

**BIBLIOTHEEK**  
**NIOO-CEMO**  
Postbus 140  
4400 AC YERSEKE



Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

# Eutrofiëring en productiviteit in de Noordzee

Rapport RIKZ - 99.008



R

# RIKZ

Archie,  
A 327

**VLIZ (vzw)**  
VLAAMS INSTITUUT VOOR DE ZEE  
FLANDERS MARINE INSTITUTE  
Oostende - Belgium



Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

63477

## **Eutrofiëring en productiviteit in de Noordzee**

J.C.H. Peeters, I. de Vries & H.A. Haas

Rapport RIKZ-99.008  
september 1999

ISBN 90-369-3483-4

## Inhoud

---

	Samenvatting	5
	Summary	7
I.	Inleiding	9
II.	De Noordzee	11
III.	Het Noordzee-ecosysteem	19
IV.	Eutrofiëring en eutrofiëringsbestrijding	25
V.	Eutrofiëringseffecten in de Noordzee	27
	<i>Intermezzo 1. Plaagalgen in de Noordzee</i>	30
VI.	Eutrofiëringsonderzoek van RIKZ	33
	<i>Intermezzo 2. Experimentele ecosystemen</i>	37
VII.	Epiloog. Beantwoording beleidsvragen	39
VIII.	Literatuur	43
	Colofon	47



## Samenvatting

---

De nota "Eutrofiëring en productiviteit in de Noordzee" beschrijft de effecten van eutrofiëring op het Noordzee-ecosysteem en de gevolgen van de bestrijding ervan. De nota presenteert ook resultaten van onderzoek naar de effecten van bestaand en nog niet gerealiseerd beleid.

Eutrofiëring veroorzaakte een toename van de plaagalg *Phaeocystis* langs de continentale kusten. Andere plaagalgsoorten zijn niet zo duidelijk door de vergroting van de nutriëntentoevoer beïnvloed. Eutrofiëring vergroot de kans op zuurstofgebrek in gestratificeerde gebieden van de Noordzee. De vergroting van de nutriëntentoevoer zou echter ook een positief effect kunnen hebben op de productie van vis en schelpdieren.

De effecten van het saneringsbeleid sinds 1987 zijn vooral duidelijk voor fosfaat. De belasting en de concentraties in het kustwater zijn met ongeveer 60% afgenomen t.o.v. die van 1985. Deze daling heeft echter niet geleid tot minder grote bloeien van het fytoplankton. Het is daarom ook onwaarschijnlijk dat de beschreven vangstafname van sommige vissoorten door de fosfaatsanering veroorzaakt is. Immers, de reductie van de fosfaatbelasting zou pas een verlaging van de visproductie kunnen veroorzaken, wanneer die reductie ook tot een vermindering van de fytoplanktonproductie had geleid.

RIKZ deed experimenteel onderzoek naar de effecten van bepaalde saneringsscenario's op de productiviteit en soortdiversiteit van het fytoplankton en op de productiviteit van bodemdieren en microzoöplankton van onze kustecosystemen. Gecombineerd met resultaten van veldonderzoek, kon geconcludeerd worden dat er bij een verdergaande fosfaatsanering een goede kans bestaat dat de plaagalg *Phaeocystis* zal afnemen. Het is niet waarschijnlijk dat de fosfaatsanering effect heeft op de productiviteit van schelpdieren, omdat *Phaeocystis* weinig geschikt is als voedsel. Ook zal de fosfaatsanering geen respectievelijk weinig invloed hebben op de kans op zuurstofgebrek in de centrale Noordzee en De Duitse Bocht vanwege het feit dat de fytoplanktonproductie slechts kort gelimiteerd is door fosfaat.

De antropogene stikstoftoevoer naar de Noordzee is nog nauwelijks afgenomen en de stikstofconcentraties in zee zijn daarom nog steeds te hoog. Experimenten naar de effecten van stikstofreductie lieten zien dat bij reducties van de stikstoftoevoer met 50 en 75% er minder grote bloeien van het zomerfytoplankton optraden. In combinatie met de resultaten van veldonderzoek, leidt dit tot de conclusie dat stikstofsanering met name effect zal hebben op de groei van het zomerfytoplankton in de Noordzee. In het experiment nam de groei van bodemdieren sterk af bij 75% reductie van de stikstofaanvoer, maar bleef beperkt bij 50% reductie (het door de Noordzeestaten nagestreefde reductiepercentage). Sommige plaagalgsoorten worden toxisch in water met een stikstofovermaat. De kans op toxische bloeien wordt dus verkleind door een reductie van de stikstoftoevoer naar zee. De kans op zuurstofgebrek in de centrale Noordzee wordt indirect door de aanvoer van stikstof via de rivieren en direct door de aanvoer via de atmosfeer bepaald. In de Duitse Bocht is de relatie tussen kans op

zuurstofgebrek en de aanvoer van stikstof zowel via rivieren èn atmosfeer direct. Effecten van een stikstofsanering op de kans op zuurstofgebrek zijn dus het grootst in de Duitse Bocht.

## Summary

---

The report "Eutrophication and productivity in the North Sea" gives an overview of the effects of eutrophication on the North Sea ecosystem and of the effects of eutrophication control measures implemented since 1987. The report also presents results of experimental research on effects of the present policy and possible future steps.

Eutrophication caused an increase of the harmful alga *Phaeocystis* along the continental coasts. Other species of harmful algae have apparently been less influenced by the increased nutrient loading to the North Sea. Eutrophication also increases the risks of oxygen deficiency in stratified areas of the North Sea. On the other hand, eutrophication might promote the production of fish and shellfish.

The effects of the recent nutrient reduction programs are most noticeable for phosphate. Both riverine discharges and the concentrations in the Dutch coastal zone have decreased with approximately 60%, compared to the situation in 1985. However, this decrease in phosphate has not resulted in smaller phytoplankton blooms. Consequently, it is improbable that the observed declines in catches of several fish species are caused by the decline in phosphate load. After all, reduced phosphate loadings could only have led to lower fish production through a decrease in phytoplankton productivity.

The National Institute for Coastal and Marine Management / RIKZ has carried out experimental research on the effects of different nutrient reduction schemes. The effects on the productivity and species composition of phytoplankton, and on the production of benthic animals and zooplankton were studied. The results were combined with the outcomes of field studies. It was concluded that a continuing reduction in phosphate loadings will most probably result in smaller blooms of the harmful alga *Phaeocystis*. It is considered improbable that such a further reduction in phosphate loads will affect the production of shellfish, as *Phaeocystis* is regarded as a less suitable food source. Reducing phosphate loadings will neither have a significant positive effect on the risks of oxygen depletion in the central North Sea or the German Bight, because of the short period in spring only, that algal production is limited by phosphorus.

The anthropogenic nitrogen supply to the North Sea has not significantly decreased yet, and inorganic nitrogen concentrations in the sea are still too high. Experiments studying effects of nitrogen reduction indicated that a reduction with 50 to 75% would lead to lower phytoplankton blooms during summer. Combined with evidence from seagoing research, it is concluded that reductions in nitrogen loading will mainly affect the growth of summer phytoplankton. In the experimental studies, growth of benthic animals was lower at a 75% N-reduction, but showed no decrease in the 50% nitrogen reduction scheme. The latter reduction is the current policy.

Some harmful algal species have shown to become toxic under conditions with an excessive nitrogen supply. The risks of harmful algal blooms will thus be reduced by decreasing the nitrogen supply to the North Sea. The chances of oxygen depletion in the central North Sea

are indirectly determined by the riverine discharges of nitrogen, and directly enhanced by atmospheric deposition. In the German Bight, riverine discharges and atmospheric deposition of nitrogen directly influence the risks of hypoxia. Sanitation measures reducing nitrogen loads to the North Sea will therefore have the strongest impact on the conditions in the German Bight.

# I. Inleiding

---

Tot aan het begin van deze eeuw verzamelden kinderen op de heidevelden schapenkeutels als mest voor de landbouwgronden. Meststoffen waren schaars in die tijd. Dat beeld is nu totaal veranderd. De heidevelden zijn ontgonnen door gebruik te maken van kunstmest en huisvuil. Inmiddels is er zelfs sprake van overbemesting. Hierdoor komen tegenwoordig veel meer meststoffen in het water terecht dan vroeger het geval was.

Deze overmatige toevoer van meststoffen naar het milieu, ofwel eutrofiëring, veroorzaakt veel problemen. Het is uitgegroeid tot een mondiaal probleem, dat zowel zoete wateren als kustwateren beïnvloedt. De groei van de wereldbevolking en van de mondiale veestapel, de toename van het kunstmestgebruik, maar ook het loslaten van hergebruik van nutriënten in de landbouw, zijn de hoofdoorzaken van eutrofiëring. In de Nederlandse binnenwateren leidde het tot een sterke verarming van flora en fauna. Meststoffen vervuilen het grondwater en verzuren de bodem. Zelfs de Noordzee kampt met de gevolgen van eutrofiëring.

Alhoewel eutrofiëring niet uitsluitend negatieve gevolgen heeft - het kan bijvoorbeeld leiden tot een verhoging van de visproductie - kan het natuurlijke evenwicht in de wateren er flink door verstoord raken.

Eutrofiëring veroorzaakt een sterke toename van het plantaardige plankton (fytoplankton), wat in sommige Noordzeegebieden tot zuurstofgebrek kan leiden. In de jaren tachtig traden in grote delen van de Duitse Bocht (tot 18.000 km<sup>2</sup>) zeer lage zuurstofconcentraties op. Dit veroorzaakte massale sterfte van bodemdieren en vissen. Eutrofiëring kan ook de soortensamenstelling van het fytoplankton doen veranderen. In ons kustwater zijn daardoor bepaalde plaagalgen sterk toegenomen. Eutrofiëring vormt dus een bedreiging voor de waterkwaliteit van de Noordzee.

In 1987 gaven deze effecten aanleiding tot het besluit van de Noordzeeministers om de stikstof- en fosforbelasting op de Noordzee te halveren. De Noordzeeministers namen destijds hun beslissing op basis van het voorzorgsprincipe. Later kwam vanuit het beleid het verzoek om deze beslissing wetenschappelijk te onderbouwen. Meer specifiek luiden de beleidsvragen:

- Tot hoever moeten de fosfor- en vooral de stikstofbelasting verminderd worden om de risico's van zuurstofgebrek en plaagalgen in de Noordzee tot een aanvaardbaar niveau te beperken?
- Is er een veilig niveau van de nutriëntenbelasting aan te geven, waarbij de eutrofiërisingsrisico's geminimaliseerd zijn, zonder dat de productie van schelpdieren en vissen afneemt?

In dit rapport wordt de eutrofiëring van de Noordzee beschreven en wordt getracht antwoord te geven op bovengenoemde beleidsvragen.

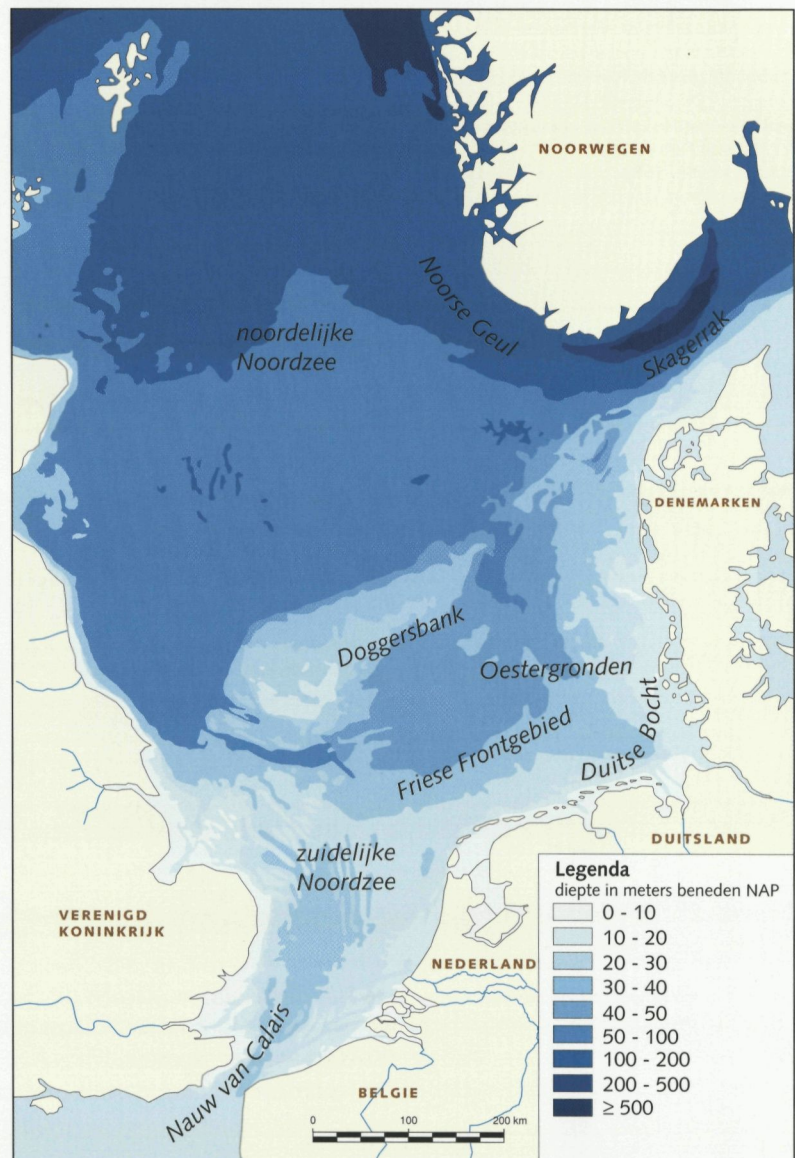


## II. De Noordzee

### Diepte

De Noordzee heeft de vorm van een trechter, die van zuid naar noord dieper en breder wordt (figuur 1). De Doggersbank, plaatselijk slechts 13 m diep, vormt de scheiding van de diepe noordelijke en de relatief ondiepe, zuidelijke Noordzee. Het noordelijke deel is vaak dieper dan 100 m, in de Noorse Geul zelfs meer dan 350 m. De zuidelijke Noordzee is niet dieper dan 50 m.

