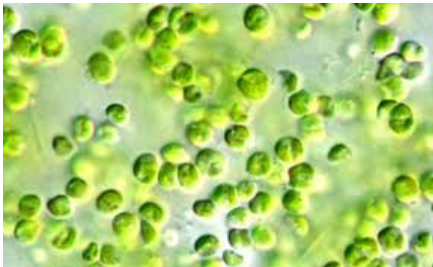


Schatting van de primaire productie in de Waddenzee in de laatste drie decennia

Roel Riegman

Technisch Rapport project Meerjarige effect- en
productiemetingen aan MZI's in de Westelijke Waddenzee
en Oosterschelde
Rapport C186/13



IMARES Wageningen UR

(IMARES - Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies)

Opdrachtgever:

Ministerie van EZ
Directie Agro Kennis
Postbus 20401, 2500 EK Den Haag

BAS code: BO-11-007-007

Publicatiedatum:

april 2014

IMARES is:

- een onafhankelijk, objectief en gezaghebbend instituut dat kennis levert die noodzakelijk is voor integrale duurzame bescherming, exploitatie en ruimtelijk gebruik van de zee en kustzones;
- een belangrijke, proactieve speler in nationale en internationale mariene onderzoeksnetwerken (zoals ICES en EFARO).

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken binnen het Beleidsondersteunend onderzoek in het kader van programma BO-11-007-007 (2010).

P.O. Box 68 1970 AB IJmuiden Phone: +31 (0)317 48 09 00 Fax: +31 (0)317 48 73 26 E-Mail: imares@wur.nl www.imares.wur.nl	P.O. Box 77 4400 AB Yerseke Phone: +31 (0)317 48 09 00 Fax: +31 (0)317 48 73 59 E-Mail: imares@wur.nl www.imares.wur.nl	P.O. Box 57 1780 AB Den Helder Phone: +31 (0)317 48 09 00 Fax: +31 (0)223 63 06 87 E-Mail: imares@wur.nl www.imares.wur.nl	P.O. Box 167 1790 AD Den Burg Texel Phone: +31 (0)317 48 09 00 Fax: +31 (0)317 48 73 62 E-Mail: imares@wur.nl www.imares.wur.nl
--	--	---	--

© 2014 IMARES Wageningen UR

IMARES, onderdeel van Stichting DLO.
KvK nr. 09098104,
IMARES BTW nr. NL 8113.83.696.B16.
Code BIC/SWIFT address: RABONL2U
IBAN code: NL 73 RABO 0373599285

De Directie van IMARES is niet aansprakelijk voor gevolgschade, noch voor schade welke voortvloeit uit toepassingen van de resultaten van werkzaamheden of andere gegevens verkregen van IMARES; opdrachtgever vrijwaart IMARES van aanspraken van derden in verband met deze toepassing.

Dit rapport is vervaardigd op verzoek van de opdrachtgever hierboven aangegeven en is zijn eigendom. Niets uit dit rapport mag weergegeven en/of gepubliceerd worden, gefotokopieerd of op enige andere manier gebruikt worden zonder schriftelijke toestemming van de opdrachtgever.

A_4_3_1-V14.1

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave.....	3
Samenvatting.....	4
1. Inleiding.....	5
2. Methoden.....	5
3. Resultaten.....	9
3.1. Pelagische Primaire productie.....	9
3.2. Langetermijnveranderingen in algen.....	12
4. Conclusies.....	15
5. Literatuur.....	16
6. Kwaliteitsborging.....	17
7. Dankwoord.....	17
Verantwoording.....	18
Bijlage A. Trends in jaargemiddelde meetwaarden.....	19

Samenvatting

In dit rapport wordt een schatting gepresenteerd van de primaire productie in de oostelijke en de westelijke Waddenzee gedurende de laatste drie decennia. Deze gegevens worden in een ander onderdeel van het project Meerjarige effect- en productiemetingen aan MZI's in de Westelijke Waddenzee en Oosterschelde gebruikt voor het valideren van een model dat het effect berekend van opschaling van MZI's (mosselzaadinvangsystemen) op de draagkracht voor schelpdieren in de Waddenzee.

De eerste stap in de berekening betreft de vertaling van de dagelijkse instraling naar de het onderwaterlichtklimaat. Een belangrijke parameter is het gesuspendeerd materiaal. De gebruikte meetgegevens van Rijkswaterstaat komen goed overeen met een onafhankelijke dataset van het NIOZ in het Marsdiep. De volgende stap bij het berekenen van de primaire productie is de vertaling van het onderwaterlichtklimaat naar de primaire productie door algen. Hierbij is het uitgangspunt dat de algen biomassa (gemeten als chlorofyl-a) een specifieke fotosynthese activiteit vertoont die afhankelijk is van de beschikbare hoeveelheid licht. Een belangrijkste aanname is dat de seizoensafhankelijke variatie in de Chlorofyll-a specifieke fotosynthese parameters in de afgelopen dertig jaar niet veranderd is. Uit metingen, die uitgevoerd zijn in 2011, blijkt dat dit inderdaad niet gebeurd is. Daarom kan de gevolgde berekeningsmethode beschouwd worden als een betrouwbare 'hind-cast' van de primaire productie.

De berekende primaire productie getallen komen goed overeen met een schatting van Philippart et al. (2007), welke gebaseerd is op onafhankelijke metingen door het NIOZ in het Marsdiep. Uit de hier gerapporteerde berekeningen blijkt dat het slibgehalte grote invloed heeft op de primaire productie. Dit is vooral het geval in de oostelijke Waddenzee. In dit gedeelte is betrekkelijk weinig variatie in de jaarlijkse primaire productie. Als gevolg van de relatief hoge slibgehalten is er ook weinig invloed waarneembaar van variaties in de beschikbaarheid van nutriënten. De westelijke Waddenzee bevat minder slib. Ondanks de grotere diepte is er meer licht beschikbaar voor de algengroei. Vooral 's zomers is er sprake van nutriënt gelimiteerde primaire productie. Dit houdt in dat een verdere reductie in de eutrofiering zal leiden tot lagere primaire productie.

1. Inleiding

In dit rapport wordt een schatting gemaakt van de primaire productie in de oostelijke en de westelijke Waddenzee gedurende de laatste drie decennia. Deze gegevens worden in een ander onderdeel van het project Meerjarige effect- en productiemetingen aan MZI's in de Westelijke Waddenzee en Oosterschelde gebruikt voor het valideren van een model dat het effect berekend van opschaling van MZI's (mosselzaadinvangsystemen) op de draagkracht voor schelpdieren in de Waddenzee (Brinkman, 2011).

Het aantal rechtstreeks uitgevoerde metingen aan de primaire productie (PP) in de Waddenzee is gering. In de jaren 1976-1980 is gedurende vier jaar op twee locaties in de oostelijke Waddenzee gemeten (Colijn 1983). Daarnaast zijn er gedurende een langere periode (vanaf 1972 tot nu) metingen gedaan in het Marsdiep (Cadee & Hegeman 2002, Philippart e.a. 2007). Deze Marsdiep waarnemingen hebben echter een aantal beperkingen. Ten eerste is er bij hoog water gemonsterd, en het is de vraag in hoeverre deze waarnemingen representatief zijn voor de primaire productie in de Waddenzee. Daarnaast is er slechts geïncubeerd met één vaste lichtintensiteit. Een ander, niet kwantificeerbaar nadeel is dat de monsterlocatie (de NIOZ-pier) gelegen is in een deel van het Marsdiep waar het water relatief slecht mengt met het overige water in het Marsdiep.

