

# Środowisko Morza Bałtyckiego

Zeszyt 3

## Eutrofizacja Morza Bałtyckiego

**Autor**

*Curt Forsberg*  
Uniwersytet w Uppsali

**Tłumaczenie**

*Paweł Migula*



Wersja „elektroniczna”

# PRZEDMOWA

Zeszyt ten, traktuje o problemach jakości wód w wyniku zwiększonego napływu składników odżywczych do Morza Bałtyckiego i jest komplementarny z trzecim odcinkiem programu telewizyjnego serii "Baltic Sea Environment". Część prezentowanego materiału jest bardzo prosta i winna być zrozumiała bez specjalnego przygotowania w zakresie ekologii wód. Inne części dla pełnego zrozumienia wymagają uzupełnienia wiadomości, gdyż potraktowane są bardzo pobieżnie.

Odnosińki do piśmiennictwa są nieliczne i głównie cytowane są pozycje angielskojęzyczne. Nie włączono cytowań do tekstu, za wyjątkiem tych, które wiążą się z rycinami i tabelami. Na początku umieszczono piśmiennictwo dotyczące zagadnień ogólnych, po nich prace szczegółowe polecane osobom, które chciałyby uzyskać bardziej wyczerpujący przegląd omawianych zagadnień.

Szczególne uwagę zwrócono na te problemy, które mogą opóźnić regenerację morza lub udaremnić planowane lub już realizowane działania odtwórcze. konieczne jest, by wszyscy mieszkańcy żyjący na obszarach zlewni Morza Bałtyckiego przekonali naszych decydentów o potrzebie podjęcia nadzwyczajnych działań w celu rozwiązania problemu eutrofizacji, podobnie jak i innych globalnych problemów środowiskowych naszego regionu. Jest to główne i najważniejsze przesłanie tego rozdziału.

Ingemar Ahlgren, Lars Bergström, Bengt Hultman a szczególnie Lars Rydén, wnieśli szczególny i konstruktywny wkład do tego opracowania. Hans Mathiesen. Marcin Plinski, Heikki Salemaa, Turi Trei, Fredrik Wulff i Tobjörn Willen dostarczyli odpowiednich danych. Benny Kullinger i Robert Titus odpowiedzialni są za redakcję i stronę językową.

Uppsala, październik 1991

*Curt Forsberg*

# SPIS TREŚCI

<b>PRZEDMOWA</b> .....	<b>2</b>
<b>1. WSTĘP</b> .....	<b>4</b>
<b>1.1. Od problemów lokalnych do światowych</b> .....	<b>4</b>
<b>1.2. Eutrofizacja w środowisku morskim</b> .....	<b>5</b>
<b>1.3. Fizjologiczne podstawy eutrofizacji</b> .....	<b>5</b>
<b>2. AZOT I FOSFOR – KLUCZOWE SKŁADNIKI ODŻYWCZE W EUTROFIZACJI</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1. Biogeochemia azotu i fosforu</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2. Ograniczające składniki mineralne</b> .....	<b>10</b>
<b>2.3. Pochodzenie składników odżywczych</b> .....	<b>11</b>
<b>2.4. Oszacowanie eksportu substancji odżywczych do morza</b> .....	<b>12</b>
<b>3. AZOT I FOSFOR W MORZU BAŁTYCKIM</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1. Obciążenie i obieg azotu i fosforu</b> .....	<b>13</b>
<b>3.2. Oceny stężenia</b> .....	<b>14</b>
<b>4. JAK EUTROFIZACJA WPŁYWA NA MORZE BAŁTYCKIE</b> .....	<b>16</b>
<b>4.1. Uwagi ogólne</b> .....	<b>16</b>
<b>4.2. Eutrofizacja i wzrost glonów</b> .....	<b>16</b>
<b>4.3. Zakwity glonów</b> .....	<b>17</b>
<b>4.4. Niedosyt tlenu w warstwach dennych</b> .....	<b>18</b>
<b>4.5. Eutrofizacja i populacje ryb</b> .....	<b>20</b>
<b>4.6. Zmiany lokalne</b> .....	<b>21</b>
<b>4.7. Oddziaływania w Kattegacie</b> .....	<b>23</b>
<b>5. WYKORZYSTANIE I OBIEG SKŁADNIKÓW POKARMOWYCH W SPOŁECZNOŚCI</b> .....	<b>24</b>
<b>5.1. Miasta – oczyszczanie ścieków</b> .....	<b>24</b>
<b>5.2. Ruch komunikacyjny – samochody i transport</b> .....	<b>24</b>
<b>5.3. Rolnictwo</b> .....	<b>26</b>
<b>5.4. Zmiany krajobrazu – znaczenie terenów podmokłych</b> .....	<b>27</b>
<b>6. PERSPEKTYWY PRZYSZŁOŚCI</b> .....	<b>28</b>
<b>6.1. Wykorzystanie składników odżywczych –         od małych i zamkniętych do dużych i otwartych systemów</b> .....	<b>28</b>
<b>6.2. Zaawansowane oczyszczalnie ścieków – gdzie odkładać P i N?</b> .....	<b>29</b>
<b>6.3. Globalne ocieplenie –         scenariusz zmian klimatycznych dla obszarów Bałtyku</b> .....	<b>31</b>
<b>6.4. Czy eutrofizację w Bałtyku można zahamować lub zatrzymać?</b> .....	<b>33</b>
<b>7. PODSUMOWANIE</b> .....	<b>35</b>
<b>8. PIŚMIENNICTWO</b> .....	<b>36</b>

# 1. WSTĘP

## 1.1. Od problemów lokalnych do światowych

Eutrofizacja w ekosystemach słodkowodnych jest zjawiskiem powszechnym. Jest to naturalny proces, w którym jeziora ubogie w składniki odżywcze (oligotroficzne) przekształcają się powoli w jeziora bogate w te zasoby (eutroficzne); proces który w normalnych warunkach trwałby przez tysiące lat. Aktywność ludzi przyspieszyła ten proces (eutrofizacja antropogeniczna) i stała się obecnie problemem ogólnoświatowym, obejmującym obszary morskie, na przykład Morze Bałtyckie.

Eutrofizacja rozwijała się w podobny sposób w większości krajów, lecz oczywiście w różnym tempie i stopniu uzależnionym od zagęszczenia mieszkańców, wielkości danego obszaru i intensywności gospodarki rolnej. Wcześniej zwracano głównie uwagę na problemy lokalnych jezior i wybrzeży. Jednak po zakończeniu II Wojny Światowej eutrofizację na wielką skalę stwierdzono w Szwajcarii, Szwecji i w Ameryce Północnej, a nieco później w wielu krajach europejskich. Przykłady powszechnie znanych jezior, które uległy silnej eutrofizacji to w Europie Jezioro Constanca, Jezioro Zurychskie, Jezioro Lugano i Lago Maggiore. Lista z mniejszymi eutroficznymi jeziorami i zbiornikami wodnymi mogła by obejmować większość krajów.

Wiele estuariów i zatok położonych jest w środowiskach, gdzie stosuje się najsilniejsze nawożenie ziemi, na przykład wzdłuż linii brzegowej Północnej i Południowej Ameryki, Afryki, Indii, Południowo-wschodniej Azji, Australii, Chin i Japonii. Od czasu kiedy uznawano, że są to problemy obszarów przybrzeżnych uprzemysłowionych regionów, takich jak obszary Morza Bałtyckiego czy morza Śródziemnego, eutrofizacja stała się obecnie problemem ogólnoświatowym.

Zrozumienie eutrofizacji opiera się na badaniach fizjologicznych i ekologicznych roślin wodnych. Kamieniami węgielnymi dla zrozumienia tego procesu były badania z lat 1940., w których określono wymogi środowiskowe słodkowodnych glonów. W latach 1950. więcej uwagi zwrócono na badania produkcji pierwotnej i przyrostu biomasy glonów. Badania bardziej ukierunkowane na zarządzanie środowiskiem zapoczątkowano w latach 1970., zaś w latach 1980. zajęto się koncepcją limitów pokarmowych. Dalszy postęp w rozwoju wiedzy przydatnej dla gospodarki wodnej dała koncepcja maksymalnych dopuszczalnych obciążeń azotem i fosforem. Dalsze badania limnologiczne nad eutrofizacją, prowadzoną pod patronatem OECD zaowocowały opracowaniem modeli wskazujących zależności między obciążeniem substancjami mineralnymi a odpowiedzią jeziora. Była to pierwsza ilościowa prezentacja zależności między obciążeniem jeziora substancjami mineralnymi a jakością jego wód. Badania OECD potwierdziły również kluczową rolę fosforu w wodach śródlądowych, jako czynnika ograniczającego.

### Definicja

**Eutrofizacja:** zwiększony wpływ do wód głównie azotu i fosforu, powodujący zwiększenie produkcji pierwotnej – wzrost glonów i roślin wyższych.

Eutrofizacja powoduje wielkie zmiany w ekosystemach wodnych i niezamierzoną degradację jakości wody, prowadząc na przykład do deficytu tlenu, co może być zabójcze dla ryb.

## 1.2. Eutrofizacja w środowisku morskim

Główne skutki wzrostu wprowadzanych do zbiornika wodnego składników roślinnych (N i P) to:

- wzrost stężenia substancji pokarmowych w wodzie;
- wzrost produkcji pierwotnej (wzrosty biomasy fitoplanktonu, nasilony wzrost nitkowatych glonów);
- w następstwie tego zmiany fizyczne, chemiczne i biologiczne (np. zmniejszenie przenikania światła, deficyt tlenu i śnięcie ryb).

Schemat na **Ryc. 1** przedstawia możliwe procesy eutrofizacji w morzu, gdy wyraźna haloklina oddziela wody powierzchniowe od głębszych wód (warstwa dzieląca wody powierzchniowe od bardziej zasolonych wód na głębokościach 60–80 m i głębszych). Poniżej przedyskutujemy zmiany, które obserwowano w Bałtyku.

W latach 1960. stało się jasne, że w wyniku antropogennej eutrofizacji nasiliła się niepożądana degradacja jakości wód w jeziorach i zbiornikach wodnych. Narastający problem zakwitów toksycznych sinic stał się przedmiotem szczególnej uwagi. Pogorszenie jakości wód spowodowało istotne straty ekonomiczne, gdyż kolidowało z niezbędną użytkowością wody pitnej. Stało się to bodźcem dla dofinansowania przez OECD badań nad procesami kontroli eutrofizacji. Od lat 1970. narasta liczba doniesień naukowych o zakwitach toksycznych sinic, warunkach beztlenowych i ginięciu ryb w obszarach morskich.

Eutrofizacja może zmienić przydatności wód powierzchniowych dla rekreacji, ograniczając np. rybołówstwo, możliwość korzystania z kąpeli itp., oddziałuje więc zarówno na aspekty socjalne jak i ekonomiczne. Jeśli nie będzie można zatrzymać eutrofizacji morza, następstwem tego mogą być poważne zaburzenia w produkcji ryb i innych produktów morza z nieoczekiwanymi konsekwencjami dla społeczeństwa.

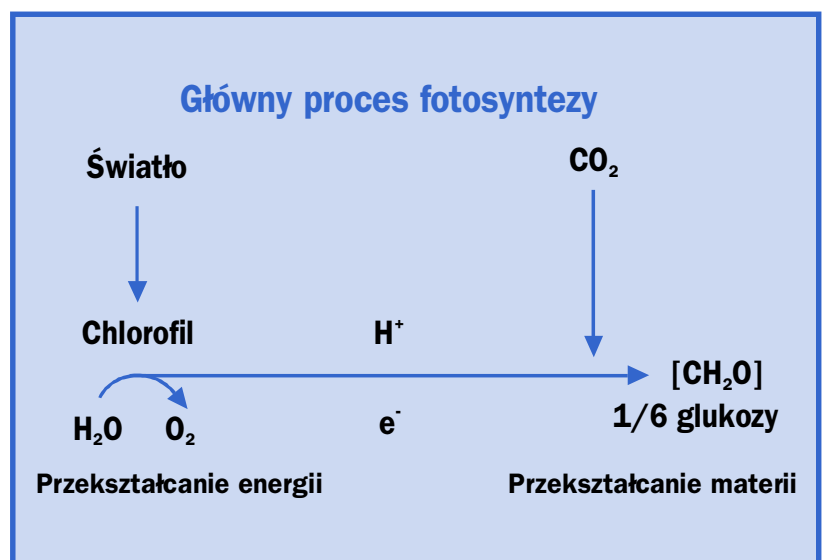
## 1.3. Fizjologiczne podstawy eutrofizacji

Fizjologiczną podstawą procesu eutrofizacji jest fotosynteza. Jest to zespół serii reakcji, które zapoczątkowuje absorpcja kwantu energii świetlnej przez chlorofil lub inne barwniki roślin zielnych. Wynikiem tego jest synteza związków organicznych z dwutlenku węgla i wody. W fotosyntezie możemy wyróżnić dwa główne procesy.

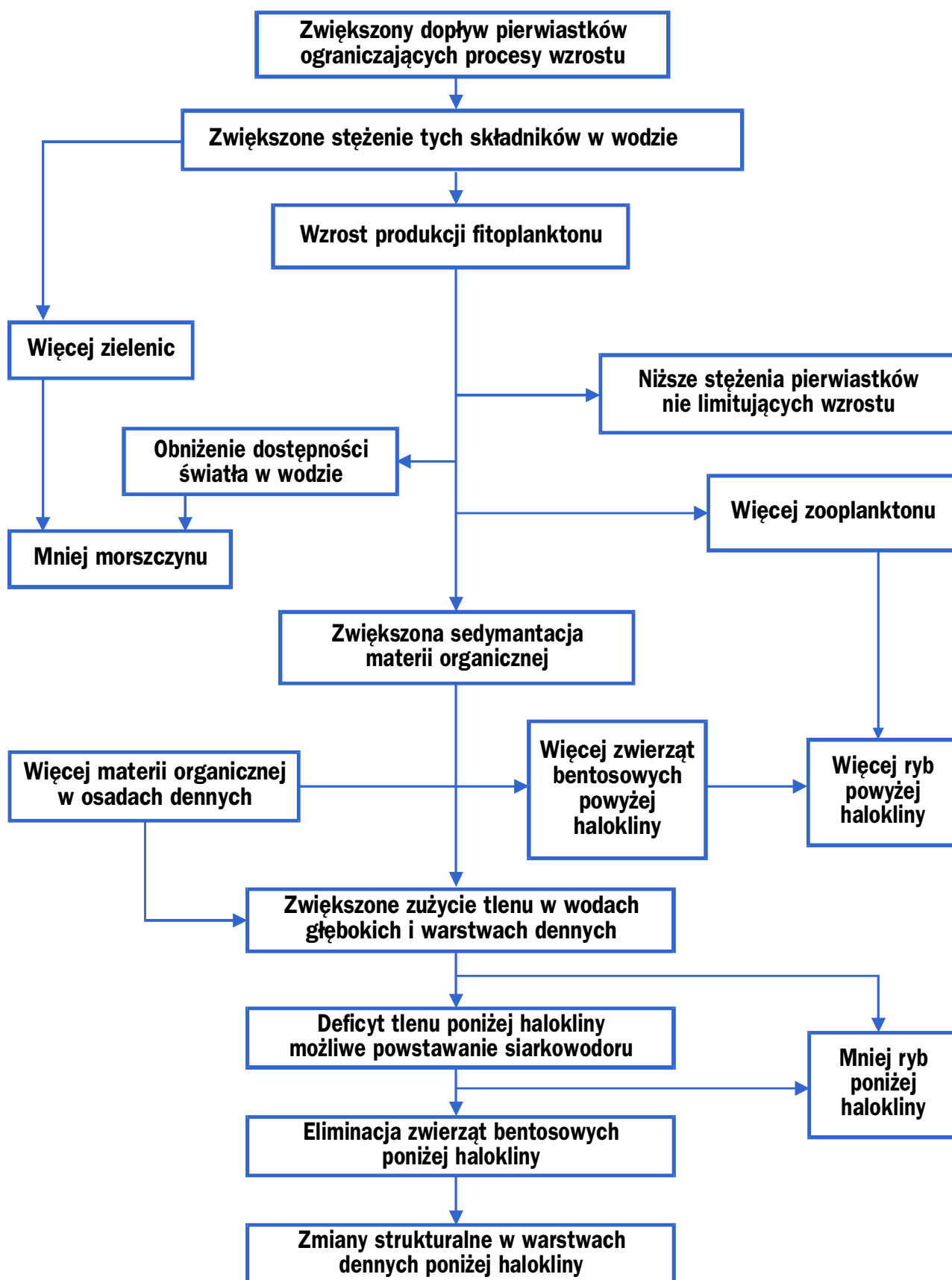
W pierwszej fazie energia świetlna jest zamieniana na energię chemiczną, a w drugiej fazie węgiel nieorganiczny jest przekształcany w materię organiczną, początkowo w glukozę i dalej w składniki budujące komórki.

Głony i inne rośliny zielone zbudowane są głównie z węgla, azotu i tlenu (często powyżej 98% świeżej masy). Źródłem dla tych pierwiastków, jak przedstawiono wyżej, jest dwutlenek węgla i woda. Do głównych elementów budujących materię organiczną potrzebne są również w większych ilościach, dodatkowo, inne pierwiastki, w tym niektóre metale, takie jak wapń, magnez, potas i niemetale: siarka, azot i fosfor. Pierwiastki te nazywa się często makroelementami. Inne pierwiastki, takie jak metale śladowe: miedź, cynk, bor, mangan i selen, są niezbędne w bardzo małych ilościach, dlatego nazywamy je pierwiastkami śladowymi lub mikroelementami.

Niedobór podstawowych składników pokarmowych może ograniczać wzrastanie roślin. W środowiskach wodnych azot i/lub fosfor to pierwiastki,



## Eutrofizacja i jej konsekwencje w środowisku morskim



**Ryc. 1.** *Możliwe procesy eutrofizacyjne w obszarach morskich z halokliną wyraźnie oddzielającą wody powierzchniowe od wód głębokich [wg Monitor, 1988; zmodyfikowane].*

które często pełnią kluczową rolę jako czynników limitujących. Azot jest pierwiastkiem niezbędnym dla białek komórkowych, zaś fosfor ma kluczową rolę w przemieszczaniu energii w komórce. Oba pierwiastki niezbędne są w różnych proporcjach uzależnionych od specyficznego zapotrzebowania różnych gatunków roślin. W materii organicznej fitoplanktonu jest średnio 16 atomów azotu na 1 atom fosforu (tzn. 16 N:1 P). Stosunek azotu do fosforu, nazywany wskaźnikiem Redfielda, opisuje z grubsza wzorzec pobierania tych pierwiastków przez glony. Wskaźnik dla tych najbardziej niezbędnych pierwiastków można uzyskać porównując stężenia obu pierwiastków w wodach powierzchniowych.