**Figuur 1**  
Dieptekaart Noordzee. De Noordzee wordt van zuid naar noord breder en dieper. De Doggersbank in de centrale Noordzee vormt de scheiding tussen de ondiepe zuidelijke en de diepe noordelijke Noordzee.  
naar: ICONA, 1992

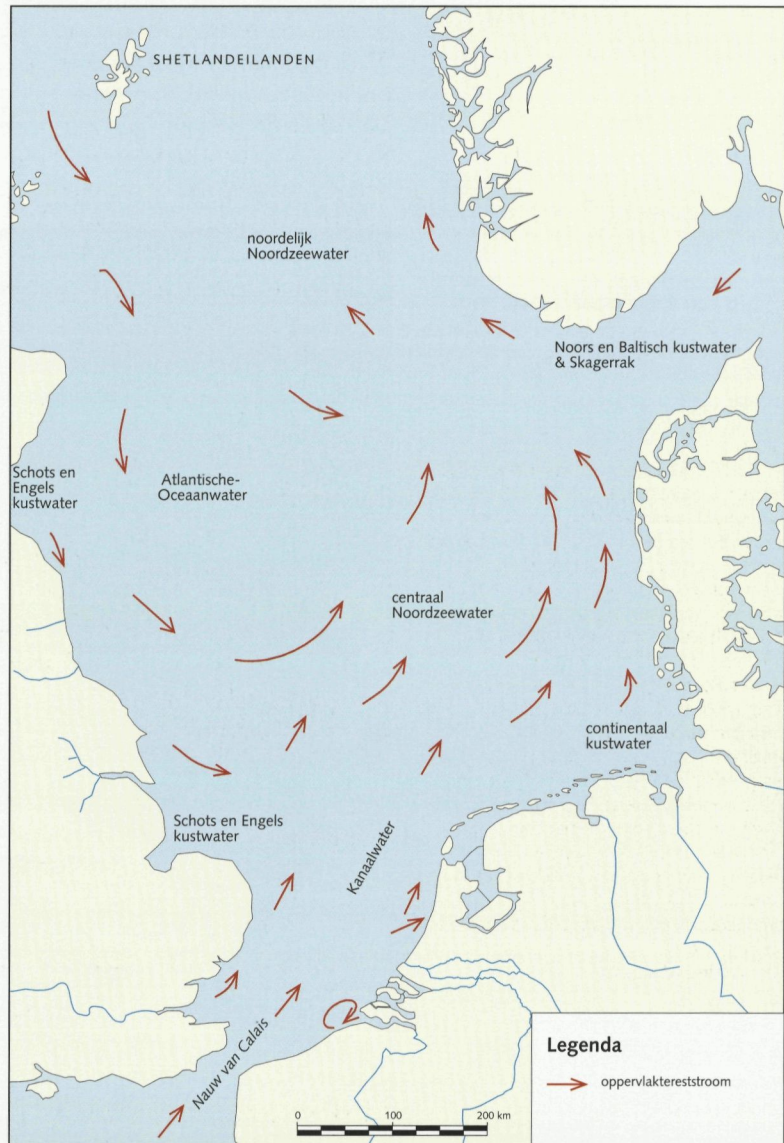


## Zeestromen

Door het Nauw van Calais stroomt Kanaalwater de Noordzee binnen en in het noorden water vanuit de Atlantische Oceaan (figuur 2). Deze zeestromen zijn getijgemiddelde reststromen. Ze ontstaan doordat de stroomsnelheden gedurende eb en vloed meestal van elkaar verschillen en doordat ook de wind gemiddeld een bepaalde invloed heeft op stroomsnelheid en -richting. De reststroom bereikt gemiddelde snelheden van enkele kilometers per dag.

**Figuur 2**

De Noordzee wordt door drie belangrijke zeestromen beïnvloed. Kanaalwater stroomt door het Nauw van Calais en langs de continentale kusten naar het Noorden. Water uit de Atlantische Oceaan stroomt tussen Schotland en de Shetlandeilanden langs de Engelse oostkust naar het zuiden en verlaat de oostelijke Noordzee samen met het Kanaalwater. Het Noord-Atlantische water en het Kanaalwater hebben de grootste invloed op de Noordzee. De uitstroom van de Oostzee heeft alleen effect op het noordoostelijke deel van de Noordzee. naar: Laevastu, 1983



De hoeveelheden water, die de Noordzee binnenstromen vanuit het Kanaal en de noordelijke Atlantische Oceaan bedragen beide ongeveer  $200.000 \text{ m}^3$  per seconde. Dit is honderd maal het debiet van de Rijn. De Noordzee is daarmee een zeer 'open' zee, waarvan de hydrologie vrijwel volledig wordt beheerst door in- en uitstromend oceanwater.

Het Kanaalwater stroomt naar het noorden langs de continentale kusten, waar het zich mengt met het water van de grote rivieren. Het Noord-Atlantische water stroomt naar het zuiden langs de Schotse en Engelse kust, draait naar het noorden en verlaat de Noordzee samen met het Kanaalwater en water uit de Oostzee.

Het continentale kustwater mengt zich vrijwel niet met het water van de centrale en noordelijke Noordzee. Door de geringe diepte is het kustwater turbulent en blijft er veel zwevend materiaal in suspensie. De oceanische getijgolven beïnvloeden het getij in de Noordzee vooral via de noordelijke ingang tussen Noorwegen en Schotland en in veel mindere mate via het Nauw van Calais. De toenemende diepte en breedte van de Noordzee van zuid naar noord, heeft tot gevolg dat de maximale stroomsnelheden in die richting afnemen, van ongeveer 80 -100 cm per seconde in de zuidelijke tot ongeveer 20 - 40 cm per seconde in de centrale Noordzee. Deze getijsnelheden bepalen, samen met de wind, de mate van verticale menging in de Noordzee.

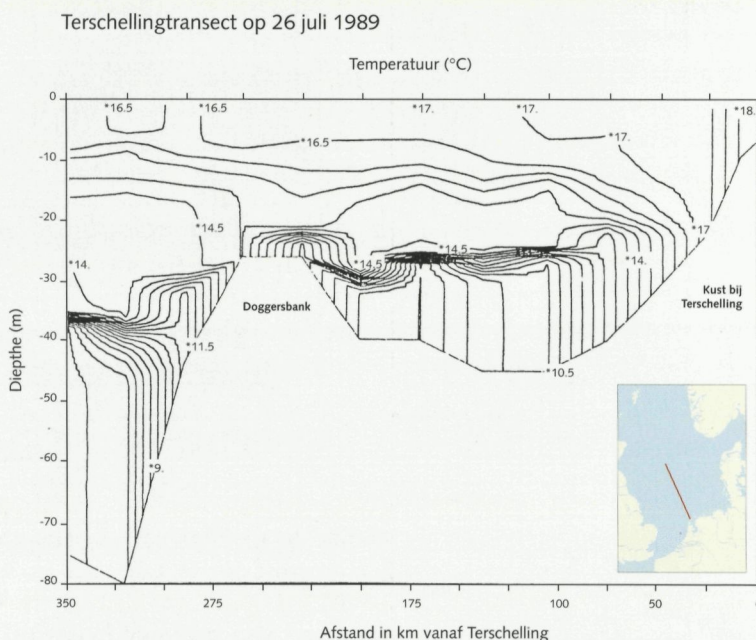
### Stratificatie

In de centrale en noordelijke Noordzee treedt 's zomers gelaagdheid op (figuur 3 en figuur 5). Deze gelaagdheid of stratificatie ontstaat door opwarming van de bovenlaag door de zon, terwijl de onderlaag koud blijft. Het warme water blijft op het koude water drijven. De uitwisseling van opgeloste stoffen tussen boven- en onderlaag wordt hierdoor belemmerd.

**Figuur 3**

Stratificatieprofiel van de Noordzee op het transect Terschelling-Doggersbank op 26 juli 1989. Dit profiel toont de temperatuurverdeling. Dichtbij Terschelling lopen de lijnen van gelijke temperatuur (thermoclinen) verticaal. Dit geeft aan dat het water goed gemengd is. Verder noordelijk lopen de thermoclinen in de bovenlaag min of meer horizontaal vanwege een lange periode met ongewoon rustig weer. In de onderlaag lopen de thermoclinen weer verticaal, omdat door de wrijving van de getijstromen met de bodem een goede menging ontstaat. Heel duidelijk is de spronglaag, de steile overgang tussen de warme boven- en koude onderlaag, te zien. Deze spronglaag lag boven de Oestergronden op 25 meter diepte. Ten noorden van de Doggersbank ligt de spronglaag dieper vanwege de invloed van oceaangolven.

naar: Peeters *et al.*, 1991



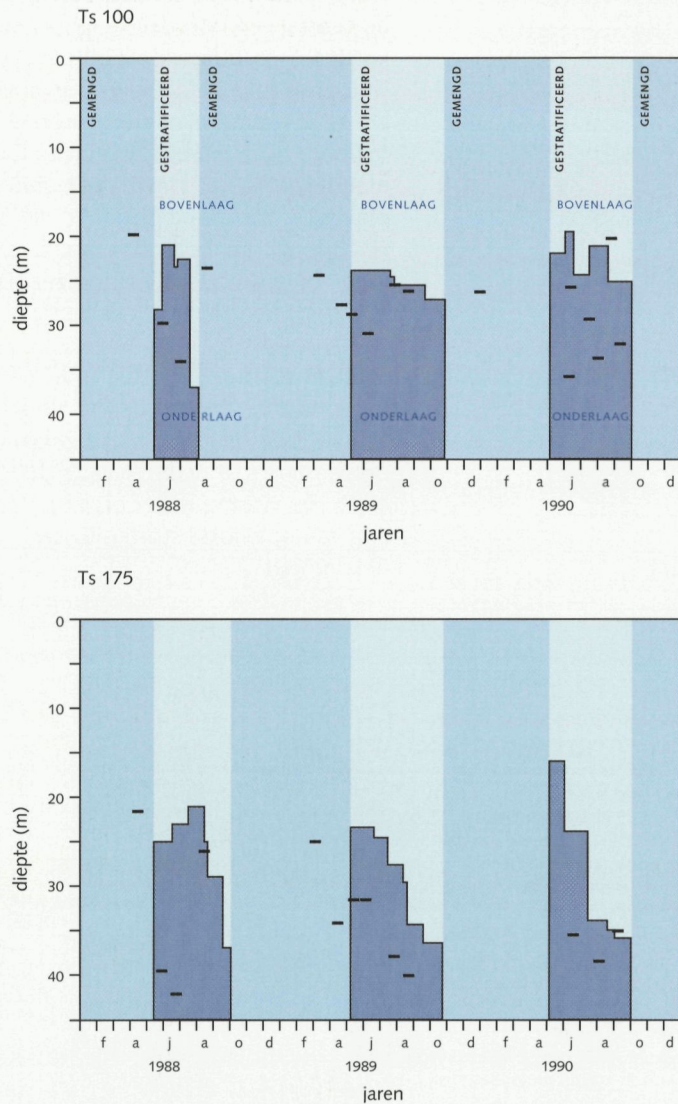
De stratificatie in de centrale Noordzee begint meestal in mei. Tot ongeveer eind juli stijgt het temperatuurverschil tussen de boven- en onderlaag, waarna het verschil weer langzaam kleiner wordt (figuur 4). In augustus of september beëindigt een stevige wind vaak de dan al zwakke stratificatie.

Het weer bepaalt in hoge mate hoe sterk de stratificatie zich manifesteert. Een koude winderige zomer veroorzaakt een zwakke stratificatie, terwijl een zonnige, windarme zomer een 'harde' stratificatie oplevert. In het laatste geval is er ook meer kans op zuurstofgebrek (Hoofdstuk V).

Stratificatie kan ook ontstaan door verticale verschillen in zoutgehalte. Zoet- en brak water hebben een lagere dichtheid dan zeewater en drijven daarom op het zoutere water. Zoutstratificatie komt het meest voor in de buurt van riviermondingen (figuur 5). Dit zijn meestal ook gebieden waar de menging door het getij groot is, waardoor dit type

**Figuur 4**

Seizoensverloop van de stratificatie op een station 100 km (Ts 100) en een station op 175 km (Ts 175) ten noorden van Terschelling. De scheiding tussen boven- en onderlaag, de zogenaamde spronglaag, blijft 's zomers op Ts 100 op een diepte van 20-25 m. liggen. Op Ts 175 daarentegen daalt de spronglaag gedurende de zomer van ongeveer 20 m. naar ongeveer 35 m. diepte. De korte, horizontale streepjes markeren de diepte waar nog 1% van het oppervlaktelicht doordringt. De 1%-lichtgrens ligt op Ts 175 meestal dieper dan op Ts 100. naar: Peeters *et al.*, 1991



stratificatie meestal niet lang standhoudt. Stratificatie in de Duitse Bocht berust op verticale zout- en temperatuurverschillen.

### Transport van zwevend materiaal

Getij- en windgedreven stroming transporteren grote hoeveelheden zwevend materiaal. Dit zwevende materiaal bestaat uit slib, plankton en dode organische stof. Zand wordt dicht bij de bodem getransporteerd als de turbulentie groot genoeg is. In turbulente watermassa's neemt de hele waterkolom deel aan het transport van zwevende stof. In gestratificeerde gebieden wordt zwevende stof dicht bij de bodem getransporteerd door afwisselende opwerveling en sedimentatie. Het meeste zwevende materiaal belandt uiteindelijk in de diepe Noorse Geul ten zuiden van Noorwegen. Onderweg sedimenteert er ook veel materiaal op de Oestergronden.