Op basis van de NIOZ-pier gegevens is een schatting gepubliceerd (Philippart e.a. 2007) van de primaire productie in de westelijke Waddenzee. Bij deze berekening werd aangenomen dat de fotosynthese een lineair verband vertoont met de lichtintensiteit. Dit leidt tot een overschatting van de PP omdat de fotosynthese-licht respons relatie niet lineair is maar een maximum vertoont (bijvoorbeeld: Platt et al. 1980). Daarnaast is het onderwaterlichtklimaat berekend aan de hand van gegevens over de Secchi diepte met behulp van een algoritme dat gebaseerd is op metingen in de Oosterschelde. Hiermee wordt de troebelheid van het water waarschijnlijk overschat, hetgeen juist weer een onderschatting van de primaire productie zou opleveren.

Voor deze studie is een rekenmodel geconstrueerd dat zo goed mogelijk aansluit bij de wetmatigheden zoals die in de wetenschappelijke vakliteratuur zijn gepubliceerd. In sectie 2 wordt de werkwijze uiteengezet. Dit model is ingezet om de **kennisvraag** *Wat de primaire productie in de oostelijke en de westelijke Waddenzee gedurende de laatste drie decennia?* te beantwoorden.

2. Methodes

Voor de berekening is gebruik gemaakt van meetgegevens afkomstig van het KNMI (Dagelijkse instraling; KNMI data verkregen van Dr. H. van Aken, NIOZ) en van Rijkswaterstaat (SPM, chlorofyll-a, en de diepteverdeling van de Waddenzee). Gegevens voor de westelijke Waddenzee zijn berekend op basis van waarnemingen op de meetlocaties Doove Balg west, Marsdiep noord en Vliestroom. Voor de oostelijke Waddenzee zijn gegevens gebruikt van Dantziggat, Zoutkamperlaag zeegat en Zuidoost Lauwers oost. Biomassa specifieke koolstoffixatie snelheden en respiratie zijn ontleend aan gegevens uit de vakliteratuur (zie hieronder).

De eerste stap in de berekening betreft de vertaling van de dagelijkse instraling naar de het onderwaterlichtklimaat. Van de gemeten instraling (KNMI data) bestaat 53% uit PAR (photosynthetic active radiation) (Kirk 1983). Omdat de gegevens van het KNMI de totale dagelijkse hoeveelheid instraling betreffen, werd het opvallende licht (PAR) omgezet in een synodale relatie tussen de lichtintensiteit en het moment in de lichtperiode. Deze lichtperiode werd voor iedere dag opgedeeld in twintig tijdstappen. Onder het wateroppervlak neemt het licht exponentieel af met de diepte (Wet van

Lambert-Beer). De mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van de troebelheid van het water, en wordt uitgedrukt in de uitdovingscoëfficiënt (K_d):

$$K_d = 0.01 + 0.0485 * \text{SPM} + 0.005 * \text{Chl-a} \quad (\text{Vergelijking 1})$$

Waarbij de uitdovingscoëfficiënt K_d (in m^{-1}) wordt uitgerekend op basis van de concentratie gesuspendeerd materiaal SPM (in mg/L) en de chlorofyll-a concentratie (in $\mu\text{g/L}$). Dit algoritme is ontleend aan gegevens van Colijn et al. (1987). De K_d , berekend uit de chlorofyll concentratie en de concentratie SPM, is consistent met schattingen van het doorzicht aan de hand van de Secchi schijf (Fig. 1). Op de X as staan de berekende K_d waarden op basis van gemeten secchi dieptes, op de Y-as de berekende waarden van K_d berekend op basis van SPM en chl-a. De grote spreiding komt door variaties in beide meetmethoden. De correlatie is echter nagenoeg 1 is. Dat wil zeggen dat beide rekenmethoden gemiddeld uitkomen op dezelfde waarde voor de K_d .

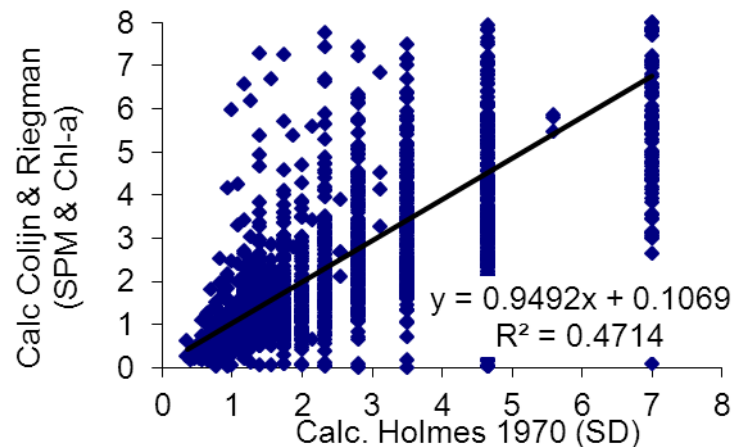


Fig. 1. Overeenkomst tussen berekende K_d conform vergelijking 1 (deze studie) en volgens Holmes (1970) a.d.h.v. secchi disc waarnemingen voor metingen in de Eems Dollard en de oostelijke Waddenzee (Colijn 1983).

SPM en chlorofyll-a meetgegevens zijn ontleend aan het Databestand van Rijkswaterstaat (www.waterbase.nl). Voor de oostelijke Waddenzee betrof dit de meetlocaties Zuidoost Lauwers oost, Zoutkamperlaag zeegat en Dantziggat. Voor de westelijke Waddenzee is gebruik gemaakt van de meetseries bij Doove Balg west, Marsdiep noord en Vliestroom.

Vooraf van SPM gegevens is bekend dat deze zeer variabel kunnen zijn, en bovendien onderhevig aan methodologische veranderingen die binnen de meetperiode door Rijkswaterstaat zijn doorgevoerd. Ter toetsing van de consistentie van deze meetgegevens werd een vergelijking gemaakt met een onafhankelijke dataset, waarin het doorzicht was gemeten m.b.v. een Secchi disk op de NIOZ pier (Cadee & Hegeman, 2002). De berekende K_d waarden voor de westelijke Waddenzee (vergelijking 1) werden omgezet in Secchi disk waarden (Holmes, Avizonis et al. 1970).

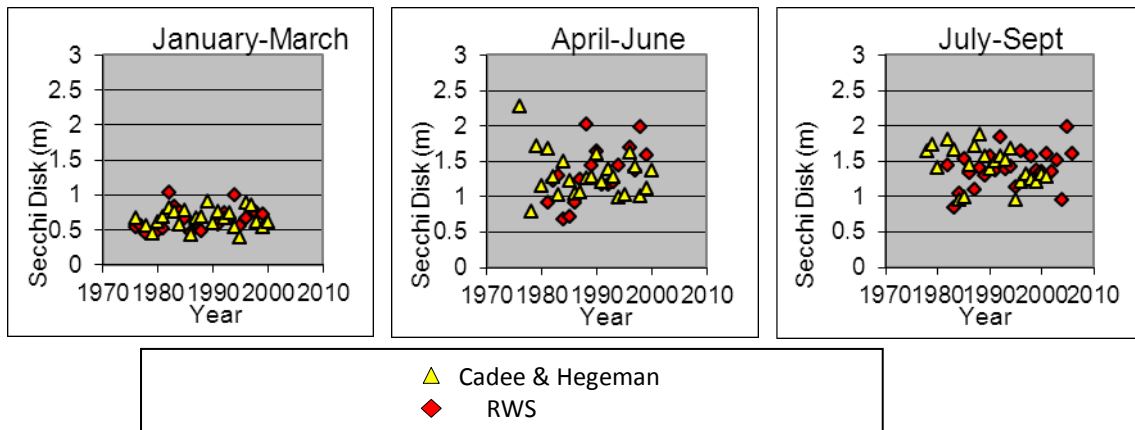


Fig.2. Vergelijking tussen gemeten Secchi disk waarden (gele symbolen; Cadee en Hegeman 2002) en waarden berekend a.d.h.v. SPM gegevens van Rijkswaterstaat (RWS) (Rode symbolen).