## Główne problemy wiążące się z eutrofizacją

### A. Pogorszenie jakości wody (*słodkiej*)

- smak, zapach, kolor, filtracja, kłaczkowanie, sedimentacja i inne problemy z użytkowaniem
- hypolimnetyczne wyczerpywanie tlenu, zmiany pH, zwiększone stężenia Fe, Mn, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S
- toksyczność

### B. Pogorszenie warunków rekreacyjnych (*wody słodkie i morskie*)

- zawirowania, straty estetyki
- zagrożenie dla pływaków
- Zwiększenie zagrożenia zdrowia

### C. Pogorszenie rybołówstwa (*wody słodkie i morskie*)

- śmiertelność ryb
- niepożądane ławice ryb



## 2.

# AZOT I FOSFOR – KLUCZOWE SKŁADNIKI ODŻYWCZE W EUTROFIZACJI

### 2.1. Biogeochemia azotu i fosforu

Rośliny często pobierają składniki pokarmowe w postaci prostych jonów nieorganicznych. Na przykład azot jest łatwo przyswajalny w postaci azotynów, azotanów lub amoniaku ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ). Fosfor pobierany jest głównie w postaci fosforanów ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Oba pierwiastki występują także w różnych związkach organicznych (jak np. azot w aminokwasach) i w takiej postaci mogą być wykorzystywane przez glony. Należy także zwrócić uwagę że wiele bakterii, również sinice (zwane inaczej bakteriami cyjanowymi) mogą wykorzystywać azot atmosferyczny,  $\text{N}_2$  i wiązać go biologicznie.

Azot i fosfor, pobierane z powietrza lub jako składniki mineralne gromadzą się w organizmach żywych i uwalniane są do atmosfery lub ponownie, jako składniki mineralne, krążą w *cyklu biogeochemicznym*. Pojęcie to jest podstawą zrozumienia równowagi tych pierwiastków w przyrodzie.

Azot i fosfor przedostają się do ekosystemów różnymi drogami. Azot przez mokre i suche depozyty gazowe lub cząsteczkowe, a także przez wiązanie biologiczne. Fosfor uwalnia się głównie w procesach wietrzenia skał.

Ponowne przejście azotu z wody do powietrza odbywa się w procesie zwanym *denitryfikacją* (**Ryc. 2**). Nie ma podobnego procesu powracania fosforu. Pierwiastek ten „wędruje” przez ekosystemy tylko jednokierunkowo; przede wszystkim z gleby do wód powierzchniowych i ostatecznie do morza. Działalność człowieka przyczyniła się do gwałtownego wzrostu ilościowego obu pierwiastków, głównie z trzech powodów:

- stosowanie sztucznych nawozów
- stosowanie syntetycznych detergentów
- spalanie naturalnych kopalni i spalanie drewna

Glony planktonowe i inna materia organiczna, która nie została zjedzona lub rozłożona w toni wodnej, opada na dno morza. Tam ulega wolnemu rozkładowi lub mineralizacji przez bakterie, prowadząc do uwolnienia fosforanu i amoniaku. Inne bakterie mogą utleniać amoniak ( $\text{NH}_3$ ) do azotynów ( $\text{NO}_2^-$ ) lub azotanów ( $\text{NO}_3^-$ ) w procesie określanym jako *nitryfikacja* (**Ryc. 2**). Powracające do wody składniki nieorganiczne mogą być przyswojone, zabezpieczając ponownie produkcję pierwotną.

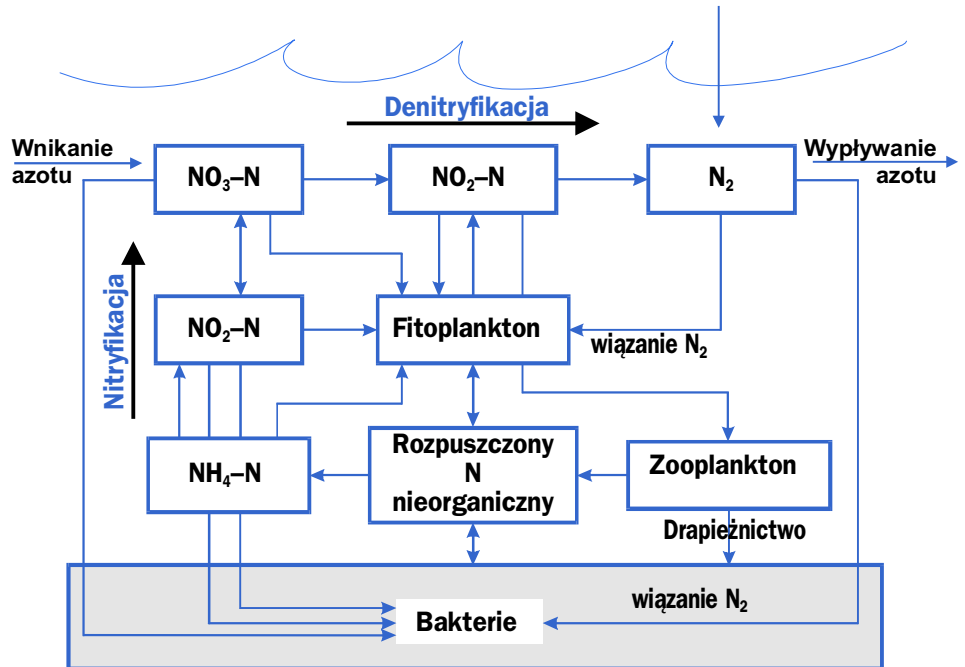
Znaczące ilości fosforu mogą być związane w osadach, często wiążąc się z żelazem, przez co są efektywnie wyłączane z biologicznego krążenia. Jednakże, w zależności od nasilenia procesów biochemicznych, z osadów mogą się uwalniać znaczne jego ilości. Takie zjawisko może zachodzić w warunkach beztlenowych, w głębszych wodach, a także w płytkich warstwach dennych gdy panują wysokie letnie temperatury. Takie uwalnianie fosforu nazywamy często „obciążeniem wewnętrznym”, które jest wynikiem długotrwałego wnikania składników mineralnych. Takie wewnętrzne obciążenie wzmaga procesy eutrofizacji, powodując wysoką produkcję pierwotną, nawet w okresie kiedy znacząco obniżył się dopływ składników mineralnych z zewnątrz.



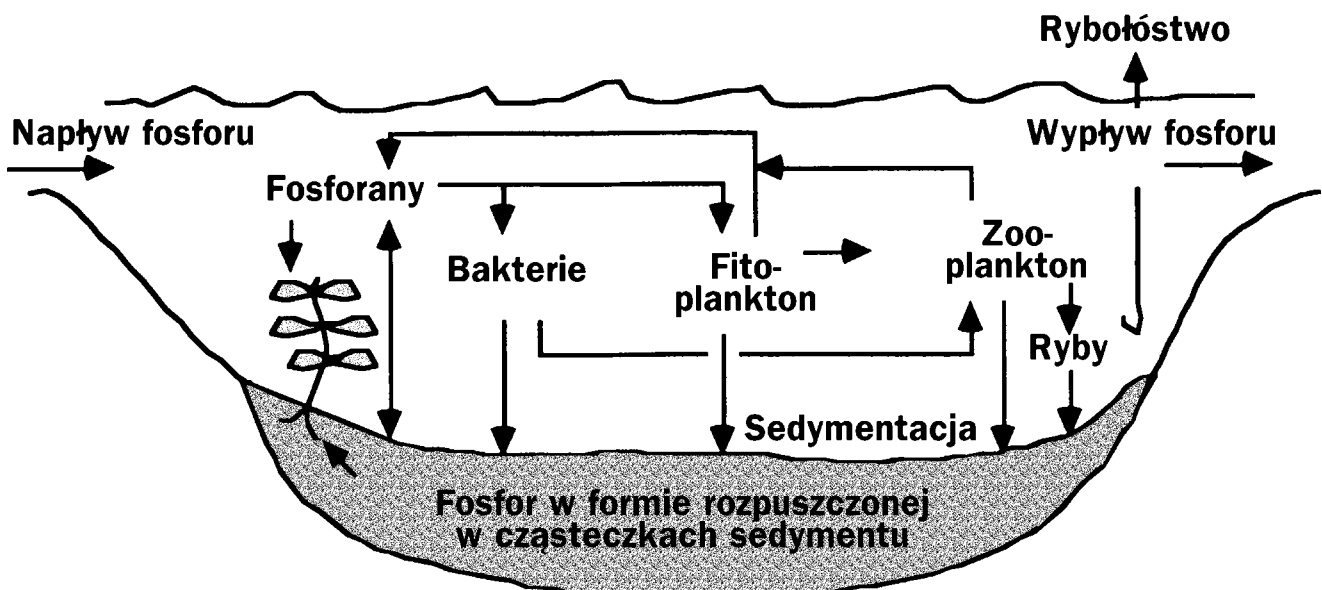
Normalnie, materia zalegająca na powierzchni osadów morskich jest natleniona. Braki tlenu pojawiają się parę centymetrów poniżej powierzchni. Granicę pomiędzy środowiskami tlenowym i beztlenowym nazywamy *redoksykliną*. Wielkie ilości bakterii zamieniają tu azotany ( $\text{NO}_3^-$ ) na azot gazowy ( $\text{N}_2$ ) w procesie *nitryfikacji*. Może on zachodzić również w pozbawionych tlenu wodach przy dnie. Gazowy azot uwalnia się do masy wody i dalej do atmosfery. Denitryfikacja może usunąć większość związanego azotu, który wniknął do Morza Bałtyckiego. Jest to jeden z głównych powodów, dla czego stosunek azotu do fosforu w Bałtyku właściwym jest niski, podobnie jak w wielu płytkich wodach przybrzeżnych.

Dlatego właśnie w Morzu Bałtyckim zarówno azot jak i fosfor uczestniczą w procesach krążenia biochemicznego w wolnych masach wód, a także między osadami i wodą. Schemat procesu krążenia azotu przedstawiono na **Ryc. 2**.

Fosfor nie występuje w formie gazowej i jest przyswajalny jako nieorganiczny, głównie w postaci fosforanu. Krążenie fosforu w masie wody jest dlatego mniej skomplikowane niż azotu, jak ilustruje to **Ryc. 3**. Procesy mikrobiologiczne i fizyczne mogą jednak bardziej komplikować relacje fosforu między osadami i wodą.



**Ryc. 2.** Uproszczony model krążenia azotu ilustrujący wzajemne relacje między różnymi związkami azotowymi a wzrostem bakterii, fito- i zooplanktonu.



**Ryc. 3.** Uproszczony cykl krążenia fosforu obrazujący wzajemne relacje między fosforanami i wzrostem bakterii, fito- i zooplanktonu.

## 2.2. Ograniczające składniki mineralne

Niedobory składników pokarmowych mogą ograniczać produkcję pierwotną. Można wyróżnić trzy rodzaje ograniczeń:

- tempa wzrostu poszczególnych populacji glonów
- produkcji pierwotnej netto lub akumulacji biomasy netto
- produkcji netto ekosystemu

Najczęściej stosowane pojęcia określające niedobory składników odżywczych w ekosystemach wodnych to obniżenie produkcji pierwotnej netto lub akumulacja biomasy netto. Poznanie, który z składników najbardziej ogranicza wzrost glonów ma szczególne znaczenie dla gospodarki wodnej.

Dla określenia, który z czynników odżywczych jest najbardziej limitującym stosuje się różne metody:

- **Wskaźnik dostępności składników odżywczych** wyznacza się przez porównania, jak zmienia się stosunek azotu do fosforu w materiale wnoszonym z zewnątrz z ich wzajemnymi relacjami w wodach powierzchniowych oraz odpowiadające im wielkości w komórkach glonów (jak wspomniano wcześniej, 16:1), dając podstawę do wyznaczenia najbardziej limitującego czynnika. Wskaźnik znacznie poniżej 16:1 wskazuje, że azot występuje w niedoborze, natomiast wartości odwrotne świadczą, że to fosfor jest pierwiastkiem kluczowym. Wzajemne relacje obu wnioskujących z zewnątrz pierwiastków mogą być nieprawdziwe, gdyż zawartość dostępnych dla roślin składników mineralnych może zmieniać się gwałtownie w wyniku zachodzących procesów biochemicznych, jak dzieje się to w Morzu Bałtyckim.
- **Test wzbogacania składników mineralnych.** Wprowadzanie dodatkowych ilości składników mineralnych do hodowli glonów lub naturalnych zespołów planktonowych może wskazać, który z składników może chwilowo ograniczać dalszy ich wzrost.
- **Oszacowanie ilościowe fosfatów zasadowych.** Enzymy te odłączają wiązania fosforanowe od związków organicznych. Ich obecność może wskazywać na fosfor jako czynnik limitujący.

Najbardziej wartościowe informacje uzyskamy stosując kombinację tych metod.

Azot i fosfor wprowadzony z źródeł zewnętrznych odkłada się we wszystkich subobszarach Morza Bałtyckiego w stosunku przewyższającym 16:1. Zimą, wzajemne relacje tych pierwiastków w wodach powierzchniowych są zmienne. W Zatoce Botnickiej są one wyższe aniżeli wskazuje na to stosunek tych pierwiastków pochodzących z zewnątrz, podczas gdy w Bałtyku właściwym i Kattegacie są one odpowiednio niższe. Takie zróżnicowanie wskazuje na znaczenie procesów wewnętrznych, które mogą regulować stężenia składników odżywczych, na przykład poprzez: odtworzenie tych pierwiastków z materii organicznej wód powierzchniowych; denitryfikację w bentosie płytkich wód lub prawie beztlenowych wód głębokich; niską rozpuszczalność i wytrącanie wywołujące sedymentację.

Test wzbogacania składników mineralnych wskazuje zasadniczo na niedobory azotu w Bałtyku właściwym i Kattegacie, jednak wzrost glonów stymuluje zwiększenie fosforu w czasie wiosennych zakwitów glonów. Azot może być również najsilniej ograniczającym pierwiastkiem w przybrzeżnych obszarach Bałtyku, gdzie nie ma bezpośredniego dopływu składników mineralnych. Niskie wartości stosunku azotu do fosforu w warstwie osadowej Bałtyku właściwego mogą tłumaczyć zachodzące na dużą skalę procesy denitryfikacyjne.

W Zatoce Botnickiej kluczową rolę czynnika ograniczającego pełni fosfor. Wysoki stosunek azotu do fosforu tłumaczyć może sprzężenie fosforanów z żelazem, zachodzące w wodach rzek leśnych wpływających do tej zatoki. Niska rozpuszczalność i strącanie może prowadzić do osadzania się fosforu. Produkcja pierwotna będzie niska, co oznacza, że tylko niewielka część azotu nieorganicznego jest związana w materii organicznej, która opadła na dno.

## 2.3. Pochodzenie składników odżywczych

Główne źródła, z których przedostają się do Bałtyku składniki pokarmowe to:

- lokalne źródła lądowe (rurami wyrzutowymi z oczyszczalni ścieków i zakładów przemysłowych)
- inne, nie lokalne lub rozcieńczone źródła (wycieki z terenów miejskich, obszarów rolnych lub lasów)
- depozyty z powietrza
- uwalnianie z osadów

Pochodzenie składników mineralnych wnoszonych do Bałtyku może być bardzo różne. Kiedy po II Wojnie Światowej zaczęła się na wielką skalę eutrofizacja wód śródlądowych większą uwagę zwracano na ścieki z obszarów zurbanizowanych. Wyrzut składników mineralnych jest bardzo zmienny i zależy od standardów sanitarnych, sprawności systemów oczyszczających i stopnia oczyszczenia ścieków. Niezależnie od systemów kontroli zawsze pojawiają się ścieki uwalniające się zawsze z terenów zurbanizowanych, z systemów oczyszczających, fabryk, miejskich wód deszczowych i rozcieńczane zanieczyszczenia miejskie (przecieki, wycieki).

W ciągu doby pewna ilość składników mineralnych wydostaje się z lądu do wody jako pośredni efekt odżywiania się ludzi. Przykładowo, w krajach zindustrializowanych dobowe pobranie fosforu na osobę w ciągu dnia może sięgać 1–1,5 g, z czego większość jest wydalana. W obszarach miejskich fosfor stosuje się również jako nawóz (parki, ogrody) i jako chemikalia (głównie w gospodarstwie domowym w detergentach do zmywania).

W ostatnich trzech–czterech dziesięcioleciach nastąpił proces modernizacji rolnictwa, włączając w to między innymi zwiększone zużycie nawozów. Nawozy sztuczne są zawsze spodziewanym składnikiem obciążenia wód substancjami mineralnymi pochodzącymi z tak zwanych źródeł rozpuszczalnych lub niepunktowych. Źródła te często obejmują również składniki mineralne, które pochodzą od wypasanych zwierząt (odchody i mocz) a także z strat wynikających z erozji wietrznej lub wodnej. Całość składników mineralnych uwalnianych z obszarów rolnych pochodzi z następujących źródeł:

- obszarów uprawnych (nawozy, erozja)
- pastwisk (kał, mocz, erozja)
- magazynów obornika
- mleczarni
- ścieków komunalnych

Wzorzec wycieku składników mineralnych z terenów rolnych do wody jest różny dla azotu i fosforu. Azot często jest tracony dzięki silnie mobilnym jonom azotanowym, podczas gdy fosfor i fosforany mogą, przynajmniej okresowo, w znacznym stopniu włączać się do gleby (przepływ fosforu jest omówiony poniżej).