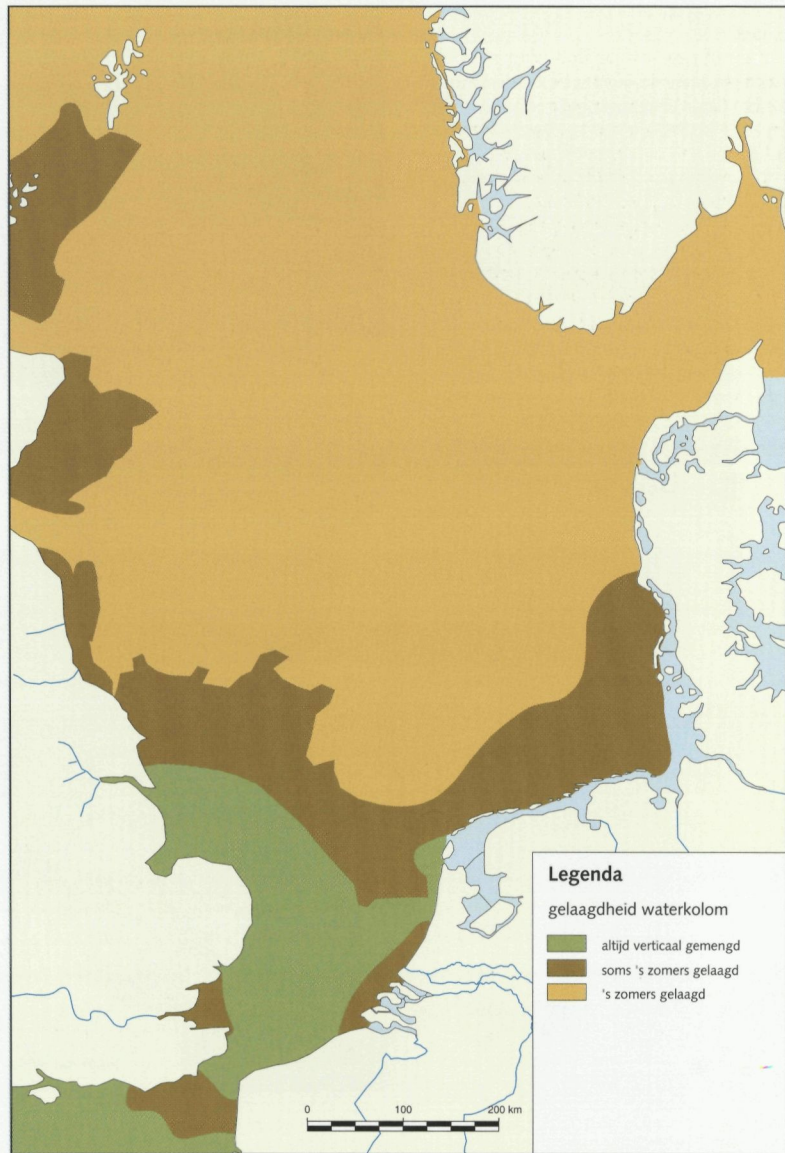
### Lichtklimaat

De lichtdoordringing in het water bepaalt samen met de hoeveelheid nutriënten het niveau van de primaire productie. De lichtdoordringing varieert sterk over de Noordzee. Kanaalwater en water uit de Atlantische Oceaan is zeer helder, met zichtdiepten tot 20 m! Kustwater is veel troebeler; de zichtdiepte ligt meestal tussen de 2 en 4 m. Opwerveling van bodemslib, algenbloei en de invloed van rivieren zijn

**Figuur 5**

Verspreiding van de stratificatie in de Noordzee. De centrale en noordelijke Noordzee zijn in de zomer permanent gestratificeerd. De zuidelijke Noordzee is voor het grootste deel permanent gemengd. Tussen deze zones in bestaat een overgangsgebied waarin bij rustig weer stratificatie kan optreden. Voor de Nederlandse kust en bij de Thamesmondning treedt af en toe zoutstratificatie op.

naar: Pingree *et al.*, 1978



daarvan de oorzaak. De rivieren voeren slib naar zee, maar rivierwater bevat ook veel humusachtige stoffen die veel licht absorberen.

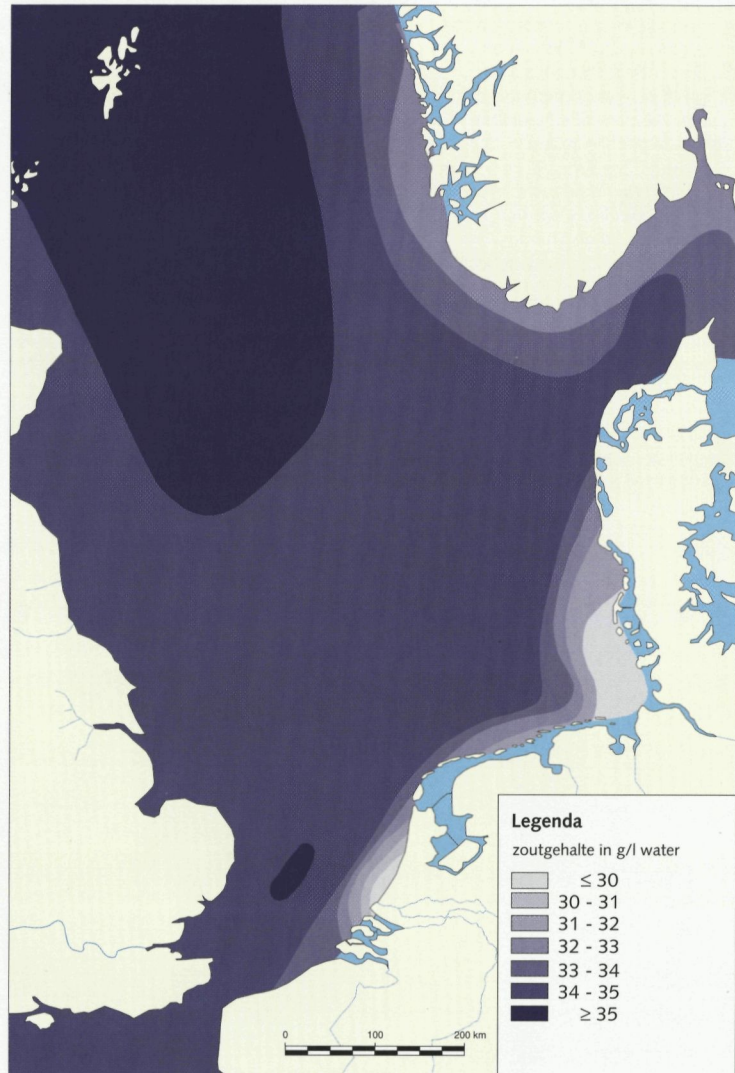
### Nutriënten

Oceaanwater heeft een hoog zoutgehalte (ongeveer 35 gr per liter) en bevat weinig nutriënten. Kustwater daarentegen heeft een lager zoutgehalte door bijmenging van rivierwater (figuur 6) en is daardoor rijker aan deze voedingsstoffen. Dit geldt zeker voor de rivieren die in de Noordzee uitmonden. Rivieren als Rijn en Elbe stromen door dichtbevolkte gebieden met een intensieve landbouw. De mengverhouding van rivier- en zeewater bepaalt dus hoe hoog de nutriëntenconcentraties zijn (figuur 7).

De stikstofconcentratie in rivieren is, vooral in winter en voorjaar, hoog vergeleken met de fosforconcentratie. In oceaanwater is de stikstofconcentratie, vooral in de zomer, laag. Deze eigenschappen verklaren voor een belangrijk deel de nutriëntendynamiek in de Noordzee. De toevoer van rivierwater naar de Noordzee bedraagt ordegrrootte enkele procenten van die van het oceaanwater. Door de veel hogere concentraties is de omvang van de riviervrachten toch vergelijkbaar

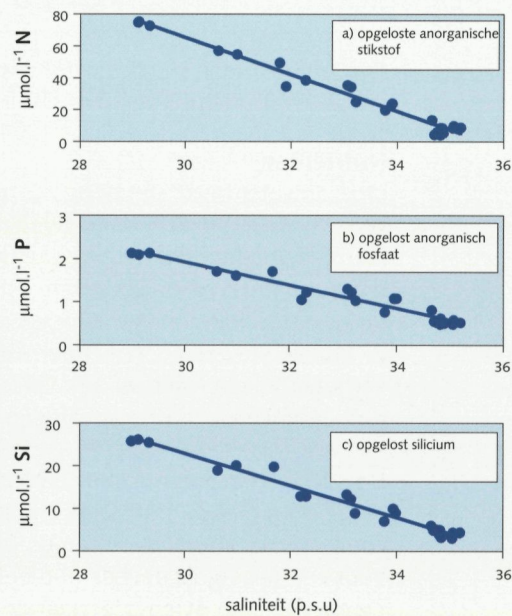
**Figuur 6**

Zoutgehalteverdeling in de Noordzee. De continentale rivieren en het Oostzeewater zorgen lokaal voor verlaagde zoutgehaltes. naar: ICES, 1962



**Figuur 7**

De winterrelatie tussen zoutgehalte en nutriëntengehalten in het Nederlandse kustwater tussen 1975 en 1995 (a. opgeloste anorganisch stikstof, b. opgelost anorganisch fosfaat en c. opgelost silicium). Hoe hoger het zoutgehalte des te lager zijn de nutriëntenconcentraties. naar: De Vries *et al.*, 1998



met die van de oceaan. De invloed van de continentale rivieren beperkt zich tot de kustgebieden; de uitwisseling met de centrale Noordzee is zeer klein. Daardoor heeft het grootste deel van de Noordzee een hoog zoutgehalte en is dus ook voedselarm. Slechts een beperkt deel van de Noordzee is geëutrofiëerd!



### III. Het Noordzee-ecosysteem

---

Fytoplankton kan worden gezien als het gras van de zee. Het vormt een zwevende weide, die net als het gras op het land licht en nutriënten nodig heeft om te groeien. Het wordt door allerlei dieren gegeten en vormt daarmee de basis van de voedselketen in zee. Zonder fytoplankton geen zoöplankton en bodemdieren; zonder deze geen vis en geen zeehonden en bruinvissen.

De vergelijking van fytoplankton met gras is überhaupt niet zo vreemd, aangezien veel van onze ideeën over de Noordzee gestoeld zijn op kennis van land(bouw)-ecosystemen. Er zijn veel overeenkomsten, maar ook verschillen die ons kunnen helpen de eutrofiëringsproblemen beter te begrijpen.

#### **Beperkende factoren voor het fytoplankton**

Fytoplankton heeft deels dezelfde beperkende factoren als landplanten en deels andere. Licht is sterker beperkend in zee, omdat het door het water wordt uitgedoofd.

Fosfor en stikstof zijn nutriënten die zowel op het land als in zee beperkend kunnen worden. Kalium is belangrijk voor landplanten, maar is ruimschoots aanwezig in zeewater, terwijl kiezelzuur (silicium) vaak beperkend is voor een belangrijke fytoplanktongroep, de kiezelwieren of diatomeeën.

De concentraties van nutriënten vertonen karakteristieke variaties in ruimte en tijd. Langs de kust, bijvoorbeeld, bereikt stikstof 's zomers minimale concentraties, terwijl dat voor fosfor meestal al in mei gebeurt (figuur 8). De hele zomer bestaat er een siliciumtekort voor diatomeeën. In de offshore-gebieden worden stikstof en silicium al vroeg in het jaar beperkend en bestaat er een relatief overschot aan fosfor.

Fytoplankton leeft heel kort. Omdat het ook snel groeit, is de omzet- of turnoversnelheid (met andere woorden de productie per eenheid biomassa) van het fytoplankton hoog,  $\pm 100$  x per jaar. Ter vergelijking is de turnover van gras, dat niet begraasd of gemaaid wordt, slechts 1 x per jaar. De hoge turnover van het fytoplankton betekent dat de nutriënten uit het dode materiaal snel vrijkomen. Het fytoplankton neemt deze vrijkomende nutriënten weer op, waardoor de productie kan doorgaan. Het houdt ook in dat met dezelfde (kleine) hoeveelheid nutriënten meer fytoplankton kan worden geproduceerd in een bepaalde tijd dan bij gras het geval is.

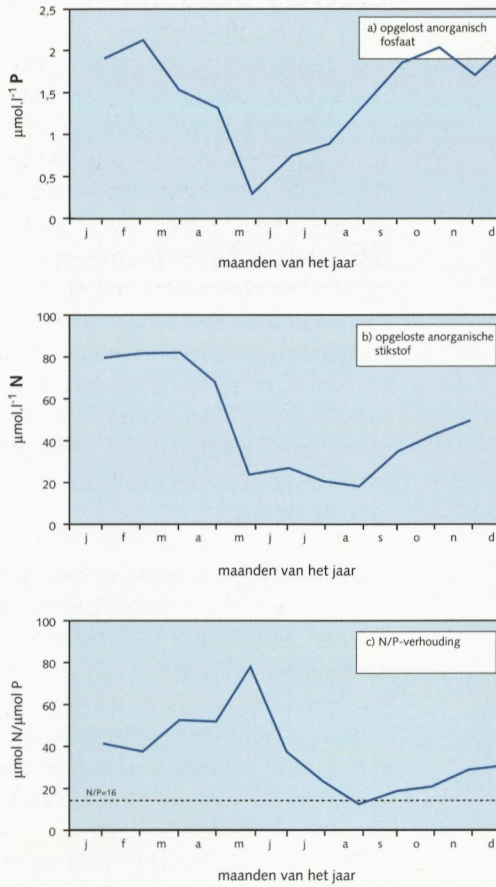
De hoeveelheid aanwezige, plantaardige biomassa is veel kleiner in zee dan op het land. In de kustzone is maximaal zo'n 5-10 gram fytoplankton drooggewicht per  $m^2$  aanwezig. Midden op de Noordzee is dat vijf tot tien maal minder en in een voedselarme oceaan zelfs honderd maal minder. Ter vergelijking, de maximale biomassa op grasland bedraagt al gauw 500 gram drooggewicht per  $m^2$  en op een maïsakker zelfs 1200 gram per  $m^2$ .

#### **Fytoplanktodynamiek**

De natuurlijke wisselingen van de beperkende factoren bepalen voor een deel de dynamiek van fytoplankton in het kustwater. In het vroege voorjaar domineren diatomeeën. Deze soorten groeien goed bij lage

**Figuur 8**

Het gemiddelde seizoensverloop (1975-1995) van opgelost anorganisch fosfaat (a), opgeloste anorganische stikstof (b) en de verhouding tussen die twee in het kustwater bij Noordwijk (c). De stikstof/fosfaatverhouding is zeer hoog gedurende vrijwel het hele jaar. De horizontale lijn geeft de stikstof/fosfaatverhouding aan die als optimaal voor fytoplanktonproductie wordt beschouwd. naar: De Vries *et al.*, 1998



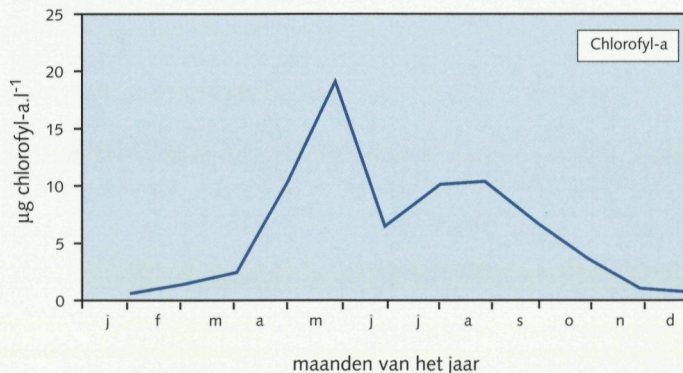
temperatuur en lage lichtintensiteiten. Wanneer de lichtintensiteit toeneemt komt de flagellaat *Phaeocystis* op. Deze soort kan snel groeien bij de hoge nutriëntenconcentraties en veel licht. *Phaeocystis* en diatomeeën domineren vervolgens de voorjaarsbloei omdat de nutriënten dan nog ruim beschikbaar zijn. De bloei van *Phaeocystis* stopt meestal door fosfaatgebrek. De diatomeeën nemen in het voorjaar juist af door siliciumgebrek. Na de voorjaarsbloei volgt soms nog een bloei, maar meestal is er 's zomers minder fytoplankton dan in het voorjaar (figuur 9).

