



**Antropogene
eutrofiëring en
natuurlijke variaties**

**Consequenties voor de
produktiviteit van de Noordzee**

Beleidsgericht
ecologisch onderzoek
van de
Noordzee/Waddenzee



NIOZ

Antropogene eutrofiëring en natuurlijke variaties

Consequenties voor de produktiviteit van
de Noordzee

INP-MOORING
PELAGIC FOOD WEB
STED
STRAECOS

620

(Data rapport INP-mooring project 1994)

W. van Raaphorst	(NIOZ)
F.C. van Duyl	(NIOZ)
H. Ridderinkhof	(NIOZ)
R. Riegman	(NIOZ)
P. Ruardy	(NIOZ)

Juni 1995

BEON Rapport nr. 95-8

BEON project NIOZ 94 E 01

ISSN 0924-6576

INHOUDSOPGAVE

I.	Samenvatting	1
II.	Voorlopige conclusies	2
1.	Inleiding	3
1.1.	Achtergrond en algemene vraagstelling	3
1.2.	Doelstelling	5
1.3.	Beleidsrelevantie	6
2.	Overzicht van de metingen	7
2.1.	INP-Mooring	7
2.2.	PEL. FOOD WEB	11
2.3.	STED	11
3.	Stratificatie-Ecosysteemmodel (STRAECOS)	15
4.	Resultaten en Discussie	18
4.1.	INP-Mooring	18
4.2.	PEL. FOOD WEB	24
4.3.	STED	26
4.4.	STRAECOS	31
5.	Referenties	36

I. SAMENVATTING

In dit fase-rapport wordt een overzicht gegeven van de data die in 1994 verkregen zijn middels een uitgebreid meetprogramma rond een verankeringsstation op de Oestergronden in de Noordzee (54°25' N, 4°02' E, RWS monitoringstation TS 135). De gepresenteerde resultaten en conclusies hebben een voorlopig karakter. De resultaten zullen in 1995 in een definitieve vorm uitgewerkt en geëvalueerd worden. Het programma vond plaats in het kader van het BEON speerpunt eutrofiëring en was een samenwerking tussen NIOZ, RWS/RIKZ, RWS/DNZ en MAFF (UK).

De eerste doelstelling van het project is het scheppen van de wetenschappelijke voorwaarden om voor een depositiegebied als de Oestergronden een aantal vragen te kunnen beantwoorden aangaande de effecten van een reductie van de emissie van nutriënten door de grote rivieren. Bijvoorbeeld: Leidt een verlaagde N of P belasting tot een verlaagd voedselaanbod aan de bodemfauna, wat is het effect op de zuurstofhuishouding. Deze vragen kunnen nog niet goed beantwoord worden, omdat kennis over de niet nabij de kust gelegen gestratificeerde delen van de Noordzee nog in onvoldoende mate beschikbaar is. Dit onderzoek heeft tot doel na te gaan hoe korte termijn fluctuaties (uren, dagen) in meteorologie doorwerking in eutrofiëringsprocessen als primaire productie, mineralisatie van organisch materiaal en nalevering van nutriënten van bodem naar waterkolom. De tweede doelstelling is het leveren van een bijdrage aan de operationalisering van een geautomatiseerde monitoringstechniek die additioneel kan zijn voor het bestaande monitoringsysteem met behulp van schepen.

Het project bestaat uit 4 onderdelen: het verankeringsproject INP-MOORING, de expedities PEL. FOOD WEB en STED (Short TERM Dynamics), en het gecombineerde stratificatie-ecosysteem model STRAECOS (STRATification ECOSystem model).

In het INP-MOORING sub-project werd een groot aantal fysische, chemische en biologische variabelen semi-continu gemeten middels aan boeien verankerde sensoren. De resultaten laten de ontwikkeling van de temperatuur-stratificatie tussen april en september goed zien. In de zomer had de waterkolom een 3-lagen structuur met een temperatuur spronglaag of niet-turbulente tussenlaag (NTTL) in het midden (op 12-25 m diepte). De nitraat spronglaag lag steeds aan de onderkant van de NTTL. Hoewel de zomer van 1994 weinig wind kende, is toch een aantal (kleine) sprongsgewijze verdunningen van de NTTL waargenomen. Deze veranderingen gingen gepaard met een verhoging van de fluorescentie ("chlorofyl") boven de thermocline, wat duidt op de directe relatie tussen verstoring van de verticale structuur van de waterkolom en het ontstaan van algenbloeien in gestratificeerde gebieden.

Tijdens de PEL. FOOD WEB expedities (april en juli 1994) is de structuur van het pelagisch voedselweb bepaald. In april direct na de voorjaarsbloei werd de primaire productie grotendeels verzorgd door algen $> 5 \mu\text{m}$ die door hun grootte kunnen ontsnappen aan begrazing (principe van "size differential control"). In de zomer bestond het pelagisch systeem voornamelijk uit pico- en nanoalgen en microzoöplankton. In deze situatie kan het zoöplankton de algenbiomassa door graas controleren.

De STED expeditie in juli 1994 had de korte termijn variaties in de pelagisch-benthische interacties tot onderwerp. De verzamelde data wijzen op een door het getij geïnduceerde variatie in de depositie van organisch materiaal, die een getijdencyclus in de activiteit van benthisch "small food web" tot gevolg lijkt te hebben. De bodem-water uitwisseling van nutriënten werd verhoogd door resuspensie van bodemmateriaal, waarschijnlijk ten gevolge van desorptie vanaf de geresuspendeerde deeltjes. Ook in situ kan dit een belangrijk mechanisme zijn voor de nalevering van met name fosfaat en ammonium.

Integratie van de verzamelde (en additionele) data kan alleen via modellen. Daarom is een fysisch menglaag model gekoppeld met het ERSEM ecosysteem model tot het 1-dimensionale kolommodel STRAECOS. Het model berekent de verticale structuur van de waterkolom onder invloed van de weerscondities. Uitwisseling van opgeloste stoffen tussen boven- en onderlaag vindt plaats als door wind de niet-turbulente tussenlaag dunner wordt of geheel verdwijnt (entrainment). Als gevolg hiervan stijgt de chlorofyl concentratie boven de thermocline. Het model simuleert een aantal van deze (zomer)bloeien. Iedere bloei heeft een verhoging van de sedimentatie van organisch materiaal tot gevolg, en daarmee ook een verhoging van het zuurstofverbruik in de onderlaag van de waterkolom en door de bodem. Juist in deze situaties kunne lage zuurstofconcentraties onder in de waterkolom ontstaan.

II. CONCLUSIES

Omdat dit fase-rapport vooral een data verslag is, en analyse en uitwerking nog moet volgen, zij de conclusies vrij algemeen gesteld.

In de zomermaanden bepaalt de verticale structuur (gelaagdheid) van de waterkolom de mate waarin nutriënten beschikbaar kunnen komen voor het fytoplankton boven de thermocline. Vooral de aanwezigheid van een niet-turbulente tussenlaag speelt als diffusie barrière een belangrijke rol. Onder invloed van wind kalft deze tussenlaag af en mengt water uit de tussenlaag en vanonder de thermocline op met water uit de fotsche zone. Hierdoor worden de zomerse algenbloeien in de relatief ondiepe Oestergronden geïnduceerd. Het is te verwachten dat de hoogte van de bereikte chlorofyl concentraties tijdens deze bloeien mede bepaald wordt door hergebruik van buiten het gebied aangevoerde hoeveelheid nutriënten, waarschijnlijk in organische vorm.

In een zomer met meerdere stormen of periodes met relatief veel wind (bijv. 1988) is de totale primaire productie hoger dan in een rustige zomer (bijv. 1987, 1994). Hierdoor is ook de depositie van (vers) organisch materiaal groter en daarmee de voedselbeschikbaarheid voor de bodemfauna.

Door de stimulerende invloed van wind op zomerse algenbloeien in de ondiepe, maar gestratificeerde Oestergronden en de hierop volgende sedimentatie en mineralisatie (zuurstofverbruik) in de onderlaag van de waterkolom en in de bodem, is de kans op lage zuurstofconcentraties nabij de bodem waarschijnlijk het grootst in een periode met weinig wind direct volgend op een periode met veel wind.

Door wind en getij geïnduceerde resuspensie van bodemmateriaal heeft een stimulerend effect op de nalevering van nutriënten door de bodem, met name voor de voor adsorptie - desorptie gevoelige componenten fosfaat en ammonium.

Omdat wind een stochastisch karakter heeft met een sterke variabiliteit, vertonen nutriënten- en chlorofylconcentraties in de waterkolom op de Oestergronden sterke variaties op een termijn van dagen tot weken. Door deze variaties zijn de zomer-gemiddelde concentraties niet adequaat met een conventioneel monitoringprogramma (1 x per 2 weken) te bepalen, maar zijn semi-continu registraties noodzakelijk (≥ 1 x per dag).

1. INLEIDING

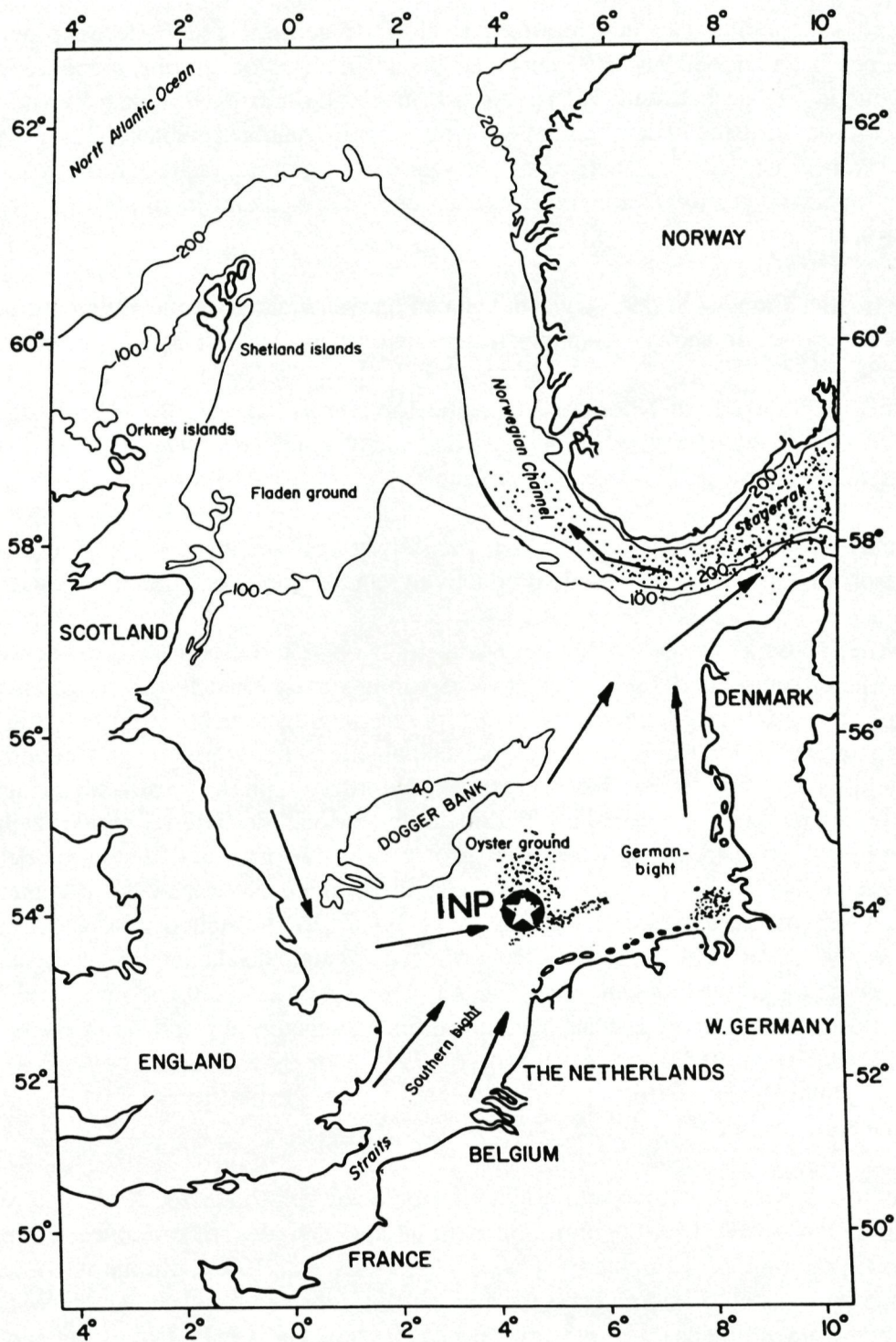
1.1. ACHTERGROND EN ALGEMENE VRAAGSTELLING

Antropogene eutrofiëring van de Noordzee is al sinds geruime tijd onderwerp van zowel wetenschappelijk onderzoek als van beheer en beleid. Internationaal zijn afspraken gemaakt over de reductie van de belasting van de Noordzee met de nutriënten stikstof en fosfor met 50%. Vooral voor stikstof is deze reductie tot nu moeilijk haalbaar gebleken, met als gevolg dat op dit moment de belasting met fosfor veel verder is terug gebracht dan die met stikstof. Belangrijke beleidsvragen die met de reductiemaatregelen samenhangen zijn (BEON-speerpunt Eutrofiëring):

1. Welke effecten kunnen worden verwacht van een onevenwichtige reductie van nutriënten (P 50%, N < 50%), en wat zijn de najleffecten (nalevering P vanuit de bodem, i.t.t. N)?
2. Welk streefbeeld voor de Noordzee in relatie tot eutrofiëring wordt nagestreefd, zijn de risico's voor lage zuurstofverzadigingswaarden (<50%) bij een 50% nutriënten-reductie-scenario voldoende laag en daardoor acceptabel?
3. Hoe werkt (de-)eutrofiëring door in het voedselweb en welke gevolgen heeft het voor hogere trofische niveau's en de totale productiviteit van de Noordzee?

Voor de Nederlandse kustzone kunnen deze vragen tot op zekere hoogte en met een redelijke betrouwbaarheid beantwoord worden, en is voorspelling van de effecten van reductiescenario's ook met gecalibreerde modellen mogelijk. Hier spitsen de vragen zich toe op onder andere de voorspelling van het risico van bloeien met toxische algen, en de doorwerking van eutrofiëring op uiteindelijk de visproductie. Voor de open Noordzee zijn bovenstaande vragen veel moeilijker te beantwoorden, omdat hier de directe invloed van de rivieren minder zichtbaar is en de nutriëntenconcentraties voor een veel groter deel dan nabij de kust door de oceaan bepaald worden. Natuurlijke variaties maken dat in de open Noordzee de effecten van de reductie van de nutriëntenbelasting moeilijk in het veld vast te stellen zijn. Prognoses met modellen kunnen nog niet goed gegeven worden omdat de kennis over belangrijkste mechanismen als advectioneel transport van POC en chlorofyl-a, sedimentatie en resuspensie, en over de invloed van weer en klimaat niet in voldoende mate aanwezig is (VAN HAREN & JOORDENS 1990, RUARDIJ & VAN RAAPHORST 1995). Ook is kwantitatieve kennis over de dominerende invloed van verticale mengprocessen in de gestratificeerde waterkolom nog onvoldoende aanwezig (TETT e.a. 1993).

Toch worden ook eutrofiëringsverschijnselen gemeld voor het "open-zee deel" van het NCP. Bij langdurige NO-wind kan de antropogene bijdrage aan de stikstofconcentratie op de Oestergronden (Figuur 1.1) oplopen tot 60% (DE VRIES e.a. 1993). Zuurstof concentraties minder dan 50% van het verzadigingsniveau zijn gemeld voor de onderlaag van de waterkolom van de Oestergronden tijdens de zomerstratificatie (PEETERS e.a. 1991). Ook is het aandeel van potentieel toxische dinoflagellaten in de totale algensamenstelling in dit gebied groter dan nabij de kust (COLIJN 1991, ZEVENBOOM e.a. 1991, KOEMAN & RADEMAKER.1993, ZEVENBOOM 1993).



Figuur 1.1. Kaart van de zuidelijke en oostelijke Noordzee met daarin aangegeven de locatie van het INP-MOORING verankeringsstation in de Oestergronden. De pijlen geven het residuele transport van water en gesuspendeerd (organisch) materiaal weer. Gestippeld weergegeven zijn de (tijdelijke) depositiegebieden.