Tradycyjnie uważa się, że lasy są ekosystemami prawie zamkniętymi, gdzie składniki mineralne są wymieniane lub tracone tylko w niewielkim zakresie. Leśne jeziora są zazwyczaj także oligotroficzne (ubogie w składniki mineralne). Jednak w ostatnich latach nastąpiło jakby „nasylenie” azotem niektórych obszarów leśnych, w wyniku wysokiej depozycji z powietrza (o czym poniżej). Można więc na tej podstawie spodziewać się zwiększonego uwalniania azotu z gleby do wody. Ponadto, współczesna gospodarka leśna może zwiększyć straty składników mineralnych przez:



*Problem kontrolowania eutrofizacji Morza Bałtyckiego można przezwyciężyć. Jednak rozwiązanie tego problemu będzie wymagać ustawienia wysokiej poprzeczki z wykorzystaniem podstawowej wiedzy ekologicznej i rozwojem właściwych metod pomiarowych.*

- nawożenie
- wylesianie
- budowę dróg leśnych
- budowę przepustów

**Składniki mineralne z powietrza**, szczególnie azot, wzrosły znacząco począwszy od lat 1950. i mają obecnie znaczący udział w całościowym obciążeniu Bałtyku azotem. Działania człowieka przyczyniły się do uwalniania azotu do powietrza, powodując emisję tlenków azotu z:

- spalania kopalin (ropa, węgiel) w fabrykach i elektrowniach a także w transporcie samochodowy, ciężarówki, samoloty, statki)
- spalania biomasy (do produkcji ciepła, elektryczności)
- parowania amoniaku z gnojowisk na fermach hodowlanych

Ważne jest także wymywanie składników z osadów. Materia zawierająca te składniki, produkowana lub wprowadzana do Morza Bałtyckiego, przez sedymentację zawsze osiada na dnie. Z upływem czasu składniki mineralne mogą się kumulować, szczególnie fosfor wiążący się w dostępności tlenu z żelazem. W warunkach beztlenowych fosfor może uwalniać się z osadów morskich do wody, gdzie może brać udział w procesach wzrostu glonów, przyczyniając się do dalszej eutrofizacji.

## 2.4. Oszacowanie eksportu substancji odżywczych do morza

Jak przedstawiono wyżej, różne są źródła pochodzenia składników mineralnych. Odmienne metody zastosowano dla ilościowej oceny tych substancji eksportowanych do morza z źródeł lokalnych i źródeł niepunktowych.

**Obszary zlewni:** Oceniając stężenia składników mineralnych jak i przepływ wody w rzece w pobliżu jej ujścia do Bałtyku można obliczyć całkowity eksport substancji mineralnych z tego obszaru (stężenie pomnożone przez tempo przepływu wody). Zarówno stężenie tych składników jak i prąd wody mogą być bardzo zmienne. Dlatego częstotliwość dokonywania ocen obu parametrów powinna być bardzo duża.

**Oczyszczalnie ścieków:** Wyrzut z wielu oczyszczalni ścieków odbywa się bezpośrednio do wód przybrzeżnych. W tym przypadku również eksport substancji mineralnych ocenia się przez przemnożenie ich stężenia i szybkości przepływu.

**Bezpośredni wyrzut ścieków do wód przybrzeżnych:** W przypadku braku oczyszczalni ścieków eksport składników mineralnych z obszarów miejskich można ocenić stosując wyliczone współczynniki eksportu. Współczynniki te mogą być różne, zależnie od kraju i zależą od wzorców odżywiania ludzi, stosowania środków chemicznych w gospodarstwie domowym itp. Dla fosforu można przyjąć 2–3 g w przeliczeniu na jedną osobę na dobę. Dla odzwierciedlenia aktualnej sytuacji potrzebne są oceny dokonywane w każdym z krajów. Dane te mogą się znacząco wahać, np. gdy stosuje się ulepszenia detergentów zawierających fosfor.

**Obszary rolnicze i leśne:** Tereny te reprezentują niepunktowe źródła zanieczyszczeń. Gdy nie włączymy ich do oceny eksportu z obszarów całej zlewni, należy je oszacować stosując odpowiednie współczynniki obszarowe (kg/hektar/rok). Dane te muszą być wyznaczane dla różnych obszarów. Powodem są znaczne różnice w wycieku składników mineralnych z gleby do wód powierzchniowych, które zależą od wahań opadów i poziomu wód gruntowych. Uzyskane w ten sposób wielkości mogą być mniej dokładne niż wyniki bezpośrednich pomiarów stężeń i przepływu wody.

**Depozyty atmosferyczne:** Udział powietrza w eksporcie substancji mineralnych musimy oceniać zarówno w postaci tak zwanych depozytów mokrych i suchych, które dopiero łącznie wskazują na depozycję danego pierwiastka. Dokładne oszacowanie eksportu pierwiastków pochodzących z tego źródła jest trudne, między innymi z powodu występowania azotu w różnorodnych postaciach, jak azotany lub amoniak.



## 3.

## AZOT I FOSFOR W MORZU BAŁTYCKIM

## 3.1. Obciążenie i obieg azotu i fosforu

Roczne, zewnątrzpochodne zasoby azotu i fosforu wprowadzane do Bałtyku oraz do Cieśnin Duńskich i Kattegatu, ocenia się na 53 tys. ton fosforu i 1 060 tys. ton azotu.

Blisko 50% azotu pochodzi z atmosfery, włącznie z azotem związanym. Fosfor pochodzi głównie z obszarów lądowych (90%). Dówóz zewnętrznego fosforu i azotu do różnych części Morza Bałtyckiego prezentuje **Tab. 1**. Taki sposób oceny pozostawia zawsze pewną dozę niepewności.

Około 100 lat temu do Morza Bałtyckiego wnikało zdecydowanie mniej składników mineralnych niż obecnie, gdyż ocenia się, że dla azotu jest on czterokrotnie a dla fosforu ośmiokrotnie większy. Prawdopodobnie wzrost ten trwa od lat 1950.

Ocena obiegu składników mineralnych w Morzu Bałtyckim może nastroczać trudności, szczególnie dla azotu, gdyż w obiegu tego pierwiastka zaangażowane są zarówno procesy wiązania azotu jak i denitryfikacji. Zasadniczo, część z wnikaających składników mineralnych związana z obumarłym fitoplanktonem lub innymi cząstkami materii opada na dno. Część azotu może wrócić do atmosfery, dzięki denitryfikacji, gdzie ponownie może być wiązany i powracać do ekosystemów wodnych. Część składników może być wprowadzana przez Kattegat do Skagerraku. Wpływają one na wzrost stężenia azotu w Morzu Bałtyckim.

**Tab. 1.** Zewnętrzny dopływ azotu i fosforu do różnych subbasenów w obszarze Bałtyku. [Rosenberg i in., 1990].

	N całkowity (ton/rok)	%	P całkowity (ton/rok)	%
<b>ZATOKA BOTNICKA</b>				
Szwecja	19 000	28	1 000	29
Finlandia	32 000	47	2 000	57
depozycja	17 000	25	500	14
<b>Podsuma</b>	<b>68 000</b>	<b>100</b>	<b>3 500</b>	<b>100</b>
<b>MORZE BOTNICKIE</b>				
Szwecja	35 500	30	1 600	37
Finlandia	22 100	19	1 660	38
depozycja	60 000	51	1 100	25
<b>Podsuma</b>	<b>117 600</b>	<b>100</b>	<b>4 360</b>	<b>100</b>
<b>WYBRZEŻE FINLANDII</b>				
Finlandia	16 300	21	860	16
ZSRR	57 700	76	3 990	76
depozycja	2 100	3	410	8
<b>Podsuma</b>	<b>76 100</b>	<b>100</b>	<b>5 260</b>	<b>100</b>
<b>BAŁTYK WŁAŚCIWY (łącznie z wybrzeżem Rygi, Sundem i Beltem)</b>				
Szwecja	44 300	6	1 780	5
ZSRR	72 600	10	1 890	5
Polska	109 900	15	19 100	52
NRD	3 600	1	380	1
RFN	16 400	2	2 370	6
Dania	51 000	7	860	22
depozycja	289 900	41	3 420	9
zatr. N <sub>2</sub>	130 000	18	–	–
<b>Podsuma</b>	<b>717 700</b>	<b>100</b>	<b>36 800</b>	<b>100</b>
<b>KATTEGAT</b>				
Szwecja	37 000	46	900	29
Dania	18 000	22	1 900	61
depozycja	26 000	32	300	10
<b>Podsuma</b>	<b>81 000</b>	<b>100</b>	<b>3 100</b>	<b>100</b>

Średnie wartości dla jednego roku z okresu 1982–1987 zostały skompilowane na podstawie danych dostarczonych Komisji Helsińskiej na pierwszym okresowym spotkaniu i z późniejszych szwedzkich danych monitoringowych

Obieg fosforu i azotu przedstawia **Ryc. 4**. Wielkości przedstawianych liczb mogą różnić się od terażniejszych szacunków, lecz różnice te można uznać za nieistotne, jeśli ponownie uwzględnimy niedokładności tego typu szacowania bilansu. Proszę zwrócić uwagę na porównywalnie większą redukcję w wypływie niż dopływie obu pierwiastków.

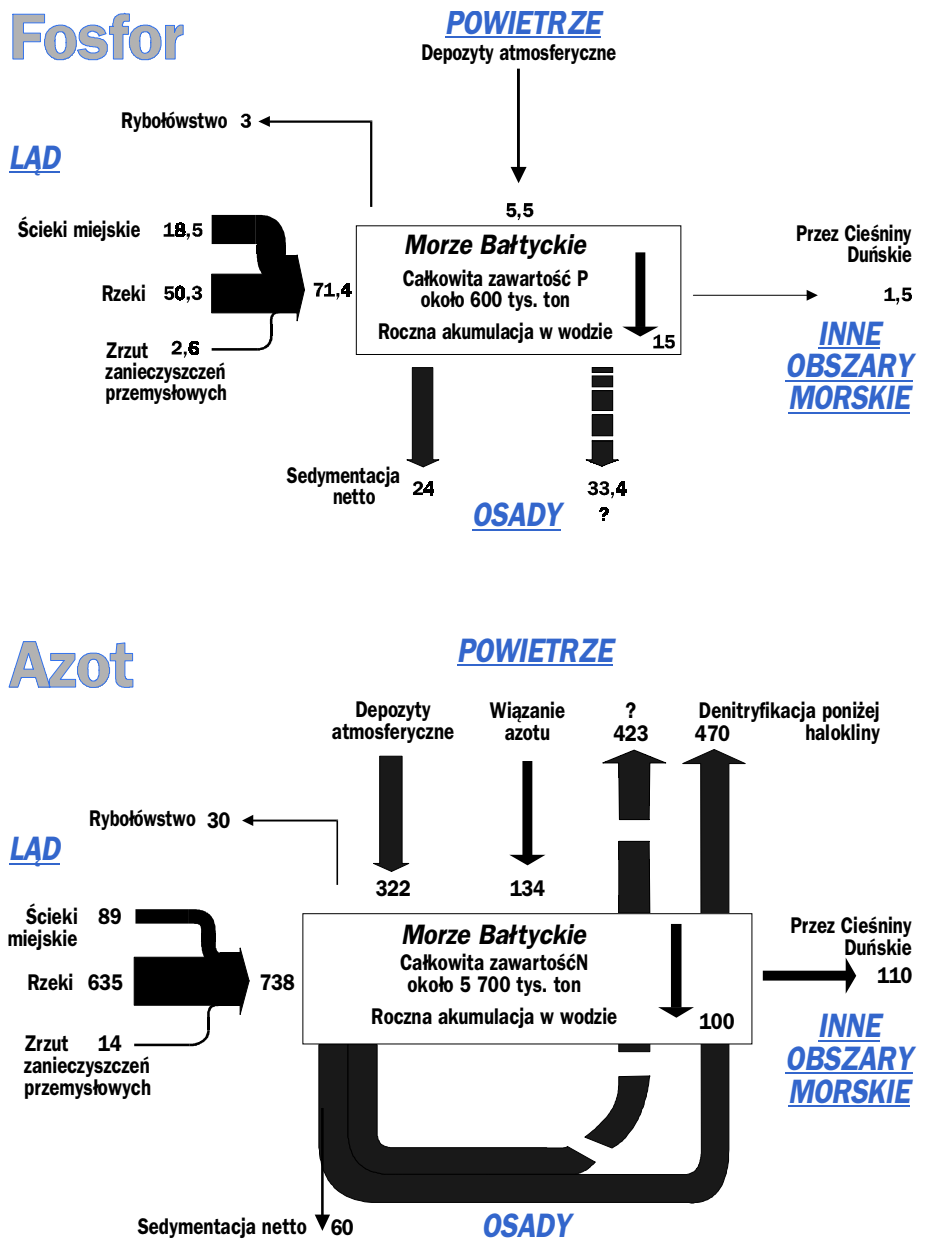
### 3.2. Oceny stężenia

Znaczący, coroczny dopływ składników odzwierciedlają wzrastające stężenia azotu i fosforu w każdym z basenów Morza Bałtyckiego (**Ryc. 5**). Na rycinie przedstawiono również obszary (Baseny Bornholmu, Arkony, Gotlandii, Zatoki Fińskiej), gdzie w ostatnich latach deficyt tlenu w niektórych porach roku wpłynął negatywnie na faunę denną.

Poziom azotu we wszystkich basenach wzrastał począwszy od lat 1960. Dotyczy to również fosforu, za wyjątkiem Zatoki Ryskiej i Botnickiej. Charakteryzując ogólnie sytuację w większych połaciach Bałtyku właściwego w ciągu ostatnich trzydziestu lat zawartość azotu w wodach powierzchniowych wzrosła w okresie zimowym prawie trzykrotnie. W Kattegacie w ostatnim dwudziestoleciu zimowe stężenie fosforu powyżej halokliny wzrosło o 50%, a azotu o 100%.

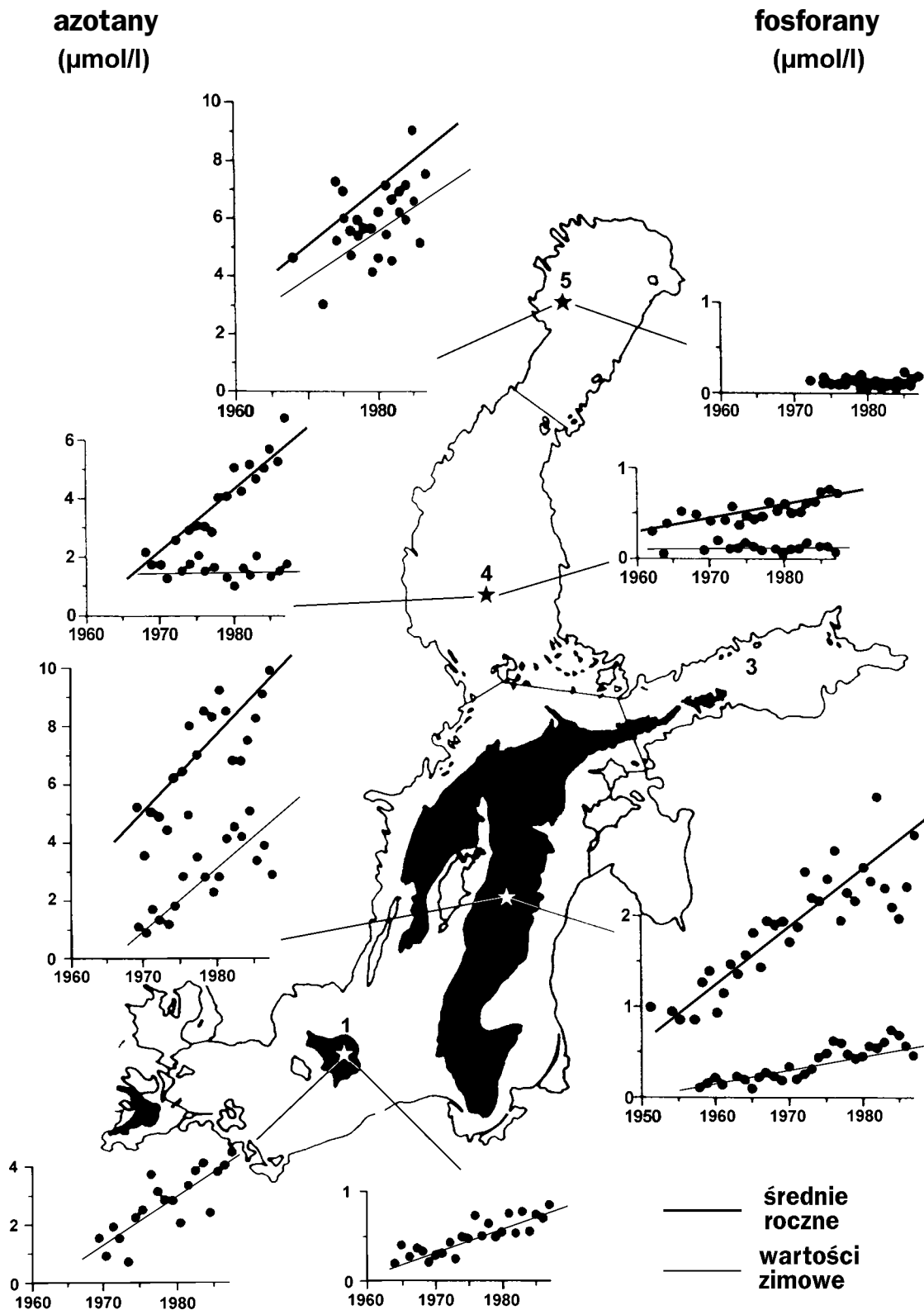
W latach 1958–1969 stężenie fosforu w południowo–zachodniej części Zatoki Kilońskiej wzrosło 1,7 razy, lecz dalej nie zmieniało się aż do roku 1978, by ponownie od 1980 roku znacząco wzrosnąć. W przedziale lat 1962–1984 stężenie rozpuszczonego azotu nieorganicznego utrzymywało się na stałym poziomie. Import z wód powierzchniowych Bałtyku i głębszych wód Kattegatu wydaje się ważniejszy dla kontroli poziomu substancji mineralnych w tych wodach, a ponadto, ogólne procesy akumulacji i uwalniania fosforu z osadów dennych oraz redukcja azotu w procesie denitryfikacji.

Na wzorce regionalnych stężeń wpływa dopływ składników z źródeł zewnętrznych, a także wymiana pomiędzy różnymi zbiornikami oraz ich retencja. Ponieważ większość substancji jest eksportowana z lądu do morza, ich stężenia w wodach przybrzeżnych są wyższe w porównaniu z wodami otwartymi. Można więc spodziewać się iż zmiany biologiczne będą zachodziły wcześniej w strefie brzegowej aniżeli w otwartej części Morza Bałtyckiego.



**Ryc. 4.** Obrót azotu i fosforu w Morzu Bałtyckim, wyrażony w tys. ton/rok [wg Monitor, 1988].





**Ryc. 5.** Szkic Morza Bałtyckiego z zaznaczonymi okresowymi zmianami stężeń składników mineralnych. Najwyższe wartości przedstawiają średnie dla głębokości 100 m (basen Bornholmu nie dołączony), zaś najmniejsze dla zimowych wód powierzchniowych. Obszary zaciemnione w ostatnich latach wykazywały w pewnych okresach warunki beztlenowe.  $\mu\text{mol/l}$  oznacza stężenie danego związku w jednym litrze ( $l$ ) roztworu wody, mol jest masą cząsteczkową tej substancji wyrażonej w gramach. W tym przypadku  $\mu$  (mikro,  $10^{-6}$ ) oznacza milionową część mola. [wg Elmgren, 1989].