**Voedselweb**

Behalve door het licht en de nutriënten wordt de dynamiek van fytoplankton sterk beïnvloed door de rest van de levensgemeenschap die het fytoplankton consumeert. De organismen van deze levensgemeenschap vormen samen een voedselweb (figuur 10), een netwerk dat aangeeft wat een organisme eet en door wie het wordt gegeten.

**Figuur 9**

Het over de jaren 1975-1995 gemiddelde seizoensverloop van chlorofyl-a in het kustwater bij Noordwijk. naar: De Vries *et al.*, 1998



Fytoplankton wordt begraasd door zoöplankton en filtrerende bodemdieren (in de kustzone bijvoorbeeld door kokkels, strandschelpen en mesheften). Bodemdieren zijn meestal weinig kieskeurig. Alleen heel kleine cellen en slijmbevattende kolonies, zoals die van *Phaeocystis*, worden niet gegeten. Hoge dichtheden van filtrerende bodemdieren in het ondiepe water van estuaria zijn in staat het fytoplankton op een laag niveau te houden. De zee daarentegen is te diep voor zo'n graascontrole door bodemdieren. Bovendien zijn de dichtheden van bodemdieren hier veel lager dan in de estuaria. In zee speelt zoöplankton een grote rol.

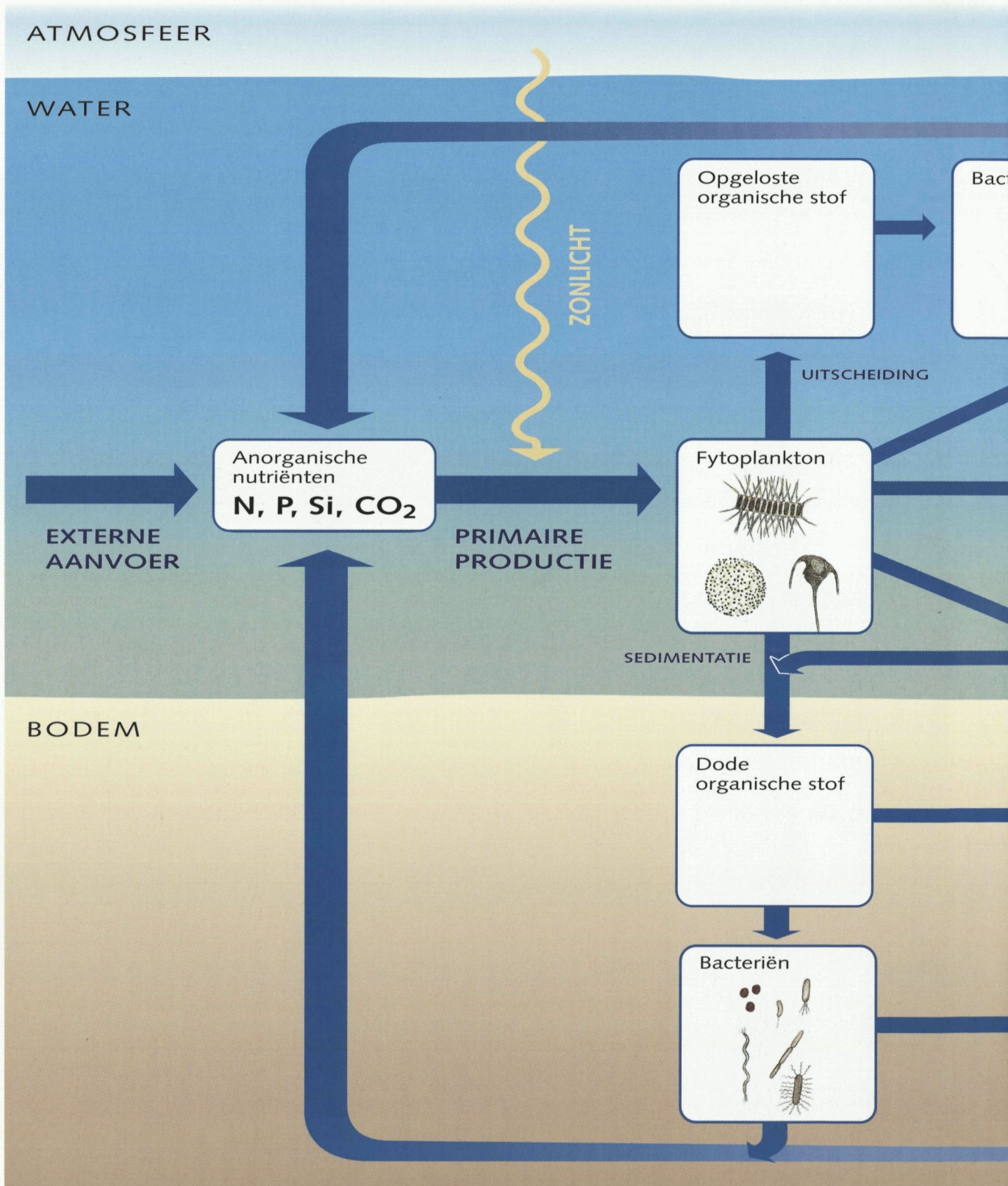
In het algemeen graast zoöplankton selectiever. Grote, slijmerige, stekelige of giftige algen worden niet of nauwelijks gegeten en kunnen onder bepaalde omstandigheden talrijk worden. Dit is vergelijkbaar met weilanden waar soms boterbloemen, distels e.d. een 'plaa' vormen, omdat koeien wel gras, maar geen weide-onkruiden eten. Bodemdieren en dierlijk plankton worden op hun beurt door vissen gegeten. Zoogdieren consumeren weer vissen.

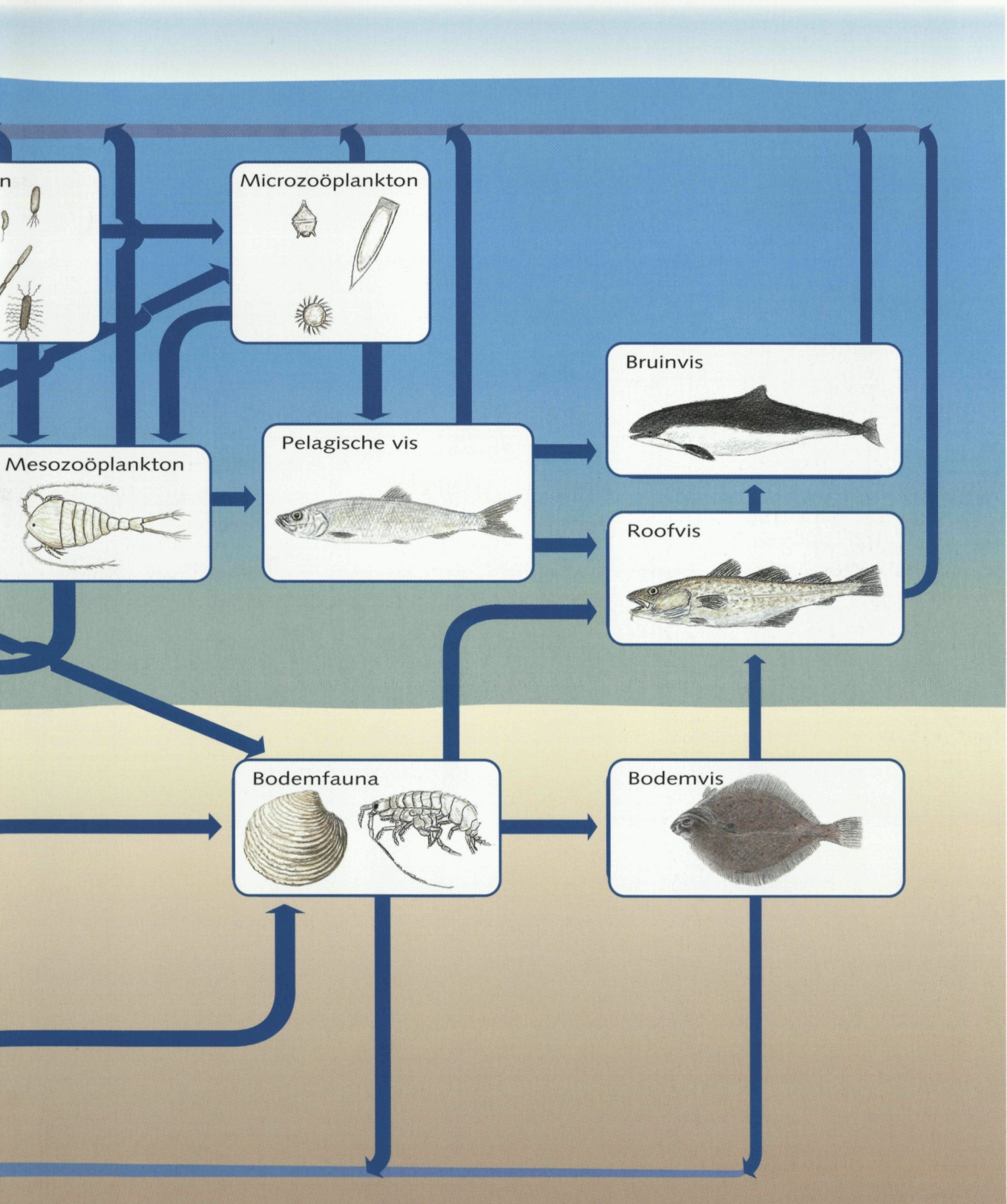
Bij elke stap in het voedselweb, bijvoorbeeld in de reeks fytoplankton-zoöplankton-vis-bruinvis, wordt maar een betrekkelijk klein percentage van de energie in het voedsel gebruikt voor de opbouw van biomassa van de consument zelf. Dit percentage noemt men de ecologische of voedselketenefficiëntie. Deze bedraagt meestal 5-20%. Als er veel stappen in de voedselketen zijn, blijft er uiteindelijk weinig energie over voor het hoogste trofische niveau. Met andere woorden: de groei van een bruinvis is afhankelijk van de productie van heel veel fytoplankton. Voor de productie van een bruinvis van 100 kg zou, bij een omzettingsefficiëntie van 10% per stap in de voedselketen, respectievelijk 1000 kg vis, 10000 kg zoöplankton en 100000 kg fytoplankton nodig zijn.

Bij het verteren van voedsel scheiden dieren het grootste deel van de opgenomen nutriënten uit. Nutriënten komen ook vrij bij de afbraak van organische stof door bacteriën en schimmels. Hierdoor accumuleren er maar betrekkelijk weinig nutriënten in de hogere trofische niveaus. Minder dan 1% van alle nutriënten die in de Noordzee terechtkomen bereikt uiteindelijk de vis.

**Figuur 10**

Voedselweb van de Noordzee. Het zonlicht levert de energie waarvan alle groepen in het voedselweb afhankelijk zijn. De nutriënten worden vastgelegd in de organismen, maar er wordt steeds een deel geremineeraliseerd en hergebruikt.







## IV. Eutrofiëring en eutrofiëringsbestrijding

---

### Omvang en aard van de eutrofiëring

De fosfaat- en stikstofemissies naar de Noordzee zijn van ongeveer 1930 tot 1980 respectievelijk viermaal en tienmaal toegenomen. Deze groei werd veroorzaakt doordat er steeds meer kunstmest werd gebruikt, de import van voedsel en veevoer toenam en de riolering en waterzuivering zijn ingevoerd. Daarnaast werd er veel fosfaat gebruikt in wasmiddelen. De emissie van stikstofverbindingen via de atmosfeer nam toe door de groei van verkeer, industrie en landbouwemissies.

### Eutrofiëringsbeleid

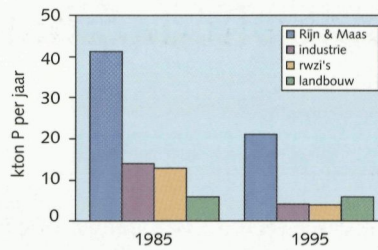
De afspraak van de Tweede Noordzeeministersconferentie in 1987 om de nutriëntenemissies naar de Noordzee te halveren, was gebaseerd op het voorzorgsprincipe. Dit betekende dat de maatregelen al werden afgekondigd voordat helemaal duidelijk was of ze effectief waren. De meeste onderzoekers verwachtten dat de effecten van de halvering van de nutriëntenemissies nauwelijks zichtbaar zouden zijn. Pas bij een reductie van ongeveer 75% zou er een redelijke afname van algenbloeien optreden. Voor de langere termijn wordt daarom gestreefd naar een reductie van 75% van de fosfaat- en 70% van de stikstofbelasting.

Uitgangspunt bij het terugdringen van de emissie was ten eerste dat de maatregelen zo dicht mogelijk bij de bron moesten worden genomen. Ten tweede moesten alle nutriëntenlozers een evenredige bijdrage aan de reductie leveren. Fasering van de maatregelen was mogelijk en nodig, omdat niet alle maatregelen even makkelijk realiseerbaar waren.

### Fosfaat

De totale fosfaatbelasting uit de rivieren op de Noordzee bedroeg in 1985 ongeveer 50 kiloton per jaar. De afgelopen tien jaar zijn veel maatregelen genomen om de eutrofiëring te reduceren. Voor de fosfaatemissie is in de periode tussen 1985 en 1995 de beoogde afname van 50% gerealiseerd (figuur 11). Dit succes is vooral te danken aan de sanering van puntbronnen, zoals fabrieken en waterzuiveringsinstallaties. Ook de vermindering of vervanging van fosfaat in wasmiddelen en in veevoer heeft hieraan bijgedragen. Omdat de sanering in Duitsland even voortvarend is aangepakt als in Nederland, liepen de fosfaatemissies in de Rijn ook terug (figuur 12). Een verdere reductie van de fosfaatemissie zal langzamer verlopen, omdat de puntbronnen inmiddels efficiënt gesaneerd zijn en de huidige emissie vooral afkomstig is uit diffuse bronnen, zoals de landbouw. De landbouw is nu de grootste afzonderlijke fosfaatbron voor het oppervlaktewater.

