



Ontwikkelingen in de biomassa van het microfytobenthos in de Oosterschelde en Westerschelde in de periode 1981-1996

Johan Stapel
Dick de Jong

Rapport RIKZ-98.023.

Rapportage in het kader van het project Delta Rapportage (DELRAP)

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1. Inleiding	5
Microfytobenthos	5
Oosterschelde	5
Westerschelde	7
Onderzoekskader	7
2. Materiaal en methodes	9
Monsterlocaties	9
Chlorofyl-a	9
Bodemhoogte	11
Slibgehalte	12
Bodemdynamiek	12
Statistiek	12
3. Resultaten	13
Oosterschelde	13
Westerschelde	16
4. Discussie	20
Jaarlijkse variatie	20
Locale variatie: hoogteligging en licht	22
Intermezzo 1	23
Seizoensvariatie: hydrodynamiek	26
Fauna28	
Conclusie	29
5. Habitatontwikkeling en primaire productie	30
Habitats	30
Oosterschelde	31
Westerschelde	33
Vergelijking Oosterschelde - Westerschelde	34
6. Advies voor verder onderzoek	36
Oosterschelde	36
Westerschelde	36
Literatuur	38
Summary	43
Captions of the tables and figures	44
Bijlagen	47

Samenvatting

Microfytobenthos wordt gevormd door eencellige algen die voorkomen in en op het sediment van (ondiepe) wateren. In het intergetijdengebied van de Oosterschelde en Westerschelde (ZW Nederland) bestaat deze groep hoofdzakelijk uit diatomeeën (kiezelwieren). Benthische diatomeeën zijn van belang als voedselbron voor verschillende soorten fauna, zowel vertebraten als evertrebraten. Het aandeel van benthische diatomeeën in de totale primaire productie van een ecosysteem is afhankelijk van een aantal factoren. Tot de belangrijkste factoren horen de hydrodynamiek (golfslag en stroomsnelheid) en de troebelheid van het water.

In de Oosterschelde hebben de Deltawerken op deze factoren een aanzienlijk effect gehad. Het systeem is minder dynamisch geworden en de waterkolom helderder; de platen en slikken vlakken af en verlagen, waarbij het intergetijdenareaal afneemt. Dit proces zal ook in de toekomst nog lang voortduren. In de Westerschelde zal in de naaste toekomst, ten gunste van de scheepvaart naar Antwerpen, de vaargeul nog verder worden verdiept. Dit heeft tot gevolg dat de platen hoger en steiler worden. Dit proces is tegenovergesteld aan het proces dat na het gereedkomen van de stormvloedkering in de Oosterschelde in gang is gezet.

In dit rapport wordt het voorkomen van benthische diatomeeën gerelateerd aan de fysische eigenschappen van hun leefomgeving. De contrasterende fysische situatie in de Ooster- en Westerschelde levert daarbij een beeld op over de meest waarschijnlijke factoren die het voorkomen van benthische diatomeeën bepalen. Door bepaalde habitatkarakteristieken te koppelen aan de diatomeeënbiomassa en de gemiddelde jaarproductie kan een schatting worden gemaakt van de totale primaire productie van benthische diatomeeën. Aan de hand van de waargenomen ontwikkelingen in het chlorofyl-a gehalte en (model)voorspellingen over de veranderingen in de karakteristieke habitatarealen kan een globale uitspraak worden gedaan over de primaire productie van microfytobenthos in de toekomst.

In de afgelopen 15 jaar is maandelijks een aantal locaties (4 in de Oosterschelde en 20 in de Westerschelde) bezocht door de meetdienst van Rijkswaterstaat Directie Zeeland (Vlissingen). Op meerdere monsterpunten per locatie (in totaal 147) is daarbij de bovenste cm van het sediment bemonsterd. Dit sediment is in het laboratorium van het Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ (Middelburg) geanalyseerd op het chlorofyl-a gehalte. De chlorofyl-a gegevens zijn statistisch geanalyseerd en de resultaten daarvan zijn wetenschappelijk geïnterpreteerd en in dit rapport gerapporteerd. De lengte van de onderzoeksperiode bedraagt 15 jaar in de Oosterschelde en 8 (voor enkele locaties 10) jaar in de Westerschelde.

Twee factoren spelen een dominante rol bij het voorkomen van diatomeeën (gemeten als chlorofyl-a) in de Ooster- en Westerschelde: de dynamiek van de locatie en de lichtbeschikbaarheid als afgeleide van de hoogteligging in het intergetijdengebied en de troebelheid van het water. Deze factoren kunnen de verschillen in locale variaties en jaar- en seizoensvariaties tussen de beide systemen verklaren. Slibrijke

locaties in de Westerschelde vertonen een duidelijke seizoensritmiek. In de zomermaanden is het chlorofyl-a gehalte hier hoog, in de winter laag. Deze ritmiek wordt waarschijnlijk niet verklaard door seizoensvariatie in zonneschijn en daglengte of temperatuur, maar hoofdzakelijk door seizoensvariatie in windsnelheid.

Door de veranderingen in de Oosterschelde als gevolg van de Deltawerken is de primaire productie van benthische diatomeeën in de afgelopen 15 jaar met ca. 45% toegenomen van ca. $18.10^6 \text{ kg C j}^{-1}$ tot ca. $26.10^6 \text{ kg C j}^{-1}$. Deze toename is voornamelijk het gevolg van een afname in plaatdynamiek en een aanzienlijke verbetering van het onderwater lichtklimaat, waardoor er sublitoraal een groot potentieel habitatareaal voor benthische diatomeeën is bijgekomen. Door een verdergaande erosie van intergetijdengebied in de toekomst zal de productie van benthische diatomeeën weer afnemen. Hoeveel dat is kan niet met zekerheid worden gezegd. Voor de Westerschelde is de totale primaire productie van benthische diatomeeën berekend op $7.10^6 \text{ kg C j}^{-1}$. Voorspeld wordt dat deze productie door de verdieping met ca. 10% zal kunnen toenemen tot $7,6.10^6 \text{ kg C j}^{-1}$, doordat het areaal intergetijdengebied iets in oppervlak zal toenemen, waarbij tevens het aandeel van hoog dynamisch, ongeschikt, areaal zal afnemen ten gunste van laag dynamisch, geschikt, areaal.

Inleiding

Microfytobenthos

Microfytobenthos zijn eencellige algen die voorkomen in en op het sediment van (ondiepe) wateren. In de sedimenten van estuaria zoals de Ooster- en Westerschelde bestaat deze groep hoofdzakelijk uit diatomeeën (kiezelwieren; Daemen & De Leeuw Vereecken, 1985; Admiraal et al., 1988; Sabbe & Vyverman, 1991; De Jonge, 1992). Microfytobenthos is voornamelijk van belang als voedselbron voor sedimenteters, sedimentgrazers en filtreerders (evertebraten zoals schelpdieren, wadslakjes, wormen en tal van geleedpotigen), en bepaalde groepen vissen en vogels, (e.g. Fenchel & Kofoed, 1976; Asmus, 1982; Admiraal et al., 1983; Morrissey 1988a,b; Meininger & Snoek, 1992; Kamermans, 1994).

Het aandeel van benthische diatomeeën in de totale primaire productie van een ecosysteem is afhankelijk van een aantal factoren. Naast hydrodynamiek (golfslag en stroomsnelheid) is de troebelheid van het water één van de belangrijkste (De Jonge, 1985; Delgado et al., 1991; De Jong & De Jonge, 1995; De Jonge & Van Beusekom, 1995). In een estuarium dat wordt gekenmerkt door zeer troebel water kunnen benthische diatomeeën een aanzienlijk deel van de totale primaire productie voor hun rekening nemen. Door de hoge troebelheid van het water kan de lichtintensiteit al op enkele cm's diepte te gering zijn voor productie door fytoplankton. Benthische diatomeeën, daarentegen, leven in en op het sediment in het intergetijdengebied van het estuarium en kunnen daardoor tijdens droogval een aanzienlijke hoeveelheid koolstof fixeren zonder daarbij gehinderd te worden door lichtlimitatie, veroorzaakt door de troebele waterkolom (Colijn, 1982; De Jong & De Jonge, 1995; De Jonge & Van Beusekom, 1995). In heldere wateren kan de productie van microfytobenthos ook bij hoog water en zelfs onder de laagwaterlijn doorgaan. Het onderwaterlichtklimaat wordt hierdoor eveneens een factor die mede bepalend is voor het voorkomen van benthische diatomeeën (Colijn, 1992; De Jong et al., 1994).

Een factor die ook vaak in verband wordt gebracht met het voorkomen van benthische diatomeeën is het slibgehalte van het sediment. Het slibgehalte wordt dan veelal gebruikt als een maat voor de dynamiek op een bepaalde locatie. Daarnaast bestaan er ook aanwijzingen dat het slibgehalte mede bepalend is voor de samenstelling van benthische diatomeeënpopulaties en omgekeerd (Daemen & De Leeuw Vereecken, 1985; Vos, 1986; Sabbe & Vyverman, 1991; Underwood & Paterson, 1993a, b).

Oosterschelde

Sinds de Deltawerken gereed zijn gekomen is de Oosterschelde (in Zuidwest-Nederland) (Figuur 1) veranderd van een estuarium in een zeearm. De zoet/zoutgradiënt is daarbij vrijwel verdwenen (Nienhuis & Smaal, 1994; Van Berchum & Wattel, 1997). Door de bouw van de



Figuur 1.
Kaart van het Deltagebiet in Zuidwest-Nederland met de ligging van Oosterschelde en Westerschelde en de locaties waarop microfytobenthos is bemonsterd. De locatienummers in de Westerschelde (1 - 27) corresponderen met de bijlagenummers (1 - 27)



stormvloedkering is de doorstroomopening van de Oosterscheldemonding sterk verkleind. Het getijvolume is hierdoor afgenomen, evenals de getijamplitude en de stroomsnelheden. Hierdoor is het evenwicht tussen de diepte van de geulen en het getijvolume verstoord. De geulen zullen daarom in de toekomst langzaam maar zeker ondieper worden. Het zand dat nodig is voor het opvullen van de geulen zal voor een deel ten koste gaan van intergetijdengebied (Kohsiek et al., 1987). Het intergetijdengebied zal hierdoor afvlakken en lager worden, waardoor ook het totale oppervlak ervan zal afnemen. Dit zou kunnen inhouden dat het habitatareaal van benthische diatomeeën in het litoraal geringer wordt. Aan de andere kant is het water helderder geworden (Mulder & Louters, 1994; Nienhuis & Smaal, 1994; Wetsteyn & Kromkamp, 1994; Ten Brinke et al., 1994), waardoor benthische diatomeeën zich in de nieuw ontstane situatie ook op grotere diepte zouden kunnen handhaven. Het is de vraag hoe deze twee aan elkaar tegengestelde effecten doorwerken op de primaire productie van de benthische diatomeeën en op de totale primaire productie van het systeem.

Westerschelde

De Westerschelde is een echt estuarium (Figuur 1). Het water is troebel en er zijn duidelijke estuariene gradiënten (Heip & Herman, 1995). In dit estuarium speelt de primaire productie van benthische diatomeeën zich voor het grootste deel af in het intergetijdengebied. Vrijwel direct na overstroming zal de benthische fotosynthese door lichtgebrek stoppen. De productie op de hoogst gelegen locaties zal naar verwachting dus het hoogst zijn, omdat ze het langst aan licht zijn blootgesteld, en op de laagst gelegen locaties het minst (Colijn, 1982; Colijn & De Jonge, 1984; De Jong & De Jonge, 1995). De relatie tussen productie en droogvalduur is niet lineair, omdat na verloop van tijd processen als uitdroging, diffusielimitatie en fotorespiratie ten nadele van de productie van benthische diatomeeën gaan werken. Een verandering van het oppervlak van het intergetijdengebied zal effect hebben op de totale productie van benthische diatomeeën. Daarnaast zal ook het hoger of lager worden van slikken en platen en een verschuiving in de verhouding hoogdynamische - laagdynamische gebieden een aanzienlijke verandering van die productie betekenen. In de naaste toekomst zal de Westerschelde ten behoeve van de scheepvaart naar Antwerpen verder worden verdiept, waardoor er meer water door de geulen gaat stromen (Vroon et al., 1997). Als gevolg hiervan zullen de platen hoger en steiler worden, een proces dat tegenovergesteld is aan wat er nu in de Oosterschelde gebeurt. Kleinere platen die (nu nog) door ondiepe kortsluitgeulen van elkaar worden gescheiden zullen tot grotere platen aaneengroeien en hoger worden waardoor het oppervlak aan ondiep water afneemt (Vroon et al., 1997). Het resultaat zou kunnen zijn dat er meer areaal beschikbaar komt voor de benthische primaire productie.

Onderzoekskader

De afgelopen 15 jaar hebben maandelijkse bepalingen van het chlorofyl-a gehalte in de litorale bodem van de Ooster- en Westerschelde een grote hoeveelheid informatie opgeleverd over het voorkomen van benthische diatomeeën in de beide watersystemen. In dit rapport wordt het voorkomen van benthische diatomeeën

gerelateerd aan de fysische eigenschappen van hun leefomgeving. De contrasterende fysische situatie in de Oosterschelde en Westerschelde levert een beeld op over de meest waarschijnlijke factoren die het voorkomen van benthische diatomeeën bepalen. Door bepaalde habitatkarakteristieken te koppelen aan diatomeeënbiomassa (gemeten als chlorofyl-a) en de gemiddelde jaarproductie (als afgeleide van het maandelijks chlorofyl-a gehalte) kan een schatting gemaakt worden van de totale primaire productie van benthische diatomeeën. Aan de hand van de waargenomen ontwikkelingen in het chlorofyl-a gehalte en de (model)voorspellingen over veranderingen in karakteristieke habitatarealen kan een globale uitspraak worden gedaan over de primaire productie van microfytobenthos in de toekomst.

2. Materiaal en methodes

Monsterlocaties

Oosterschelde

In de Oosterschelde zijn 4 locaties geselecteerd die als representatief worden beschouwd voor de verschillende habitatkarakteristieken van dit gebied (Figuur 1). In het noordwesten van de Oosterschelde (de Monding) zijn op de Roggenplaat (ca. 1200 ha) 12 monsterpunten geselecteerd, in hoogte variërend tussen NAP +0,7 m en NAP -1,3 m en 1 punt op ca. NAP -5 m (permanent onder water). In het Middengebied van de Oosterschelde zijn op de Galgeplaat (ca. 1000 ha) 10 monsterpunten geselecteerd in hoogte variërend tussen NAP +0,3 m en NAP -1,5 m. In het oostelijk deel van de Oosterschelde (de Kom) liggen twee locaties op slikken. Op het Verdrongen land van Zuid-Beveland ligt een raai met 6 monsterpunten in hoogte aflopend van NAP -1,1 m tot ca. NAP -1,5 m. Op Rattekaai ligt een raai met 4 monsterpunten in hoogte aflopend van NAP +1,7 m tot NAP -1 m.

Westerschelde

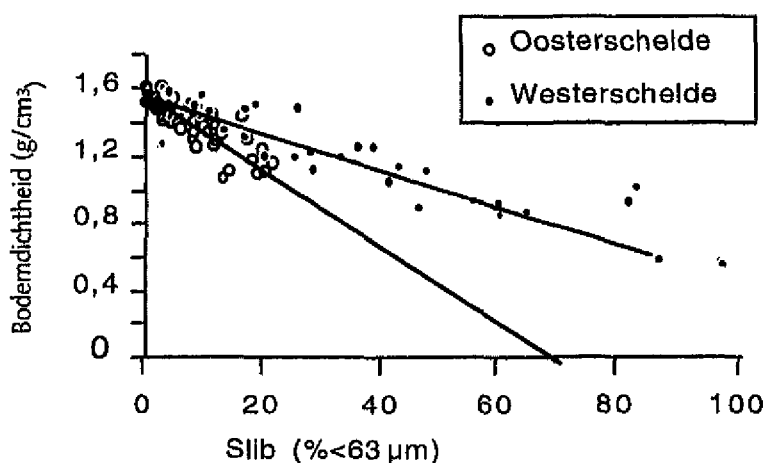
In de Westerschelde zijn 20 locaties geselecteerd, 9 platen en 11 slikken (Figuur 1). Op elk van deze locaties is een of meerdere raaien uitgezet, bestaande uit een variërend aantal monsterpunten (115 in totaal). Tabel 1 geeft een overzicht van de locaties: het type, het aantal raaien en monsterpunten, de nummers van de monsterpunten en de datum waarop de monsternamen voor de betreffende locatie van start is gegaan.

Chlorofyl-a

Op ieder monsterpunt is maandelijks de bovenste cm van het sediment bemonsterd met behulp van een perspex bodemsteker (diameter 2 cm). Per monsterdatum en -punt is 1 monster genomen. Elk monster bestaat uit vijf sedimentschijfjes van 1 cm dikte, resulterend uit 5

Figuur 2.

Relatie slibgehalte (% sedimentdeeltjes < 63 µm) en bodemdichtheid (soortelijk gewicht van de bodem). De relatie voor de Westerschelde wordt beschreven door de vergelijking $y = -0.01x + 1.54$ ($R^2 = 0.85$) en die voor de Oosterschelde door de vergelijking $y = -0.02x + 1.57$ ($R^2 = 0.51$), waarin y = bodemdichtheid en x = slibgehalte.



Tabel 1.

Overzicht monsterlocaties microfytobenthos in de Westerschelde. Voor de exacte ligging van de monsterlocaties zie Figuur 1.
P = plaat; S = slik; W = west; O = oost

	Locatie	Type en Ligging	Aantal raaien	Aantal punten	Puntnummers	Start monstername
1	Hooge Platen	P W	2	8	2911 - 2914 2921 - 2924	april 91
2	Hooge Springer	P W	1	5	2901 - 2905	mei 89
3	Paulinapolder	S W	1	3	2071 - 2073	april 91
4	Rammekenshoek	S W	1	3	2221 - 2223	maart 91
5	Staatse Nol	S W	1	3	2191 - 2193	maart 91
6	Middelplaat	P W	1	3	2241 - 2243	mei 94
7	Everingen	S W	1	3	2171 - 2173	maart 93
8	Plaat van Baarland	P W	1	3	2231 - 2233	mei 94
9	Pas van Terneuzen	S W	1	3	2061 - 2063	april 91
10	Platen van Hulst	S W	2	7	2041 - 2044 2051 - 2053	april 91
11	Rug van Baarland	P W	1	6	2801 - 2806	maart 89
12	Molenplaat	P W	2	6	2701 - 2706	maart 89
13	Platen van Ossensisse	P O	1	8	2601 - 2608	maart 89
14	Waarde	S O	3	9	2401 - 2409	maart 87
15	Plaat van Valkenisse West	P O	2	19	2501 - 2519	maart 89
16	Plaat van Valkenisse Oost	P O	1	3	2541 - 2543	oktober 90
17	Baalhoek	S O	1	4	2551 - 2554	oktober 90
18	Saeftinge	S O	3	13	2561 - 2564 2571 - 2574 2581 - 2585	oktober 90
19	Bath	S O	1	3	2121 - 2123	april 91
20	Appelzak	S O	1	3	2111 - 2113	april 91

verschillende steken, die zijn samengevoegd tot 1 mengmonster. De monsters zijn ingevroren (minimaal -70°C; maximaal -20°C) bewaard tot het moment van de analyse op het chlorofyl-a gehalte. Het chlorofyl-a gehalte is bepaald in een acetonextract van een homogeen deelmonster uit het mengmonster. Het resterende deelmonster is gedroogd om het vochtgehalte te bepalen, waarna het chlorofyl-a gehalte kan worden uitgedrukt in $\mu\text{g g}^{-1}$ droge grond.

Met behulp van bodemonsters (in voorjaar en/of najaar) is het slibgehalte bepaald (zie Slibgehalte). Via een gebiedsspecifieke relatie tussen slibgehalte en bodemdichtheid (soortelijk gewicht van de bodem), bepaald aan de hand van bodemonsters afkomstig van een representatieve doorsnede van het totaal aan monsterpunten, kan het chlorofyl-a gehalte vervolgens uitgedrukt worden in mg m^{-2} (Figuur 2). De chlorofyl-a getallen die in dit rapport staan vermeld zijn het resultaat van drie verschillende projecten. Van 1981 t/m 1983 is in het kader van het project BALANS onderzoek gedaan naar de kwalificering en kwantificering van het microfytobenthos in de Oosterschelde (Daemen & De Leeuw Vereecken, 1985). In 1983 en 1984 is in het kader van het project GEOMOR onderzoek gedaan naar de sedimentstabiliserende werking van benthische diatomeeën in de Oosterschelde (Vos, 1986). Sinds 1987 wordt in zowel de Oosterschelde als de Westerschelde chlorofyl-a bemonsterd ten

behoefte van onderzoek naar het voorkomen van benthische diatomeeën (EOS, MWTL-Biologische monitoring; De Jong et al., 1994; De Jong & De Jonge, 1995).

