

Opdrachtgever:

Bestuurlijk Overleg Krammer-Volkerak

Resultaten scenario-berekeningen met het 2D en 3D-blauwalgenmodel voor het Volkerak, Krammer en Zoommeer

Planstudie waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer

Rapport

december 2006

Opdrachtgever:

Bestuurlijk Overleg Krammer-Volkerak

Resultaten scenario-berekeningen met het 2D en 3D-blauwalgenmodel voor het Volkerak, Krammer en Zoommeer

Planstudie waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer

Pascal Boderie
Simon Groot
Rolf Hulsbergen
Hans Los
Erwin Meijers

Rapport

december 2006

Inhoud

1	Achtergrond en inleiding.....	1—1
2	Modelberekeningen en varianten	2—1
2.1	Het zoete alternatief.....	2—1
2.2	Het zoute alternatief.....	2—1
2.3	De referentiesituatie	2—2
2.4	De nutriëntenreductiescenario's.....	2—2
2.4.1	Nutriëntenreductie in Brabantse Rivieren.....	2—2
2.4.2	Nutriëntenreductie in het Hollandsch Diep	2—3
2.4.3	Andere bronnen	2—3
3	2D en 3D-modellering.....	3—1
3.1	Achtergrond	3—1
3.2	Specifieke doelstelling.....	3—4
3.3	Modelopzet	3—4
3.3.1	Modellering waterbeweging: Delft3D-FLOW	3—5
3.3.2	Modellering waterkwaliteit: Delft3D-WAQ	3—11
4	Berekeningsresultaten scenario's	4—1
4.1	Randvoorwaarden modellering scenario's.....	4—1
4.1.1	Hydrodynamica met Delft3D-FLOW	4—1
4.1.2	Bodemflux voor fosfaat	4—2
4.1.3	Waterkwaliteit met Delft3D-DBS.....	4—3
4.1.4	Systeem-analyse Volkerak-Krammer-Zoommeer	4—4
4.2	Resultaten modellering scenario's	4—4
4.2.1	Huidige / referentie situatie	4—4

4.2.2	De zoete varianten.....	4—17
4.2.3	De zoute varianten.....	4—26
4.3	Aanvullende berekeningen.....	4—38
4.3.1	Aanvullend zoet scenario	4—38
4.3.2	Aanvullende zoute scenario's.....	4—41
5	Samenvatting en conclusies	5—1
5.1	Huidige / referentie situatie	5—1
5.2	De zoete varianten.....	5—1
5.3	De zoute varianten.....	5—2
5.4	Conclusies	5—3
6	Literatuur.....	6—1

1 Achtergrond en inleiding

Het Bestuurlijk Overleg Krammer-Volkerak (BOKV) wil in het kader van de planstudie/MER en kosten-batenanalyse Volkerak-Zoommeer laten onderzoeken welke maatregelen, uitgaande van aanpassingen aan bestaande infrastructuur, genomen kunnen worden om de overlast van blauwalgen in het watersysteem op de middellange termijn (tot het jaar 2015) zoveel mogelijk te beperken. Bovendien moet een beschrijving en beoordeling van de effecten van deze maatregelen worden gemaakt zodat mede op basis hiervan een beargumenteerde keuze gemaakt kan worden om bepaalde maatregelen daadwerkelijk uit te voeren.

WL | Delft Hydraulics is als onderaannemer van Haskoning betrokken bij de uitvoering van de planstudie / MER. De specifieke rol van WL | Delft Hydraulics ligt ondermeer in het uitvoeren van benodigde modelstudies.

Als onderdeel van de definitiefase zijn verschillende alternatieven en daaronder liggende varianten onderworpen aan een analyse waarmee uit verschillende varianten een subset is geselecteerd. Er is door het Projectteam Alternatieven een voorlopig werkdocument¹ opgesteld waarin voor een negental varianten van de referentiesituatie en verschillende zoute en zoete alternatieven de aard van de te nemen maatregelen is uitgewerkt met daarbij het voorgestelde doorspoelregime. De varianten verschillen vooral van elkaar in de wijze waarop de hydrologie van het Volkerak-Zoommeer wordt beïnvloed.

Ter ondersteuning van de definitiefase zijn in een eerder stadium met behulp van een 1D-waterbewegings- en waterkwaliteitsmodel berekeningen uitgevoerd die inzicht moeten geven over de te verwachten effectiviteit van verschillende varianten ten aanzien van de bestrijding van blauwalgen in het Volkerak-Zoommeer. Op basis van de trechtering van varianten op basis van deze 1D-modelberekeningen, is een aantal varianten geselecteerd om met behulp van het 2D en zonodig 3D-modelinstrumentarium gebaseerd op Delft3D te worden geanalyseerd. In de onderhavige rapportage worden de aanpak en de resultaten van deze 2D en 3D-modelexercitie toegelicht en op hoofdlijnen beschreven.

Voor een meer gedetailleerde beschrijving van het plangebied Volkerak-Zoommeer wordt verwezen naar eerdere rapportages van deze en andere studies (zoals de rapportage in het kader van het project DeltaBreed), en naar de rapportage van de resultaten die met het 1D-modelinstrumentarium zijn verkregen.

¹ *Werkdocument Projectteam Alternatieven – Planstudie Waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer. ‘Mogelijke varianten van de Alternatieven Zoet en Zout’. Versie 2 november 2005.*

2 Modelberekeningen en varianten

Van de negen verschillende varianten die in een eerder stadium zijn doorgerekend met het 1D-model, zijn een tweetal karakteristieke varianten geselecteerd om (naast de referentiesituatie) gedetailleerd te worden doorgerekend met het 2D of 3D-modelinstrumentarium. Deze twee varianten worden verder aangeduid als de zoute en de zoete variant. In deze rapportage worden alleen de resultaten van de waterkwaliteitsberekeningen inclusief blauwalgenbloei beschreven. Voor de beschouwing van de ecologische effecten met behulp van HABITAT instrumentarium wordt verwezen naar de afzonderlijke rapportage daarvan.

2.1 Het zoete alternatief

Bij het beschouwde karakteristieke zoete alternatief wordt het Volkerak-Zoommeer doorspoeld met een grote hoeveelheid zoet rivierwater afkomstig uit het Hollandsch Diep. Daarbij is de aanvoer vanuit het Hollandsch Diep in de zomerperiode lager dan in de winterperiode vanwege de beperktere beschikbaarheid. In deze variant wordt gebruik gemaakt van een extra omloopriool in de Krammersluizen. Hierdoor kunnen inclusief het reguliere schutverlies van daggemiddeld $9 \text{ m}^3/\text{s}$, debieten van maximaal $55 \text{ m}^3/\text{s}$ water extra via de Krammersluizen naar de Oosterschelde afgevoerd worden. De zomerperiode is in deze variant gedefinieerd als de periode van juni t/m oktober. In deze periode is slechts een beperkte hoeveelheid zoet water vanuit het Hollandsch Diep beschikbaar die gelijk verondersteld wordt aan in totaal $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Tevens is er een instroom van $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ zout water door lekverliezen via de Krammersluizen. Daarnaast wordt er in de zomerperiode ongeveer $5 \text{ m}^3/\text{s}$ en in de rest van het jaar $20 \text{ m}^3/\text{s}$ vanuit de Brabantse rivieren aangevoerd. De aanvoer vanuit de verschillende Brabantse rivieren en daaraan gerelateerde nutriëntenbelasting is bepaald door een vaste verdeelsleutel te hanteren voor de verschillende aanvoerposten naar rato van de jaargemiddelde afvoeren. In de modelinvoer is rekening gehouden met het feit dat de gemiddelde spuicapaciteit van de Bathse spuisluizen ten hoogste $125 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt. Naast een simulatie met $100 \text{ m}^3/\text{s}$ vanuit het Hollandsch Diep is ook een berekening uitgevoerd met een debiet van $150 \text{ m}^3/\text{s}$, ook al staat daarvan vast dat een dergelijk groot debiet niet elk jaar de gehele zomerperiode beschikbaar is.

2.2 Het zoute alternatief

Bij het beschouwde karakteristieke zoute alternatief wordt het Volkerak-Zoommeer doorspoeld met een grote hoeveelheid zout water uit de Oosterschelde. In deze variant wordt via een doorlaatmiddel in de Philipsdam een daggemiddeld debiet van $100 \text{ m}^3/\text{s}$ zout water vanuit de Oosterschelde ingelaten. De afvoer van de Brabantse rivieren is variabel. Om zoutindringing tegen te gaan wordt het afgevoerde water tijdelijk tegengehouden en dagelijks regelmatig gespuid. Bij de Volkeraksluizen wordt op basis van het principe van lekkende deuren een lekverlies van $50 \text{ m}^3/\text{s}$ gecreëerd om zoutwaterindringing op het Hollandsch Diep tegen te gaan. De afvoer van het water via het doorlaatmiddel inclusief schutverliezen in de Krammersluizen bedraagt ongeveer $60 \text{ m}^3/\text{s}$. Het overige water wordt naast een geringe afvoer via de Kreekraksluizen ($3 \text{ m}^3/\text{s}$) grotendeels via de Bathse

spuisluizen gespuid op de Westerschelde. Ook hier geldt een maximum afvoercapaciteit van daggemiddeld 125 m³/s. Er is een aanvullende simulatie gemaakt voor een situatie waarbij slechts 30 m³/s water bij de Volkeraksluizen wordt ingelaten om zoutwaterindringing op het Hollandsch Diep tegen te gaan.