## 4.

# JAK EUTROFIZACJA WPŁYWA NA MORZE BAŁTYCKIE

### 4.1. Uwagi ogólne

Ponieważ większość substancji odżywczych dociera z lądu, ich stężenia w wodach przybrzeżnych będą większe aniżeli w wodach otwartych. Oznacza to, że zmiany biologiczne w wyniku eutrofizacji będą pojawiać się częściej w strefach brzegowych aniżeli w dużych obszarach wód otwartych. Trudno na przykład przedstawić udokumentowane statystycznie biologiczne efekty eutrofizacji w wodach otwartych Bałtyku. Nie oznacza to, że takiego efektu nie ma, gdyż powodem jest raczej brak właściwego programu monitoringu.

Podstawy eutrofizacji wód morskich przedstawiono na **Ryc. 1**. Zanim jednak przyjrzymy się wynikom niektórych badań ilustrujących regionalną charakterystykę przedstawimy ogólnie zachodzące zmiany, zwracając główną uwagę na strefę przybrzeżną. Są to:

- zwiększona produkcja pierwotna
- wzrost zakwitów glonów
- zwiększone stężenia chlorofilu
- zwiększone odkładanie materii organicznej w warstwie dennej
- wzrost biomasy makrobentosu powyżej halokliny
- zwiększenie częstotliwości i drastyczności deficytu tlenu w wodach przydennych
- obniżona przejrzystość wody
- zmniejszona głębokość penetracji *Fucus vesiculosus*
- zmniejszenie biomasy makrobentosu poniżej halokliny

Wyobrażenie o skali zmian w ekosystemach Bałtyku może dać ocena ogólnego przepływu energii, wyrażona zmianami ilościowymi węgla organicznego. Oddziaływanie człowieka w XX wieku mogą zilustrować następujące wielkości:

- produkcja pierwotna pelagialu wzrosła o 30–70%
- produkcja zooplanktonu wzrosła o 25%
- wzrost sedymentacji węgla organicznego o 70–190%
- prawie zdwojona produkcja makrobentosu powyżej halokliny
- ponad dziesięciokrotny wzrost odłowu ryb (tylko częściowo spowodowany wzrostem produkcji ryb; głównie w wyniku wzrostu wydajności połowów)
- Braki tlenu w wodach przydennych, co spowodowało zniszczenie makrobentosu na prawie 100 tys. km<sup>2</sup> głębszych stref dennych Bałtyku właściwego i Zatoki Fińskiej.

### 4.2. Eutrofizacja i wzrost glonów

W wielu częściach Bałtyku wpływ eutrofizacji na rośliny jest znaczący. W wodach przybrzeżnych Danii bardziej szczegółowe badania prowadził Uniwersytet w Aarhus. Oceniono, że w fiordach, gdzie odkłada się dużo składników pokarmowych i długim okresie zalegania wody produkcja pierwotna była pięciokrotnie wyższa w porównaniu z dużymi obszarami Kattegatu. Obecne, poważne problemy zdominowane są skutkami nadmiernego wzrostu nitkowatych glonów. Zmiany te charakteryzują się zwiększaniem dominacji pojedynczych gatunków – od wielu gatunków do masowego rozwoju zaledwie kilku z nich. Zwiększa się udział glonów wolno pływających, np. *Ulva lactuca* i glonów epifitycznych (przymocowanych). Te ostatnie mogą ograniczać wzrost i rozwój swojego

gospodarza (np. od pokrywających je epifitów ucierpiała trawa morska *Zostera marina*).

Lista gatunków, które uległy redukcji obejmuje wszystkie zanurzone makrofity. Na przykład, od roku 1971 zniknęły one całkowicie z strefy 17 km Fiordu Randers w Danii. W niektórych wodach przybrzeżnych Kattegatu zawęził się również rozkład pionowy niektórych gatunków, takich jak *Zostera marina*. Eutrofizacja wpłynęła również na wzrost produkcji fitoplanktonu z masowym rozwojem glonów, np. „czerwone fale” lub zakwity glonu *Nodularia*.

Oprócz eutrofizacji inne czynniki mogą uczestniczyć w zmianach roślinności, jak mniejsza intensywność światła bliskich wód przybrzeżnych, którą powoduje wprowadzanie z lądu barwnych cząstek humusu, duże amplitudy zasolenia i fluktuacje poziomu wód.

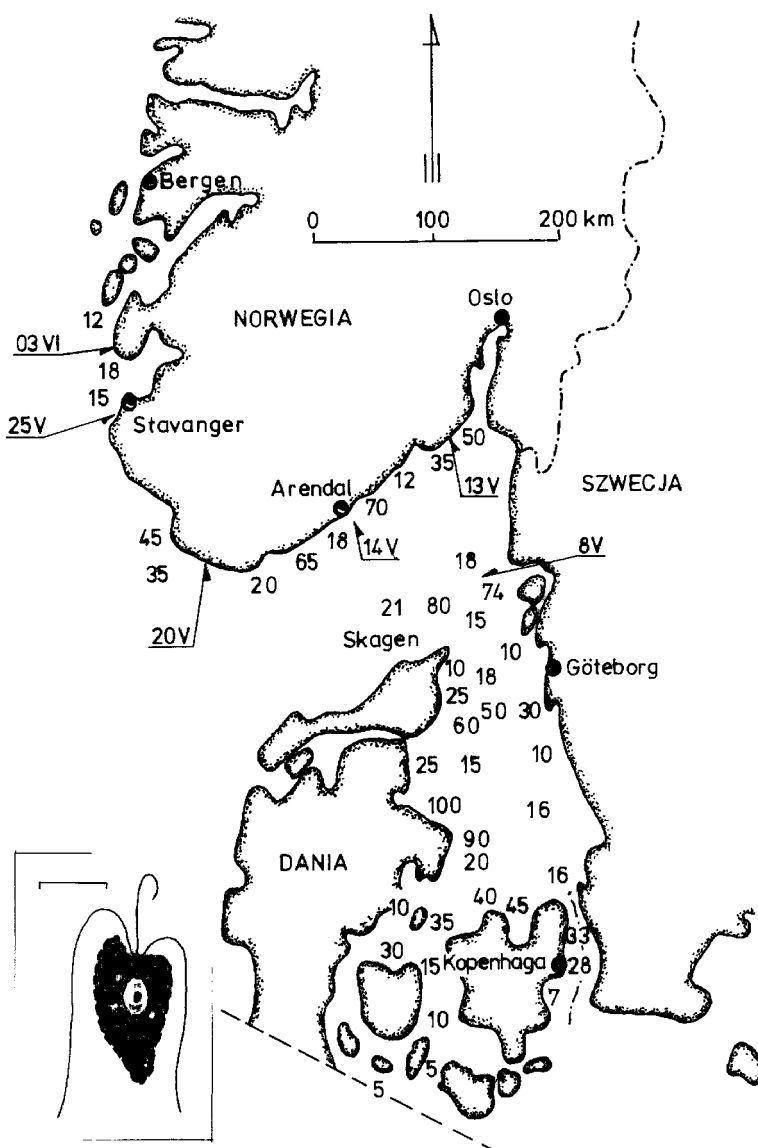
### 4.3. Zakwity glonów

Najbardziej uderzającym skutkiem eutrofizacji są zakwity glonów, kiedy na ogromnych obszarach masowy rozwój drobnych glonów gwałtownie zmniejsza przejrzystość wody i prowadzi okresowo do tworzenia się szumowin i odrażających zapachów. Glony tworzące takie zawiesiny to sinice, które dzięki pęcherzykom powietrza ułatwiającym utrzymanie się w wodzie, łatwo przedostają się do wód powierzchniowych. Taki sposób tworzenia zakwitów zależny jest od trzech warunków: wcześniejszej obecności populacji glonów, znaczącego udziału komórek z wakuolami zawierającymi gaz i stabilności kolumny wody.

Intensywne zakwity glonów notowano na otwartych wodach Bałtyku już od połowy ubiegłego wieku. Badania z końcowych lat tego wieku i początków wieku XX wykazywały masowe występowanie sinic *Nodularia spumigena* i *Aphanizomenon flos-aquae*. Tłumaczono te zakwity jako efekt dopływu składników pokarmowych z rzek i wód przybrzeżnych.

Dzisiaj te same gatunki glonów powodują zakwity, które, jak wykazały obserwacje satelitarne, rozciągają się na szerokich obszarach Bałtyku właściwego. Wiadomo również, że zakwity nie są związane z wodami bogatymi zarówno w azot jak i fosfor. Ponieważ zarówno *N. spumigena* jak i *A. flos-aquae* są zdolne do wiązania azotu z atmosfery, gdy latem fosfor może występować w nadmiarze, lecz brakuje zmineralizowanego azotu zyskują one przewagę w konkurencji z innymi glonami bałtyckimi.

W otwartych wodach Bałtyku i wzdłuż południowych i południowo-wschodnich wybrzeży Szwecji w lecie 1991 roku wystąpił bardzo intensywny zakwit *N. spumigena*. Gatunek ten, i inne uczestniczące w zakwitach sinice, mogą być toksyczne dla zwierząt. *Nodularia* wytwarza peptyd (związek chemiczny zbudowany z aminokwasów), będący hepatotoksyną, która powoduje degenerację komórek wą-



**Ryc. 6.** Zagęszczenie *Chrysochromulina polylepis* (w mln komórek/l) w czasie zakwitu z 1988 roku. Daty wskazują jak postępowała migracja glonów [wg Berge i wsp., oraz Dahl (zmodyfikowane), *The Norwegian Journal Vann*, 3B, 1988].

trobowych, działa rakotwórczo i prowadzi do śmierci na skutek niewydolności wątrobowej. Śmiertelność psów wywołaną zakwitami *Nodularia* notowano w Danii, Gotlandii a także południowych i południowo-wschodnich wybrzeżach Szwecji. Na innych obszarach toksyczność glonów wykazano dla koni, krów, owiec, świń, ptaków i ryb. U ludzi zaburzenia żołądkowe, bóle głowy, egzema, zapalenia spojówek są także wynikiem zakwitów *Nodularia*.

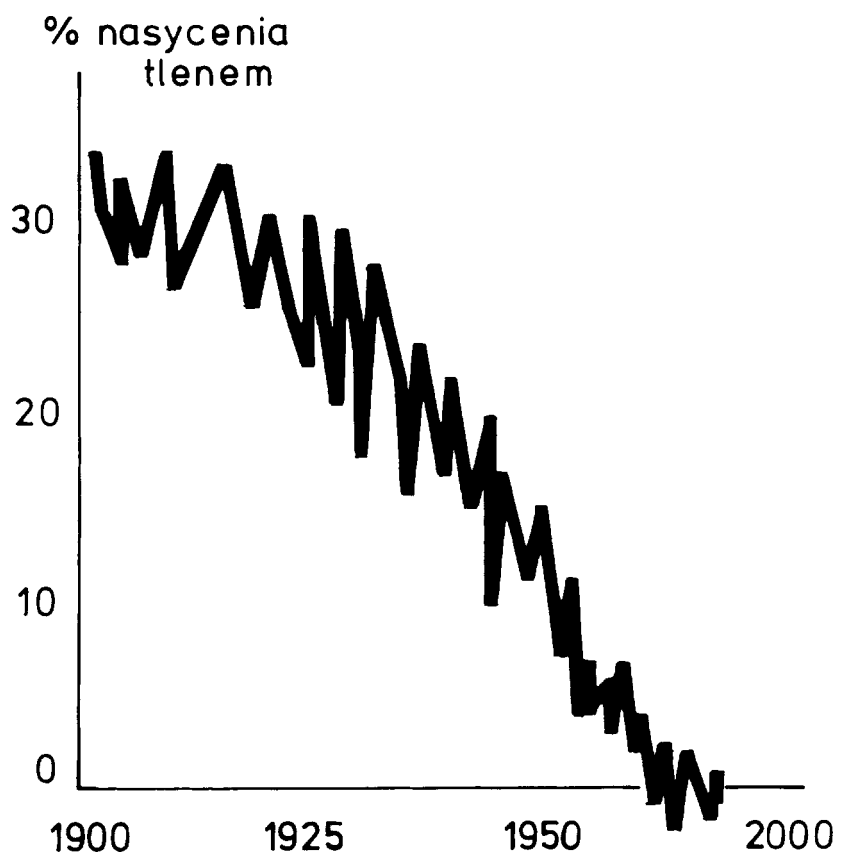
W latach 1980. szereg silnych zakwitów innych niż *Nodularia* toksycznych gatunków: bruzdnic *Prorocentrum sp.*, *Dinophysis*, oraz *Dichtyoa* (*Chrysophyceae*) i *Prymnesium* wraz z *Chrysochromulina* (*Chrysmnesiopyceae*) stwierdzono w Kattegacie i w innych bardziej zasolonych partiach Morza Bałtyckiego. Niektóre z ostatnich zakwitów spowodowały śmierć organizmów pelagicznych, zarówno roślin jak i zwierząt. Najbardziej znany bardzo rozległy i ostry zakwit *Chrysochromulina* w roku 1988 wzdłuż wybrzeży Danii, Szwecji i Norwegii sięgnął daleko, aż do Bergen w Norwegii (Ryc. 6).

Zakwity glonów rejestruje się obecnie w wielu różnych miejscach Morza Bałtyckiego a także na jego wodach otwartych. Jest oczywiste, że warunki pokarmowe znakomicie służą wielu gatunkom tworzącym zakwity. Utrzymują się również lokalne ogniska dla kolejnych masowych zakwitów. Możemy więc przewidywać, że silne zakwity będą pojawiać się w dalszym ciągu, a wśród nich wiele będzie miało toksyczny charakter.

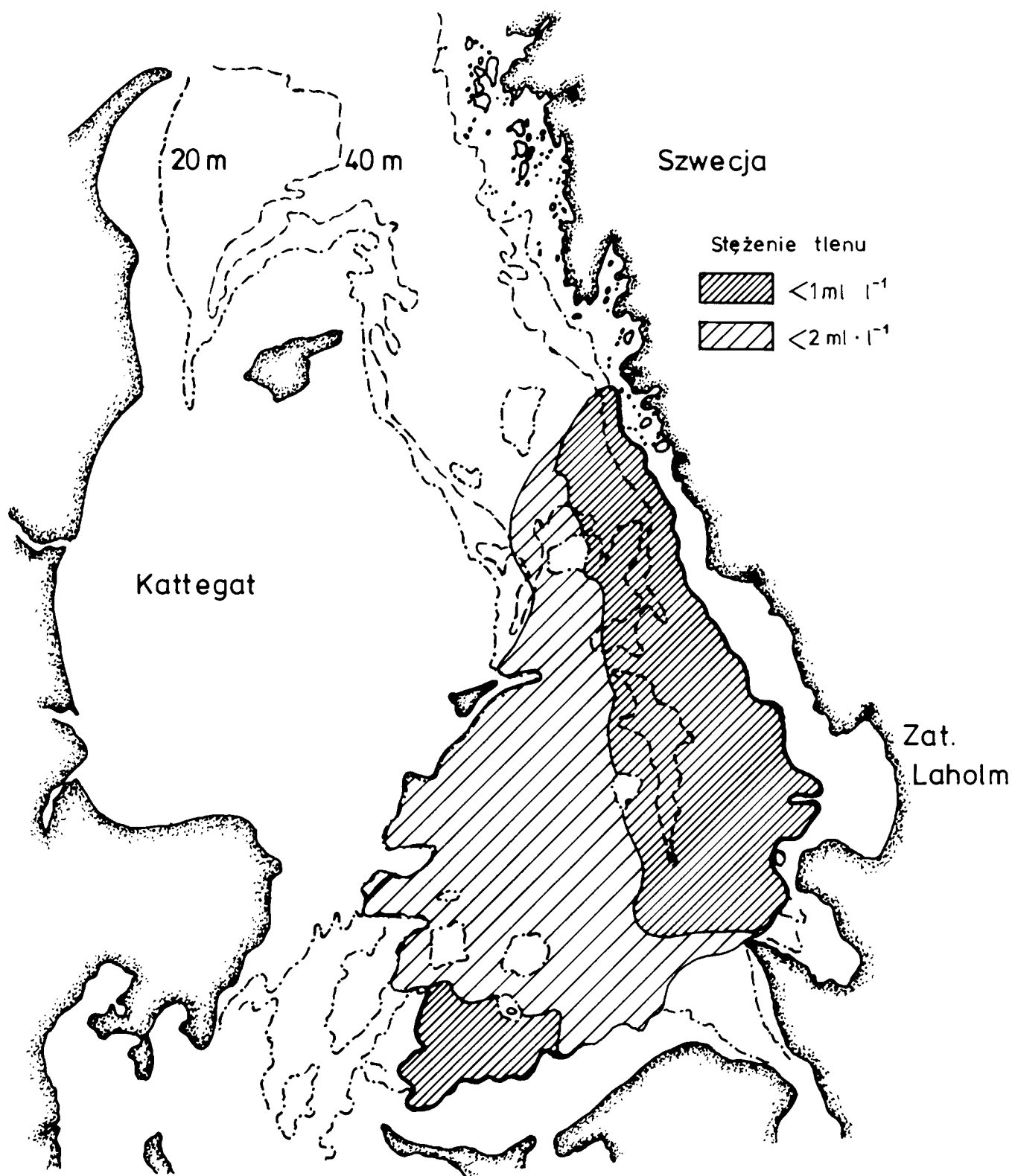
#### 4.4. Niedosyt tlenu w warstwach dennych

Dzisiaj, jednym z ważniejszych, palących problemów Morza Bałtyckiego jest niedostateczne natlenienie głębszych wód (Ryc. 7). Z drugiej zaś strony, tlen rozpuszczony w wodach powierzchniowych, dyfundując z atmosfery wraz z tlenem wytwarzanym podczas fotosyntezy (patrz Rozdział 1.3.), tworzą warunki prawie pełnego wysycenia tlenem. Na głębokości 20 m i głębiej w fotosyntezie powstaje mniej tlenu niż zużywa się podczas procesów oddychania i bakteryjnego rozkładu opadającej materii organicznej.