Het chlorofyl-a gehalte van de monsters die in dit rapport staan beschreven is op twee verschillende manieren bepaald. Het chlorofyl-a gehalte van de monsters afkomstig van de Oosterscheldelocaties Roggenplaat, Galgeplaat en Verdrongen Land van Zuid-Beveland van vóór maart 1983 is spectrofotometrisch bepaald (Daemen & De Leeuw Vereecken, 1985). Het chlorofyl-a gehalte in de overige monsters is bepaald met behulp van HPLC (Daemen, 1986; Vos, 1986; De Jong et al., 1994; De Jong & De Jonge, 1995). Door deze twee verschillende analysetechnieken laat de periode van vóór de bouw van de stormvloedkering zich moeilijk vergelijken met de periode erna. De mate van overeenkomst tussen beide methodes (uitgedrukt in de ratio HPLC:spectrofotometrisch) varieert per monster tussen 0,7 en 1. Gemiddeld per locatie varieert de ratio tussen 0,8 (Verdrongen Land), 0,89 (Roggenplaat) en 0,97 (Galgeplaat) (Rattekaai niet bemonsterd; Daemen, 1986).

Ten einde de spectrofotometrisch bepaalde chlorofyl-a data te kunnen vergelijken met de HPLC-data zijn de spectrofotometrische getallen gecorrigeerd door te vermenigvuldigen met een factor 0,7 (Daemen & De Leeuw Vereecken, 1985; Daemen, 1986). Om een inschatting te kunnen maken van de juistheid van deze correctie, zijn de data van vóór de bouw van de stormvloedkering per locatie vergeleken met de data van ná de bouw, waarbij in het ene geval alle spectrofotometrisch bepaalde data zijn gecorrigeerd met een factor 0,7 en in het andere geval niet. Voor de platen geldt dat in beide gevallen het chlorofyl-a gehalte significant toeneemt ($p < 0,05$). Voor het Verdrongen Land treedt in het geval van correctie geen verandering op ($p > 0,05$), terwijl er een significante afname te zien is indien niet wordt gecorrigeerd voor een verschil in de twee analysetechnieken ($p < 0,05$). Rattekaai (alleen HPLC-metingen) is buiten beschouwing gelaten. Het is erg onwaarschijnlijk dat er op het Verdrongen Land een verlaging van het benthisch chlorofyl-a gehalte is opgetreden na de komst van de stormvloedkering. De omgevingsfactoren zijn immers niet in negatieve zin voor de benthische diatomeeën veranderd. Het niet corrigeren van de spectrofotometrisch bepaalde data zou dus in een niet te verklaren afname van het chlorofyl-a gehalte op het Verdrongen Land hebben geresulteerd. Tevens blijkt er bij deze vergelijking geen interpretatieverschil te ontstaan wanneer voor de Roggenplaat en de Galgeplaat de gecorrigeerde data danwel de niet gecorrigeerde data wordt gebruikt. De gehanteerde correctieterm van 0,7 is dus verdedigbaar.

Bodemhoogte

Van de meeste monsterpunten is met behulp van landmeetkundige apparatuur de hoogteligging ten opzichte van NAP bepaald. Bij de meeste van deze monsterpunten liggen bovendien zogenaamde sedimentatie - erosie plotjes, waardoor van maand tot maand de exacte hoogteligging van de monsterpunten is bijgehouden (Van der Weck, 1994; Ruitenbeek, 1995; Tank, 1995). In een beperkt aantal gevallen is de hoogteligging van een monsterpunt bepaald uit een dieptekaart met behulp van GIS. Voor de statistische verwerking van de resultaten is de hoogte van de plotjes in hoogtecategorieën ingedeeld: $< \text{NAP}$, $\text{NAP} - \text{NAP} + 1,5 \text{ m}$, $> \text{NAP} + 1,5 \text{ m}$. Deze categorieën zijn vastgesteld na visuele inspectie van een grafiek waarin

het chlorofyl-a gehalte is uitgezet tegen de plothoogte.

Slibgehalte

Het slibgehalte (sedimentdeeltjes $< 63 \mu\text{m}$) van de bovenste 2 cm van de monsterlocaties is aanvankelijk in voor- en najaar en later alleen in het najaar bepaald. Voor het meten van het slibgehalte is gebruik gemaakt van de laserdiffractie-methode (apparatuur 'Malvern Mastersizer'), terwijl van de bodem tevens vochtgehalte, humusgehalte en kalkgehalte zijn gemeten. De laatste twee parameters zijn gebruikt ter bepaling van het juiste (gecorrigeerde) percentage slib. Het slibgehalte is gebruikt als een relatieve maat voor de dynamiek van het systeem en om de chlorofyl-a getallen te kunnen uitdrukken per oppervlakte-eenheid (zie 'Chlorofyl-a').

Voor de statistische verwerking van de resultaten is het slibgehalte van de plotjes in drie categorieën ingedeeld: $<2,5\%$, $2,5-10\%$ en $10-30\%$ voor de Oosterschelde, en $<10\%$, $10-30\%$ en $>30\%$ voor de Westerschelde. Deze categorieën zijn vastgesteld op basis van een ongeveer gelijke verdeling van het aantal monsterpunten over deze indelingsklassen.

Bodemdynamiek

De dynamiek van een monsterpunt is afgelezen uit geomorfologische karteringen. Bij deze karteringen is onderscheid gemaakt tussen hoogdynamische en laagdynamische gebieden, en binnen de laagdynamische gebieden is weer een onderverdeling in slibrijk en slibarm gemaakt. Voor beide watersystemen is gebruik gemaakt van karteringen uitgevoerd door de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat, voor de Oosterschelde een kartering uit 1989 (RWS-Meetkundige Dienst, ongepubl.) en voor de Westerschelde karteringen uit 1990 en 1996 (Huijs, 1995; RWS-MD, 1997).

Statistiek

De relaties tussen het chlorofyl-a gehalte in de bovenste cm van het sediment en de hoogteligging (gecategoriseerd), het slibgehalte (gecategoriseerd), de locatie, de bodemdynamiek, de maand (seizoensvariatie) en het jaar (jaarlijkse variatie) zijn, tenzij anders vermeld, bepaald met een één-, twee- of drie-weg ANOVA zonder replicatie. Door het uitvallen van monstercampagnes kunnen er in deze opzet (meerdere) waarden ontbreken. In zo'n geval is dan de volledige categorie waarin een waarde ontbreekt bij de analyse buiten beschouwing gelaten (b.v. een hele jaargang, een maandklasse of een locatie). Waar mogelijk zijn in andere gevallen de gemiddeldes van categorieën statistisch met elkaar vergeleken.

Teneinde het gemiddelde chlorofyl-a gehalte en een standaarddeviatie voor een meetpunt te berekenen is eerst per maand een gemiddelde waarde en een standaarddeviatie over alle jaargangen bepaald. Vervolgens zijn deze twaalf waarden gemiddeld. Bij het bepalen van de standaarddeviatie is uitgegaan van de aanname dat de chlorofyl-a gehalten van één punt in de verschillende maanden niet aan elkaar gecorreleerd zijn. Onder deze aanname is de variantie van een som van waarnemingen gelijk aan de som van de varianties van de afzonderlijke waarnemingen (Burrough, 1986). De variantie van het gemiddelde chlorofyl-a gehalte is dan het gemiddelde van de varianties per maand.

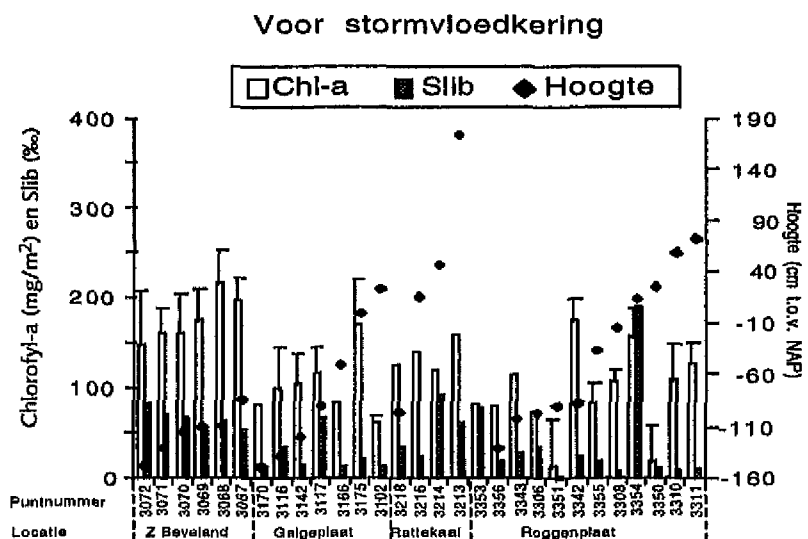
3. Resultaten

Oosterschelde

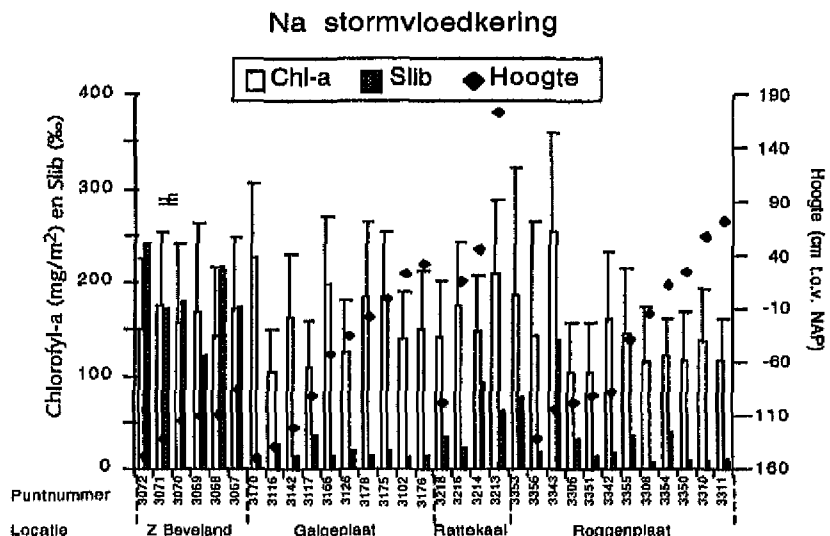
Figuur 3 toont het jaargemiddelde microfytobenthisch chlorofyl-a gehalte (mg m^{-2}) voor de meetpunten in de Oosterschelde vóór de stormvloedkering (A) en ná de stormvloedkering (B). Tevens zijn in dezelfde grafieken de gemiddelde hoogteligging en het gemiddelde slibgehalte van de meetpunten over de monsterperiode weergegeven. De gegevens laten slechts voor het Verdrongen Land van Zuid-Beveland vóór de stormvloedkering een zwakke, maar significant positieve relatie zien tussen het gemeten chlorofyl-a (mg m^{-2}) en de hoogteligging van de monsterpunten (Figuur 3A; lineaire regressie, $p < 0,05$). Op de andere locaties is er geen aantoonbaar verband met de hoogte ($p > 0,05$). Ook bestaat er binnen een locatie geen aantoonbaar verband tussen het slibgehalte en het chlorofyl-a of tussen de (hydro)dynamiek en het chlorofyl-a. Wanneer de vier locaties onderling worden vergeleken kan er in de periode vóór de

Figuur 3a.

Gemiddeld chlorofyl-a gehalte (mg m^{-2} ; witte staafjes + 1 sd), gemiddeld slibgehalte (% (l) fractie < 63 μm ; grijze staafjes) en de gemiddelde hoogteligging (cm t.o.v. NAP; zwarte punten) voor de verschillende monsterpunten in de Oosterschelde voor (A) en na (B) de bouw van de stormvloedkering. In tabel 2 is voor de verschillende monsterpunten aangegeven of het punt in 1989 een hoog- (H) of een laagdynamisch (L) karakter heeft.



Figuur 3b

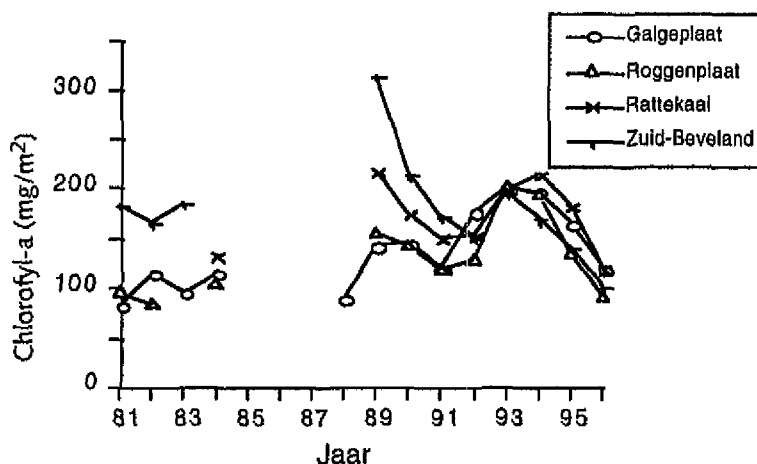


stormvloedkering nog wel een verband worden gelegd tussen het chlorofyl-a - en het slibgehalte van het sediment ($p < 0.05$). In de periode ná de stormvloedkering is er nog wel een verschil in slibgehalte tussen de verschillende locaties ($p < 0.05$), maar het verschil in chlorofyl-a gehalte is verdwenen. Een verband tussen het chlorofyl-a - en het slibgehalte van het sediment berust dus waarschijnlijk op een niet causale relatie.

Figuur 4 toont het verloop van het jaargemiddelde chlorofyl-a gehalte over de totale meetperiode. Ondanks de diepere ligging van de meetpunten op het Verdrongen Land van Zuid-Beveland (gemiddeld NAP -1,2 m t.o.v. NAP -0,8 m, NAP -0,6 m en NAP +0,35 m op respectievelijk de Roggenplaat, de Galgeplaat en Rattekaai) is het chlorofyl-a gehalte hier vóór de stormvloedkering significant hoger dan op de drie andere locaties ($p < 0.05$). Het chlorofyl-a gehalte op Rattekaai is vóór de stormvloedkering bovendien significant hoger dan op de Galgeplaat ($p < 0.05$). De beide platen vertonen een overeenkomstig verloop ($p > 0.05$). Ook na het gereedkomen van de stormvloedkering in 1987 is er aanvankelijk nog een hogere diatomeeënbiomassa in het oostelijk deel van de Oosterschelde (Verdrongen Land en Rattekaai). In 1989 worden zelfs extreem hoge waarden waargenomen. Volgens De Jong (in Van Berchum & Wattel, 1997) zijn de chlorofyl-a waarden in de winterperiode van dit jaar echter niet representatief voor de biomassa aan benthische diatomeeën alleen. Naar alle waarschijnlijkheid zijn deze monsters gecontamineerd geweest met draadwieren. Om niet tot verkeerde conclusies te komen is dit jaar niet meegenomen in de statistische analyses van het verloop van de diatomeeënbiomassa's op Rattekaai en het Verdrongen Land. Enkele jaren na het gereedkomen van de stormvloedkering is er geen verschil meer tussen de locaties.

Bij nadere beschouwing van de afzonderlijke monsterpunten voor en na de stormvloedkering, waarbij ook een onderscheid in seizoen is gemaakt (Tabel 2), blijkt dat niet alle punten zich door de jaren heen hetzelfde hebben gedragen. De punten die een significante verhoging van het chlorofyl-a gehalte laten zien zijn op één uitzondering na volgens een geomorfologische kaart uit 1989 alle geclassificeerd als hoogdynamisch ($p < 0.05$; Figuur 3; Tabel 2). Analyse van het effect van de bouw van de stormvloedkering op de dynamiek laat zien dat het chlorofyl-a gehalte op de hoogdynamische locaties vóór 1985 significant ($p < 0.05$) lager is dan op zowel de hoog- als de laagdynamische locaties ná 1985 (bij analyse zijn monsterpunten genest binnen dynamiek). Het lijkt er tevens op dat het vooral de lager gelegen punten zijn die een verhoging vertonen.

Figuur 4. Verloop van het jaargemiddeld chlorofyl-a gehalte (mg m^{-2}) van alle monsterpunten in de Oosterschelde per locatie vanaf 1981 t/m 1996.



De chlorofyldata van de vier onderzoekslocaties laten een geringe seizoensvariatie zien (Figuur 5). Deze variatie is bovendien niet consistent met de wisseling van de seizoenen. Variantie-analyse geeft

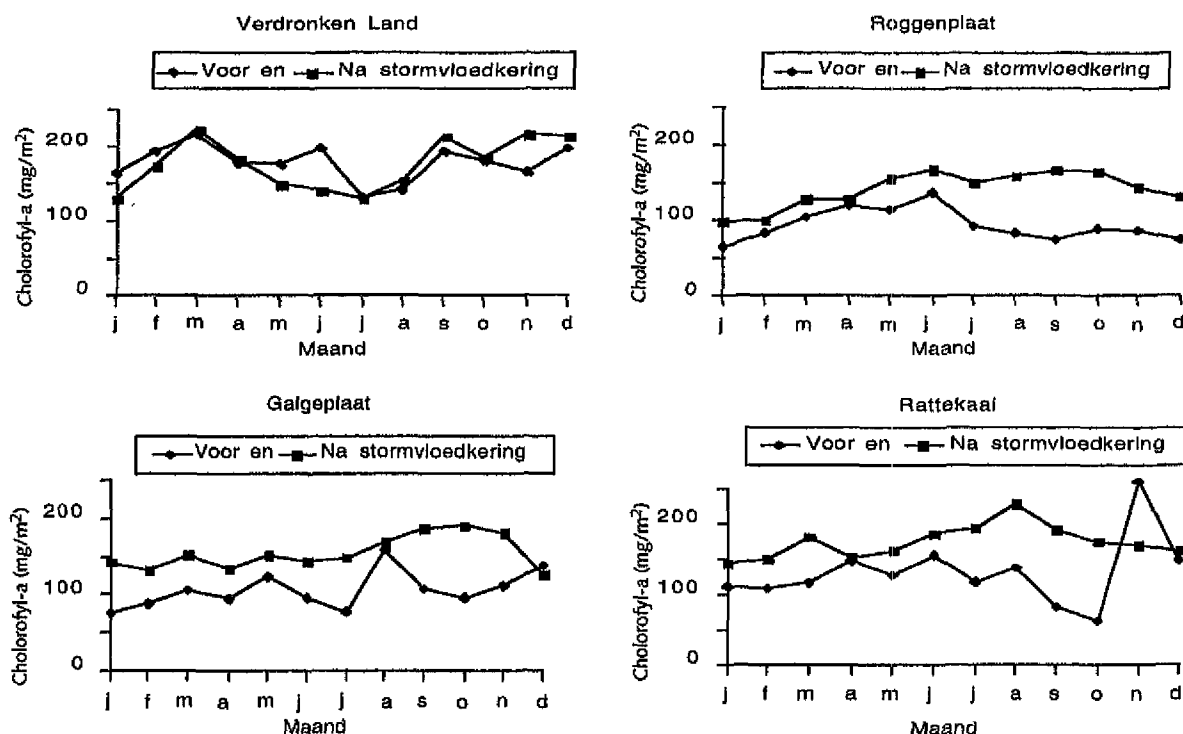
Tabel 2.

Chlorofyl-a gehalten in de bovenste cm van het sediment op de verschillende locaties in de Oosterschelde. De waarden geven het gemiddelde weer in de zomer (april t/m september) en de winter (oktober t/m maart) in de periode voor en na 1985. Een significant verschil tussen voor en na 1985 (ANOVA) is aangegeven (s).