2.3 De referentiesituatie

Eén van de varianten die gedetailleerd is beschouwd betreft de referentiesituatie. In de referentiesituatie wordt de instroom vanuit de Brabantse rivieren in beschouwing genomen, terwijl daarnaast rekening wordt gehouden met een instroom van 2,5 m³/s zoet water door schutverlies via de Volkeraksluizen. Bij de Krammersluizen is er een uitstroom van 9 m³/s water door schutverlies en een instroom van 0,5 m³/s zout water door lekverliezen. De afvoer van het restant aan water vindt plaats via de Bathse spuisluis in het uiterste zuiden. In de richtlijnen voor de MER wordt genoemd dat bij het referentiealternatief de huidige situatie wordt beschouwd en derhalve geen substantiële maatregelen worden uitgevoerd.

De autonome ontwikkelingen die reeds zijn vastgelegd in genomen beslissingen en geplande beheersmaatregelen zijn in een apart nutriëntenreductiescenario ondergebracht. Hieronder waaronder wordt verstaan versterkt beheer door middel van visstandbeheer, inzet filters (driehoeksmosselen) en zoveel mogelijk terugdringen van de nutriëntenbelasting via autonome ontwikkelingen in het stroomgebied en eventueel een verdere optimalisatie van de beperking van de waterinlaat vanuit het Hollandsch Diep. Alleen deze laatste ontwikkelingen worden meegenomen in de analyse die is aangeduid als een apart nutriëntenreductiescenario onder de naam ‘autonome ontwikkelingen’ of ‘midden scenario’. De andere vormen van beheer zijn niet met het model gesimuleerd.

2.4 De nutriëntenreductiescenario's

Bij elk van de hierboven beschreven modelberekeningen worden verschillende scenario's voor nutriëntenreductie gehanteerd. Dit betreft de volgende situaties:

2.4.1 Nutriëntenreductie in Brabantse Rivieren

Tijdens het PT-ALT overleg van 13 december 2005 is besloten dat voor de Brabantse rivieren drie scenario's voor nutriëntenreductie gehanteerd worden:

- *Stand-still scenario*: Stand-still voor stikstof en fosfaat ten opzichte van het jaar 2000;
- *Midden scenario*: Stand-still voor fosfaat en 15% reductie voor stikstof ten opzichte van het jaar 2000 (op basis van berekeningen uitgevoerd in het kader van het afstudeeronderzoek van Kees aan de Wiel²);
- *Maximale scenario*: Maximale variant op basis van MTR waarden (tenzij concentratie op de rand reeds onder de MTR waarde ligt).

² *Wiel, K. aan de, et al., 2006. Brongerichte maatregelen waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer. Emissiescenario's nutriënten 2015. RIZA-werkdocument 2006.054X en PPO-rapportnummer 32500004.*

2.4.2 Nutriëntenreductie in het Hollandsch Diep

Voor de autonome ontwikkeling in nutriëntenreductie wordt gebruik gemaakt van de ‘Quick scan stofstromen studie’ die door RIZA is uitgevoerd in 2005. Deze studie had als doel in kaart te brengen welke vrachten er te verwachten zijn in 2015 wanneer voorgenomen maatregelen in het stroomgebied van de Maas en Rijn getroffen worden. Hierbij is ook gekeken wat de reductie zou zijn aan de grens wanneer bovenstrooms gelegen landen maatregelen treffen conform de KRW-artikel 5 rapportages voor hun stroomgebied. Door nu de verwachte vrachten in 2015 uit het stofstromenmodel te vergelijken met de vrachten in 2000 kan afgeleid worden met welke percentages stikstof en fosfaat in het Hollandsch Diep gereduceerd worden. De percentages bedragen 36% voor totaal stikstof en 18% voor totaal fosfaat. Naast dit reductiescenario wordt analoog aan de situatie voor de Brabantse rivieren het stand-still scenario voor N en P ten opzichte van het jaar 2000 en het MTR scenario voor stikstof en fosfaat doorgerekend kunnen worden om de bandbreedte te bepalen.

Hieruit volgen dus de volgende nutriëntenreductiescenario's:

- *Stand-still scenario*: Stand-still voor stikstof en fosfaat ten opzichte van het jaar 2000;
- *Midden scenario*: Reductie van 36% voor stikstof en 18% voor fosfaat in 2015 ten opzichte van het jaar 2000 conform de resultaten van de Quick Scan Stofstromenstudie (Driesprong, 2005);
- *Maximale scenario*: Maximale variant op basis van MTR waarden (tenzij concentratie op de rand reeds onder de MTR waarde ligt).

2.4.3 Andere bronnen

Er wordt bij de modelberekeningen geen reductie aan nutriënten opgelegd op direct op het Volkerak-Zoommeer uitslaande RWZI's en poldergemalen, omdat deze reductie niet significant bijdraagt aan de totale belasting.

3 2D en 3D-modellering

3.1 Achtergrond

Door de vorming van het Volkerak-Zoommeer veranderde het voormalige getijdengebied binnen één jaar in een zoetwatermeer met een vast peil. De eerste jaren leek de waterkwaliteit zich gunstig te ontwikkelen maar daarna veranderde de situatie. Vanaf 1994 vindt er iedere zomer één of meerdere keren een bloei van blauwalgen plaats. De meest dominante soort is *Microcystis*. Deze bloeiperiodes van *Microcystis* zorgen iedere zomer voor overlast. Doordat *Microcystis* lichter is dan water ontstaan er onder windstille omstandigheden drijfslagen. Drijfslagen zijn ophopingen van blauwalgen aan het wateroppervlak. Deze drijfslagen hopen zich vooral op nabij de oevers en ondiepe delen waar ze gaan rotten en voor stankoverlast zorgen. Aangezien *Microcystis* giftige stoffen produceert die ook gevaarlijk zijn voor de mens, vormen de algen, en vooral de drijfslagen, ook een gevaar voor de volksgezondheid (Huisman et al. 2005). Om dat gevaar te beperken worden er in de (na-)zomer vaak zwemwaarschuwingen gegeven en wordt het water uit het Volkerak niet gebruikt als irrigatiewater voor de landbouw. Daarnaast zijn er aanwijzingen dat bloei van giftige algen effect heeft op andere organismen in het meer. Tijdens een bloeiperiode van *Microcystis* worden er dode vissen aangetroffen, terwijl tijdens de bloei van 2002 er bijna 5000 vogels stierven.

Er is een aantal oorzaken voor de massale bloei van *Microcystis* in het Volkerak-Zoommeer. In de eerste plaats is het meer erg voedselrijk, met name door de aanvoer van nutriënten via de Brabantse rivieren³. In de tweede plaats is er een geringe doorstroming van water door het meer, zodat de verblijftijd van water erg lang is (120 dagen). Beide factoren zorgen er voor dat *Microcystis* zich beter kan handhaven dan andere, minder schadelijke, soorten. Om problemen met *Microcystis* in de toekomst te voorkomen worden er grootschalige waterbeheersmaatregelen overwogen. De maatregelen die op dit moment door Rijkswaterstaat en de overige waterbeheerders in overweging worden genomen zijn:

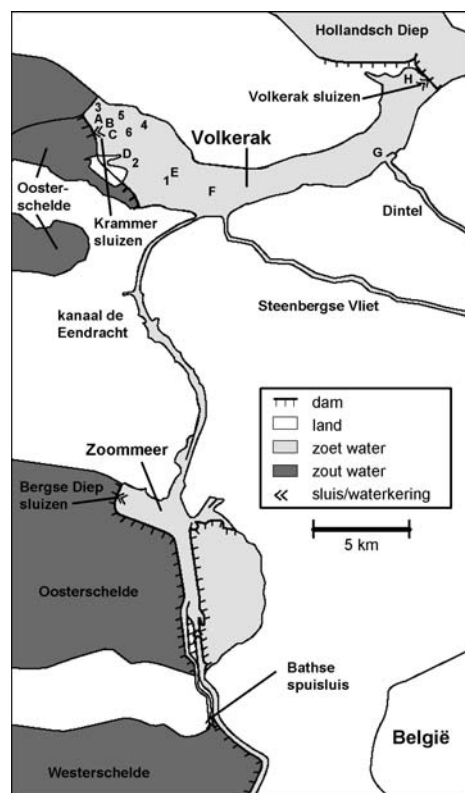
- verlaging van de aanvoer van nutriënten via de Brabantse rivieren;
- verlagen van de verblijftijd door het verhogen van de stroomsnelheid van water in het Volkerak-Zoommeer, en
- het herintroduceren van zout water.