Uit de vergelijking blijkt dat beide datasets consistent zijn met elkaar voor de drie onderzochte kwartalen over een periode van ongeveer twintig jaar. Hoewel de gegevens van RWS verzameld zijn bij laag water op verschillende lokaties in de westelijke Waddenzee en door Cadee en Hegeman uitsluitend bemonsterd is in het Marsdiep bij hoogwater, liggen de waarden voor de Secchi diepte op het zelfde niveau voor de drie verschillende seizoenen. Deze correlatie ($y = 0.6302x + 0.4028$, $R^2 = 0.5005$, $P < 0.002$) houdt in dat de gegevens van RWS inzake SPM representatief kunnen worden geacht voor de Waddenzee in de periode 1975-2007.

De volgende stap bij het berekenen van de primaire productie is de vertaling van het onderwaterlichtklimaat naar de primaire productie door algen. Hierbij is het uitgangspunt dat de algen biomassa (gemeten als chlorofyl-a) een specifieke fotosynthese activiteit vertoont die afhankelijk is van de beschikbare hoeveelheid licht (Platt et al., 1980):

$$PP^{chl-a} = P_{max} * (1 - e^{(-\alpha I / P_{max})}) * e^{(-\beta I / P_{max})} \quad (\text{Vergelijking 2})$$

Hierbij staat PP^{chl-a} voor de chlorofyl-a specifieke Koolstof-fixatie snelheid (in $mg\ C. mg\ chl-a^{-1}.h^{-1}$), P_{max} de fotosynthese die gemeten wordt bij verzadigende lichtintensiteiten, α is de affiniteitsconstante, β de foto-inhibitie constante en I de lichtintensiteit (in $\mu E.m^{-2}.s^{-1}$). Met name de naar biomassa (chl-a) genormaliseerde affiniteit (α) en maximale koolstoffixatiesnelheid (P_{max}) variëren afhankelijk van het seizoen, als gevolg van fysiologische aanpassingen en variaties in de soort samenstelling. Voor de berekening van de dagelijkse primaire productie werd de PP^{chl-a} vermenigvuldigd met de chlorofyl-a concentratie en met de daglengte (conversie van uur naar etmaal). Daarnaast is een correctie voor de respiratie van fytoplankton, om tot een netto primaire productie te komen. De gebruikte correctiefactor is $5\ mg\ C. mg\ chl-a^{-1}.h^{-1}$ (Riegman & Colijn, 1991).

Bij gebrek aan recentere gegevens voor de berekeningen is gebruik gemaakt van seizoens-afhankelijke waarden voor de biomassa specifieke P_{max} en α zoals deze gemeten zijn door Colijn (1983) gedurende de periode 1976-1980 in de oostelijke Waddenzee en de Dollard:

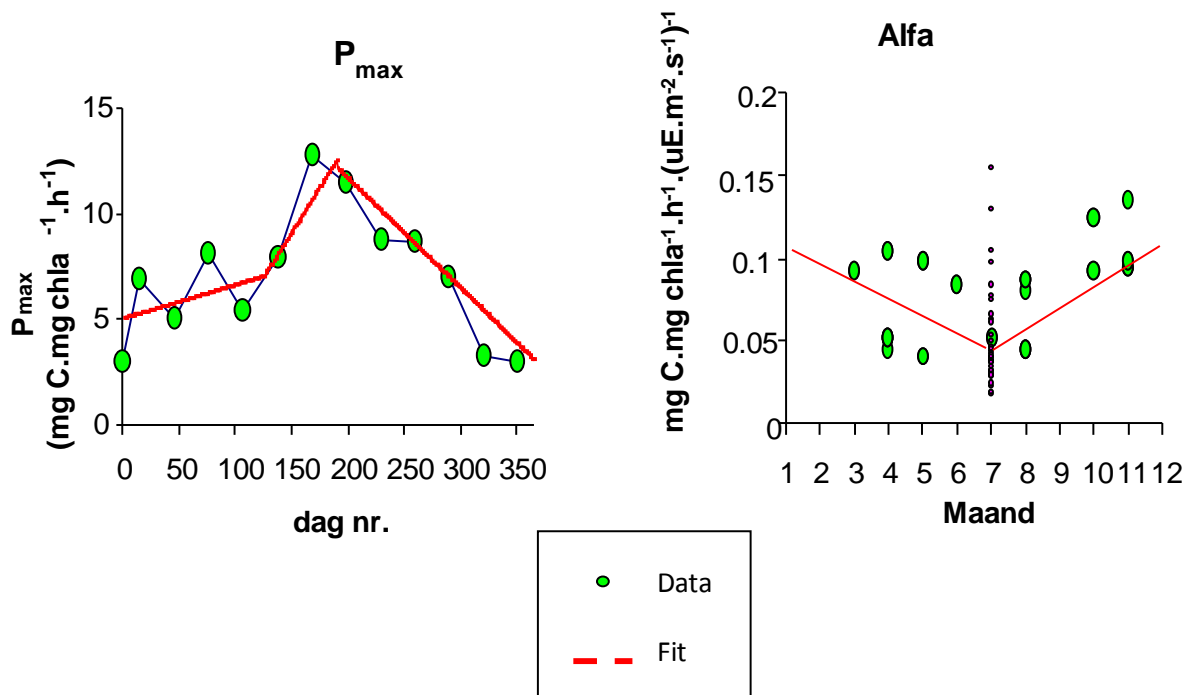


Fig. 3. Seizoens-afhankelijke variatie van fotosynthese parameters (groene symbolen; conform Colijn 1983) zoals gebruikt voor de primaire productie berekeningen (rode lijn is de gebruikte fit voor het rekenmodel). Kleine rode cirkels in rechter grafiek: waarnemingen in Nederlandse deel van de Noordzee (Riegman & Colijn 1991).

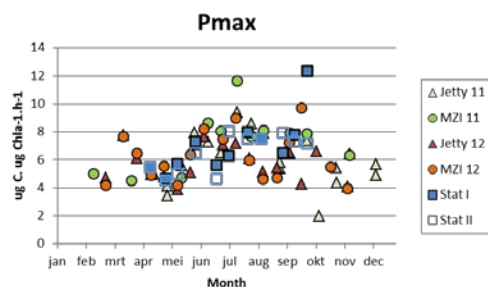


Fig. 4. Chlorofyl-a specifieke waarden voor de maximale fotosynthese capaciteit (Pmax) (a) en lichtaffiniteits-constante (Alfa) (b) in 2011 (in groen), 2012 (in rood/oranje) en 2013 (blauw) bij de Jetty (driehoeken) en bij de MZI (cirkels en vierkanten).

Inherent aan de toegepaste berekeningsmethode is de impliciete aanname dat het seizoens-patroon van de fotosyntheseparameters, zoals waargenomen in de periode 1976 – 1980, in de afgelopen dertig jaar niet wezenlijk veranderd is in de Waddenzee. Metingen aan Marsdiep monsters in 2011-2013 (Kamermaans et al, in prep.) laten zien dat het seizoenspatroon van de biomassa specifieke fotosyntheseparameters in 2011 niet wezenlijk anders zijn dan eind jaren tachtig (Fig. 4).