Locatie	Punt	Dynamiek	Hoogte (m NAP)	Chlorofyl-a (mg m ⁻²)				
				Winter		Zomer		
				Voor 1985	Na 1985	Voor 1985	Na 1985	
Verdronken Land	3067	L	-0,85	207	180	175	182	
	3068	L	-1,09	241	161	184	142	
	3069	L	-1,10	175	205	168	167	
	3070	L	-1,15	166	199	156	158	
	3071	L	-1,32	155	225	155	161	
	3072	L	-1,48	147	199	138	168	
Galgeplaat	3102	L	0,23	51	131	s 51	136	s
	3116	H	-1,39	109	111	92	97	
	3117	H	-0,91	77	106	125	114	
	3126	H	-0,35		122		133	
	3142	H	-1,20	99	163	s 110	160	s
	3166	H	-0,52	80	187	s 84	187	s
	3170	H	-1,49	61	222	s98	216	s
	3175	H	-0,01	170	180	166	178	
	3176	L			148		147	
Rattekaai	3178	H	-0,17		164		197	
	3213	L	1,74	162	200	151	230	
	3214	L	0,47	117	147	120	154	
	3215	L		119		119		
	3216	L	0,16	139	172	137	178	
	3217	L		143		120		
	3218	H	-0,97	123	140	124	178	
	3306	H	-0,97	63	93	82	111	
	3307			53		97		
Roggenplaat	3308	H	-0,15	87	104	127	126	
	3309			127		134		
	3310	L	0,58	107	120	107	144	
	3311	L	0,73	105	114	144	112	
	3342	H	-0,88	177	133	179	196	
	3343	H	-1,04	128	255	s 93	245	s
	3350	H	0,25	23	119	s 20	126	s
	3351	H	-0,91	11	101	s 14	120	s
	3353	H	-5,25	49	166	s 102	190	s
	3354	H	0,13	121	109	150	138	
	3355	H	-0,38	71	105	s 87	180	s
	3356	H	-1,32	75	129	s 78	171	s

aan dat er geen significante verschillen zijn tussen de 'winterperiode' (maanden oktober t/m maart) en de 'zomerperiode' (maanden april t/m september). Kennelijk is het chlorofyl-a gehalte niet of slechts in geringe mate bepaald door temperatuur of lichtinstraling.

Figuur 5.
Verloop van het maandgemiddelde chlorofyl-a gehalte (mg m^{-2}) van alle locaties in de Oosterschelde vanaf 1981 t/m 1996.



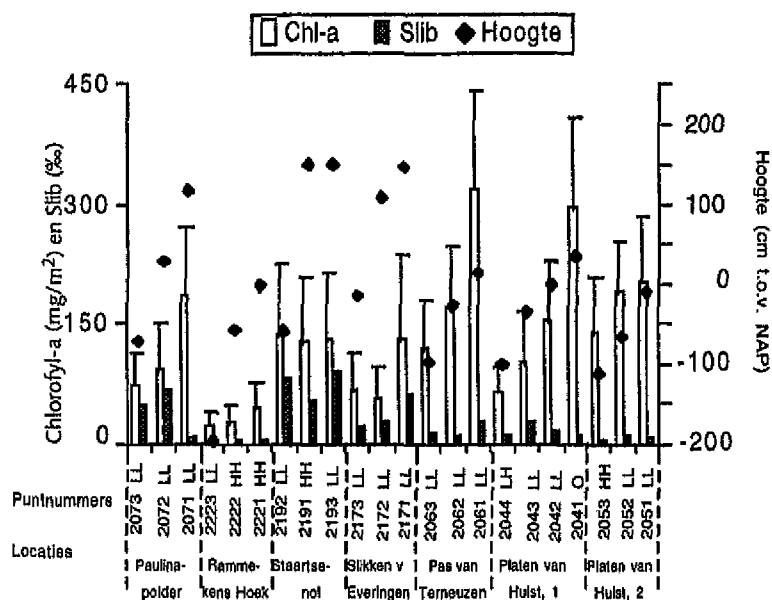
Westerschelde

In de Westerschelde is er, in tegenstelling tot de Oosterschelde, binnen de onderzochte locaties een duidelijke relatie tussen de hoogteligging van de meetpunten en het jaargemiddelde benthisch chlorofyl-a gehalte ($p < 0.05$). Alleen op monsterpunten binnen een locatie met een hoge of sterk wisselende dynamiek kan het zijn dat hoger gelegen punten toch een lager chlorofyl-a gehalte vertonen (Figuur 6). Wanneer locaties echter onderling worden vergeleken blijkt de hoogteligging niet de enige omgevingsfactor te zijn die het gehalte aan chlorofyl-a verklaart. Als de locaties worden verdeeld in 'West' en 'Oost' en in 'Plaat' en 'Slik' (Tabel 1), dan blijkt dat de slikken in het westen een significant hoger benthisch chlorofyl-a gehalte hebben dan de overige categorieën ($p < 0.05$), terwijl de gemiddelde hoogte van de monsterpunten op de slikken-west beduidend lager is: NAP -0,15 m t.o.v. NAP +0,12, +0,51 en +0,68 m op respectievelijk platen-west, slikken-oost en platen-oost; (Figuur 7). Uit deze figuur blijkt ook dat het jaargemiddelde chlorofyl-a gehalte in de Westerschelde fluctuaties vertoont. Deze jaarlijkse fluctuaties zijn vergelijkbaar met de fluctuaties die zich in de Oosterschelde van jaar tot jaar voordoen (Figuur 3).

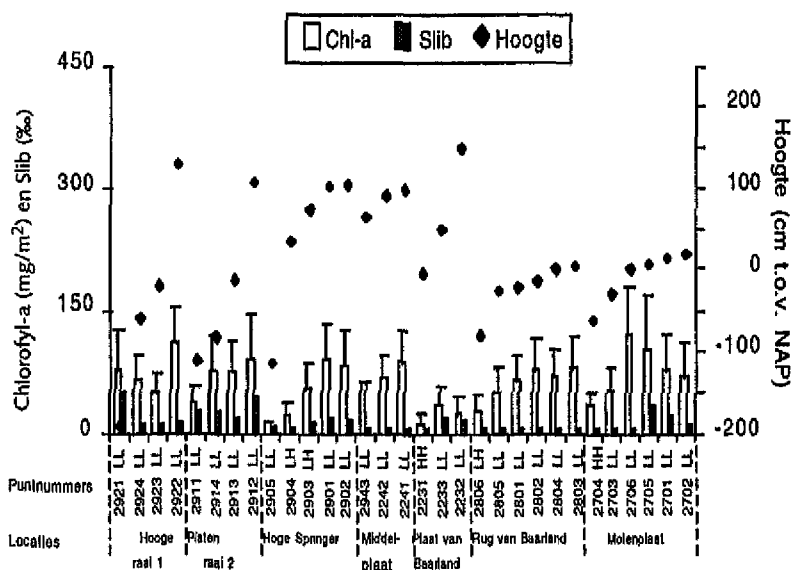
De seizoensvariatie van chlorofyl-a is in de Westerschelde duidelijk anders dan in de Oosterschelde (Figuur 8, bijlage 1-27). In de Westerschelde is in de meeste gevallen een bloei waar te nemen in voorjaar/zomer, terwijl in de wintermaanden het chlorofyl-a gehalte over het algemeen laag is (bv. Figuur 8A). Een aantal locaties in de Westerschelde (bv. Figuur 8B) vertoont echter duidelijke overeenkomsten met het jaarverloop in de Oosterschelde, namelijk gedurende het hele jaar hoge waarden zonder duidelijk seizoensverloop. Daarnaast zijn er locaties waar het chlorofyl-a gehalte het hele jaar door erg laag is en waar ook geen duidelijke seizoensdynamiek is waar te nemen (bv. Fig 8C).

Figuur 6a

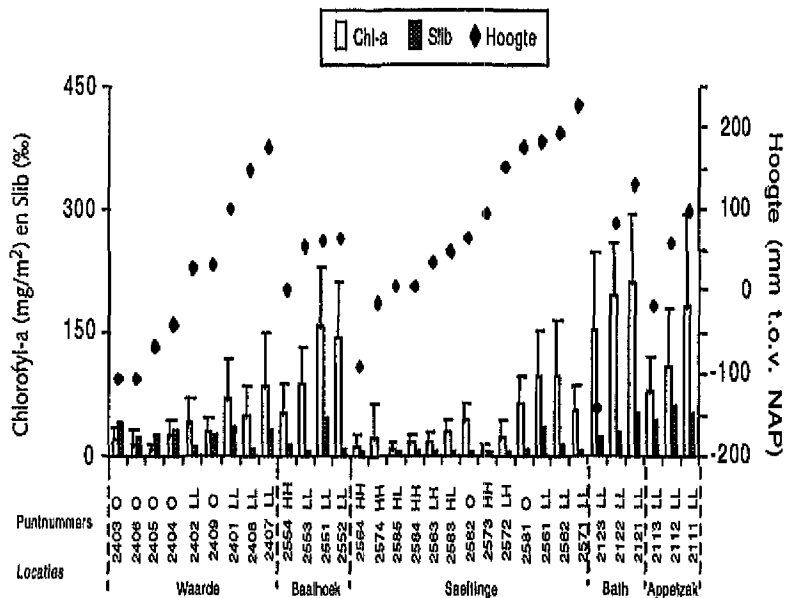
Gemiddeld chlorofyl-a gehalte (mg m^{-2} ; witte staafjes + 1 sd), gemiddeld slibgehalte (% (l) fractie < 63 μm ; grijze staafjes) en de gemiddelde hoogteligging (cm t.o.v. NAP; zwarte punten) voor de verschillende monsterpunten in de Westerschelde over de volledige periode 1988 - 1996; A: Slikken-West, B: Platen-West, C: Slikken-Oost en D: Platen-Oost. Achter de nummers van de monsterpunten is aangegeven of het punt een hoog- (H) of een laagdynamisch (L) karakter heeft. De eerste letter verwijst naar de dynamiek in 1990, de tweede letter naar de dynamiek in 1996; O: dynamiek onbekend.



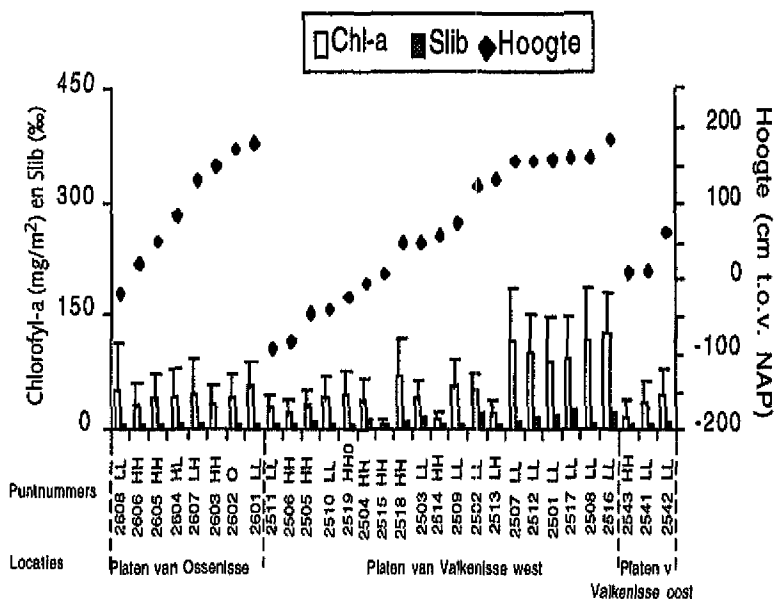
Figuur 6b



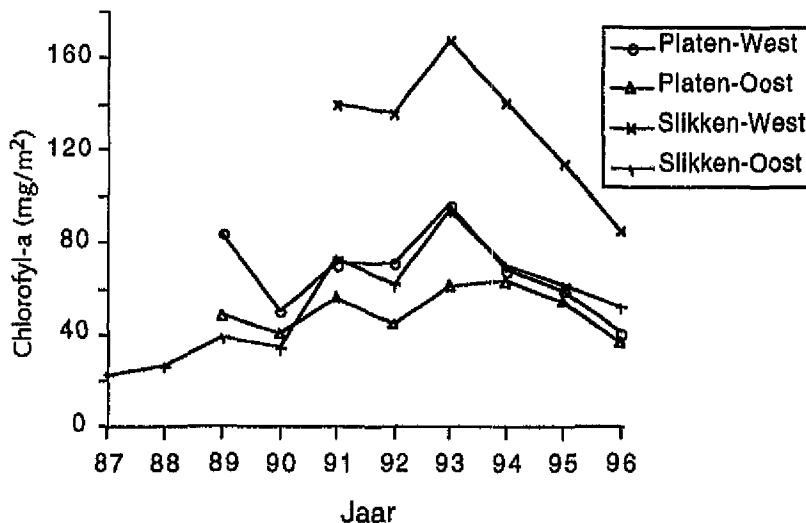
Figuur 6c



Figuur 6d

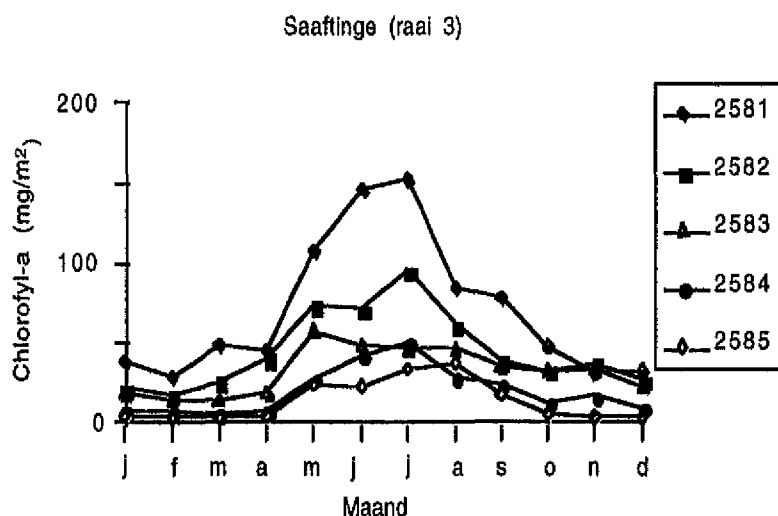


Figuur 7.
Verloop van het jaargemiddeld chlorofyl-a
gehalte (mg m^{-2}) van alle monsterpunten
in de Westerschelde vanaf 1988 t/m 1996,
ingedeeld in 4 gebieden: Slikken West,
Platen West, Slikken Oost en Platen Oost.

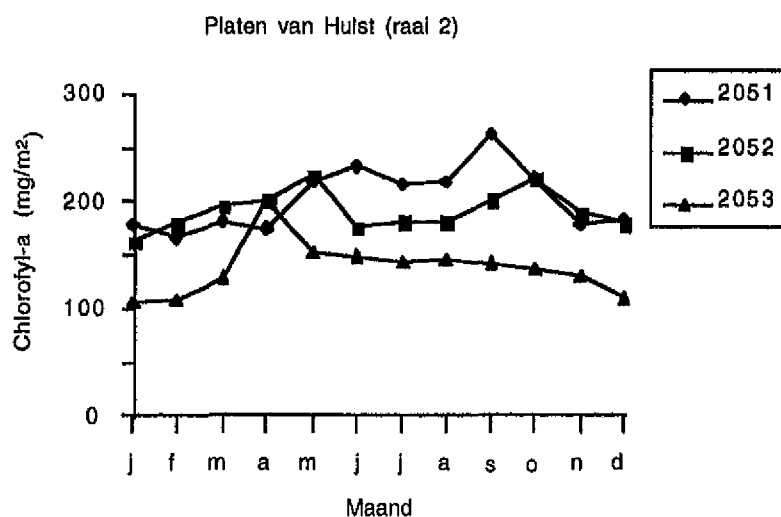


Figuur 8a.

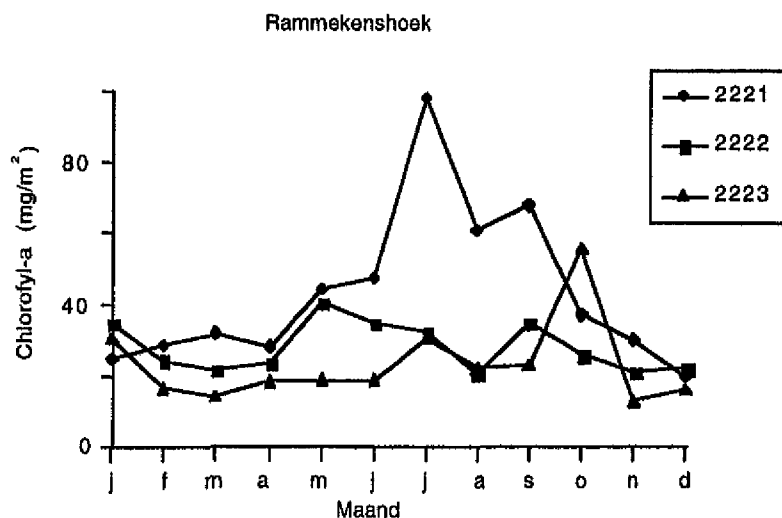
Verloop van het maandgemiddelde chlorofyl-a gehalte (mg m^{-2}) op enkele voorbeeldlocaties in de Westerschelde vanaf 1988 t/m 1996; A: een duidelijk seizoensverloop, B: een min of meer constant hoog gehalte, C: een min of meer constant laag gehalte. In bijlage 1 t/m 27 is het verloop voor alle locaties en punten in de Westerschelde opgenomen.



Figuur 8b



Figuur 8c



4. Discussie

De resultaten van de chlorofyl-a monitoring van de bovenste cm van het sediment in de Ooster- en Westerschelde vertonen overeenkomsten en verschillen. Ook de omgevingsfactoren die op beide watersystemen inwerken vertonen overeenkomsten en verschillen. Zo zal bijvoorbeeld lichtinstraling en temperatuur tijdens droogval voor de beide systemen nagenoeg gelijk zijn, maar kunnen omstandigheden zoals stroomsnelheid, waterhelderheid en slibgehalte duidelijk verschillen. Door deze overeenkomsten en verschillen naast elkaar te zetten kan een beeld gekregen worden van de factoren die belangrijk zijn voor het bepalen van het voorkomen van benthische diatomeeën.

Jaarlijkse variatie

De resultaten van de Oosterschelde laten van jaar tot jaar aanzienlijke verschillen zien in het jaargemiddelde chlorofyl-a gehalte (Figuur 4). Aanvankelijk zou geconcludeerd kunnen worden dat door de komst van de stormvloedkering, waardoor het water helderder is geworden en de hydrodynamiek is verminderd, de benthische diatomeeënbiomassa is toegenomen (De Jong et al., 1994). De laatste jaren laten echter weer een sterke daling zien. De jaarlijkse variatie in het chlorofyl-a gehalte in de Westerschelde laat een overeenkomstig verloop zien (Figuur 7). De waarden liggen weliswaar lager, maar het patroon is gelijk: vanaf '87 - '88 een toename tot '93 - '94 en daarna weer een afname. Er is kennelijk een universele sturende factor die dit verloop bepaald. De jaren 1988 t/m 1995 waren gemiddeld gezien warm en zonnig (bron: KNMI weerrapporten). Dit kan een gunstig effect hebben gehad op de diatomeeënproductie, waardoor het chlorofyl-a gehalte kan toenemen (Colijn & Van Buurt, 1975; C. Barranguet, pers. comm.). Deze jaren vallen toevallig precies samen met de hogere chlorofyl-a waarden gemeten na het gereedkomen van de stormvloedkering. De gemiddelde temperatuur in 1996 scoorde volgens het KNMI onder het langjarige gemiddelde. De chlorofyl-a waarden die toen in de Oosterschelde zijn gemeten zijn niet meer verschillend van de waarden die vóór de bouw van de stormvloedkering gemeten zijn ($p > 0.05$). Variantie-analyse geeft aan dat er een significant positieve relatie is van de gemiddelde jaar temperatuur en het jaargemiddeld chlorofyl-a gehalte ($p < 0.05$; $R^2 = 0,412$ en $0,779$ in resp. Ooster- en Westerschelde). Deze relatie is niet voor alle punten gelijk, wat tot uitdrukking komt in een significante interactie tussen monsterpunt en temperatuur. Een deel van de verhoging van het chlorofyl-a gehalte in de Oosterschelde na de bouw van de stormvloedkering kan dus worden verklaard aan de hand van de gemiddeld hogere temperaturen in de jaren '89 - '95. De bouw van de stormvloedkering heeft daarom waarschijnlijk een veel geringer (positief) effect gehad op de benthische diatomeeën dan aanvankelijk werd gedacht (De Jong et al., 1994).

