucznie wyprodukowane izotopy promieniotwórcze. Najczęściej występującymi sztucznymi pierwiastkami w wodzie i osadach powierzchniowych Morza Bałtyckiego są cez (^{137}Cs) i stront (^{90}Sr). Ich pojawienie się jest skutkiem:
– światowych prób z bronią jądrową w latach 60-tych naszego wieku;
– katastrofy w elektrowni atomowej w Czarnobylu (kwiecień, 1986 r.);
– zrzutów odpadów z elektrowni atomowych w Sellafield/Windscale w Wielkiej Brytanii i La Hague we Francji, które napłynęły wraz z wodą słoną z Morza Północnego;
– pracy reaktorów nuklearnych w rejonie zlewiska bałtyckiego.

Należy podkreślić, że około 76–80 % cezu dostarczyła katastrofa elektrowni w Czarnobylu, a około 83 % strontu pochodzi z prób z bronią jądrową. Rejon zlewiska Morza Bałtyckiego dostarcza tylko około 0,01 % całkowitej ilości cezu i około 0,04 % strontu. Poza cezem i strontem sztuczne izotopy promieniotwórcze, takie jak wodór (^{3}H), kobalt

Rys. 4.10 Rejony zatopienia amunicji chemicznej (wg HELCOM 1996)

(^{60}Co), cynk (^{65}Zn), srebro (^{110}Ag), antymon (^{125}Sb) i inne, dostają się do morza jako odpady procesów jądrowych.

Konsumpcja ryb bałtyckich stanowi jeden ze sposobów w jaki pierwiastki promieniotwórcze przechodzą z wody morskiej. Są one także składnikami aerozoli, które z jednej strony dostają się do dróg oddechowych, a z drugiej działają bezpośrednio na skórę podczas zażywania kąpieli słonecznych. Pozytywnym zjawiskiem jest to, że obecnie notowane dawki promieniowania kształtują się na poziomie promieniotwórczości naturalnej. Doza, którą może otrzymać człowiek poprzez ryby bałtyckie lub aerozole stanowi zaledwie 1 % napromieniowania pochodzenia lądowego, wynoszącego około 2–5 mSV na rok.

4.5 Skażenia mikrobiologiczne

Nieoczyszczone ścieki miejskie, niewłaściwie funkcjonujące hodowle ryb, rolnicze gospodarstwa hodowlane, odpady przemysłu przetwórstwa spożywczego stanowią źródła zanieczyszczeń mikrobiologicznych. Jednak bakterie, które dostają się do wody morskiej nie mają większych szans na rozwój, ze względu na hamujący wpływ soli czy zbyt niską temperaturę. W miarę oddalania się od brzegu szybko giną i zwykle są lokalnym problem w rejonach kąpielisk, stanowiąc poważne zagrożenie dla ludzi. Najczęściej, podczas kąpieli morskich, można zarazić się bakteriami chorobotwórczymi przewodu pokarmowego, wywołującymi dur brzuszny – pałeczkami *Salmonella typhi* lub *Salmonella paratyphi*. Ponadto zagrożenie mogą stanowić pałeczki czerwonki *Shigella* spp., laseczki zgorzeli gazowej *Clostridium perfringens*, pałeczki z rodzaju *Pseudomonas* wywołujące infekcje dróg oddechowych, układu moczowego i nerek oraz słonolubne bakterie *Vibrio* spp. powodujące zapalenie ucha środkowego. Wirusy w morzu zachowują zdolność do wywoływania chorób przez czas dłuższy niż bakterie. Nie stwierdzono, by drobnoustroje wnoszone z wodami rzecznymi do Bałtyku, wywierały wpływ na organizmy żywe zasiedlające to morze.