Zużycie tlenu w wodach głębszych prowadzi do jego znacznych ubytków o ile nie zostanie uzupełniony przez mieszanie dobrze wysyconych wód powierzchniowych z głębszymi warstwami. Takie mieszanie może zachodzić na przykład w Zatoce Botnickiej, gdy cyrkulacja wód stymulowana jest przez sztormy jesienne. Pionowe mieszanie wód jesienią może więc doprowadzić do rozmieszczenia natlenionych wód w całym słupie wody. Jednakże w Bałtyku właściwym i Kattegacie, gdzie gęstość wody zależy bardziej od zasolenia niż temperatury, wyraźne halokliny tworzą prawie nieprzepuszczalne bariery dla pionowego mieszania się wód. W efekcie do tych wód dochodzi ograniczona ilość tlenu, za to spore ilości materii organicznej (np. obumarły plankton, skoagulowana materia organiczna), które opadają z warstw powierzchniowych. Zużycie tlenu przewyższa tam jego dopływ z wa-



Ryc. 7. Malejące stężenie tlenu w najgłębszych partiach Bałtyku właściwego. W ciągu ostatniego dziesięciolecia siarkowódór zastąpił tlen i przestały egzystować wszystkie wyższe formy życiowe [Wg F. Wulff].



**Ryc. 8.** Rozmieszczenie przestrzenne niskiego stężenia tlenu w południowym Kattegacie, wrzesień, 1988. Próbkę pobierano około 0,5–1,0 m powyżej powierzchni osadu na głębokościach 20–60 m [Według Baden i wsp., 1990].



rstw powierzchniowych, prowadząc do stopniowego niedotlenienia. Kiedy tlen prawie się wyczerpie, bakterie zaczynają wykorzystywać inne substancje dla procesów metabolicznych. Przede wszystkim azotany, które przekształcane są w azot atmosferyczny, a później, gdy azotanów już brak, siarczany, które zamieniają w siarkowodór ( $H_2S$ ). Uwolniony tlen bakterie wykorzystują do rozkładu materii organicznej.

Brak tlenu jest niekorzystny w skutkach dla zwierząt wodnych. Kiedy stężenie rozpuszczonego tlenu osiągnie poziom około 2 mg/l, ryby podejmują wędrówkę do obszarów lepiej wysyconych tlenem. W stężeniach < 2 mg/l zagrożona jest fauna denna i ginie wiele wrażliwszych gatunków. Gdy cały wolny tlen zostanie zużyty i zastąpiony siarkowodorem, giną również organizmy wyższe. Przy dominacji toksycznego  $H_2S$ , zamiera życie w warstwie dennej i przerwana jest egzystencja wszystkich wyższych form życia. (Konsekwencje braku tlenu ilustruje **Ryc. 11**).

Niestety, taką sytuację mamy obecnie w głębszych warstwach Bałtyku właściwego, gdzie na obszarze prawie 100 000 km<sup>2</sup> dna brakuje tlenu. Obszary, z negatywnymi skutkami braku tlenu na faunę denną przedstawia **Ryc. 5**.

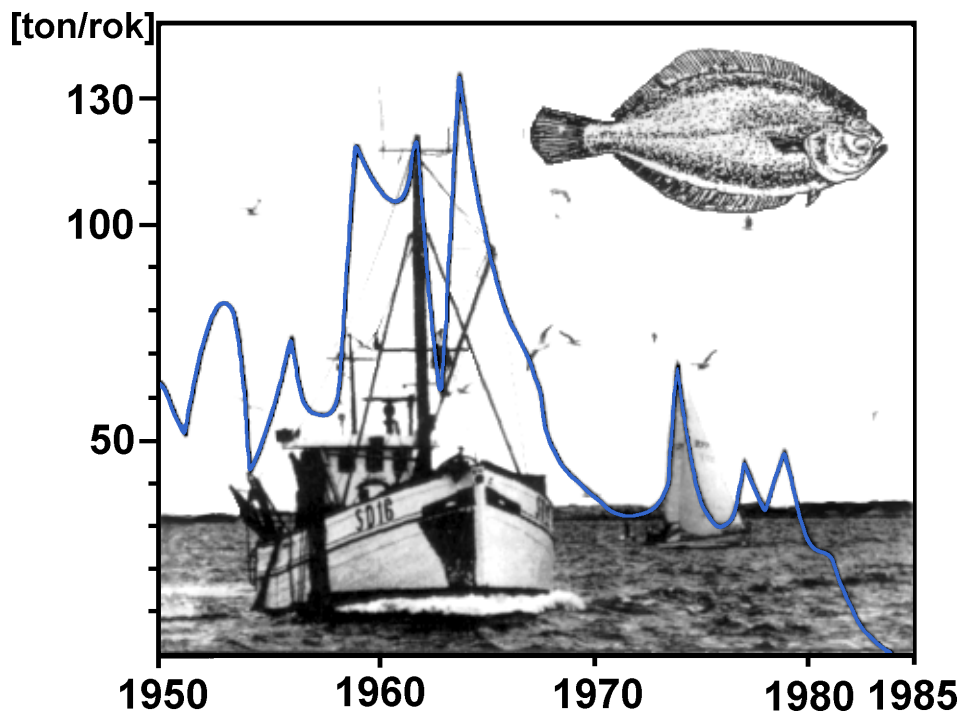
Niewystarczająca wymiana wód i narastająca produkcja materii organicznej spowodowała, że w obecnym stuleciu stężenie tlenu obniżyło się we wszystkich głębszych partiach Bałtyku właściwego. Także głębsze wody Kattegatu mają późnym latem i jesienią obniżoną zawartość tlenu (**Ryc. 8**). Zarówno w Morzu Bałtyckim jak i w Kattegacie większe jest obecnie zużycie tlenu aniżeli kilkadziesiąt lat temu.

## 4.5. Eutrofizacja i populacje ryb

W ostatnich 50 latach całkowite połowy ryb w Morzu Bałtyckim wzrosło dziesięciokrotnie. Złożyło się na to wiele powodów. Przede wszystkim udoskonalenie technicznych środków służących połowom. Niemniej ważne były również inne czynniki, jak obniżenie liczebności fok, co wpłynęło na zmniejszenie drapieżnictwa względem ryb. Eutrofizacja wpłynęła głównie na wzrost produktywności morza, w tym także produkcję ryb. Jednakże eutrofizacja może wywoływać zmiany w środowisku negatywne dla populacji ryb. Dlatego dorsz (*Gadus morhua*) ograniczył rozród do obszarów, gdzie zasolenie jest wyższe niż 10‰, a więc wód, jedynie niektórych głębszych basenów.

W takich basenach ostry brak tlenu ogranicza lub całkowicie uniemożliwia reprodukcję. Niedobory tlenu zagrażają także płastugom, co ilustrują ich obniżone połowy w zatoce Køge (**Ryc. 9**). W odróżnieniu od dorszy śledzie (*Clupea harengus*) rozmnażają się w wodach przybrzeżnych i składają ikrę w roślinności litoralnej. Nasilony wzrost nitkowatych brunatnic może wzmacniać toksyczne działanie ich wydzielin względem ikry śledzia.

Młode śledzie odżywiają się zazwyczaj zooplanktonem, podczas gdy pokarm dużych śledzi stanowią w znacznym stopniu organizmy denne.



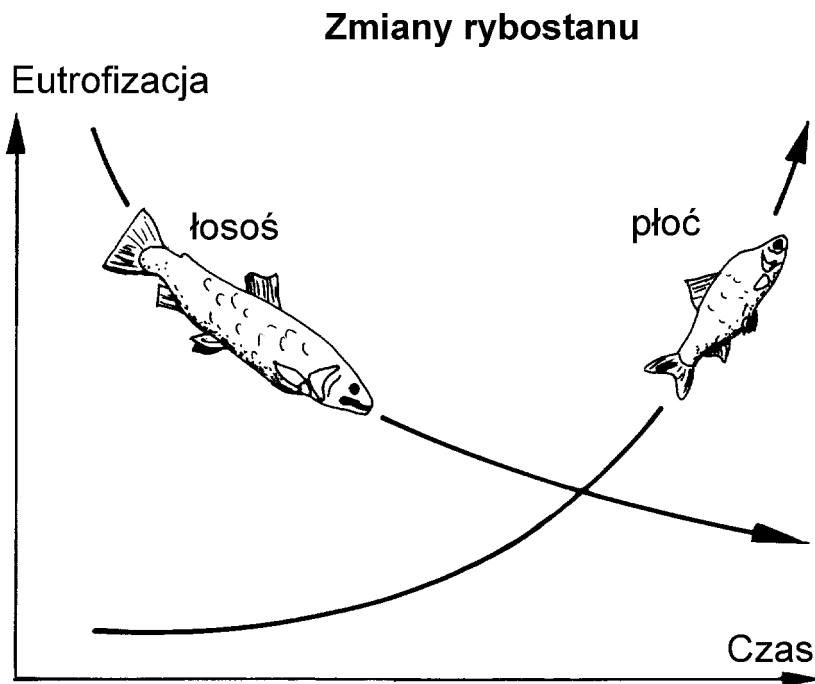
**Ryc. 9.** Zmniejszanie połowów flądry spowodowane spadkiem zawartości tlenu i zanieczyszczeniami przemysłowymi w Zatoce Køge, w Sundzie [Informacja Szwedzkiej Komisji Ochrony Środowiska, The Sound Commission, 1989].



Oznacza to, że eutrofizacja z jednej strony stymuluje z drugiej zaś hamuje wzrost śledzia; stymuluje poprzez wzrost produkcji zooplanktonu, hamuje przez eliminację fauny dennej wywołaną brakiem tlenu.

W zeutrofizowanych wodach archipelagów zmiany fauny słodkowodnej są podobne jak w przypadku jezior. Stwierdzono obniżenie liczebności troci (*Salmo trutta*), sielawy (*Coregonus sp.*), miętusa (*Lota lota*) i szczupaka (*Esox lucius*). Wzrosła również liczebność płoci (*Rutilus rutilus*), krapia (*Blicca bjoerkna*) i *Gymnocephalus cernua*. Schematycznie zmiany te przedstawia **Ryc. 10**.

Podsumowując, na podstawie obserwacji w jeziorach, możemy stwierdzić, że eutrofizacja w Morzu Bałtyckim może być powodem zmian stwierdzanych w populacjach ryb. Jednakże wyciągnięcie bardziej oczywistych wniosków odnośnie oddziaływań eutrofizacji na stan ryb w Bałtyku uniemożliwia brak długoterminowych badań



**Ryc. 10.** W eutroficznych wodach archipelagów liczebność ryb słodkowodnych, jak troć (*Salmo trutta*) maleje, a innych, na przykład płoc (*Rutilus rutilus*) wzrasta.

## 4.6. Zmiany lokalne

Rozwój eutrofizacji ma odmienny przebieg w różnych obszarach Morza Bałtyckiego. Poniżej przedstawimy niektóre z najważniejszych skutków:

W latach 1970. w obszarach morskich południowo–zachodniej Finlandii morskich porosty, *Fucus*, przerastały namnażające się intensywnie nitkowate glony, głównie *Pilayella* i *Cladophora*. Przykrywa glonów rozszerzała ponadto warstwa nitkowatego detrytus, uniemożliwiając odnawianie się morskich porostów. Pozostałe żyjące rośliny uszkodziła przez wyjadanie ogromna ilość skorupiaków równonogich. Takie zaburzenie w zespołach litoralu i obniżenie liczebności *Fucus* na północnych skalistych wybrzeżach Bałtyku ilustrują jak eutrofizacja może zmieniać lub uszkodzić to co stanowiło wcześniej bardziej pierwotny ekosystem.

Wody przybrzeżne północnej Estonii są głównie zanieczyszczone przez nietoksyczne ścieki i wody odpadowe z przemysłu spożywczego, rolnictwa a także z hodowli bydła i trzody. Wszystkie te różnorodne formy zanieczyszczeń prowadzą do eutrofizacji wód przybrzeżnych. Stwierdzono typowe zmiany w składzie gatunkowym roślin: masowe pojawianie się nitkowatych zielenic i całe warstwy glonów na powierzchni płytkich wód i oczek. W przybrzeżnych wodach Zatoki Fińskiej zanieczyszczenia przemysłowe wywołują głównie efekty toksyczne prowadzące do eliminacji roślinności z wewnętrznych części wielu zatok.

Zatoka Gdańska uznawana jest jako najbardziej zagrożony obszar wodny Bałtyku, głównie z powodu zrzutów zanieczyszczeń z Wisły. Zaobserwowano na tym obszarze szereg efektów biologicznych, które dokumentują gwałtowne zmiany w Zatoce Puckiej, płytkim basenie (5 m głębokości), do pewnego stopnia odizolowanym od wód zatoki:

W składzie florystycznym zmniejsza się sukcesywnie występowanie *Zostera marina*, *Furcellaria fastigiata* i *Fucus vesiculosus*. Od roku 1984 dwa ostatnie gatunki praktycznie zniknęły i zastąpiły je gatunki z rodziny *Ectocarpaceae*. Także fauna denna płytkich wód wykazuje zaburzenia: zmniejszyła się liczba skorupiaków (*Idothea*, *Gammaridae*) wzrosła natomiast małży (*Mytilus*, *Macoma*,

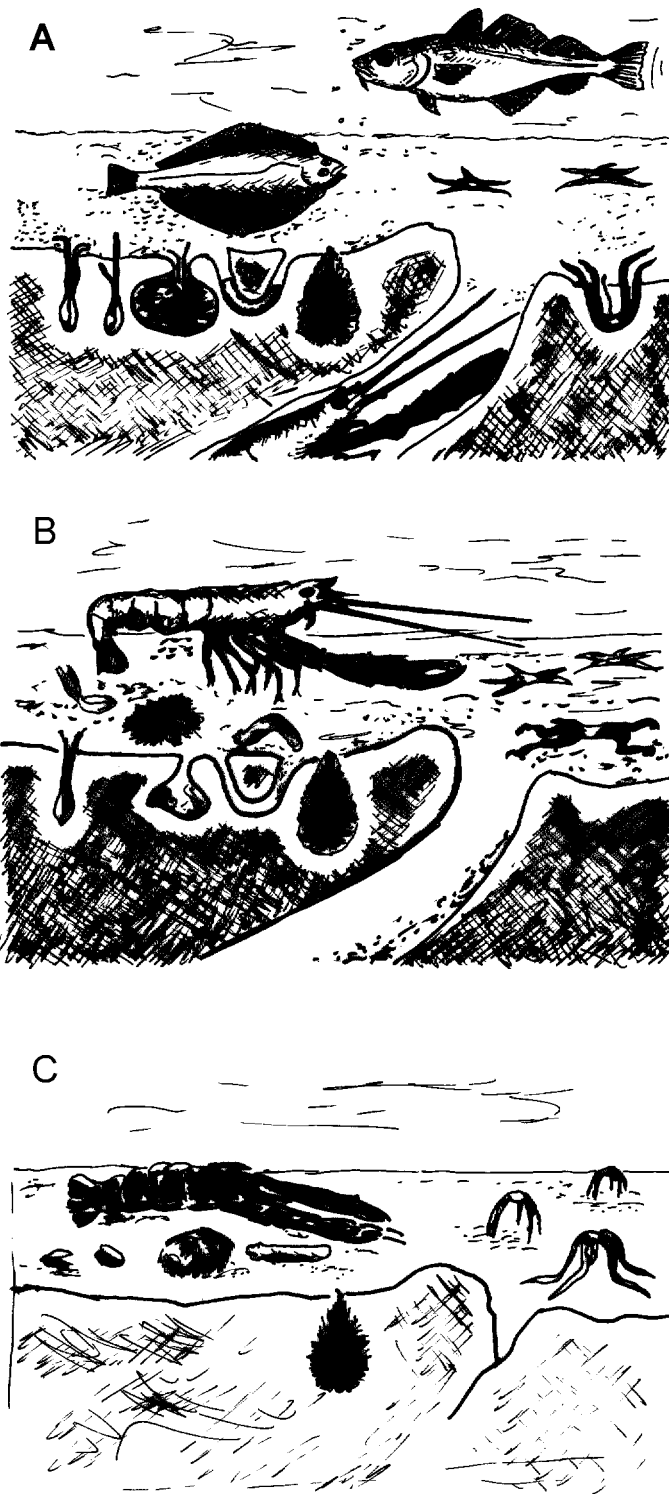
*Cardium*). Zmiany nastąpiły także w populacjach ryb jak gwałtowny spadek pojawiania się troci morskiej, łososia i węgorza, przy równoczesnym wzroście płoci.

Zmieniły się również pozostałe partie Zatoki Gdańskiej z tendencjami podobnymi do wyżej opisanych. Ilustracją gwałtownego obniżenia jakości wody może być zmiana rozkładu pionowego fitobentosu, od głębokości 25 m w latach 1920., do 6 m obecnie. Wzrost stężeń składników odżywczych prowadzący do wzrostu biomasy planktonu mógł być spowodowany obniżonym przenikaniem światła i zwiększonym obszarem zasięgu roślinności bentosu.

Himmerfjärd to eutroficzny obszar przybrzeżny północnej części Bałtyku właściwego. Produkcja pierwotna może przewyższać tam o 70% wielkości stwierdzane na porównywalnych stanowiskach pełnego morza. Taki wzrost produkcji ma miejsce głównie w okresie wiosennym, w pewnych granicach również jesienią, natomiast latem produkcja pierwotna zmienia się w niewielkim stopniu. W przybliżeniu, podwojenie wielkości produkcji pierwotnej w Himmerfjärd zwiększa biomasa fauny dennej około 10 razy, głównie przez *Macoma balthica*.

Otwarta Zatoka Kilońska reprezentuje część Bałtyku, gdzie wody wypływają na powierzchnię a wody z Kattegatu wpływają blisko strefy dennej. Komplikuje to możliwość dokonywania oceny w tej zatoce, gdyż koncentracja składników pokarmowych jest wypadkową obu morskich zbiorników, centralnego Bałtyku i Kattegatu. Warunki w fiordach i estuariach mają różnią się.

W otwartej Zatoce Kilońskiej stwierdziliśmy w latach 1964–1984 więcej jak dwukrotny wzrost fitoplanktonu, głównie drobnych wiciowców. Z naszego punktu widzenia także tam zaszły niekorzystne zmiany w składzie gatunkowym. W roku 1983 zaobserwowano po raz pierwszy masowy rozwój bruzdnicy *Prorocentrum minimum*, gatunku, który czasami może czasami stać się toksycznym. Zestawienia danych z lat 1960 i 1980 wykazały czterokrotny wzrost biomasy makrofauny, głównie rogowca (*Macoma*), w osadach piaszczystych na głębokościach 9 i 13 m. Głównym powodem było prawdopodobnie obniżanie się stężenia tlenu, szczególnie po roku 1965. Od lat 1980. warunki tlenowe w wodach głębokich każdego roku są bardzo złe.



**Ryc. 11.** Niektóre dominujące gatunki makrobentosu i ryby Kattegatu w warunkach normalnego natlenienia (A), przy wysyceniu tlenem w 15% (B) i wysyceniu tlenem w 5–10% (C) [Wg Baden i wsp., 1990].