Resultaten van recent onderzoek naar de sediment-water uitwisseling van nutriënten (N, P, Si) en het benthisch small-food web (BELS-INP 1991-1992) geven aan dat algenmateriaal dat geproduceerd is in de Zuidelijke Bocht van de Noordzee zich (tijdelijk) kan ophopen op de bodem van de Oestergronden en het Friese Front voordat het wordt doorgevoerd naar de Duitse Bocht en uiteindelijk het Skagerrak (VAN RAAPHORST 1993 en referenties daarin, GEHLEN 1994, LOHSE e.a. 1994). In de zomer daalt in deze depositiegebieden de zuurstofindringing in de bodem en de -concentratie in het water direct boven de bodem tot soms zeer lage waarden ten gevolge van de afbraak van het gedeponeerde organisch materiaal (LOHSE e.a. 1993). Via nalevering van nutriënten uit de bodem kunnen hier verhoogde zomerbloeien van fytoplankton ontstaan (VAN RAAPHORST e.a. 1991).

Eutrofiëring van de zuidelijke Noordzee kan dus een aanzienlijk effect hebben op de beschikbaarheid van voedsel voor de bodemfauna (en daarvan levende vissen) van de ecologisch belangrijke depositiegebieden. In de Oestergronden is een toename geconstateerd in de dichtheid van de slangster *Amphiura filiformis* in de periode tussen eind jaren zeventig en 1991 (HOLTMANN & GROENEWOLD 1992). Deze macrobenthossoort is een indicator voor voedselrijke gebieden. Reductie van de nutriëntenbelasting heeft mogelijk indirecte gevolgen voor de bodemfauna van de Oestergronden en het Friese Front omdat er minder voedsel op de bodem zal neerkomen. De preciese consequenties zijn nog onbekend.

Wel is duidelijk dat kort durende variaties in bijvoorbeeld de stratificatie, sedimentatie en resuspensie onder invloed van instraling, wind en getij bepalend zijn voor de respons van deze gebieden op nutriënten reductie. Chlorofyl-a concentraties in de waterkolom en zuurstofopname door de bodem laten een jaarcyclus zien met met meerdere kort durende pieken en dalen, zij het dat de jaar-maxima meestal aan het eind van de zomer optreden (VAN RAAPHORST e.a. 1992). Als primaire productie in depositiegebieden voor een substantieel deel bepaald wordt door hergebruik (nalevering) van nutriënten die zijn opgeslagen in organisch materiaal, dan hebben winterwaarden van nutriënten concentraties hier slechts een beperkte betekenis voor de fytoplankton productie. De kort durende variaties brengen ook met zich mee dat zomergemiddelde condities niet betrouwbaar geschat kunnen worden op grond van enkele metingen. Bovendien zal in de zomer de beschikbaarheid van organische componenten inclusief POC en DOC van belang kunnen zijn voor de primaire productie.

1.2. DOELSTELLING

Een gedegen inzicht in de variabiliteit van fysische, chemische en biologische variabelen in de depositiegebieden is onontbeerlijk voor het evalueren en voorspellen van de effecten van mogelijke nutriënten-reductiescenario's. Leidt een verlaagde N of P belasting tot een verlaagd voeselaanbod aan de bodemfauna van de Oestergronden? Wat is het effect op de zuurstofhuishouding? Kan de bodem hier nog lang P naleveren? Vindt in deze bodems een belangrijke N verwijdering door denitrificatie plaats? De uiteindelijke doelstelling van het INP-MOORING 94-96 programma is het scheppen van de wetenschappelijke voorwaarden om deze vragen te kunnen beantwoorden.

Meer concreet: Dit onderzoek heeft tot doel na te gaan hoe korte termijn fluctuaties (uren, dagen) in meteorologie doorwerken in primaire productie, mineralisatie van organisch materiaal en nalevering van nutriënten van de bodem naar de waterkolom.

Een tweede doelstelling is een bijdrage te leveren aan de operationalisering van een geautomatiseerde monitoringstechniek die additioneel kan zijn voor het bestaande monitoringsysteem vanaf schepen.

In dit rapport wordt verslag gedaan van de voorlopige resultaten die verkregen zijn middels een uitgebreid meetprogramma rond een verankeringsstation op de Oestergronden. Het doel van het eerste deel van dit programma (INP-MOORING) was om met behulp van semi-continu registrerende sensoren kwantitatieve informatie te krijgen over de optredende variabiliteit van een aantal sleutelparameters (o.a. temperatuur, stroomsnelheid en -richting, troebelheid, chlorofyl-a en nitraat). Voor een goede interpretatie van de meetgegevens is het nodig de structuur van het pelagisch voedselweb te kennen. Hiertoe zijn in april en augustus 1994 een aantal metingen uitgevoerd (PEL. FOOD WEB-programma). Om de verbinding te leggen naar de depositie van organisch materiaal op de bodem en de beschikbaarheid van voedsel voor de bodemfauna, zijn gedurende 3 weken in juli 1994 metingen uitgevoerd naar de benthisch-pelagische interacties op de Oestergronden (STED-programma). Ook hier met de nadruk op kort durende fluctuaties. Tot slot is een mathematisch model ontwikkeld waarin de berekening van de verticale gelaagdheid van de waterkolom (inclusief kort durende variaties) en de dynamiek van het ecosysteem geïntegreerd zijn. Vooral dit model zal belangrijk zijn voor het beantwoorden van de hierboven geformuleerde vragen.

Dit data rapport bevat een eerste verkenning van de resultaten die verkregen zijn in 1994 (eerste fase). Het is de bedoeling om de resultaten in de tweede fase (1995) van het project uit te werken en te evalueren. Daarna kunnen in een derde fase (1996) definitieve berekeningen worden uitgevoerd met het STRatificatie-ECOSysteem model (STRAECOS), met gebruikmaking van de experimentele resultaten uit de eerste en tweede fase.

1.3. BELEIDSRELEVANTIE

In sectie 1.1 is de relatie van het onderzoek met een aantal beleidsvragen al gegeven. Het onderzoek is vooral ook relevant omdat het zich richt op de open Noordzee waarover nog te weinig kennis beschikbaar is om de effecten van nutriënten-reductiescenario's te kunnen voorstellen. De relatie met het 2^e BEON meerjarenprogramma wordt samengevat in de kenbegrippen "monitoringstechnieken", en "voedselwebrelaties, natuurlijke versus antropogene factoren" van het BEON speerpunt eutrofiëring

Het onderzoek kan ook inzicht geven of een verantwoorde vertaling mogelijk is van kortetermijn dynamiek (in proceswaarden etc.) naar "grofstoffelijke" parameterwaarden zoals gehanteerd in bijv. de MANS, FYFY en ERSEM modellen, of dat een verfijnd model-instrumentarium (met korte tijdstappen en hoge mate van dynamiek) noodzakelijk is voor het kunnen beantwoorden van meestel globale beleidsvragen.

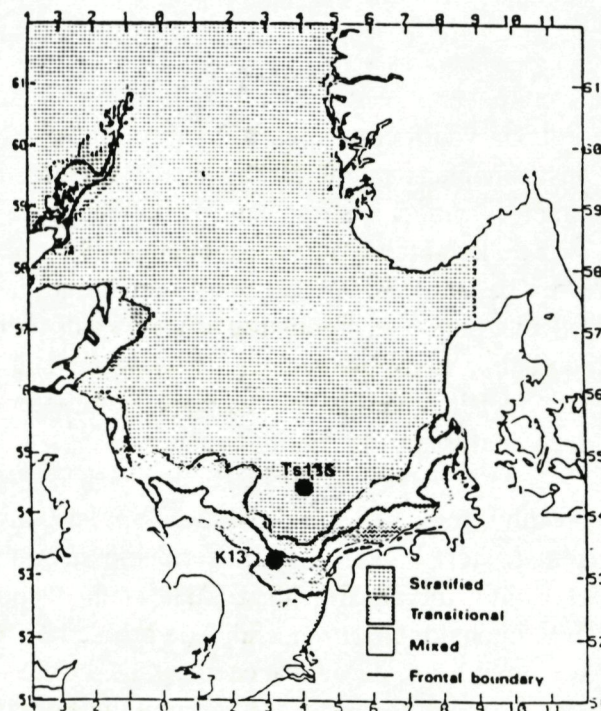
2. OVERZICHT VAN DE METINGEN

2.1. INP-MOORING

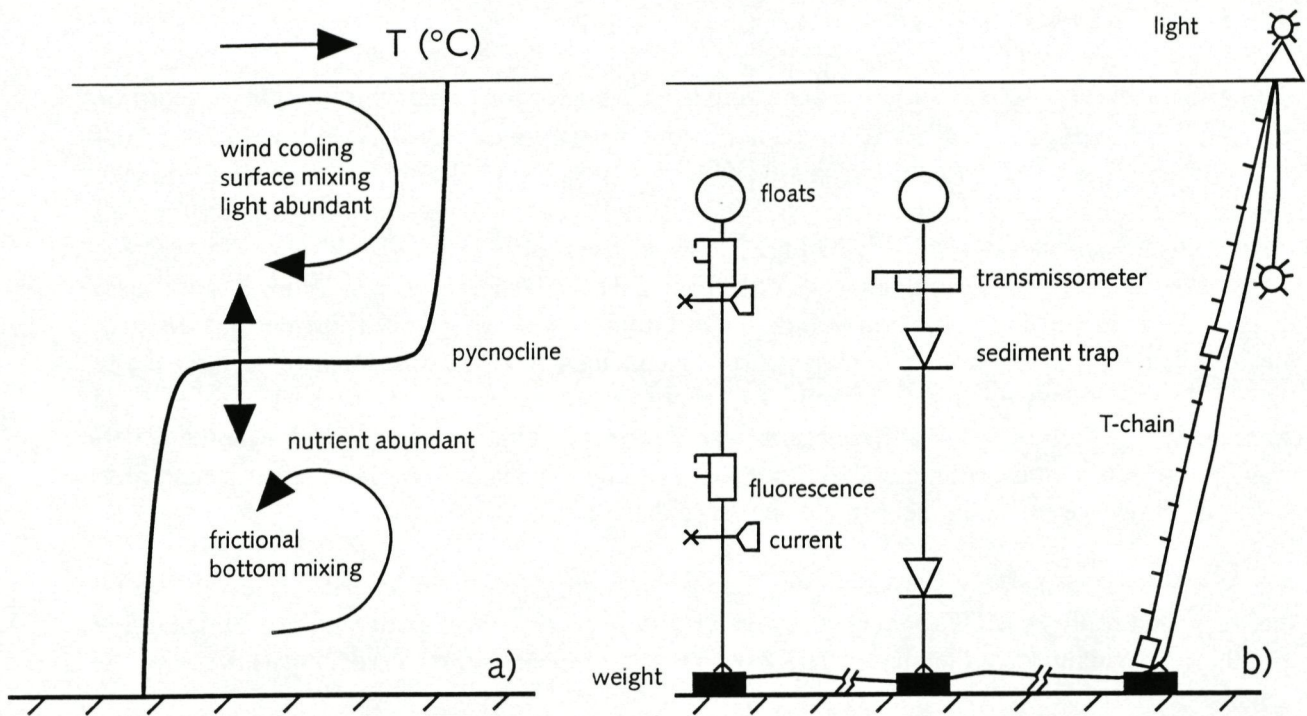
Een groot aantal fysische, biologische en chemische variabelen is semi-continu geregistreerd op de INP locatie (54°25' N, 4°02' E) op de in de zomer gestratificeerde Oestergronden, overeenkomend met het DNZ monitoringsstation TS 135 (Fig. 2.1). Hiertoe werden instrumenten bevestigd aan een aantal verankeringen die beschermd werden tegen aanvaringen etc. middels markeringsboeien van de DGSM. In Fig. 2.2 is schematisch een voorbeeld gegeven van een dergelijke set van verankeringen (zie ook Fig. 2.3). Bovendien is een typisch voorbeeld gegeven van de verticale structuur van de waterkolom tijdens het gestratificeerde seizoen. Met de RV Pelagia werd het verankeringsstation maandelijks bezocht om de instrumenten uit te lezen, te inspecteren en om onderhoud en reparaties uit te voeren. Daarnaast werden deze vaartochten gebruikt om in-situ calibratie waarden te verzamelen en om de horizontale verdeling van een aantal parameters rondom het station te bepalen. Vooral deze maandelijks tochten hebben gemaakt dat het project zeer arbeidsintensief is geweest.

De MS Holland van DNZ verrichtte assistentie bij intercalibratie en leverde gegevens vanuit het zeegaand (online) MONO programma van DNZ (o.a. over thermocline ligging en laagdikte in 1994). De analyse resultaten van RIKZ zullen beschikbaar zijn bij verder uitwerken van de gegevens van 1994.

Het meetprogramma is een vervolg van een in 1991 gestart INP-mooring programma. De huidige meetcampagne is gestart in december 1993 en loopt tot in januari 1995.



Figuur 2.1. Locatie van het INP-MOORING verankeringsstation (TS 135) in de Noordzee. K13 geeft de positie van een permanent meteostation weer. De in de zomer gestratificeerde gebieden zijn aangegeven.



Figuur 2.2. a: Typisch temperatuur profiel in een in twee lagen gestratificeerde waterkolom. Twee verschillende biologische regimes zijn gescheiden door een thermocline, de scherpe overgang tussen warm (nutriënten-arm) oppervlaktewater en koud (nutriënten-rijk) bodemwater. b: Schematisch voorbeeld van een verankeringssysteem om een gestratificeerde waterkolom te bestuderen.

In Tabel 2.1 is samengevat welke verankeringen (eerste kolom) en instrumenten (tweede kolom) tot de meest recente Pelagia vaartocht (week 41) gebruikt zijn. De derde kolom geeft de verticale positie van de instrumenten (in meters boven de bodem, hab = height above bottom). In de overige kolommen is aangegeven of een instrument in de betreffende week is gebruikt en, indien gebruikt, wat de kwaliteit van de resultaten is (g = goed, h = matig, nog te corrigeren, v = slecht of verloren gegaan). Als gerealiseerd wordt dat alle instrumenten semi-continu gemeten hebben, d.w.z. met een meet frequentie < 1 uur, dan wordt direct de enorme hoeveelheid verzamelde data duidelijk. Deze hoeveelheid is nodig om statistisch verantwoorde analyses uit te voeren waarmee onderlinge verbanden tussen de parameters onderzocht kunnen worden. Het is de bedoeling deze analyses in 1995 uit te voeren.

Van de instrumenten die de stroming meten (BB = Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP, en CM = conventionele Current Meter) blijken de conventionele stromingsmeters zeer goed gefunctioneerd te hebben met weinig uitval. Het horizontale snelheidsprofiel en de variaties daarin zijn daarmee naar behoren bepaald. Door verschillende problemen zijn er tot nu toe nog maar weinig bruikbare data verzameld met de geavanceerde ADCP, die o.a. ook de verticale component van het stromingsveld bepaalt. Met het ter beschikking komen van nieuwe ADCP instrumenten in de laatste maanden van 1994 worden hopenlijk toch nog gedetailleerde metingen van het verticale snelheidsprofiel verkregen.

De thermistorstrings (TS) die met een resolutie van 2 m het verticale temperatuurprofiel in de waterkolom meten, hebben naar behoren gefunctioneerd. Vooral in de gestratificeerde zomerperiode lijken de profielen met voldoende nauwkeurigheid geregistreerd te zijn. In aanvulling op de stroomsnelheid en de temperatuur is recentelijk een gecombineerde golf-getij meter (WT) ter beschikking komen die goed blijkt te functioneren.

De meteo-sensoren (met =windsnelheid, -richting, lichtinstraling, luchttemperatuur, luchtvochtigheid) gaven de eerste periode veel problemen en geen bruikbare data. De in de zomer gemeten data zijn wel goed. Ter aanvulling zijn door het KNMI meteo-data beschikbaar gesteld, waardoor voor het gehele jaar voldoende gegevens aanwezig zullen zijn.

De sensoren die de hoeveelheid licht in het water registreren (PAR) hebben nagenoeg steeds goed gefunctioneerd. Het zelfde geldt voor de transmissometers (TM) waaruit de troebelheid van het water en, bij voldoende in-situ calibratie data, de hoeveelheid gesuspendeerd materiaal bepaald kan worden.