**Figuur 11**  
Verloop van de fosfaatemissie in Nederland.  
naar: Boers *et al.*, 1996

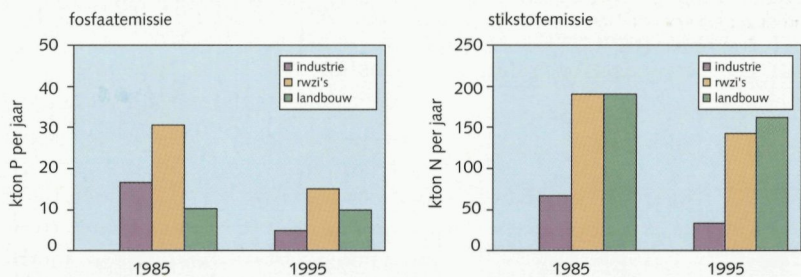


### Stikstof

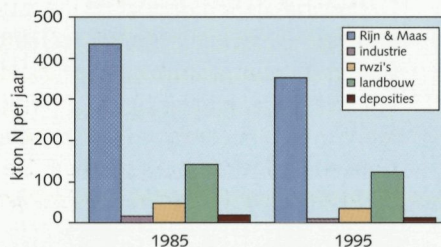
De totale stikstofbelasting van de hele Noordzee via de rivieren bedraagt ongeveer 1000 kiloton per jaar. De aanvoer van stikstof via oceaanwater is ongeveer even groot als die via de rivieren. Schattingen van de atmosferische depositie van stikstof voor de Noordzee als geheel liggen in de ordegrootte van 300-500 kiloton per jaar.

De sanering van stikstof verloopt veel moeizamer dan bij fosfaat. Zoals figuur 13 aangeeft bedraagt de reductie die tussen 1985 en 1995 is bereikt slechts 15-20%. De reden daarvoor is dat de intensieve bemesting in de landbouw moeilijker te saneren is. vormt daarbij het grootste probleem. Extra stikstofverwijdering in rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) kan dit probleem niet compenseren. Het zou ook het uitgangspunt van evenredige bijdragen aan de opheffing van de vervuiling ondergraven.

**Figuur 12**  
Verloop van de fosfaat- en stikstofemissie in het Rijnstroomgebied.  
naar: Boers *et al.*, 1996



**Figuur 13**  
Verloop van de stikstofemissie in Nederland.  
naar: Boers *et al.*, 1996



## V. Eutrofiëringseffecten in de Noordzee

Het eerste eutrofiëringseffect is de toename van nutriëntenconcentraties. Dit leidt tot een toename van de fytoplanktonproductie. Alle andere effecten zijn hierop terug te voeren, zoals:

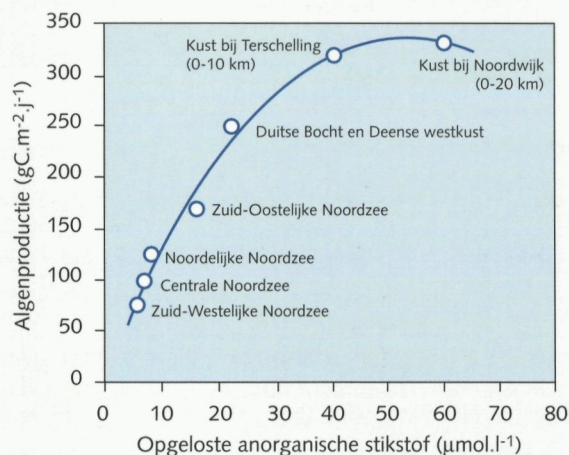
- verschuivingen in de fytoplanktensamenstelling met bijvoorbeeld meer plaagalgen;
- veranderingen van de visproductie;
- zuurstofgebrek in gestratificeerde gebieden.

### Fytoplanktonproductie

De fytoplanktonproductie in de Noordzee is deze eeuw ongetwijfeld toegenomen door de stijgende nutriëntenconcentraties, maar op plaatsen waar de fosfaat- en stikstofconcentraties hoog zijn wordt er iets anders beperkend, bijvoorbeeld licht. In de voedselarme en heldere delen van de Noordzee stijgt de jaarproductie dan ook met de nutriëntenconcentratie, maar in het Nederlandse kustwater treedt verzadiging op door lichtbeperking (figuur 14).

**Figuur 14**

De relatie tussen de winterconcentraties van opgeloste anorganische stikstof en de jaarproductie van fytoplankton in de Noordzee. In het Nederlandse kustwater treedt verzadiging van de primaire productie op voor nutriënten. naar: De Vries *et al.*, 1998



De recente daling van de fosfaatbelasting heeft geen effect gehad op de productiviteit van fytoplankton. De oorzaak daarvan is dat de fosfaatconcentraties langs de kust nog te hoog zijn. Bij een verdere daling zal fosfaat in mei waarschijnlijk enkele weken echt beperkend worden voor de fytoplanktonproductie, zoals recent in de Oosterschelde is waargenomen. De fosfaatbeperking had daar echter geen significant effect op de jaarlijkse fytoplanktonproductie.

### Visproductie

In de Nederlandse kustwateren correleerde de toename van de belasting van fosfor en stikstof in de laatste 50 jaar met een toename van de overleving van zeer jonge tong en schol en met hun latere groei. Een recente afname van de scholvangsten werd gecorreleerd met de afname van de fosfaatbelasting en de conclusie werd getrokken dat de fosfaatsanering leidde tot afname van de schol. Deze conclusie kan echter niet juist zijn omdat de fytoplanktonproductie nog niet is

afgenomen. Er moet dus een alternatieve verklaring gevonden worden voor de afname van de scholvangsten.

Het blijkt vaak moeilijk om eutrofiëringseffecten op visserijopbrengsten vast te stellen. In de geëutrofiëerde Oostzee bijvoorbeeld zijn de vangsten van haring en kabeljauw in deze eeuw zeer sterk gestegen. Oppervlakkig gezien lijkt deze stijging door de gelijktijdig opgetreden eutrofiëring veroorzaakt te zijn. In dezelfde periode echter nam het aantal zeehonden spectaculair af. Het wegvallen van de visconsumptie door zeehonden bleek echter voor een belangrijk deel de vangststijgingen te kunnen verklaren. Uit dergelijke case-studies blijkt meestal, dat naast eutrofiëring, ook allerlei andere factoren veranderen, waardoor men moeilijk conclusies kan trekken.

Een invloed van eutrofiëring op de visopbrengst van de gehele Noordzee is niet waargenomen en ook niet te verwachten omdat alleen de randen van de Noordzee geëutrofiëerd zijn.

### **Plaagalgen**

Eutrofiëring wordt beschouwd als één van de factoren, die de mondiale toename veroorzaken van giftige en niet-giftige plaagalgen. Een toename van de nutriëntentoevoer kan het voorkomen van plaagalgen (zie Intermezzo I op pagina 28) op verschillende manieren beïnvloeden. In de eerste plaats veroorzaakt het een verandering in de verhouding van fosfor en stikstof enerzijds en andere voedingsstoffen anderzijds. Omdat de toevoer van kiezelzuur niet toeneemt bij eutrofiëring, terwijl fosfor en stikstof dat wel doen, treedt er een verschuiving op van kiezelwieren naar andere algen. Dat kan ongewenst zijn, omdat de meeste diatomeeën goed eetbaar zijn voor zoöplankton en bodemdieren, terwijl andere algen dat vaak niet zijn. Vooral in de groep dinoflagellaten komen veel slecht eetbare soorten voor. Sommige plaagalgen, zoals *Phaeocystis*, groeien ook snel ook bij hoge concentraties van fosfor en stikstof. Deze soort is sterk toegenomen door eutrofiëring langs de kusten van België, Nederland, Duitsland en Denemarken.

Een tweede proces dat het optreden van plaagalgen bevordert, is de selectieve begrazing door zoöplankton. Hierdoor worden goed eetbare soorten weggegraasd en blijven de oneetbare (grote, slijmerige, gepantserde of giftige) soorten over. Dit proces wordt op gang gebracht door eutrofiëring. Zoöplankton wordt talrijk door de toename van de voorjaarsbloeien van goed-eetbare algen, waardoor het later in het jaar een grote graasdruk kan uitoefenen.

Bij relatief hoge stikstofconcentraties vormen sommige soorten (*Alexandrium*) gifstoffen waarin stikstof is ingebouwd. Bij stikstofgebrek daarentegen, maken ze die gifstoffen niet. Een mogelijke verklaring waarom algen deze stoffen maken, is om begrazing door zoöplankton te verminderen.

De mate van turbulentie bepaalt welke typen (plaag)algen voorkomen. Weinig turbulentie bevordert het voorkomen van flagellaten en het verdwijnen van diatomeeën. Flagellaten zijn algen die kunnen zwemmen. Hierdoor zijn ze in staat gunstige omstandigheden in de waterkolom (nutriënten, licht) op te zoeken. Bij veel turbulentie zijn ze daartoe niet in staat en doen ze het meestal slecht. Diatomeeën hebben juist turbulentie nodig, omdat ze anders bezinken. De groep van de flagellaten heeft relatief veel giftige vertegenwoordigers. Weinig turbulentie vergroot dus de kans op plaagalgbloeien.

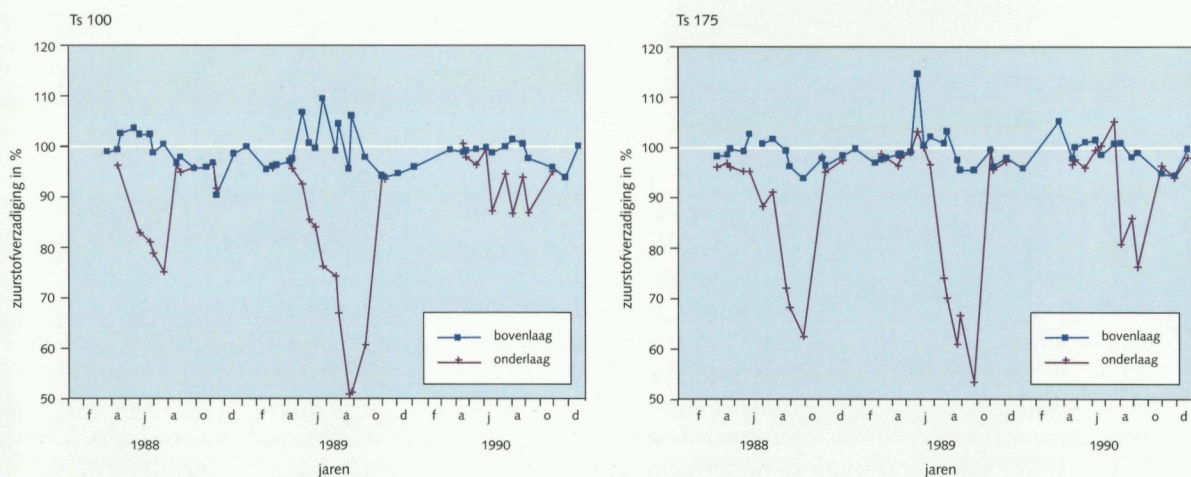
De toename van het scheepvaartverkeer (met verplaatsing en lozing

van ballastwater) en van het transport van schelpdieren leidt ertoe dat ruststadia van giftige algen op plaatsen terecht komen, waar ze vroeger niet voorkwamen.

### Zuurstofgebrek

Een bekend effect van eutrofiëring is zuurstofgebrek. Dit zuurstofgebrek ontstaat in gestratificeerde gebieden door afbraak van fytoplankton dat in de onderlaag terecht gekomen is. Doordat de uitwisseling van zuurstof tussen boven- en onderlaag beperkt is, kan de zuurstof in de onderlaag niet snel genoeg worden aangevuld. Er treedt dan verlaging van de zuurstofconcentratie op, waardoor in extreme gevallen vis- en bodemdiersterfte optreedt.

Zuurstofgebrek in gelaagde gebieden is waargenomen in de Duitse Bocht en op de Oestergronden. De minimale zuurstofverzadigingspercentages in de onderlaag van het laatste gebied bedragen ongeveer 50% (figuur 15). In de Duitse Bocht zijn veel lagere waarden vastgesteld (tot 10%). Er bestaan geen langjarige meetreeksen van zuurstof in beide gebieden, zodat er geen historisch verband met eutrofiëring kon worden bewezen. Er bestaan wel tijdreeksen van de Adriatische Zee en van Oostzeegebieden. De Duitse Bocht ontvangt veel rivierwater. Door eutrofiëring lijkt daar de kans op zuurstofgebrek bij stratificatie te zijn toegenomen.



**Figuur 15**

Het verloop van het zuurstofverzadigingspercentage in boven- en onderlaag van twee stations, Ts 100 en Ts 175, van de Oestergronden (Centrale Noordzee). De situaties in de drie onderzochte jaren verschilden sterk. In 1988 ontwikkelde zich een stratificatie die echter op Ts 100 door een storm in juli verstoord werd. De zuurstofconcentratie daalde daarom op dit station niet verder. Dit gebeurde wel op Ts 175. In 1989 was de stratificatie veel sterker en duurde veel langer op beide stations. Het verzadigingspercentage daalde daardoor tot 50. In 1990 was de stratificatie op beide stations zwak en daalde de zuurstofconcentratie nauwelijks.  
naar: Peeters *et al.*, 1991

Het zuurstofgebrek onder de spronglaag in de centrale Noordzee kan worden verklaard uit de afbraak van organische stof die vanuit de zuidelijke Noordzee wordt aangevoerd, uit de afbraak van de bezonken voorjaarsbloei en van de bezinkende productie uit de bovenlaag. Het is aannemelijk dat het zuurstofgebrek in het Oestergrondengebied is toegenomen door de toename van de atmosferische stikstofbelasting en indirect door de eutrofiëring van de zuidelijke Noordzee.

## Plaaggalgen in de Noordzee

De term 'plaagalg' is voortgekomen vanuit het menselijke perspectief. Algen die massaal voorkomen en daarbij stank en schuim veroorzaken, worden al snel plaagalg genoemd. Hetzelfde geldt ook voor algen die mosselen, door hun gifstoffen, ongeschikt maken voor menselijke consumptie.