Ook moet de nodige reserve in acht worden genomen bij het vergelijken van het benthisch chlorofyl-a gehalte voor en na de bouw

van de stormvloedkering. Hoewel de monsterpunten wat betreft geografische ligging dezelfde zijn gebleven, zijn ze door de grote geomorfologische veranderingen van karakter veranderd en als zodanig eigenlijk niet meer met elkaar te vergelijken. Tenslotte maakt ook het gebruik van twee verschillende analysetechnieken een vergelijking door middel van variantie-analyse moeilijk.

Toch heeft zich in de Oosterschelde een verandering voorgedaan die wel zonder terughoudendheid kan worden vastgesteld. Het verschil tussen de monsterpunten op het Verdrongen Land (Kom) en op de platen (Mond en Midden) is verdwenen. Dit zou het gevolg kunnen zijn van een afname in de hydrodynamiek van de monsterpunten op de platen en een verbetering van het onderwaterlichtklimaat, beide als gevolg van de komst van de stormvloedkering. De waarden van het chlorofyl-a gehalte, die vóór de bouw van de stormvloedkering het gemiddelde op de platen naar beneden haalden, liggen tegenwoordig op een dusdanig niveau dat er gemiddeld gezien geen verschil meer bestaat tussen slik en plaat. Maar ook in de Kom heeft zich een *aanzienlijke en - zeker proportioneel gezien - in veel gevallen meer* uitgesproken verhoging van de helderheid van het water en verlaging van de stroomsnelheid voorgedaan (Mulder & Louters, 1994; Nienhuis & Smaal, 1994; Wetsteyn & Kromkamp, 1994; Ten Brinke et al., 1994). Men zou verwachten dat dit ook hier een positief effect op het bentisch chlorofyl-a gehalte moet hebben gehad. Wanneer de data van het Verdrongen Land vóór de bouw van de stormvloedkering worden beschouwd, dan blijkt er inderdaad een zwakke, maar *significant positieve relatie te bestaan tussen plotheogte en chlorofyl-a gehalte* (Figuur 3A). Ná het gereedkomen van de stormvloedkering is die relatie verdwenen. Kennelijk is in de periode vóór de stormvloedkering licht nog een beperkende factor op de dieper gelegen locaties. Het feit dat het verschil tussen voor en na de stormvloedkering zo gering is kan worden verklaard door het volgende. De monsterlocaties in de Kom (Verdrongen Land en Rattekaai) zijn op één uitzondering na in 1989 alle geclassificeerd als laagdynamisch (Figuur 3). Ook vóór de bouw van de stormvloedkering was het Verdrongen Land beschermd door een 'rif' van oude oesterputten (De Jong et al., 1994) en, in verhouding tot de platen, al een uitgesproken laagdynamisch gebied. Kennelijk is een lage dynamiek van het systeem dus zeer bevorderlijk voor de ontwikkeling van hogere dichtheden bentische diatomeeën op de slikken. Een verlaging van de stroomsnelheid of een verhoging van de helderheid van het water kan hierdoor aan dit soort laagdynamische gebieden misschien nog maar een geringe extra positieve bijdrage leveren.

Uit de resultaten blijkt dat het slibgehalte niet een factor is die van primair belang is voor het chlorofyl-a gehalte van het sediment. Vóór de komst van de stormvloedkering bestond er wel een relatie tussen slibgehalte en chlorofyl-a. Ná de bouw van de stormvloedkering is die relatie verdwenen. Het slibgehalte wordt beschouwd als een maat voor de dynamiek van het systeem. Die dynamiek is abrupt veranderd na het gereedkomen van de stormvloedkering. Het slibgehalte heeft zich wellicht nog niet volledig kunnen aanpassen aan de nieuw ontstane situatie. Dit impliceert dat het slibgehalte in de Oosterschelde op dit moment niet veel zegt over dynamiek. De relatie tussen slibgehalte en het bentische chlorofyl-a gehalte is dus niet een causale relatie, maar een afgeleide van de dynamiek van de locatie. Dit wil overigens niet zeggen dat er daarom ook geen relatie bestaat tussen de samenstelling van bentische diatomeeën populaties en de samenstelling van het sediment (zie b.v. Underwood & Paterson, 1993a, b).

Locale variatie: hoogteligging en licht

Alle locaties in de Westerschelde vertonen een significante relatie tussen hoogteligging van de monsterpunten en het chlorofyl-a gehalte in de bovenste cm van de bodem. Alleen wanneer een hooggelegen locatie erg dynamisch is, is er een uitzondering op deze regel. Door de troebelheid van het Westerscheldewater is primaire productie van benthische diatomeeën beperkt tot de periode van droogval. Op een hooggelegen punt, waar de productieve periode langer is dan op een laaggelegen punt, kan zich dus een hoger chlorofyl-a gehalte instellen. Vergelijkbare resultaten zijn gevonden in het Eems estuarium door Colijn & De Jonge (1984), in het Westerschelde estuarium door De Jong & De Jonge (1995) en in de Oosterschelde door De Jong et al. (1994). In de Oosterschelde is tegenwoordig een relatie met hoogteligging afwezig, hetgeen erop duidt dat wellicht ook na inundatie van de monsterpunten de lichthoeveelheid voor benthische diatomeeën nog steeds genoeg is om tot primaire productie te komen. Door gebruik te maken van helderheidsmetingen aan de waterkolom met behulp van de zgn. 'secchi-schijf' kan via een theoretische benadering een globale relatie tussen hoogteligging en de productie van benthische diatomeeën voor verschillende situaties worden berekend. In intermezzo I staat dit beschreven voor de Oosterschelde in 1983 en 1996 en voor de Westerschelde in 1993.

INTERMEZZO I

Met de formule

$$I_d = I_0 e^{-kd}$$

waarin:

I_d = de lichtintensiteit op diepte d ($\mu E m^{-2} s^{-1}$),

I_0 = de lichtintensiteit aan het wateroppervlak ($\mu E m^{-2} s^{-1}$),

k = de lichtuitdovingscoëfficiënt (m^{-1}) en

d = de diepte (m),

kan de lichtintensiteit op verschillende hoogtes in de waterkolom worden berekend (De Jong & Meulstee, 1989).

Met behulp van secchidisk metingen kan de uitdovingscoëfficiënt worden bepaald: $k = 1,6/\text{secchidiepte}$ in m (De Jong & De Jonge, 1989). Voor het doorzicht (secchidiepte) van het Oosterscheldewater voor en na de stormvloedkering is gebruik gemaakt van metingen gedaan op verschillende plaatsen in de Monding, het Midden en de Kom in 1983 en in 1996. Voor het Westerscheldewater zijn alle metingen gedaan in 1993 als standaard gebruikt. De waarden van verschillende meetlocaties in dezelfde maand zijn gemiddeld, waarmee voor de Oosterschelde in 1983 en 1996 en de Westerschelde in 1993 voor elke maand een k is bepaald. Tevens is voor elke maand een I_0 bepaald door het gemiddelde dagtotaal van de lichtinstraling te delen door het gemiddeld aantal uren daglicht in die maand. Hiervoor is gebruik gemaakt van de lichtinstralingsgegevens voor Vlissingen over de jaren 1983 t/m 1996 (bron: KNMI; $\mu E cm^{-2}$). De I_0 in een bepaalde maand is voor alle situaties gelijk.

Vervolgens is per maand voor een waterkolom van 10 meter hoogte om de 10 cm de I_d bepaald. De I_d is onder andere afhankelijk van de waarde van k en daarom voor de drie situaties (Oosterschelde 1983, 1996 en Westerschelde) niet gelijk. Daarna is voor gemiddeld tij berekend hoe lang de bodem op een bepaalde hoogte t.o.v. NAP is overspoeld door een waterkolom van een bepaalde diepte (de 'bodemdiepteduur'). Hierbij is er vanuit gegaan dat er twee getijcycli in een etmaal vallen en dat de getijbewegingen een perfecte sinus volgen. Voor de Westerschelde en de Oosterschelde in 1983 is een getijamplitude van 2 m in acht genomen en voor de Oosterschelde in 1996 van 1,8 m. Tenslotte is de bodemdiepteduur vermenigvuldigd met het gedeelte van het etmaal dat de lichtperiode duurt (b.v. voor januari met 8,2/24 en voor juni met 16,7/24; dit is voor de drie verschillende situaties weer gelijk).

Door gebruik te maken van een PI-curve (deze beschrijft de relatie tussen lichtinstraling en primaire productie) voor benthische diatomeeën uit de Oosterschelde (De Jong, 1990) en de gemiddelde lichtintensiteit op een bepaalde diepte t.o.v. NAP ($\mu E m^{-2} s^{-1}$; berekend volgens de hierboven beschreven methode) kan voor elke maand een curve voor de daggemiddelde bruto C-productie van benthische diatomeeën als functie van de hoogteligging van het sediment worden berekend. Figuur 9 A toont de gemiddelde bruto jaarproductie (het resultaat van de som van de twaalf maand-curves) in relatie tot de diepte voor de Oosterschelde in 1983 en in 1996, en voor de Westerschelde in 1993, uitgedrukt in $g C g C^{-1} j^{-1}$. Door deze curves te vermenigvuldigen met de actueel aanwezige biomassa aan benthische diatomeeën ($g C m^{-2}$) op de verschillende hoogtes t.o.v. NAP, kunnen de productiecurves worden uitgedrukt in $g C m^{-2} j^{-1}$.

Om de gemiddelde bruto jaarproductie in $g C g C^{-1} j^{-1}$ om te rekenen naar productie in $g C m^{-2} j^{-1}$ is een omrekeningsfactor bepaald. Voor het bepalen van deze

omrekeningsfactor (zijnde de verhouding tussen de berekende gemiddelde bruto jaarproductie per g C en de jaargemiddelde bruto jaarproductie per m^{-2}) zijn de chlorofyl-a gegevens uit het Oosterschelde intergetijdengebied van de jaren 1991 t/m 1996 als referentie gebruikt. Er is hierbij vanuit gegaan dat op verschillende plaatsen in het intergetijdengebied van de Oosterschelde in deze periode geen verschillen in diatomeeënbiomassa en -productie bestaan die zijn veroorzaakt door hoogteligging. De gemiddelde chlorofyl-a concentratie in het intergetijdengebied in de Oosterschelde vanaf 1991 is 153 mg m^{-2} . Voor het omrekenen van het gemiddelde chlorofyl-a gehalte (mg m^{-2}) naar productie ($\text{g C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$) is gebruik gemaakt van de relatie

$$P = 1,13B + 8,23$$

waarin:

P = bruto primaire productie ($\text{g C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$) en

B = jaargemiddelde biomassa chlorofyl-a ($\text{mg m}^{-2} \text{ j}^{-1}$)

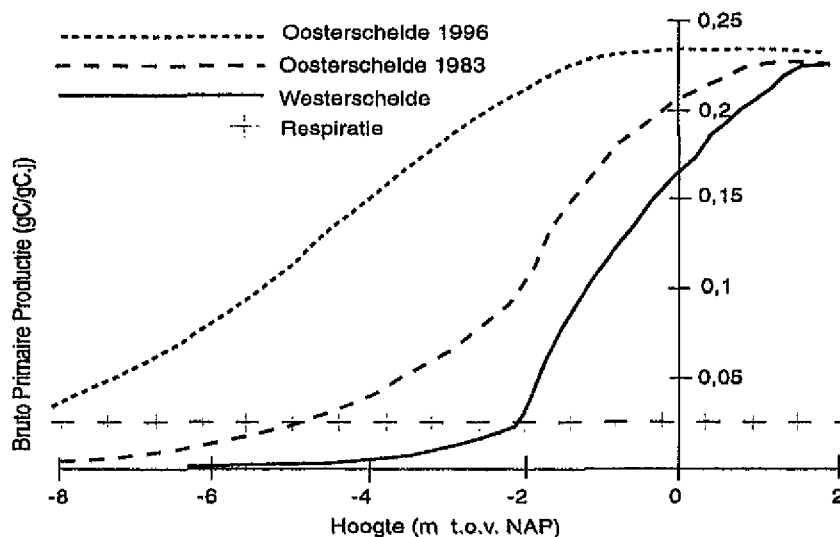
(De Jong et al, 1994).

Hieruit volgt een berekende jaargemiddelde bruto primaire productie van benthische diatomeeën in het intergetijdengebied van de Oosterschelde van $181 \text{ g C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$. Door deze waarde te koppelen aan de gemiddelde bruto jaarproductie van $0,23 \text{ g C g C}^{-1} \text{ j}^{-1}$ in het intergetijdengebied van de Oosterschelde in 1996 (Figuur 9 A, Oosterschelde 1996 tussen NAP -1,8 m en NAP +1,8 m) wordt een omrekeningsfactor van 782 verkregen.

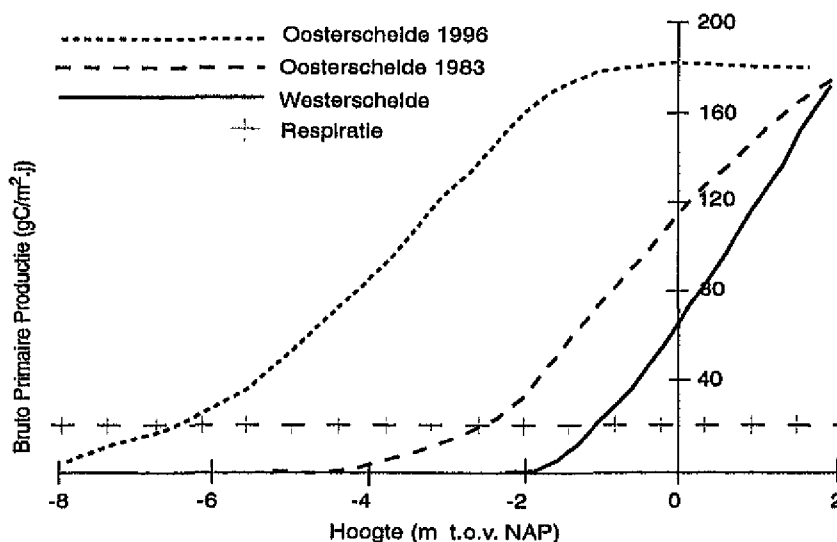
In Figuur 9 A wordt de relatie tussen productie per biomassa-eenheid benthische diatomeeën (g C) en diepte (= licht) weergegeven. De biomassa van de benthische diatomeeën neemt echter met de diepte af. Simpelweg vermenigvuldigen van de curves met deze factor 782 om de productie van benthische diatomeeën per m^{-2} te krijgen is niet voldoende. Deze omrekeningsfactor moet ook nog worden vermenigvuldigd met de relatie tussen biomassa en diepteligging. Aangezien de omrekeningsfactor 782 is vastgesteld aan de hand van de maximale waarden in het intergetijdengebied van de Oosterschelde in 1996 wordt de biomassa in dit gebied op 100% gesteld. Deze 100% biomassa geldt voor de Oosterschelde 1996 voor het volledige gebied tussen NAP -1,8 m en NAP + 1,8 m, maar voor de Oosterschelde 1983 en de Westerschelde wordt 100% biomassa slechts op NAP +2 m bereikt. Onder de laagwaterlijn in de Westerschelde vindt geen productie van benthische diatomeeën meer plaats. Het lichtniveau behorend bij een hoogteligging van NAP -2 m in de Westerschelde is daarom gehanteerd als ondergrens voor het voorkomen van benthische diatomeeën (0% biomassa; bruto productie = respiratie; netto productie = 0). Uit de horizontale lijn die dit niveau in Figuur 9 A aangeeft (respiratie) is vervolgens ook de ondergrens van het voorkomen van benthische diatomeeën in de Oosterschelde 1983 en 1996 afgelezen, respectievelijk NAP -5 m en NAP -10 m. Vervolgens is tussen deze uitersten een lineaire afname in de biomassa van 100% naar 0% verondersteld; dwz. voor de Westerschelde tussen NAP +2 m en NAP -2 m, voor de Oosterschelde 1983 tussen NAP +2 m en NAP -5 m en voor de Oosterschelde 1996 tussen NAP -1,8 m en NAP -10 m. Door de verschillende curves uit Figuur 9 A te vermenigvuldigen met de combinatie van deze relatie en de omrekeningsfactor wordt uiteindelijk de productie van benthische diatomeeën tegen de diepte verkregen in $\text{g C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ (Figuur 9 B)

De berekende relatie tussen hoogteligging en de productie van benthische diatomeeën dient met voorzichtigheid te worden geïnterpreteerd. Zo zijn er een aantal aannames gedaan met betrekking tot het verloop van de biomassa van benthische diatomeeën en de diepte. Ook is er geen rekening gehouden met uitdroging tijdens laagwater, waardoor gasuitwisseling en nutriëntentransport afnemen, hetgeen een negatief effect heeft op de productie. Hetzelfde geldt voor diffusielimitatie. Er vindt ophoping plaats van fotosynthese producten, waardoor fotorespiratie een grote verliespost wordt. (De Winder, pers. comm. 1998). Uitdroging en diffusielimitatie werken met name negatief in de hogere zones van het intergetijdengebied, wat juist hier kan leiden tot een overschatting van de productie. Toch demonstreert het resultaat vrij aardig wat de consequenties zijn voor de productie van benthische diatomeeën in de

Figuur 9a
Bruto primaire productie microfytobenthos in relatie tot plot hoogte (mm t.o.v. NAP). A: gemiddelde bruto jaarproductie in $\text{gC gC}^{-1} \text{ j}^{-1}$. De stippe lijn representeert het niveau van de respiratie van microfytobenthos. B: gemiddelde jaarproductie in $\text{gC m}^{-2} \text{ j}^{-1}$. Voor de relatie tussen A en B zie Intermezzo I.



Figuur 9b

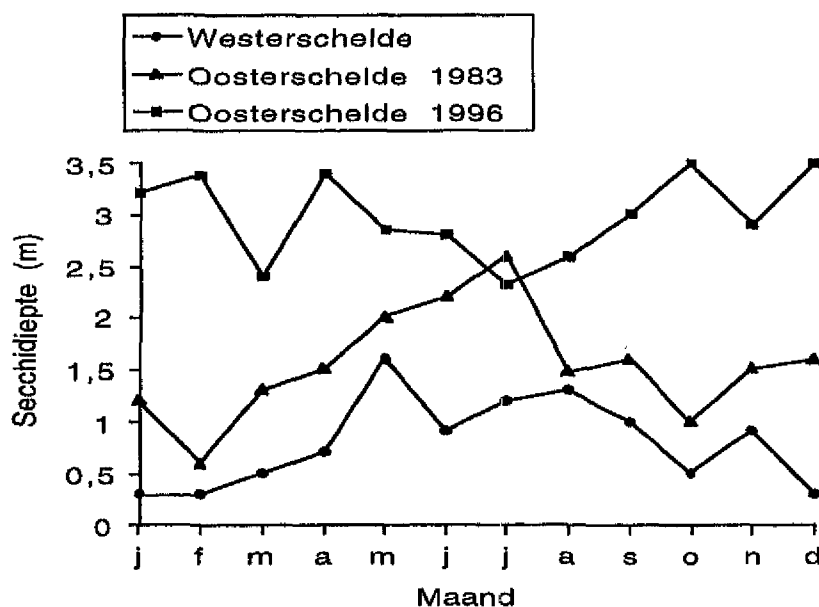


verschillende situaties.

De productie versus hoogte - curve voor de Westerschelde ligt beduidend lager dan de curves voor de Oosterschelde in 1983 en in 1996 (Figuur 9 B). Dit is toe te schrijven aan het altijd veel troebeler water in de Westerschelde (Figuur 10). Opvallender is het grote

verschil tussen de curves van de Oosterschelde in 1983 en in 1996. De secchidisk waarden die in 1996 in de Oosterschelde zijn gemeten zijn beduidend hoger dan die in 1983 (Figuur 10): het water is over het gehele jaar genomen veel helderder (zie ook: Nienhuis en Smaal, 1994; Van Berchum & Wattel, 1997). Uit het verschil tussen de beide curves valt af te leiden dat door een verbetering van het onderwaterlichtklimaat benthische diatomeeën theoretisch tot op grotere diepte in het water kunnen voorkomen, en ook dat het verschil in primaire productie tussen locaties op verschillende hoogtes in het intergetijdengebied kleiner wordt: de curve voor de Oosterschelde 1996 toont praktisch geen verschil tussen locaties helemaal boven in het intergetijdengebied (NAP +1,8 m) en locaties op de laagwaterlijn (NAP -1,8 m; Figuur 9 B). Dit zou een verklaring kunnen zijn voor het feit dat er tegenwoordig in de Oosterschelde geen relatie meer is te vinden tussen hoogteligging en benthisch chlorofyl-a gehalte (Figuur 3 B). Uit deze theoretische benadering en de gevonden verschillen tussen Wester- en Oosterschelde blijkt, dat behalve hydrodynamiek ook de troebelheid van het water, en dus eigenlijk de lichtbeschikbaarheid, een belangrijke factor is, die het voorkomen van benthische diatomeeën bepaalt.