De automatische nitraat-analysers (NAS = Nitrate Analysis System) behoren tot de eerste verankerbare nutriënt-analyse instrumenten die in dit soort programma's worden gebruikt. Het zal dan ook geen verbazing wekken dat zich veel problemen hebben voorgedaan met deze nog maar recent ontwikkelde apparatuur. In het eerste halfjaar zijn slechts voor korte perioden bruikbare data verzameld. Na een aantal aanpassingen aan de instrumenten en een herziening van de standaard nabewerking van de ruwe data, zijn in de zomermaanden wel bruikbare data verkregen.

Tot slot de voor het project uiterst belangrijke fluorimeters (FM). De in de bovenlaag van de waterkolom verankerde fluorimeter heeft nagenoeg de gehele periode naar behoren gewerkt. Dieper in de waterkolom zijn slechts voor enkele perioden, vooral in de zomer, bruikbare metingen verricht.

2.2. PEL. FOOD WEB

In de periode 25 maart - 12 april en 28 juni - 15 juli is langs een 400 mijl transect tussen de Doggersbank en de Shetland eilanden een meetprogramma uitgevoerd om in het veld het principe van "size-differential control" en andere aspecten van van het pelagisch voedselweb te bestuderen. Dit transect is gekozen om de invloed van de invoer van nutriënten vanuit de Atlantische Oceaan ("natuurlijke eutrofiëring") op de structuur van het voedselweb te meten. In totaal zijn op 16 stations de volgende metingen uitgevoerd:

- ^{14}C -opname (productie) en ^{15}N -opname door fytoplankton, gesplitst in 2 grootte-
klassen: $< 5 \mu\text{m}$, $> 5 \mu\text{m}$;
- biomassa en begrazingsactiviteit van microzoöplankton;
- biomassa, voedsel-opnamesnelheid en ei-productie van copepoden;
- biomassa en productie bacteriën, en begrazing door heterotrofe nanoflagellaten
(HNANS);
- sedimentatie snelheden van organisch materiaal (sediment vallen);
- concentraties van opgeloste anorganische nutriënten.

Speciaal voor het BEON INP-MOORING programma is tijdens beide PEL. FOOD WEB tochten het meetprogramma ook uitgevoerd op het verankeringsstation in de Oestergronden. In vergelijking met het transect naar de Shetland eilanden, geldt de Oestergronden als een station dat relatief sterk door antropogene eutrofiëring is beïnvloed. Wetmatigheden die op het gehele transect gevonden zijn (effect van nutriënten invoer op de structuur van het voedselweb) zijn echter ook geldig voor de Oestergronden.

2.3. STED

Het STED programma (Short TERM Dynamics) is uitgevoerd met de RV Pelagia in de periode 4 tot 21 juli 1994. Het eerste deel van STED was gecombineerd met een onderhoudstocht naar het verankeringsstation (INP-MOORING). Het centrale aandachtspunt van STED was de benthisch-pelagische koppeling rond het verankeringsstation in de Oestergronden, met name de korte termijn variaties (minuten, uren, dagen, weken) in depositie van gesuspendeerd (organisch) materiaal en resuspensie van bodemdeeltjes, het "small food web" (bacteriën, protozoën), en de bodem-water uitwisseling van nutriënten (met de nadruk op stikstof). De basis hypothese van STED is dat kort durende variaties in de sedimentatie en resuspensie van organisch materiaal worden gereflecteerd in de activiteit van het "small food web" in de bodem, en in de bodem-water uitwisseling van nutriënten. Het mengen van nutriënt-rijk water van onder de thermocline met het nutriënt-arme oppervlakte water stimuleert de primaire productie en kan zo een algenbloei induceren. Het mengen gebeurt onder invloed van wind (stormen) of door het passeren van een koufront. Door het uitzakken van algen en detritus verdwijnt het geproduceerde organisch materiaal weer uit de eufotische zone naar de onderste laag van de waterkolom en naar het sediment, waar het als vers voedsel dient voor de bodemfauna. Door de regeneratie van nutriënten in de bodem en het bodemwater kan deze cyclus zich steeds weer herhalen.

Zonder fysische menging van de waterkolom kunnen er in de zomer geen algenbloeien optreden in de Oestergronden. Zonder menging is dus ook de aanvoer van vers organisch materiaal naar de bodemfauna beperkt en zijn de benthische organismen veroordeeld tot een

hongerdieet. Eutrofiëring heeft tot gevolg dat alle verticale massa fluxen op een hoger niveau komen te liggen. Dit betekent hogere productiesnelheden in het water en in de bodem, maar ook variaties met grotere amplitudes. Juist deze grote amplitudes kunnen ongewenste effecten veroorzaken (zuurstofloosheid, toxische algenbloeien van enige omvang).

Het STED programma is uitgevoerd in een grid van 17 stations direct naast het verankeringsstation (Fig. 2.3). De stations liggen op ca. 180 m van elkaar af. Iedere dag werd door loting vastgesteld welk station bemonsterd werd. Alleen de sedimentvallen werden steeds binnen het kwadrant van de verankeringen weggehangen. Om een goed beeld te verkrijgen van de heterogeniteit van het gebied zijn tweemaal op 1 dag 9 stations bemonsterd (ook weer door loting vastgesteld) voor de parameters van het bentisch "small food web", 1 x bij laag water minimale stroomsnelheid (7 juli), 1 x bij maximale ebstroom (9 juli). De posities van de stations is weergegeven in Tabel 2.2.

Op de STED stations zijn de volgende metingen uitgevoerd:

Dagelijks werd 2 x een CTD profiel van de waterkolom gemeten. Watermonsters werden op 6 dieptes genomen: 0.5 m boven de bodem (met een membraan pomp), en 5, 15, 25, 35 en 40 m onder het wateroppervlak (met Rosette sampler). Op 6 stations (om de dag) zijn de concentraties aan particulier materiaal, particulier organisch C en N (POC en PON), anorganische opgeloste nutriënten en ureum op de 6 dieptes in de waterkolom bepaald. Op alle stations zijn op 5 m onder het wateroppervlak, direct onder de thermocline en bij de bodem (40 m diepte) watermonsters genomen om de concentraties aan fytopigmenten te meten. Al deze metingen zijn steeds 2 keer uitgevoerd, 1 x bij maximale stroomsnelheid (eb- of vloedstroom) en 1 x bij minimale stroomsnelheid (kentering).

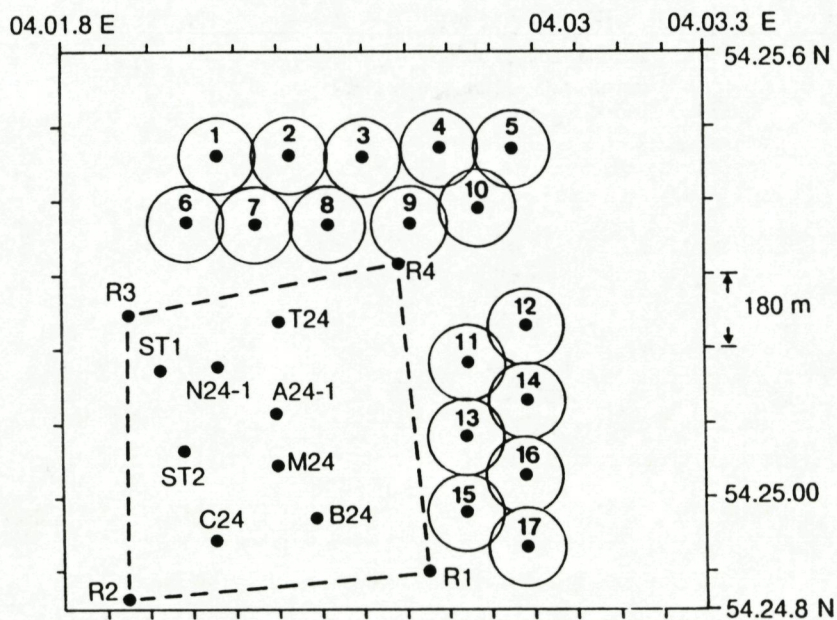
Dagelijks werd de zuurstofconcentratie in het bodemwater vastgesteld, en het zuurstofprofiel in de bovenste mm's van de bodem bepaald. Op 6 stations is de zuurstofconsumptie door de bodem gemeten.

Met sedimentvallen is de variabiliteit (uren tot dagen) in de depositie van particulier materiaal vastgesteld. Van het ingevangen materiaal wordt in ieder geval gemeten: hoeveelheid droog materiaal, gehalte aan POC, PON en fytopigmenten.

Op alle stations zijn bodemmonsters verzameld en gesneden in 16 laagjes in dikte variërend van 0.25 tot 2 cm. Van deze monsters wordt in ieder geval bepaald: het watergehalte (porositeit), POC, PON en fytopigmenten. Poriewater profielen zijn op alle stations gemaakt voor ammonium, nitraat, nitriet, ureum, fosfaat en silicaat, met een zelfde verticale resolutie als de bodemmonsters. Op 3 stations werd ook het verticale profiel van aan bodemdeeltjes geadsorbeerd ammonium bepaald. Op alle stations is de bodem-water uitwisseling van nutriënten gemeten, met en zonder resuspensie van bodemmateriaal (variable turbulentie).

Adsorptie en desorptie van ammonium door particulier materiaal is op 4 stations gemeten met bodemdeeltjes afkomstig van de bovenste 5 mm van het sediment. Ter aanvulling zijn deze metingen ook 2 keer uitgevoerd met materiaal dat verzameld was met de sedimentvallen. Nitrificatie en denitrificatie in het sediment zijn gemeten op 6 stations met de recent ontwikkelde "¹⁴N¹⁵N ion pairing" technique. Om vergelijking met oudere gegevens mogelijk te maken is denitrificatie ook met de klassieke "acetylene-block" techniek bepaald.

Op alle stations is de productie van vrij zwevende en aan deeltjes gebonden bacteriën in het bodem water bepaald (^3H -leucine incorporatie techniek). Ook zijn bepaald de productie en biomassa van bacteriën in het sediment en het gehalte aan fytopigmenten in de bovenste 3 mm van de bodem. Bepaling van de dichtheid en biomassa aan heterotrofe nanoflagellaten (HNANS) in het sediment en de begrazing van HNANS op bacteriën moet het beeld van de activiteit van het bentisch "small food web" compleet maken. Al deze metingen zijn steeds uitgevoerd bij minimale en maximale getijde stroomsnelheid.



Figuur 2.3. Overzicht van het 600 x 600 m² kwadrant van het verankersstation met aan de noord- en oostzijde gelegen STED stations (circels met nrs. 1 t/m 17). De afstand tussen twee stations is ongeveer 180 m. Iedere dag werd door loting vastgesteld welk station bemonsterd zou worden. R = DGSM boei, ST = verankering voor sedimentval, N = NAS verankering, T = thermistorstring, A = verankering met ADCP, M = meteo-boei, C = verankering met stroommeters, B = verankering met fluorimeters.

Tabel 2.2. *Overzicht van de STED stations en hun posities. Ook is aangegeven welke stations bemonsterd zijn tijdens de heterogeniteits metingen op 7 en 9 juli.*

Station nr	Position		Sampling		
	latitude	longitude	standard	heterogeneity	
1	54° 25.46 N	4° 02.16 E	8 July		HM
2	54° 25.46 N	4° 02.33 E	9 July	HK	HM
3	54° 25.46 N	4° 02.50 E	6 July		HM
4	54° 25.47 N	4° 02.68 E	12 July		
5	54° 25.47 N	4° 02.85 E	11 July	HK	
6	54° 25.37 N	4° 02.09 E	15 July	HK	HM
7	54° 25.37 N	4° 02.25 E	18 July	HK	
8	54° 25.37 N	4° 02.42 E	19 July		
9	54° 25.46 N	4° 02.61 E		HK	HM
10	54° 25.39 N	4° 02.77 E		HK	HM
11	54° 25.18 N	4° 02.74 E	14 July	HK	
12	54° 25.46 N	4° 02.88 E	7 July	HK	
13	54° 25.08 N	4° 02.74 E	5 July		
14	54° 25.13 N	4° 02.88 E			HM
15	54° 24.98 N	4° 02.74 E	17 July		HM
16	54° 25.03 N	4° 02.88 E	16 July		
17	54° 24.93 N	4° 02.88 E	10 July	HK	HM

HK: stations sampled during low water slack tide (7 July)

HM: stations sampled during max. ebb current (9 July)

3. SRATIFICATIE-ECOSYSTEEM MODEL (STRAECOS)

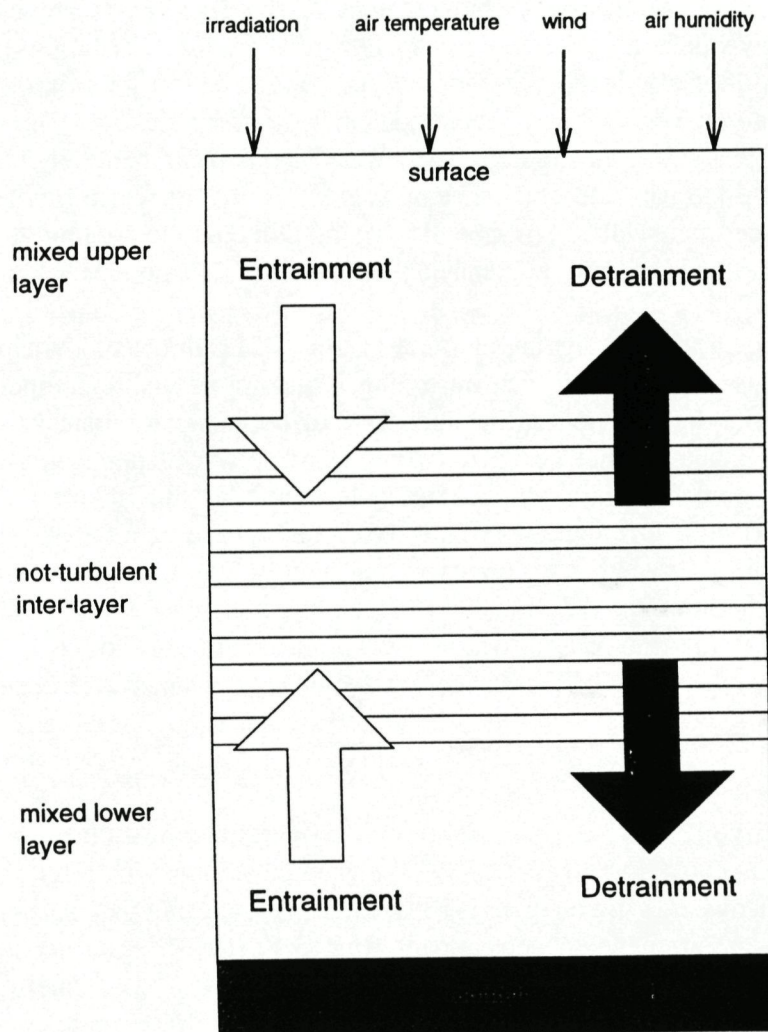
In STRAECOS is een ecosysteem model gekoppeld aan een 1-dimensionaal model dat de verticale menging in de waterkolom beschrijft. Het model draait onder het SESAME simulatie pakket (RUARDIJ e.a. 1991) op een SUN-workstation onder UNIX. Het ecosysteem model omvat een volledig dynamische beschrijving van alle relevante stromen van koolstof en macronutriënten in zowel de waterkolom als de bodem. Onderscheiden groepen van organismen zijn o.a. fytoplankton, zoöplankton, en bodemfauna. Dit deel van STRAECOS is ontleend aan het Noordzee brede ERSEM dat door een aantal Europese instituten ontwikkeld is in het kader van EG MAST I en II. Nadere detaillering van de submodellen kan in de documentatie van ERSEM gevonden worden (o.a. BARETTA e.a. 1995; RUARDIJ & VAN RAAPHORST 1995).

Het fysisch deel van STRAECOS is beschreven in RIDDERINKHOF (1992). Het beschrijft de stratificatie van de waterkolom in 3 lagen en hun onderlinge uitwisseling van warmte en massa door menging. Bij volledige menging van de waterkolom (winter situatie) is alleen de bovenste laag aanwezig. De bovenste en onderste laag van de waterkolom worden gezien als turbulent met volledige menging. In de niet-turbulente tussen-laag (NTTL, thermocline) vindt geen menging plaats. Advectief transport van gesuspendeerde deeltjes door bijvoorbeeld sedimentatie treedt op in en door alle lagen. In tegenstelling tot de meestal gebruikte benadering in 1-dimensionale mengmodellen berekent het model niet de dispersieve uitwisseling van waterdeeltjes tussen in een vast grid gerangschikte waterlagen, maar berekent het dynamisch de verandering van de dikte van de 3 onderscheiden lagen. Transport wordt dus geïnduceerd door verschuiving van de grensvlakken tussen de lagen. Directe uitwisseling tussen boven- en onderlaag is alleen mogelijk als beide grensvlakken van de NTTL bij elkaar komen.

