

Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde Deelrapport 6: effecten op primaire productie van verschillende scenario's voor het terugstorten van slib.

dr. ir. Tom Cox, prof. dr. Patrick Meire

Nota ECOBE 016-R188
Antwerpen, November 2015

Colofon

Nota Ecosystem Management Research Group ECOBE 015-R188

Tekst: Tom Cox

Dit rapport dient als volgt geciteerd te worden:

Cox, T.; Meire, P. (2015) Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde. Deelrapport 6: effecten op primaire productie van verschillende scenario's voor het terugstorten van slib, Universiteit Antwerpen, onderzoeksgroep Ecosysteembeheer, ECOBE 016-R188.

University of Antwerp "Campus Drie Eiken"
Prof. Dr. P. Meire
Department of Biology
Ecosystem Management Research Group
Universiteitsplein 1
BE-2610 Antwerpen (Wilrijk)
Tel.+32 3 265 22 64

e-mail: Patrick.Meire@uantwerpen.be
<http://www.uantwerpen.be/ecobe>

Inhoud

1. Inleiding.....	4
1.1 Situering.....	4
1.2 Studie-opzet.....	4
1.3 Beknopte fenomenologie van primaire productie in de Beneden-Zeeschelde en Westerschelde...6	
2. Impact wijziging in SPM concentratie op primaire productie.....	8
2.1. Statische berekening.....	9
2.1.1. Achtergrond.....	9
2.1.2. Primaire productie in de Beneden-Zeeschelde en de Westerschelde.....	10
2.1.3. Impact stortscenario's op primaire productie.....	11
2.1.4. Conclusies en discussie statische berekening.....	14
2.2. Dynamische berekening.....	14
2.2.1. Ecosysteemmodel.....	14
2.2.2 Parameterisatie van primaire productie en begrazing door zoöplankton.....	15
2.2.3 Impact stortscenario's op primaire productie.....	23
2.2.4 Discussie en conclusies dynamische berekening.....	27
3. Algemene discussie en conclusies.....	27
Referenties.....	30

1. Inleiding

1.1 Situering

Om de toegankelijkheid naar de Scheldehavens te garanderen worden quasi continu onderhoudsbaggerwerken uitgevoerd. De uitgebaggerde specie wordt niet uit het systeem gehaald, maar wordt teruggestort. Binnen de huidige vergunning wordt zandige specie teruggestort in de Schaar van Ouden Doel (waar ook zandwinning plaatsvindt) en slibrijke specie ter hoogte van de Punt van Melsele (linkeroever) en Plaat van Boomke, Oosterweel en Vlake van Hoboken (rechteroever). De huidige vergunning voor baggeren en storten in de Beneden-Zeeschelde loopt tot december 2017. Voor de Westerschelde werd in 2013 een verlenging aangevraagd, dewelke in 2014 werd toegekend en loopt tot februari 2022.

Ten behoeve van een nieuwe vergunning voor de werken in de Beneden-Zeeschelde dient onderzocht te worden hoe deze stortstrategie zo optimaal mogelijk ingevuld kan worden, rekening houdend met toekomstige ontwikkelingen zoals zandwinstrategie, aanleg Oosterweeltunnel, risico op regime shift naar hyptertroebelheid, en de ecologische impact. Voorliggend deelrapport beschrijft de resultaten van de doorrekening van de impact op primaire productie van verschillende scenario's voor het terugstorten van slibrijke specie. Het vertrekpunt van deze studie is de gesimuleerde impact van de verschillende scenario's op de concentratie gesuspendeerd materiaal (SPM), uitgevoerd door het Waterbouwkundig Laboratorium (Coen *et al*, 2015b).

1.2 Studie-opzet

Om de impact op primaire productie van een wijziging in stortstrategie inzichtelijk te maken en in te schatten wordt in deze studie een tweeledige aanpak gevolgd: een statische, data-gebaseerde aanpak en een dynamische, model-gebaseerde. Het voordeel van de statische aanpak is de eenvoud. Eerst tonen we aan dat een relatieve stijging of daling van de lichtextinctie in de waterkolom zich in eerste orde vertaalt in evenredige relatieve daling of stijging van de primaire productie (wanneer we de biomassa constant veronderstellen). Daarna laten we zien dat de voorliggende scenario's netto een daling van de primaire productie veroorzaken aangezien ze een stijging van de troebelheid inhouden in zones waar de productiviteit en de watervolumes hoog zijn, en een daling van de troebelheid in zones waar de productiviteit laag is en ook de watervolumes minder groot zijn.

Het nadeel van de statische aanpak is dat deze berekening inconsistent is: als de primaire productie wijzigt zal immers ook de biomassa-opbouw wijzigen. Dit zorgt voor een positieve terugkoppeling: grotere productiviteit = hogere biomassa = nog hogere productiviteit, enz. Met de model-gebaseerde aanpak rekenen we dit wel dynamisch door. Het nadeel van de model-gebaseerde aanpak is dat het resultaat afhankelijk is, zij het beperkt, van een aantal parameters die we enkel via calibratie kunnen bepalen (dit is uiteraard het nadeel van zowat elke modelstudie).

1.3 Beknopte fenomenologie van primaire productie in de Beneden-Zeeschelde en Westerschelde

Onder primaire productie verstaan we de opbouw van biomassa door fotosynthetische organismen¹. In het Schelde-estuarium komt het gros van deze primaire productie voor rekening van het fytoplankton, i.e. in het water zwevende micro-algen. Het fytoplankton vormt een belangrijke basis van de voedselketen: het wordt begraasd door zoöplankton, wat op zijn beurt het voedsel is voor hogere organismen.

Net als alle groene planten, heeft fytoplankton licht nodig om te groeien en suikers op te bouwen d.m.v. fotosynthese. De benodigde voedingsstoffen (of nutriënten) zijn in estuaria van nature abundant aanwezig. In estuaria zoals de Schelde met een sterk verhoogde input van organisch materiaal en nutriënten door de hoge bevolkingsdichtheid en de landbouwactiviteiten is dit helemaal het geval. De bepalende factor voor de primaire productie in de Schelde is daarom de hoeveelheid beschikbaar licht in de waterkolom. Het lichtklimaat in de waterkolom is afhankelijk van de hoeveelheid zonlicht boven water, en van de eigenschappen van de waterkolom. Enerzijds is de diepte tot waar licht kan doordringen – de eufotische diepte – van belang. Anderzijds speelt de diepte waarover het fytoplankton wordt gemengd in de waterkolom – de mengdiepte – een rol. Behalve de lichtbeschikbaarheid, die de maximale groeisnelheid van het fytoplankton in bepaalde zones bepaalt, zijn ook de fysische transportprocessen een bepalende factor voor de hoeveelheid biomassa die opgebouwd wordt. Tot slot speelt ook begrazing door zoöplankton een rol.

Primaire productie wordt in het Schelde-estuarium opgevolgd binnen Moneos. Een uitgebreide beschrijving van de primaire productie en gerelateerde parameters zoals chlorophyl concentratie en lichtextinctie in de waterkolom, is te vinden in de OMES rapporten (Maris et al, 2015). Een beschrijving van de recente evoluties in primaire productie in de Beneden-Zeeschelde en de Westerschelde is terug te vinden in Kromkamp et al (2014).

Grosso modo zorgt de afhankelijkheid van lichtbeschikbaarheid voor het volgende patroon in de Schelde. Hoewel de Boven-Zeeschelde behoorlijk troebel is, is de primaire productie in deze zone toch hoog wegens de geringe diepte en geringe bovenafvoer. Ook in de Westerschelde vindt veel productie plaats maar om tegenovergestelde redenen: het estuarium is er dieper maar de lichtbeschikbaarheid hoger wegens de beperktere troebelheid. In de Beneden-Zeeschelde daarentegen zijn de omstandigheden voor fotosynthese veel minder gunstig. Zowel troebelheid als diepte zijn er hoog. Dit was waarschijnlijk van nature reeds het geval en door menselijke ingrepen versterkt. Enerzijds door historische en recente morfologische en hydraulische ingrepen (inpolderingen, verdiepingen, wijzigingen in bovenafvoer) die het transport van sediment doorheen het estuarium hebben beïnvloed, anderzijds door rechtstreekse impact op de concentratie zwevende stof door terugstorten van baggerspecie.

1 Primaire productie is dus het *proces* dat leidt tot opbouw van biomassa. Merk op ook andere processen de biomassa beïnvloeden, bv begrazing, uitspoeling. Een lage biomassa kan dus het gevolg zijn van lage primaire productie of van hoge begrazing of uitspoeling. Daarom is de biomassa op zich geen goeie maat voor de productiviteit van een systeem.

Sowieso is primaire productie een dynamisch gegeven. Aangezien ze afhankelijk is van lichtinstraling, en de opbouw van biomassa ook gecontroleerd wordt door de afvoerdebieten, is de primaire productie variabel van jaar tot jaar. Het seizoenale karakter van de lichtinstraling zorgt dan weer voor een overeenkomstige seizoenaliteit in de primaire productie. Wanneer de zoöplankton-populatie zich voldoende kan ontwikkelen zorgt begrazing voor een karakteristieke lente-bloei: eerst zorgt de toenemende lichtbeschikbaarheid voor een exponentiële groei van het fytoplankton, de daaropvolgende opbouw van een zoöplanktonpopulatie zorgt ervoor dat deze bloei snel weer weggegraasd wordt. Zo'n sterk gepiekte lente-bloei wordt inderdaad waargenomen in de chlorofyl a concentraties in de Westerschelde en in de meer stroomafwaartse zone van de Beneden-Zeeschelde. In de Boven-Zeeschelde zien we zo'n lentebloei niet: de algenbloei is daar uitgesmeerd over een veel groter gedeelte van het jaar. Het lijkt er dan ook op dat de zoöplanktonpopulatie in de Boven-Zeeschelde (nog?) niet in staat is om de fytoplanktonbloei weg te grazen. Wat hiervoor de reden is, en of dit slechts een overgangssituatie is in de evolutie naar verbeterde waterkwaliteit is op dit moment niet gekend. Wel zeker is dat ook in de Boven-Zeeschelde de zoöplankton-populatie in recente jaren sterk is toegenomen (sinds 2008).

Het Schelde-ecosysteem is bovendien in continue verandering is. Een belangrijke trend is de algehele verbetering in de waterkwaliteit. Deze heeft in de vroege jaren 2000 voor een regime shift² van in de Boven-Zeeschelde (BoZS) gezorgd (Cox et al, 2009). De input van ammonium en organisch materiaal viel toen onder een bepaalde drempel, waardoor zuurstofproductie door fytoplankton de overhand kon halen op zuurstofconsumptie door respiratie en nitrificatie. Daardoor veranderde de BoZS van een systeem met amper primaire productie naar een systeem met uitzonderlijk hoge primaire productie. Dit terwijl de lichtbeschikbaarheid en de uitspoeling niet wijzigden.

De reeds genoemde toename in zoöplanktonpopulatie zal onvermijdelijk een effect hebben op de biomassa van fytoplankton. Het is een open vraag of toekomstige evoluties in het estuarium, bv. een verdere verbetering van de waterkwaliteit, een verdere verhoging van zoöplankton-populatie zal veroorzaken. Een andere recente verandering werd waargenomen in de Westerschelde en de meest stroomafwaartse zone van de Beneden-Zeeschelde. Daar wordt tegenwoordig een sterke lentepiek waargenomen. Deze treedt pas op sinds 2008 (Kromkamp et al, 2014). De oorzaak is tot op vandaag niet gekend. Het is duidelijk dat in zo'n wijzigende context slechts voorwaardelijke uitspraken kunnen worden gedaan over het mogelijk effect van veranderingen in SPM-concentraties op primaire productie.