Figuur 10. Secchidisk waarden (m): gemiddeld doorzicht per maand voor de Westerschelde (doorgetrokken lijn), de Oosterschelde in 1983 (onderbroken lijn) en de Oosterschelde in 1996 (stippellijn). (bron: MWTL)



Seizoensvariatie: hydrodynamiek

In gematigde streken, zoals in Nederland, wordt seizoensvariatie in de natuur voornamelijk bepaald door licht en temperatuur (b.v. Duarte 1989). Op de meeste locaties in de Westerschelde vertoont het chlorofyl-a gehalte in de bovenste cm van het sediment duidelijke variaties die overeenkomen met de natuurlijke seizoenspatronen in licht en temperatuur. Twee locaties (bijl. 11, 26) en diverse hoger gelegen punten op andere locaties (b.v. bijl. 9, 10, 23) vormen hierop echter een uitzondering en ook in de Oosterschelde is er geen duidelijke seizoensvariatie waar te nemen. Het ligt dus niet voor de hand de waargenomen seizoensvariatie in de Westerschelde toe te schrijven aan licht en/of temperatuur.

Het zou echter kunnen dat het optreden van seizoensvariatie in diatomeeënbiomassa door veranderingen in lichtinstraling en

temperatuur afhankelijk is van de soortensamenstelling van de diatomeeënpopulatie op een bepaalde locatie. Benthische diatomeeën kunnen worden ingedeeld in twee groepen, de epipsammische diatomeeën, gekarakteriseerd door geen of een geringe mobiliteit in het sediment, en de epipelische diatomeeën, die zeer mobiel zijn en voornamelijk voorkomen in de bovenlaag van het sediment. Informatie over de samenstelling van diatomeeënpopulaties in de Ooster- en Westerschelde is terug te vinden in studies van Daemen & De Leeuw Vereecken (1995), Vos (1986) en Sabbe & Vyverman (1991). Vos (1986) constateerde dat onder de epipsammische soorten in de Oosterschelde geen seizoensgebonden soorten voorkwamen, terwijl de epipelische diatomeeën in het (vroeg) voorjaar een bloei vertoonden. Het ontbreken van een duidelijke seizoensvariatie onder epipsammische soorten is eerder gevonden door o.a. Amspoker (1977), Amspoker & McIntire (1978) en Sundbäck (1983) en lijkt daardoor karakteristiek voor deze groep. Baillie & Welsh (1980 en referenties daarin) vonden dat de biomassa van epipelische diatomeeën normaal gesproken ook geringe jaarlijkse fluctuaties vertonen. Ook Daemen & De Leeuw Vereecken (1985) constateerden dat een duidelijk seizoensverloop van diverse soorten benthische diatomeeën in de Oosterschelde niet te geven is.

Een andere verklaring voor het optreden of uitblijven van een seizoensvariatie zou kunnen worden gevonden in een verandering in de troebelheid van het water. Weersomstandigheden die sterke resuspensie van het sediment en dus vertroebeling van het water veroorzaken vallen in Nederland meestal tussen november en maart en vallen dus samen met de periode van lage benthisch chlorofyl-a waarden in de Westerschelde. Het water in de Westerschelde is echter over het algemeen zo troebel dat ook in de zomer de productie van benthische diatomeeën onder water te verwaarlozen valt. Het is dan ook niet waarschijnlijk dat een verhoogde troebelheid in de winterperiode een verklaring is voor de waargenomen seizoensvariatie. Er zijn daarbij ook locaties die niet zo'n seizoensvariatie vertonen (bv. Figuur 8 B, C).

Waarom vertoont het benthisch chlorofyl-a op de meeste plaatsen in de Westerschelde dan toch zo'n duidelijk afwisselend zomer - winter patroon als licht, noch temperatuur, noch troebelheid de bepalende omgevingsfactoren zijn en waarom vond Vos (1986) dan wel een seizoensvariatie onder epipelische diatomeeën in de Oosterschelde? Misschien dat een verklaring toch gevonden kan worden in een verschil in dynamiek tussen zomer en winter. Resuspensie van sediment en de daarin/op voorkomende benthische diatomeeën wordt vooral veroorzaakt door golfwerking (De Jonge, 1985; Delgado et al., 1991; De Jonge & Van Beusekom, 1995). Een stormachtige periode zal dan ook een negatieve invloed hebben op de chlorofyl-a concentratie in de bovenste cm's van het sediment. Resultaten van Colijn & Dijkema (1981) en Vos (1986) ondersteunen dit en geven aan dat vanaf windkracht 6 à 7 een meetbare chlorofyl-a afname optreedt. In golfwerking zullen Ooster- en Westerschelde niet veel van elkaar verschillen, hoewel de golfbrekende werking van de stormvloedkering wel merkbaar zal zijn op de locaties die er direct achter gelegen zijn (De Jong et al., 1994). De oostelijke delen van de Ooster- en Westerschelde zullen meer vergelijkbaar zijn, omdat ook in de Westerschelde veel van de energie van de Noordzeegolven al in het westelijk gedeelte door de platen zal zijn geabsorbeerd. Een groot verschil tussen de Ooster- en Westerschelde is de stroomsnelheid en

het slibgehalte. In de Oosterschelde zijn eb- en vloedstromen, zeker over de intergetijdengebieden, veel minder krachtig dan in de Westerschelde (Nienhuis & Smaal, 1994). Het geresuspendeerde sediment zal dus in de Oosterschelde veel minder ver worden getransporteerd dan in de Westerschelde. Daarbij komt dat het grovere sediment van de Oosterschelde later in suspensie komt en eerder zal bezinken (vgl. De Jonge & Van Beusekom, 1995). Hierdoor zal in de Oosterschelde de hoeveelheid geresuspendeerd sediment niet alleen geringer zijn en minder ver worden getransporteerd, maar zal ook het water sneller helder worden, waardoor de productie tijdens overspoeling van de benthische diatomeeën weer snel op gang kan komen.

Een verschil in diatomeeënpopulatie zou hierbij ook een rol kunnen spelen. De epipsammische diatomeeën domineren over het algemeen in een zandig, energierijk substraat. Deze groep bestaat voornamelijk uit kleine, sterk aan het sediment gebonden soorten die afhankelijk zijn van omwoeling en transport van sediment en alleen op die manier van tijd tot tijd in de fotische zone van het sediment verblijven. De dichtheid van deze groep vertoont dan ook geen sterke afname met diepte in het sediment. De Oosterschelde diatomeeënpopulaties worden gedomineerd door epipsammische soorten (Vos, 1986). De vaak grotere epipelische soorten, die niet sterk aan het sediment gebonden zijn, domineren in de bovenste mm's van beschutte, slibrijke sedimenten en zijn veel gevoeliger voor verstoring en spoelen bij een storm dus snel uit (Van den Hoek et al., 1979; Admiraal, 1984; De Jonge, 1985; Daemen & De Leeuw Vereecken, 1985; Vos, 1986). Daemen & De Leeuw Vereecken, (1985) vonden voor de Oosterschelde en Sabbe & Vyverman (1991) voor de Westerschelde een relatie tussen sediment en het voorkomen van diatomeeëntype. Locaties waar wind en golven de meeste invloed op het benthisch chlorofyl-a hebben zijn dus slibrijke locaties, gedomineerd door epipelische diatomeeën. Aangezien de Oosterschelde veel zandiger is dan de Westerschelde en door epipsammische diatomeeën wordt gedomineerd zal het effect van wind en golven op het chlorofyl-a gehalte hier dus geringer zijn dan op de meeste locaties in de Westerschelde. De locaties in de Westerschelde die geen duidelijke seizoensdynamiek vertonen zijn zandiger dan de andere locaties in dit gebied (vgl. Figuren 6 & 8, bijlagen 1-27) en zijn als zodanig vergelijkbaar met de Oosterschelde. Hierbij is niet gekeken naar de locaties die het hele jaar door een laag chlorofyl-a gehalte hebben. Deze locaties vormen een aparte groep. Ze zijn zeer zandig en waarschijnlijk het hele jaar door zeer dynamisch. Hier zal ook in de zomer door de extreme dynamiek geen belangrijke productie van benthische diatomeeën kunnen plaatsvinden. Over belangrijke verschillen of overeenkomsten in stroomsnelheden en de samenstelling van de diatomeeënpopulaties kan echter weinig worden gezegd.

Fauna

Een aspect wat in dit rapport nog niet aan de orde is gekomen is het effect van de fauna. Sedimentomwoeling (bioturbatie) door sommige diersoorten kan door z'n destabiliserende werking een negatief effect hebben op het chlorofyl-a gehalte, net zoals golfslag dat heeft. Daarnaast zijn er tal van diersoorten die microfytobenthos als voedselbron gebruiken (b.v. meiofauna, wadslakjes, nonnetjes, slijkgapers, harders, bergeenden; Fenchel & Kofoed, 1976; Asmus,

1982; Admiraal et al., 1983; Morrissey 1988a,b; Meininger & Snoek, 1992; Kamermans, 1994). Verschillen in biomassa van soorten die veel graven en/of diatomeeën eten, kan van invloed zijn op verschillen in het verloop van het chlorofyl-a gehalte tussen locaties onderling. Het zou kunnen dat het gebruik van microfytobenthos als voedselbron veel groter is op locaties die in het najaar een sterke verlaging vertonen van het chlorofyl-a gehalte dan op locaties die niet zo'n sterke verlaging vertonen. Op vier monsterpunten in de Westerschelde is gekeken naar de bodemfauna in relatie tot benthische diatomeeën: Appelzak (puntnummer 2112: sterke seizoensdynamiek), Bath (puntnummers 2121 en 2122: geen seizoensdynamiek) en Everingen (puntnummer 2171: sterke seizoensdynamiek; Verschoore de la Houssaye, 1998). Op grond van de resultaten vermeld in dat rapport kunnen echter geen conclusies worden getrokken over de rol van de biomassa of dichtheid van bodemdieren op de waargenomen seizoensdynamiek van benthische diatomeeën.

Conclusie

Uit het bovenstaande kan worden geconcludeerd dat twee factoren een dominante rol spelen bij het voorkomen van diatomeeën (gemeten als chlorofyl-a) in de Ooster- en Westerschelde: de dynamiek van de locatie en de lichtbeschikbaarheid als afgeleide van hoogteligging en troebelheid van het water. Deze factoren kunnen de verschillen in lokale variaties en in jaar- en seizoensvariates tussen de beide systemen verklaren. Voor locaties die geen sterke seizoensvariatie vertonen wordt verondersteld dat in vergelijking met andere locaties:

- 1) de golfenergie geringer en de stroomsnelheid lager is waardoor minder sediment wordt omgewoeld en minder van het geresuspendeerde materiaal wordt weggevoerd,
- 2) het sediment een relatief laag slibgehalte heeft, waardoor de energie nodig voor resuspensie hoger is en het sediment transport geringer,
- 3) de diatomeeënpopulatie een andere samenstelling heeft of een ander seizoensverloop vertoont, waarschijnlijk als gevolg van de sedimentsamenstelling.

Het slibgehalte vertoont geen directe relatie met het benthisch chlorofyl-a gehalte. Een positieve correlatie tussen beide parameters wordt hooguit bepaald doordat beide afhankelijk zijn van de (hydro)dynamiek van de locatie.

5. Habitatontwikkeling en primaire productie

Habitats

Om een uitspraak te kunnen doen over de totale biomassa en primaire productie van benthische diatomeeën in de Ooster- en Westerschelde moet inzicht worden verkregen in het totale oppervlak aan leefgebieden, de zgn. habitats. Het al of niet geschikt zijn van een gebied voor een organisme wordt primair bepaald door een combinatie van een aantal relevante abiotische omgevingsvariabelen. Uit bovenstaande is gebleken dat vooral hydro- en geomorfologische dynamiek en plotheogte bepalend zijn voor de mate van voorkomen van benthische diatomeeën. Het verspreidingsgebied van de diatomeeën kan worden ingedeeld in een aantal combinaties van geomorfologisch eenheden en hoogtecategorieën, de zgn habitats. Door de chlorofyl-a waarden die gemeten zijn op punten in overeenkomstige habitats te middelen, kunnen aan die habitats voor benthische diatomeeën specifieke chlorofyl-a gehalten worden toegekend. Deze gehalten kunnen vervolgens met het totale oppervlak per habitat worden vermenigvuldigd en bij elkaar worden opgeteld om tot een totaal voor het hele systeem te komen. Hieronder staat voor de Ooster- en Westerschelde beschreven hoe deze benadering gebruikt kan worden bij het vaststellen van de ontwikkeling van biomassa en primaire productie van benthische diatomeeën in de afgelopen tijd en in de toekomst. Voor het omrekenen van biomassa (chlorofyl-a gehalten) naar bruto primaire productie is gebruik gemaakt van de relatie $P=1,13B+8,23$ (De Jong et al, 1994)

Tabel 3.

Overzicht oppervlakte (ha) van het intergetijdengebied en het sublitoraal tot 10 m onder NAP in de Oosterschelde in 1983/1989 en 1996 (Smaal & Boeije, 1991; Oosterlaan & Zagers, 1996; Berchum & Wattel, 1997) en in 2021 ('expert judgement'). Ten behoeve van het berekenen van de totale bruto primaire productie van benthische diatomeeën is voor het jaar 1983 onderscheid gemaakt tussen de verschillende deelgebieden in het intergetijdengebied (zie Figuur 1 en tekst voor uitleg). De oppervlaktetotalen voor 1983 en 1989 zijn gelijk.

	Mond	Midden 1983	Kom	Noord	Totaal 1983/1989	Totaal 1996	Totaal 2021
Intergetijdengebied	2450	3483	4062	1666	11661	11065	10215
Sublitoraal							
2 - 2,5 m -NAP					1313	1322	1353
2,5 - 5 m -NAP					3993	4090	4435
5 - 10 m -NAP					4107	4104	4092
Totaal					21074	20581	20095

Oosterschelde

In de Oosterschelde is de geomorfologische heterogeniteit sinds het gereedkomen van de Deltawerken sterk verminderd. Het verschil in benthische diatomeeënbiomassa tussen platen en slikken is geheel verdwenen, waarschijnlijk als gevolg van de sterk afgenomen dynamiek. Ook zal het systeem in de toekomst nog steeds zandiger worden, omdat het slib langzaam maar zeker naar de geulen wordt afgevoerd, terwijl er geen nieuwe slibaanvoer meer plaatsvindt (Nienhuis & Smaal, 1994; Van Berchum & Wattel, 1997). De populatiesamenstelling van benthische diatomeeën zal hierdoor van plaats tot plaats minder verschillen dan vroeger. Het totale intergetijdenoppervlak vertoont hierdoor nu een tamelijk uniform beeld, waardoor dit voor het bepalen van de totale primaire productie van benthische diatomeeën als één habitat kan worden gekarakteriseerd. Vóór het gereedkomen van de stormvloedkering was er nog wel heterogeniteit tussen de verschillende deelgebieden in de Oosterschelde. Bij het schatten van de totale productie in 1983 is daarom uitgegaan van de indeling in vier deelgebieden: Mond, Midden, Kom en Noordelijke Tak (Figuur 1). Voor de gebiedsgrenzen is de huidige ligging van de dammen aangehouden waardoor de geschatte productie in 1983 direct vergeleken kan worden met de schattingen voor de jaren erna. Tabel 3 toont een overzicht van de onderscheiden arealen voor 1983, 1989 en 1996 (Smaal & Boelje, 1991; Oosterlaan & Zagers, 1996; Berchum & Wattel, 1997). Door de zgn. 'zandhonger' van de geulen zal het intergetijdenareaal ook in de toekomst in oppervlakte afnemen, ten gunste van het sublitorale areaal (Kohsiek et al., 1987). De voorspelling is dat er in het jaar 2021 10215 ha intergetijden areaal zal zijn t.o.v. 11065 ha nu en dat er 9880 ha tussen NAP -10 m en NAP -2 m zal zijn tegenover 9516 ha nu ('expert judgement'; Smaal & Boelje, 1991; Oosterlaan & Zagers, 1996; Berchum & Wattel, 1997).

Voor het bepalen van de primaire productie van benthische diatomeeën zijn voor de in Tabel 3 onderscheiden arealen de jaargemiddelde chlorofyl-a gehalten berekend. Voor de Mond in 1983 is hiervoor gebruik gemaakt van de gemiddelde chlorofyl-a waarden tussen 1981 en 1984 van de Roggenplaat. Voor de habitats in het Midden en de Noordelijke Tak is gesteld dat 50% van het areaal

Tabel 4.

Overzicht van de chlorofyl-a gehalten (mg Chl-a m^{-2}) van de bovenste cm van het sediment in het intergetijdengebied van de Oosterschelde en de hiervan afgeleide jaarproductie van benthische diatomeeën (P ; $\text{gC m}^{-2} \text{ j}^{-1}$). In 1983 is het intergetijdengebied ingedeeld in vier deelgebieden. De jaarproductie in de onderscheiden sublitorale habitats is afgelezen uit figuur 9 B. Hierbij is voor 1983 geen onderverdeling in vier deelgebieden gemaakt.

	1983								1989 - 2021	
	Mond		Midden		Kom		Noord		Totaal	
	Chl-a	P	Chl-a	P	Chl-a	P	Chl-a	P	Chl-a	P
Intergetijdengebied	103	125	112	135	152	180	112	135	152	180
Sublitoraal										
2 - 2,5 m -NAP		27		27		27		27	153	
2,5 - 5 m -NAP		5,6		5,6		5,6		5,6		87
5 - 10 m -NAP		-		-		-		-		11

overeenkomt met dat van de Galgeplaat en 50% met dat van Rattekaai. Voor de Kom is er vanuit gegaan dat de habitatarealen voor 50% overeenkomen met dat van het Verdrongen Land en 50% met dat van Rattekaai. Voor 1989, 1996 en 2021 is één waarde gehanteerd voor het gehele intergetijdengebied van de Oosterschelde: het gemiddelde chlorofyl-a gehalte van alle monsterpunten van de jaren 1991 t/m 1996 (Tabel 4). Sinds de aanzienlijke verbetering van het onderwaterlichtklimaat is er echter ook een nieuw potentieel habitat voor het microfytobenthos bijgekomen, namelijk onder de laagwaterlijn (Figuur 9 B). Over de primaire productie in dit sublitorale gebied kan niets met zekerheid worden gezegd. Wel kan aan de hand van Figuur 9 B en Tabel 3 een schatting worden gemaakt van de theoretische sublittorale productie in de Oosterschelde (Tabel 4). Er is hierbij verondersteld dat het sublittorale habitat in 1983 in Mond, Midden, Noord en Kom een uniform beeld vertoont.

Uit Tabellen 3 en 4 volgt de totale bruto primaire productie van de Oosterschelde. Na het gereedkomen van de stormvloedkering blijkt dat de productie van benthische diatomeeën aanvankelijk is toegenomen van ca. $18 \cdot 10^6 \text{ kg C j}^{-1}$ in 1983 naar $26 \cdot 10^6 \text{ kg C j}^{-1}$ in 1989 (Tabel 5). Deze schattingen zijn iets hoger dan de schattingen van De Jong et al. (1994), die respectievelijk $14 \cdot 10^6$ en $22 \cdot 10^6 \text{ kg C j}^{-1}$ rapporteerden. Zij hebben echter geen rekening gehouden met productie onder de laagwaterlijn. Tussen 1983 en 1996 is in het intergetijdengebied in de Oosterschelde aanvankelijk een toename van de productie als gevolg van de afname in dynamiek. Sublitoraal vindt er als gevolg van de verbeterde helderheid ook een flinke toename plaats. In de toekomst zal de productie in het intergetijdengebied afnemen als gevolg van areaalvermindering. De toenemende productie in het sublitoraal is niet helemaal voldoende om hiervoor te kunnen compenseren. De vermindering van het litorale areaal zal zich waarschijnlijk ook na 2021 voortzetten, alleen is het niet duidelijk met welke snelheid. Het is goed mogelijk dat uiteindelijk de benthische primaire productie zelfs onder het niveau van vóór de stormvloedkering zal uitkomen als het intergetijdengebied inderdaad steeds kleiner wordt en er in feite gunstig litoraal habitatareaal wordt ingeruild voor ongunstig sublitoraal areaal.