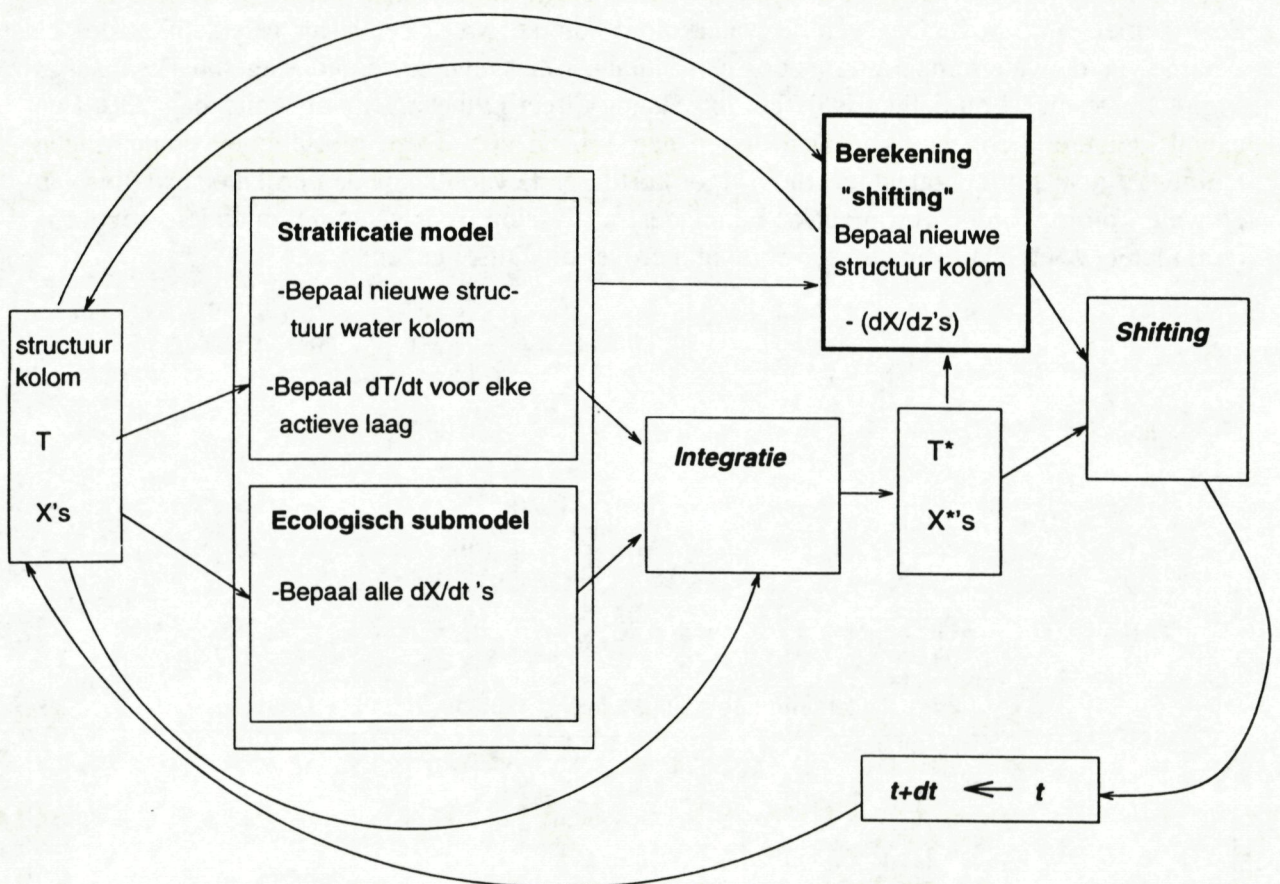
De sturende variabelen voor de ligging en dikte van de NTTL in het model zijn het getij en de actuele meteorologische condities: licht-instraling, wind, oppervlakte temperatuur en luchtvochtigheid. In de huidige versie van het model vindt opbouw en erosie van de thermocline alleen van bovenaf plaats. In het voorjaar en in de zomer warmt het water van bovenaf op, waardoor zich een temperatuurgradiënt aan het wateroppervlak ontwikkelt. Deze ontwikkeling wordt tegengewerkt door turbulente menging, verdamping en uitstraling. Uiteindelijk ontstaat dieper in de waterkolom een scherpe overgang van warm oppervlaktewater naar koud bodemwater, en ontstaat uiteindelijk een drie lagen situatie met de NTTL als scheiding. Bij extreem rustig zomerweer met weinig wind en weinig turbulentie, zal de bovenlaag dun zijn en het bovenste grensvlak van de NTTL zich relatief dicht onder het water oppervlak bevinden. De totale dikte van de NTTL is dan groot, en dus is de uitwisseling tussen boven- en onderlaag dan slecht.

In iets meer detail wordt voor de berekening van de verticale structuur van de waterkolom gebruik gemaakt van een vast grid (sublagen), waarvan de sublagen in de gemengde boven- en onderlaag passief aanwezig zijn, en in de NTTL actief. Verandering van de dikte van de bovenlaag gebeurt door entrainment en detrainment (Fig. 3.1). Door entrainment worden een of meerdere sublagen van de NTTL van bovenaf geërodeerd en wordt het water uit deze sublagen gemengd met de goed gemengde bovenlaag. Op deze manier komen nutriënten uit de NTTL beschikbaar voor de bovenste meters van de waterkolom. Door detrainment komt water uit een goed gemengde laag in de NTTL. Een schematische weergave van de berekenings volgorde in STRAECOS is te vinden in Fig. 3.2.

De integratie van ERSEM met dit type stratificatie model in een volledig dynamisch gekoppeld model kende een drietal technische hoofdproblemen. Ten eerste moeten bij iedere structuur verandering van de waterkolom (entrainment en detrainment) ook de toestandsvariabelen (nutriënten, fytoplankton, etc.) netjes doorgegeven worden, dat wil zeggen met behoud van massa. Ten tweede moet bij entrainment de omzetting van een actieve sublaag in een passieve sublaag goed uitgevoerd worden, inclusief definities van concentraties in de sublaag. Ten derde moeten veranderingen van de hoofstructuur van de waterkolom vloeiend verlopen (bijv. van een volledig gemengde waterkolom naar 2 lagen met of zonder NTTL). Om deze problemen op te lossen is een speciale interface-module ontwikkeld die de "shifting" van de lagen en de bijbehorende massa-transporten regelt. Bovendien zijn in het simulatie-pakket SESAME voorzieningen getroffen om de "shifting" te kunnen uitvoeren.



Figuur 3.1. Schematische weergave van het concept van het stratificatie model in STRAECOS. Door entrainment wordt de niet-turbulente tussenlaag dunner en wordt water uit de tussenlaag opgemengd met een goed gemengde laag. Bij detrainment gebeurt het omgekeerde en wordt de tussenlaag dikker.

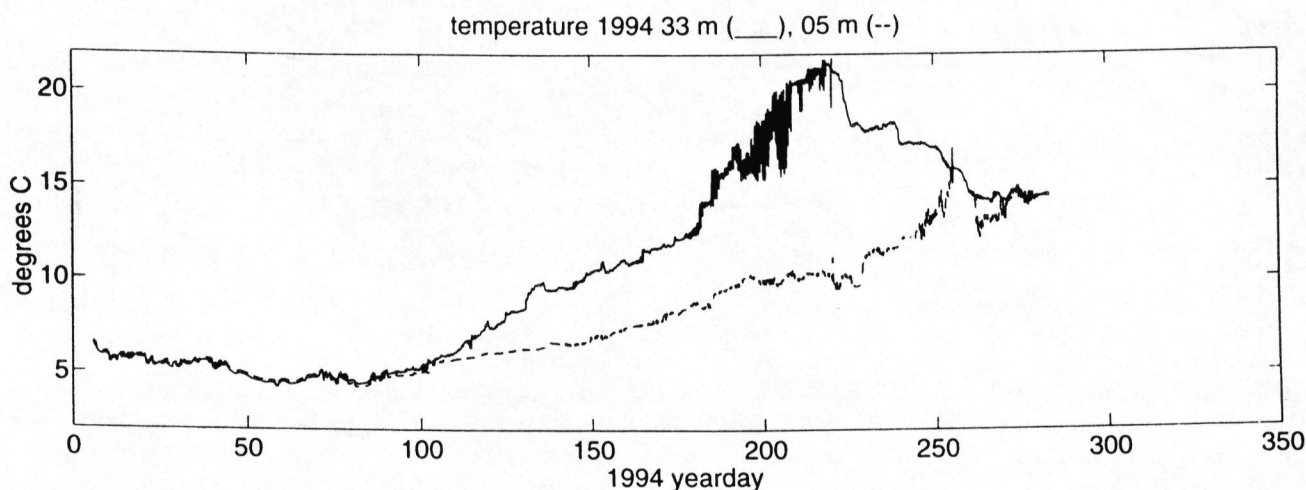


Figuur 3.2. Berekeningsvolgorde in STRAECOS. Vanuit bestaande waarden (temperatuur T , concentraties X) op tijdstip t worden de afgeleiden dT/dt en dX/dt bepaald voor alle lagen van de waterkolom, en geïntegreerd tot "tussenwaarden" (T^* , X^*). Vervolgens wordt de nieuwe structuur van de waterkolom en de verticale gradiënt (dT/dz , dX/dz) berekend. Na "shifting" van de lagen volgen de nieuwe waarden T en X voor elke laag op tijdstip $t + dt$.

4. RESULTATEN en DISCUSSIE

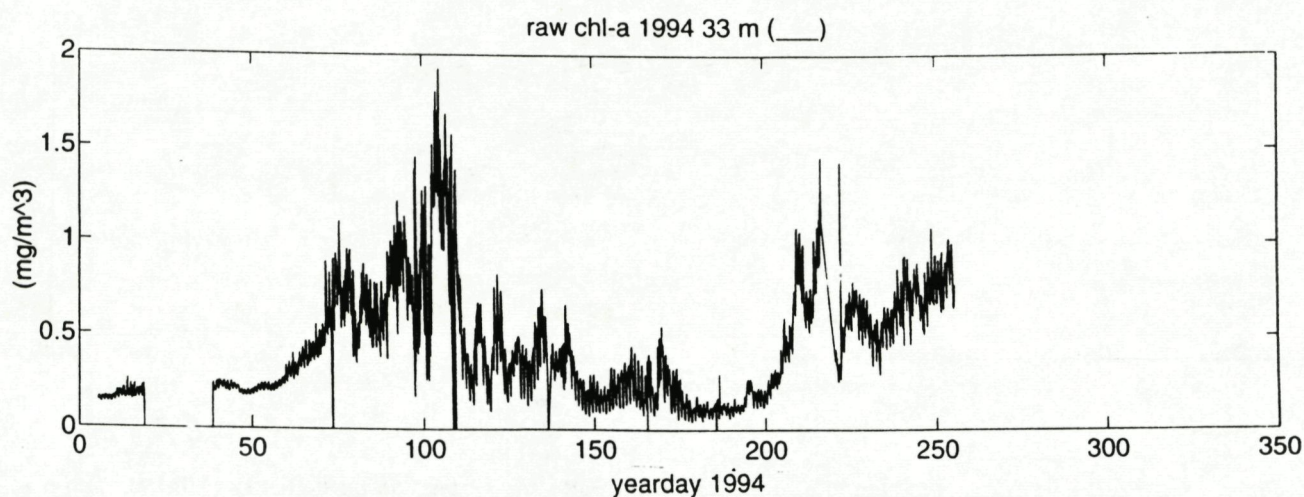
4.1. INP-MOORING

Omdat het meetprogramma nog niet is voltooid, en omdat nog maar een deel van de gegevens is verwerkt tot gecalibreerde en "geschoonde" datasets die voor statistische analyse geschikt zijn, betreft het hier een voorlopig overzicht van een aantal in het oog springende resultaten. In Fig. 4.1 is de watertemperatuur op 33 en 5 m boven de bodem (12 en 40 m onder het oppervlak) weergegeven. Het temperatuurverloop laat duidelijk zien dat de waterkolom goed doorgemengd was tot ongeveer dag 100 (tweede week april). Daarna begint de gestratificeerde periode met verschillende temperaturen in de onder- en bovenlaag. Deze periode duurt tot ongeveer dag 255 (tweede week september). Extreem hoge temperaturen ($> 20^{\circ}\text{C}$) werden deze zomer in de bovenlaag van de waterkolom bereikt. Naast een meer geleidelijke toe- en afname van de watertemperatuur is ook een aantal sprongsgewijze veranderingen herkenbaar in Fig. 4.1. De meest duidelijke is de abrupte daling direct na het maximum rond dag 230. Een aantal kleinere "hobbels" is te zien tussen dag 110 en 205. Deze plotselinge veranderingen kunnen of door horizontale advectie of door kortdurende variaties in de verticale structuur van de waterkolom worden veroorzaakt. Een nadere analyse op basis van deze en andere gegevens (o.a. meteo, zoutgehalte en stroming) moet hierover uitsluitsel geven.



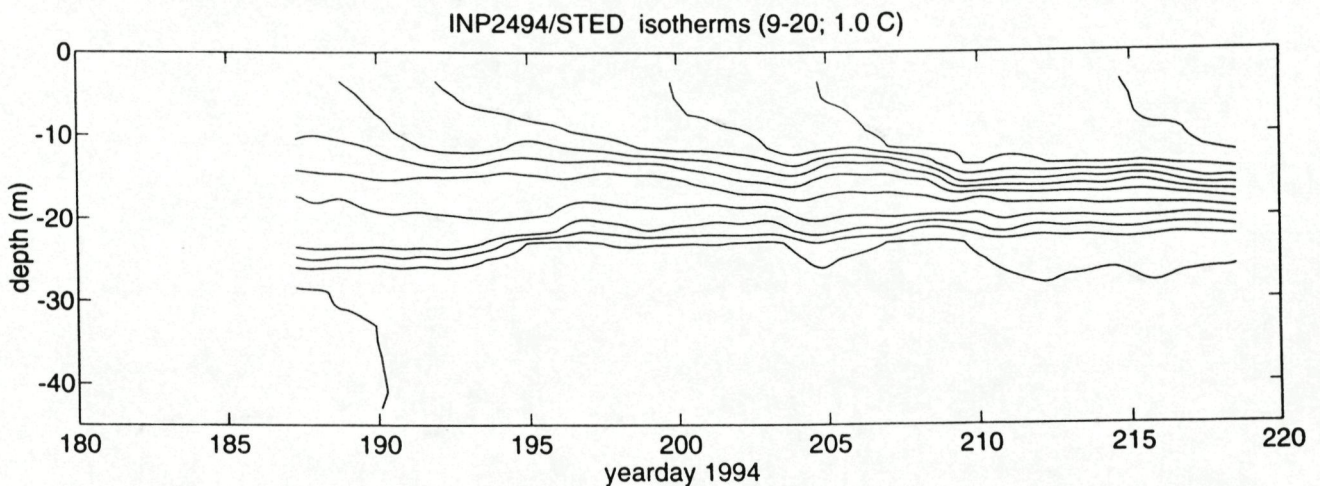
Figuur 4.1. Watertemperatuur op 5 m en 33 m boven de bodem van het verankeringsstation in 1994. Rond dag 100 gaan de temperaturen uit elkaar lopen, rond dag 255 wordt de temperatuur in het oppervlaktewater weer gelijk aan die nabij de bodem. In de tussen gelegen periode is de waterkolom gestratificeerd.