Correlaties tussen de algen concentratie (chl-a) en de primaire productie (PP) enerzijds, en fosfaat, stikstof, en silicaat anderzijds zijn berekend met een "generalized additive model".

3. Resultaten

3.1. Pelagische Primaire productie

Uit de berekeningen bleek dat de berekende primaire productie sterk afhankelijk is van zowel de chlorofyl-a concentratie als het slibgehalte. Normaliter varieert de uitdoving coëfficiënt (K_d) tussen de 0.6 en 1.2 m^{-1} gedurende het groeiseizoen. Deze variatie is onder meer afhankelijk van het optreden van stormen. Zo kan de primaire productie van jaar tot jaar verschillend beïnvloed worden door meteorologische omstandigheden. Ter illustratie dient Figuur 5. Daaruit blijkt dat de dikte van de fotische zone bij extreme troebelheid kan verminderen van 8 naar 4 meter of nog minder.

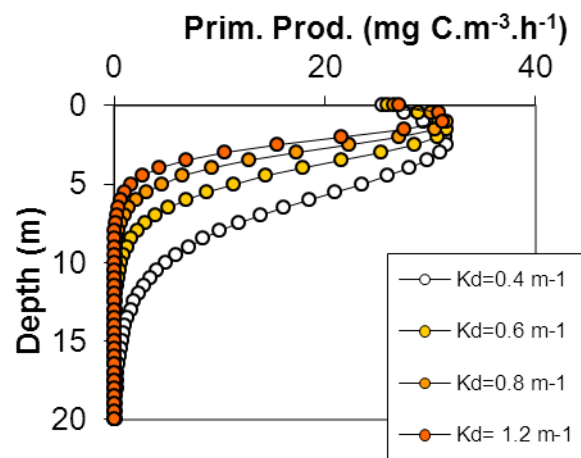


Fig. 5. Invloed van de troebelheid van het water op de diepteverdeling van de primaire productie, berekend met het model voor de westelijke Waddenzee voor een gemiddelde zomerdag rond 12.00 uur.

Een andere parameter die de primaire productie sterk beïnvloedt is het de algen concentratie (chlorofyl-a). In de Waddenzee wordt de algenconcentratie onder meer bepaald door de nutriënten beschikbaarheid. In de jaren tachtig was deze hoog als gevolg van de eutrofiering. Verbeteringen op het gebied van afvalwaterzuivering op het Europese Continent hebben er toe geleid dat vooral de laatste tien jaar de fosfaat en stikstofbelasting van de Waddenzee weer aan het afnemen is. Het effect van deze reductie is waarneembaar in het chlorofyl-a gehalte. Vooral in de zomermaanden, wanneer er voldoende licht beschikbaar is voor de algengroei, raken nutriënten zoals stikstof en fosfaat beperkend voor de algenbiomassa en primaire productie. Daarnaast kan overbegrazing invloed hebben op de biomassa van fytoplankton. Aangezien de zomermaanden ook het meeste relevant zijn voor het kweken van mosselzaad (de installaties worden geplaatst in april en verwijderd in oktober) is het van belang eventuele trends in de primaire productie, en de factoren die daar invloed op hebben, voor de kweekperiode nader te bekijken (zie figuur 6).

WZW

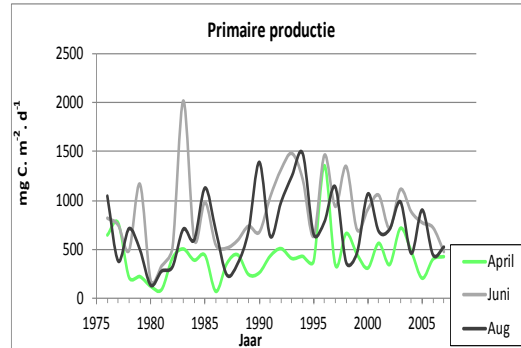
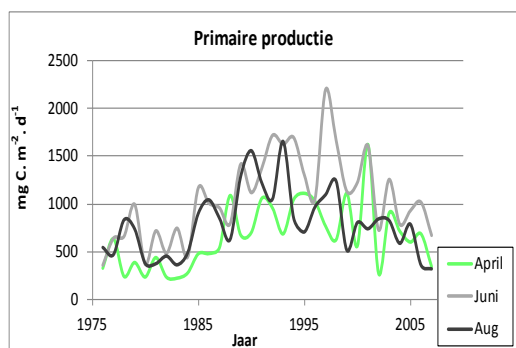
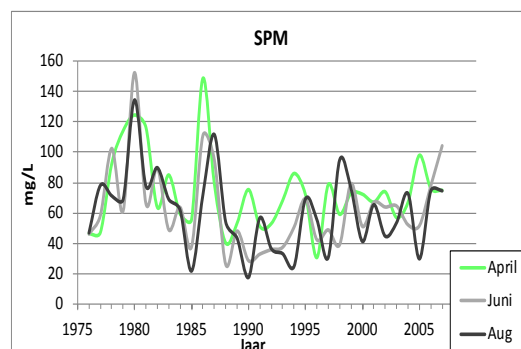
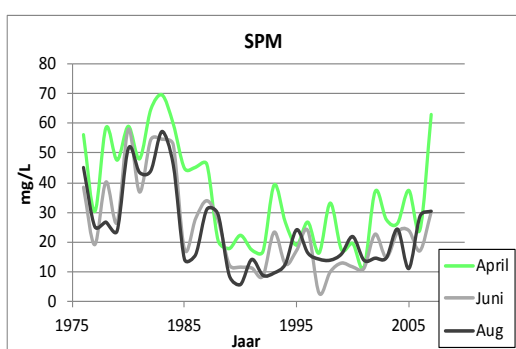
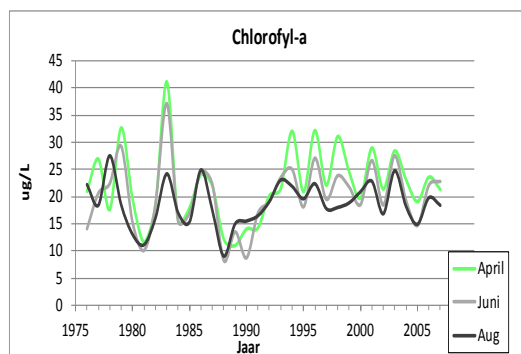
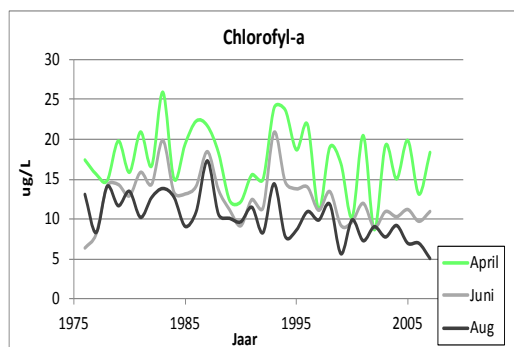


Fig. 6. Lange termijn trends in maandgemiddelde waarden van chlorofyl-a, gesuspendeerd materiaal (SPM) en berekende primaire productie in de westelijke Waddenzee (linker grafieken) en de Oostelijke Waddenzee (rechter grafieken).