### *Phaeocystis*

De bekendste, niet-giftige plaagalg in de Noordzee is *Phaeocystis*. De soort kan, in kolonievorm, massaal voorkomen (tot 100 miljoen cellen per liter!). De kolonies bevatten veel slijm. Ze worden daarom èn door hun omvang, weinig gegeten door zoöplankton en filtrerende bodemdieren. Bij het afsterven van een *Phaeocystis*-bloei kunnen grote hoeveelheden schuim uit dit slijm ontstaan waar badgasten op het strand hinder van ondervinden. Deze soort maakt DMS (dimethylsulfide), een vluchtige stof die bijdraagt aan de zure regen. *Phaeocystis* is door eutrofiëring sterk toegenomen.

### *Noctiluca*

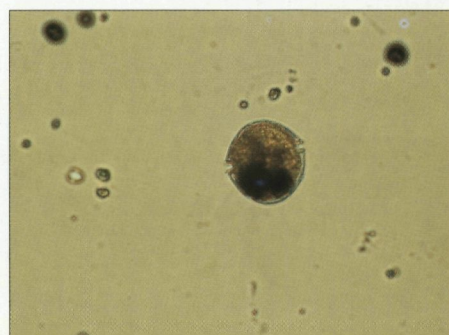
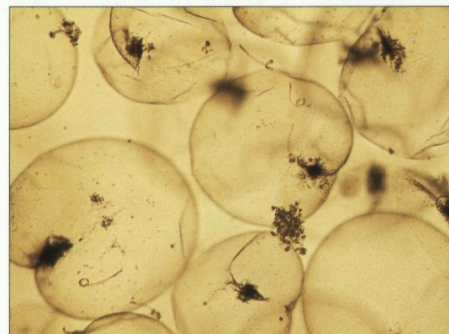
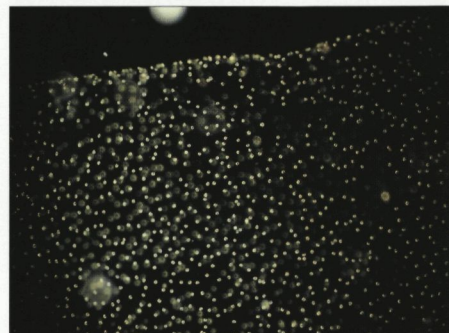
De niet-giftige, zeevonk of *Noctiluca* nam waarschijnlijk sterk toe door eutrofiëring. Dit organisme veroorzaakt 's zomers grote oranje-rode drijfblazen in zee, die bij aanspoeling onder meer stankproblemen kunnen geven.

### *Dinophysis*

Van de *Dinophysis*-soorten was twintig jaar geleden nog niet bekend dat ze giftig waren. Men verdacht andere soorten van de maag- en darmstoornissen (de zogenaamde Diarrheic Shellfish Poisoning, DSP), die soms voorkwamen bij schelpdierconsumenten. *Dinophysis acuminatu* is in Nederland economisch gezien de belangrijkste giftige soort. Bloeien van deze soort leiden met enige regelmaat tot sluiting van de mosselhandel.

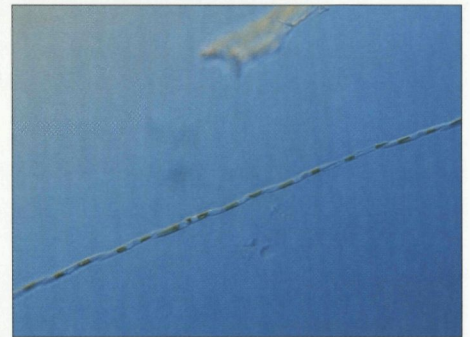
### *Alexandrium tamarense*

*Alexandrium tamarense* is nog maar kort geleden ontdekt in het Nederlandse deel van de Noordzee, maar zijn giftigheid was al lang bekend. Het gif van deze flagellaat veroorzaakt, soms dodelijke, zenuwverlammingen bij schelpdierconsumenten (Paralytic Shellfish Poisoning, PSP). Doorgifte van het gif heeft ook geleid tot sterfte van echte zeedieren, zoals walvisachtigen en zeevogels.



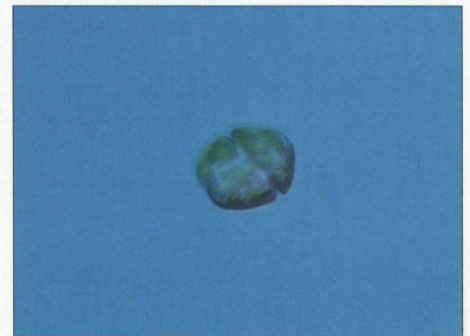
#### *Pseudonitzschia*

Een diatomee van de groep *Pseudonitzschia* veroorzaakte in 1987 in Canada de dood van drie mensen die mosselen gegeten hadden en geheugenverlies bij de overlevenden van die vergiftiging (Amnesic Shellfish Poisoning, ASP). Deze alg was bekend maar men kende de giftige vorm nog niet. De soort blijkt ook in Nederland voor te komen in, tot nu toe, onschadelijke concentraties. Bepaalde *Pseudonitzschia*-soorten kunnen ook vis- en vogelsterfte veroorzaken.



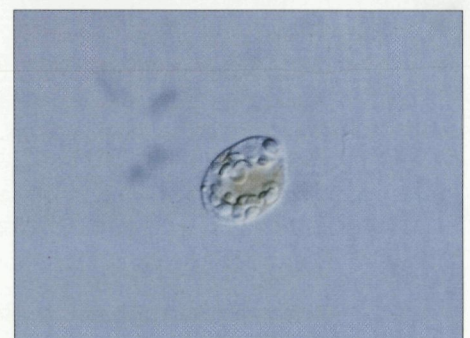
#### *Gymnodinium mikimotoi*

De dinoflagellaat *Gymnodinium mikimotoi* komt algemeen voor in de Noordzee. *Gymnodinium* veroorzaakt bij hoge concentraties vissterfte. In de Noorse zalmteelt treedt daardoor regelmatig sterfte op.



#### *Chrysochromulina polylepis*

Een beruchte bloei van *Chrysochromulina polylepis* veroorzaakte in 1988 bij Noorwegen massale sterfte van allerlei organismen, van zeeieren tot vissen. Men kende deze kleine flagellaten wel, maar hun giftigheid was tot dan toe volstrekt onbekend. In Nederland zijn ook *Chrysochromulina*'s waargenomen, maar in lage, tot nu toe, ongevaarlijke concentraties.



#### *Chattonella* en *Pfiesteria*

In Nederland zijn incidenteel *Chattonella*-soorten waargenomen. Deze groep veroorzaakt in Japan ook veel problemen. In het voorjaar van 1998 veroorzaakte een *Chattonella*-soort massale vissterfte in de Noordzee. Een soortgelijk gif als *Chattonella* is onlangs ook ontdekt in *Gymnodinium mikimotoi*. De neurotoxinen van deze groep algen kunnen via schelpdieren leiden tot Neurotoxic Shellfish Poisoning (NPS) en via aerosolen, die in de branding ontstaan, tot Respiratory Illness (RI), bestaande uit neus- en keelproblemen.

De recent in Amerika ontdekte dinoflagellaat *Pfiesteria* is nog niet in de Noordzee waargenomen.



## VI. Eutrofiëringsonderzoek van RIKZ

### Beleidsvragen

De Derde Nota waterhuishouding uit 1990 was grotendeels gebaseerd op model-prognoses. Vragen zoals: 'Hoe reageert het ecosysteem op het huidige beleid?' en 'Daalt het fosfaatgehalte in het kustwater al?', moeten beantwoord worden met monitoringsgegevens. Inschatting van de effecten van het langetermijnbeleid op bijvoorbeeld plaagalgen en visproductie vragen echter om experimenteel onderzoek van de beleidsvarianten.

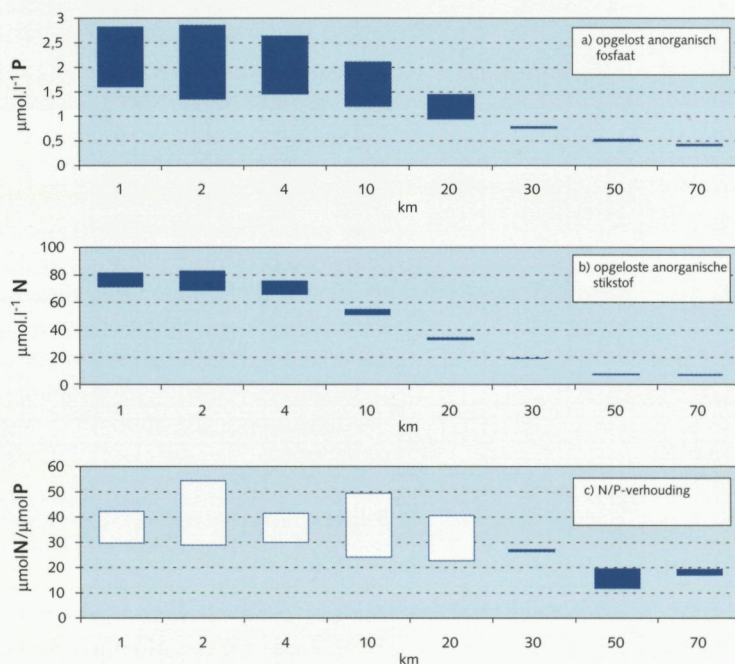
### Trendanalyse van het huidige beleid

Meetreeksen van nutriënten vertonen een enorme variatie in ruimte en tijd. Om een trend te kunnen bepalen, moet deze variatie (veroorzaakt door seizoenen, jaren en verschillen in zout-gehalte) eerst worden 'uitgefilterd'. Zo'n trendanalyse is uitgevoerd met monitoringsgegevens verzameld in de Nederlandse estuaria en het kustwater van 1975 tot 1995. Uit deze analyse bleek (figuur 16) dat sinds  $\pm$  1985 de fosfaatconcentraties in het kustwater (tot 20 km) jaarlijks met ongeveer 5% zijn gedaald. De concentraties verminderden momentaan en proportioneel met de vermindering van de rivierbelasting. De concentraties in de centrale, zuidelijke Noordzee (30-70 km) veranderden niet.

De vrees dat nalevering van fosfaten uit de bodem het effect van vermindering van de belasting zou vertragen of zelfs teniet zou doen, bleek ongegrond. Het effect van de fosfaatvermindering op de hoogte van de voorjaarsbloei in de kustzone bleek echter nihil (figuur 17). De verwachting dat voor zichtbare effecten op fytoplankton een verdergaande sanering nodig is, wordt hiermee bevestigd. In tegenstelling tot fosfaat zijn de concentraties van anorganische stikstof niet significant gedaald (figuur 16). De N/P-ratio nam daardoor sterk toe in het kustwater.

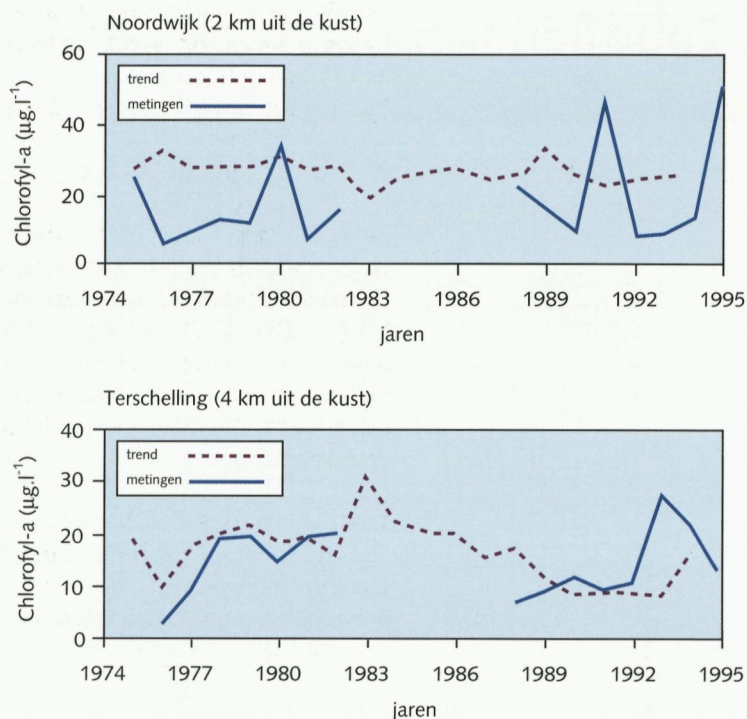
**Figuur 16**

Trend van de concentraties van: (a) opgelost anorganisch fosfaat, (b) opgeloste anorganische stikstof en (c) van de verhouding b/a, op een raai bij Noordwijk (1-70 km) van 1988 tot 1995. De hoogte van de blokken geven de mate van verandering weer (open = toename, blauw = afname).  
naar: De Vries *et al.*, 1998



**Figuur 17**

Het verloop van de voorjaarsconcentratie (april-mei) van chlorofyl-a tussen 1975 en 1995 op de stations Noordwijk 2 en Terschelling 4. De trend, gearceerd weergegeven, is niet significant. naar: De Vries *et al.*, 1998



### Voorspellend onderzoek ten behoeve van het toekomstige beleid

Experimenten met ecosystemen maken het in principe mogelijk om een indruk te krijgen van de effecten van toekomstige beleids- of beheersingrepen. Het experimenteel uitvoeren van een beleidsmaatregel in een natuurlijk ecosysteem is echter meestal te duur of om andere redenen niet haalbaar. Laboratoriumexperimenten zijn weliswaar uitstekend uitvoerbaar en betaalbaar, maar ze zijn niet representatief voor de natuur.

Experimentele ecosystemen (modelecosystemen of 'mesocosms') bieden een uitkomst voor dit dilemma. Zij vormen het compromis tussen natuurlijke ecosystemen en laboratoriumopstellingen. Het zijn relatief kleine, geïsoleerde delen van natuurlijke ecosystemen die experimenteel goed manipuleerbaar zijn. Men kan bijvoorbeeld het effect van de hoogte van de fosfaatbelasting onderzoeken door een aantal mesocosms een oplopende reeks fosfaattoevoer te geven. Vanwege hun beperkte omvang herbergen modelecosystemen meestal geen grotere organismen, zoals vissen. De kleine organismen daarentegen, zijn in normale aantallen aanwezig. Juist deze kleine organismen (bacteriën, fytoplankton, zoöplankton) spelen een sleutelrol bij eutrofiëring. Experimentele ecosystemen zijn daarom zeer geschikt voor onderzoek naar eutrofiëringseffecten.