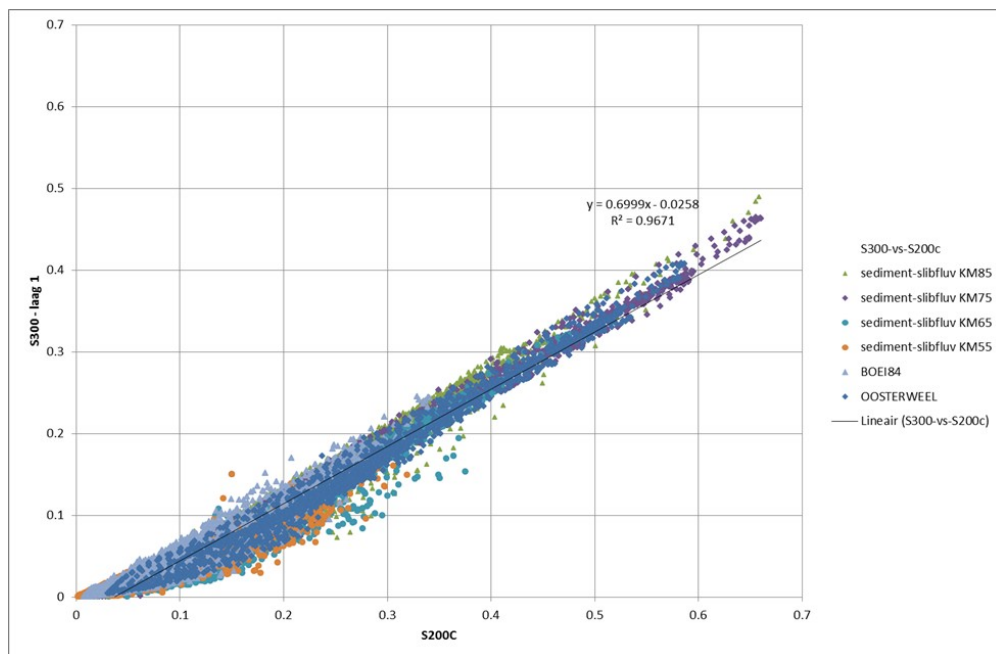
2 Een regime shift is een structurele wijziging in het gedrag van een dynamisch systeem, veroorzaakt door een of meerdere controleparameters die een drempelwaarde overschrijden. De hier beschreven regime shift in de Boven-Zeeschelde heeft niets te maken met de eerder vernoemde regime shift naar hypertroebelheid.

2. Impact wijziging in SPM concentratie op primaire productie

De definities van de alternatieve scenario's voor het terugstorten van slib zijn te vinden in Coen et al, (2015a,b). In deze deelstudie focussen we ons specifiek op de scenario's S422 (Dichtbij), S423 (Afwaarts I), S424 (Afwaarts II), S428 (Huidig + dichtbij opwaarts), S429 (Huidig + dichtbij afwaarts) en S434 (Huidig + dichtbij opwaarts en afwaarts). Deze worden afgewogen t.o.v. de referentiesimulatie S421 die de huidige situatie simuleert. Voor het doorrekenen naar primaire productie worden de simulatieresultaten van de slibconcentraties uitgemiddeld over de simulatieperiode. Dit zijn resultaten van een diepte-gemiddeld model. Primaire productie speelt zich echter af in het bovenste deel van de waterkolom (In de Schelde is dit, afhankelijk van de SPM concentratie, in de bovenste 0.5 tot 2m). Hiertoe worden de dieptegemiddelde simulatieresultaten omgerekend naar oppervlakteconcentraties

$$SPM^{Opp} = 0.7 * SPM \text{ [depth averaged]} - 0.0258$$

Dit verband werd opgesteld door een beperkte periode door te rekenen met een 3D-model, en de concentraties in de bovenste gesimuleerde laag uit te zetten ten opzichte van de simulatieresultaten met het 2D model (Figuur 1).



Figuur 1 Verband tussen SPM concentratie in bovenste simulatielaag van 3D model en dieptegemiddelde concentratie uit 2D model

2.1. Statistische berekening

2.1.1. Achtergrond

Bij constante biomassa B kan de dieptegemiddelde productie GPP in een balkvormige waterkolom met diepte d berekend worden als

$$\begin{aligned} GPP(t) &= \frac{B}{d} \mu(t) \\ \mu(t) &= \int_0^d \mu(z, t) dz \\ \mu(z, t) &= P_m \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha E(z, t)}{P_m}\right) \right) \\ E(z, t) &= E_0(t) \exp(-k_d z) \end{aligned}$$

Hierbij veronderstellen we een typische Webb-Platt respons van primaire productie op lichtbeschikbaarheid E met fotosynthetische parameters α en P_m . Lichtbeschikbaarheid op diepte z wordt berekend uit de oppervlakte lichtinstraling E_0 met een Lambert-Beer exponentiële afnemende lichtbeschikbaarheid met lichtextinctie-coëfficiënt k_d .

Wanneer de diepte van het systeem groot genoeg is (bv. groter dan de diepte waarbij er nog 1% van het ingestraalde licht doordringt) kan in de bovenstaande integraal de bovengrens vervangen worden door oneindig. Dat is in de Schelde bijna altijd en overal het geval. In dat geval volgt uit substitutie van de de integratievariabele in bovenstaande integraal door $z' = k_d z$ dat de dieptegemiddelde productie omgekeerd evenredig schaalst met k_d . Evenzo volgt hieruit dat een procentuele toename of afname van k_d resulteert in een proportionele afname of toename van de dieptegemiddelde productie. We merken op dat dit resultaat essentieel volgt uit het feit dat k_d enkel voorkomt als als het product $k_d z$, en dus niet afhankelijk is van de functionele respons van primaire productie op lichtbeschikbaarheid. Het resultaat geldt dus ook voor andere dan Webb-Platt respons.

De lichtextinctie wordt in de Schelde bijna volledig bepaald door de SPM-concentratie. In de OMES monitoring wordt k_d rechtstreeks gemeten. Uit een analyse van alle data OMES-data volgt het volgende verband tussen k_d en SPM (Renquet, 2014)

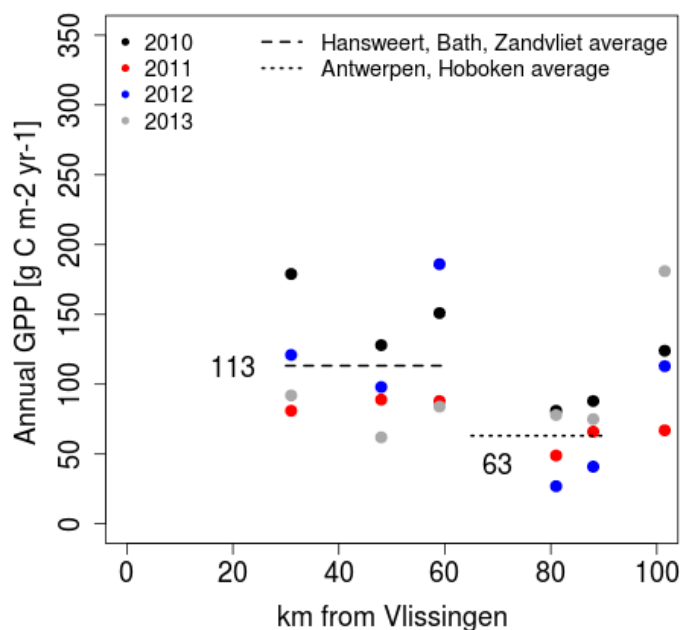
$$k_d = 0.04 * SPM + 2.22$$

Met bovenstaande kan dus een eenvoudige eerste orde berekening gemaakt worden van de impact van gewijzigde SPM-concentraties op primaire productie. Uit de wijziging van SPM-concentraties berekenen we de gewijzigde k_d . Een procentuele toename (of afname) van k_d resulteert dan in een procentuele afname (of toename) van dezelfde grootte van de dieptegemiddelde productie.

2.1.2. Primaire productie in de Beneden-Zeeschelde en de Westerschelde

Een beschrijving van de recente evoluties in primaire productie in de Beneden-Zeeschelde en de Westerschelde is terug te vinden in Kromkamp et al (2014). Dit rapport is gebaseerd op rechtstreekse metingen van de productiviteit met behulp van ^{14}C -incubaties, zoals deze worden uitgevoerd binnen OMES en Moneos. Uit deze incubaties worden de fotosynthetische parameters bepaald die gelden voor de fytoplanktonpopulatie, waarbij een Eilers-Peeters respons verondersteld wordt tussen primaire productie en lichtbeschikbaarheid. Deze worden doorgerekend naar dagproducties m.b.v. de opgemeten lichtextincties, lichtinstraling en de lokale bathymetrie (gemiddeld over een Omes-compartiment). Jaarproducties worden berekend door de opgemeten lichtextinctie en chlorofyl a concentratie te interpoleren tussen de metingen. In figuur 2 worden de berekende jaarlijkse producties uit dat rapport van 2010 tot 2013 weergegeven voor de stations binnen het modeldomein van de SPM simulaties die door WL zijn uitgevoerd, zijnde Hansweert, Bath, Zandvliet, Antwerpen en Hoboken. Merk op dat hier de gebruikelijke oppervlakte-specifieke producties worden weergegeven, m.a.w. de productie is gesommeerd over de waterkolom.

Van figuur 2 lezen we af dat de jaargemiddelde productie bij Antwerpen en Hoboken beduidend lager is dan in de meer stroomafwaartse stations. Gemiddeld over de jaren en over de stations is de productiviteit er ongeveer de helft van de meer stroomafwaartse stations. Deze stations liggen in de zone waar zowel de troebelheid als de waterdiepte hoog zijn.



Figuur 2 Jaargemiddelde oppervlakte-specifieke producties van 2010-2013. Uit Kromkamp et al (2014)

We merken op dat er in de zone tussen Antwerpen en Zandvliet geen ^{14}C – incubaties gebeuren, waardoor we op basis van deze metingen niet precies kunnen zeggen waar de productiviteit opnieuw begint toe te nemen. Voor de eenvoud zullen we in de statische berekening ervan uitgaan dat de oppervlakte-specifieke productie in de referentiesituatie tussen Hoboken en Zandvliet constant is en gelijk aan de 2010-2013 gemiddelde waarde voor Antwerpen en Hoboken, $63 \text{ gC m}^{-2} \text{ j}^{-1}$. Overeenkomstig stellen we de productie van Zandvliet tot Hansweert in de referentiesituatie gelijk aan $113 \text{ gC m}^{-2} \text{ j}^{-1}$.

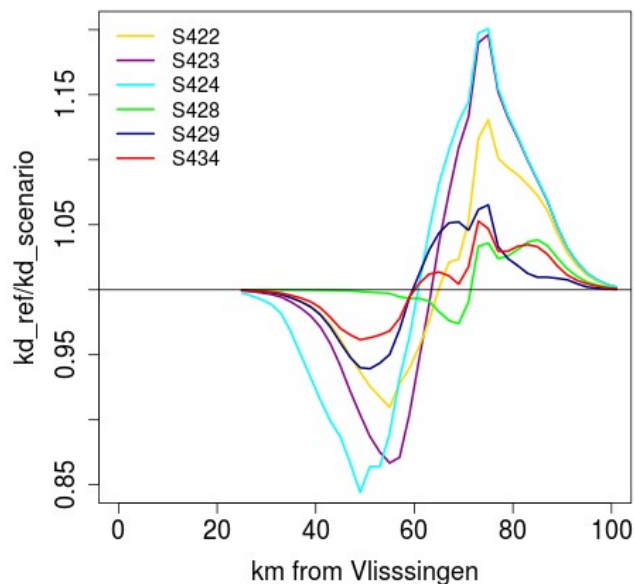
De totale productie in de zone tussen Hoboken en Hansweert berekenen we met de gewogen som:

$$\text{GPP}^{\text{Tot}} = \sum_i S_i \cdot \text{GPP}_i$$

Deze totale productie is in de referentiesituatie gelijk aan $8.4 \text{ kton C j}^{-1}$. De gemiddelde oppervlakte-specifieke productie van Hoboken tot Hansweert is dan $99.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ j}^{-1}$. De oppervlaktes in deze berekening zijn de vrije-wateroppervlaktes bij gemiddelde getij in OMES-compartimenten 5 tot 8 voor de zone Zandvliet tot Hansweert, en compartimenten 9 tot 12 voor de zone van Zandvliet tot Hoboken.