## 4.7. Oddziaływania w Kattegacie

Przez ostatnie 10 lat Kattegat znacznie ucierpiał z powodu silnej eutrofizacji. Większość szwedzkich badań, prowadzonych w tym okresie nad skutkami eutrofizacji, dotyczyła obszarów zatoki Laholm i południowo-wschodniego Kattegatu. Stwierdzono bardzo silne zmiany; produkcja pierwotna w zewnętrznej części zatoki Laholm była w latach 1980. 25–30% wyższa aniżeli w Kattegacie w latach 1970.

W ostatnich dziesięcioleciach pojawiło się szereg zakwitów glonów; wiosenne zakwity okrzemek i jesienne zakwity bruzdnic. Najbardziej spektakularnym okazał się niszczący masowy pojaw bardzo toksycznych wiciowców *Chrysochromulina polylepis* wczesną wiosną 1988 roku (**Ryc. 6**). Od połowy lat 1970. wzrosła liczebność nitkowatych i innych zielenic (*Cladophora sp.* i *Enteromorpha sp.*), któremu towarzyszył spadek, a w końcu zanik gatunków *Fucus*. Podobne zmiany obserwowano w innych miejscach wzdłuż wybrzeży Szwecji. Powyżej halokliny, małże *Cardium edule* i *Mya arenaria*, rozgwieżdża *Asterias rubens*, cechowały się umiarkowanym, do silnego, wzrostem śmiertelności. Poniżej halokliny stwierdzano masowe wymieranie małża *Abra alba*. Homar nerczan *Nephros norvegicus* jest ważnym gospodarczo gatunkiem dziesięcionogów, które żyją w norach gromadzących się warstw dennych (**Ryc. 11**) W połowie lat 1980. 50% wśród odłowionych homarów stanowiły ginące lub martwe osobniki.

Zmieniły się także połowy ryb. W latach 1980tych całkowite połowy dorsza i flądry, w szczególności płastugi (**Ryc. 9**) obniżyły się w porównaniu z latami 1960–tymi, odpowiednio o 40% i 70%.

Uważa się, że powodem tych dramatycznych zmian jest niedostatek tlenu. W latach 1980. niskie stężenia tego gazu (hipoksja, poniżej 2 ml tlenu/l) późnym latem i jesienią notowano każdego roku w południowo-wschodnim Kattegacie. Poważne skutki biologiczne są wynikiem rozkładu odkładającej się materii organicznej, włączając biomasę fitoplanktonu. Ostra haloklina ma również swój udział w ubogiej wentylacji, prowadzącej do warunków beztlenowych.

## 5.

# WYKORZYSTANIE I OBIEG SKŁADNIKÓW POKARMOWYCH W SPOŁECZNOŚCI

### 5.1. Miasta – oczyszczanie ścieków

Zużyte wody municypalne to ważne źródło wyrzutu składników pokarmowych odbierane przez jeziora i rzeki, a w końcu Morze Bałtyckie. Z początkiem naszego wieku w niektórych miastach zainstalowano systemy oczyszczające, głównie z powodów sanitarnych. W miarę rozwoju urbanizacji szkodliwe dla ich odbiorców skutki ścieków były bardziej widoczne i ścieki zaczęto kierować do oczyszczalni. Od, początkowo, prostych oczyszczalni mechanicznych wiele obecnie funkcjonujących ma zarówno etapy oczyszczania biologicznego (usuwanie zawiesiny organicznej) jak i chemicznego (wytrącanie fosforu). Źródła zanieczyszczeń organicznych i ścieki kanalizacyjne są odpadami pochodzenia komunalnego. Człowiek wydala fosfor w ilości około 1,5 g dziennie na osobę. Stężenia w ściekach wzrosły gwałtownie od połowy lat 1950., wraz z wprowadzeniem środków piorących zawierających fosfor. Oczywiście człowiek wydala również azot, głównie w postaci mocznika, do poziomu sięgającego 15 g dziennie na osobę.

Wielkości azotu i fosforu w zrzutach do Morza Bałtyckiego podano w **Tab. 1**. Bezpośredni wyrzut z miast do morza to jedynie 10% dla azotu i 15% dla fosforu, a jeszcze mniej pochodzi z przemysłu. Jednakże wartości te winno się dodać do ilości wprowadzanej z miast do rzek w obszarze zlewni, a te wielkości są już znaczące. Ścieki są głównym źródłem emisji fosforu do Bałtyku. Zaawansowanie techniczne oczyszczalni ścieków w regionie Bałtyku wykazuje znaczące różnicowanie. Wiele miejscowości, szczególnie we wschodniej części obszaru nie posiada wcale oczyszczalni ścieków. Na przykład Warszawa, największe miasto w tym regionie, miała zaledwie jedną oczyszczalnię ścieków. W zachodniej części Morza Bałtyckiego sytuacja jest odmienna, z wieloma oczyszczalniami ścieków i trójstopniową procedurą redukcji BZT (biologicznego zapotrzebowania na tlen) do 15 g/m<sup>3</sup> lub niższym.

W miarę rozwoju urbanizacji – w Szwecji około 85% populacji żyje obecnie w miastach – bardzo ważnym problemem staje się oczyszczanie ścieków dla kontroli ich wyrzutu do Morza Bałtyckiego. Dlatego więc konieczność zmniejszenia eutrofizacji w Bałtyku może być także powodem, dla którego należy zwrócić uwagę na usuwanie azotu w procesach oczyszczania. Doświadczenia z usuwaniem azotu prowadzi się na pełną skalę w szwedzkich oczyszczalniach ścieków. W jednym z doświadczeń można było usunąć 12 g azotu z 1 m<sup>3</sup>, gdy czas zalegania wody wynosił 8,4 godziny. Wykorzystano metody biologiczne obejmujące zarówno procesy nitryfikacji jak i denitryfikacji. W wielu oczyszczalniach zaawansowane są już prace nad oczyszczaniem rzędu 15 g N/m<sup>3</sup>.

### 5.2. Ruch komunikacyjny – samochody i transport

Znaczna część azotu z tak zwanych niepunktowych źródeł pochodzi ze spalin samochodowych i spalania naturalnych kopalin dla celów energetycznych. W ten sposób gromadzi się w powietrzu rejonu Morza Bałtyckiego do 50% całkowitego azotu. Nie znamy wielkości pochodzących z transportu morskiego i lotniczego, lecz przypuszcza się, że udział statków w tym względzie jest także znaczący.



Obecnie rozwój motoryzacji jest bardzo silny. Wzrasta liczba samochodów. W Europie Zachodniej na 1 000 mieszkańców przypada około 350 samochodów. Dane dla Polski podają, że jest zaledwie 80 pojazdów na tysiąc mieszkańców, (obecnie znacznie więcej – *przyp. tłum.*), lecz znacząco rozwija się eksport używanych samochodów z zachodnich do wschodnich części rejonu Bałtyku.

Można by się spodziewać obniżenia emisji tlenków azotu wraz z instalacją katalizatorów spalin, lecz tylko w ograniczonym zakresie. W świetle wyliczeń Szwedzkiej Komisji Ochrony Środowiska obniżenie może sięgać nie więcej jak 20–35%. Obecnie w Szwecji około 25% samochodów jest wyposażonych w katalizatory spalin, lecz oczywiście używane samochody, które eksportuje się do wschodnich krajów Bałtyku takich katalizatorów z reguły nie mają. Dla ograniczenia emisji tlenków azotu ważne jest również, by samochody były właściwie eksploatowane. Alternatywne działania, które prowadziły by do zmniejszenia ilości spalin, takie jak używanie samochodów o napędzie elektrycznym lub generalnie zmniejszenie wykorzystania samochodów, nie wchodzi w rachubę.

Jest bardzo prawdopodobne, że rozwój przemysłowy krajów części wschodniej Bałtyku prowadzić będzie do wzrostu produkcji i zapotrzebowania na energię. Nie musi to prowadzić do zwiększenia zanieczyszczenia tlenkami azotu ze spalania kopalin w elektrowniach stosujących węgiel lub mazut. Jednakże dostępne technologie usuwania tlenków azotu ze spalin nie znalazły jeszcze szerokiego zastosowania.



*Przykłady użycia i uwalniania substancji mineralnych we współczesnym społeczeństwie. [Foto.: Powyżej: Anders Lindh / Tiofoto (ruch uliczny) oraz Poniżej: Ulf Sjöstedt / Tiofoto (uprawy rolne)].*



### 5.3. Rolnictwo

Rolnictwo w społeczeństwie zarówno produkuje jak i zużywa składniki odżywcze. Zastosowanie nawozów jest wysoce wydajnym środkiem zwiększającym plony. W Szwecji stosuje się obecnie średnio 80 kg azotu i 15 kg fosforu na hektar. Większość z tego jest wiązana w uprawach i będzie pokarmem. Dodatkowa część jest związana z nie wykorzystywanymi częściami uprawy, na przykład w słomie i korzeniach a część także przenika do otoczenia. Inną część upraw wykorzystuje się na paszę, która w ostateczności zamieniana jest na nawóz lub mocz, względnie jest pożywieniem lub jest produktem przetwórstwa mięsnego. Hodowla na skalę przemysłową, na przykład produkcja świń wielu dużymi jednostkami, znacząco wzrosła w tym rejonie.

Przenikanie azotu i fosforu pochodzącego z tych źródeł do otaczającego środowiska jest znaczne. W Danii szacuje się, że fosfor przedostający się do Morza Bałtyckiego w 21–23% pochodzi z rolnictwa. W Szwecji odpowiadająca wartość sięga 13%. Największy udział ma fosfor przenikający z niepunktowych źródeł, np. pól uprawnych. Fosfor jest wymywany z powierzchni jako związany z cząstkami gleby lub jest rozpuszczony w odprowadzanej wodzie. Straty fosforu zachodzą nieregularnie, głównie w trakcie ulewnych deszczy na zamarzniętej glebie. Zmierzenie wycieku fosforu jest bardzo trudne, lecz typowa wartość dla Szwecji odpowiada około 0,5 kg z hektara na rok.

Oprócz udziału niepunktowych źródeł znaczącymi komponentami całkowitych strat fosforu z terenów rolniczych są źródła punktowe, takie jak stajnie, ścieki z farm, silosy, detergenty stosowane podczas udoju mleka, itp.

Straty azotu pochodzenia rolniczego są wyższe aniżeli fosforu. Zwiększone zużycie rolniczych środków chemicznych stwarza problemy dla środowiska, nie tylko w postaci eutrofizacji odbierających je wód, lecz także przez obniżenie jakości wód gruntowych, w niektórych miejscach, prowadząc w studniach do wzrostu azotanów do toksycznego poziomu. Skala tych oddziaływań zależy od lokalnych warunków klimatycznych, rodzaju gleby i warunków rolniczych. Ważną przyczyną wycieku azotu jest niewłaściwe obchodzenie się z obornikiem, co jest głównym źródłem tego wycieku. Główny powód to jego rozpryskiwanie w za dużych stężeniach na małych powierzchniach zamarzniętej gleby. Z hektara pól południowej Szwecji, gdzie gnojówka rozprowadzana jest jesienią, wycieka w ten sposób aż 167 kg azotu. Największe udziały w wprowadzanych do Bałtyku składnikach pokarmowych pochodzenia roślinnego mają kraje, gdzie gnojowicy stosuje się w większych proporcjach aniżeli nawozy przemysłowe.

Nie zawsze istnieje związek czasowy między źródłem zanieczyszczenia a jego przenikaniem z pól uprawnych do określonego środowiska. Jest to jeden z powodów, dlaczego zachodzi wyciekanie azotu. Na przykład, nawóz stosuje się zazwyczaj w pojedynczych porcjach w danym okresie, powiedzmy wiosną, kiedy rośliny nie pobierają wiele azotu. Ponadto, rozkład i mineralizacja azotu związanego organicznie w glebie zachodzi zazwyczaj w okresie kiedy nie zbiera się plonów, zanim gleba nie stanie się zimą zbyt oziębiona. Jest to powód dla którego stosuje się poplony, dla związania uwolnionego azotu i pozostałości azotu po zbiorze właściwym, jako jeden z najlepszych sposobów przeciwdziałania wyciekowi azotu. Stosując te metody można wielokrotnie zmniejszyć stężenie azotu w odprowadzanych wodach. Innym, bardzo wydajnym sposobem na zmniejszenie wycieku azotu jest próba dostosowania poziomu nawożenia do wielkości odpowiadających zapotrzebowaniu roślin. Badania polowe wykazały dobitnie, że wyciekanie znacząco wzrasta kiedy stosuje się nawozy w ilościach przewyższających możliwość ich pobrania przez rośliny uprawne. Innym możliwym sposobem jest ograniczenie produkcji mięsa. Obecnie Polska i generalnie kraje wschodnioeuropejskie są zaliczane do tych, gdzie spożycie mięsa na osobę jest w skali Europy najwyższe.



## 5.4. Zmiany krajobrazu – znaczenie terenów podmokłych

Konsekwencją transformacji tradycyjnie rolniczego społeczeństwa we współczesne państwo industrialne są zmiany prowadzące do zmienionego obiegu substancji mineralnych i zwiększonego wycieku do odbierających je wód. Przekonaliśmy się już, że urbanizacja domaga się usilnie systemów oczyszczających ścieki komunalne, a także, iż uprzemysłowione rolnictwo i produkcja zwierząt skutkują wyciekami azotu i fosforu. Inną często występującą zmianą jest przekształcanie podmokłych obszarów w tereny nadające się pod uprawę, podobnie jak regulacja rzek i wykonywanie zabiegów melioracyjnych na polach. Tradycyjny, bardziej naturalny krajobraz zamienia się więc w wydajne tereny rolnicze. Prowadzi to do zaniku naturalnych procesów nityfikacji i denityfikacji. Procentowy udział przekształcanych w ten sposób wcześniejszych terenów podmokłych jest znaczący w Szwecji i Danii. Procesy te nie zaszły jednak tak daleko w krajach na wschodnich wybrzeżach Bałtyku.

Dysponujemy niewielu szacunkami oceny ilości uwalnianego azotu powodowanego przekształcaniem terenów podmokłych. Ocenia się, że w krajach północnych roczne wymywanie azotu jest niewielkie ze względu na mało wydajne procesy denityfikacji i silny przepływ wody (krótki okres zalegania wód) w okresie niskich temperatur – wiosną i jesienią. Ostatnie oceny wskazują na usuwanie rzędu 10–15%. Gdyby azot był przyswojony przez rośliny zielne wtedy jego ilość w zbieranej biomase byłaby znacznie wyższa.

Szczególne zainteresowanie kierujemy obecnie na możliwość obniżenia ilości azotu wyciekającego do wód, przez wykonywanie drenażowych odprowadzeń do małych potoków i rzek, z zachowanym oryginalnym przebiegiem, meandrami i płytkimi przejściami. To różni je od prostych kanałów i uregulowanych rzek z wyprostowanymi brzegami. Inną możliwością dla zwiększenia usuwania azotu dają tak zwane obszary ekotonowe, to znaczy pasy nieuprawianego terenu z krzewami lub inną roślinnością, pomiędzy polami uprawnymi a strumieniami lub jeziorami. Przekształcanie rzek dla poprawy obiegu pierwiastków, nazywane gospodarowaniem zasobami rzecznyymi, jest przedmiotem szczególnej uwagi w Polsce i Danii.

## 6.

# PERSPEKTYWY PRZYSZŁOŚCI

### 6.1. Wykorzystanie składników odżywczych – od małych i zamkniętych do dużych i otwartych systemów

Wymiana składników mineralnych między lądem i wodą zmieniła się znacznie pod wpływem rozwijającego się współczesnego społeczeństwa. W okresie przedindustrialnym, pierwiastki krążyły w obrębie wysoce zróżnicowanego ekosystemu, włączając człowieka. „Nawóz był złotem”, układ był prawie zamknięty, a eksport substancji poza system był niewielki.

Podstawą nasilonego rozwoju społeczeństwa industrialnego było zwiększanie eksportu produktów rolnych (w tym składników odżywczych) z obszarów rolniczych do miejskich. Spowodowało to zmniejszenie netto składników mineralnych, które w ostatnich latach ubiegłego wieku kompensował import guana z Południowej Ameryki. Składniki zawarte w wydalinach ludzkich wywożono później na sąsiadujące uprawy rolne, względnie usuwano systemami kanalizacyjnymi do jezior lub rzek. Większość była eksportowana właśnie tą drogą.

Ponieważ składniki mineralne importowane z obszarów miejskich można było użytkować tylko jednorazowo, zapasy guana wyczerpywały się gwałtownie. Jednakże wykorzystanie nowych źródeł energii przyczyniło się do produkcji związków azotowych a także importu surowców fosforanowych. Nowy, znaczący strumień fosforu pochodzenia mineralnego, przetwarzany na nawóz dostawał się do obszarów rolnych, dalej do miast, skąd przedostawał się do wód śródlądowych a w końcu w wód morskich. Od połowy lat 1950. przemieszczały się również znaczące ilości związków zawierających fosfor, na przykład detergenty. To, co wcześniej było prawie zamkniętym systemem dla obiegu fosforu, przekształciło się w system otwarty, z niską zdolnością retencyjną i wysokim eksportem.

Po II Wojnie Światowej zindustrializowane społeczeństwo przyczyniło się do gwałtownego wzrostu uwalniania związków azotowych, które przedostały się do różnych ekosystemów, włączając Morze Bałtyckie. Za ten wzrost emisji odpowiedzialne są trzy podstawowe formy działania ludzi: usuwanie ścieków, wycieki z współczesnego rolnictwa (włączając produkcję zwierząt) i leśnictwa oraz spalanie kopaliny i drewna.

Wzrost przepływu azotu na wielką skalę zilustrować mogą zmiany odkładania się azotanów i amoniaku w opadach południowo–centralnej Szwecji. Począwszy od połowy lat 1950. wzrosły one blisko trzykrotnie. Dla Bałtyku nie dysponujemy odpowiednimi danymi, lecz można przyjąć, iż depozycja azotu nad obszary morskie będzie przebiegać podobnie. Bezpośredni dowóz azotu z powietrza, wraz z opadami na powierzchnię wód morskich, może mieć znaczący udział w całkowitym dopływie azotu.