Als de aanvoer van nutriënten voldoende afneemt, is er op een gegeven moment niet voldoende voedsel voor *Microcystis* om uit te groeien tot een massale zomerbloei. Door de verblijftijd te verlagen, wordt *Microcystis* uit het Volkerak-Zoommeer weggespoeld en komt het in de Westerschelde en mogelijk Oosterschelde terecht, waar de algen afsterven door het

³ In 2000 bedroeg de relatieve aanvoer van nutriënten door de Dintel, Steenbergse Vliet en het Hollandsch Diep respectievelijk 59, 26 en 5% voor stikstof en respectievelijk 65, 12 en 11% voor fosfaat (Kouer en Griffioen 2003).

te hoge chloridegehalte. Door het binnenlaten van voldoende zout water zal *Microcystis* in het Volkerak-Zoommeer zelf door het hoge chloridegehalte afsterven.

De blauwalg *Microcystis* maakt microcystines en andere toxische stoffen aan die gevaarlijk kunnen zijn voor mens en dier. Aanraking of inslikken van (grote) hoeveelheden blauwalgen of toxines kan leiden tot huidirritaties, braken, darmproblemen, leverschade, verlamming of zelfs de dood. Het is lastig om precies aan te geven tot welk niveau de *Microcystis*-concentratie gereduceerd moet worden om overlast en gezondheidsproblemen door drijfslagen uit te sluiten. Volgens de WHO norm is het risico voor de volksgezondheid aanvaardbaar bij een dominerende *Microcystis* bloei van ten hoogste 20.000 cellen per milliliter (hetgeen bij benadering overeenkomt met een chlorofyl *a* gehalte van 10 µg/l). Bij deze dichtheid aan blauwalgen kan een microcystine concentratie van 2-4 µg/l verwacht worden indien er sprake is microcystine producerende blauwalgen. In het ergste geval is zelfs een concentratie van 10 µg/l microcystine mogelijk. Bij 100.000 *Microcystis* cellen per milliliter (of bij benadering 50 µg/l chlorofyl) wordt door de WHO aanbevolen om zwemmen te ontraden. Bij deze dichtheden zijn toxinesgehalte van 20 µg/l (WHO, 2003) mogelijk, maar kunnen bij zeer toxische soorten oplopen tot 50 µg/l. In het licht van bovenstaande zouden maatregelen ter bestrijding van de blauwalgen dan ook tot doel moeten hebben om de chlorofyl-concentraties van een door blauwalgen gedomineerd zoet watersysteem in ieder geval in de nazomer terug te dringen tot beneden de 50 µg/l chlorofyl. Er kunnen bij deze concentraties nog wel drijfslagen ('scums') voorkomen die een probleem kunnen opleveren. Voor zout oppervlaktewater bestaan geen algennormen.



Figuur 3.1: Kaart met meetlocaties in het Volkerak-Zoommeer (periode januari 2000 tot september 2001). Op de punten A-H zijn de hoeveelheden *Microcystis* in het sediment gemeten. Op de punten D, F en G is ook de *Microcystis* concentratie in de waterkolom gemeten. De punten 1-6 geven aan waar

sediment- en rekruteringsvallen zijn geplaatst. Punt C komt overeen met meetlocatie Philipsdam, punt F met meetlocatie Steenberg en punt G met meetlocatie Volkerak02.

Aan de Universiteit van Amsterdam (UvA) is in opdracht van Rijkswaterstaat een model ontwikkeld dat de populatiedynamica van *Microcystis* in water en sediment beschrijft. Het model is gebaseerd op monitoring in het veld (Figuur 3.1) en metingen in het laboratorium en beschrijft in detail de invloed van licht, temperatuur en chloridegehalte op de groei van blauwalgen (Verspagen et al. 2006). In het UvA-model wordt het Volkerak verdeeld in vier compartimenten: één water compartiment en drie sediment compartimenten met verschillende dieptes. Uit onderzoek bleek namelijk dat er grote hoeveelheden vitale *Microcystis* op het sediment voorkomen, die zouden kunnen bijdragen aan de grootte van de bloei van *Microcystis* in de waterkolom (Verspagen et al. 2004, 2005a).

Vanwege de onzekerheid die het model met één water compartiment heeft bij het doorrekenen van doorspoelvarianten is het wenselijk geacht om dit model te koppelen met een 2D waterbewegingsmodel. Dit heeft geleid een samenwerkingsproject van de UvA en het Waterloopkundig Laboratorium (WL | Delft Hydraulics). In dit samenwerkingsproject is een subset van procesformuleringen uit het UvA *Microcystis* model aan het Delft3D-instrumentarium toegevoegd om hiermee de ruimtelijke verspreiding van *Microcystis* te kunnen voorspellen. Deze versie wordt verder aangeduid als Delft3D-UvA.

In het samenwerkingproject is ook een tweede modelontwikkelingstraject gestart, waarbij gebruikt gemaakt wordt van processen uit de bestaande WAQ processenbibliotheek van Delft3D. Deze versie wordt verder aangeduid als Delft3D-DBS (DELWAQ-BLOOM-SWITCH). Deze toepassing is gestart vanuit drie doelstellingen, te weten:

- inzicht krijgen in de invloed van nutriënten op de groei van *Microcystis*;
- inzicht krijgen in mogelijke competitie met andere (zoete en zoute)algen; en
- verkrijgen van aanknopingspunten om te komen tot verdere verbetering en synergie van de beide modelconcepten.

Dit tweede modelontwikkelingstraject maakt formeel géén deel uit van deze opdracht en is om die reden niet opgenomen in deze rapportage. De verificatie van de toepassing van Delft3D-DBS met beide algenformuleringen voor het jaar 2002 in het Volkerak-Zoommeer is afzonderlijk gerapporteerd (memo Q4188, juli 2006). Voor de achtergronden van het standaard algenbloei-model BLOOM wordt verwezen naar Los (1991).

In tegenstelling tot de zoete varianten treedt bij alle zoute varianten een significante stratificatie op door dichtheidsverschillen, die een beschouwing met een driedimensionaal model noodzakelijk maakt. Omdat de gebruikte procesformuleringen van WAQ (DELWAQ-BLOOM-SWITCH) zowel voor een 2D-berekening als een 3D-berekening kunnen worden gebruikt, geeft het ontwikkelde modelinstrumentarium de mogelijkheid om zowel 2D als 3D-berekeningen te maken. De procesformulering voor zout water wordt overigens aangeduid als GEM (General Ecological Model for estuaries). Met het Delft3D-UvA model kunnen alleen 2D-berekeningen worden gemaakt.

Het op Delft3D gebaseerde modelinstrumentarium is vervolgens gebruikt om de effecten van twee fundamenteel verschillende beheersmaatregelen op de grootte van de zomerbloei

van blauwalgen te berekenen, namelijk, het doorspoelen van het meer met zoet water en het doorspoelen van het meer met zout water.

In deze rapportage zijn zowel de berekeningsresultaten opgenomen die met het 2D-modelinstrumentarium voor de zoete varianten zijn uitgevoerd, als de resultaten met het 3D-modelinstrumentarium om de effecten van de zoute varianten te kunnen beoordelen.

3.2 Specifieke doelstelling

De concrete onderzoeksvragen voor de Planstudie/MER Volkerak-Zoommeer die met het ontwikkelde modelinstrument worden beschouwd zijn:

- Hoe verandert de ruimtelijke verspreiding en groei van blauwalgen in het Volkerak-Zoommeer mede in relatie tot de bodemligging;
- Wat is het effect van doorspoelen met zoet water uit het Hollandsch Diep en daaruit afgeleid: wat is het kritische zoetwater debiet waarbij de blauwalgenbloei onder een aanvaardbaar niveau blijft. Wat is de invloed van dode zones;
- Wat is het effect van verzilten en doorspoelen met zout water en daaruit afgeleid: wat is het kritische zoutwater debiet waarbij de blauwalgenbloei onder een aanvaardbaar niveau blijft;
- Wat is het effect van bronsanering (niet van toepassing op Delft3D-UvA omdat daarin de groei van *Microcystis* onafhankelijk is van het aanbod aan nutriënten).

3.3 Modelopzet

De 2D-modellen die de waterbeweging en de waterkwaliteit van het Volkerak-Zoommeer simuleren zijn ontwikkeld met behulp van het softwarepakket Delft3D. Delft3D is een geïntegreerde 3D-modelleeromgeving waarmee in verschillende modules waterstromen, sediment transport, golven, water kwaliteit, morfologische ontwikkelingen en ecologie in kustwateren, rivieren, meren en estuariene wateren gesimuleerd kunnen worden. Met het pakket kunnen zowel 2D als 3D-berekeningen worden gemaakt. De waterbeweging en waterkwaliteit worden in aparte modules ontwikkeld. Uitkomsten uit de waterbewegingsmodule worden automatisch gebruikt in de waterkwaliteitsmodule.