Fig. 4.2 geeft de fluorescentie data voor dezelfde periode als in Fig. 4.1. De fluorometer heeft steeds op 12 m onder het wateroppervlak gehangen. Tot dag 110 (half april) neemt de fluorescentie (een maat voor chlorofyl-a) geleidelijk toe, uitmondend in een duidelijke voorjaarsbloei. Opvallend is dat de fluorescentie snel afneemt na het zich instellen van de stratificatie (Fig. 4.1). In dezelfde periode daalt het nitraat gehalte in de bovenlaag van de waterkolom van ongeveer $6 \mu\text{M}$ naar minder dan $0.5 \mu\text{M}$. Met andere woorden, de voorjaarsbloei komt tot een einde door uitputting van de voorraad nutriënten in de bovenlaag van de waterkolom. Tussen dag 110 en 205 is nog een aantal kleinere fluorescentie pieken te zien. Een eerste indruk is dat deze pieken samenvallen met de "hobbels" in de temperatuur, wat suggereert dat veranderingen in de structuur van de waterkolom van de thermocline door wind inderdaad verhoogde chlorofyl-a gehalten in de bovenlaag veroorzaken.



Figuur 4.2. Fluorescentie op 33 m boven de bodem (12 m onder het wateroppervlak) van het verankeringsstation in 1994. De data zijn weergegeven als chlorofyl-a in $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

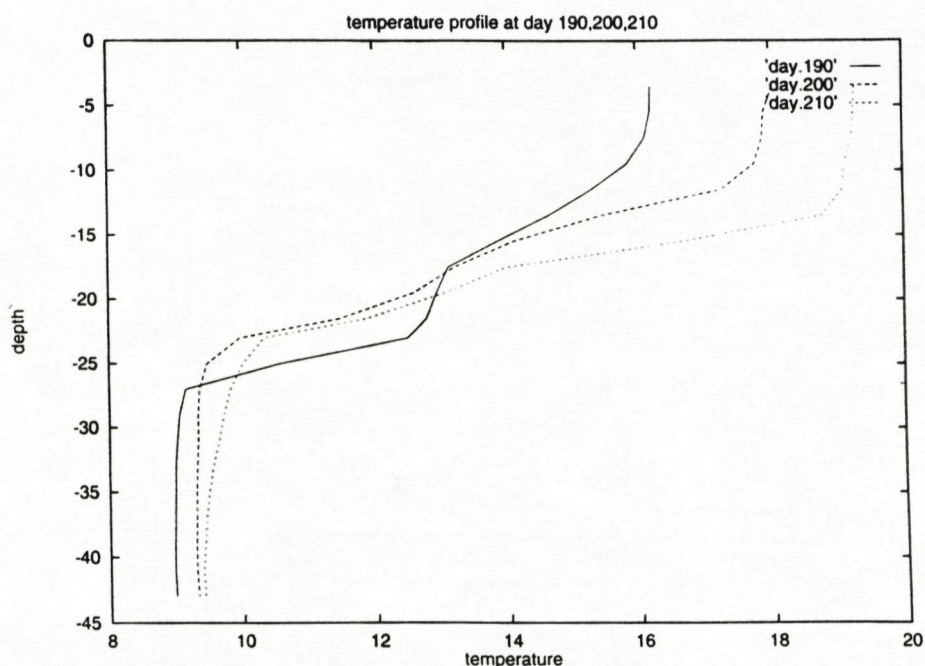
Aan het eind van de zomer (na dag 205) neemt de fluorescentie weer duidelijk toe, met een eerste maximum op dag 210 en een tweede (hoger) maximum rond dag 225. Een meer gedetailleerde weergave van de ontwikkelingen in de zomer tussen dag 180 (29 juni) en dag 220 (8 augustus) is te vinden in de Fig. 4.3 t/m 4.8. In Fig. 4.3. is de positie van de isothermen in de waterkolom weergegeven. Uit deze figuur blijkt opnieuw de zeer sterke opwarming van het bovenste gedeelte van de waterkolom in de zomer. Het brede diepte-interval waarop de (horizontale) isothermen zich bevinden geeft aan dat de structuur van de waterkolom in deze periode een 3-lagen systeem is. De laag waarin de isothermen zich bevinden is de niet-turbulente tussenlaag (NTTL) die de relatief dunne oppervlaktelaag scheidt van de bodemlaag. In Fig. 4.4 wordt deze structuur verder verduidelijkt aan de hand van de verticale temperatuurprofielen op 3 afzonderlijke dagen. De NTTL strekt zich uit tussen ongeveer 10 en 25 m diepte.



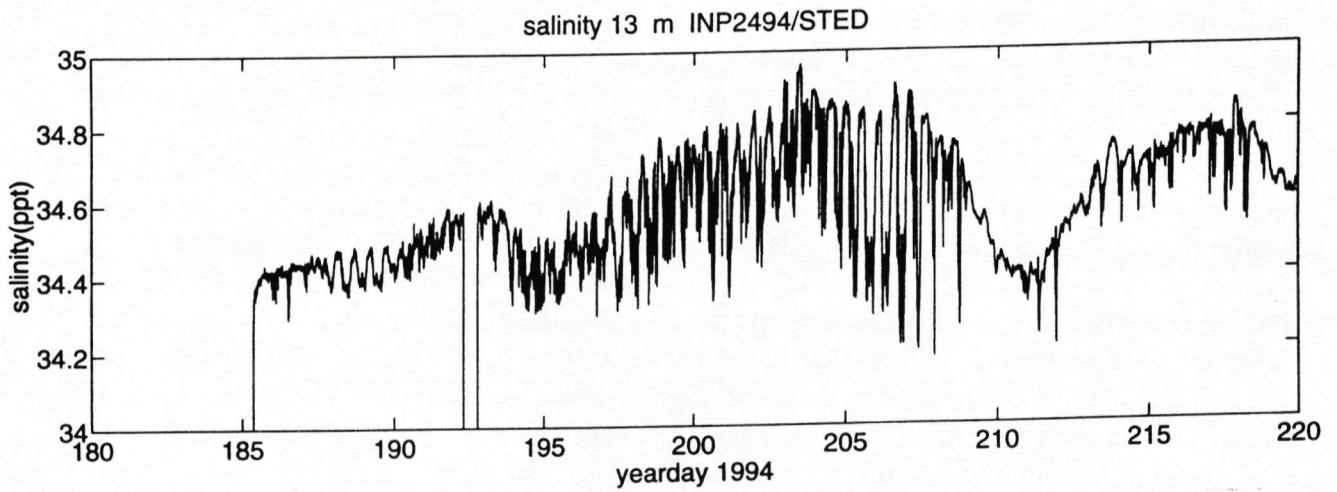
Figuur 4.3. Positie van de isothermen in de waterkolom van het verankeringsstation tussen dag 180 en dag 220 in 1994. De horizontaal lopende isothermen tonen de aanwezigheid aan van een 3-lagen structuur met een niet-turbulente tussenlaag (NTTL).

Fig. 4.5 illustreert het verloop van de saliniteit op een diepte van 13 m. Heel duidelijk is het getijsignaal te zien (korte pieken), duidend op het met het getij heen en weer schuiven van watermassa's met een verschillende saliniteit. Rond dag 205 wordt dit verschil groter, wat wijst op de mogelijke nabijheid van een front. Op dag 210 is dit front uiteindelijk gepasseerd. In iets mindere mate is het zelfde verschijnsel rond dag 195 te zien. Uit de isothermen van Fig. 4.3 blijkt dat de passage van deze fronten gepaard gaat met het dunner worden van de NTTL. Ook de fluorescentie wordt hoger in deze periodes en bereikt maxima rond dag 195 en dag 210 (Fig. 4.6). Deze resultaten bevestigen de relatie tussen fysische processen en het optreden van algenbloeien.

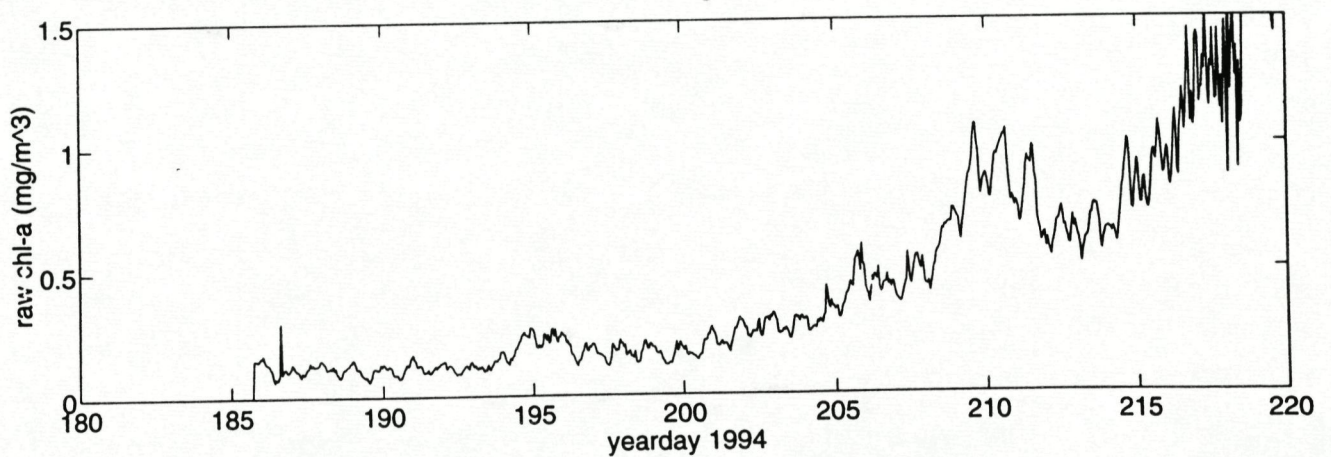
De nitraat data die met de NAS verzameld zijn ondersteunen het hier beschreven beeld. Tussen dag 195 en 202 neemt het nitraat gehalte in de bovenlaag toe, daalt dan weer iets met sterke fluctuaties tot dag 205 en neemt vervolgens toe met de passage van het front tussen dag 205 en 210 (Fig. 4.7). Na dag 210 daalt de nitraat concentratie sterk, wat een verklaring kan zijn voor de eveneens sterke daling van de fluorescentie tussen dag 210 en 215. Opvallend in deze (en ook de andere figuren) is de variabiliteit in het signaal. Onder invloed van het getij kan de nitraat concentratie twee maal per dag enkele tienden μM variëren. Binnen een termijn van enkele dagen kan de concentratie tot meer dan een μM stijgen of dalen. Met conventionele bemonstering vanaf schepen zijn deze variaties niet te registreren. Een enkele meting (binnen een regulier monitoring programma) op een dag met een maximum of minimum concentratie zal een vertekend beeld geven van de gehalten die gemiddeld over een week of maand aanwezig zijn. Dit en de relatie van de variaties met fytoplankton bloeien, bijvoorbeeld rond dag 210 (Fig. 4.6), bevestigen het belang van semi-continu geregistreerde nutriënten concentraties.



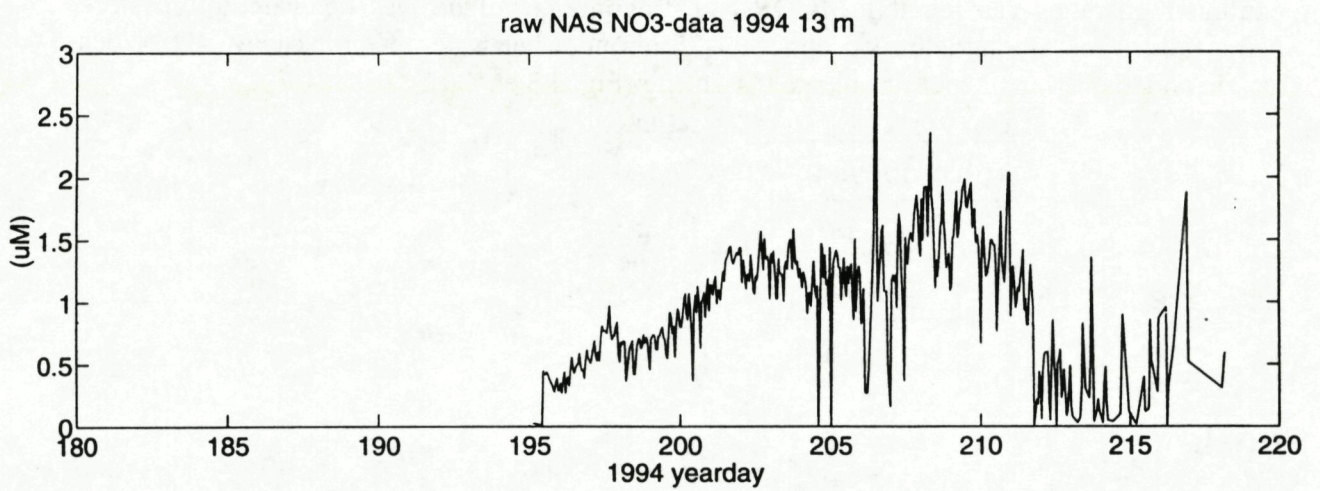
Figuur 4.4. Vertikale profielen van de temperatuur op het verankeringsstation op de dagen 190, 200 en 210 (1994). Duidelijk te zien is de opwarming van de oppervlaktelaag en de aanwezigheid van de thermocline of niet-turbulente tussenlaag (NTTL) tussen ~10 en ~25 m.



Figuur 4.5. Verloop van de saliniteit op een diepte van 13 m onder het wateroppervlak van het verankeringsstation in de periode tussen dag 180 en 220 van 1994.



Figuur 4.6. Verloop van de fluorescentie op een diepte van 12 m onder het wateroppervlak van het verankeringsstation in de periode tussen dag 180 en 220 van 1994. De fluorescentie data zijn uitgedrukt als mg chlorofyl-a per m³.

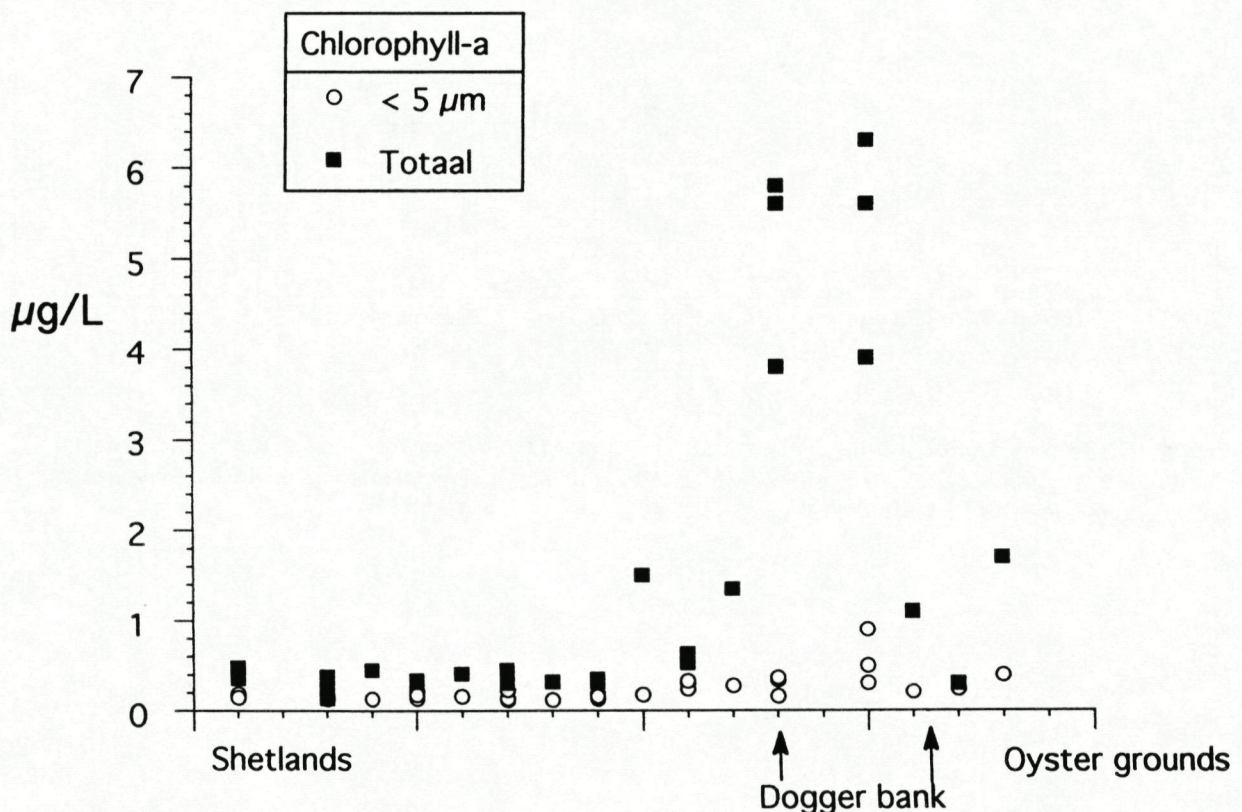


Figuur 4.7. Verloop van de nitraat concentraties op 13 m onder het wateroppervlak van het verankeringsstation in de periode tussen dag 180 en 220 van 1994. De data zijn verzameld met de NAS instrumenten, met een meetfrequentie van 1 x per uur.