2.1.3. Impact stortscenario's op primaire productie

In figuur 3 wordt de gemiddelde verhouding weergegeven van k_d in het gesimuleerde referentiescenario t.o.v. de verschillende stortscenario's. Deze verhouding is berekend door eerst de gesimuleerde SPM-concentraties (discrete uitvoerpunten) om te rekenen naar k_d met de hierboven vermelde formules. Daarna is op elk tijdstip de ratio berekend, en die ratio is vervolgens uitgemiddeld over de hele simulatieperiode. Uit figuur 3 valt duidelijk af te lezen dat alle scenario's voor een verbetering van het lichtklimaat zorgen in de meest stroomopwaartse zone (ruwweg tussen km 60 en km 100) en een verslechtering in de meer stroomafwaartse zone (ruwweg tussen km 20 en km 60).



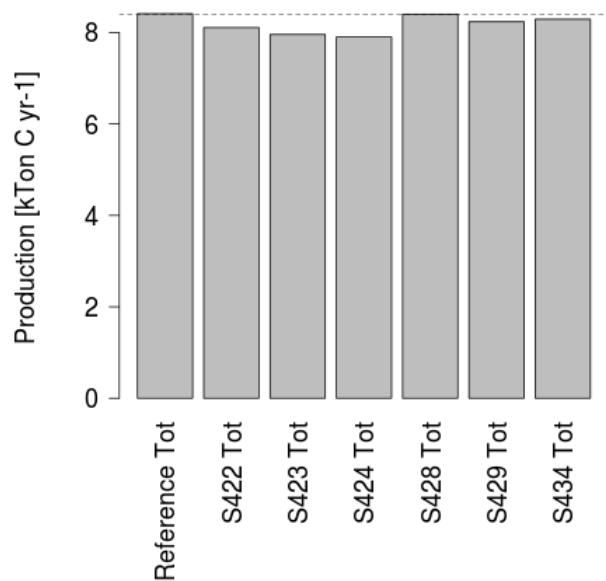
Figuur 3 Verhouding van lichtextinctiecoëfficiënt k_d in de gesimuleerde referentiesituatie t.o.v. de verschillende alternatieve stortscenario's

De ratio's in figuur 3 zijn berekend op de uitvoerpunten van het slibmodel. Deze werden lineair geïnterpoleerd naar het centrum van de OMES-compartimenten. Zoals hierboven uiteengezet werden vervolgens de opgemeten producties vermenigvuldigd met deze geïnterpoleerde ratio. De totale productie in het interessegebied werd opnieuw berekend als de gewogen som. Het berekende effect op primaire productie wordt weergegeven in tabel 1 en figuur 4.

In alle hier beschouwde scenario's neemt de totale productie in de zone Hoboken tot Hansweert af, met 8.4 ton C j⁻¹ (0.1% verlies, S428) tot 508 ton C j⁻¹ (6% verlies, S424). Dit is het netto resultaat van de afname in de zone Zandvliet tot Hansweert en een toename in de zone Hoboken tot Zandvliet. De afname in de zone Zandvliet tot Hansweert is het grootst in scenario S424 (Afwaarts II), namelijk 670 ton C j⁻¹ of 9.7%. De toename in productie in de zone Hoboken tot Antwerpen is het hoogst in datzelfde scenario, namelijk 161 ton C j⁻¹ of 10.9 %.

	Hoboken-Hansweert		Zandvliet-Hansweert		Hoboken-Zandvliet	
Referentie	8412 ton C j ⁻¹		6934 ton C j ⁻¹		1478 ton C j ⁻¹	
	Verlies ton C j⁻¹	%Verlies	Verlies ton C j⁻¹	%Verlies	Verlies ton C j⁻¹	%Verlies
S422	303	3.6	385	5.6	-82	-5.5
S423	453	5.4	594	8.6	-139	-9.4
S424	508	6.0	670	9.7	-161	-10.9
S428	8.4	0.1	19	0.3	-11	-0.7
S429	175	2.1	230	3.3	-54	-3.7
S434	120	1.4	153	2.2	-33	-2.2

Tabel 1 Statistische berekening van de impact op primaire productie van de verschillende stortscenario's



Figuur 4 Statistische berekening van de impact van verschillende stortscenario's op primaire productie in het hele gebied van Hoboken tot Hansweert. Waarden uit tabel 1

2.1.4. Conclusies en discussie statische berekening

De statische berekening laat toe om op een relatief eenvoudige wijze een eerste inschatting te krijgen van de grootteorde van het effect van verschillende scenario's van het terugstorten van slib op de primaire productie. Zoals uit de theoretische afleiding blijkt, resulteert een relatieve wijziging in de lichtextinctie k_d in eerste orde in een omgekeerd evenredige wijziging in primaire productie. Zoals uit tabel 1 blijkt, is het totaal effect over het hele interessegebied negatief. De belangrijkste reden hiervoor is dat de scenario's opgesteld zijn met de expliciete bedoeling om het gebaggerde slib meer stroomafwaarts terug te storten. Dit betekent dat er een vertroebeling zal worden teweeggebracht in meer stroomafwaartse zones waar de productie groot is, terwijl een vermindering van de troebelheid optreedt in zones waar de productie sowieso al laag is.

Het voordeel van de statische benadering is dat ze eenvoudig en inzichtelijk is, en dat ze gebaseerd is op directe productie-metingen. Het grootste nadeel is dat ze intern niet consistent is: een wijziging in primaire productie zal immers ook een wijziging in de opbouw van biomassa veroorzaken. Zoals in de theoretische afleiding werd vermeld, is het resultaat dat een wijziging in lichtextinctie zich proportioneel doorvertaalt naar primaire productie gebaseerd op de aanname dat aan de biomassa niets verandert. Aangezien een mindere productie resulteert in een verminderde biomassa-opbouw, zal in werkelijkheid het effect meer dan proportioneel zijn. Het kan dus verwacht worden dat de werkelijke impact op de productiviteit van de verschillende stortscenario's groter is dan de statische benadering. Daarom doen we in het volgende deel van deze studie een berekening met een dynamisch ecosysteemmodel.

2.2. Dynamische berekening

2.2.1. Ecosysteemmodel

Het ecosysteemmodel dat in deze studie gebruikt wordt gaat terug op het MOSES model (Soetaert en Herman, 1994), dat in opeenvolgende projecten met specifieke doelstellingen aangepast werd. Dit model werd ingezet voor het inschatten van het effect van het aankoppelen van GOG-GGGs op waterkwaliteit (Cox et al, 2004, 2005), voor het bepalen van de instandhoudingsdoelstellingen van het Schelde-estuarium (Adriaensen et al, 2005), voor het bepalen van de T2009 referentie-toestand van het estuarium (Depreiter et al 2013). In het kader van het voorliggende project en van het duurzaam beheersplan voor de Boven-Zeeschelde wordt een nieuwe implementatie en parameterisatie uitgevoerd, in overeenstemming met de huidige kennis van het ecosysteemfunctioneren (cf. o.m. Van Engeland et al. 2015). Met dit model kunnen we het effect op primaire productie van verschillende strategieën voor het terugstorten van baggerspecie dynamisch doorrekenen. Het modeldomein reikt van Melle tot Vlissingen. Concentraties en debieten aan de zijrivieren worden opgedrukt als randcondities.

De groei van fytoplankton wordt gesimuleerd als afhankelijk van nutriëntenbeschikbaarheid (DIN, PO4 en DSi), lichtbeschikbaarheid en temperatuur. De fotosynthese wordt geïntegreerd over de fotsche

diepte (berekend uitgaande van SPM-concentraties). Deze wordt berekend met een klassieke Platt-formulering voor lichtafhankelijkheid van fotosynthese, gebruik makend van fotosynthetische parameters afgeleid uit directe metingen in het kader van OMES en MONEOS. Zoöplankton predeert op fytoplankton met een graassnelheid die afhankelijk is van totale zoöplankton biomassa en van temperatuur. Een deel van het begraasde fytoplankton wordt geïncorporeerd in nieuwe zoöplankton biomassa. Horizontaal transport wordt gesimuleerd met behulp van een tijgemiddeld advection-dispersie model dat gecalibreerd is op opgemeten saliniteit.

SPM wordt opgedrukt op basis van opgemeten SPM tijdseries, en wordt dus niet dynamisch gesimuleerd. M.a.w. de maandelijkse (tweewekelijks wanneer beschikbaar) opgemeten oppervlakte SPM-concentraties worden in de tijd en ruimte geïnterpoleerd en opgedrukt in de verschillende modelboxen. Deze benadering heeft als voordeel dat er gerekend wordt met effectief opgemeten SPM-concentraties nabij het oppervlak, waardoor seizoenaliteit en longitudinale variabiliteit in SPM realistisch wordt doorvertaald naar primaire productie. Het houdt echter ook een belangrijke beperking in: er wordt immers verondersteld dat elk eenmalig oppervlaktestaal representatief is voor de SPM-concentratie gedurende de hele tijcyclus, en gedurende de hele springtij-doodtijcyclus. Dit is in eerste opzicht een grove benadering, maar ze leidt toch tot goede resultaten zoals uit onderstaande zal blijken³. Het model is immers in staat om de karakteristieke eigenschappen van de opbouw van biomassa goed te reproduceren. Dit is waarschijnlijk toe te schrijven aan de sterke longitudinale gradient in diepte en SPM-concentratie enerzijds, en de seizoenale variabiliteit in lichtinstraling anderzijds die sterk sturend zijn voor de ruimtelijke en temporele patronen in primaire productie. Desalniettemin zullen we in de afweging van scenario's gebruik maken van jaargemiddelde productie.

2.2.2 Parameterisatie van primaire productie en begrazing door zoöplankton

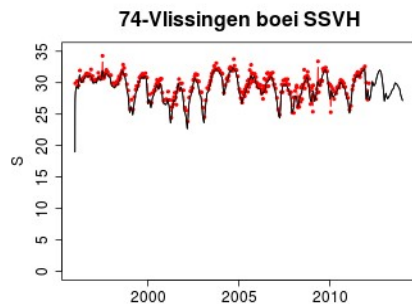
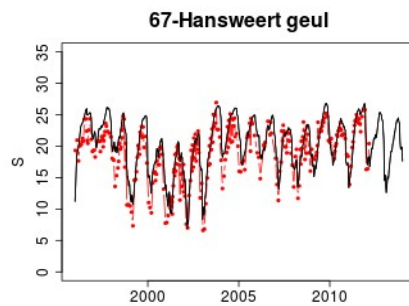
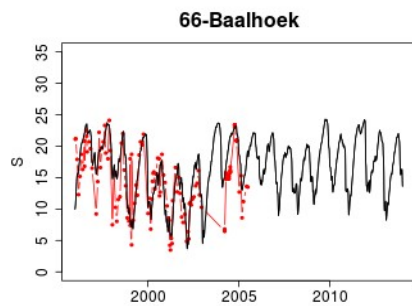
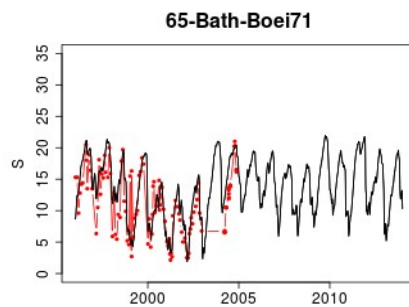
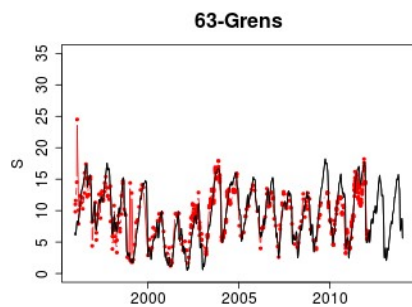
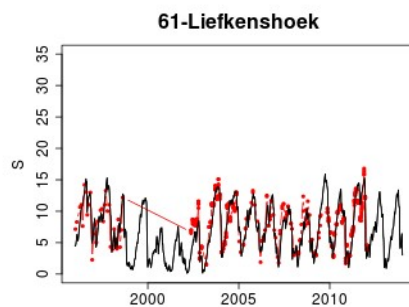
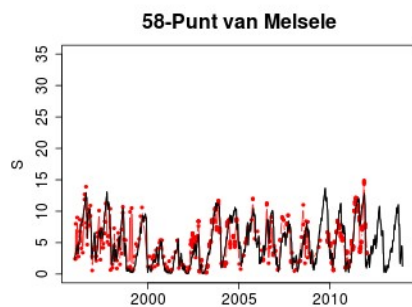
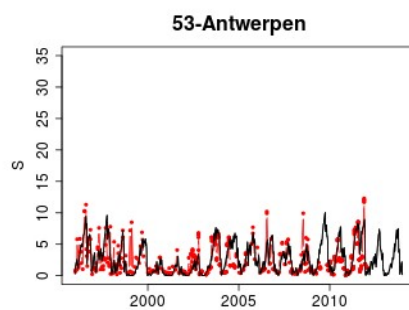
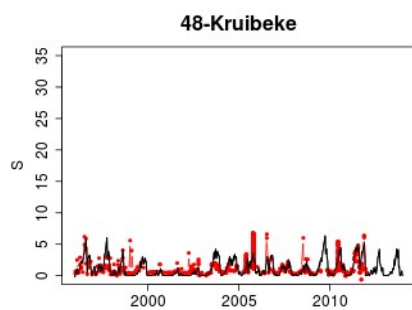
Een tijgemiddeld advection-dispersiemodel is goed in staat om de seizoenale, interannuele en longitudinale patronen te simuleren van opgelost transport. Figuur 5 vergelijkt gesimuleerde met opgemeten saliniteiten (een natuurlijke passieve tracer) van 1996 tot 2014. In deze simulatie werden opgemeten saliniteiten opgedrukt aan de beneden- en bovenstroomse randen, met lineaire interpolatie tussen de metingen. Aan de bovenstroomse randen werden opgemeten dagdebieten opgelegd. De in het model gebruikte dispersiecoëfficiënten op de randen van de model-boxen zijn het resultaat van calibratie op de opgemeten saliniteiten. Deze dispersiecoëfficiënten zijn variabel langs de lengte-as van het estuarium, maar constant in de tijd.