Oprócz stymulowania eutrofizacji zwiększony wpływ azotu jest także powodem innych problemów środowiskowych:

- globalnego ocieplenia
- zmniejszania się warstwy ozonowej w stratosferze
- nasycenia azotem gleby, która prowadzi do jego wycieku
- zakwaszania wód śródlądowych, głównie skutkiem zakwaszenia gleb w ich zlewniach

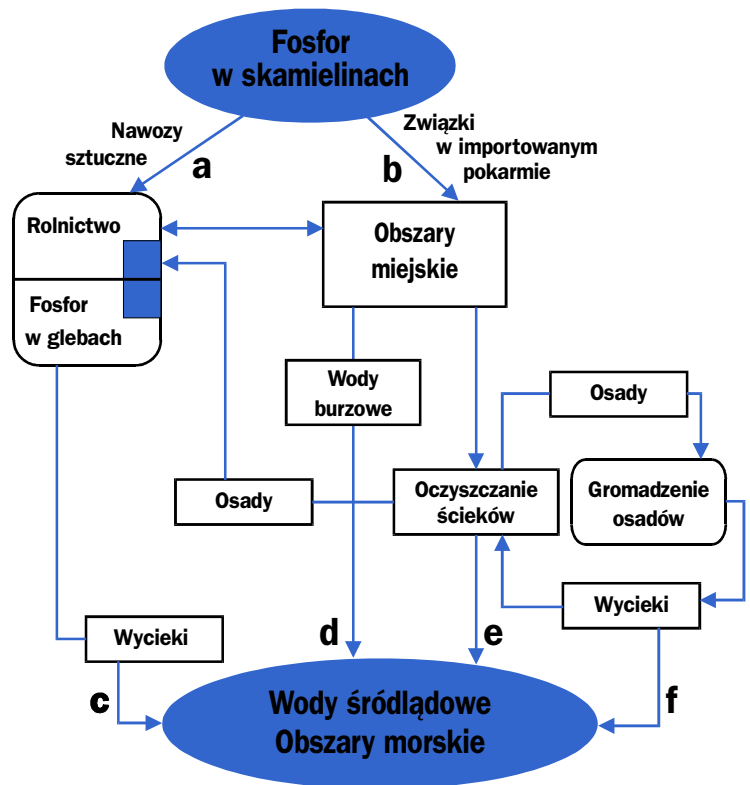
## 6.2. Zaawansowane oczyszczalnie ścieków – gdzie odkładać P i N?

Kontrola strumienia fosforu koncentruje się głównie na jego oddzieleniu w ściekach, gdzie spodziewać się można jego redukcji, nawet w 80–90%. Gdzie w przyszłości winniśmy kierować ten uwolniony fosfor? W społeczeństwie industrialnym fosfor jest importowany do obszarów rolniczych i miejskich (**Ryc. 12: a** oraz **b**). Fosfor tracony jest w procesach erozji, odprowadzanych wodach (**c**), miejskich wodach deszczowych i wyciekach z systemów kanalizacyjnych (**d**). W oczyszczalniach ścieków w celu usunięcia fosforu, w osadzie wiąże się 80 do 90% wpływającego fosforu, pozostałe 10–20% przedostaje się bezpośrednio do wypływającej wody (**e**). Wykorzystanie osadu dla celów rolniczych ograniczają koszty transportu, co powoduje ich rozmieszczanie na obszarach położonych w pobliżu oczyszczalni ścieków. Ze powodu zanieczyszczenia metalami ciężkimi i toksycznymi związkami organicznymi ilość gromadzonych osadów wzrasta, a w konsekwencji wzrasta ilość wyciekającego fosforu (**f**).

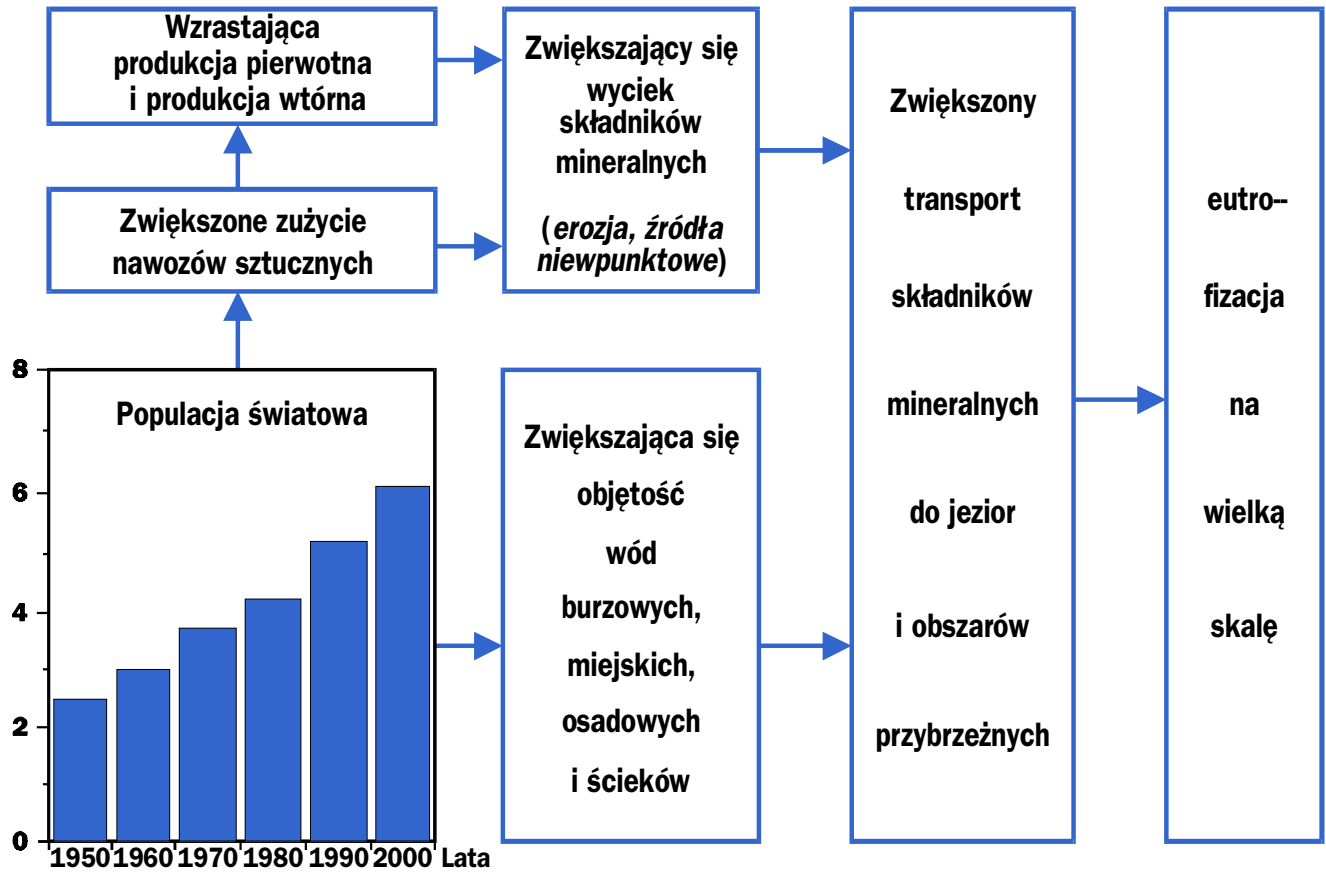
Z wyliczeń bilansu dla fosforu, wynika, że roczna akumulacja tego pierwiastka sięga aż 60–65%. Wraz z narastającą akumulacją spodziewać się można jego zwiększonych ubytków (tak zwany efekt Bertalanffiego), ilość wyciekająca jest proporcjonalna do ilości odkładanej. Z upływem czasu system osiągnie równowagę, gdzie import ( $a + b$ ) równy jest eksportowi ( $c + d + e + f$ ). W tym czasie należy wstrzymać działanie systemów oczyszczających a punktowe źródła fosforu winno się przekształcić w źródła niepunktowe. W prowadzonym szwedzkim projekcie badawczym przeanalizowane zostanie kiedy i gdzie można się tego spodziewać w odniesieniu do czasowego i przestrzennego przepływu fosforu.

Z globalnego punktu widzenia podstawową przyczyną zwiększającego się przepływu pierwiastków z lądu do wód jest wzrastające zapotrzebowanie i konsumpcja żywności, spowodowana podwojeniem liczebności populacji światowej między rokiem 1960 a 1990, od około 3 do 6 miliardów ludzi. W konsekwencji zwiększenia produkcji żywności (wzrastające użycie nawozów przemysłowych), nasilił się transport substancji pokarmowych do jezior i wód przybrzeżnych, z powodu narastających strat z źródeł niepunktowych, poprzez erozję i ścieki (**Ryc. 13**).

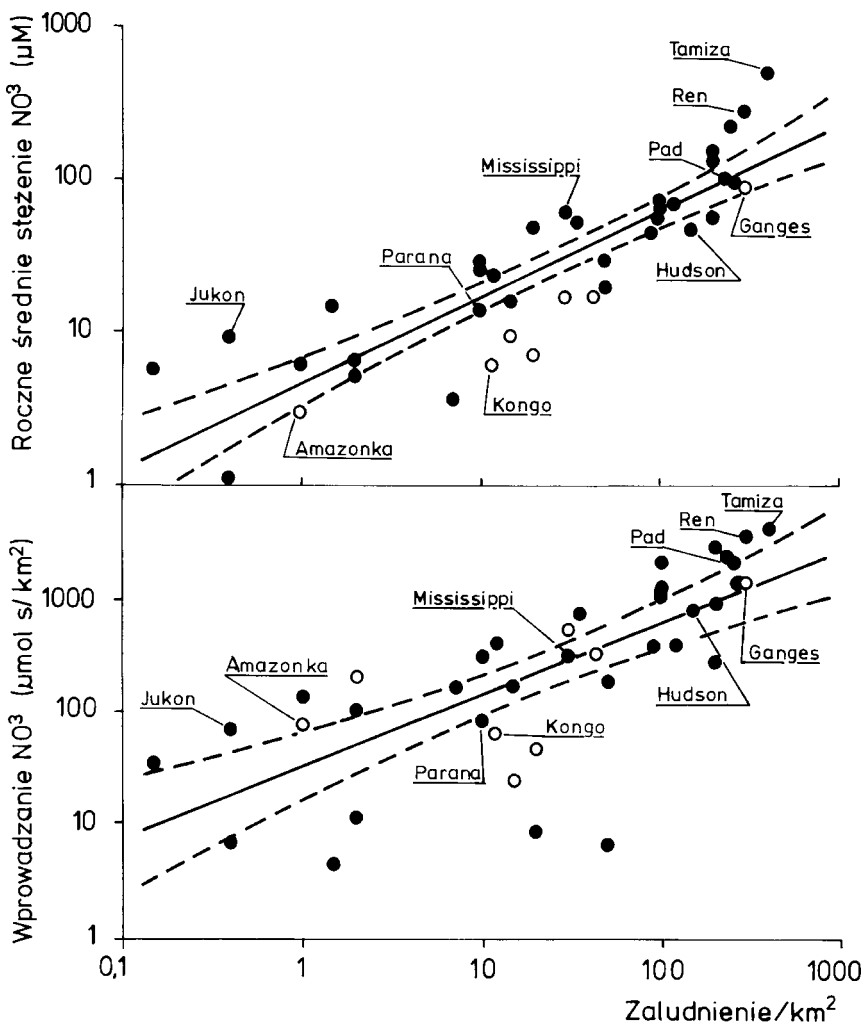
Można w odniesieniu do głównych rzek świata wykazać ścisłą korelację między liczebnością populacji zamieszkujących każdą ze zlewni a zarówno stężeniem azotanów jak i jego eksportem z tych zlewni (**Ryc. 14**). Zależności te dobrze dokumentują ogólnoswiatową i centralną rolę człowieka w wyplywie substancji mineralnych z lądu do wody i ostatecznie do morza.



**Ryc. 12.** Otwarty obieg fosforu we współczesnym społeczeństwie. Równowaga dynamiczna dla przepływu fosforu zajdzie w przypadku  $a + b = c + d + e + f$ . Zanim to nastąpi fosfor będzie gromadzić się w glebach i osadach.



Ryc. 13. Wzrost populacji ludzi jest podstawową przyczyną eutrofizacji na wielką skalę [Forsberg, 1991].



Ryc. 14. Średnioroczne stężenie (A) i eksport (B) azotanów w 42 rzekach w stosunku do zagęszczenia ludności w zlewniach tych rzek. Otwarte kółka = rzeki tropikalne; kółka pełne = wszystkie pozostałe rzeki [Według Peierls i wsp., 1991].

### 6.3. Globalne ocieplenie – scenariusz zmian klimatycznych dla obszarów Bałtyku

Aktywność ludzi może w następnym wieku doprowadzić do ocieplenia globalnego, przez wzrastającą emisję CO<sub>2</sub> i innych gazów szklarniowych, takich jak CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O czy chlorofluorowodory. Modele matematyczne przewidujące ogólne zmiany klimatu są generalnie zgodne, że spodziewane w przyszłym wieku podwojenie zawartości dwutlenku węgla w powietrzu może doprowadzić do globalnego wzrostu temperatury między 1,5 a 4,5°C. Scenariusz dla Fenu-skandii, w oparciu o trójwymiarowy model krążenia między powietrzem a oceanami, wskazuje na wzrost średniej temperatury rocznej rzędu 4–5°C. Można się spodziewać, że wzrost temperatury spowoduje zarówno wzrost jak i spadek wielkości opadów, zależnie od regionu świata. Na północy Europy, włączając obszary Bałtyku, wzrośnie ilość wody zarówno powierzchniowej jak i odpływającej. Takie zmiany spowodują szereg oddziaływań, np. na procesy geomorfologiczne, ekosystemy naturalne, rolnictwo, leśnictwo i na zasoby wodne.

Ważnym skutkiem zwiększonej zawartości CO<sub>2</sub> w powietrzu na rośliny będzie zwiększenie tempa fotosyntezy, produktywności i zużycia wody. Pojawią się jednak czynniki wpływające hamująco na procesy wzrostu.

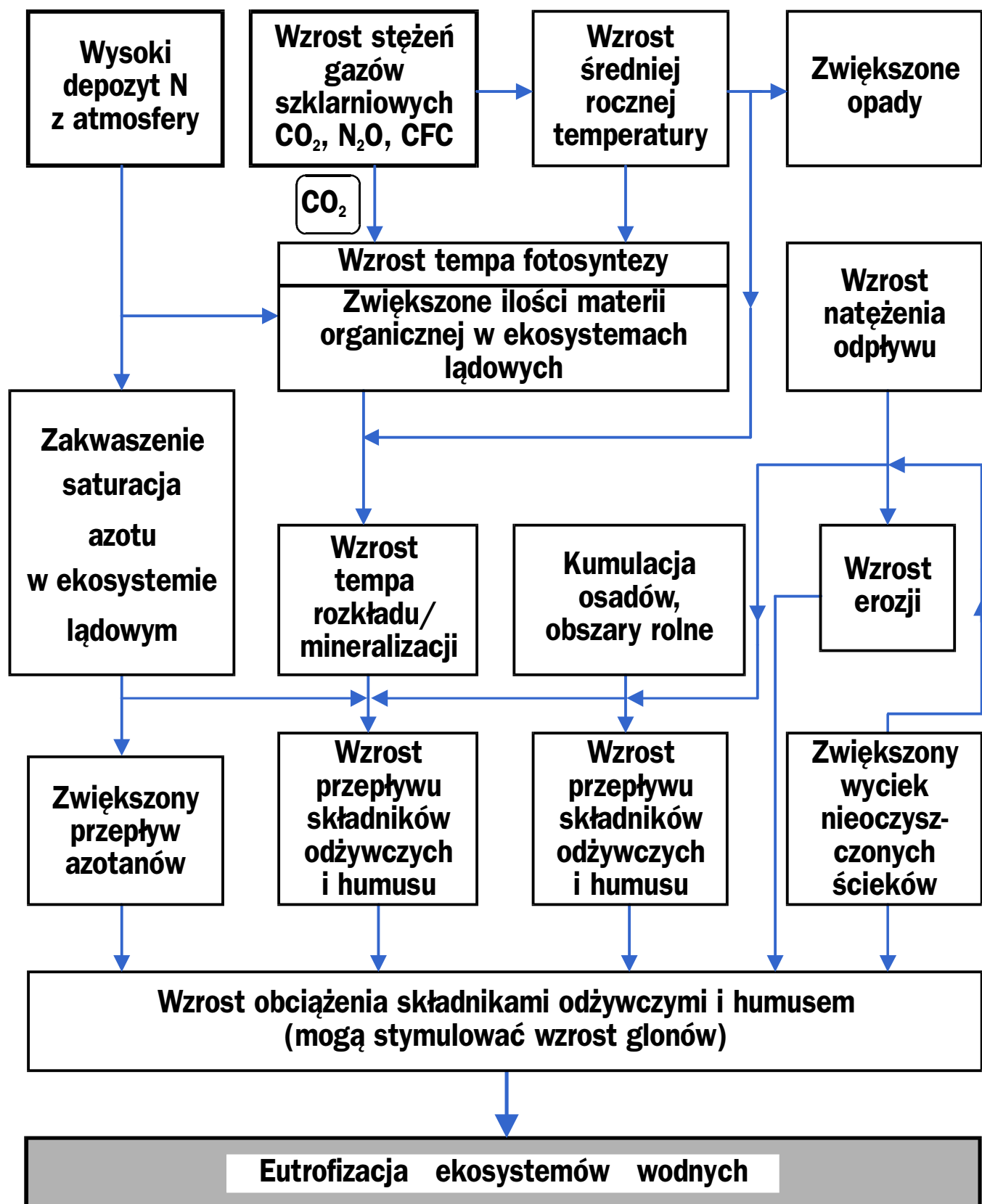
Narastający efekt cieplarniany spowoduje wydłużenie okresu wegetacyjnego, co prawdopodobnie zwiększy plony i produkcję lasów. Ekosystemy leśne, które zasadniczo limituje niedobór azotu, będą stymulowane jego zwiększonym poziomem w atmosferze. Proces ten będzie również trwał w przyszłym wieku. Podwyższona temperatura przyspieszy również procesy mineralizacji i rozkładu zwiększonych ilości wyprodukowanej materii organicznej, prowadząc ostatecznie do ilościowego wzrostu dostępnych składników mineralnych i humusu.

Zmiany klimatu wpłyną na szereg procesów w wododziałach, które zwrótnie wpłyną na związane z nimi strumienie, jeziora i wody przybrzeżne. Zwiększona temperatura może na przykład spowodować wzrost tempa mineralizacji materii organicznej z towarzyszącym temu silniejszym uwalnianiem azotu i fosforu.