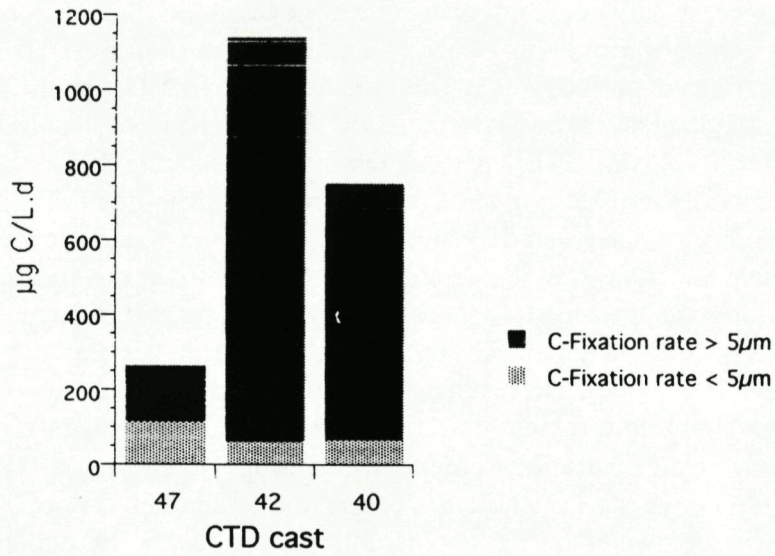
4.2. PEL. FOOD WEB

In april werd rond het verankeringsstation op de Oestergronden een algenbloei aangetroffen (zie ook Fig. 4.2, dag 90-100) waarvan een groot deel sterk aan het sedimenteren was. De groeisnelheid was laag, hetgeen waarschijnlijk het gevolg was van nutriënten depletie. Zoals voorspeld door de hypothese van "size-differential control" (RIEGMAN e.a. 1993) bestond de bloei vooral uit grotere ($> 5 \mu\text{m}$) algensoorten (Fig. 4.8), die door hun grootte kunnen ontsnappen aan begrazing. Het grootste deel van de primaire productie werd dan ook verzorgd door de grotere algen (Fig. 4.9). De sedimentatie werd hierdoor aanzienlijk versterkt.

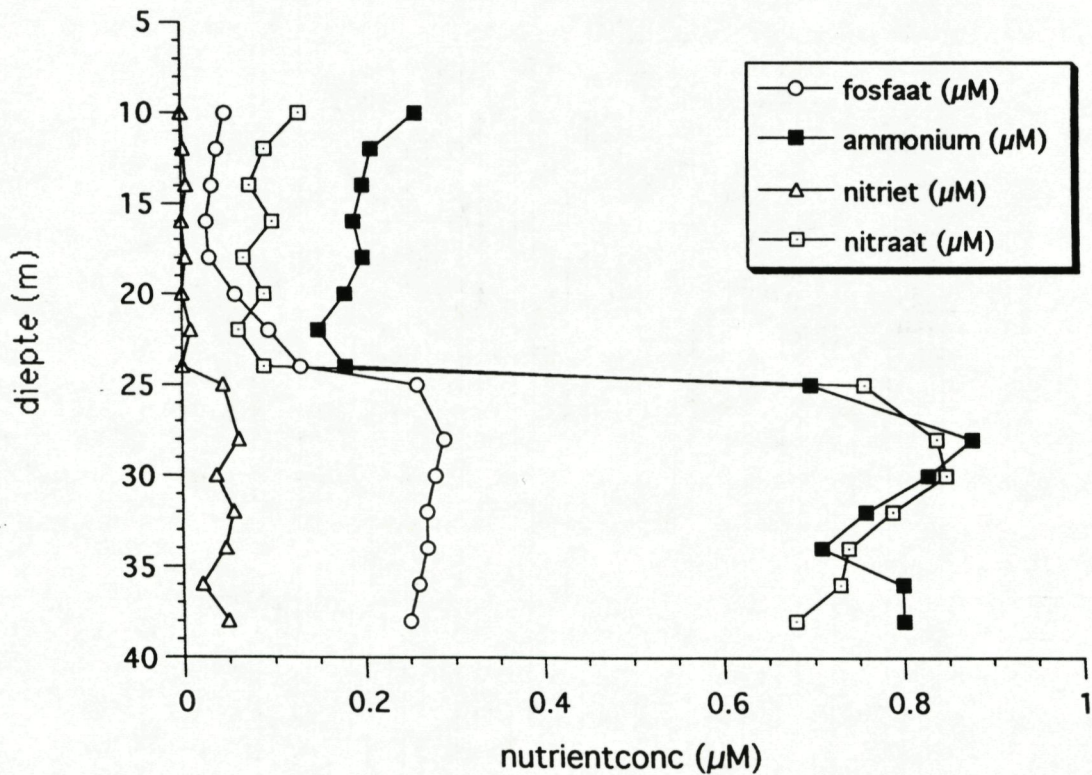
Tijdens de zomertocht werd er minder activiteit en biomassa in de waterkolom aangetroffen. Dit correspondeert met de lage, maar wel stijgende fluorescenties die in Fig. 4.6 zijn weergegeven (dag 206-210). In de bovenlaag van de waterkolom bestond het pelagisch systeem voornamelijk uit pico- en nanoalgen en microzoöplankton. Zoals ook uit de semi-continu registraties van het INP-MOORING programma volgde was de waterkolom sterk getratificeerd met de nutricline op ongeveer 25 m onder het wateroppervlak (Fig. 4.10), dus aan de onderkant van de niet-turbulente tussenlaag (Fig. 4.3 en 4.4).



Figuur 4.8. Chlorofyl-a concentraties in de fractie $< 5 \mu\text{m}$ en het totale chlorofyl-a gehalte. De metingen zijn uitgevoerd op een diepte van 10 m onder het wateroppervlak langs een raai tussen de Shetland eilanden en het verankeringsstation in de Oestergronden. Periode 25 maart - 12 april 1994.



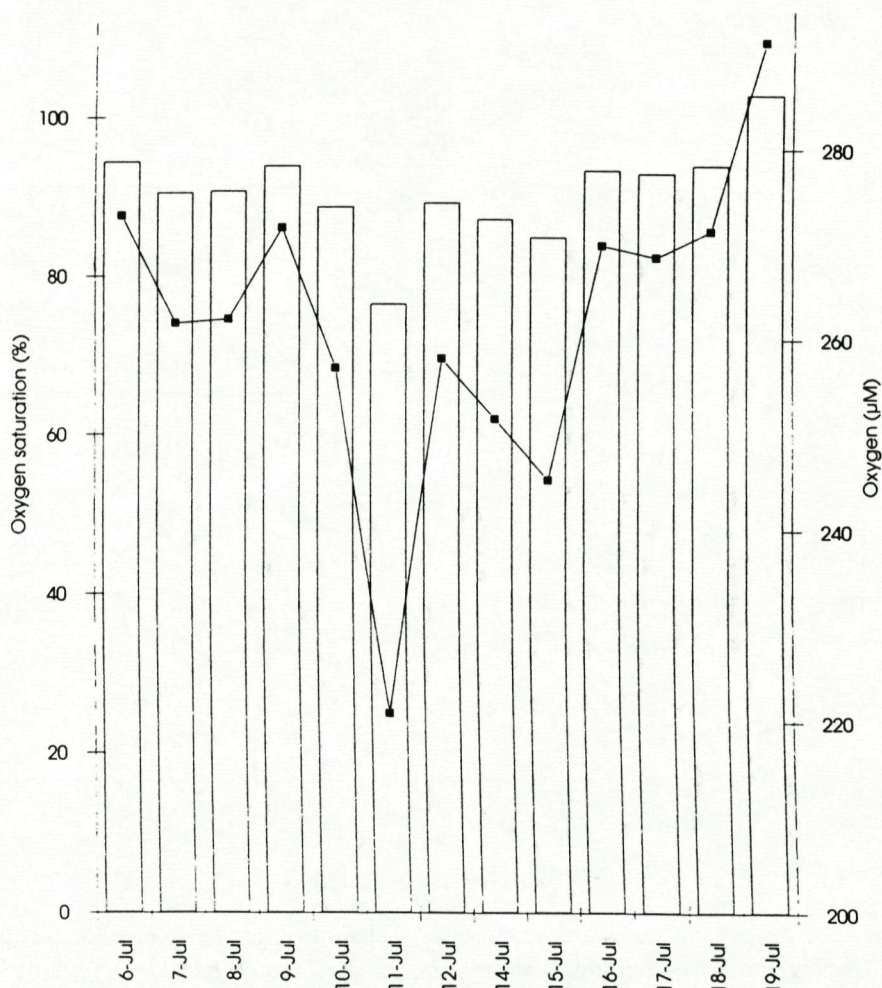
Figuur 4.9. Grootte afhankelijke C-fixatie snelheid ("primaire productie") van fytoplankton op het verankeringsstation in de Oestergronden, eind maart 1994.



Figuur 4.10. Nutriënten profielen in de waterkolom van het verankeringsstation gemeten in juli 1994. De scherpe overgang van lage naar relatief hoge concentraties op ca. 25 geeft de nutricline aan. Deze situatie komt overeen met de periode tussen dag 206 en dag 210 in de figuren 4.3 t/m 4.7.

4.3. STED

Om de oorspronkelijke hypothese van STED goed te testen was een periode met variable windsterktes ideaal geweest (bijvoorbeeld rustig weer gevolgd door een storm). De hele periode was het weer echter warm, zonnig en met weinig of geen wind (< 10 m/s, op veel dagen < 5 m/s). Significante golfhoogtes waren minder dan 1m. De stratificatie van de waterkolom was dan ook stabiel met een voortdurende aanwezigheid van een niet-turbulente tussenlaag. In Fig. 4.3 t/m 4.7 is de STED periode te vinden tussen dag 185 en dag 202, met rond dag 195 (14 juli) de meest in het oog springende verdunning van de NTTL en verhoging van de fluorescentie in de bovenlaag van de waterkolom. Opvallend was dat tijdens STED de fluorescentie in de gehele onderlaag van de waterkolom hoger was dan boven de thermocline. In Fig. 4.11 is het verloop van de zuurstofconcentratie in het water direct boven de bodem weergegeven zoals die gemeten is tijdens STED. De metingen zijn 1 x per dag verricht op verschillende momenten in het getij. De resultaten geven aan dat het zuurstof-verzadigingspercentage bij de bodem varieerde tussen 75% en 110%, overeenkomend met respectievelijk 220 en 290 μM . De laagste concentraties werden gevonden op 11 juli (dag 192), de hoogste op 19 juli (dag 200). Op het eerste gezicht is er geen relatie tussen het verloop van de zuurstofconcentratie in het bodemwater en de fluorescentie in de boven- of onderlaag van de waterkolom (gemeten met verankerde sensoren of 2 x daags met CTD).

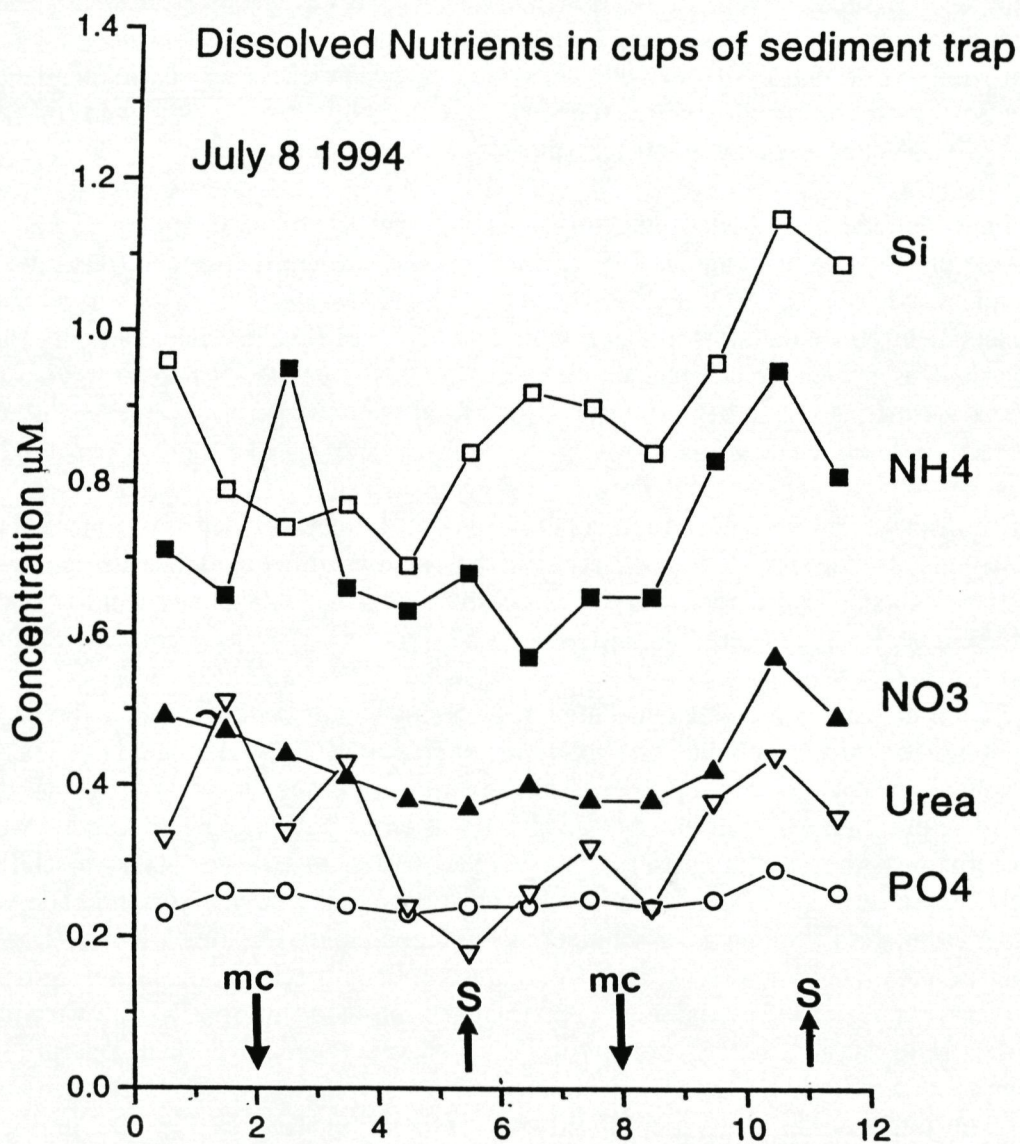


Figuur 4.11. Zuurstofconcentraties (■) en -verzadiging (balken) in het bodemwater van het verankeringsstation tijdens de STED periode. Het bodemwater is gemonsterd uit boxcores, zuurstof is gemeten met behulp van Winkler titraties.