In het algemeen zijn de chl-a concentraties in de westelijke Waddenzee lager dan in de Oostelijke Waddenzee. De concentratie van SPM is ook lager in het westelijke gedeelte. Als gevolg daarvan is de beschikbare hoeveelheid licht in de waterkolom juist groter. De primaire productie varieert in beide deelgebieden grofweg tussen de 300 en 1500 $\text{mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. De invloed van de reductie van nutriënten vanaf de begin jaren negentig is vooral waarneembaar tijdens de zomermaanden in de westelijke Waddenzee. Hoge concentraties SPM hebben in de periode 1976 – 1987 geleid tot een relatief lage primaire productie. Vanaf 1985 nam de SPM sterk af en daarmee de primaire productie sterk toe. Na circa 1995 neemt de primaire productie weer af. Dit is het gevolg van een reductie in de algenbiomassa (chl-a) die vooral in de zomermaanden waarneembaar is. Deze daling in algen biomassa wordt toegeschreven aan de afname van de nutriëntconcentraties in het Nederlandse kustwater (Phillippart et al. 2007). Deze daling in zowel nutriënten als chlorofyl is duidelijker waarneembaar in het westelijke dan

in het oostelijke deel van de Waddenzee (Brinkman, 2008). Ook lijkt het SPM gehalte, en daarmee de troebelheid van het water, geleidelijk aan weer toe te nemen in de westelijke Waddenzee.

In de Oostelijke Waddenzee zijn de dalende trends in chl-a en primaire productie minder duidelijk waarneembaar dan in het westelijke gedeelte. Waarschijnlijk is dit het gevolg van de hogere SPM (slib-) gehalten in het water. De benthische productie door microfytobenthos wordt geschat op slechts 15% van de totale primaire productie in de oostelijke Waddenzee (Colijn, 1983). De grens tussen het westelijke en oostelijke gedeelte van de Waddenzee wordt gelegd bij de wantij grens bij Terschelling. Ten oosten daarvan staat de Waddenzee onder invloed van de Eems-Dollard. Dit estuarium is erg troebel. Het feit dat de Eems-Dollard van oorsprong troebeler is dan de Waddenzee wordt veroorzaakt door de geringere diepte: Slib wordt reeds bij lagere stroom- en/of windsnelheden opgewerveld. Het hogere slibgehalte zorgt ervoor dat de groei van algen sterk door de beschikbaarheid van licht beperkt wordt.

De trends in jaargemiddelde waarden voor de primaire productie staan in figuur 7.

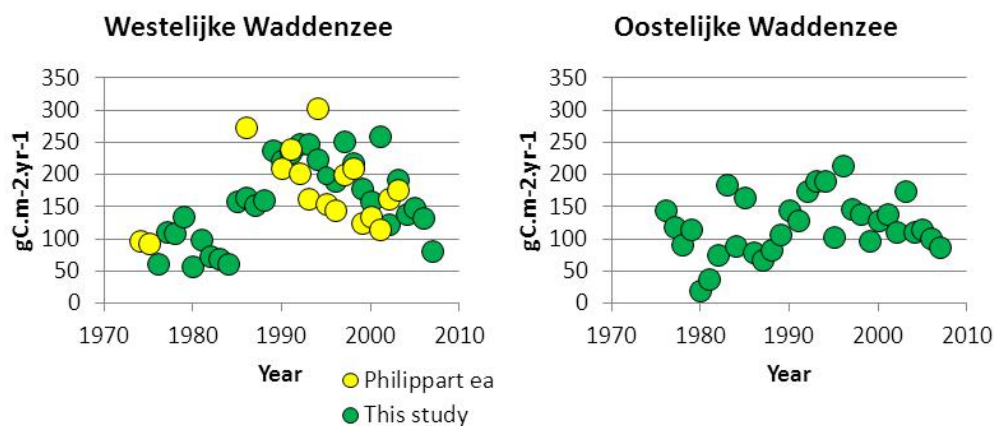


Fig. 7. Jaargemiddelde primaire productie in de westelijke (linker grafiek) en de oostelijke Waddenzee van 1973 tot 2008. Groen: deze studie. Geel: Schatting door Philippart e.a. (2007).

Voor de westelijke Waddenzee ligt de huidige schatting van de primaire productie 9% hoger dan de schattingen gepubliceerd door Philippart e.a. (2007). De berekende trend is evenwel vergelijkbaar. Er kunnen drie perioden onderscheiden worden. De eerste periode tussen 1973 en 1984 kenmerkt zich door een relatief lage primaire productie (waarden tussen de 50 en 150 gC.m⁻².yr⁻¹). In de tweede periode, van 1985 tot 1990, neemt de primaire productie toe. Vanaf 1993 vindt er een geleidelijke afname van de primaire productie plaats. In 2007 was de primaire productie net zo laag als de eind jaren zeventig. In de oostelijk Waddenzee is het patroon iets minder consistent. In de jaren '80 en '81 was er sprake van een zeer lage primaire productie omdat het water bijzonder troebel was.

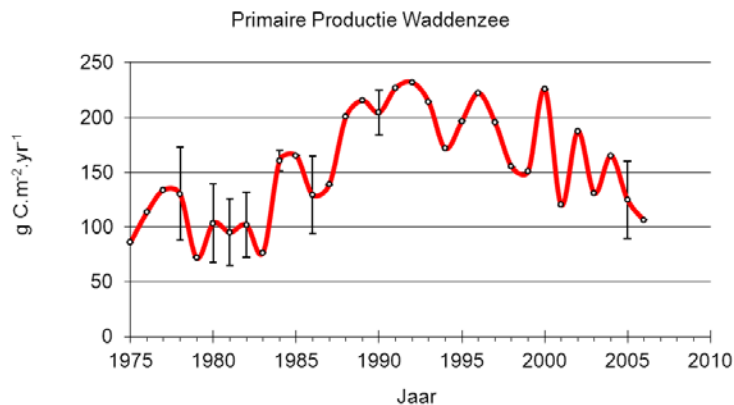


Fig. 8. Berekende jaargemiddelde primaire productie voor de gehele Waddenzee van 1973 tot 2008.

Wat betreft de primaire productie voor de gehele Waddenzee (Fig. 8) valt op dat sinds 2000 er sprake is van een afname van de productiviteit. De relatief lage waarden in de jaren '81-'84 worden veroorzaakt door een verhoogd slibgehalte. Dit verschijnsel is ook in de Nederlandse kustzone waargenomen en blijkt veroorzaakt te zijn door verhoogde baggeractiviteiten nabij de Rotterdamse haven (De Jonge & de Jong, 2002).

3.2. Langetermijnveranderingen in algen

De westelijke en oostelijke Waddenzee verschillen op hoofdlijnen in meerdere opzichten van elkaar (Tabel 1). Het westelijke gedeelte is dieper, en de concentraties van fosfaat en algenbiomassa (chlorofyl-a) zijn lager. Ook is het gemiddelde gehalte aan zwevende stof lager. Hierdoor is er meer licht beschikbaar voor de fotosynthese in het westelijke gedeelte. De primaire productie is ondanks de lagere algenbiomassa, hoger dan in het oostelijke gedeelte. De totale mosseldichtheid is in het westelijke deelgebied iets hoger. Gelet op deze systeemeigenschappen kan gesteld worden dat de oostelijke Waddenzee sterker licht gecontroleerd zal zijn, en de westelijke Waddenzee meer nutriënt gecontroleerd. Met dit inzicht zijn de lange termijn variaties in algenbiomassa's en primaire productie ook beter te verklaren.

Tabel 1. Eigenschappen van de oostelijke en westelijke Waddenzee, jaargemiddelden die vervolgens gemiddeld zijn over een periode van dertig jaar (periode 1978-2008).