De waterbeweging is gemodelleerd met behulp van de Delft3D-FLOW module. De Delft3D-FLOW module is gebaseerd op de WAQUA-model schematisatie die door Piet Lievense (2002) van RWS Directie Zeeland is gemaakt. De waterbeweging die door de FLOW module berekend wordt, dient als basis voor de waterkwaliteitsmodellen. Voor de zoete varianten en de huidige situatie wordt gebruik gemaakt van een 2D-waterbeweging, waarbij impliciet is aangenomen dat er daarbij geen stratificatie optreedt in het meer. Bij de zoute varianten moet de optredende zoutstratificatie en dichtheidsstroming expliciet worden beschreven en is noodgedwongen overgestapt op een 3D-berekening.

Er zijn twee modellen beschikbaar gekomen die de populatiedynamica van *Microcystis* beschrijven. Het eerste model is gebaseerd op het bestaande UvA *Microcystis* model. Het UvA model is ontleed in verschillende subroutines en herschreven in FORTRAN-code, gebruik makend van de Open Processen Bibliotheek van Delft3D. Deze aanpak maakt het dynamisch aansturen van verschillende processen die de groei en verspreiding van

Microcystis bepalen (transport, lichtintensiteit, saliniteit en temperatuur) mogelijk vanuit Delft3D. Het uiteindelijke resultaat is een *Microcystis* procesmodule die voor specifieke parameters kan communiceren met een draaiend Delft3D model. Het Delft3D-UvA model kan alleen worden gebruikt voor 2D-berekeningen (zoete varianten en huidige situatie).

Het tweede model is een bestaand DBS model (DELWAQ-BLOOM-SWITCH) dat is opgezet volgens de gangbare praktijk van WL | Delft Hydraulics, waarbij op basis van de door het jaar veranderende waterbeweging en belastingen van het watersysteem de primaire productie berekend wordt van een viertal algengroepen, waaronder *Microcystis*. Op deze manier wordt inzicht verkregen in de respons van de (blauw)algen op variabele nutriëntenconcentraties, lichtintensiteit, temperatuur, saliniteit, onderlinge competitie met andere algensoorten en een opgelegde graasintensiteit door zooplankton. Het Delft3D-DBS model kan zowel voor 2D als 3D-berekeningen worden gebruikt, en is derhalve geschikt voor zowel de zoete als de zoute varianten, en uiteraard voor de beschouwing van de huidige situatie in het Volkerak-Zoommeer.

Beide algenformuleringen zijn ondergebracht in een op het Delft3D-pakket gebaseerd modelinstrumentarium waarmee een uitspraak gedaan kan worden over de ruimtelijke verspreiding van *Microcystis*. Bij het ontwikkelen van de modellen zijn de processen in principe geijkt op de meetwaarden van 2000 en gevalideerd op de meetwaarden van 2001.

3.3.1 Modelling waterbeweging: Delft3D-FLOW

De waterbeweging is gemodelleerd met behulp van Delft3D-FLOW. Delft3D-FLOW is een modelomgeving om meerdimensionale hydrodynamische stromen en transporten, gestuurd door meteorologische parameters, waterafvoeren en getijdenbewegingen, te simuleren. De hydrodynamische condities (snelheid, waterstand, dichtheid en chloridegehalte) berekend met Delft3D-FLOW kunnen als invoer voor andere Delft3D modules gebruikt worden.

Het grid, de bathymetrie en de randgegevens van het 2D-model zijn aangeleverd door het RIKZ in de vorm van een WAQUA-model (Lievence 2002). Er is een grove en een fijne schematisatie aangeleverd, maar alleen de grove schematisatie is gebruikt. Alle gegevens zijn geconverteerd naar een Delft3D-FLOW model.

Randgegevens

De randgegevens uit WAQUA bleken niet bruikbaar omdat ze slechts een periode van 7 dagen bestreken en omdat ze niet cyclisch waren gemaakt (sluitfout). In plaats van randgegevens uit WAQUA zijn daarom gegevens uit een studie van Kouer en Griffioen (2003) gebruikt om de debieten en concentraties op de randen in en uit het model te bepalen. Randgegevens zijn vanuit het model CONVER (Kouer en Griffioen, 2003) geconverteerd en aan Delft3D toegevoegd.

Grid

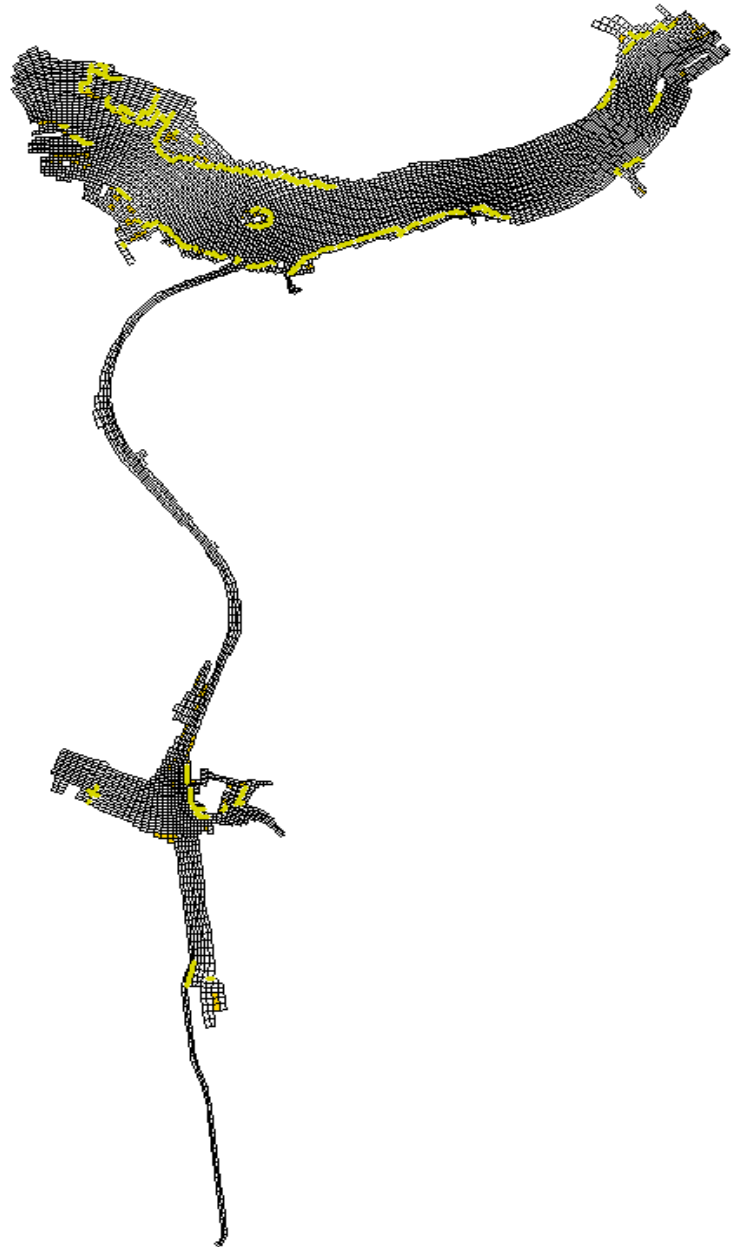
Het grid van het Delft3D-FLOW model is weergegeven in Figuur 3.2. Het WAQUA-model heeft ook gridcellen buiten de Bergse Diepsluis, de Krammer sluis en de Bathse spuisluis (niet zichtbaar gemaakt op de kaart). Omdat deze delen geen onderdeel zijn van het Delft3D-FLOW model (in het WAQUA model waren ze slechts aanwezig voor toekomstige

Real-Time Control) zijn ze verwijderd. Alle randinvloeden zijn gemodelleerd als totale afvoer (Total Discharge Boundaries).

Om de rekentijd van Delft3D-WAQ te verkorten is het grid dat in Delft3D-FLOW is gebruikt geaggregeerd. Bij deze aggregatie is eerst het gehele grid met een factor twee in beide dimensies grover gemaakt. Enkele cellen langs de randen zijn samengevoegd met naburige cellen. Op de plekken waar het grid zeer fijn was, met name nabij meetpunt Steenbergen en Volkerak02 (meetpunten F en G), is er extra geaggregeerd.

Waterstand en debieten

Bij grote debieten door de Bathse Spuisluis kan de waterstand in het Volkerak-Zoommeer oplopen vanwege het daarbij horende grotere verhang (zoals voorspeld door Haas en Tosserams, 2001). Als het debiet erg groot wordt dan is er een groot verhang nodig om de energieverliezen te compenseren. Er is een Excel programma gebruikt om op basis van een simpele 0-dimensionale waterbalans voor het gebied een eerste schatting van de debieten door de Bathse Spuisluis, Volkerak Spuisluis, Krammersluizen en Bergse Diepsluis te maken. Op basis van deze middelen een spreadsheet bepaalde waterbalans berekent Delft3D-FLOW een gedetailleerde stromingen in het beschouwde gebied.