In de mesocosms van het Rijksinstituut voor Kust en Zee op Noord-Beveland (zie Intermezzo II, figuur 21) is onderzocht welke ecologische effecten een vermindering van de nutriëntentoevoer naar de Noordzee zal hebben. In 1992 is het systeem getest in pilotexperimenten en in de twee daaropvolgende jaren zijn in kortlopende experimenten fosfaat en stikstof onderzocht. In 1995 werd een drietal beleidsscenario's nagebootst.

### Pilotexperimenten

Het pilotonderzoek moest aantonen of de omgevingsfactoren goed nagebootst konden worden en of de metingen reproduceerbaar waren. Een overmaat van silicium, stikstof en fosfaat in het pilotexperiment in 1992 leidde tot een afname van diatomeeën en een zeer grote bloei

van *Phaeocystis*. Dit was een onverwacht resultaat omdat de gangbare hypothese over het effect van hoge siliciumgehalten voorspelde dat de diatomeeën juist zouden moeten toenemen t.o.v. de flagellaat *Phaeocystis*. Dit is kennelijk niet het geval als fosfaat en stikstof ook hoog zijn. De reproduceerbaarheid van dit experiment, maar ook van andere metingen bleek goed.

#### Kortdurende experimenten met nutriënten en mosselen

In een serie korte vervolgenten werden de toevoer van stikstof en fosfaat gevarieerd. De sleutelrol van silicium voor de fytoplankton-samenstelling werd bevestigd. Diatomeeën zijn prima in staat met andere soorten te concurreren om stikstof en fosfaat, zolang er maar voldoende silicium is. Bij een overmaat van stikstof of fosfaat echter, raakt vroeg of laat het silicium uitgeput en leggen diatomeeën het af tegen *Phaeocystis*.

Een grote graasdruk door mosselen bleek de hoeveelheid en samenstelling van het fytoplankton sterk te beïnvloeden. Langzaam groeiende soorten werden door de mosselen weggegraasd. Alleen snelgroeiende soorten konden zich onder deze omstandigheden handhaven.

#### Figuur 18

De ontwikkeling van het fytoplankton (als chlorofyl-a) in de drie scenario's van het experiment in 1995.

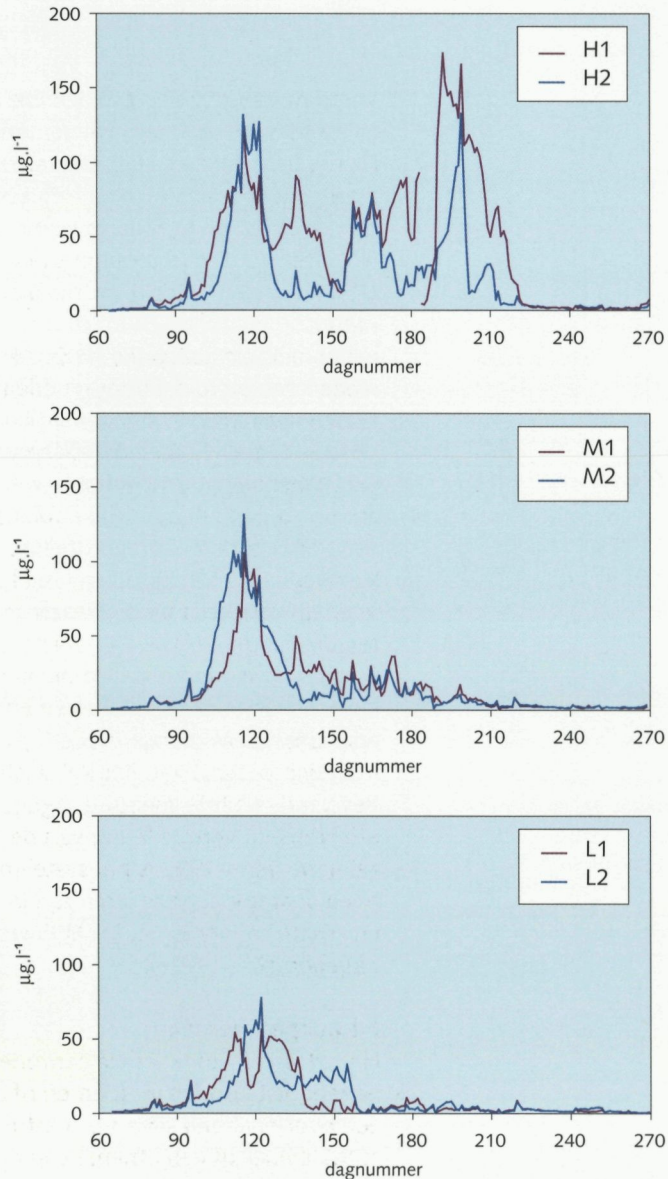
De scenario's hebben de volgende nutriëntenreducties t.o.v. die van 1985:

H-scenario: 50% P-reductie,  
10% N-reductie;

M-scenario: 50% P-reductie,  
50% N-reductie;

L-scenario: 75% P-reductie;  
75% N-reductie.

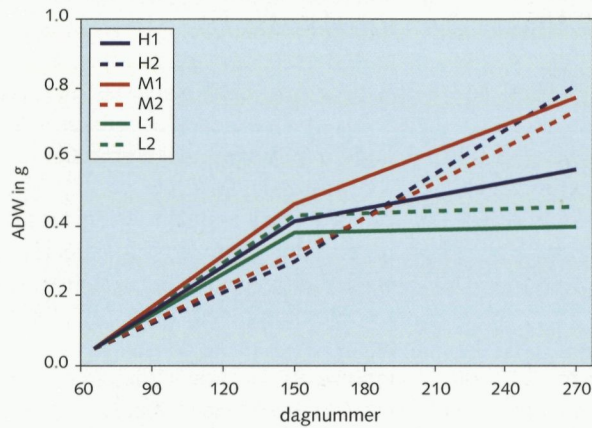
Alle scenario's zijn in duplo uitgevoerd.  
naar: Smaal *et al.*, 1997



**Figuur 19**

De seizoensontwikkeling van de mosselbiomassa ADW (asvrij drooggewicht) in de drie scenario's H, M en L in 1995. De mosselen groeien aanvankelijk in alle scenario's ongeveer even goed. Vanaf begin juni blijft de groei in scenario L achter bij die in M en H.

naar: Smaal *et al.*, 1997



### Beleidsscenario's

Beleidsvoorspelling was het doel van de experimenten van 1995. In deze experimenten, die het hele groeiseizoen duurden, werden de huidige en toekomstige nutriëntenbelastingen van het Noordzeekustwater nagebootst. De drie scenario's hoog, midden en laag, imiteerden respectievelijk de volgende reductie-percentages t.o.v. 1985: N 10%, P 50%; N 50%, P 50% en N 75%, P 75%.

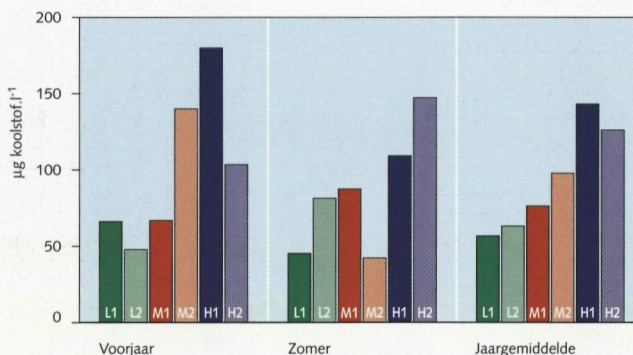
Het bleek dat P-reductie uitsluitend effect heeft op de voorjaarsbloei (figuur 19). Een P-reductie van 75% had een gering effect op de hoogte van de voorjaarsbloei. Een vermindering van de stikstofbelasting bleek veel effectiever. Een reductie van 50% van de N-belasting gaf een evenredige vermindering van algenbiomassa en algenproductie in de zomer. Bij een nog grotere reductie uitte dit effect zich nog sterker. De soortensamenstelling van het fytoplankton bleek weinig te variëren in deze experimenten.

De groei van mosselen vertoonde een ander beeld dan de productie van fytoplankton (figuur 20). In het voorjaar was de groei in alle drie behandelingen ongeveer hetzelfde. In de zomer groeiden de mosselen bij de hoge en middelhoge nutriëntenbelastingen ongeveer even snel. Bij de laagste N- en P-toevoer daarentegen, bleef groei in de zomer geheel achterwege! Kennelijk bestond er toen een voedseltekort. De bodemdieren (mosselen + 'wilde' bodemdieren) in dit scenario produceerden in de hele experimentele periode minder dan in de twee andere scenario's. In tegenstelling tot de bodemdieren reageerde het kleine microzoöplankton wel min of meer evenredig op de fytoplanktonproductie en dus op de nutriëntentoevoer (figuur 21). Het grotere mesozöplankton was in deze experimenten ondervertegenwoordigd. Een interessante, nu nog onbeantwoorbare, vraag is hoe deze respons van bodemdieren en microzoöplankton doorwerkt op de productiviteit van vissen.

**Figuur 20**

De ontwikkeling van de biomassa ( $\mu\text{g}$  koolstof./l<sup>-1</sup>) van het microzoöplankton in de drie scenario's in voorjaar, zomer en jaargemiddelde. Globaal hebben de hoogstbelaste mesocosms ook het meeste microzoöplankton.

naar: Smaal *et al.*, 1997



## Experimentele ecosystemen

### Nabootsing van het kustwater

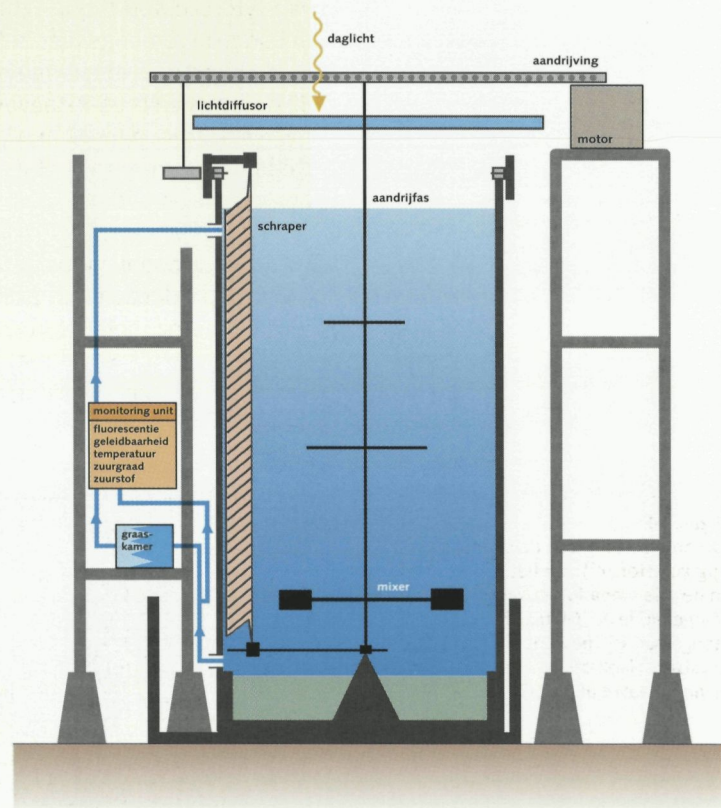
Het lijkt onbegonnen werk om in een mesocosm van 3 m<sup>3</sup> een stukje Noordzee na te bootsen. Het water in de zuidelijke Noordzee bijvoorbeeld is gemiddeld 30 m. diep. Een dergelijke diepte is moeilijk te realiseren in een mesocosm. Toch is het essentieel dat een experimenteel ecosysteem voldoende lijkt op het ecosysteem dat men bestudeert.

De waterdiepte bepaalt, samen met de lichtuitdoving, de lichtintensiteit in een waterkolom. Door de lichtuitdoving te versterken (o.m. door zwarte wanden te kiezen) bleek dat het mogelijk was het lichtklimaat van een waterkolom van 10 meter in een mesocosm van 3 meter, na te bootsen (figuur 16). In de mesocosms zijn behalve het lichtklimaat, ook de watertemperatuur, de menging, de verversing en de nutriëntenbelasting van de kustzone bij Noordwijk, nagebootst. Daarmee werden de belangrijkste fysische en chemische voor het fytoplankton vergelijkbaar in mesocosms én kustzone.

Een andere voorwaarde is dat de levensgemeenschap in de mesocosm lijkt op die van het kustwater. Die gelijkenis is eenvoudig te realiseren voor het plankton (fyto-, zoö- en bacterioplankton): men vult de mesocosms met kustwater met alles wat daarin zit.

Het nabootsen van een natuurlijke bodemgemeenschap is maar beperkt mogelijk in kleine mesocosms. Daarom is besloten om alleen filtrerende bodemdieren toe te voegen. Hiervoor zijn mosselen gekozen die in graaskamers werden geplaatst. Deze graaskamers werden continu doorstroomd met water uit de mesocosms. Daarbij werd ook de consumptie van fytoplankton door de bodemdieren in de graaskamer continu gemeten.

Door de bescheiden afmetingen hebben kleine mesocosms veel wand per eenheid volume. Om de aangroei van zeepokken en zeevieren op die wanden te voorkomen, werden deze daarom continu schoon gehouden.



**Figuur 21**

Schema van de mesocosm te Jacobahaven. Een lichtdiffusor zorgt ervoor dat er een versterkte lichtuitdoving door de zwarte wanden plaats vindt. Met de menger kan een groot bereik aan turbulenties worden nagebootst. De schrapper verwijdert de aangroei van de wanden. Het water in de tanks kan verversd worden en een monitoringeenheid registreert automatisch o.m. het zout- en zuurstofgehalte, de pH, de temperatuur en de fluorescentie. In een apart compartiment kan de graas van bodemdieren op fytoplankton worden gemeten.

naar: Smaal *et al.*, 1997



## VII. Epiloog. Beantwoording beleidsvragen

---

Tot hoever moet de nutriëntenstroom worden ingedamd om negatieve eutrofiëringseffecten te bestrijden en eventuele positieve effecten in stand te houden? We zullen deze vraag uit de inleiding beantwoorden aan de hand van de effecten, die vermindering van nutriënten kan hebben op plaagalgen, op zuurstofgebrek en op de productiviteit van schelpdieren en vissen.