Tabel 5.

Primaire produktie van benthische diatomeeën (10^6 kg C j^{-1}) in de Oosterschelde en Westerschelde.

Oosterschelde: productie in 1983 (voor de bouw van de stormvloedkering), 1989 en 1996 (na de bouw), alsmede de verwachting voor 2021, gebaseerd op de voorspelde habitatareaal ontwikkeling als gevolg van de erosie van intergetijdengebied veroorzaakt door 'zandhonger' (Kohsiek et al.; Tabel 3).

Westerschelde: productie in 1996 en de verwachting voor 2021, gebaseerd op de voorspelde habitatareaalontwikkeling ('expert judgement') als gevolg van geulverdiepings- en geulwandverdedigingswerkzaamheden (zie ook tabel 6).

	Oosterschelde				Westerschelde	
	1983	1989	1996	2021	1996	2021
Intergetijdengebied	17	20	20	18	7,0	7,6
Sublitoraal						
2 - 2,5 m -NAP	0,5	2,0	2,0	2,1	-	-
2,5 - 5 m -NAP	0,6	3,5	3,6	3,9	-	-
5 - 10 m -NAP	-	0,5	0,5	0,5	-	-
Totaal	18,1	26,0	26,1	24,5	7,0	7,6

De productie van fytoplankton in de Oosterschelde is ongeveer $100 \cdot 10^6 \text{ kg C j}^{-1}$ (Wetsteyn & Kromkamp, 1994; Van Berchum & Wattel, 1997). Hieruit volgt dat een aanzienlijk deel (zo'n 20 tot 25%) van de totale primaire productie in de Oosterschelde voor rekening komt van benthische diatomeeën. Hoe de totale benthische primaire productie en de verhouding met de pelagische productie in de Oosterschelde zich in de toekomst zal ontwikkelen hangt voor een groot deel af van de ontwikkeling in habitatareaal dat geschikt is voor de groei van benthische diatomeeën.

Westerschelde

De Westerschelde is wat betreft geomorfologie veel heterogener dan de Oosterschelde. Hoog- en laagdynamische gebieden komen over het hele systeem voor, evenals slibrijke en slibarme locaties. Tevens is er door het estuarine karakter van de Westerschelde van oost naar west een duidelijke gradiënt in milieuomstandigheden. Vanwege de mozaïekachtige verdeling van habitatkarakteristieken over het gehele systeem is voor de berekening van de totale primaire productie van benthische diatomeeën het estuarium ingedeeld in een westelijk deel, een middendeel en een oostelijk deel (Figuur 1). Binnen elk deel is onderscheid gemaakt tussen hoog- en laagdynamische habitats en tussen platen en slikken. Het laagdynamische areaal is vervolgens weer opgedeeld in twee hoogtecategorieën: alles boven NAP en alles onder NAP. Met behulp van GIS is de oppervlakte per habitat bepaald voor 1996. Daarnaast is een schatting gemaakt voor de oppervlaktes in 2021 ('expert judgement' RIKZ), rekening houdend met de toekomstige ontwikkelingen. Door geulverdieping en geulwandverdediging zullen de plaatcomplexen aaneengroeien en hoger en steiler worden. Tevens wordt verwacht dat schor- en slikranden zullen eroderen en dat het hoogwaterniveau zal toenemen (met ca. 2 cm bij Vlissingen tot ca. 10 cm bij de Belgisch-Nederlandse grens; Vroon et al., 1997; EU, 1997). Deze ontwikkelingen hebben gevolgen voor het totale oppervlak aan voor benthische diatomeeën geschikte habitats. Tabel 6 toont de oppervlaktes van de onderscheiden arealen in 1996 en 2021. De verwachting voor het totale oppervlak intergetijdengebied in het jaar 2021 is een toename van 2,2%. Een gedetailleerde beschouwing laat zien dat er een afname is van hoogdynamisch habitatareaal, hoofdzakelijk in Oost en Midden, terwijl met name de laagdynamische gebieden boven NAP in areaal

Tabel 6.

Overzicht oppervlakte (ha) van het intergetijdengebied in de Westerschelde in 1996 (GIS) en in 2021 ('expert judgement'), ingedeeld in verschillende onderscheiden deelgebieden (habitats) voor de benthische diatomeeën in de Westerschelde.

			Platen			Slikken		
			Oost	Midden	West	Oost	Midden	West
1996	Hoogdynamisch		717	580	430	359	290	861
	Laagdynamisch	<NAP	249	272	225	125	136	451
		>NAP	913	354	508	456	177	1015
2021	Hoogdynamisch		544	503	431	272	251	862
	Laagdynamisch	<NAP	217	251	234	109	125	468
		>NAP	1051	503	567	526	251	1133

toenemen.

In Tabel 7 worden de jaargemiddelde chlorofyl-a waarden, en de daarvan afgeleide productiegegevens, weergegeven voor de onderscheiden microfytobenthoshabitats. Wanneer deze tabel wordt vergeleken met Tabel 6, dan blijkt areaalafname op te treden van voor microfytobenthos ongunstige habitats en areaaltoename van habitats waar de productie van microfytobenthos hoog is. Ervanuit gaande dat de veranderingen in de overige milieuvariabelen geen noemenswaardig effect hebben op de habitatspecifieke productie van benthische diatomeeën, is de verwachting dat in het jaar 2021 de totale bruto primaire productie van benthische diatomeeën ten opzichte van 1996 met 8,6% zal zijn toegenomen van $7,0 \cdot 10^6$ naar $7,6 \cdot 10^6$ kg C j^{-1} (Tabel 5). Er is hierbij vanuit gegaan dat ook in 2021 onder de laagwaterlijn geen productie van microfytobenthos plaatsvindt. Deze schatting is lager dan de $8,6 \cdot 10^6$ kg C j^{-1} gegeven door De Jong & De Jonge (1995). Hun schatting is echter gebaseerd op slechts twee jaargangen (1991 en 1992) van chlorofyl-a resultaten en zonder het diatomeeënhabitat van de Westerschelde in verschillende deelgebieden in te delen.

De totale bruto primaire productie van fytoplankton in de Westerschelde wordt geschat op zo'n $42 \cdot 10^6$ kg C j^{-1} (Van Spaendonk et al., 1993; Kromkamp et al., 1995). Dus ca. 15% van de totale bruto primaire productie in de Westerschelde komt voor rekening van benthische diatomeeën. Op het eerste gezicht lijkt het belang van de productie van microfytobenthos in de Westerschelde dus beduidend minder dan in de Oosterschelde. Aangezien de Westerschelde een zeer troebel en dynamisch estuarium is, zeker in vergelijking met de Oosterschelde, zal echter een groot aandeel van de primaire productie van fytoplankton worden gebruikt voor de eigen respiratie (Van Spaendonk et al., 1993; Kromkamp et al., 1995; Kromkamp & Peene, 1995). Hierdoor zal het aandeel van de benthische diatomeeën in de netto primaire productie van het estuarium hoger uitvallen. De Jong & De Jonge (1995) stellen dat op sommige locaties het benthische aandeel mogelijk zelfs 100% kan zijn. Het netto belang van productie door benthische diatomeeën kan dus voor een troebel estuarium veel groter zijn dan voor heldere wateren, ondanks het feit dat het aandeel van deze groep in de bruto primaire productie klein is.

Tabel 7.

Overzicht van de chlorofyl-a gehalten van de bovenste cm van het sediment (chl-a; mg m^{-2}), ingedeeld in verschillende onderscheiden deelgebieden (habitats) voor de benthische diatomeeën in de Westerschelde, en de daarvan afgeleide jaarproductie van benthische diatomeeën (P; gC $m^{-2} j^{-1}$).

	Oost		Platen		West		Oost		Slikken		West	
	chl-a	P	chl-a	P	chl-a	P	chl-a	P	chl-a	P	chl-a	P
Hoogdynamisch	21,9	34	37,3	50	21,5	33	6,7	27	85,1	104	27,9	40
Laagdynamisch <NAP	29,6	42	55,1	70	46,8	61	88,2	108	137	163	104	126
>NAP	90,7	111	49,1	64	69,8	87	83,6	103	214	250	139	165

Vergelijking Oosterschelde - Westerschelde

De productie van benthische diatomeeën is in de Westerschelde beduidend lager vergeleken met de Oosterschelde. Dat komt ten dele

omdat het oppervlak aan geschikt habitat in de Oosterschelde veel groter is (ca 20500 ha tegen ca 8100 ha). Maar ook als alleen het intergetijdengebied wordt bekeken en de productie wordt uitgedrukt per hectare, dat blijkt dat in de Oosterschelde de productie ongeveer 2 maal zo hoog is als in de Westerschelde ($1,5 \cdot 10^3$ tot $1,8 \cdot 10^3$ kg C ha⁻¹ in de Oosterschelde tegenover ca. $0,8 \cdot 10^3$ kg C ha⁻¹ in de Westerschelde). Dit verschil wordt zeer waarschijnlijk veroorzaakt door de grote verschillen in de bodemdynamiek en het doorzicht van de waterkolom.

6. Advies voor verder onderzoek

Oosterschelde

De ontwikkelingen die op dit moment gaande zijn in de Oosterschelde doen vermoeden dat de chlorofyl-a gehalten in de bovenste cm van het sediment in het intergetijdengebied op de verschillende locaties in de Oosterschelde ook in de toekomst geen noemenswaardige verschillen meer zullen vertonen. Het integraal blijven bemonsteren van het intergetijdengebied in de Oosterschelde zal daarom in de toekomst geen wezenlijk nieuwe informatie bijdragen aan de kennis over de biomassa en productie van benthische diatomeeën in dit gebied.

Nieuw is het (potentiële) sublittorale habitatareaal. Over het voorkomen en de productie van benthische diatomeeën in deze zone is zeer weinig bekend. Om een betere schatting te kunnen maken van de totale benthische primaire productie zal juist dit gebied beter onderzocht moeten worden. Het advies is dan ook om een aantal raaien uit te zetten, beginnend in het intergetijdengebied en lopend tot op een diepte van minstens NAP -10m, waarin het chlorofyl-a gehalte van de bovenste cm van het sediment wordt bepaald. Tevens is het voor een juiste schatting van belang om een goed inzicht te hebben in de beschikbare arealen in de verschillende dieptezones. Gedetailleerde dieptekaarten in GIS kunnen hierbij uitkomst bieden.

Om een uitspraak te kunnen doen over de totale benthische primaire productie in de toekomst zijn betrouwbare modellen nodig die veranderingen in de arealen van de verschillende dieptezones kunnen voorspellen.

Westerschelde

Het benthische diatomeeënonderzoek in de Westerschelde heeft zich in het verleden voornamelijk geconcentreerd op chlorofyl-a gehalten in de bovenste cm van het sediment. De meeste van deze metingen werden gedaan bij sedimentatie - erosie plots waardoor de exacte hoogte van een monsterpunt t.o.v. NAP vaststond. Aangezien er een zeer duidelijk verband bestaat tussen hoogteligging en chlorofyl-a concentratie is het meten van de plothoogte een vereiste. Daar waar die hoogteligging nu nog onvoldoende wordt bijgehouden zal hieraan meer aandacht moeten worden gegeven of moet worden overwogen deze locaties in de toekomst niet meer te bemonsteren.

De Westerschelde is een dynamisch estuarium met veel verschillende habitats. In het verleden is te weinig aandacht besteed aan het duidelijk vaststellen van het habitat-type van de monsterlocatie. Er zal voor elk monsterpunt meer informatie beschikbaar moeten komen m.b.t. golfaanval, stroomsnelheid, sedimentsamenstelling en -stabiliteit en de variaties hierin gedurende het jaar. Het verdient tevens aanbeveling om de soortensamenstelling van de benthische diatomeeën in verschillende habitats en de relatie met het wisselen van de seizoenen vast te stellen. Over jaarlijkse variaties in de

hydromorfologische dynamiek van monsterlocaties, en de daarmee samenhangende sedimentomwoeling en – verplaatsing, en eventueel een verandering in soortensamenstelling in relatie tot de biomassa van benthische diatomeeën is nu nog niets bekend. Daarnaast zal ook in meer detail gekeken moeten worden naar het effect van bodemdieren op de seizoensdynamiek en het voorkomen van microfytobenthos. Om tenslotte een uitspraak te kunnen doen over de totale benthische primaire productie in de toekomst zijn, net als voor de Oosterschelde, betrouwbare modellen nodig die veranderingen in habitatarealen kunnen voorspellen.

Literatuur

Admiraal W (1984).

The ecology of estuarine sediment-inhabiting diatoms. In: Round, Chapman (eds) Progress in Phycological Research, Vol 3, Biopress Ltd.

Admiraal W, Bouwman LA, Hoekstra L, Romeyn K (1983).

Qualitative and quantitative interactions between microphytobenthos and herbivorous meiofauna on a brackish intertidal mud flat. Int Revue ges Hydrobiol 68: 175-191.

Admiraal W, Van Arkel MA, Baretta JW, Colijn F, Ebenhöh W, De Jonge VN, Kop A, Ruurdij P, Schröder HGJ (1988).

The construction of the benthic submodel. In: Baretta J, Ruurdij P (eds) Tidal flat estuaries. Simulation and analysis of the Ems estuary. Ecological Studies 71, Springer-Verlag, Heidelberg: 105-152.

Amspoker MC (1977).

The distribution of intertidal epipsammic diatoms on Scripps Beach, La Jolla, California, USA. Bot Mar 20: 227-232.

Amspoker MC, McIntire CD (1978).

Distribution of intertidal diatoms associated with sediments in Yaquina estuary, Oregon. J Phycol 14: 387-395.

Asmus H (1982).

Field measurements on respiration and secondary production of a benthic community in the northern Wadden Sea. Neth J Sea Res 16: 403-413.

Baillie PW, Welsh BL (1980).

The effect of tidal resuspension on the distribution of intertidal epipellic algae in an estuary. Est Coast Mar Sci 10: 165-180.

Burrough PA (1986).

Principles of geographical information systems for land resources assessment. Monographs on soil and resources survey no. 12, Clarendon Press Oxford.

Colijn F (1982).

Light absorption in the waters of the Ems-Dollard estuary and its consequences for the growth of phytoplankton and microphytobenthos. Neth J Sea Res 15: 196-216.

Colijn F, Van Buurt G (1975).

Influences of light and temperature on the photosynthetic rate of marine benthic diatoms. Mar Biol 31: 209-214.

Colijn F, Dijkema KS (1981).

Species composition of benthic diatoms and distribution of chlorophyll-a on an intertidal flat in the Dutch Wadden Sea. Mar Ecol Prog Ser 4: 9-21.

Collijn F, De Jonge VN (1984).

Primary production of microphytobenthos in the Ems-Dollard estuary. Mar Ecol Prog Ser 14: 185-196.

Daemen EAMJ (1986).

Comparison of methods for the determination of chlorophyll in estuarine sediments. Neth J Sea Res 20:21-28.

Daemen EAMJ, De Leeuw Vereecken MTT (1985).

Kwalificering en kwantificering van het microfytobenthos in de Oosterschelde. Delta Instituut voor Hydrobiologisch Onderzoek/Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, Eindrapport Balans projekt 1985-3.

De Jong DJ, De Jonge VN (1989).

Zeegras *Zostera marina* L., *Zostera noltii* Horn.: een ecologisch profiel en het voorkomen in Nederland. Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren Nota GWAO 89.1003.

De Jong DJ, Meulstee C (1989).

Wieren en Weiden in de Oosterschelde. Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren/Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst.

De Jong DJ, De Jonge VN (1995).

Dynamics and distribution of microphytobenthic chlorophyll-a in the Western Scheldt estuary (SW Netherlands). Hydrobiologia 311: 21-30.

De Jong DJ, Nienhuis PH, Kater BJ (1994).

Microphytobenthos in the Oosterschelde estuary (The Netherlands), 1981-1990; consequences of a changed tidal regime. Hydrobiologia 282/283: 183-196.

De Jong SA (1990).

Primary production of benthic microalgae in the Oosterschelde estuary (SW Netherlands). Delta Instituut voor Hydrobiologisch Onderzoek/Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, Eindrapport Balans nota 43.

De Jonge VN (1985).

The occurrence of 'epipsammic' diatom populations: a result of interaction between physical sorting of sediment and certain properties of diatom species. Est Coast Shelf Sci 21: 607-622.

De Jonge VN (1992).

Physical processes and dynamics of microphytobenthos in the Ems estuary (the Netherlands). PhD thesis University of Groningen.

De Jonge VN, Van Beusekom JEE (1995).

Wind and tide induced resuspension of sediment and microphytobenthos in the Ems estuary. Limnol Oceanogr 40: 766-778.

Delgado M, De Jonge VN, Peletier H (1991).

Experiments on resuspension of natural microphytobenthos populations. Mar biol 108: 321-328.

Duarte CM (1989).

Temporal biomass variability and production/biomass relationships of seagrass communities. Mar Ecol Prog Ser 51:269-276.

EU (1997).

Influence of rising sea level on ecosystem dynamics of salt marshes. A proposal towards the 'Environment and climate' EU framework programme (1994 - 1998).

Fenchel T, Kofoed LH (1976).

Evidence for exploitative interspecific competition in mud snails (Hydrobiidae). *Oikos* 27: 367-376.

Heip CHR, Herman PMJ (1995).

Major biological processes in European tidal estuaries. *Hydrobiologia* 311: 1-3.

Huijs SWE (1995).

Geomorfologische ontwikkeling van het intergetijdegebied in de Westerschelde, 1935-1989. Institute for Marine and Atmospheric Research, Universiteit Utrecht. Rapport R 95-3.

Kamermans P (1994).

Similarity in food source and timing of feeding in deposit- and suspension-feeding bivalves. *Mar Ecol Prog Ser* 104: 63-75.

Kohsiek LHM, Mulder JPM, Louters T, Berben F (1987).

De Oosterschelde naar een nieuw onderwaterlandschap. Eindrapport Project Geomor, Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, Nota DGW AO 87.029.

Kromkamp J, Peene J (1995).

Possibility of net phytoplankton primary production in the turbid Schelde estuary (SW Netherlands). *Mar Ecol Prog Ser* 121: 249-159.

Kromkamp J, Peene J, Van Rijswijk P, Sandee A, Goosen N (1995).

Nutrients, light and primary production by phytoplankton and microphytobenthos in the eutrophic, turbid Westerschelde estuary (The Netherlands). *Hydrobiologia* 311: 9-19.

Meininger PL, Snoek H (1992).

Non-breeding Shelduck (*Tadorna tadorna*) in the SW Netherlands: effects of habitat changes on distribution, numbers, moulting sites and food. *Wildfowl* 43: 139-151.

Morrissey DJ (1988a).

Differences in effects of grazing by deposit-feeders *Hydrobia ulvae* and *Corophium arenarium* on sediment microalgal populations. I Qualitative differences. *J Exp Mar Biol Ecol* 118: 33-42.

Morrissey DJ (1988b).

Differences in effects of grazing by deposit-feeders *Hydrobia ulvae* and *Corophium arenarium* on sediment microalgal populations. II Quantitative differences. *J Exp Mar Biol Ecol* 118: 43-53.

Mulder JPM, Louters T (1994).

Changes in basis geomorphology after implementation of the Oosterschelde estuary project. *Hydrobiologia* 282/283: 29-39.

Nienhuis PH, Smaal AC (1994).

The Oosterschelde estuary (The Netherlands): a case-study of a changing ecosystem. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht .

Oosterlaan WMA, Zagers LM (1996).

Veranderingen in de hydrodynamiek en morfologie van het Oosterschelde bekken in de periode 1990-1995. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht/Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee. Rapport R 96-22.

Ruitenbeek M (1995).

Bodemhoogte ontwikkeling van het intergetijdengebied in de Westerschelde. Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie/Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee. Stagerapport februari 1995.

RWS-MD (1997).

Toelichting bij de Geomorfologische kartering van de Westerschelde 1996. Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst. Rapport MDGAT-97.52.

Sabbe K, Vyverman W (1991).

Distribution of benthic diatom assemblages in the Westerschelde (Zeeland, the Netherlands). Belg J Bot 124: 91-101.

Smaal AC, Boelje RC (1991).