Figuur 3.2: Grid gebruikt voor het 2D waterbewegingsmodel in Delft3D.

Het spreadsheet programma gaat uit van een model dat sterk vereenvoudigd is ten opzichte van het FLOW model:

- Het spreadsheet is 0-dimensionale benadering bestaande uit een enkel bakje waar water in- en uitstroomt. Het houdt dus geen rekening met looptijden.
- Het verhang is in het spreadsheet model opgenomen als een constante waarde, die iteratief wordt bepaald met behulp van FLOW. Er wordt uitgegaan van een constant verschil tussen de gemiddelde waterstand en de waterstand bij de Bathse Spuisluis van 1 cm bij het referentie scenario. Waterstandsverschillen tussen gemiddeld peil en de Krammersluizen zijn -30% van deze waarde.
- Het spreadsheet model houdt geen rekening met windopzet.

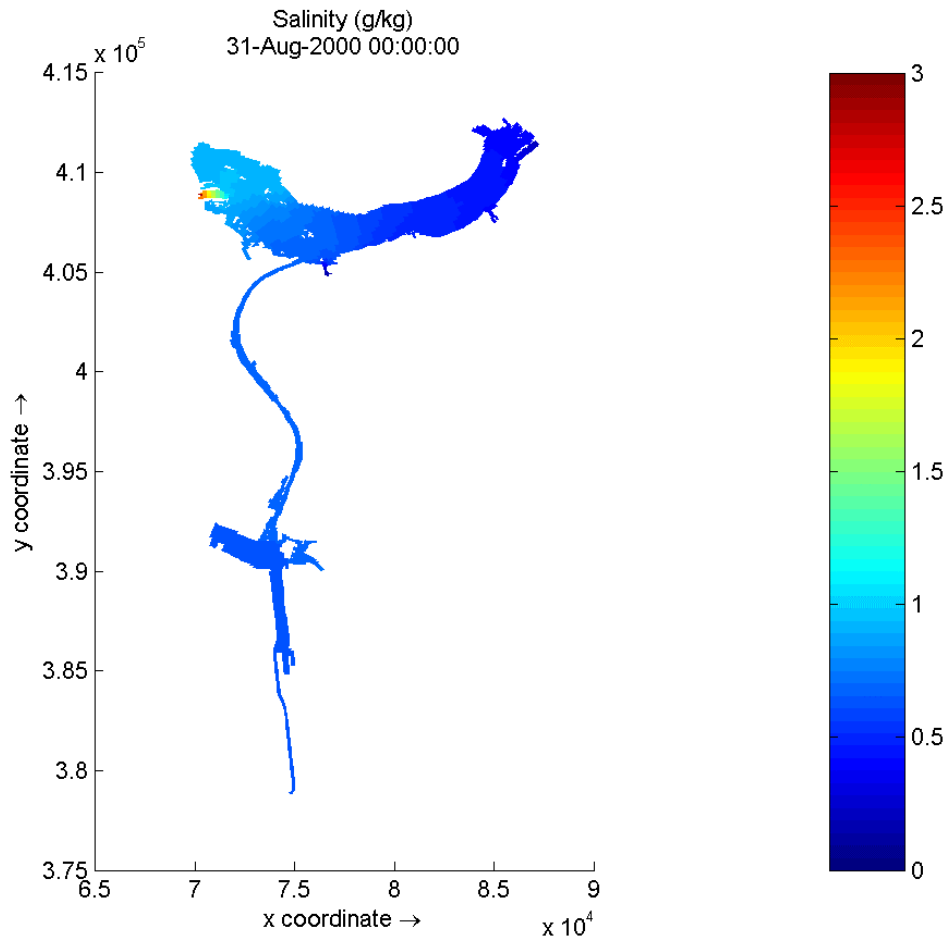
- Het spreadsheet model gaat uit van een rond NAP gelineariseerde relatie tussen het volume en de waterstand.
- Het eenvoudige spreadsheet model werkt met een tijdstap van 10 minuten en gebruikt de invoer als blokfunctie, terwijl het FLOW model debietwaarden als lineaire functie gebruikt.
- Om te voorkomen dat de waterstand in het Volkerak-Zoommeer te hoog wordt, is een maximum waterstand van 0,20 m +NAP ingesteld, waarboven geen water meer wordt ingelaten via de Volkeraksluizen.

Als gevolg van de vereenvoudigingen blijkt dat de waterstand zoals in FLOW wordt berekend tot 10 cm kan afwijken van de waterstand zoals in het vereenvoudigde Excel spreadsheet model wordt berekend. Deze afwijking blijken echter niet cumulatief te zijn, want zelfs bij de referentieberekening over 2 achtereenvolgende jaren blijft de afwijking van de waterstand binnen de gestelde marge. Het vereenvoudigde model is daarmee een bruikbaar hulpmiddel om na te gaan of voorgestelde varianten problemen zouden kunnen opleveren bij de (tijdrovende) berekening van de hydrodynamica met Delft3D-FLOW.

Zout

Voor een correcte beschrijving van de chloridegehalten in het Volkerak-Zoommeer zijn de volgende toevoegingen/aanpassingen doorgevoerd voor de berekening van de waterbeweging:

- Er is een extra inlaat-locatie toegevoegd bij de Krammersluizen zodat het lekken van zout water vanuit de Oosterschelde meegenomen kan worden in het model.
- Om het lekken van zout water door de Krammersluizen te modelleren zijn 2-wekelijkse chloridegehalten (2000 en 2001) gebruikt uit <http://www.waterbase.nl/>.
- Het zoute water dat via de Krammersluizen en de Bathse spuisluisen naar binnen lekt en de waarden voor dispersie en 'eddy viscositeit' zijn geschat door de gemodelleerde chloridegehalten te vergelijken met gemeten chloridegehalten op meetlocaties Philipsdam, Steenberg, Volkerak02 en Oesterdam. De chloridegehalten van de meetlocaties zijn afgeleid uit de door RIZA toegeleverde CONVER invoerbestanden (Kouer en Griffioen, 2003). Een zoutlek van $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ in combinatie met een eddy viscositeit van $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ en een dispersie van $5 \text{ m}^2/\text{s}$ levert bij het gekozen grid en schematisatie resultaten die overeen komen met de gemeten chloridegehalten in het meer. Deze waarden hebben in principe een vrij grote onzekerheid en kunnen nog verder geoptimaliseerd worden (Figuur 3.3).
- De Volkeraksluizen bestaan uit twee sluiscomplexen: de scheepssluisen en de spuisluisen. In het referentie-scenario zijn deze sluisen samengevoegd omdat de debieten van deze locatie in CONVER gesommeerd werden aangeleverd.



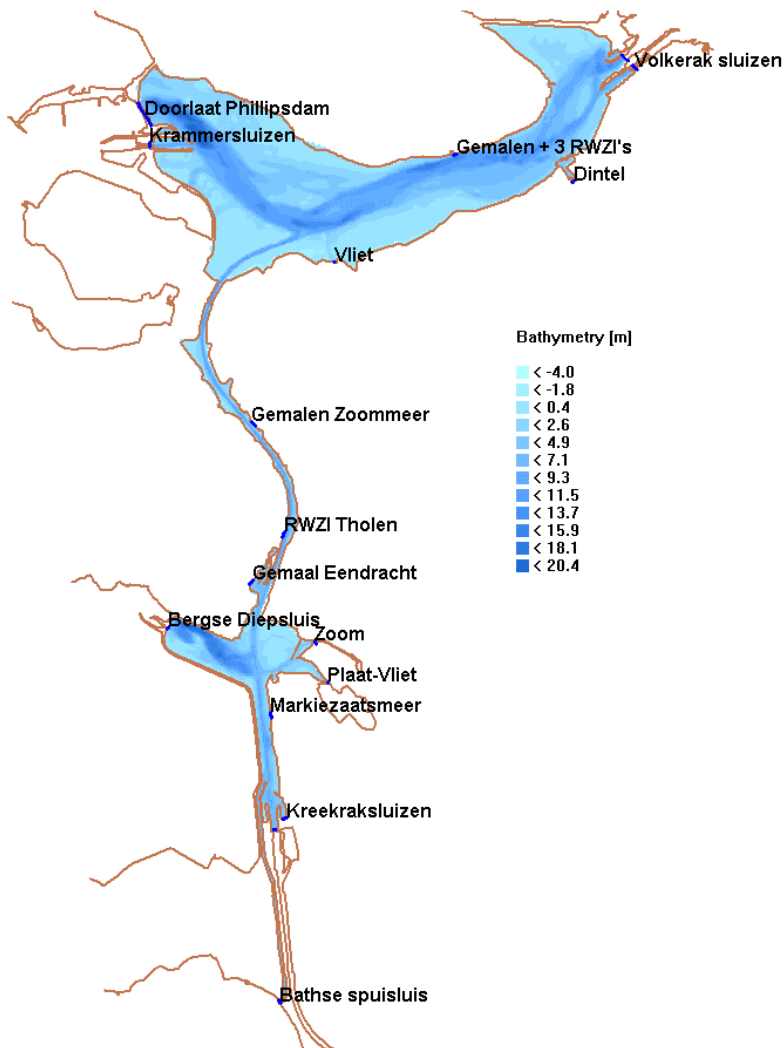
Figuur 3.3: Binnendringen van zoutwater bij de Krammer- en Bathse sluizen (chloridegehalte van 0-3 g/l).