### Fosfaatemissies

Bij een reductie van de fosfaattoevoer naar zee kan de primaire productie pas dalen, als de fosfaatovermaat is verdwenen. Omdat dit nu nog niet is gebeurd, is de fytoplanktonproductie evenmin gedaald. Het is dan ook, vanwege de relaties in de voedselketen, onwaarschijnlijk dat de afname van vangsten van bepaalde vissoorten werd veroorzaakt door de fosfaatsanering.

Ook bij een verdwijning van de fosfaatovermaat zal de fytoplanktonjaarproductie nauwelijks dalen, omdat fosfaatbeperking in ons kustwater maar kort duurt. Dit is gebleken in de Oosterschelde, waar de fosfaatbelasting sinds 1985 met 85% is gereduceerd. De fytoplanktonjaarproductie van dit gebied daarentegen is niet afgenomen. Ook de mesocosm-studies suggereren dat de jaarproductie van fytoplankton nauwelijks zal worden aangetast bij een sterke reductie van de fosfaattoevoer. Bij een verdwijning van de fosfaatovermaat zal daarom de vis- en schelpdierproductie evenmin verminderen. Dit is bevestigd in de Oosterschelde en in de mesocosm-experimenten.

*Phaeocystis* heeft hogere fosfaat- en stikstofconcentraties nodig dan de meeste andere fytoplanktonsoorten. Bij een sterke fosfaatreductie zal deze plaagsoort afnemen. In de huidige Oosterschelde lijken de *Phaeocystis*-bloeien inderdaad in omvang afgenomen en treedt soms zeer sterke fosfaatbeperking op. Omdat deze soort wordt gemeden als voedsel door zoöplankton en schelpdieren, zal het effect van sanering op de productie van deze diergroepen klein zijn.

De rivierinvloed in de centrale Noordzee is nihil. Een effect van fosfaatreductie op de zuurstofhuishouding in dit gebied is daarom onwaarschijnlijk. De kans op lage zuurstofgehalten in de Duitse Bocht zal evenmin afnemen bij voortgezette P-sanering, vanwege de korte duur van de fosfaatlimitatie.

### Stikstofemissie

Vermindering van de stikstofaanvoer met tientallen procenten, zal aanvankelijk leiden tot vermindering van de stikstofovermaat in het kustwater, zonder waarneembare gevolgen voor fytoplankton, zoöplankton, bodemdieren en vissen.

Bij een verdergaande reductie zal 's zomers stikstofbeperking optreden, omdat er in die periode van nature relatief weinig stikstof aanwezig is. De fytoplanktonproductie zal daardoor afnemen. Omdat de stikstofbeperking veel langer zal duren dan de fosfaatbeperking, zal ook het effect op de jaarproductie van het fytoplankton groter zijn dan bij een fosfaatsanering.

In de zomer is de graasdruk van zoöplankton en bodemdieren hoog, waardoor de koppeling tussen de productie van fytoplankton en die van vissen en vogels optimaal is. In de Waddenzee bijvoorbeeld, is

aangetoond dat de mosselproductie afhangt van de zomerproductie van het fytoplankton. Hieruit volgt dat een hoge graad van stikstofsanering een grotere kans op daling van de vis- en schelpdierproductie zou geven dan een vergelijkbaar niveau van fosfaatsanering.

In het mesocosm-experiment van 1995 had een verlaging van de stikstofbelasting met 75% inderdaad een veel groter effect op de fytoplanktonproductie dan een vergelijkbare daling van de fosfaatbelasting. Het microzoöplankton nam, evenals het fytoplankton, proportioneel af met de stikstofbelasting. De productiviteit van mosselen en andere bodemdieren daarentegen werd niet noemenswaard aangetast bij een reductie 50% van de stikstofbelasting. Dit was wel het geval bij een reductiepercentage van 75. Deze uitkomsten laten zien dat de daling van de dierlijke productie niet evenredig hoeft te zijn met de daling van de fytoplanktonproductie.

De reductie van de stikstofbelasting op de Oosterschelde bedroeg 70%. Het heeft geleid tot het verdwijnen van de stikstofovermaat, maar de fytoplankton- en schelpdierproductie bleven ongeveer gelijk. Dit kan grotendeels verklaard worden door een betere benutting van de overgebleven stikstof en door een toegenomen helderheid van het water.

De gevolgen van een verlaging van de stikstofbelasting voor de visproductie van de Noordzee zijn al met al toch onzeker. De verwijdering van de overmaat zal echter weinig effect hebben op de visproductie van het kustwater. Bij verdere reducties daarentegen bestaat er wél een reële kans dat de visproductie afneemt.

Afname van de stikstofbelasting leidt, evenals de afname van de fosfaatbelasting tot een verbeterde concurrentiepositie van diatomeeën ten opzichte van *Phaeocystis* en andere flagellaten. Minder stikstof verkleint het risico van giftigheid van sommige plaagalgbloeien.

In de centrale Noordzee en in de Duitse Bocht bestaat er risico op zuurstofgebrek bij de bodem. Atmosferische depositie van stikstofverbindingen, tezamen met de indirecte doorwerking van de eutrofiëring van de zuidelijke Noordzee via het bodemgebonden slibtransport, vergroten dit risico voor de centrale Noordzee. Ook de omvangrijke stikstofbelasting via de rivieren in de Duitse Bocht vergroot de lokale kans op zuurstofgebrek. Vermindering van de stikstofemissies, niet alleen naar het oppervlaktewater, maar ook naar de atmosfeer, zal daarom de kans op lage zuurstofgehalten in de gestratificeerde gebieden kunnen verkleinen.

## Overblijvende vragen

Er bestaan ten aanzien van zoutwatereutrofiëring drie gebieden waarvan onvoldoende kennis voorhanden is.

De productie van vis en schelpdieren is niet alleen afhankelijk van de primaire productie, maar ook van de omzettingsefficiëntie van de voedselketen. Deze efficiëntie hangt waarschijnlijk sterk af van de voedselkwaliteit van plaagalgen, maar ook het aantal stappen in de voedselketen is belangrijk. Zoöplankton lijkt cruciaal voor de overgang van algen naar vis, maar kan ook de voedselkwaliteit van het fytoplankton beïnvloeden.

**Hoe efficiënt is de omzetting van fytoplankton via de voedselketen in schelpdieren, vis en andere grotere dieren? Wat is daarbij de rol van zoöplankton en plaagalgen?**

In deze eeuw zijn veel estuaria als zodanig verloren gegaan. Estuaria hebben van nature een hoge stikstofverwijdering.

**Hoe kan, in verband met de traag verlopende stikstofsanering, de stikstofverwijderingscapaciteit van estuaria beter benut worden?**

Plaagalgbloeien laten zich moeilijk voorspellen. Vroegtijdige waarschuwing is daarom belangrijk voor het beheer, maar is ook van belang om de processen die tot deze bloei leiden, beter te leren kennen. Verscheidene soorten zijn in lage concentraties al schadelijk. Een aantal soorten is moeilijk te identificeren.

**Hoe kan een betrouwbaar en vroegtijdig waarschuwingssysteem voor plaagalgen worden ontwikkeld?**

Deze vragen zullen de komende tijd door RIKZ opgepakt worden.



## VIII. Literatuur

---

- Berchum, A.M.van & G.Wattel, 1997.  
De Oosterschelde, van estuarium tot zeearm. Bekkenrapportage 1991-1996. Rapport RIKZ-97.034.
- Beusekom, J. van & S. Diel-Christiansen, 1993.  
A synthesis of phyto- and zooplankton dynamics in the North Sea environment. Rapport WWF International North Sea Programme, Godalming, Surrey, U.K.
- Boers, P., W. Laane, I. de Vries, W. Zevenboom & J. Coppoolse, 1996.  
Nieuwe wegen naar helder water. RIZA-rapport 97.008. ISBN 9036950554.
- Derde Nota Waterhuishouding, Basisrapport Eutrofiëring, 1990.  
Min. Verkeer & Waterstaat, SDU, 's Gravenhage
- Hansson, S. & L.G. Rudstam, 1990.  
Eutrophication and Baltic fish communities. *Ambio* 19:123-125.
- ICES, 1962.  
Mean monthly temperature and salinity of the surface layer of the North Sea and adjacent waters. Charlottelund.
- ICONA, 1992.  
Noordzee-atlas. Stadsuitgeverij Amsterdam.
- Kromkamp, J. & J. Peene, 1999.  
Estimation of phytoplankton photosynthesis and nutrient limitation in the Eastern Scheldt estuary using variable fluorescence. *Aquat.Ecol.* 33: 101-104.
- Lammens, E.H.R.R. & S.H. Hosper, 1998.  
Het voedselweb van IJsselmeer en Markermeer. Trends, gradiënten en stuurbaarheid. RIZA-rapport 98.003.
- Laevastu, T., 1983.  
Serial atlas of the marine environment. Vol.4. Am. Geogr. Soc., New York.
- Nanninga, H.J., 1997.  
Invloed van stikstof en fosfor op de visstand in de Noordzee. Vakgroep Mariene Biologie, Rijksuniversiteit Groningen.
- Nienhuis, P.H. & A.C.Smaal (eds.), 1994.  
The Oosterschelde estuary (The Netherlands): A case-study of a changing ecosystem. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- North Sea Task Force, 1993.  
North Sea Quality Status Report 1993. Oslo and Paris Commissions, London.

- Peeters, J.C.H. & L. Peperzak, 1990.  
Nutrient limitation in the North Sea: a bioassay approach. *Neth.J.Sea Res.* 27: 61-73.
- Peeters, J.C.H., H.A. Haas & L. Peperzak, 1991.  
Eutrofiëring, primaire productie en zuurstofhuishouding in de Noordzee. DGW-nota GWAO-91.O83.
- Peeters, J.C.H., H.A. Haas, L. Peperzak & I. de Vries, 1993.  
Nutrients and light as factors controlling phytoplankton biomass on the Dutch Continental Shelf (North Sea) in 1988-1990. Rapport DGW-93.004.
- Peeters, J.C.H., J.C.A. Joordens, A.C. Smaal & P.H. Nienhuis (eds.), 1993.  
The impact of marine eutrophication on phytoplankton and benthic suspension feeders: result of a mesocosm pilot study. Rapport DGW-93.039; NIOO/CEMO-654.
- Peeters, J.C.H., R.W.P.M. Laane & L. Peperzak, 1993.  
De relatie tussen nutriënten in de Rijn en het kustwater van de Noordzee: effecten en doelen. In: Eutrofiëring en beleid in Nederland, hoe verder? RIZA-notitie 93.056x, DGW-nota 93.007, RIVM-rapport 732404002.
- Peperzak, L., 1994.  
Plaagalgen in de Noordzee. Rapport DGW-93.053.
- Pingree, R.D., D.H. Holligan & G.T. Mardell, 1978.  
The effect of vertical stability on phytoplankton distribution in the summer on the North-west European Shelf. *Deep-sea.Res.* 25: 1011-1028.
- Prins, T.C., V. Escaravage, L.P.M.J. Wetsteyn, J.C.H. Peeters & A.C. Smaal, 1999.  
Effects of different N- and P-loading on primary and secondary production in an experimental marine ecosystem. *Aquat. Ecol.* 33: 65-81.
- Raaphorst, W. van, 1996. INP-Mooring 94-96.  
Antropogene eutrofiëring en natuurlijke variaties in de open Noordzee: Metingen op een verankeringsstation in de Oestergronden. BEON-rapport 96-16.
- Smaal, A.C., J.C.H. Peeters, T.C. Prins, H.A. Haas & C.H.R. Heip (eds.), 1997.  
The impact of marine eutrophication on phytoplankton, zooplankton and benthic suspension feeders. Final report: results of a long term mesocosm experiment with three nutrient reduction scenarios. Rapport RIKZ-97.035; NIOO/CEMO-1997.05.
- Sommer, U., 1994.  
Planktologie. Springer-Verlag, Berlin.

De Vries, I., F.J. Los, R. Janssen, A. Cramer, M. van der Tol, 1993.  
Risiko-analyse eutrofië-ring Noordzee. DGW-rapport-93.029.

Vries, I. de, R.N.M. Duin, J.C.H. Peeters, F.J. Los, M. Bokhorst &  
R.W.P.M. Laane, 1998.  
Patterns and trends in nutrients and phytoplankton in Dutch coastal  
waters: comparison of time series analysis, ecological model simulation  
and mesocosm experiments. ICES Journal of Marine Science 55: 620-  
634.



## Colofon

---

Deze brochure is een uitgave van het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) en geeft een samenvatting van het eutrofiëringsonderzoek dat is uitgevoerd in de projecten "EUZOUT" en "BEON.EUTRO". Deze onderzoeken zijn uitgevoerd in opdracht van het Hoofdkantoor van Rijkswaterstaat en in samenwerking met het de directie Noordzee en het Centrum voor Estuariene en Marien Oecologie (NIOO-CEMO) te Yerseke.

Veel personen hebben bijgedragen aan de inzichten neergelegd in dit rapport, in het bijzonder:

P.C.M. Boers, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA)

V.Escaravage, J.C. Kromkamp (NIOO-CEMO)

A.C Smaal, voorheen RIKZ, nu Rijksinstituut voor Visserij Onderzoek (RIVO)

R.R. Jansen, L.Peperzak, A.J. Pouwer, T.C. Prins, M.W.M. van der Tol, M. Vink en L.P.M.J. Wetsteyn (RIKZ).

### Inlichtingen

J.C.H. Peeters

RIKZ, Postbus 8039

4330 EA MIDDELBURG

tel. (0118) 67 23 12

fax (0118) 65 10 46

e-mail: j.c.h.peeters@rikz.rws.minvenw.nl

### Tekst

J.C.H. Peeters, I. de Vries & H. Haas (RIKZ)

### Vormgeving

J.C.B. Eykman (RIKZ)

### Illustraties en foto's

Illustraties figuur 10, pagina 22-23 : J.C.H.Peeters (RIKZ)

Foto's Intermezzo I, pagina 30-31 : L.Peperzak (RIKZ)

### Druk

LnO drukkerij/uitgeverij, Zierikzee

### Referentie

J.C.H. Peeters, I. de Vries & H. Haas, 1999. Eutrofiëring en productiviteit in de Noordzee. Rapport RIKZ-99.008, ISBN 90-369-3483-4.