Dodatek

Pomiar zasolenia wody morskiej w szkolnej pracowni chemicznej
(opracowano wg „Working for Better Water Quality in The Baltic Sea")

Wspomniano wcześniej, że woda morska zawiera różne sole. Ich stężenie zmienia się w różnych miejscach wszechoceanu od około 40 do paru promili, ale ich wzajemne proporcje w wodzie morskiej pozostają mniej więcej stałe. Dzięki temu istnieje możliwość określenia zasolenia przez pomiar stężenia tylko jednego jonu. Metoda ta polega na określeniu stężenia jonu chlorkowego $\mathbf{Cl^-}$. Masę jonów chlorkowych w próbce wody określamy mianem równowartości chlorkowej $\mathbf{Cl}\,(‰)$ i wyrażamy ją w gramach na kilogram lub w promilach. Ze względu na to, że jon chlorkowy stanowi około 55 % masy wszystkich rozpuszczonych składników, to zasolenie można obliczyć na podstawie:

$$\mathbf{S = 0,03 + 1,805 \times Cl}\,‰$$

Do określenia stężenia jonów chlorkowych w próbce wody używa się miareczkowania metodą Mohra[2]. Metoda ta wykorzystuje reakcję jonów chlorkowych z jonami srebra, w wyniku której powstaje bardzo trudno rozpuszczalny osad chlorku srebra.

$$\mathbf{Ag^+ + Cl^- \longrightarrow AgCl}$$

Wskaźnikiem końcowego punktu miareczkowania są jony chromianowe, które z nadmiarem jonów srebrowych dają brązowo-czerwony osad chromianu srebra.

$$\mathbf{2Ag^+ + CrO_4^{2-} \longrightarrow Ag_2CrO_4}$$

W praktyce kolor brązowo-czerwony jest widoczny dopiero po dodaniu około $1\,cm^3$ roztworu jonów srebra ponad punkt końcowy miareczkowania. Ilość ta musi być wyznaczona przez miareczkowanie roztworu samych jonów chromianowych roztworem jonów srebra. Należy także zwrócić uwagę na to, że w czasie miareczkowania pH roztworu powinno zawierać się pomiędzy 6 a 10.

[2]Przez długie lata obowiązywała definicja zasolenia oparta na równowartości chlorkowej. Obecnie używana definicja zasolenia oparta jest na przewodnictwie elektrycznym wody morskiej. Zgodnie z nią zasolenie jest wyznaczane w jednostce PSU (ang. practical sainity unit), która pod względem wielkości prawie dokładnie odpowiada promilowi zasolenia.

Potrzebne wyposażenie:
– biureta 25 cm^3,
– kolba stożkowa,
– kolba miarowa.

Odczynniki:
– roztwór azotanu srebra ($0,1$ mol dm^{-3}),
– roztwór chromianu potasu ($0,25$ mol dm^{-3}).

Procedura:
– W celu wykonania ślepej próby należy wlać 20 cm^3 wody destylowanej do kolby stożkowej i dodać odrobinę węglanu wapnia, aby zagwarantować odpowiednie pH oraz 1 cm^3 roztworu chromianu potasu. Miareczkować roztworem azotanu srebra aż do uzyskania czerwono-brązowego koloru (objętość v_0).
– Wlać 20 cm^3 badanej wody do kolby stożkowej. Dodać 1 cm^3 roztworu chromianu potasu. Miareczkować roztworem azotanu srebra aż do uzyskania takiego samego koloru jak przy wykonaniu ślepej próby (objętość v_a).
– Obliczyć równoważność chlorową ze wzoru:

$$\mathbf{Cl} = [(\mathbf{v_a} - \mathbf{v_0})/\mathbf{1000}] \times \mathbf{C_{[AgNO_3]}} \times \mathbf{35,46} \times \mathbf{1000}/\mathbf{v_p}$$

gdzie:
– $\mathbf{v_a}$ - objętość (w cm^3) azotanu srebra zużytego do miareczkowania próbki wody morskiej,
– $\mathbf{v_0}$ - objętość (w cm^3) azotanu srebra zużytego do miareczkowania próbki testowej,
– $\mathbf{C_{[AgNO_3]}}$ - stężenie azotanu srebra [mol dm^{-3}],
– **35,46** - masa molowa Cl,
– $\mathbf{v_p}$ - objętość (w cm^3) próbki.

Przykład:
W trakcie miareczkowania próbki (20 cm^3) zużyto 16,9 cm^3 roztworu azotanu srebra o stężeniu 0,1 mol dm^{-3}, a w próbce testowej (bez jonów chlorkowych) zużyto $0,5$ cm^3.

$\mathrm{Cl} = [(16,9 - 0,5)/1000] \times 0,1 \times 35,46 \times 1000/20 = 2,91$
$\mathrm{S} = 0,03 + 1,805 \times 2,91 = 5,3$

Odpowiedź: Zasolenie badanej próbki wynosi 5,3 ‰.