Waddenzee			
Gemiddeld over 1976-2007	Oost	West	
Diepte	2.0	3.4	m
o-Fosfaat	52	39	ug/L
Chlorofyl-a	14	9	ug/L
Gesuspendeerd materiaal	85	35	mg/L
Primaire productie	121	159	gC.m ⁻² .yr ⁻¹
Mossel vlees kg/ha	177	195	kg/ha

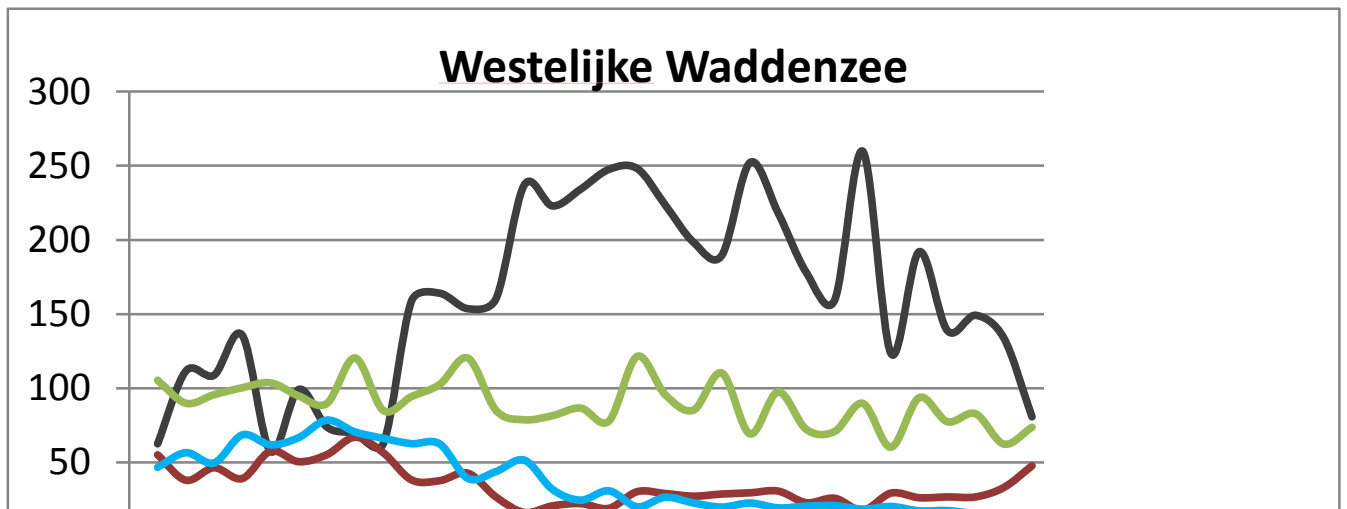


Fig. 9. Lange termijn trends in de westelijke Waddenzee. Jaargemiddelde waarden. Berekende primaire productie uitgedrukt in $gC.m^{-2}.yr^{-1}$, chlorofyl-a in $0.1*ug/L$, SPM in mg/L , ortho-fosfaat in ug/L .

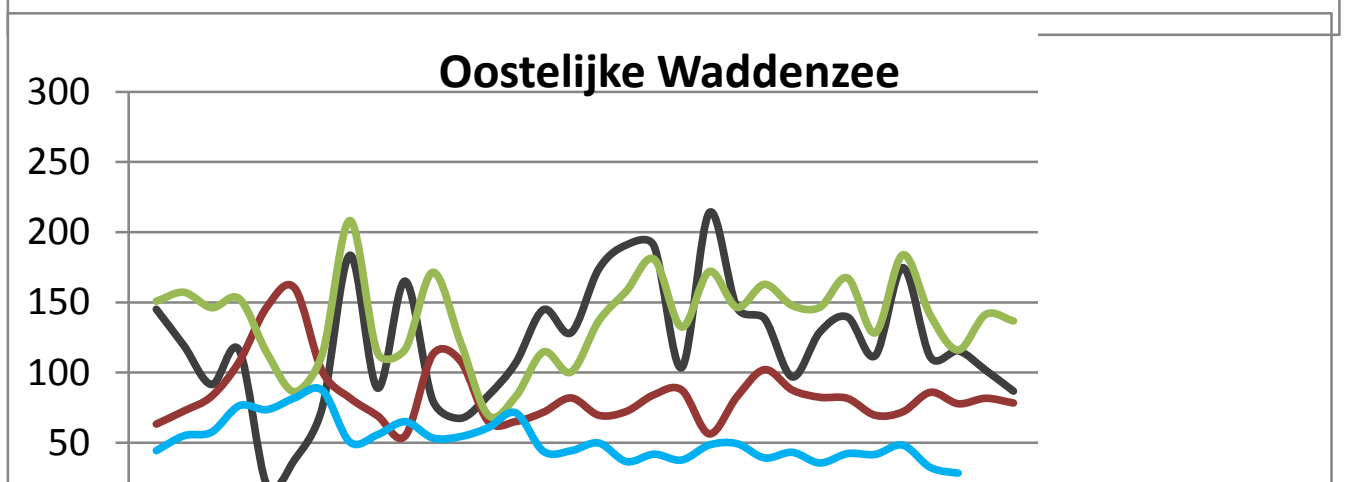


Fig. 10. Lange termijn trends in de oostelijke Waddenzee. Jaargemiddelde waarden. Berekende primaire productie is uitgedrukt in $gC.m^{-2}.yr^{-1}$, chlorofyl-a in $0.1*ug/L$, SPM in mg/L , ortho-fosfaat in ug/L .

Ondanks een daling in het ortho-fosfaatgehalte aan het einde van de jaren tachtig, neemt de primaire productie in de westelijke Waddenzee vanaf 1975 sterk toe (Figuur 9). Dit is het gevolg van een sterke daling in het zwevende stof gehalte waardoor het onderwaterlichtklimaat sterk verbetert. In de jaren tachtig begint de eutrofiëringsbestrijding zichtbaar te worden. Vanaf de jaren negentig begint het fosfaat dermate laag te worden dat ook de algenbiomassa gaat dalen. Daardoor neemt vervolgens ook de primaire productie af. Deze ontwikkeling is vooral de laatste tien jaar zichtbaar. In de oostelijke Waddenzee zijn dezelfde variaties in fosfaat, SPM en chlorofyl-a veel zwakker waarneembaar (Figuur 10).

In het algemeen worden voor de analyse van lange termijn datasets statistische toetsen toegepast die de correlatie tussen verschillende factoren bepaalt. In Tabel 2 staan de correlatie coëfficiënten voor chlorofyl en primaire productie, berekend met een "generalized additive model". De uitkomsten worden uitgedrukt in een waarde die tussen de +1 en -1 liggen. Hoge positieve waarden indiceren een positieve correlatie tussen twee parameters. Lage negatieve waarden zijn daarentegen een indicatie van een sterk negatieve correlatie. Waarden die dicht bij 0 liggen impliceren dat een correlatieve relatie bijzonder zwak of zelfs afwezig is.

Tabel 2. Berekende coëfficiënten voor de correlaties tussen de zomergemiddelde waarden (periode 1978-2007) van de algen concentratie (chl-a) en de berekende primaire productie (PP), met verschillende milieufactoren (t-P: totaal fosfaat, t-N: totaal stikstof, Si: Silicaat). Vet gedrukte getallen: significante correlatie. WWZ: Westelijke Waddenzee. OWZ: Oostelijke Waddenzee.