Waterkwaliteit

- De debieten, nutriënten concentraties en chloridegehalten van 2000 zijn aangeleverd in CONVER⁴ formaat. Het programma CONVER is opnieuw gedraaid zodat het uitvoer op basis van dagelijkse balansen berekent. Deze dagelijkse waarden worden in Delft3D-FLOW ingevoerd. Van de debieten van 2001 van een aantal grote posten (Volkeraksluizen, Krammersluizen, Kreekraksluizen, Dintel en Vliet) zijn 10-daagse waarden beschikbaar. Deze zijn ingevoerd als een blok-interpolatiefunctie. De kleinere posten zijn gekopieerd van het jaar 2000. Ook alle nutriëntenconcentraties en chloridegehalten voor 2001 zijn identiek genomen aan die van het jaar 2000. De debietranden zijn weergegeven in Figuur 3.4.
- Er waren geen gegevens beschikbaar van de watertemperatuur van het water dat het meer binnenstroomt. Daarom is de watertemperatuur afkomstig van het meetpunt Bovensluis (<http://www.waterbase.nl/>), dat stroomopwaarts van de Volkeraksluizen ligt, gebruikt voor alle binnenkomende debieten. Aangezien het water in het Volkerak-Zoommeer een lange verblijftijd heeft en de temperatuurverschillen tussen de Bovensluis en het Volkerak-Zoommeer klein zijn, heeft de temperatuur van het

⁴ CONVER is een software tool waar waterbalansen mee opgesteld kunnen worden (van der Vat en van der Molen 1996).

binnenstromende water echter geen groot effect op de berekende watertemperaturen. (2000 en 2001). De watertemperatuur wordt hoofdzakelijk bepaald door de meteorologische condities.

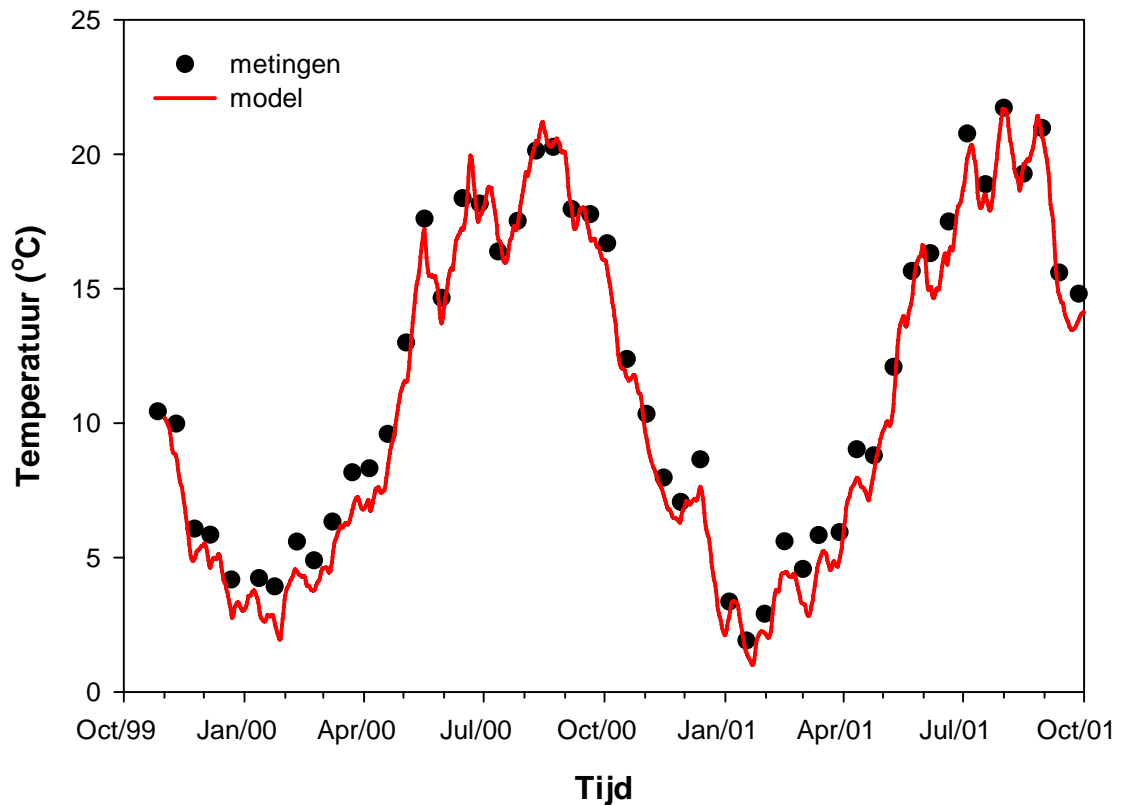


Figuur 3.4: Debietranden/doorlaatmiddelen in het Volkerak-Zoommeer.

Meteorologie

- Waarden voor neerslag en verdamping voor 2000 zijn aangevoerd in CONVER bestanden. In tegenstelling tot CONVER zijn in Delft3D neerslag en verdamping waarden niet als debiet gemodelleerd maar als een diepte over het gehele water oppervlak. Voor 2001 is de verdamping gebruikt uit 2000 en de neerslag als gemiddelde dagelijkse waarden van de KNMI meetstations Rotterdam en Vlissingen. Neerslag die in FLOW op de droge cellen valt komt niet tot afstroming. Bij het WAQUA model wordt een deel van deze neerslag wel meegenomen, maar het verschil is klein.
- Waarden voor luchttemperatuur, vochtgehalte en wolkenbedekking zijn dagelijkse waarden en gemiddelden van de KNMI stations in Rotterdam en Vlissingen (2000 en 2001). Waarden voor windsnelheid en windrichting zijn uurwaarden afkomstig van KNMI station Tholen (2000 en 2001).

- De (2D) water temperatuur in 2000 en 2001 is gemodelleerd met behulp van het ‘Ocean heat flux model’ (Gill 1982, Lane 1989). Het model is gekalibreerd op de meetwaarden van de UvA op meetstation Steenberg (meetpunt F) in het Volkerak-Zoommeer (Figuur 3.5).



Figuur 3.5: Gemeten en met het ‘Ocean Heat flux model’ berekende temperatuur op locatie Steenberg.

3.3.2 Modelling waterkwaliteit: Delft3D-WAQ

Zowel de door WL als door UvA beschreven algenmodel-procesformuleringen zijn geïmplementeerd in Delft3D-WAQ en maken dus voor het overgrote deel gebruik van dezelfde code. De waterbeweging is identiek voor beide modellen: een 2D-model dat de waterbeweging, stoftransport en watertemperatuur in het Volkerak-Zoommeer simuleert. Uitkomsten van de waterbewegingsmodule worden automatisch gebruikt in de waterkwaliteitsmodule. De waterkwaliteitsmodules van beide modellen zijn geïmplementeerd in (DEL)WAQ maar verschillen qua procesformuleringen.

Het Delft3D-UvA model beschrijft de populatiedynamica van de blauwalg *Microcystis* in een 2D omgeving en is gebaseerd op het bestaande ééndimensionale UvA-model voor *Microcystis* (Verspagen et. al., 2006). Een gedetailleerde beschrijving van het Delft3D-UvA model is te vinden in WL, 2005a. Delft3D-UvA is vanwege de opzet van de algenmodule alleen beschikbaar voor 2D-berekeningen.

De algenprocesformulering onder Delft3D die gebruik maakt van de standaard module BLOOM (verder aangeduid als Delft3D-DBS) is beschreven in Los (1991) en kan gebruikt worden voor zowel 2D als 3D-berekeningen (als ECO voor zoet en GEM voor zout water).

Delft3D-UvA en Delft3D-DBS maken beide gebruik van dezelfde algemene waterkwaliteitsroutines zoals beschreven in WL, 2005b.