De meeste parameters in het primaire productiemodel zijn degene die gekend zijn uit directe metingen in de Schelde (cf. Cox *et al*, 2010; Kromkamp en Peene, 1995;2005). De belangrijke fotosynthetische parameters α en $P_{\max}$ alsook hun ruimtelijke variabiliteit en hun afhankelijkheid van temperatuur zijn daarmee goed gekend. Een andere belangrijke parameter, de koolstof-chlorofyl ratio, is daarentegen slecht gekend. In het algemeen is bekend dat sommige fytoplanktonsoorten zich aanpassen aan de lichtbeschikbaarheid door meer of minder chlorofyl aan te maken (foto-acclimatie). Of dit gebeurt en met welke snelheid is afhankelijk van de fytoplanktonsoort. In de Boven-Zeeschelde zijn zeer lage koolstof-chlorofyl ratio's gedocumenteerd (<10 mgC per mg Chl, Lionard *et al*, 2008). Het experimenteel bepalen van deze ratio is echter niet evident, en de zeer lage ratio's in vergelijking met andere studies deden de auteurs van voormelde studie twijfelen aan de resultaten. Een meer standaard

³ We merken op dat ook de 'metingen' van primaire productie gebruik maken van dezelfde opgemeten SPM-concentraties om de diepte-geïntegreerde productie te bepalen (zie bv. Kromkamp *et al* 2014).

waarde in estuaria en kustzones is ergens tussen 20 en 30 mgC per mg Chl. We hebben er voor gekozen om voor deze parameter een lage waarde te nemen, in overeenstemming met de literatuur (20-25 mg C per mg Chl). In wat volgt zullen we met een beperkte sensitiviteitsstudie het effect van deze parameter op de resultaten weergeven.

De parameters die begrazing door zoöplankton bepalen zijn minder goed bekend. Hoewel er binnen OMES en Moneos veel data rond zoöplankton wordt verzameld, is deze slechts ten dele geanalyseerd. Bovendien is de zoöplanktondynamiek volop in verandering. We hebben binnen dit project een pragmatische calibratie-aanpak gevolgd. Hierbij hebben we de model-ouput vergeleken met twee verschillende types metingen: enerzijds chlorofyl-concentraties en anderzijds productiviteitsmetingen. Aangezien het eerste een maat is voor een toestandsvariabele, en het tweede voor een omzettingssnelheid, geeft overeenstemming tussen model en beide types data een robuust vertrouwen in de simulaties. Volgende aanpak werd gevolgd: eerst werd de maximale begrazingssnelheid $G_{\max}$ constant gehouden over het hele estuarium. Deze werd vervolgens maximaal verhoogd zonder de fytoplanktonpopulatie in de Boven-Zeeschelde helemaal weg te grazen. Daarna maakten we $G_{\max}$ r



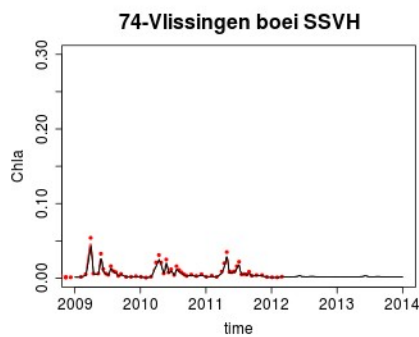
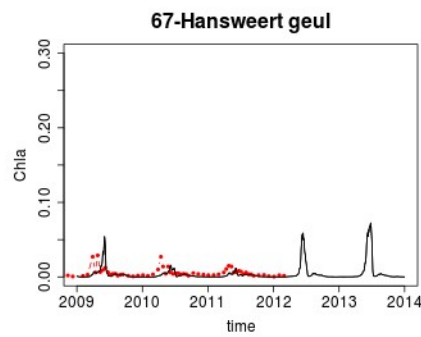
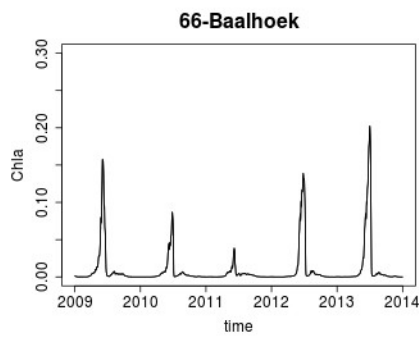
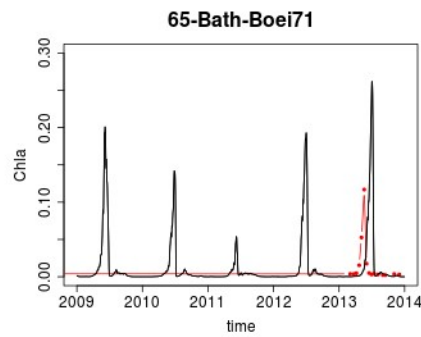
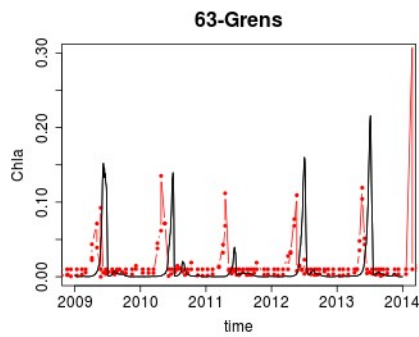
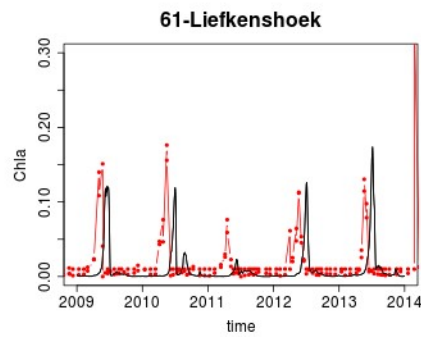
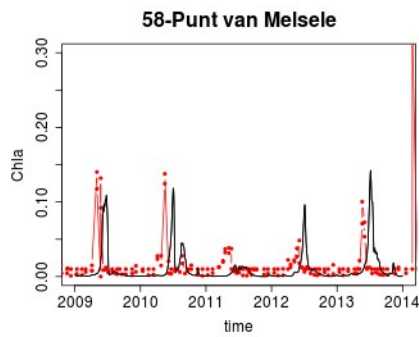
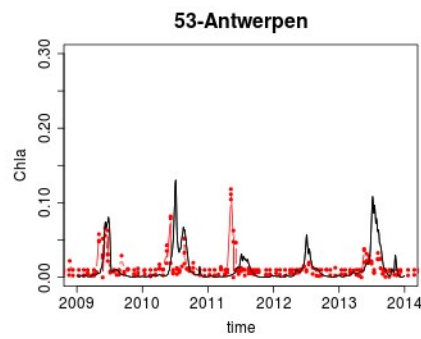
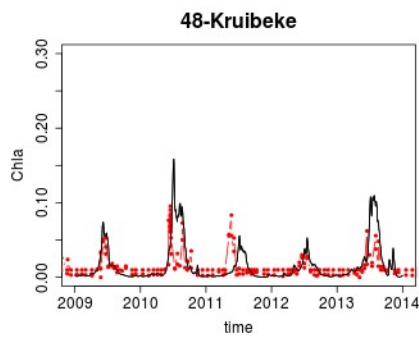
Figuur 5 Opgemeten (rood) en gesimuleerde (zwart) saliniteiten. Nummers zijn de modelboxen waarin de monitoringslocaties gelegen zijn.

ruimtelijk afhankelijk, als een functie van saliniteit: constant onder een bepaalde saliniteit, dan lineair toenemend tot een maximum. $G_{\max}$ aan de benedenstroomse grens werd vervolgens verhoogd totdat de chlorofyl concentraties aan Hansweert correct werden gereproduceerd. Tot slot werd de saliniteitsafhankelijkheid (de minimale en maximale saliniteit waartussen $G_{\max}$ lineair oploopt) afgestemd op de geobserveerde chlorofyl a concentraties. Tegelijkertijd hebben we, bij gebrek aan gegevens, de benedenstroomse randvoorwaarde voor zoöplankton biomassa constant gehouden. De bovenstroomse randvoorwaarden werden opgedrukt op basis van metingen.

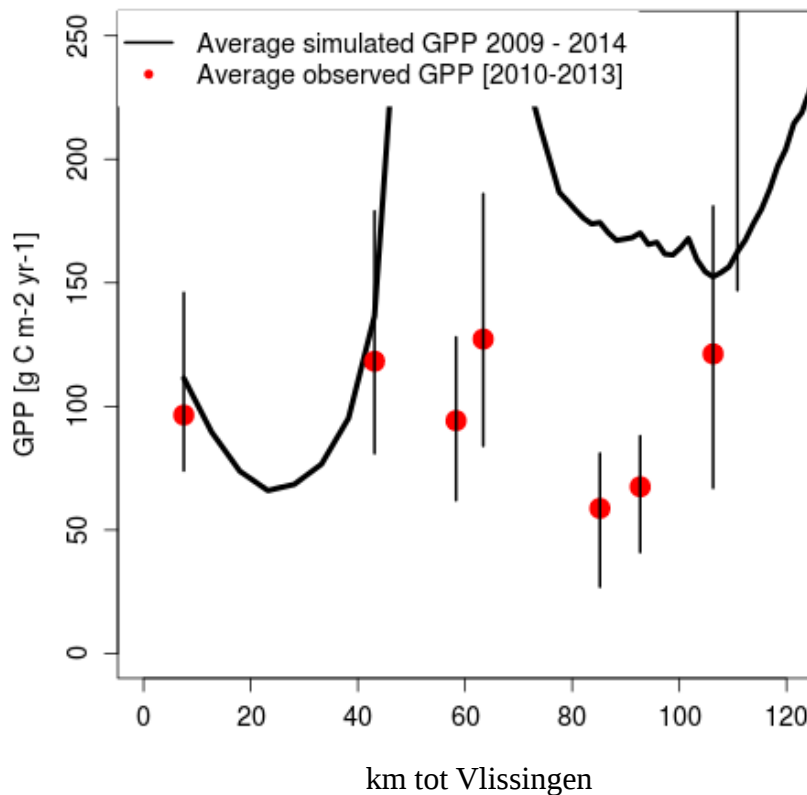
We bespreken eerst de simulatieresultaten van de parameterisatie waarmee het best de chlorofyl a metingen worden gereproduceerd. Figuur 6 bevat de vergelijking tussen opgemeten en gesimuleerde chlorofyl concentraties van 2009 tot 2013. Hierop zien we dat het model zowel de ruimtelijke als de temporele dynamiek reproduceert. De hoogste gesimuleerde en geobserveerde piekconcentraties komen voor in de zone Punt van Melsele tot Baalhoek. Deze zone wordt gekenmerkt door de karakteristiek en scherp gepiekte voorjaarsbloei, kenmerkend voor een fytoplanktonbloei die gecontroleerd wordt door zoöplanktonbegrazing. De lengte van de bloei (breedte van de piek) wordt mooi gereproduceerd door het model. In de meer opwaartse stations zijn de maximale concentraties minder hoog en spreidt de bloei zich uit over een grotere periode van het jaar. Tot op zekere hoogte reproduceert het model ook de inter-annuele variabiliteit in piekconcentraties, met hogere concentraties in 2009, 2010 en 2013, en lagere concentraties in 2011 en in minder mate 2012.