	Chlorofyl-a		Primaire productie	
	WWZ	OWZ	WWZ	OWZ
t-P	0.73	0.02	-0.46	-0.45
t-N	0.15	0.02	-0.37	-0.27
Si	0.13	-0.33	0.09	-0.28
SPM	0.45	0.13	-0.87	-0.73
Chl-a			-0.05	0.48

In de Westelijke Waddenzee blijkt de algenbiomassa (chlorofyl-a) sterk gecorreleerd te zijn aan fosfaat. Hogere chlorofyl waarden worden ook aangetroffen bij hogere waarden voor gesuspendeerd materiaal, d.w.z. wanneer het water relatief troebel is. (NB. De bijdrage van chlorofyl aan SPM in termen van mg/L is hooguit circa 1 procent, voor het overige bestaat het gesuspendeerd materiaal uit klei en zand deeltjes.) Een positieve correlatie tussen slibgehalte en chlorofyll-a kan het gevolg zijn van fysiologische adaptatie. Bij sub-optimale lichtintensiteiten (veel SPM) bevatten algen meer chl.-a per hoeveelheid beschikbaar nutriënt. In de oostelijke Waddenzee heeft de algenbiomassa weinig of geen correlatie met stikstof, fosfaat en silicaat. Dit duidt op een overmaat aan nutriënten in de zomerperiode, ten opzichte van de beschikbare hoeveelheid licht. De primaire productie is negatief gecorreleerd met de nutriënt concentraties. Een sterke negatieve correlatie tussen de hoeveelheid gesuspendeerd materiaal en de primaire productie is inherent het gevolg van de methode waarop primaire productie is berekend. In het rekenmodel wordt het onderwaterlichtklimaat berekend aan de hand van het SPM. Een hogere waarde voor het SPM leidt automatisch tot een geringere hoeveelheid licht in de waterkolom en lagere primaire productie.

Gelet op de zwakte van statistische toetsen, wat betreft het vermogen om causale verbanden aan te tonen, is het feitelijk onjuist om conclusies te trekken uit variaties die waarneembaar zijn in lange termijn datasets. Omgekeerd, is het wel mogelijk om op basis van bestaande kennis inzake het gedrag van de verschillende componenten in het ecosysteem, uitspraken te doen over mogelijke correlatieve verbanden die gevonden zouden kunnen worden. De westelijke Waddenzee bevat minder slib dan het oostelijk gedeelte. Het water is weliswaar dieper, maar ook veel helderder. Berekent men de gemiddelde hoeveelheid licht in de waterkolom, op basis van de gegeven systeemkarakteristieken (Tabel 1) (berekening volgens Riley 1957), dan blijkt dat er in de westelijke Waddenzee 40% meer licht in de waterkolom beschikbaar is voor de primaire productie dan in het oostelijk gedeelte. Voor de zomermaanden ligt dit getal zelfs nog een factor tien hoger (400%). De beschikbare hoeveelheid nutriënten is met name 's zomers daarentegen veel lager in het westelijk gedeelte. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de westelijke Waddenzee zich in de periode van april tot oktober zal gedragen als een nutriënt gecontroleerd systeem. Hierbij is het fosfaat de belangrijkste biomassa-beperkende factor is voor de algen, gelet op de negatieve correlatie tussen chlorofyl-a en totaal-fosfaat. In de Oostelijke Waddenzee is eerder sprake van lichtbeperkte primaire productie. Dit verklaart waarom er een negatieve correlatie lijkt te bestaan tussen de nutriënten concentraties en de hoeveelheid chlorofyl-a. In jaren waar relatief weinig licht beschikbaar is voor de algengroei, worden minder nutriënten geconsumeerd en via algenbiomassa geëxporteerd naar de bodem. De totale hoeveelheid nutriënten in de waterkolom is dan hoger dan in jaren wanneer er veel licht beschikbaar is.

4. Conclusies

In dit rapport is een berekening gepresenteerd van de primaire productie in de Waddenzee. Een belangrijke parameter is het gesuspendeerd materiaal. De gebruikte meetgegevens van Rijkswaterstaat komen goed overeen met een onafhankelijke dataset (Cadee & Hegeman 2002). Bij de berekening van het onderwaterlichtklimaat is gebruik gemaakt van een algoritme dat niet alleen gemeten is in de Waddenzee (Colijn 1983), maar ook overeenkomt met bevindingen op andere locaties (Holmes et al. 1970). De berekende primaire productie getallen komen goed overeen met de resultaten van Philippart et al. (2007), welke gebaseerd zijn op onafhankelijke metingen door het NIOZ in het Marsdiep. Een belangrijkste aanname die niet geverifieerd kon worden door een gebrek aan meetgegevens, is dat de seizoensafhankelijke variatie in de fotosynthese parameters P_{max} en α in de afgelopen dertig jaar niet veranderd is. Het is bekend dat de soortensamenstelling van algen in de westelijke Waddenzee een aantal keren binnen de onderzoeksperiode aan verandering onderhevig is geweest (Philippart et al., 2000). Dit kan een effect hebben gehad op de chlorofyl-a specifieke fotosynthese karakteristieken. Recente, niet gepubliceerde, metingen in de oostelijke Waddenzee geven aan dat de fotosynthese karakteristieken van het fytoplankton minder dan 10 % veranderd is t.o.v. dertig jaar geleden.

Uit de berekeningen blijkt dat het slibgehalte grote invloed heeft op de primaire productie. Dit is vooral het geval in de oostelijke Waddenzee. In dit gedeelte is betrekkelijk weinig variatie in de jaarlijkse primaire productie. Als gevolg van de relatief hoge slibgehaltenes is er ook weinig invloed waarneembaar van variaties in de beschikbaarheid van nutriënten. Er lijkt sprake te zijn van lichtbeperkte groei van algen gedurende het groeizeizoen (april t/m september). Menselijke activiteiten die een verhogend hebben op het slibgehalte, zoals baggeren, mechanische schelpdiervisserij, of zandsuppletie kunnen een reducerend effect hebben op de primaire productie, en daarmee de draagkracht van de oostelijke Waddenzee. De westelijke Waddenzee bevat minder slib. Ondanks de grotere diepte is er meer licht beschikbaar voor de algengroei. Vooral 's zomers is er sprake van nutriënt gelimiteerde primaire productie. Dit houdt in dat een verdere reductie in de eutrofiering kan leiden tot lagere primaire productie.

De huidige studie leidt tot een aantal conclusies die belangrijk zijn voor het beheer en beleidsdoelstellingen. Ten aanzien van de EU KRW zal gelet moeten worden op een mogelijke overschrijding van de chlorofyl-a norm. De Goede Ecologische Toestand wordt bereikt bij een zomergemiddelde chlorofyl-a concentratie van maximaal $10.5 \mu\text{g L}^{-1}$. In het afgelopen decennium was het zomergemiddelde chlorofyl-a $11.1 \mu\text{g L}^{-1}$ in de westelijke Waddenzee en $21.7 \mu\text{g L}^{-1}$ in de oostelijke Waddenzee.

In hoeverre variaties in de primaire productie een mogelijk effect zullen hebben op de draagkracht voor schelpdieren is verder onderzocht met behulp van een model (Brinkman 2013).