Veilig getij: de effecten van de waterbouwkundige werken op het getijdemilieu van de Oosterschelde. Rijkswaterstaat dienst Getijdewateren/Directie Zeeland. Nota GWWS 91.088/AX 91.091.

Sundbäck K (1983).

Microphytobenthos on sand in shallow brackish water, Öresund, Sweden. PhD thesis University of Lund.

Tank FTG (1995).

Bodemligging Galgeplaat, Oosterschelde: veranderingen in de morfologie tussen 1987 en 1994. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht. Rapport R 95-2.

Ten Brinke WBM, Dronkers J, Mulder JPM (1994).

Fine sediments in the Oosterschelde tidal basin before and after partial closure. Hydrobiologia 282/283: 41-56.

Underwood GJC, Paterson DM (1993a).

Recovery of intertidal benthic diatoms after biocide treatment and associated sediment dynamics. J Mar Biol Assoc UK 73: 25-45.

Underwood GJC, Paterson DM (1993b).

Seasonal changes in diatom biomass, sediment stability and biogenetic stabilization in the Severn estuary. J Mar Biol Assoc UK 73: 87-887.

Van Berchum AM, Wattel G (1997).

De Oosterschelde, van estuarium naar zeearm. Bekkenrapportage 1991-1996, Rijkswaterstaat. Rapport Rijksinstituut voor Kust en Zee 97.034.

Van den Hoek C, Admiraal W, Colijn F, De Jonge VN (1979).

The role of algae and seagrasses in the ecosystem of the Wadden Sea: a review. In: Wolff WJ (ed) Flora and vegetation of the Wadden Sea. Report 3 of the Wadden Sea Working Group, Texel.

Van der Weck AW (1994).

Bodemligging Oosterschelde: veranderingen in de morfologie van platen en slikken sinds de aanleg van de Stormvloedkering. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht. Rapport 94-1.

Van Spaendonk A, Kromkamp J, De Visscher P (1993).

Primary production of phytoplankton in the turbid, coastal plain estuary De Westerschelde (The Netherlands). *Neth J Sea Res* 18: 246-259.

Verschoore de la Houssaye J (1998).

De invloed van windgolven en stroming op de seizoensvariatie van benthische diatomeen in de Westerschelde. Stageverslag Van Hall Instituut, Groningen, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Middelburg.

Vos PC (1986).

De sediment stabiliserende werking van benthische diatomeeën in het integetijdengebied van de Oosterschelde. Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren/Rijksuniversiteit Utrecht. Rapport RWS 86-03.

Vroon J, Storm C, Coosen J (1997).

Westerschelde, stram of struis? Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee. Rapport RIKZ-97.023.

Wetsteyn LPJM, Kromkamp J (1994).

Turbidity, nutrients and phytoplankton primary production in the Oosterschelde (The Netherlands) before, during and after a large-scale coastal engineering project (1980-1990). *Hydrobiologia* 282/283: 61-78.

Summary

Microphytobenthos consists of unicellular algae within and on top of the sediment in (shallow) waters. In the intertidal area of the Oosterschelde and the Westerschelde (SW Netherlands) this group consists predominantly of diatoms (with a siliceous skeleton). Benthic diatoms are of importance as food for various fauna species, vertebrates as well as invertebrates. The contribution of benthic diatoms to the total primary production of an ecosystem depends on a number of factors. Apart from hydrodynamics, (wave action and current velocity) water turbidity is one of the most important.

In the Oosterschelde the Delta Works had a considerable impact on these factors. The system has become less dynamic and the water column has become much clearer; shoals and intertidal flats are getting flatter and are becoming lower, in the course of which the intertidal area is diminishing. In the Westerschelde the channel will be deepened yet some more to make it possible for large sea-going vessels to reach the city of Antwerp in future.. Consequently shoals are getting higher and steeper. This process is opposite to that which has been started off after the construction of the Storm Surge Barrier in the Oosterschelde and which will be continued in future.

In this report the occurrence of benthic diatoms is related to the physical characteristics of their environments. The opposite physical situation in the Oosterschelde and the Westerschelde results in a picture about the most probable factors that determine the occurrence of benthic diatoms. By linking habitat characteristics to diatom biomass and their mean annual production, the total primary production of benthic diatoms can be estimated. By means of observed developments in chlorophyll-a content and (model) predictions on changes in characteristic habitat areas a rough prediction can be made on future microphytobenthos primary production rates.

In the past 15 years a number of locations (4 in the Oosterschelde and 20 in the Westerschelde) have been frequently visited by the Measurements Branch of Rijkswaterstaat Directie Zeeland (Vlissingen) (Directorate Zeeland of the Ministry of Transport and Public). On a number of sample points per location (a total of 147) the top first cm of the soil has been sampled. These samples have been analysed in the laboratory of the RIKZ (National Institute for Coastal and Marine Management, Middelburg) for chlorophyll-a contents. The chlorophyll-a data have been statistically analysed and the results have been scientifically interpreted and are reported here. The length of the research period is 15 years in the Oosterschelde and 8 (some locations 10) years in the Westerschelde.

Two factors play a predominant part in the occurrence of diatoms (measured as chlorophyll-a) in the Oosterschelde as well as the Westerschelde: the hydrodynamics of the location and the availability of light as derived from the height of the intertidal area above mean sea level (MSL) and water turbidity. These factors can explain the differences in annual, local and seasonal variations between both

systems. Locations that are rich in silt in the Westerschelde show a distinct seasonal rhythm. In summer chlorophyll-a contents are high, in winter they are low. This rhythm is not likely to be explained by seasonal variations in hours of sunshine and length of daylight or temperature, but mainly it can be explained by the seasonal variation in wind velocity.

Due to the changes in the Oosterschelde as a consequence of the Delta Works the primary production of benthic diatoms has increased with about 45% from about $18 \cdot 10^6 \text{ kg C y}^{-1}$ to about $26 \cdot 10^6 \text{ kg C y}^{-1}$ in the last 15 years. This increase is mainly a consequence of the decrease of shoal dynamics and a considerable improvement of the underwater light climate, due to which in the sublittoral zone a vast potential of habitat areas for benthic diatoms has been added. However, by a continuing erosion of the intertidal areas the future production of benthic diatoms will decrease. To what extent this will be cannot be predicted with any certainty. In the Westerschelde the total amount of primary production of benthic diatoms has been calculated at $7 \cdot 10^6 \text{ kg C y}^{-1}$. It can be predicted that this production will increase due to the deepening of the channel with about 10% to an amount of $7.6 \cdot 10^6 \text{ kg C y}^{-1}$, as a consequence of the increase of intertidal surface areas, in addition to which the part of high dynamic, unsuitable areas will decrease in favour of low dynamic, suitable areas.

Captions of the tables and figures

Table 1.

Outline of microphytobenthos sampling locations in the Westerschelde. For a detailed location of these sampling points see Figuur 1. P= shoal; S= intertidal flat, W= west; O= east

Table 2.

Chlorophyll-a contents in the upper cm of the sediment on various locations in the Oosterschelde. The values represent the mean values in summer (April up to and including September) and winter (October up to and including March) in the period before and after 1985. A significant difference between before and after 1985 (ANOVA) is indicated by s.

Table 3.

Outline of the surface area (ha) of the intertidal areas and the sublittoral zone to a depth of 10 m below MSL in the Oosterschelde in 1983/1989 and 1996 (Smaal & Boeije, 1991; Oosterlaan & Zagers, 1996; Berchum & Wattel, 1997) and in 2021 ('expert judgement'). For calculation of the total gross primary production of benthic diatoms in 1983 a division has been made between the various subsectors of the intertidal area (see Figuur 1 for explanation). Surface areas for 1983 and 1989 are equal.

Table 4.

Outline of chlorophyll-a contents (mg Chl-a m^{-2}) of the upper cm of the sediment in the intertidal area of the Oosterschelde and the derived annual production of benthic diatoms ($\text{P; gC m}^{-2} \text{y}^{-1}$). In 1983 the intertidal area was subdivided into four subsectors. The annual production in the distinguished sublittoral habitats has been derived from Figuur 9 B. To this end a subdivision has been made into four subsectors for 1983.

Table 5.

Primary production of benthic diatoms (10^6 kg C y^{-1}) in the Oosterschelde and Westerschelde.

Oosterschelde: production in 1983 (before the construction of the Storm Surge Barrier), 1989 and 1996 (after the construction), and the forecast for 2021, based on the predicted development of habitat areas as a consequence of erosion of the intertidal area due to 'sand hunger' (Kohsiek et al; Table 3).

Westerschelde: production in 1996 and the forecast for 2021, based on the predicted development of habitat areas ('expert judgement') caused by deepening of the channel and construction of defences of the channel sides (see also table 6).

Table 6.

Outline of surface area (ha) of the intertidal area of the Westerschelde in 1996 (GIS) and in 2021 ('expert judgement'), subdivided into various subsectors (habitats) for benthic diatoms in the Westerschelde.

Table 7.

Outline of chlorophyll-a contents of the upper cm of the sediment (chl-a, mg. m^{-2}), subdivided into various subsectors (habitats) for benthic diatoms in the Westerschelde and the derived annual production of benthic diatoms (P ; $\text{gC. m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$).

Figure 1.

Map of the Delta area in SW Netherlands with the location of Oosterschelde and Westerschelde and sampling points of microphytobenthos. The numbers in the Westerschelde correspond to the enclosure numbered 1-27.

Figure 2.

Relation silt contents (sediment particles $< 63 \mu\text{m}$) and soil density (specific gravity of the soil).

The relation for the Westerschelde is described by the equation $y = -0.01x + 1.54$ ($R^2 = 0.85$) and that for the Oosterschelde by $y = -0.02x + 1.57$ ($R^2 = 0.51$), in which y = soil density and x = silt content. Y-axis soil density (g.cm^{-3}), X-axis silt ($\% < 63 \mu\text{m}$)

Figure 3.

Mean chlorophyll-a content (white bars + 1 sd), mean silt content (grey bars) and mean height (black dots) for the various sampling points in the Oosterschelde before (A) and after (B) the construction of the Storm Surge Barrier. In table 2 it is indicated whether the various sampling points had a high (H) or a low (L) dynamic character in 1989.

Y-axis left : Chlorophyll-a (mg.m^{-2}) and silt ($\% < 63 \mu\text{m}$); Y-axis right: Height (cm with respect to MSL); X-axis sampling point number and location.

Figure 4.

Course of the mean annual chlorophyll-a content of all sampling points in the Oosterschelde per location from 1981 up to and including 1996. Y-axis Chlorophyll-a (mg.m^{-2}); X-axis: Year.

Figure 5.

Course of the mean monthly chlorophyll-a content of all locations in the Oosterschelde from 1981 up to and including 1996. Y-axis: chlorophyll-a (mg.m^{-2}); X-axis: Month.

Figure 6.

Mean chlorophyll-a content (white bars + 1 sd), mean silt content (grey bars) and mean height (black dots) for the various sampling points in the Westerschelde for the full period of 1988 to 1996. A: Tidal Flats West, B: Shoals West, C: Tidal Flats East and D: Shoals East. The numbers of the sampling points are followed by an indication whether they have a high (H) or a low (L) dynamic character. The first letter refers to the dynamics of the location in 1990, the second to the dynamics in 1996; O: dynamics are not known. Y-axis left: Chlorophyll-a (mg.m^{-2}) and silt ($\% < 63 \mu\text{m}$); Y-axis right: Height (cm with respect to MSL); X-axis sampling point number and location.

Figure 7.

Course of the mean annual chlorophyll-a content of all sampling points in the Westerschelde from 1988 up to and including 1996, subdivided into 4 areas Tidal Flats West, Shoals West, Tidal Flats East and Shoals East. Y-axis: Chlorophyll-a (mg.m^{-2}); X-axis: Year.

Figure 8.

Course of the mean monthly chlorophyll-a content of some locations used as an example in the Westerschelde from 1988 up to and including 1996; A: a distinct seasonal course, B: a more or less stable high content, C: a more or less stable low content. In enclosures 1 up to and including 27 the course of all locations is presented. Y-axis: chlorophyll-a (mg.m^{-2}); X-axis: Month.

Figure 9.

Gross primary production of microphytobenthos in relation to sampling point height (m with respect to MSL) A: mean gross annual production in $\text{gC.gC}^{-1}.\text{y}^{-1}$. The dotted line represents the level of microphytobenthos respiration. B: mean annual production in $\text{gC.m}^{-2}.\text{y}^{-1}$. For the relation between A and B: see Intermezzo 1. Y-axis: see A and B; X-axis Height with respect to MSL.

Figure 10.

Secchi disk values: mean transparency per month for the Westerschelde (solid line), for the Oosterschelde in 1983 (discontinuous line) and for the Oosterschelde in 1996 (dotted line). (source: MWTL). Y-axis Secchi depth (m); X-axis: Month.

Enclosures 1-27

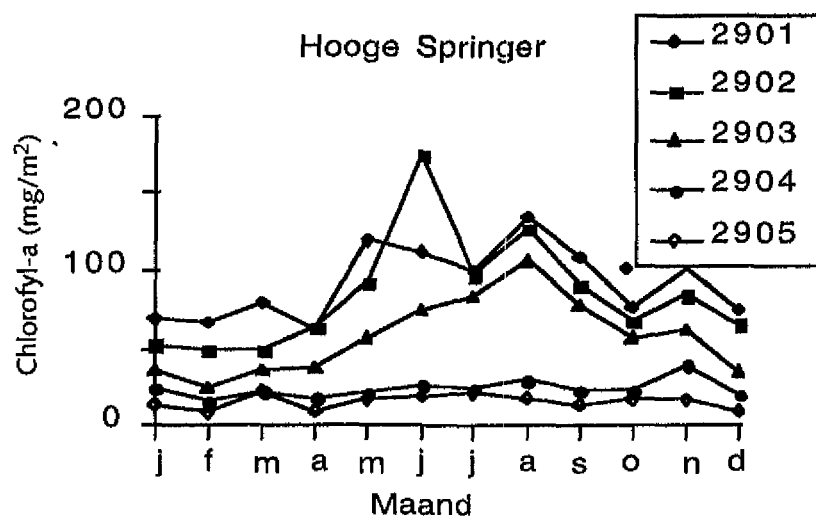
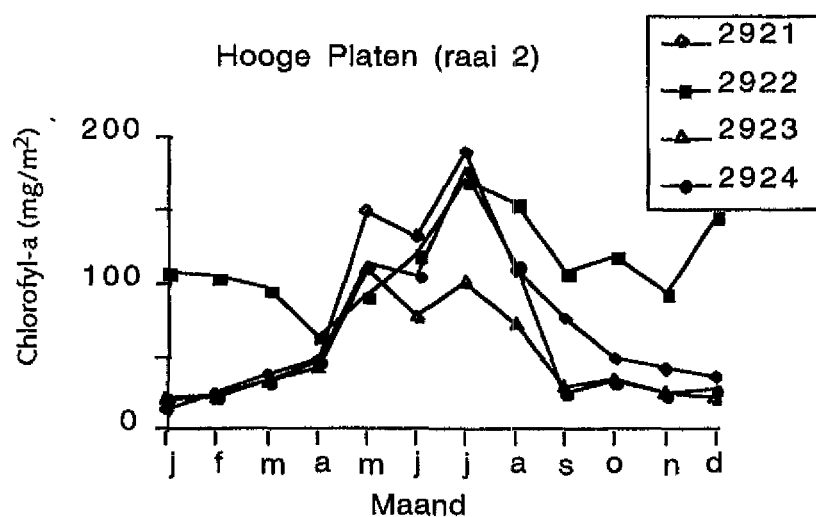
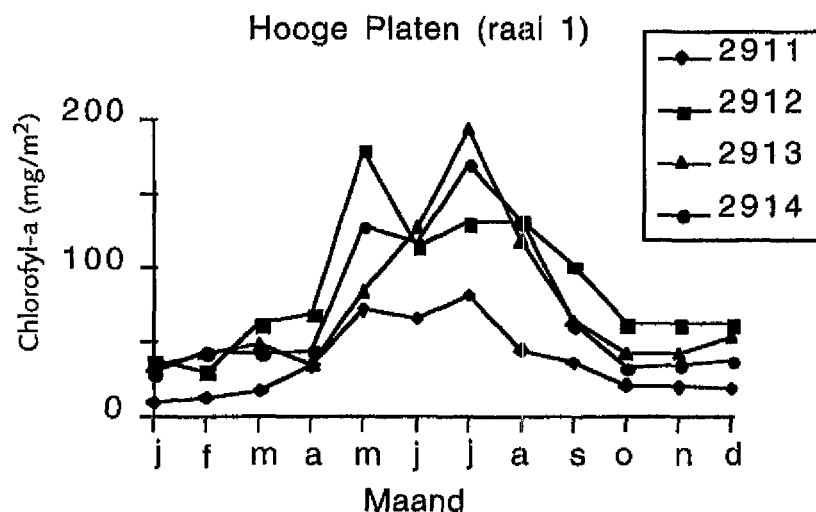
Course of mean monthly chlorophyll-a contents of all sampling points in the Westerschelde from 1988 up to and including 1996. Y-axes: Chlorophyll-a (mg.m^{-2}); X-axes: Month.

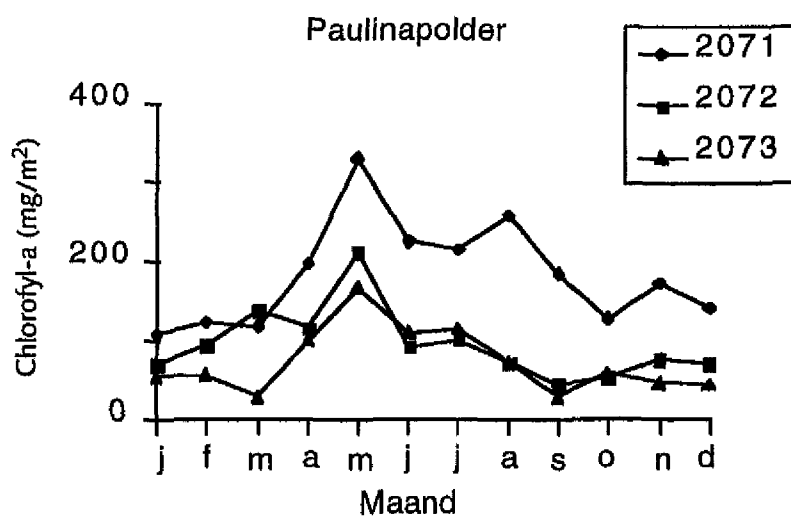
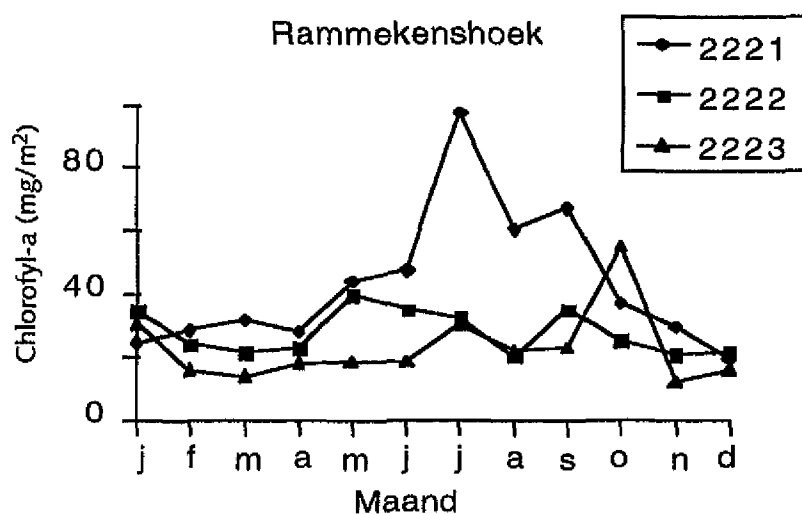
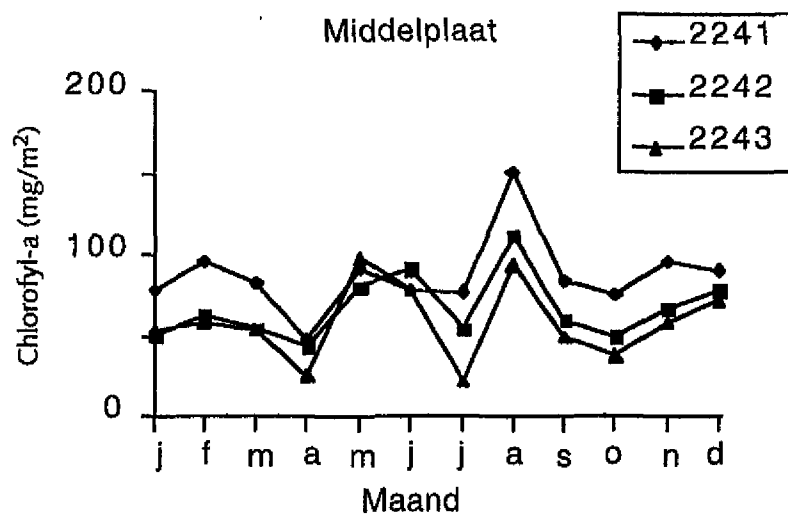
Bijlagen 1 - 27