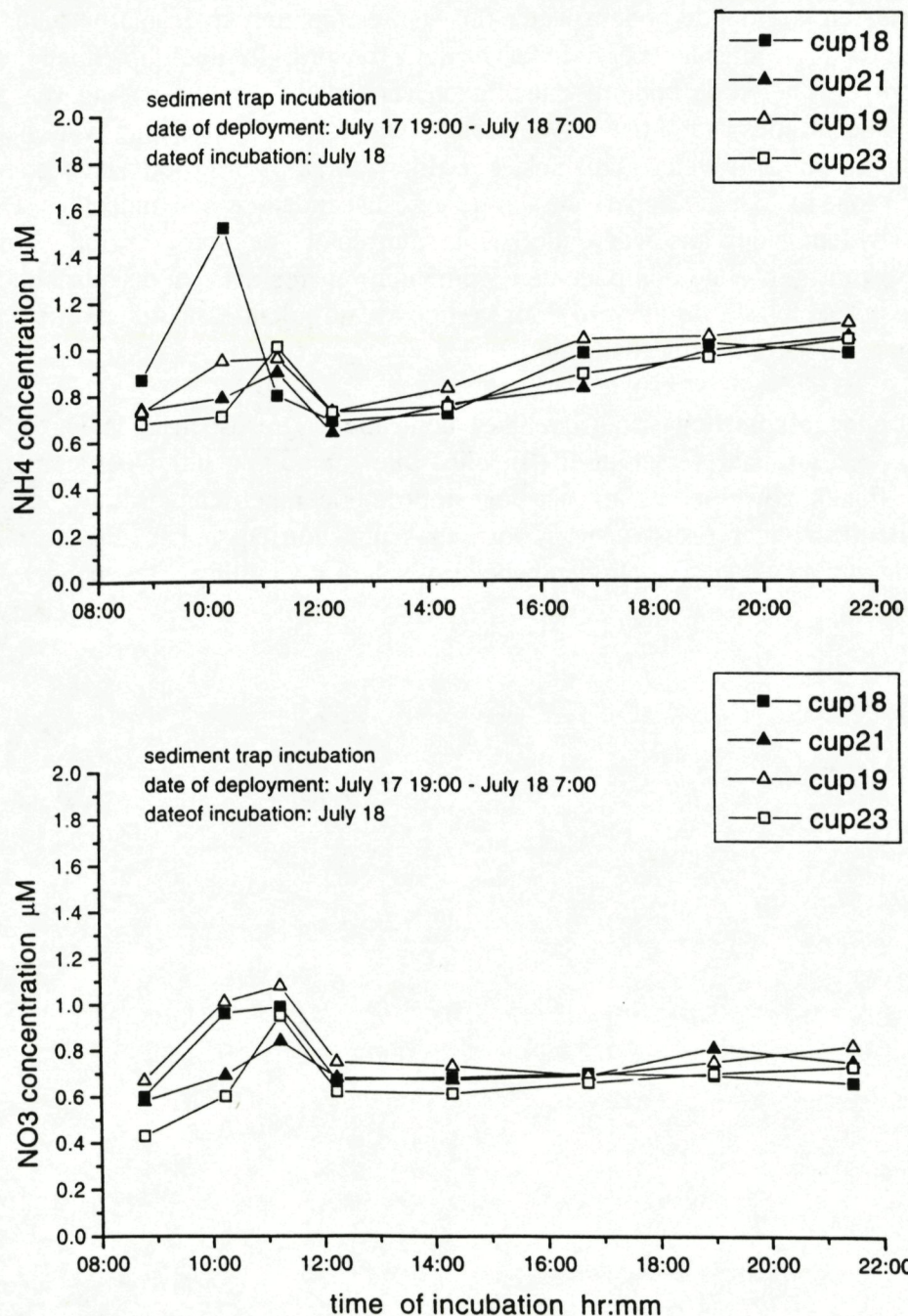
Depositie en resuspensie van particulier materiaal (organisch en anorganisch) is bestudeerd m.b.v. sedimentvallen, transmissometers en directe bepalingen van de verdeling van particulier materiaal (SPM) in de waterkolom. De hoogste SPM concentraties waren meestal aanwezig op een diepte van 25 m, dus direct onder de NTTL, en vlak boven de bodem, vooral bij maximale (getijde)-stroomsnelheden. Deze laatste waarneming duidt op resuspensie onder invloed van het getij. Om het verloop in de depositie van SPM te meten, is iedere dag tussen 19.00 en 7.00 uur een sedimentval opgehangen op 2 m boven de bodem, met openingsintervallen van steeds 1 uur. Visuele inspectie van de vangsten in de val liet op alle dagen een duidelijk getijde-effect zien met om de 6 uur maximale vangsten. Onder de microscoop bleek het gevangen materiaal rijk te zijn aan algen, heterotrofe nanoflagellaten en detritus. Hoewel de hoeveelheden materiaal in de vallen niet direct vertaald kunnen worden naar depositiesnelheden, suggereren deze waarnemingen op een door het getij veroorzaakte dynamiek in de beschikbaarheid van (vers) voedsel voor het benthos. Deze conclusie is vergelijkbaar met die van JENNES & DUINEVELD (1985) voor de niet gestratificeerde zuidelijke Noordzee.

De bacteriële productie in de bodem was ongeveer $30 \text{ mgC. m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, wat een stuk lager is dan producties die in juli 1988 en augustus 1991 gemeten zijn op de Oestergronden (respectievelijk 53 en $54 \text{ mgC. m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, VAN DUYL e.a. 1993, VAN DUYL & KOP 1994). Patchiness in dichtheden aan benthische heterotrofe nanoflagellaten lijkt niet op te treden op een schaal van cm's tot m's, maar wel enigszins op een schaal van honderden meters. De eerste en nog zeer voorlopige resultaten van de metingen aan het benthisch "small food web" suggereren een respons van de microbiële activiteit op deze getijdecyclus in de depositie van SPM. Nadere bepalingen en analyse van de gehalten aan POC, PON en fytopigmenten in het sedimentval materiaal moet hierover uitsluitsel geven. De voorlopige conclusie is dat de meestal toegepaste enkelvoudige metingen aan de activiteit van en de voedselbeschikbaarheid voor het benthos, die gebaseerd is op de aanname van stationaire condities en die voorbij gaat aan de dynamiek van het systeem, geen goed beeld geeft van de werkelijkheid.

Ook de concentraties aan opgeloste nutriënten in de potjes van de sedimentvallen zijn bepaald. De resultaten wijzen op substantiële verschillen tussen de potjes (Fig. 4.12), die in serie elk een uur open hebben gestaan om gesuspendeerd materiaal in te vangen, en vervolgens aan de val "geïncubeerd" zijn tot de val weer aan dek gebracht was en de potjes geopend konden worden voor monsternamen. Alle nutriënten tonen een getijdevariatie, met de grootste verschillen in concentratie tussen de eb- en vloedkentering. Dit wijst op de invloed van verschillende water-massa's die met het getij heen en weer schuiven. De hiergenoemde variaties kunnen vergeleken worden met de resultaten van de NAS-nitraat analysers. Er zijn echter ook pieken in de concentraties waar te nemen rond de tijden van maximale eb- en vloedstroom. Dit kan veroorzaakt zijn door de afgifte van nutriënten door het in de vallen verzamelde materiaal. Daarom is een aantal keren de reactiviteit van het materiaal uit de sedimentvallen getest door een eenvoudige in het donker uitgevoerde incubatie bij in situ temperatuur (Fig. 4.13). De afgifte van ammonium en nitraat door het in de vallen verzamelde SPM is duidelijk te zien in deze figuur, een indicatie dat de depositie en resuspensie van SPM een rol speelt in de nutriënten balans van de waterkolom. Aan een aantal potjes is voor de incubatie de nitrificatie remmer N-serve toegevoegd om nitrificatie als bron van nitraat te identificeren. De resultaten laten echter geen duidelijk verschil zien in de nitraat afgifte/productie met en zonder N-serve. Mogelijk speelt dus nog een ander mechanisme dan nitrificatie een rol in de nitraat afgifte door het in de potjes van de sedimentvallen verzamelde SPM.



Figuur 4.12. Nutriënten concentraties gemeten in potjes van een sedimentval direct nadat de val aan dek gebracht was (9 juli 8.00 uur). Het eerste potje van de val was geopend op 8 juli van 19.00 tot 20.00 uur, potje twee van 20.00 tot 21.00 uur, enz. Het laatste potje was geopend op 9 juli van 6.00 uur tot 7.00 uur. MC (maximum current) geeft aan het moment van maximale sterkte van de getijdestroming, S (slack tide) de kentering.



Figuur 4.13. Ontwikkeling van de ammonium en nitraat concentraties in 4 potjes van de sedimentval van 8-9 juli (zie figuur 4.12), in een incubatie na het aan dek bengen van de val op 8 juli 8.00 uur. Potje 18 was geopend aan de val van 0.00 - 1.00 uur, potje 19 van 1.00 - 2.00 uur, potje 21 van 3.00 - 4.00 uur en potje 23 van 5.00 - 6.00 uur. De nitrificatie remmer N-serve was toegevoegd aan de potjes 18 en 21.

Bodem-water fluxen van zuurstof, ammonium, nitrate, nitriet, silicaat en fosfaat zijn dagelijks (tijdens STED) gemeten door middel van incubatie van intacte kernen. De metingen waren onderverdeeld in 3 fases: (1) 0-2 uur, matige roersnelheid zonder zichtbare resuspensie van bodemmateriaal. Voor O₂ was de diffusieve grenslaag boven het sediment-oppervlak onder deze condities ca. 300 µm; (2) 2-4 uur, hoge roersnelheid met resuspensie en afwezigheid van een diffusieve grenslaag boven de bodem; (3) 4-6 uur, opnieuw matige roersnelheid. De laatste fase is niet voor alle stations uitgevoerd. In nagenoeg alle gevallen gaf verhoogde turbulentie en resuspensie een verhoogde bodem-water flux van ammonium en fosfaat te zien, terwijl de afgifte van nitraat en silicaat veel minder beïnvloed werd. In hoofdlijnen kan verhoogde turbulentie op 3 manieren de bodem-water fluxen versterken: (1) Opmenging van poriewater (met hoge concentraties) met het bovenstaande water; (2) Versterking van het diffusief transport door het bodem-water grensvlak, o.a. door afbraak van de diffusieve grenslaag; (3) Desorptie van ionen vanaf het oppervlak van de geresuspendeerde bodemdeeltjes. De eerste 2 mechanismen gelden voor alle hier onderzochte nutriënten, de derde vooral voor de voor adsorptie/desorptie gevoelige componenten ammonium en fosfaat. Omdat juist bodem-water flux van deze nutriënten versterkt werd door verhoogde turbulentie, lijkt desorptie van bodemdeeltjes het meest belangrijke mechanisme.

Een voortdurende afwisseling van (tijdelijke) depositie en resuspensie is in de Noordzee waarschijnlijk een normaal verschijnsel. Bij bijna alle tot nu toe uitgevoerde metingen van bodem-water fluxen, zowel in situ als met ongestoorde bodemkernen, wordt uitgegaan van een matige turbulentie zonder resuspensie. Voor een aantal nutriënten kan dit een aanzienlijke onderschatting van de werkelijk optredende bodem-water uitwisseling betekenen.

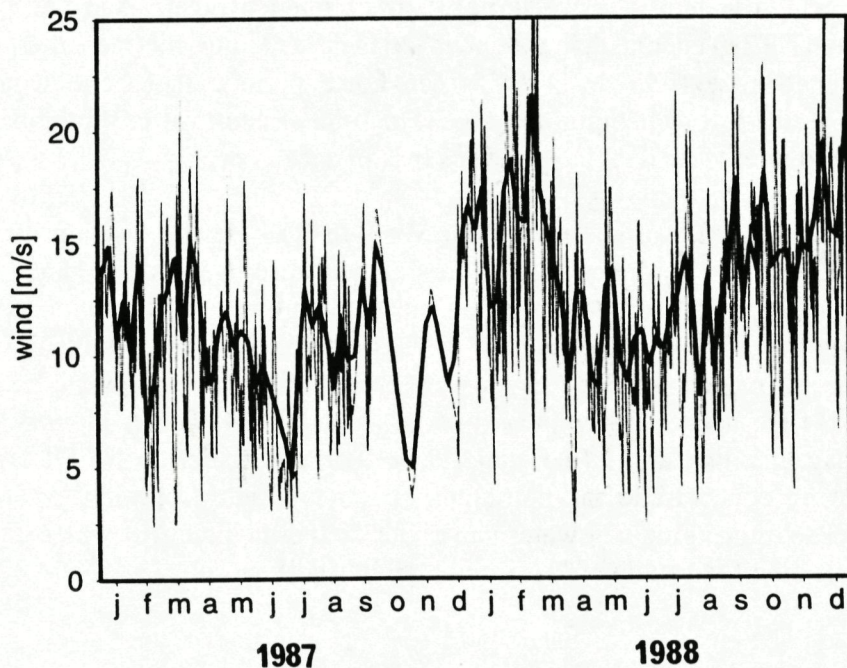
4.4. STRAECOS

De hier gepresenteerde berekenings-resultaten betreffen een run waarbij de ERSEM submodellen en parameterwaarden in ongewijzigde vorm toegepast zijn. De diepte van de 1-dimensionale kolom is gesteld op 45 m, de dikte van de sublagen is gezet op 1 m. Voor de meteorologische condities ("external forcing") zijn gegevens gebruikt van het KNMI (vliegveld De Kooy bij Den Helder, jaren 1987 en 1988). Uiteraard zullen bij nadere uitwerking gegevens van 1994 gebruikt worden. De beginvoorwaarden zijn bepaald met het Noordzee-brede ERSEM model (ERSEM box 8 waarin de Oestergronden liggen, BARETTA e.a. 1994).

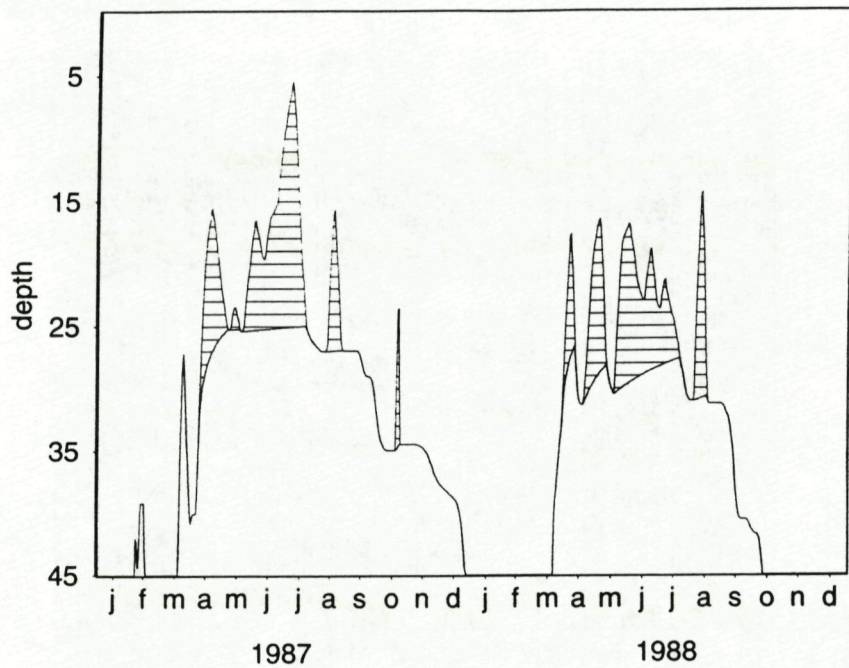
De weerscondities van 1987 en 1988 waren duidelijk verschillend, met in 1987 gemiddeld rustiger weer dan in 1988 (Fig. 4.14). In de periode oktober - december 1987 ontbreken de windgegevens voor een aantal weken. In het model zijn de ontbrekende waarden aangevuld door middel van lineaire interpolatie tussen de wel aanwezige data. Hierdoor is de windsnelheid voor de herfst van 1987 uitzonderlijk laag geschat, wat als een artefact beschouwd moet worden. Het verschil in wind komt goed tot uiting in de berekende structuur van de waterkolom in beide jaren (Fig. 4.15). De bijbehorende temperatuursverdeling is te vinden in Fig. 4.16. De stratificatie stelt zich in in maart wanneer de instraling en de luchttemperatuur toenemen. In eerste instantie wordt een 2-lagen structuur gevormd zonder NTTL (niet-turbulente tussenlaag). Daarna (maart-april) ontwikkelt zich de NTTL, die een zeer dynamisch gedrag vertoont. De dikte van de tussenlaag varieert soms binnen enkele dagen van 20 naar 0 m en omgekeerd. In juni-juli 1987 is de windsnelheid lager dan in dezelfde maanden van 1988. In deze maanden is de NTTL daarom dikker in 1987 dan in 1988. De zomer van 1987 is in dit opzicht vergelijkbaar met die van 1994 (zie sectie 4.3). Tijdens de STED periode in 1994 strekte de NTTL zich uit tussen ongeveer 10 en 25 m diepte (Fig. 4.3 en 4.4). De gesimuleerde positie van de NTTL voor juni-juli 1987 komt hiermee goed overeen. Aan het eind van de zomer verdwijnt de NTTL en ontstaat weer een 2-lagen structuur met een thermocline die geleidelijk naar beneden zakt. In de herfst is een korte periode met hoge windsnelheden voldoende om de stratificatie volledig af te breken. In 1988 gebeurt dit in september, in 1987, door eerder genoemd artefact in de windgegevens, pas in december.