5. Literatuur

- Brinkman, AG (2008) Nutrient- en chlorofylgehalten in het westelijke en oostelijke deel van de Nederlandse Waddenzee; waarden en trends tussen 1980 en 2005 en mogelijke oorzaken daarvan. Wageningen IMARES Rapport C112/09: 370 pp.
- Brinkman A.G. (2013) Modelling the effects of mussel seed collectors on the Wadden Sea ecosystem. IMARES Rapport C061/13
- Cadee, G. C. and J. Hegeman (2002). Phytoplankton in the Marsdiep at the end of the 20th century; 30 years monitoring biomass, primary production, and *Phaeocystis* blooms. *Journal of Sea Research* 48(2): 97-110
- Colijn, F. (1983). Primary production in the Ems-Dollard Estuary. Thesis University of Groningen
- Colijn, F. and V.N. De Jonge (1984). Primary production of microphytobenthos in the Ems-Dollard Estuary. *Marine Ecology Progress Series* 14 (1984), pp. 185–196.
- Colijn, F., W. Admiraal, et al. (1987). Primary Production in a Turbid Estuary, the Ems-Dollard Fieldand Model Studies. *Continental Shelf Research* 7(11-12): 1405-1409.
- Holmes, D. A., P. V. Avizonis, et al. (1970). On-Axis Irradiance of a Focused, Apertured Gaussian Beam. *Applied Optics* 9(9): 2179-&.
- Jonge, V.N. de & de Jong, D.J. (2002). ' Global Change ' Impact of Inter-Annual Variation in Water Discharge as a Driving Factor to Dredging and Spoil Disposal in the River Rhine System and of Turbidity in the Wadden Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 55: 969-991.
- Kirk, J. T. O. (1983). Light and photosynthesis in aquatic ecosystems.
- Philippart, C. J. M. et al. (2000). Long-term phytoplankton-nutrient interactions in a shallow coast sea: Algal community structure, nutrient budgets, and denitrification potential. *Limnology and Oceanography* 45(1): 131-144.
- Philippart, C. J. M. et al. (2007). Impacts of Nutrient Reduction on coastal Communities. *Ecosystems* 10: 95-118.
- Platt, T., Gallegos, C.L. & Harrison, W.G. (1980). Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton. *J. Mar. Res.* 38: 687-701
- Riegman, R. and Colijn, F. (1991) Evaluation of measurements and calculation of primary production in the Dogger Bank area (North Sea) in summer 1988. *Marine Ecology Progress Series* 69: 125-132
- Riegman, R. et al. (1993). Size-Differential Control of Phytoplankton and the Structure of Plankton Communities. *Netherlands Journal of Sea Research* 31(3): 255-265.
- Riley, G.A. (1957). Phytoplankton of the North Central Sargasso Sea, 1950-52. *Limnology & Oceanography* 2: 252-270.

6. Kwaliteitsborging

IMARES beschikt over een ISO 9001:2008 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem (certificaatnummer: 57846-2009-AQ-NLD-RvA). Dit certificaat is geldig tot 15 december 2012. De organisatie is gecertificeerd sinds 27 februari 2001. De certificering is uitgevoerd door DNV Certification B.V. Daarnaast beschikt het chemisch laboratorium van de afdeling Milieu over een NEN-EN-ISO/IEC 17025:2005 accreditatie voor testlaboratoria met nummer L097. Deze accreditatie is geldig tot 27 maart 2013 en is voor het eerst verleend op 27 maart 1997; deze accreditatie is verleend door de Raad voor Accreditatie.

7. Dankwoord

Graag bedank ik Peter Herman, Aad Smaal en Pauline Kamermans voor commentaar op eerdere versies van dit rapport.

Verantwoording

Rapport C186/13

Projectnummer: 4308301013

Dit rapport is met grote zorgvuldigheid tot stand gekomen. De wetenschappelijke kwaliteit is intern getoetst door een collega-onderzoeker en het betreffende afdelingshoofd van IMARES.

Akkoord: Aad Smaal
senior onderzoeker

Handtekening:



Datum: 18 april 2014

Akkoord: Jakob Asjes
Hoofd afdeling Ecosystemen

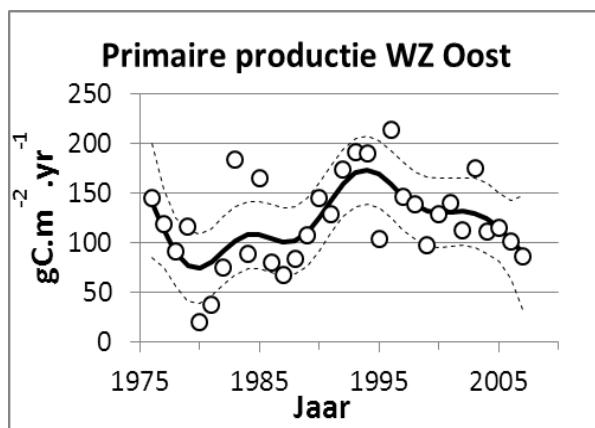
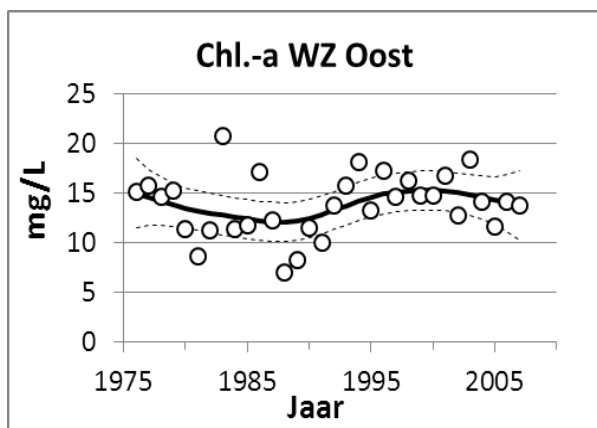
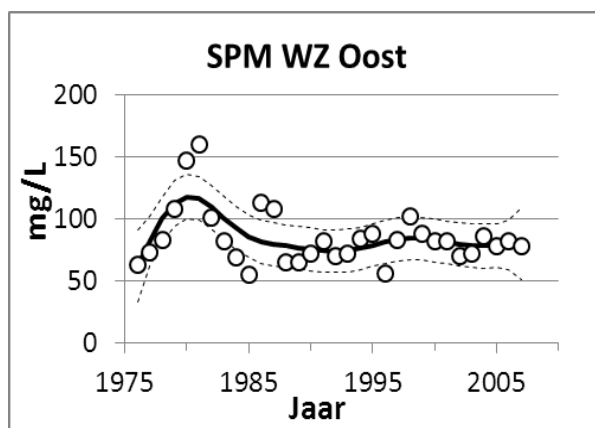
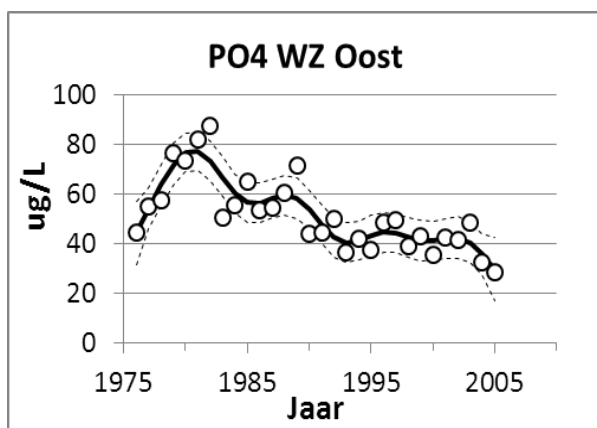
Handtekening:



Datum: 18 april 2014

Bijlage A. Trends in jaargemiddelde meetwaarden

Bijlage A1. Trends in jaargemiddelde meetwaarden in de westelijke Waddenzee (RWS data, PP berekeningen; gegevens Vogels van Brinkman (pers.commun.), berekend met een 'generalized additive model'. Stippellijnen geven 95% betrouwbaarheidsinterval aan.



Bijlage A2. Trends in jaargemiddelde meetwaarden in de oostelijke Waddenzee, berekend met een 'generalized additive model'. Gegevensbron als in Bijlage A1). Stippellijnen geven 95% betrouwbaarheidsinterval aan.