Na znacznych obszarach Skandynawii roczne depozyty azotu atmosferycznego sięgają obecnie 10–20 kg/ha. Większość z tych depozytów zatrzymuje się w ekosystemach lądowych, lecz obecnie stają się one „wysyczone” azotem. Wraz z wysyceniem można spodziewać się zwiększonego uwalniania azotu, co doprowadzi do zwiększonego przepływu tego pierwiastka z gleby do śródlądowych wód powierzchniowych i dalej do wód morskich. Procesy takiego obciążania wód będą trwać również w przyszłym wieku.

Prawdopodobne skutki narastającego efektu cieplarnianego na eutrofizację opisać można szeregiem sprzężonych ze sobą procesów (**Ryc. 15**). Ocena znaczenia zmian klimatycznych dla obciążenia składnikami mineralnymi wód Norwegii wskazuje między innymi, że jeśli wzrośnie wysycenie azotem i mineralizacja azotu organicznego w glebie, to w przyszłości obciążenie wód morskich tym pierwiastkiem może 2–3 krotnie wzrosnąć. Toteż ocieplenie globalne może zwiększyć dopływ pierwiastków do wód powierzchniowych, włączając Morze Bałtyckie i w ten sposób stymulować eutrofizację.

## Przypuszczalny wpływ depozytów azotu z atmosfery i zmian klimat na eutrofizację



**Ryc. 15.** Przypuszczalne oddziaływania zwiększonego odkładania się azotu z powietrza oraz ocieplenia globalnego na przemieszczanie się pierwiastków z lądu do wód



## 6.4. Czy eutrofizację w Bałtyku można zahamować lub zatrzymać?

Teoretycznie zahamowanie lub zatrzymanie eutrofizacji w Bałtyku jest bardzo proste. Jest to problem ograniczenia wpływu pierwiastków do wody morskiej. Z praktycznego punktu widzenia problem jest poważny i bardzo trudny do wykonania.

Jak wykazano wyżej, zarówno azot jak i fosfor mogą pełnić kluczową rolę w ograniczaniu wzrostu glonów w Bałtyku. Dla Zatoki Botnickiej, niektórych obszarów przybrzeżnych i w okresie letnim dla sinic wiążących azot, kluczowym pierwiastkiem jest fosfor. Dla pozostałych części Bałtyku, włączając Kattegat, i dla innych ważnych grup glonów, najbardziej ograniczającym pierwiastkiem jest azot.

Dla polepszenia warunków:

- obciążenie azotem musi się zmniejszyć w celu obniżenia ogólnego poziomu produkcji
- obciążenie fosforem musi być zmniejszone w celu ograniczenia wzrostu sinic.

### O ile powinno się ograniczyć obciążenie by poprawić stan Morza Bałtyckiego?

Jeśli celem ma być przywrócenie w morzu warunków jakie panowały zanim ekosystemy denne uległy znacznej dewastacji, obciążenie musi być zredukowane do wielkości, które występowały pod koniec lat 1940. Oznacza to przynajmniej 50% redukcję fosforu i azotu.

Dla odzyskania w Kattegacie warunków odpowiadających obserwowanym w latach 1960., zanim zaczęły się zmiany w zespołach makroglonów, dopływ azotu i fosforu należy zredukować w co najmniej 50%, a raczej w 70–80%.

### Czy konieczna jest redukcja obciążenia zarówno fosforem jak i azotem?

Jak wykazano wyżej, stężenia azotu w Bałtyku wzrastały gwałtowniej aniżeli fosforu (**Ryc. 5**). Jeśli taki trend utrzyma się, to fosfor może stać się stopniowo kluczowym pierwiastkiem ograniczającym, nie tylko dla procesów wzrostu sinic, lecz również innych glonów. Jeśli uwzględnimy jedynie eutrofizację w otwartych wodach Bałtyku to w odległej perspektywie czasu spodziewać się można redukcji jedynie przez ograniczenie obciążenia fosforem. Takie działania były by najprostsze i najbardziej ekonomiczne, lecz nie wpłyną na polepszenie warunków w Kattegacie. W bardziej generalnej perspektywie dla środowiska konieczne jest także zmniejszenie obciążenia azotem pochodzącym z powietrza, rolnictwa i ścieków. Wiadomo bowiem, że azot przyczynia się do poważniejszych problemów niż eutrofizacja; na przykład globalnego ocieplenia, zakwaszenia i zanieczyszczenia wód gruntowych.

Odpowiedź na to pytanie jest więc następująca: Jest absolutnie konieczne znaczące obniżenie aktualnych wielkości obciążeń zarówno dla azotu jak i dla fosforu.

### Kiedy można spodziewać się poprawy?

Pierwiastki w systemach morskich mają porównywalnie długi okres krążenia. Oznacza to, że następuje tam opóźnienie pomiędzy okresem wnikania a skutkami eutrofizacji, a także między obniżonym wnikaniem i odpowiednią reakcją glonów. Wyliczono, że wzrost stężenia fosforu będzie postępował w morzu Bałtyckim jeszcze przez dziesiątki lat, nawet jeśli jego dopływ ograniczy się do obecnego poziomu.

Umowy polityczne Komitetu Helsińskiego, Konferencji Morza Północnego i Komitetu Paryskiego, o 50% obniżeniu wyrzutu składników mineralnych, mogą przynieść widoczną poprawę dopiero za parę lat. W odniesieniu do całego ekosystemu morskiego potrzeba od 5 do 15 lat zanim stwierdzi się poprawę. Lecz, jak wspomniano wyżej, 50% redukcja może nie wystarczać dla eliminacji negatywnych skutków.

Musimy także pamiętać, że potrzeba czasu by sfinansować i wybudować oczyszczalnie ścieków dla usuwania składników mineralnych. W wielu skupiskach ludzkich brak jest oczyszczalni ścieków, podczas gdy w innych miejscach większość to już oczyszczalnie, które mogą usuwać fosfor. Skuteczne i na dużą skalę usuwanie azotu z ścieków będzie trudniejsze i bardziej kosztowne do wprowadzenia, co oznacza, że nie należy się spodziewać szybkiego ograniczenia

obciążenia azotem. W tym pesymistycznym obrazie istotne jest również, że przeszło 50% z całkowitego obciążenia azotem Morza Bałtyckiego pochodzi z atmosfery, a szybkie zmniejszenie wnikania azotu z tego źródła jest bardzo trudne. Bardziej prawdopodobne jest liczenie się z dłuższym okresem naprawy niż przedstawione wyżej przewidywania.

- **Procesy, które mogą przeszkadzać poprawie warunków:** W prostych warunkach zredukowanie dopływu składników mineralnych może szybko zmniejszyć eutrofizację. Jednakże w Morzu Bałtyckim występują procesy, które mogą wydłużać eutrofizację i w najgorszym przypadku wstrzymują poprawę. Są to następujące procesy:
- **Recykling pierwiastków:** W stosunkowo płytkim Morzu Bałtyckim większość składników transportowana jest do głębszych partii przez sedymentację materii organicznej. Zwiększa to stężenie pierwiastków w wodach głębokich, skąd mogą włączać się do krążenia, by ponownie uczestniczyć w produkcji pierwotnej. Jak pokazuje to **Ryc. 4**, tylko niewielka część tych pierwiastków jest transportowana przez Cieśniny Duńskie.
- **Samoczynna eutrofizacja:** Wzrost beztlenowych obszarów dennych może zmniejszać arealy, gdzie zachodzą procesy denitryfikacji i nitryfikacji, przez zmniejszenie się osadów uczynnianych biologicznie (przez budowę kryjówek, odżywianie, lokomocję, aktywność respiracyjną i wydalniczą fauny dennej; procesy te pełnią istotną rolę pośredniczącą w transporcie składników mineralnych między osadami a wodą). Beztlenowe dna uwalniają także więcej fosforu aniżeli dna natlenione. Przy obecnym poziomie dopływu pierwiastków powiększanie beztlenowych obszarów dennych powoduje wzrost ich stężeń, co skutkuje rozprzestrzenieniem efektów eutrofizacji.
- **Ocieplenie globalne:** Wpływ zmian klimatycznych na eutrofizację (**Ryc. 15**) jest trudny do przewidzenia, lecz badania modelowe wskazują, że obciążenie pierwiastkami ekosystemów morskich Skandynawii może znacząco wzrosnąć skutkiem ocieplenia globalnego.
- **Otwarty przepływ pierwiastków:** We współczesnym społeczeństwie otwarty przepływ pierwiastków z lądu do wody na wielką skalę będzie bardzo trudny do zastąpienia układami bardziej zamkniętymi. Problemy różnego rodzaju stwarzają zarówno fosfor jak i azot. Eksport azotu do obszarów morskich w postaci azotanów jest silnie skorelowany z liczebnością populacji zamieszkujących obszary zlewni (**Ryc. 14**). Jon azotanowy jest bardzo mobilny i trudno zapobiec jego przenikaniu we wszystkich formach współczesnego wykorzystywania ziemi. Znaczna redukcja azotu w ściekach pochodzących od milionów ludzi jest zadaniem niezwykle trudnym, a jeszcze trudniejszym jest ograniczenie emisji tego pierwiastka z procesów energetycznych (spalanie kopalni, drewna opałowego), przynajmniej na krótki dystans.
- **Fosfor:** wyliczony bilans dla wnikania – wychodzenia fosforu wskazuje, że pierwiastek ten może być w znacznym stopniu wiązany w glebie. Powstają jednak straty, powodowane głównie wiatrami i erozją wodną. Aby zabezpieczyć się przed jego wnikaniem do Morza Bałtyckiego z obszarów miejskich musi znacząco poprawić się proces usuwania fosforu ze ścieków. Zadanie to może jednak prowadzić do powstawania znacznych depozytów fosforu w osadzie. Jak wzmiankowano już wyżej (**Rozdział 6.2.**) istnieje ryzyko, że fosfor z źródeł punktowych, pochodzący z nowoczesnych oczyszczalni ścieków, może być transportowany do źródeł niepunktowych (**Ryc. 12**). Oznacza to, że w długoterminowej perspektywie może postępować niekontrolowany ekologicznie wpływ fosforu z lądu do wody.

## 7.

## PODSUMOWANIE

- Eutrofizacja wód charakteryzuje się zwiększoną produkcją pierwotną i wzrostem glonów oraz roślin wyższych.
- Podstawowymi skutkami eutrofizacji są zmiany w składzie gatunkowym, deficyt tlenu i giniecie ryb.
- Podstawą fizjologiczną eutrofizacji jest fotosynteza, złożona seria reakcji, w których rośliny zielne przekształcają energię świetlną w energię wiązań chemicznych.
- Azot i fosfor to składniki pokarmowe roślin, które są najczęstszymi czynnikami ograniczającymi wzrost biomasy glonów.
- Fosfor pełni kluczową rolę w Zatoce Botnickiej, podczas gdy limitacja azotu występuje w Bałtyku właściwym i w Kattegacie. Latem, fosfor może ograniczać zakwity wiążących azot sinic w Bałtyku właściwym.
- W porównaniu z warunkami panującymi około 100 lat temu obciążenie azotem i fosforem wzrosło odpowiednio cztero i ośmiokrotnie. Spowodowało to wzrost ich stężeń we wszystkich basenach Bałtyku.
- Najbardziej uderzającym aspektem eutrofizacji mogą być zakwity glonów, które rozciągają się obecnie na szerokich obszarach Bałtyku właściwego i Kattegatu, a także na wodach przybrzeżnych. Wiele gatunków glonów jest toksycznych dla zwierząt; z zakwitami wiąże się z również problemy zdrowotne ludzi.
- Oddzielne problemy stwarza nasilony wzrost nitkowatych glonów i zawężone rozmieszczenie pionowe ważnych ekologicznie roślin, takich jak *Zostera marina* i *Fucus vesiculosus*.
- Poważnym problemem dnia dzisiejszego jest niedostatek tlenu w głębszych warstwach Morza Bałtyckiego. W najgłębszych warstwach dna tlen jest zastępowany przez siarkowodor i zanika życie wyższych organizmów.
- Eutrofizacja zwiększyła produkcję ryb, lecz spowodowała także negatywne zmiany ze względu na wzrost warunków beztlenowych. Dlatego dorsze (*Gadus morrhua*) ograniczyły lub całkowicie zaprzestały się rozmnażać w basenach z ostrym niedotlenieniem.
- Trudno będzie zatrzymać dopływ na wielką skalę składników mineralnych z gleby do wody. Globalne ocieplenie może spowodować wzrost wpływu tych składników do Morza Bałtyckiego a przez to nasilać eutrofizację.
- Stwierdzono, że:
  - Upłynie sporo czasu zanim poprawią się warunki w Bałtyku.
  - Otwarty przepływ składników mineralnych musi być zastąpiony systemami bardziej zamkniętymi.
  - Jest wątpliwe, czy obecne społeczeństwo i nowoczesne techniki mogą podołać postawionym zadaniom. Tylko zmiany w stylu życia i efektywne wykorzystywanie naturalnych zasobów mogą ochronić Morze Bałtyckie, podobnie jak wiele innych obszarów dotkniętych szeroko pojętymi problemami środowiskowymi.

## 8.

## PIŚMIENNICTWO

## Ogólne

1. Monitor, 1988. Sweden's marine environment – ecosystems under pressure. Swedish Environmental Protection Agency, 207 p.
2. AMBIO, vol. 19, No 3, May 1990. Special issue: Marine Eutrophication. This volume covers: Biological effects in the Baltic Sea; Effects on benthos and fish in the Kattegat; Nutrient dynamics and limitations in the Baltic Sea; Nutrients, primary production, sedimentation and oxygen consumption in the Kattegat; Baltic Sea sediments; Nitrogen in sediments.

## Rozdział 1

1. Fosberg C., 1979. Die physiologischen Grundlagen der Gewässer–Eutrophierung. – Z. f. Wasser– und Abwasser–Forschung, 12:40–45.
2. Forsberg C., Ryding S.–O., 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste–receiving lakes. Arch. Hydrobiol, 89:189–207.
3. Nixon S.W., 1990. Marine eutrophication: a growing international problem. AMBIO, 19:101.
4. Rodhe W., 1948. Environmental requirements of fresh–water plankton algae. Experimental studies in the ecology of phytoplankton. Symb. Bot. Ups. 1948, 10:1–147.
5. Rodhe W., 1958. Primarproduktion und Seetypen. Verh. Int. Ver. Limnol., 13, 121–141.
6. Skulberg O.M., Codd G.A. Carmichael W., 1984. Toxic bluegerrn algal blooms in Europe: a growing problem. AMBIO, 13:144–147.
7. Stemann Nielsen E., 1955. The production of organic matter by the phytoplankton in a Danish lake receiving extraordinarily great amounts of nutrient salts. Hydrobiologia, 7, 68–74.
8. Vollenweider R., 1968. Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters, with Particular Reference to Nitrogen and Phosphorus as Factors in Eutrophication. OECD, Paris. pp. 254.
9. Vollenweider R., 1981. Eutrophication – a global problem, Water Qual. Bull. 6:59–64.
10. Vollenweider R., Kerekes J., 1982. Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. OECD, Paris, 145 p.
11. Wallström K., 1991. Ecological studies on nitrogen fixing bluegreen algae and on nutrient limitation of phytoplankton in the Baltic Sea. Acta Universitatis Upsaliensis. Comprehensive summaries of Upsala dissertations from the faculty of science. 337, 23 p.

## Rozdział 2

1. Graneli E., Wallström K., Larsson U., Granéli W., Elmgren R., 1990. Nutrient limitation of primary production in the Baltic Sea area. AMBIO, 19:142–151.
2. Forsberg C., 1989. Importance of sediments in understanding nutrient cyclings in lakes. Hydrobiologia 176/177:263–277.

## Rozdział 3

1. Larsson U., Elmgren R., Wulff F., 1985. Eutrophication and the Baltic Sea: Causes and consequences. AMBIO 14:9–14.
2. Rosenberg R., Elmgren R., Fleisher S., Jonsson P., Persson G., Dahlin H., 1990. Marine eutrophication case studies in Sweden. AMBIO, 19:102–108.
3. Wulff F., Stigebrandt A., Rahm L., 1990. Nutrient dynamics of the Baltic Sea. AMBIO 19:126–133.

## Rozdział 4

1. Baden S.P., Loo L.-O., Pihl L., Rosenberg R., 1990. Effects of eutrophication on benthic communities including fish: Swedish West Coast. *AMBIO* 19:113–122.
2. Cedervall H., Elmgren R., 1990. Biological effects of eutrophication in the Baltic Sea, particularly the coastal zone. *AMBIO* 19:109–112.
3. Elmgren R., 1989. Man's impact on the ecosystem of the Baltic Sea: energy flows today and at the turn of the century. *AMBIO* 18:326–332.
4. Gerlach S.G., 1990. Nitrogen, phosphorus, plankton and oxygen deficiency in the German Bight and in Kiel Bay. *Kieler Meeresforschung, Sonderheft 7*, 341 p.
5. Hansson S., Rudstam L.G., 1990. Eutrophication and Baltic fish communities. *AMBIO* 19:123–125.
6. Rosenberg R., Elmgren R., Fleisher S., Jonsson P., Persson G., Dahlin H., 1990. Marine eutrophication case studies in Sweden. *AMBIO*, 19:102–108.

## Rozdział 5

1. Stevenson F.J., 1982. Nitrogen in agricultural soils. American Society of Agronomy. Agronomy Monographs, Madison, Wisconsin, 940 p.
2. Khasawneh F.J., Sample E.C., Kamprath E.J., 1986. The role of phosphorus in agriculture. American Society of Agronomy, Agronomy Monographs, Madison, Wisconsin, 910 p.
3. AcidEnviro., 1990. Special Issue on Nitrogen. Magazine of transboundary pollution, 9, June 1990, Swedish Environmental Protection Agency.

## Rozdział 6

1. Boer M.M., Koster E.A., Lundberg 1990. Greenhouse impact in Fennoscandia – preliminary findings of a European workshop on the effects of climatic changes. *AMBIO* 19:2–10.
2. Forsberg C., 1991. Can large-scale eutrophication of inland and marine waters be stopped? Paper presented at the Stockholm Water Symposium, August 12–15, 1991. Proceedings.
3. Nihlgård B., 1985. The ammonium hypothesis – an additional explanation to the forest dieback in Europe. *AMBIO*, 14:2–8.
4. Odum H.T., 1983. Systems ecology: An introduction. John Wiley & Sons, New York, 644 p.
5. Peierls B.L., Caraco N.F., Pace M.L., Cole J.J., 1991. Human influence on River nitrogen. *Nature* 350:386–387.
6. Rodhe H., Rood M.J., 1986. Temporal evaluation of nitrogen compounds in Swedish precipitation since 1955. *Nature* 321:762–764.