De overeenkomst in de stations Bath en Baalhoek valt niet af te leiden uit figuur 6. Voor onderhavige studie was enkel data van Rijkswaterstaat (RWS) beschikbaar. Hoewel in het verleden door RWS wel chlorofyl gemeten werd op die locaties, is in de periode 2009-2013 enkel gemeten in Bath in 2013. Het NIOZ heeft hierover wel data, en uit figuur 14 in Kromkamp *et al*, 2014 kunnen we afleiden dat het model ook in die stations correct een sterk gepiekte voorjaarsbloei simuleert, en dat ook de piekconcentraties overeenstemmen met de waarnemingen.

Op een aantal vlakken is de overeenkomst tussen simulatieresultaten en metingen minder goed. Dit is het duidelijkste te zien aan de timing van de ontwikkeling van de voorjaarsbloei: in de simulaties treedt hij later op dan in werkelijkheid. Bij Antwerpen, en in mindere mate ook Kruibeke, wordt een sterk gepiekte voorjaarsbloei enkel in 2011 waargenomen. Deze wordt niet gereproduceerd door het model. Over het algemeen worden de chlorofyl a concentraties in deze twee stations overschat. De waargenomen seizoenale dynamiek is er erg variabel van jaar tot jaar, en wordt niet correct gereproduceerd door het model. In sommige jaren, i.c. 2009 en 2012 is de overeenkomst wel verrassend goed.



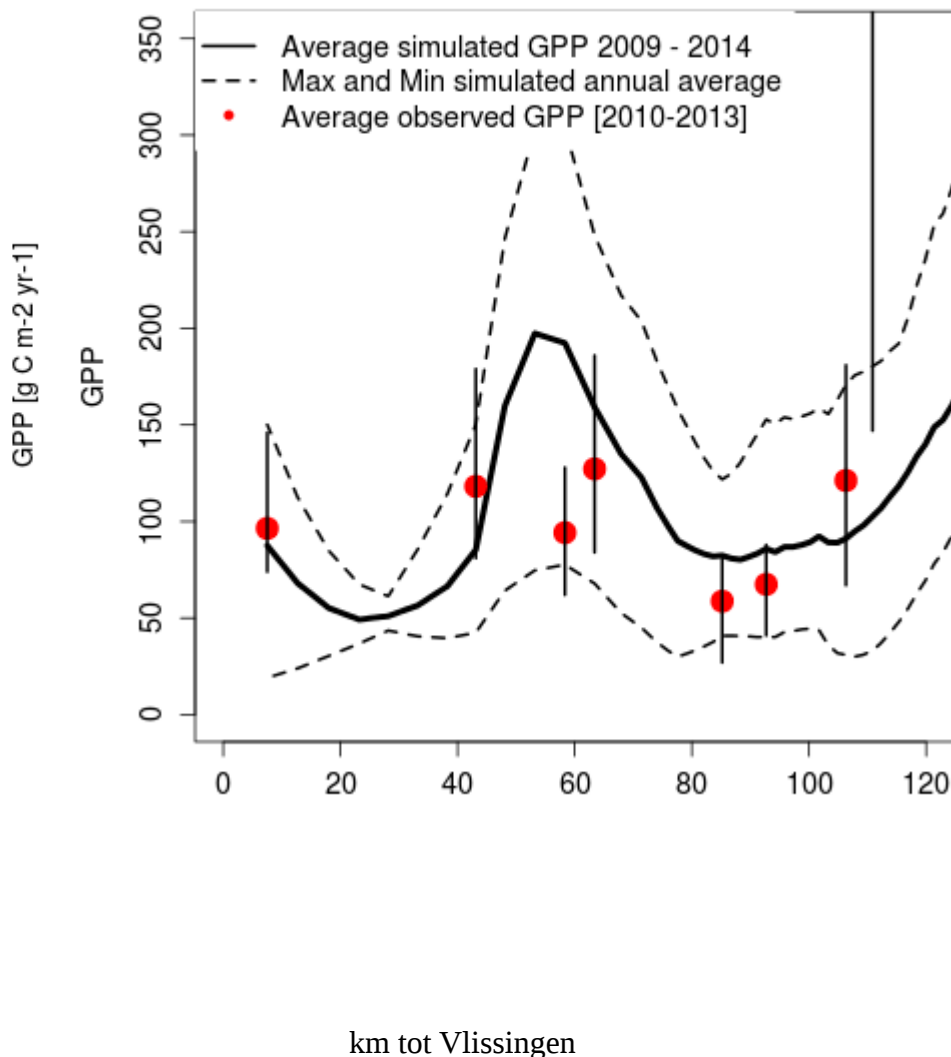
Figuur 6 Opgemeten (rood) en gesimuleerde (zwart) chlorofyl a concentraties. Nummers zijn de modelboxen waarin de monitoringslocaties gelegen zijn.



Figuur 7 Opgemeten (rood, 2010-2013) en gesimuleerde (zwart, 2009-2014) oppervlakte specifieke productiviteit, uitgemiddeld over de respectievelijke periodes. De verticale lijnen geven het maximale en minimale opgemeten jaarlijks gemiddelde in die periode.

Hoewel de hierboven besproken parameterisatie in overeenstemming is met de belangrijkste eigenschappen van de opgemeten chlorofyl a concentraties, is de overeenstemming met de opgemeten primaire productie minder goed. Figuur 7 geeft de gemiddelde productiviteit over de volledige simulatieperiode 2009-2013 en de gemiddelde geobserveerde productiviteit zoals weergegeven in Kromkamp et al, 2014.

Kwalitatief zijn de simulatieresultaten wel in overeenstemming met wat gemeten wordt: in de Boven-Zeeschelde is de productiviteit hoog (zowel simulatieresultaten als metingen vallen grotendeels buiten de figuur). Ook in de Westerschelde is de productiviteit redelijk hoog. Tussenin is een zone van verlaagde productiviteit. Echter, de gesimuleerde productie lijkt qua grootte-orde ongeveer goed in de eerste 40km van de Westerschelde, verder stroomopwaarts wordt de productie overschat tot ongeveer Temse. In de Boven-Zeeschelde is de gesimuleerde productie dan weer (veel) lager dan gemeten.



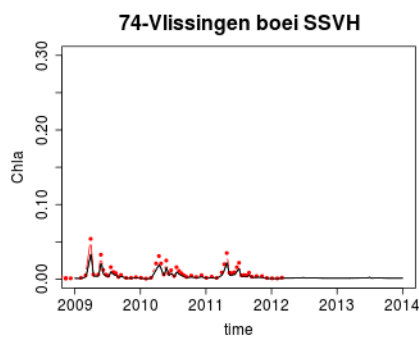
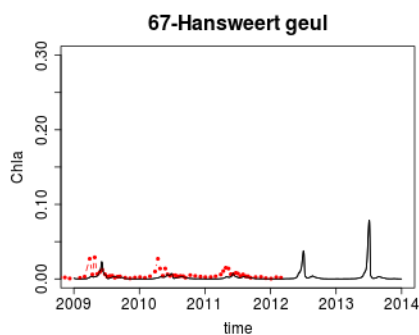
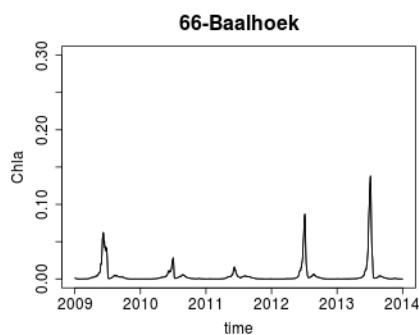
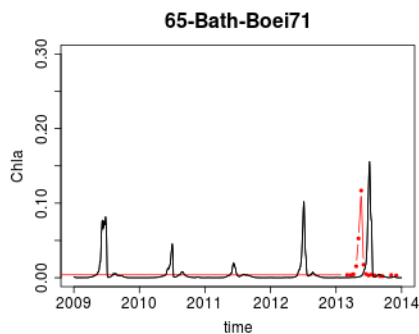
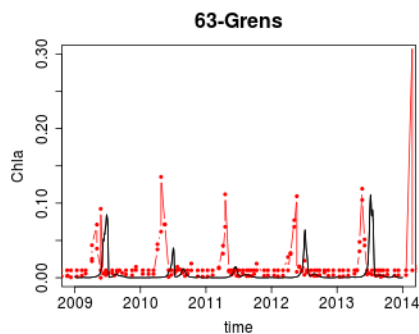
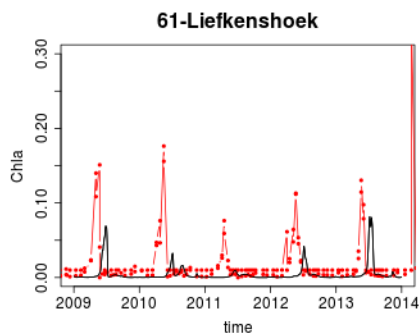
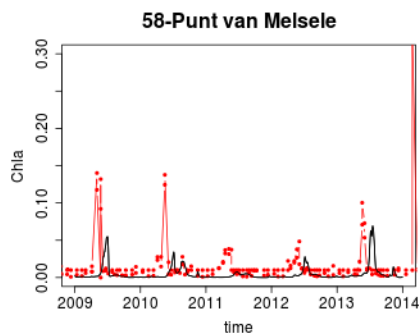
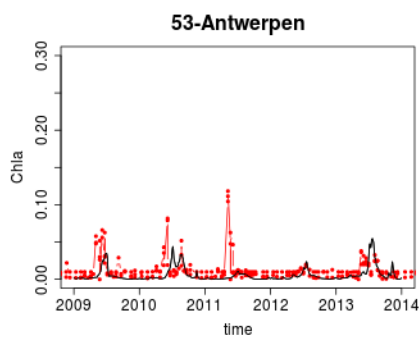
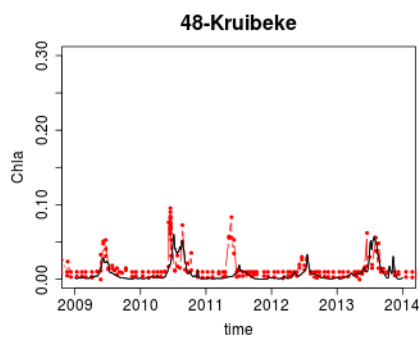
Figuur 8 Opgemeten (rood, 2010-2013) en gesimuleerde (zwart, 2009-20014) oppervlakte specifieke productiviteit, uitgemiddeld over de respectievelijke periodes. De verticale lijnen geven het maximale en minimale opgemeten jaarlijks. De stippellijn is de gesimuleerde maximale en minimale jaargemiddelde productiviteit, gemiddelde in die periode. Koolstof-chlorofyl ratio verhoogd naar 25 mg C per mg Chl.

De koolstof-chlorofyl ratio heeft een grote invloed op de absolute waarden van de gesimuleerde productiviteit. Figuur 8 geeft de resultaten weer wanneer de ratio verhoogd wordt naar 25 mg C per mg Chl. De gesimuleerde productiviteit is nu redelijk in overeenstemming met de waarnemingen, althans in de hele Westerschelde en Beneden-Zeeschelde. Echter, met deze koolstof-chlorofyl ratio gaat de overeenstemming tussen metingen en simulaties van chlorofyl a deels verloren. Dit wordt weergegeven in figuur 9. De gesimuleerde chlorofyl-concentraties worden lager over de hele lijn wat vooral in de zone Antwerpen tot grens tot onrealistisch lage chlorofyl concentraties leidt.