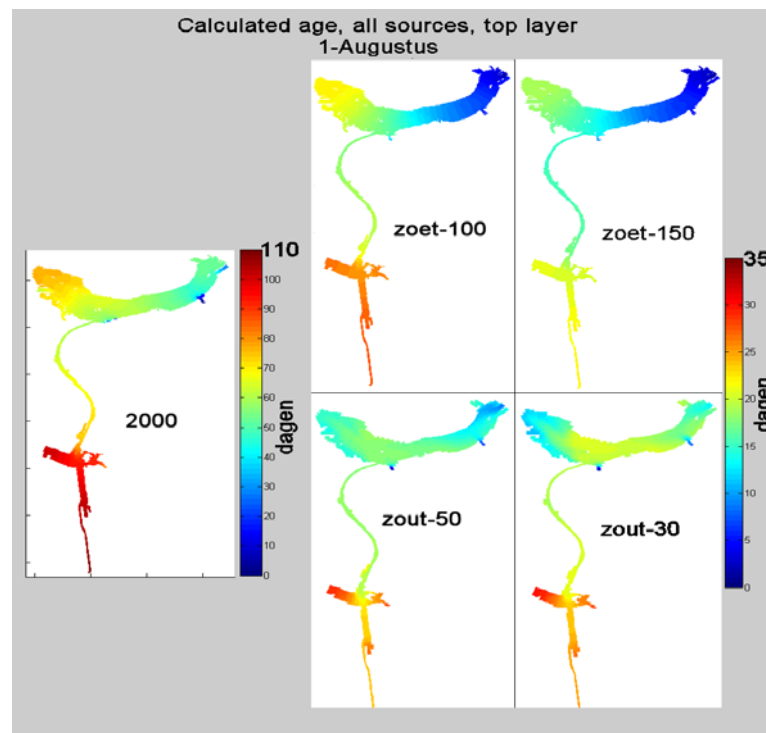
4 Berekeningsresultaten scenario's

4.1 Randvoorwaarden modellering scenario's

4.1.1 Hydrodynamica met Delft3D-FLOW

Om, uitgaande van de modelresultaten voor de bestaande (referentie) situatie, de zoete en zoute scenario's te kunnen simuleren zijn vooral aanpassingen van invoergegevens voor de waterbeweging en waterkwaliteit nodig. In deze en volgende paragrafen staat beschreven hoe de waterbeweging en nutriënten concentraties zijn aangepast in Delft3D-FLOW en Delft3D-DBS. Voor alle scenario's blijven de binnenkomende debieten van de Dintel, de Vliet, andere kleine rivieren, poldergemalen en rioolwater zuiveringsinrichtingen (RWZI's) hetzelfde. De gerelateerde debieten betreffen allemaal de situatie in het jaar 2000. Voor de beschouwing van de huidige (referentie) situatie en de zoete varianten/scenario's is gerekend met Delft3D in 2D-mode, terwijl de simulaties voor de zoute situaties vanwege de dan optredende stratificatie noodzakelijkerwijs in 3D-mode zijn uitgevoerd.

Om de leeftijd en gerelateerde verblijftijd van diverse bronnen van water die het plangebied binnenstromen te kunnen analyseren, zijn zogenaamde fractie-berekeningen uitgevoerd voor de meest karakteristieke scenario's en omstandigheden.



Figuur 4.1: Verblijftijd (leeftijd) in het Volkerak-Zoommeer voor huidige situatie en verschillende varianten.

4.1.2 Bodemflux voor fosfaat

De opgelegde fosfaat-bodemflux voor de huidige situatie is gebaseerd op berekeningen met een spreadsheetmodel (Musters, 2004), dat de concentraties van een aantal waterkwaliteitsvariabelen (chloride, totaal stikstof, totaal fosfaat, e.d.) berekent in het Volkerak-Zoommeer, als functie van:

- de waterbalans;
- de concentraties van stoffen in de inkomende debieten;
- één eerste orde verdwijnterm (0,0075 per dag) voor totaal fosfaat.

De bodemflux voor fosfaat is handmatig afgeregeld op de gemeten concentraties op het meetpunt in het Volkerak nabij Steenberg. Dit leidt tot een patroon waarin:

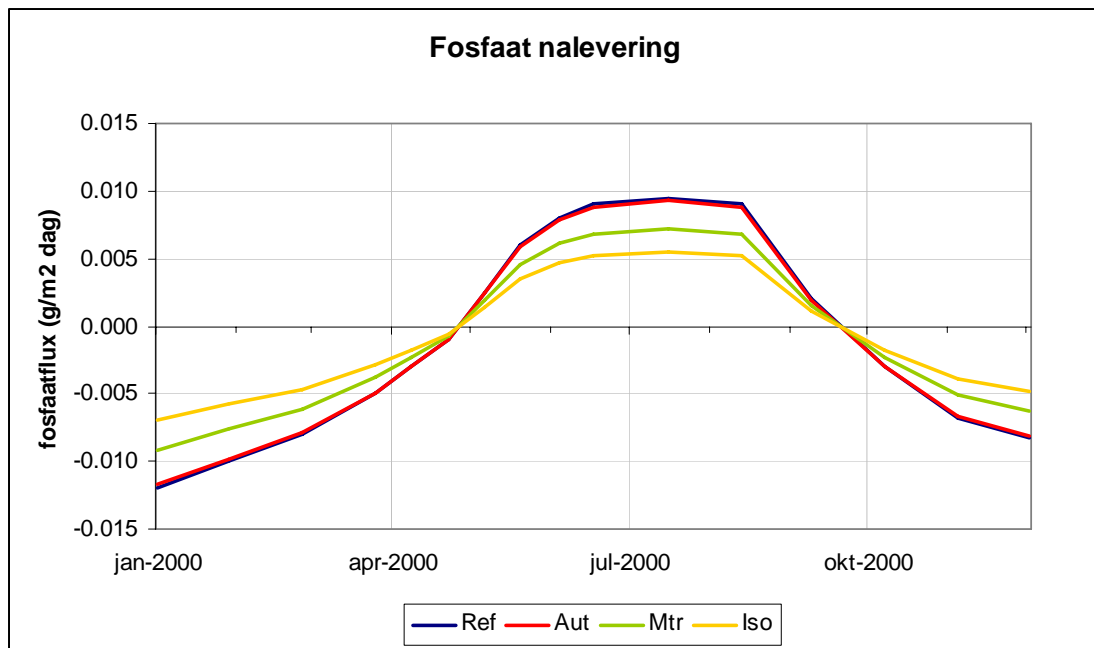
- in de winter en in het voorjaar fosfaat in de bodem wordt vastgelegd, en
- in de zomer fosfaat uit de bodem mobiliseert.

Op basis van deze methode is de maandelijkse fosfaat bodemflux voor het jaar 2000 bepaald, waarbij als uitgangspunt is gehanteerd dat de fosfaatconcentraties in het oppervlaktewater in de Referentiesituatie niet negatief kunnen worden. De opgelegde (nulde-orde) fosfaatvastlegging in de bodem is hierop geschaald. De resulterende fosfaat bodemflux voor de referentiesituatie is vermeld in onderstaande tabel.

Bodem P-flux in g/m ² /dag	Referentie situatie	Autonome ontwikkeling	Realisatie MTR-normen	Hydrologische isolatie Brabant
Reductie belasting referentie situatie	0%	2%	22%	42%
10 januari	-0,012	-0,012	-0,009	-0,007
7 februari	-0,010	-0,010	-0,008	-0,006
6 maart	-0,008	-0,008	-0,006	-0,005
3 april	-0,005	-0,005	-0,004	-0,003
17 april	-0,003	-0,003	-0,002	-0,002
1 mei	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001
15 mei	0,002	0,002	0,002	0,001
29 mei	0,006	0,006	0,005	0,003
13 juni	0,008	0,008	0,006	0,005
26 juni	0,009	0,009	0,007	0,005
25 juli	0,009	0,009	0,007	0,006
22 augustus	0,009	0,009	0,007	0,005
18 september	0,002	0,002	0,002	0,001
16 oktober	-0,003	-0,003	-0,002	-0,002
13 november	-0,007	-0,007	-0,005	-0,004
11 december	-0,008	-0,008	-0,006	-0,005

Echter, bij de berekening van de nutriënten-scenario's en de scenario's waarbij een aanzienlijk deel van de huidige belasting wordt gesaneerd, zouden negatieve fosfaatconcentraties worden berekend als gebruik wordt gemaakt van de in Referentiesituatie autonoom opgedrukte (nulde-orde) bodemflux. Mede daarom zijn aanvullende berekeningen voor de zoete varianten uitgevoerd waarbij de omvang van de opgelegde bodemflux is geschaald op basis van de verminderde belasting van het watersysteem. Voor de autonome variant van de huidige situatie is een reductie van 2% toegepast, voor de MTR-norm een reductie van 22% en voor de isolatie van de Brabantse

rivieren een reductie van 42%. Het tijdsverloop van de fosfaat bodemfluxen is niet aangepast. Het tijdsverloop van de fosfaat bodemflux voor de verschillende nutriënten-scenario's in de **zoete** varianten is in onderstaande figuur weergegeven.



Voor de berekening van de **zoute** varianten is de bodemflux van fosfaat gelijk verondersteld aan de bodemflux in het Veerse Meer. De omvang van deze bodemflux in het Veerse Meer is gecalibreerd op basis van simulaties en metingen in de periode 1995-2003.