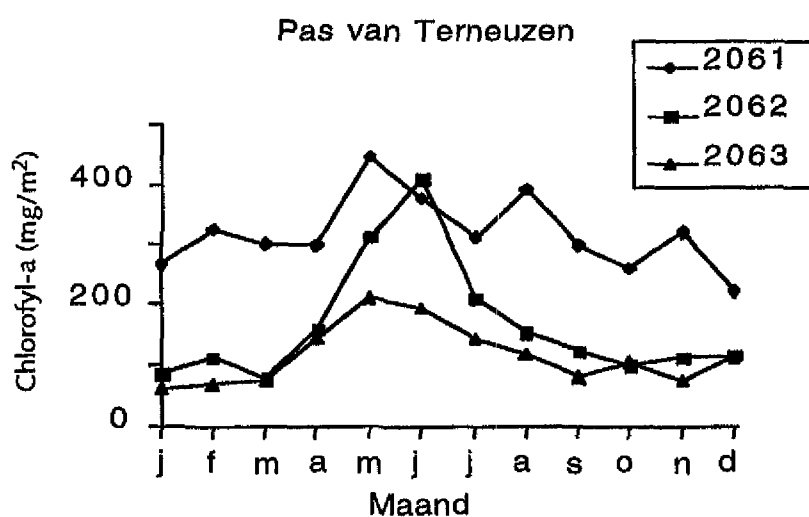
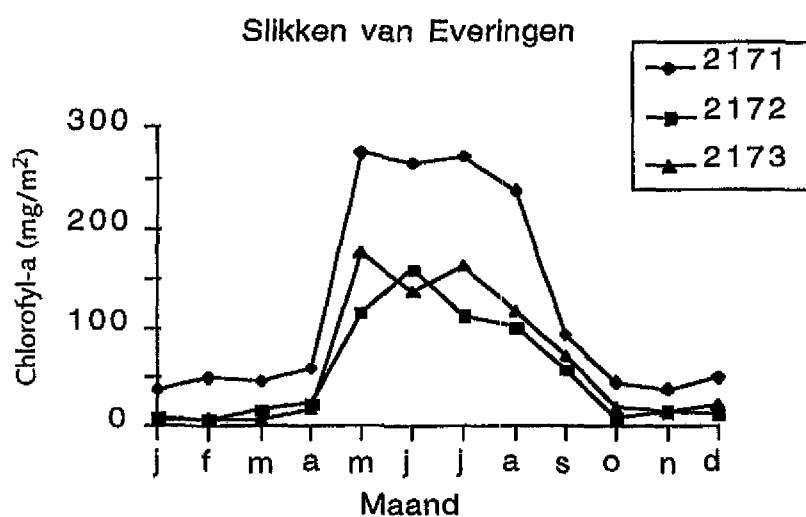
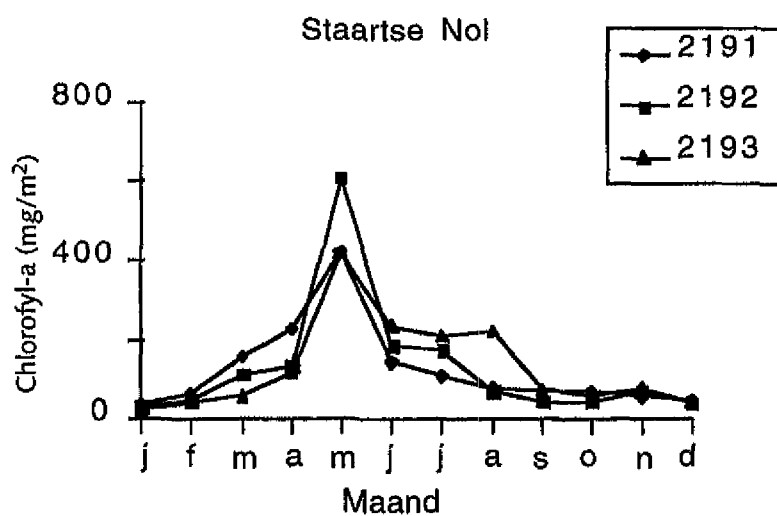
(Enclosures 1-27)

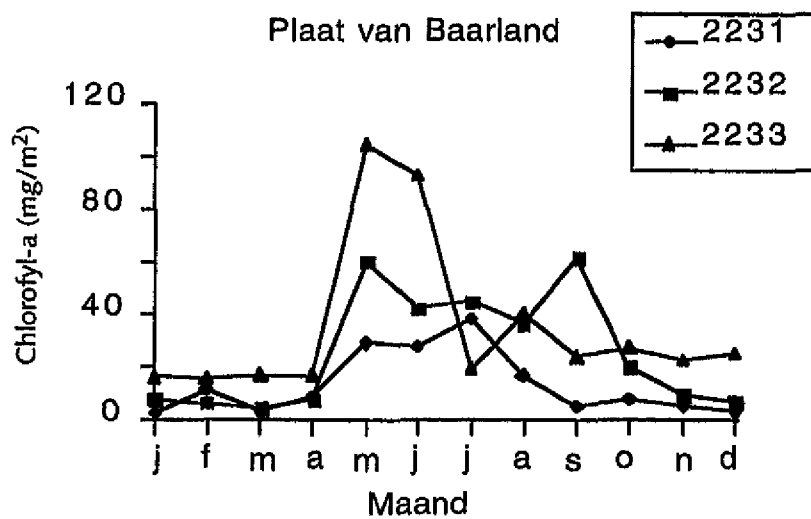
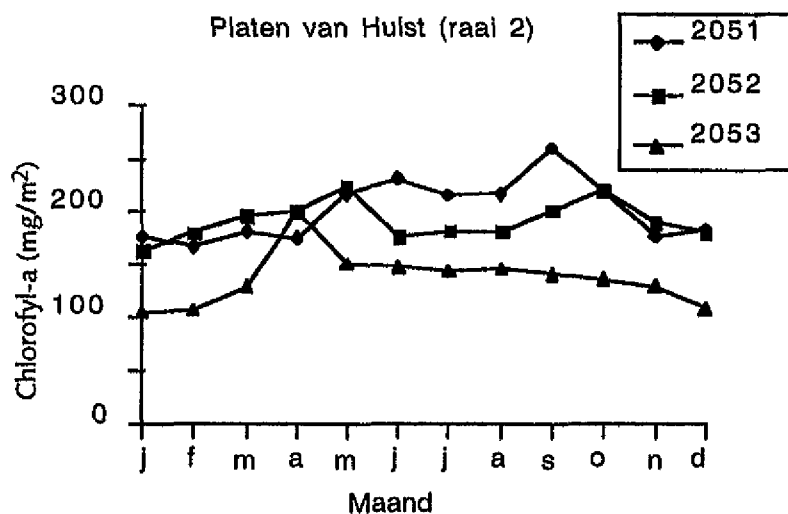
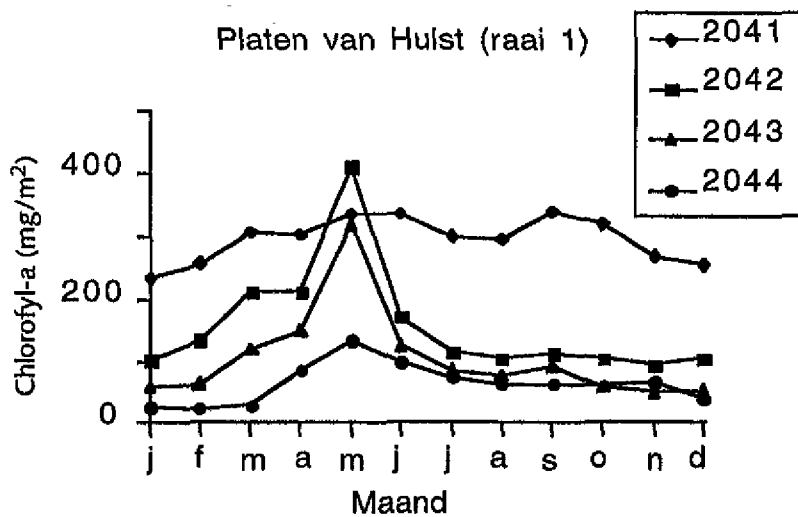
Verloop van het maandgemiddelde chlorofyl-a gehalte (mg m^{-2}) op alle meetlocaties in de Westerschelde vanaf 1988 t/m 1996.

1. Hooge Platen, raai 1	48
2. Hooge Platen, raai 2	48
3. Hooge Springer	48
4. Middelplaat	49
5. Rammekenshoek	49
6. Paulinapolder	49
7. Staartse Nol	50
8. Slikken van Everingen (Zuidgors)	50
9. Pas van Terneuzen	50
10. Platen van Hulst, raai 1	51
11. Platen van Hulst, raai 2	51
12. Plaat van Baarland	51
13. Rug van Baarland	52
14. Molenplaat	52
15. Plaat van Ossensisse	52
16. Plaat van Valkenisse west, raai 1	53
17. Plaat van Valkenisse west, raai 2	53
18. Plaat van Valkenisse oost	53
19. Waarde, raai 1	54
20. Waarde, raai 2	54
21. Waarde, raai 3	54
22. Saeftinge, raai 1	55
23. Saeftinge, raai 2	55
24. Saeftinge, raai 3	55
25. Baalhoek	56
26. Bath	56
27. Appelzak	56

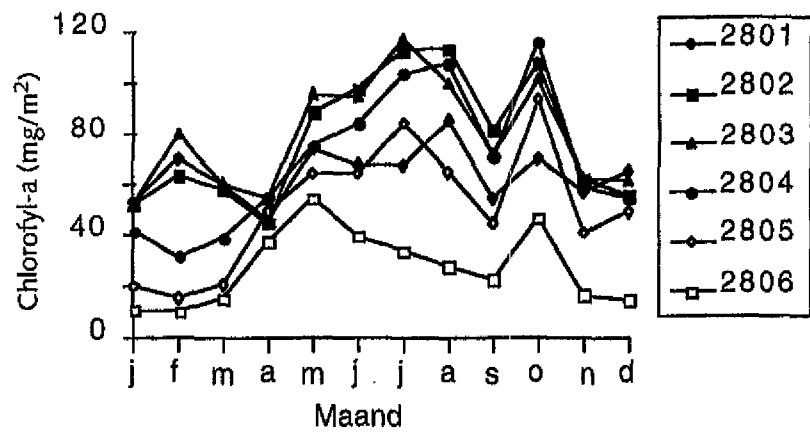




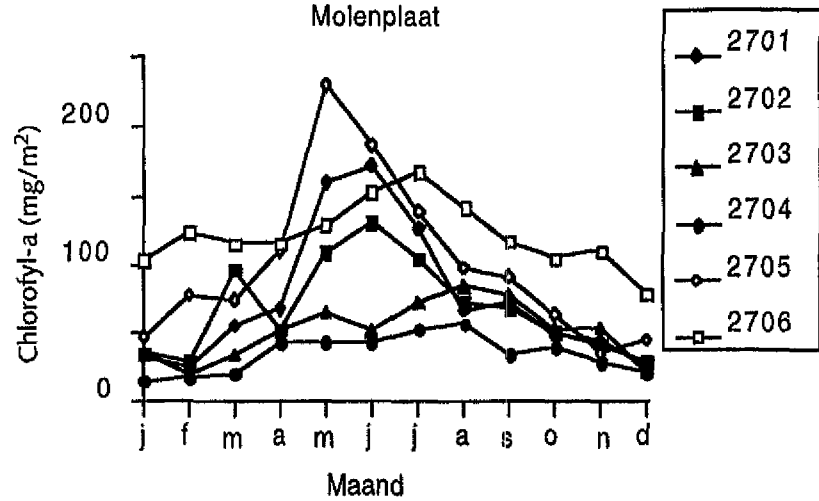




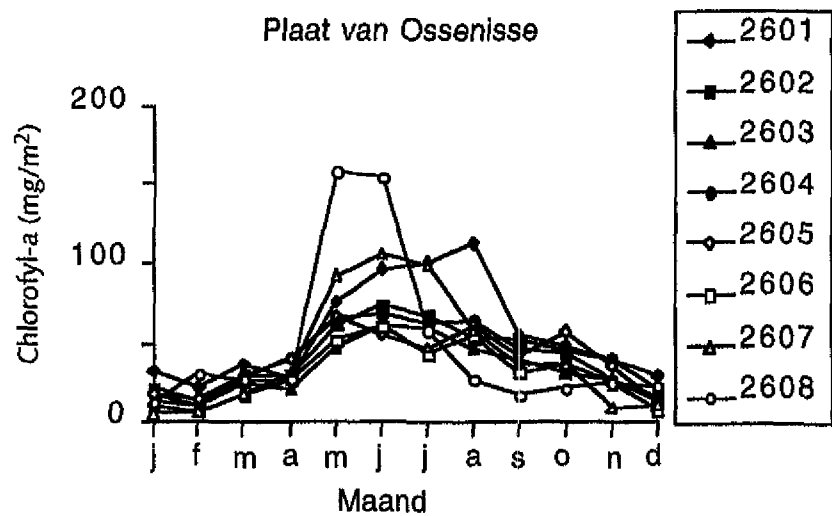
Rug van Baarland

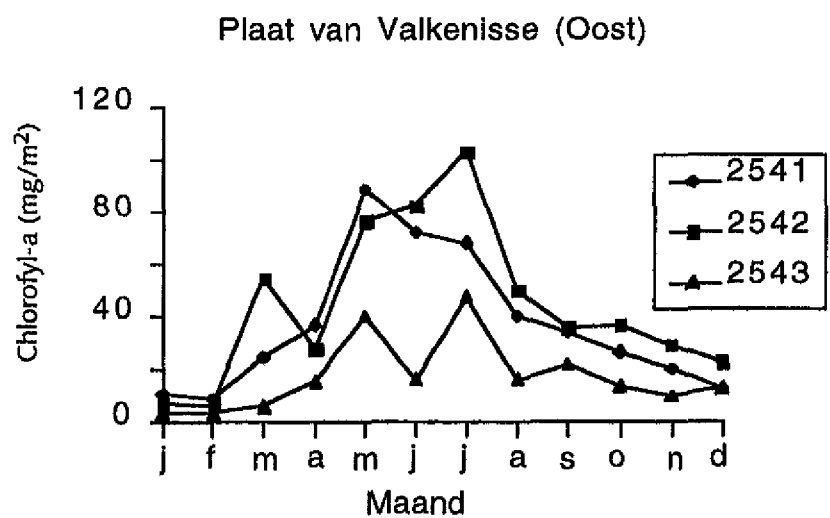
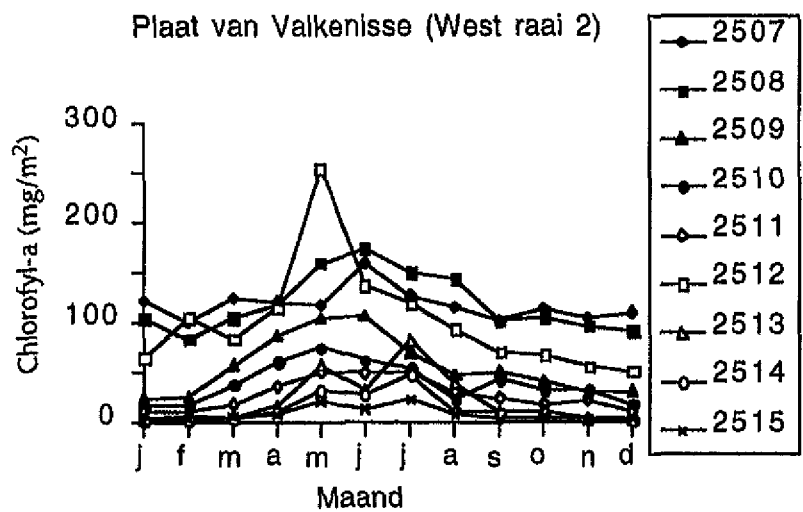
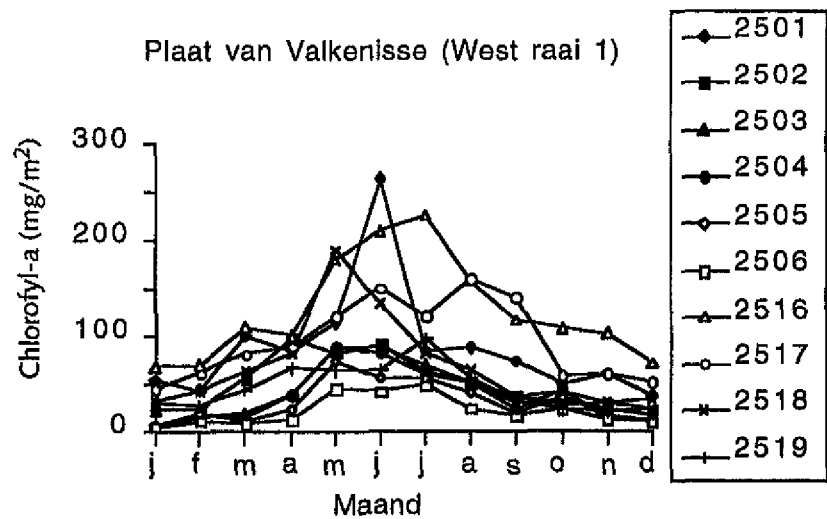


Molenplaat

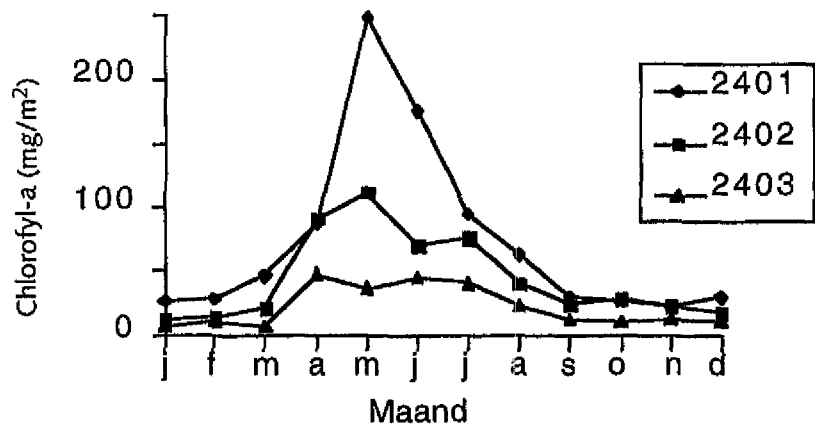


Plaat van Ossensisse

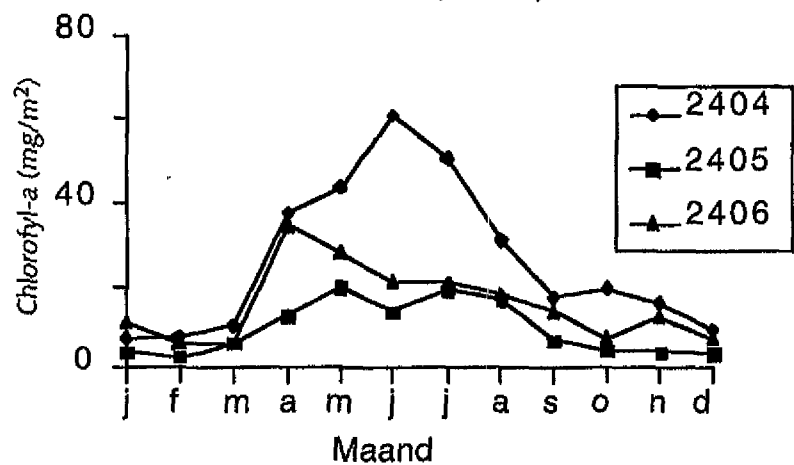




Waarde (raai 1)



Waarde (raai 2)



Waarde (raai 3)