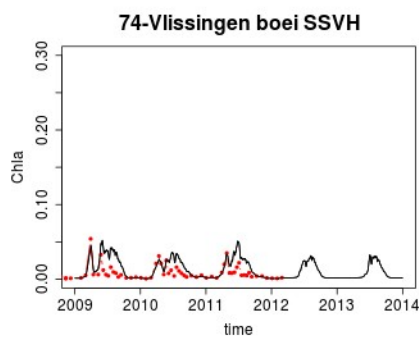
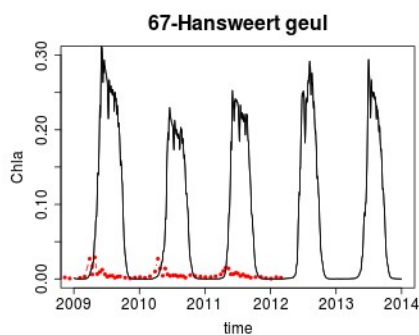
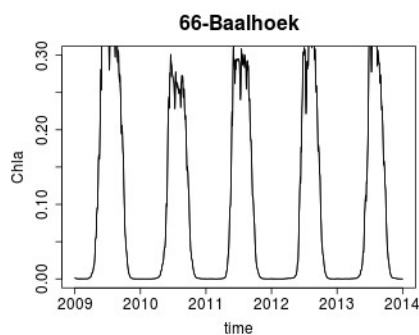
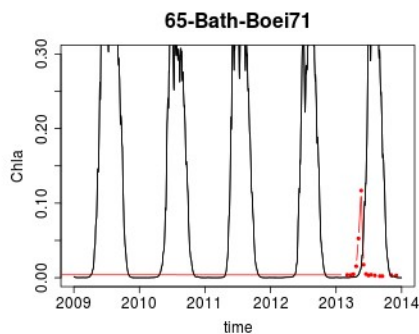
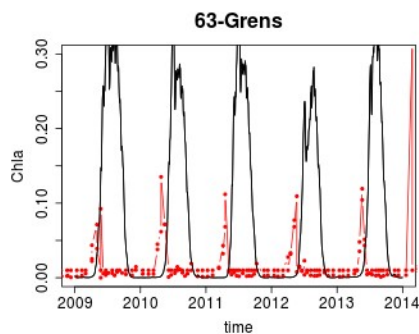
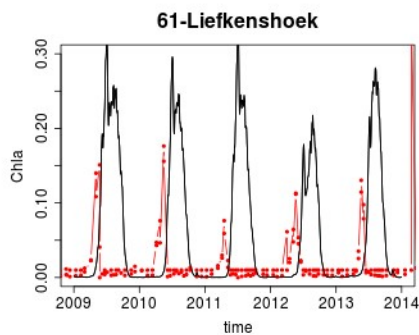
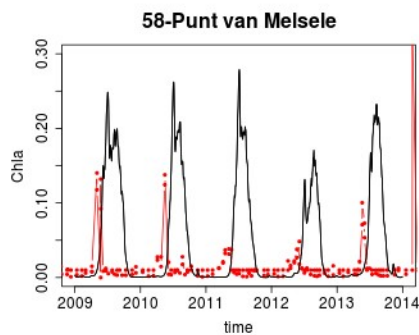
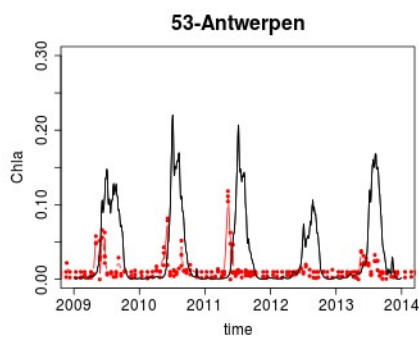
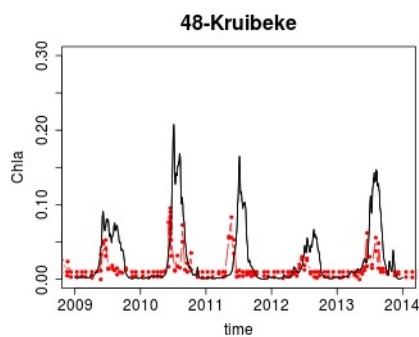
Een meer diepgaande studie zou uitsluitsel kunnen brengen over de mogelijkheid om mits een betere parameterisatie zowel de gemeten chlorofyl a concentraties als de GPP metingen realistisch te simuleren. Binnen het bestek van de voorliggende studie werd ervoor gekozen om met het effect van storstrategie door te rekenen met beide waarden voor de koolstof chlorofyl ratio.

Om het belang van begrazing te illustreren, wordt in figuur 10 de model-output weergegeven wanneer

de begrazingssnelheid artificieel op nul wordt gezet. De scherp-gepiekte voorjaarsbloei wordt niet meer gesimuleerd, en over de hele lijn worden hoge chlorofyl concentraties gesimuleerd die niet in overeenstemming zijn met de waarnemingen.



Figuur 9 Opgemeten (rood) en gesimuleerde (zwart) chlorofyl a concentraties, met verhoogde koolstof-chlorofyl ratio. Nummers zijn de modelboxen waarin de monitoringslocaties gelegen zijn.



Figuur 10 Opgemeten (rood) en gesimuleerde (zwart) chlorofyl a concentraties, waarbij begrazing door zoöplankton artificieel op nul is gezet. Nummers zijn de modelboxen waarin de monitoringslocaties gelegen zijn.

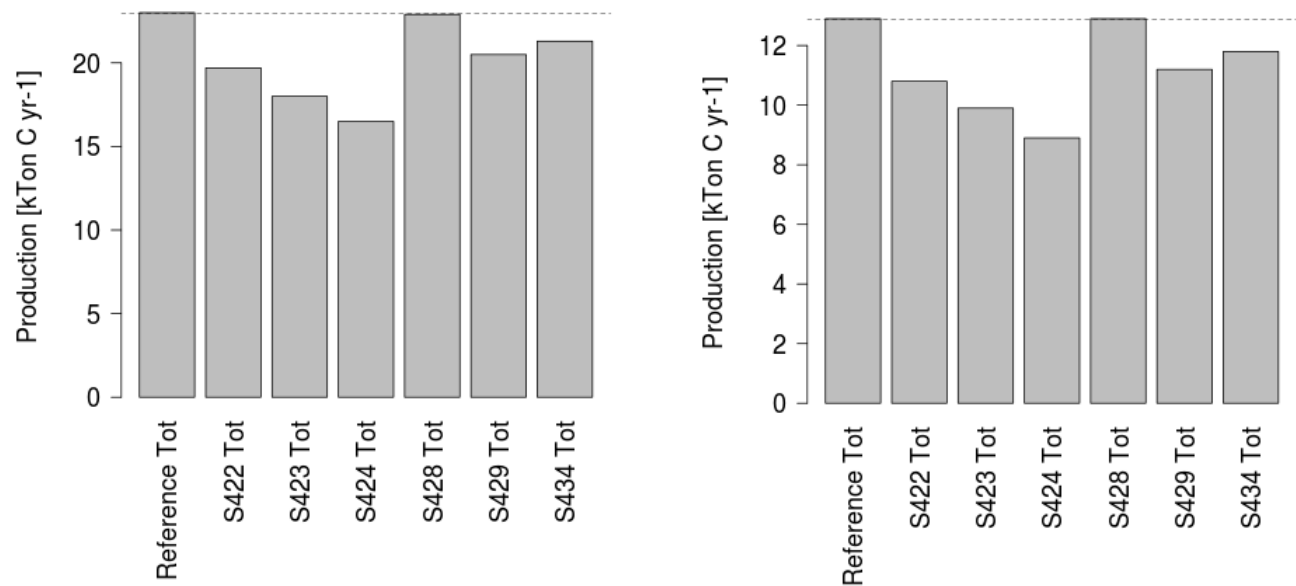
2.2.3 Impact stortscenario's op primaire productie

Om de impact van verschillende stortscenario's op een dynamische manier door te vertalen naar primaire productie, werden de simulatieresultaten van het slibmodel gebruikt om de opgedrukte SPM-concentraties in het ecosysteemmodel te herschalen. Hiertoe werd eerst de verhouding van de gesimuleerde SPM-concentratie in de verschillende stortscenario's ten opzichte van het referentiescenario berekend van, en daarna uitgemiddeld over de hele simulatieperiode⁴. De uitvoerpunten van het slibmodel werden geprojecteerd op de boxen van het ecosysteemmodel, en lineair geïnterpoleerd voor enkele boxen waarin geen uitvoerpunt beschikbaar was. Deze correctiefactoren werden vervolgens toegepast op de SPM-forcings die opgedrukt worden op elke modelbox.

De resultaten worden weergegeven in figuur 11 en tabel 2. De modelresultaten zijn ruimtelijk uitgemiddeld over dezelfde zones als in dewelke de statische aanpak werd toegepast. Op deze uitgemiddelde productiewaarden is nogmaals te zien dat de gesimuleerde producties met een koolstof chlorofyl ratio van 25 mg C per mg Chl het best overeenstemt met de productiemetingen.

De belangrijkste vaststelling is echter dat de gesimuleerde relatieve impact van de verschillende stortscenario's niet sterk beïnvloed wordt door deze parameter. Met andere woorden: hoewel de zowel de gesimuleerde chlorofyl a concentraties als de gesimuleerde productiesnelheden gevoelig zijn voor de waarde van de koolstof chlorofyl ratio's, is het procentuele effect van de verschillende stortscenario's dat niet. Dit doet ons vermoeden dat dit gesimuleerde procentuele effect inderdaad een goeie weerspiegeling zal zijn van het dynamische impact van een wijziging in het lichtklimaat op de primaire productie in het interessegebied.

4 We merken op dat de initiële slibconcentratie in het hele modeldomein op 300 mg/L werd gezet. De gesimuleerde slibconcentraties zijn in principe pas realistisch nadat het model in dynamisch evenwicht is met de randvoorwaarden. Dit is na enkele tijdcycli het geval. In de scenario's met kortere vaartijd is echter gekozen om alle stortingen in een eerste deel van de simulatieperiode te laten plaatsvinden, gevolgd door een korte periode zonder stortingen. Hierbij werd het totale volume teruggestort sediment wel constant gehouden. Om de scenario's correct met mekaar te kunnen vergelijken is daardoor gewerkt met het gemiddelde effect over de hele simulatieperiode. We maken daarmee een kleine fout doordat het slibmodel gedurende de eerste cycli nog niet in evenwicht is. Deze fout qua impact op primaire productie verwaarloosbaar.