Tijdens stratificatie bepaalt de variatie in de dikte van de NTTL de uitwisseling van opgeloste stoffen tussen de boven- en de onderlaag. In de simulatie resultaten is een aantal momenten herkenbaar waarin entrainment van de bovenlaag plaats vindt en de NTTL in korte tijd dunner wordt. Vergelijking van Fig. 4.14 met Fig. 4.15 laat zien dat dit gebeurt telkens wanneer de windsnelheid toeneemt na een periode (dagen-weken) met relatief weinig wind. Bij een sterke toename kan de NTTL geheel verdwijnen (bijvoorbeeld juli 1987), bij kleinere fluctuaties wordt de tussenlaag tijdelijk dunner (mei-juni 1988). Iedere keer dat de NTTL afkalft wordt water met een hogere concentratie aan nutriënten opgemengd in de bovenlaag van de waterkolom. Rechtstreekse opmenging van water van onder de thermocline met water uit de bovenlaag vindt plaats als de dikte van de NTTL tot nul gereduceerd wordt.

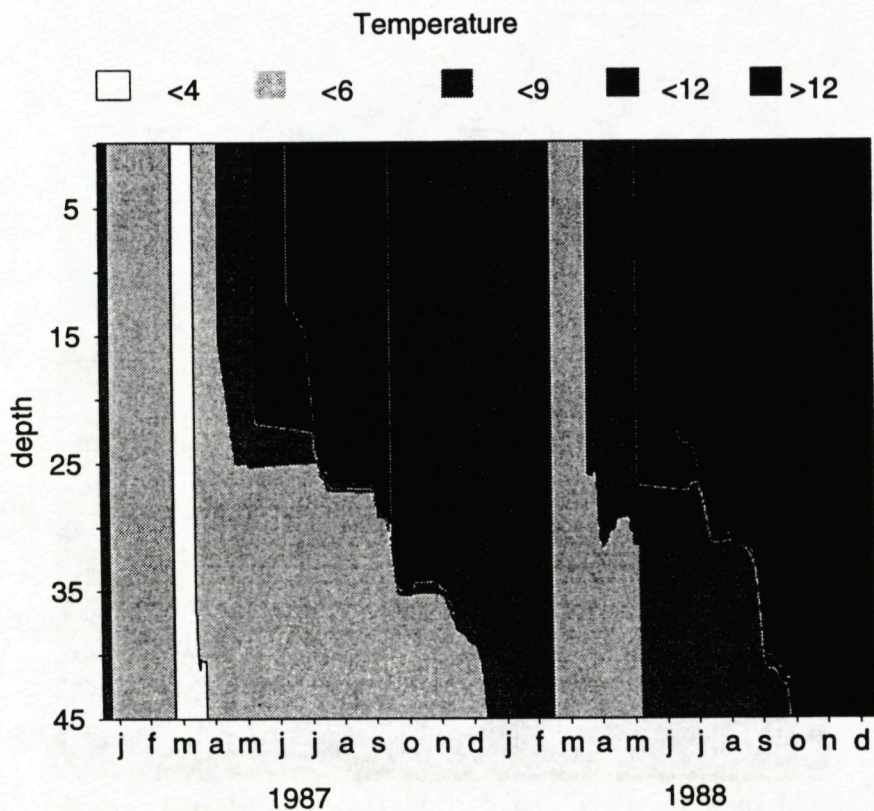
In maart-april ontwikkelt zich een voorjaarsbloei in de bovenlaag die instort zodra de stratificatie zich goed heeft ingesteld (Fig. 4.17) en de nutriënten in de fotische zone uitgeput raken (Fig. 4.18). Deze resultaten zijn goed vergelijkbaar met wat in 1994 gemeten is rond het verankeringsstation (Fig. 4.1). Door sedimentatie naar de onderlaag en vervolgens naar de bodem verdwijnen de nutriënten uit de bovenlaag van de waterkolom. Omdat rechtstreeks diffusief transport door de thermocline onmogelijk is, betekent dit dat de nutriënten zich in de onderlaag beginnen op te hopen (Fig. 4.18). Intussen is een efficiënte populatie zoöplankton aanwezig die de algenbiomassa door graas kan controleren. Hierdoor en door nutriëntengebrek in de bovenlaag, kunnen in de onderlaag hogere chlorofyl concentraties ontstaan dan boven in de waterkolom. In de zomer wisselen periodes van hoge chlorofyl concentraties af met periodes van lage chlorofyl concentraties. Begin mei 1987, begin en eind augustus 1987, september-oktober 1987, begin april 1988, half mei 1988, begin augustus 1988, en september 1988 verdwijnt de NTTL (Fig. 4.15) maar niet de stratificatie (Fig. 4.16). De spronglaag is op dit moment gereduceerd tot een scherpe thermocline met zeer geringe dikte. Al deze gebeurtenissen worden gevolgd door een (korte) periode met verhoogde chlorofyl concentraties boven de thermocline. Voor de rustige zomer van 1987 worden gemiddeld lagere algenbiomassa's gesimuleerd dan in de meer winderige zomer van 1988. De conclusie die hieruit getrokken wordt is dat in de zomer wind een stimulerende factor is voor het ontstaan van algenbloeien in een gestratificeerde waterkolom. Dit geldt vooral voor depositiegebieden als de Oestergronden, waar ook voedingsstoffen zich kunnen ophopen die van elders aangevoerd worden.



Figuur 4.14. Dag-gemiddelde (dunne lijn) en weegemiddelde (dikke lijn) windsnelheid (m/s) gemeten op vliegveld De Kooy in 1987 en 1988. Voor oktober-december 1987 ontbreekt een antal dagelijkse waarnemingen. Voor het model zijn deze aangevuld door middel van lineaire interpolatie.

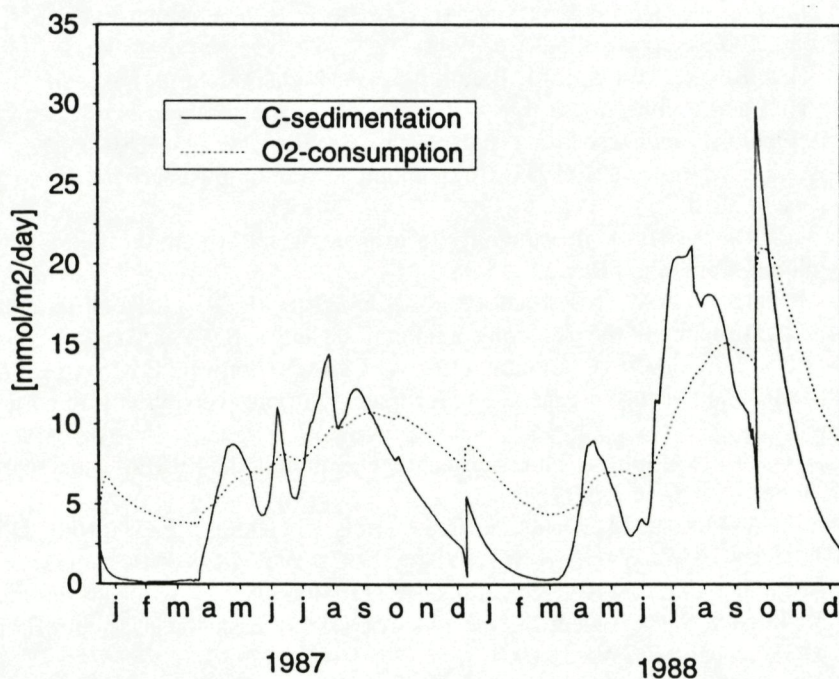


Figuur 4.15. Gesimuleerde verticale structuur van de waterkolom in 1987 en 1988. Het grijze gebied geeft het deel van de waterkolom onder de thermocline weer, het getrepte gebied de niet-turbulente tussenlaag (NTTL). Een diepte van 0 m komt overeen met het wateroppervlak, 45 m geeft de ligging van de bodem aan.



Figuur 4.16. Gesimuleerde temperatuurverdeling (°C) in de waterkolom van de Oostergronden voor de jaren 1987 en 1988. Opvallend is het doorzetten van de stratificatie in 1987 tot in december ten gevolge van de te lage schatting van de windsnelheid in het najaar van dat jaar (Fig. 4.14).

Na elke bloei vindt een verhoogde sedimentatie plaats van organisch materiaal uit de waterkolom, via de onderlaag naar de bodem (Fig. 4.19). Opvallend is dat maximale deposities in juli augustus bereikt worden en niet direct na de voorjaarsbloei in mei. (De pieken in december 1987 en oktober 1988 zijn een onvolkomenheid van het model, dat versterkte sedimentatie berekent op het moment dat de stratificatie geheel verdwijnt). De verklaring voor dit resultaat is dat in een 1-dimensionale kolom zonder laterale advectie de hoeveelheid organisch materiaal in de kolom in de eerste helft van het jaar langzaam oploopt omdat de primaire productie groter is dan de mineralisatie. Omdat de sedimentatie van organisch koolstof ongeveer evenredig is met de hoeveelheid particulier organisch koolstof in de onderlaag van de waterkolom, neemt ook de sedimentatie langzaam toe tot aan de zomer. Hoewel dit in zekere zin een artefact is van een 1-dimensionaal kolom-model, is deze situatie vergelijkbaar met wat in een depositiegebied gebeurt. In de eerste maanden na het uitzakken van de voorjaarsbloei(en) wordt in een depositiegebied waarschijnlijk ook meer organisch materiaal aangevoerd dan gemineraliseerd kan worden. Door de gemiddeld hogere chlorofyl concentraties in 1988 is ook de sedimentatie van organisch materiaal hoger in 1988 dan in 1987. Wind stimuleert dus ook de aanvoer van voedsel naar het benthos, met name in de zomermaanden. In het model komt dit tot uiting in een hoger zuurstofverbruik door de bodem in de zomer van 1988 (Fig. 4.19). Deze resultaten suggereren dat lage zuurstof concentraties in de onderlaag van de waterkolom vooral zullen optreden in de zomermaanden, in een periode met weinig wind (weinig uitwisseling met de bovenlaag) direct volgend op een periode met relatief sterke wind (algenbloei gevolgd door sedimentatie van organisch materiaal).



Figuur 4.19. Gesimuleerde sedimentatie van organisch materiaal (doorgetrokken lijn, $\text{mmol C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) en zuurstofverbruik door de bodem (stippellijn, $\text{mmol O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) van de Oestergronden in 1987 en 1988. De scherpe pieken in de sedimentatie in december 1987 en oktober 1988 zijn een onvolkomenheid van het model, veroorzaakt door interpolatie van ontbrekende gegevens.

5. REFERENTIES

- BARETTA, J.W., W. EBENHÖH & P. RUARDIJ (1995). Structure of the ERSEM model: an overview. *Neth. J. Sea Res.* (in press).
- COLIJN, F.C. (1991). Changes in plankton communities: when, where and why? ICES 1991 symposium, session 2, paper 13.
- DUYL, F.C. VAN & A.J. KOP (1994). Bacterial production in North Sea sediments: clues to seasonal and spatial variations. *Mar. Biol.* **120**: 323-337.
- DUYL, F.C. VAN, W. VAN RAAPHORST & A.J. KOP (1993). Benthic bacterial production and nutrient sediment-water exchange in sandy North Sea sediments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **100**: 85-95.
- GEHLEN, M. (1994). Early diagenesis of silica in North Sea sediments. Ph.D. thesis. Free University of Brussels, pp. 1-177
- HAREN, J.J.M. VAN & J.C.A. JOORDENS (1990). Observations of physical and biological parameters at the transition between the southern and central North Sea. *Neth. J. Sea Res.* **25**: 351-364.
- HOLTMANN, S.E. & A. GROENEWOLD (1992). Distribution of the zoobenthos on the Dutch continental shelf: The Oyster Ground, Frisian Front, Vlieland Ground and Terschelling Bank. NIOZ-rapport 1992-8, pp. 1-129.
- JENNESS, M.I. & G.C.A. DUINEVELD (1985). Effects of tidal currents on chlorophyll a content of sandy sediments in the southern North Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **21**: 283-287.
- KOEMAN, R. & M. RADEMAKER (1993). Biomonitoring van fytoplankton in de Nederlandse zoute en brakke wateren 1992. TRIPOS/DGW/DNZ report.
- LOHSE, L., J.F.P. MALSCHAERT, C.P. SLOMP, W. HELDER & W. VAN RAAPHORST (1993). Nitrogen cycling in North Sea sediments: Interaction of denitrification and nitrification in offshore and coastal areas. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **101**: 283-296.
- PEETERS, J.C.H., H.A. HAAS & L.P. PEPPERZAK (1991). Eutrofiëring, primaire produktie en zuurstofhuishouding in de Noordzee. Rijkswaterstaat, DGW, nota GWAO-91.083.
- RAAPHORST, W. VAN (1993). Theme III: Benthic links and sinks in North sea nutrient cycling (BELS). In: W. VAN RAAPHORST & J.P. BOON (eds.), The integrated North Sea programme 1991-1992. NIOZ-rapport 1993-9, pp. 6-10.
- RAAPHORST, W. VAN, H.T. KLOOSTERHUIS & E.M. BERGHUIS (1991). Stikstof regeneratie en verwijdering in het sediment van het Friese Front. In: A. DE GEE, M.A. BAARS & H.W. VAN DER VEER (eds.). De ecologie van het Friese Front. NIOZ-rapport 1991-2, pp. 49-60.
- RAAPHORST, W. VAN, H.T. KLOOSTERHUIS, E.M. BERGHUIS, A.J.M. GIELES, J.F.P. MALSCHAERT & G.P. VAN NOOORT (1992). Nitrogen cycling in two types of sediments of the southern North Sea (Frisian Front, Broad Fourteens): Field data and mesocosm results. *Neth. J. Sea Res.* **28**: 293-316.
- RAAPHORST, W. VAN & J.F.P. MALSCHAERT (1995). Ammonium adsorption in superficial North Sea sediments. *Cont. Shelf Res.* (submitted).
- RIDDERINKHOF, H. (1992). On the effects of variability in meteorological forcing on the vertical structure of stratified water column. *Cont. Shelf Res.* **12**: 25-36
- RIEGMAN, R., B.R. KUIPERS, A.A.M. NOORDELOOS & H.J. WITTE (1993). Size-differential control of phytoplankton and the structure of the plankton communities. *Neth. J. Sea Res.* **31**: 255-265.
- RUARDIJ, P., J.W. BARETTA & J.G. BARETTA-BEKKER (1995). SESAME, Software Environment for Simulation and Analysis of Marine Ecosystems in general and for spatially resolved ecosystems in particular. *Neth. J. Sea Res.* (in press).
- RUARDIJ, P. & W. VAN RAAPHORST (1995). Benthic nutrient regeneration in the ERSEM ecosystem model of the North Sea. *Neth. J. Sea Res.* (in press).
- TETT, P.B., I.R. JOINT, D.A. PURDIE, M. BAARS, S. OOSTERHUIS, G. DANERI, F. HANNAH, D.K. MILLS, D. PLUMMER, A.J. POMROY, A.W. WALNE & H.J. WIITE (1993). Biological consequences of tidal mixing gradients in the North Sea. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **343**: 493-508.
- VRIES, I. DE, H. LOS, R. JANSSEN, S. CRAMER & M. VAN DER TOL (1993). Risico-analyse eutrofiëring Noordzee. Rijkswaterstaat, DGW, rapport DGW-93.029.
- ZEVENBOOM, W. (1993). Assessment of eutrophication and its effects in marine waters. *Germ. J. Hydrogr.*, supplement 1, 141-170
- ZEVENBOOM, W., M. RADEMAKER & F.C. COLIJN (1991). Exceptional algal blooms in Dutch North Sea waters. *Wat. Sci. Tech.* **24**: 251-260.

Informatie BEON

**Programma Bureau BEON
p/a Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee
Kortenaerkade 1
Postbus 20907
2500 EX Den Haag
Tel.: 070-3114.259/257/258/260
Telefax: 070-3114321**

E-mail BEON

Internet: beon@rikz.rws.minvenw.nl

X.400 : S = beon;OU1 = rws;OU2 = rikz;O = minvenw;P = minvenw; A = 400net;C = nl