Figuur 11 Dynamisch berekende impact van verschillende stortscenario's op primaire productie in het hele gebied van Hoboken tot Hansweert. Links gesimuleerd met C:Chl = 20 mg C per mg Chl, rechts met C:Chl = 25 mg C per mg Chl (meer info in tekst). Waarden uit tabel 2

C:Chl**20 mg C / mg Chl**

	Hoboken-Hansweert		Zandvliet-Hansweert		Hoboken-Zandvliet	
Referentie	23000 ton C j ⁻¹		18900 ton C j ⁻¹		4100 ton C j ⁻¹	
	Verlies ton C j ⁻¹	%Verlies	Verlies ton C j ⁻¹	%Verlies	Verlies ton C j ⁻¹	%Verlies
S422	3300	14.3	3100	16.4	200	4.9
S423	5000	21.7	4800	25.4	200	4.9
S424	6500	28.3	6500	34.4	0	0.0
S428	100	0.4	100	0.5	0	0.0
S429	2500	10.9	2400	12.7	100	2.4
S434	1700	7.4	1700	9.0	0	0.0

C:Chl**25 mgC/mgChl**

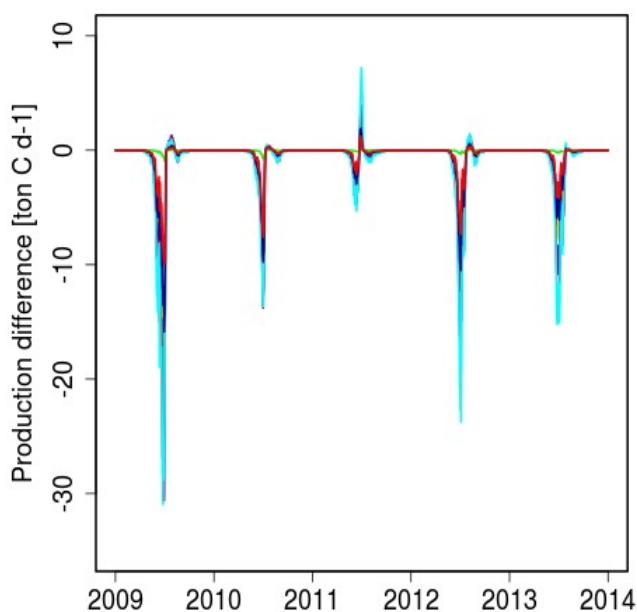
	Hoboken-Hansweert		Zandvliet-Hansweert		Hoboken-Zandvliet	
Referentie	12900 ton C j ⁻¹		10800 ton C j ⁻¹		2100 ton C j ⁻¹	
	Verlies ton C j ⁻¹	%Verlies	Verlies ton C j ⁻¹	%Verlies	Verlies ton C j ⁻¹	%Verlies
S422	2100	16.3	2000	18.5	100	4.8
S423	3000	23.3	2800	25.9	200	9.5
S424	4000	31.0	3900	36.1	100	4.8
S428	0	0.0	0	0.0	0	0.0
S429	1700	13.2	1600	14.8	100	4.8
S434	1100	8.5	1000	9.3	100	4.8

Tabel 2 Dynamische berekening van de impact op primaire productie van de verschillende stortscenario's, voor twee waarden van de koolstof-chlorofyl ratio

Deze procentuele effecten zijn vele malen groter dan met de statische benadering werd ingeschat. In het scenario met de grootste impact (S424) berekenden we met de statische methode een verlies van 6% in het hele interessegebied en bijna 10% in de zone Zandvliet tot Hansweert. In de dynamisch methode is dit respectievelijk 28.3-31% en 34.4-36.1%. Voor het scenario met de kleinste impact (S428) is de impact in de statische benadering respectievelijk 0.1% en 0.3% en in de dynamische benadering 0-0.4% en 0-0.5%. Opmerkelijk is ook dat in de dynamische benadering ook de impact in de zone Hoboken tot Zandvliet altijd negatief uitmiddelt. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de gesimuleerde productie in de zone tussen Antwerpen en Zandvliet waar geen productiemetingen zijn en waar we in de statische benadering eenzelfde gemiddelde productie veronderstelden als opgemeten op de locaties Antwerpen en Hoboken.

Tabel 2 geeft de tijdsgemiddelde impact van verschillende stortscenario's op primaire productie. Het gros van de productie in de zone Zandvliet tot Hansweert vindt echter plaats tijdens de sterke

voorjaarsbloei. Daarom kan verwacht worden dat de totale impact grotendeels bepaald wordt door de impact tijdens die bloeiperiode. In figuur 12 wordt het verloop in de tijd weergegeven van de impact van de stortscenario's op de productiesnelheid. Het grootste negatieve effect treedt inderdaad op tijdens de voorjaarsbloei. Opmerkelijk is dat na deze bloeiperiode er telkens een kortstondige periode met positief effect is. Vermoedelijk is dit het gevolg van een verminderde opbouw van zoöplankton tijdens de verminderde voorjaarsbloei, waardoor de graasdruk iets minder is in de periode daarna. Nog opmerkelijker is echter dat in 2011 dit gesimuleerde positieve effect voor sommige scenario's groter is dan het negatieve effect. Deze vaststellingen zijn binnen het huidige bestek niet verder bestudeerd en moeten dus met de nodige omzichtigheid behandeld worden.



Figuur 12 verloop in de tijd van het gesimuleerde verschil in productie tussen de verschillende stortscenario's en het referentiescenario in de zone Zandvliet-Hansweert.

2.2.4 Discussie en conclusies dynamische berekening

Deze studie is de eerste poging na het verschijnen van de scherp-gepiekte *Thalassiosira*-voorjaarsbloei om de zoöplankton-fytoplankton interactie correct te simuleren in de Beneden-Zeeschelde en de Westerschelde. Het is dan ook niet verwonderlijk dat er bepaalde aspecten nog niet voldoende goed worden berekend. In het bijzonder weten we niet wat de oorzaak is van het niet gelijktijdig kunnen reproduceren van de chlorofyl tijdseries enerzijds en de productiesnelheden anderzijds. Overigens is het even goed mogelijk dat de oorzaak in de data te zoeken is. Met name van de ^{14}C -bepalingen is bekend dat ze over het algemeen een onderschatting van de productiesnelheid opleveren. Bij sommige metingen in de Beneden-Zeeschelde werd vastgesteld ^{14}C -bepaling vele malen lager waren dan zuurstof gebaseerde productiemetingen (bv. Cox et al, 2015; Gazeau et al, 2007). Anderzijds zou het ook kunnen dat met de huidige modelstructuur toch parameterwaarden bestaan die een consistente simulatie oplevert. Verder onderzoek kan hier meer inzicht in verschaffen.

Het belangrijkste voordeel van het gebruik van het ecosysteemmodel is dat hiermee het effect van wijzigingen in SPM-concentraties op primaire productie op dynamische wijze doorerekend wordt. Weliswaar dient hier een belangrijke kanttekening gemaakt: enkel het effect van veranderde lichtcondities is in deze studie doorerekend. Het is bijvoorbeeld bekend dat verhoogde SPM-relaties ook kunnen leiden tot een vermindering van de graasdruk door zoöplankton: hoewel deze kleine diertjes heel efficiënt zijn in het selecteren van voedsel tussen de niet-eetbare deeltjes in, kunnen ze wel degelijk last ondervinden van een verhoogde verhouding niet-eetbare/eetbare deeltjes (bv. Tackx *et al*, 2003). Dit effect kan niet met het huidige model worden berekend.

In het algemeen is er zeker verbetering mogelijk in de modellering van de zoöplanktodynamiek. Binnen OMES en Moneos is er veel informatie beschikbaar. Een gedetailleerde studie naar hoe deze resultaten naar modellering vertaald kunnen worden is echter nodig.

3. Algemene discussie en conclusies

Het feit dat de relatieve verhoging van de lichtextinctie de bepalende factor is voor de impact op primaire productie is een belangrijk inzicht. Het betekent dat de impact van een verhoging of verlaging van SPM-concentraties afhangt van de beginsituatie. Bij een verhoging/verlaging van 1 mg/L is het naar ecologie een wereld van verschil of dit plaatsvindt in een systeem waar al 100 mg/L aanwezig is (1% verandering van SPM) of in een systeem met slechts 2 mg/L (50 % verandering). De conclusie van de statische benadering is dat een 1% dan wel 50% stijging in lichtextinctie in eerste orde een 1% respectievelijk 50% daling van primaire productie veroorzaakt⁵. Zoals duidelijk blijkt uit de simulaties is het dynamische effect vele malen groter dan wat uit de statische benadering volgt. Dit is een tweede belangrijke conclusie naar toekomstige studies. Het toont immers de verregaande implicaties aan van de inconsistentie die in de statische benadering zit. De dynamische simulatieresultaten laten zien dat de

5 Voor de volledigheid: dit resultaat is geen algemene eigenschap van primaire productie maar geldt wel in diepe, lichtgelimiteerde systemen zoals de Schelde.

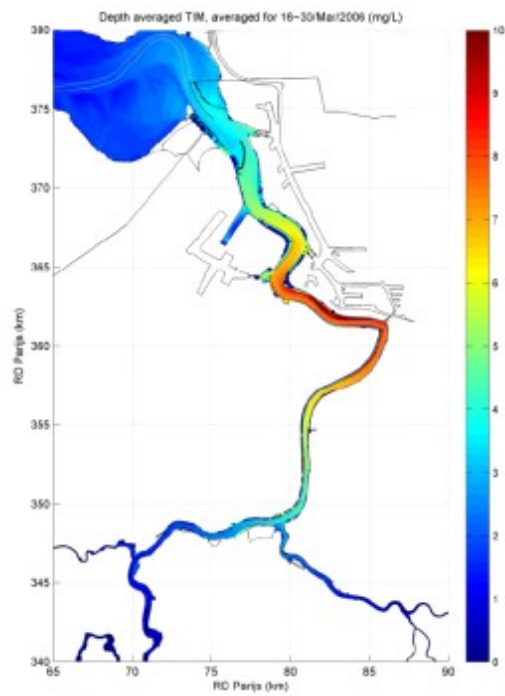
impact meer dan proportioneel is met de verandering in lichtextinctie. Het valt dus aan te bevelen om de impact op primaire productie altijd met dynamische modellen door te rekenen. Anderzijds blijkt dat de statische benadering wel correct was in de voorspelling dat het netto-effect over het hele interessegebied in alle scenario's negatief is, ondanks het feit dat in er ook een zone is waar de lichtbeschikbaarheid verhoogt. Ook de rangorde van de verschillende scenario's (welke scoort beter, welke minder goed) werd correct ingeschat.

Ondermeer als gevolg van de gevoeligheid voor de beginsituatie, is het effect op primaire productie afhankelijk van de locatie waar veranderingen in lichtbeschikbaarheid wordt geïnduceerd, bijvoorbeeld door een verandering in stortstrategie. De huidige stortstrategie zorgt voor verhoogde SPM-concentraties in een zone van het estuarium waar weinig primaire productie plaatsvindt. Dit is ten dele van nature reeds zo (wegens natuurlijk sedimenttransport en de morfologie van het systeem) en ten dele het resultaat van de huidige stortstrategie. A priori konden we verwachten dat een verhoging van de lichtbeschikbaarheid in die zone weinig positieve impact op de productie zou hebben. Dat wordt ook bevestigd in onderhavige studie. Verder benedenstrooms (Westerschelde) vindt daarentegen wel veel productie plaats. Een vermindering van lichtbeschikbaarheid in die zone heeft dus wel een duidelijk negatief effect op de totale productie in het systeem.

Hierbij dient opgemerkt dat met de voorliggende modelopzet niets gezegd kan worden over de Boven-Zeeschelde. Ook dit is een zone met hoge primaire productie. Een van de belangrijke motivaties om meer benedenstroomse stortlocaties te onderzoeken is dat dit mogelijk het risico op regime-shift naar hypertroebelheid zou verminderen. De SPM-modellering binnen deze studie kan hierover geen uitspraak doen om de eenvoudige reden dat de Boven-Zeeschelde niet tot het modeldomein behoort. Als gevolg kon er binnen het bestek van deze studie geen ecologische doorvertaling gemaakt worden.

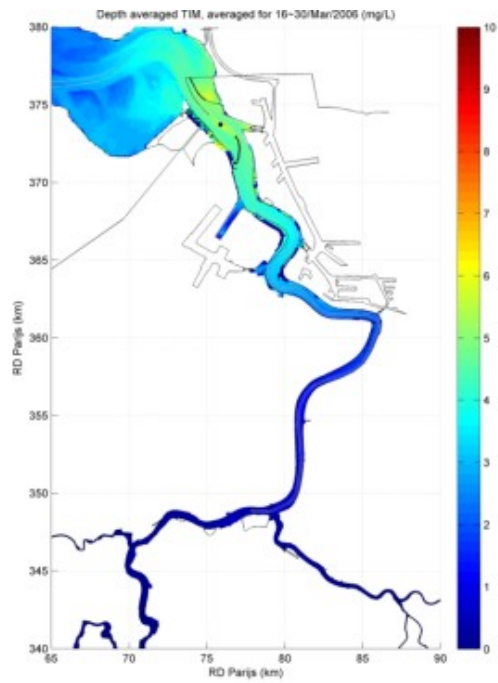
Een effect van stortlocatie op SPM-concentraties in de Boven-Zeeschelde is in het verleden beperkt bestudeerd, met name in de studie 'Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie', in het kader van LTV-Veiligheid en Toegankelijk (IMDC, 2013). Figuren 3.13, 4.10 en 4.12 uit dat rapport worden hieronder overgenomen. Deze figuren geven de gesimuleerde SPM concentraties in het estuarium bij een eenheidslozing op 3 verschillende stortlocaties. Deze simulatieresultaten laten bij meer stroomafwaarts terugstorten een duidelijk verlagend effect zien op gesimuleerde SPM concentraties in het meest stroomafwaartse gedeelte van de Boven-Zeeschelde. Het effect op het meer stroomopwaartse gedeelte van de Boven-Zeeschelde (de zoete zone met korte verblijftijd, i.e. de zone waar de lichtbeschikbaarheid in verhouding tot de diepte van de waterkolom het meest gunstig is voor de primaire productie, cf. Kromkamp *et al* (2014)) valt niet af te lezen van de figuren. De simulatieresultaten laten niet zien wat het relatieve belang is ten opzichte van de achtergrondconcentratie. Deze achtergrondconcentraties zijn in de Boven-Zeeschelde de hoogste van het hele estuarium.

De mogelijke verhoging van primaire productie in de Boven-Zeeschelde bij een stroomafwaartse stortlocatie is op dit moment niet te kwantificeren, noch op basis van bestaande rapporten noch op basis van de simulatieresultaten binnen onderhavige studie. Het is ook bekend dat de bestaande SPM-simulatiemodellen suboptimaal presteren voor de Boven-Zeeschelde. Op dit moment wordt door het Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout een nieuw 3D slibmodel ontwikkeld, specifiek met als doelstelling ook de Boven-Zeeschelde realistisch te simuleren.



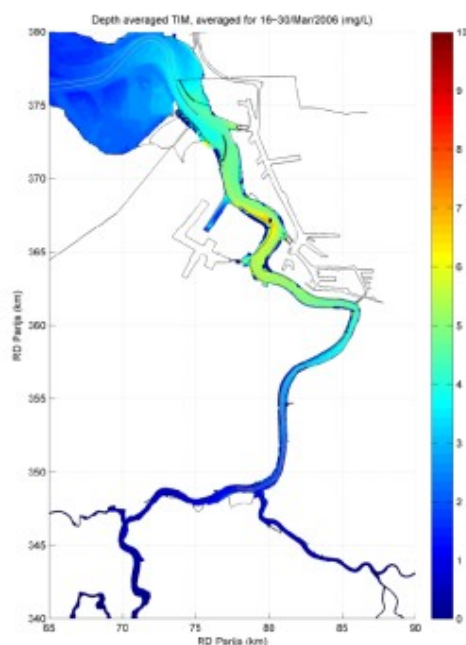
Figuur 3-13: Gemiddelde slibconcentratie over springtij – doottij cyclus bij eenheidslozing te Oosterweel.

Overgenomen uit IMDC (2013)



Figuur 4-10: Gemiddelde slibconcentratie (mg/l) over springtij – doottij cyclus bij eenheidslozing te Schaar van Ouden Doel.

Overgenomen uit IMDC (2013)



Figuur 4-12: Gemiddelde slibconcentratie (mg/l) over springtij – doottij cyclus bij eenheidslozing te Ketelplaat.

Overgenomen uit IMDC (2013)

Beperken we het studiegebied tot het modeldomein van onderhavige studie, dan geven de simulatieresultaten aan dat de marge beperkt is om de stortstrategie aan te passen om het risico op regime shift te beperken en tegelijkertijd de productiviteit in de Beneden-Zeeschelde en de Westerschelde te vrijwaren, althans gegeven de huidige storthoeveelheden. Het scenario S428 ligt mogelijk binnen deze marge: het gesimuleerde effect op productie is van de grootteorde 1%. Een piste die kort is aangehaald maar binnen het bestek van deze studie niet verder werd onderzocht, is om in de planning van de onderhoudswerken en in het bijzonder van de stortingen rekening te houden met de periode van maximale productiviteit. Een stortscenario waarin men tijdens de voorjaarsbloei en de daaropvolgende zomerperiode de stortintensiteit verlaagt, en dit compenseert door een verhoogde stortintensiteit in de winterperiode is naar primaire productie altijd gunstiger dan een scenario waarin de stortingen gelijkmatig over het jaar verdeeld worden. Daarmee zou de negatieve impact verder gereduceerd kunnen worden, mogelijk ook voor de scenario's S429 en S434. Aangezien typisch de debieten in de winterperiode hoger liggen, zou zo'n slimme timing van de stortingen ook gunstig zijn voor het verminderen van het risico op regime-shift. Ook binnen de huidige stortstrategie zou de piste van een slimme timing verder onderzocht kunnen worden.

In de scenario's die in deze studie onderzocht zijn bestaat er altijd een trade-off tussen beide doelstellingen (verminderen risico regime-shift en behoud productiviteit), tenminste wanneer men deze

wil bereiken door het wijzigen van de stortstrategie in de Beneden-Zeeschelde en gegeven de huidige storthoeveelheden. Het mogelijk verminderd risico op regime-shift moet dan worden afgewogen ten opzichte van een verwachte afname van de productiviteit in het estuarium. Zoals aangehaald is het plausibel dat een meer stroomafwaartse stortlocatie gunstig kan zijn voor de primaire productie in de Boven-Zeeschelde. Daar zijn de doelstellingen sowieso compatibel: een vermindering van het risico op regime-shift houdt in die zone per definitie een verbetering van het lichtklimaat in. Weliswaar dient bij een verschuiving van de productiviteit van de Beneden-Zeeschelde en de Westerschelde naar de Boven-Zeeschelde de kanttekening gemaakt dat deze zones ecologisch niet equivalent zijn, en ook de functionele rol en het belang van primaire productie er a priori anders zijn.

Tot slot is het nuttig te vermelden op dat zowel de statische als de dynamische benadering volledig afhankelijk is van de SPM-simulaties uitgevoerd met het 2D model. Deze simulaties zijn onder meer uitgevoerd met opgemeten bovendebieten uit de periode 24/09/2009-24/10/2009 (Coen *et al*, 2015a,b). Zoals bekend uit andere studies (bv. Vandenbruwaene *et al*, 2015) worden de SPM-concentraties in de Schelde beïnvloed door bovendebieten. De relatieve verhoging/verlaging die het gevolg zijn van de verschillende stortscenario's zijn in principe enkel geldig voor een situatie met gelijkaardige bovendebieten als deze gebruikt in de simulatie.

Referenties

Adriaensen, F.; Van Damme, S.; Van den Bergh, E.; Van Hove, D.; Brys, R.; Cox, T.; Jacobs, S.; Konings, P.; Maes, J.; Maris, T.; Mertens, W.; Nachtergale, L.; Struyf, E.; Van Braeckel, A. & Meire, P. (2005), 'Instandhoudingsdoelstellingen Schelde-estuarium'(Ecobe 05-R82), Technical report, Universiteit Antwerpen.

Coen, L.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015a). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde – Deelrapport 1 – Opzet, validatie en scenarioberekeningen fase 1 met behulp van een numeriek sedimenttransportmodel. Versie 2_0. WL Rapporten, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

Coen, L.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015b). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 3 – Slibscenario's. Versie 1.0. WL Rapporten, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

Cox, T. J. S.; Maris, T.; Soetaert, K.; Conley, D. J.; Van Damme, S.; Meire, P.; Middelburg, J. J.; Vos, M. & Struyf, E. (2009), 'A macro-tidal freshwater ecosystem recovering from hypereutrophication: the Schelde case study', *Biogeosciences* **6**(12), 2935—2948.

Cox, T.; Buis, K. & Meire, P. (2004), 'Datacompilatie in het kader van SMER en MKBA voor de actualisatie van het Sigmaplan. Modelberekeningen en literatuuronderzoek omtrent verwachte effecten van GGG's op de waterkwaliteit van de Schelde'(ECOB 04-R66) Universiteit Antwerpen, Onderzoeksgroep Ecosysteembeheer.

Cox, T.; Soetaert, K. & Meire, P. (2005), 'Studieopdracht in het kader van de actualisatie van het Sigma-plan. Eindrapport (in dutch)'(ECOB 05-R75) Universiteit Antwerpen, Onderzoeksgroep Ecosysteembeheer.

Cox, T.; Soetaert, K.; Vanderborght, J. P.; Kromkamp, J. & Meire, P. (2010), 'Modelling photosynthesis-irradiance curves: effects of temperature, dissolved silica depletion and changing community assemblage on community photosynthesis', *Limnology and Oceanography - Methods* **8**, 424-440.

Cox, T. J. S.; Maris, T.; Soetaert, K.; Kromkamp, J. C.; Meire, P. & Meysman, F. (2015), 'Estimating primary production from oxygen time series: A novel approach in the frequency domain', *Limnology and Oceanography: Methods*, 13 529-552.

Gazeau, F.; Middelburg, J. J.; Loijens, M.; Vanderborght, J. P.; Pizay, M. D. & Gattuso, J. P. (2007), 'Planktonic primary production in estuaries: comparison of C-14, O-2 and O-18 methods', *Aquatic Microbial Ecology* **46**(1), 95—106.

IMDC (2013) LTV-Veiligheid en Toegankelijkheid. Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie. Basisrapport specifieke beheersvragen B23: Analyse stortvakken Beneden-Zeeschelde. International Marine & Dredging Consultants ism. Deltares, Svašek Hydraulics en ARCADIS Nederland iov. Afdeling Maritieme Toegang: Antwerpen.

- Kromkamp, J. & Peene, J. (1995), 'On the possibility of net primary production in the turbid Schelde estuary (SW Netherlands)', *Mar Ecol-Prog Ser* **121**, 249-259.
- Kromkamp, J. C. & Peene, J. (2005), 'Changes in phytoplankton biomass and primary production between 1991 and 2001 in the Westerschelde estuary (Belgium/The Netherlands)', *Hydrobiologia* **540**(1 - 3), 117--126.
- Depreiter, D.; J., C.; van der Laan, T.; Maris, T.; Ysebaert, T. & Wijnhoven, S. (2013), 'T2009 rapportage Schelde estuarium.'. IMDC, ARCADIS, Universiteit Antwerpen, IMARES, NIOZ..
- Kromkamp, J.; Peene, J; Vlaming, J (2014), 'Primaire productie in de Westerschelde 2010-2013. Eindrapport.
- Lionard, M.; Muylaert, K.; Tackx, M. & Vyverman, W. (2008), 'Evaluation of the performance of HPLC-CHEMTAX analysis for determining phytoplankton biomass and composition in a turbid estuary (Schelde, Belgium)', *Estuarine Coastal And Shelf Science* **76**(4), 809-817.
- Maris, T. Oosterlee L. & Meire P. (Red.), 2015. Onderzoek naar de gevolgen van het Sigmaplan, baggeractiviteiten en havenuitbreiding in de Zeeschelde op het milieu. Geïntegreerd eindverslag van het onderzoek verricht in 2013. ECOBE 015-R173 Universiteit Antwerpen, Antwerpen.
- Renquet, R. (2014). Study of the light climate in the Zeeschelde. Master thesis. Interuniversity Master in Marine and Lacustrine Science and Management. UA, UGENT, VUB.
- Soetaert, K. & Herman, P. (1994), 'MOSES. Model of the Scheldt Estuary. Ecosystem model development under SENECA', Technical report, NIOO-CEMO /DGW, 77.
- Tackx, M. L. M.; Herman, P. J. M.; Gasparini, S.; Irigoien, X.; Billiones, R. & Daro, M. H. (2003), 'Selective feeding of *Eurytemora Affinis* (Copepoda, Calanoida) in temperate estuaries: model and field observations', *Estuarine Coastal And Shelf Science* **56**(2), 305--311.
- Vandenbruwaene, W.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Slibbalans Zeeschelde: Deelrapport 4 – Historische evolutie SPM. Versie 4_0. WL Rapporten, 00_029. Waterbouwkundig Laboratorium & Antea: Antwerpen, België.
- Van Engeland, T.; **Cox, T**; Vam Damme; S. Meire P Calibration of physical transport in a 1D estuarine ecosystem model, based on tracer output from a 3D hydrodynamic model : calibration, verification and steady-state simulations (2015) Universiteit Antwerpen, onderzoeksgroep Ecosysteembeheer ECOBE 015-R187