Maand	Januari	Februari	Maart	April	Mei	Juni
Jaren 1995-2003	0,005	-0,001	-0,007	-0,007	-0,012	0,000

Maand	Juli	Augustus	September	Oktober	November	December
Jaren 1995-2003	0,013	0,015	0,012	-0,001	-0,008	-0,010

De in bovenstaande tabel aangegeven bodemfluxen van fosfaat (in gP/m²/dag) zijn gehanteerd voor alle zoute varianten. Bij de zoute varianten is niet zoals bij de zoete varianten nog een additionele schaling uitgevoerd.

4.1.3 Waterkwaliteit met Delft3D-DBS

De berekening van de waterkwaliteit is uitgevoerd met Delft3D waarbij de module BLOOM een belangrijke rol voor haar rekening neemt. Met BLOOM worden 15 verschillende algentypen beschouwd die in totaal 8 zoete, brakke en zoute algensoorten vertegenwoordigen. In de simulaties voor het Volkerak-Krammer-Zoommeer watersysteem beschouwt BLOOM de zoetwatersoorten Diatomeeën, Groenalgen en *Microcystis* blauwalgen, de brakwatersoort 'Picoplankton' (een mengsel van hele kleine algensoorten, gemodelleerd als groenalg met verruimde zouttolerantie), en de zoutwatersoorten Mariene Diatomeeën, Micro Flagellaten, Dinoflagellaten en zeesla als *Ulva*. Zeegras is niet in de modelberekeningen in beschouwing genomen.

Bij de zoete berekeningen is de graasdruk afwezig verondersteld (worst case benadering), mede omdat experts inschatten dat de graasdruk in de huidige situatie gering is. Voor de zoute berekeningen is aanvankelijk met graas gerekend (gelijk aan de in het Veerse Meer gemeten graas), maar vanwege de onzekerheid wanneer graas van een dergelijke omvang ook daadwerkelijk zal optreden, is in een later stadium zonder graas gerekend. Door deze werkwijze is bovendien inzicht verkregen in de mogelijke vermindering van de algenbiomassa door een graasdruk zoals in het Veerse Meer.

Om een betrouwbare berekening van de groei van de 15 in BLOOM beschreven algentypen te waarborgen is uitgebreid aandacht besteed aan de groei-lichtfunctie en vooral aan de met de blauwalg *Microcystis* samenhangende modelcoëfficiënten. De gebruikte modelcoëfficiënten zijn nauwgezet getoetst aan de UvA laboratorium-resultaten voor karakteristieke *Microcystis* blauwalg-stammen die voorkomen in het plangebied Volkerak-Zoommeer (Verspagen et al., 2006) en de uiteindelijke algenmodelformulering is gevalideerd met meetgegevens van het jaar 2002.

4.1.4 Systeem-analyse Volkerak-Krammer-Zoommeer

Kijkend naar het watersysteem bestaande uit de Krammer, het Volkerak, de Eendracht en het Zoommeer, mag gesteld worden dat de waterkwaliteit in het gebied en de daarmee samenhangende bloei van (blauw)algen wordt bepaald door een aantal aspecten:

- De hydrodynamica (verblijftijd / verversingstijd);
- Het chloridegehalte en de daardoor eventueel optredende stratificatie/gelaagdheid;
- De belasting door voedingsstoffen (nutriënten) over de randen van het systeem (Rijn & Maas, Brabantse rivieren, Oosterschelde);
- De invloed van de bodem (nalevering van fosfaat, invloed mosselen).

Bij de beschouwing van zowel de 2D als 3D-berekeningsresultaten wordt met name gekeken wat het effect van bovenstaande aspecten is op de uiteindelijke waterkwaliteit in het plangebied. Bij de beschouwing van bijvoorbeeld het eerstgenoemde aspect ‘verblijftijd’ moet bedacht worden dat het doorspoelen van het plangebied met water vanuit het Hollandsch Diep weliswaar een verkorting van de verblijftijd in het plangebied tot gevolg heeft, maar dat dat tegelijkertijd grote invloed heeft op het als derde genoemde aspect nutriëntenbelasting. In die zin is ‘doorspoelen’ derhalve niet gelijk aan ‘schoonspoelen’.

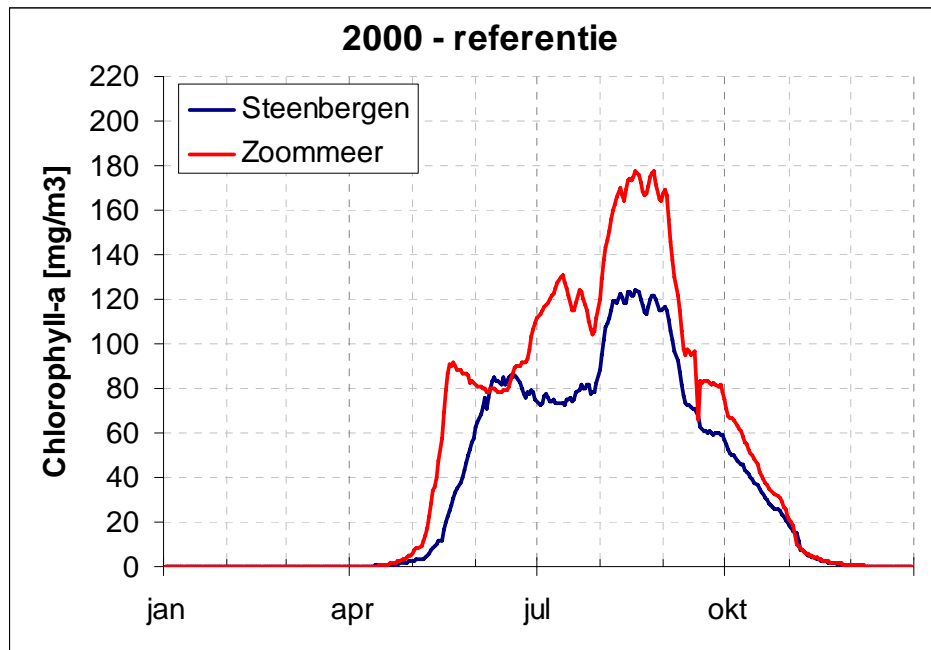
4.2 Resultaten modellering scenario's

4.2.1 Huidige / referentie situatie

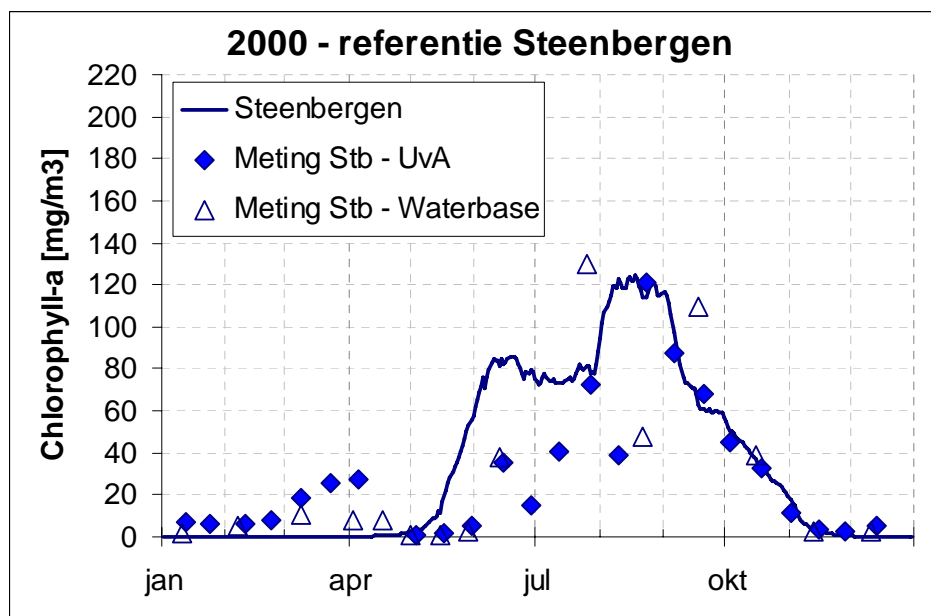
Zoals gepresenteerd in Figuur 4.1 heeft het Volkerak-Zoommeer in de referentie situatie een relatief lange verblijftijd die kan oplopen tot 100 dagen. De (blauw)algen hebben daardoor voldoende tijd om flinke biomassa's te produceren (zie Figuur 4.2). Hierdoor wordt de aangegeven bovengrens van 50 µg/l chlorofyl aanzienlijk overschreden en zijn er klachten over stankoverlast. De voorjaarspiek van algen bereikt een niveau van 80 µg/l chlorofyl, en

de (na)zomerbloei loopt conform de resultaten van veldmetingen verder op tot 120 µg/l chlorofyl op het meetpunt Steenbergen en zelfs tot 180 µg/l chlorofyl in het Zoommeer.

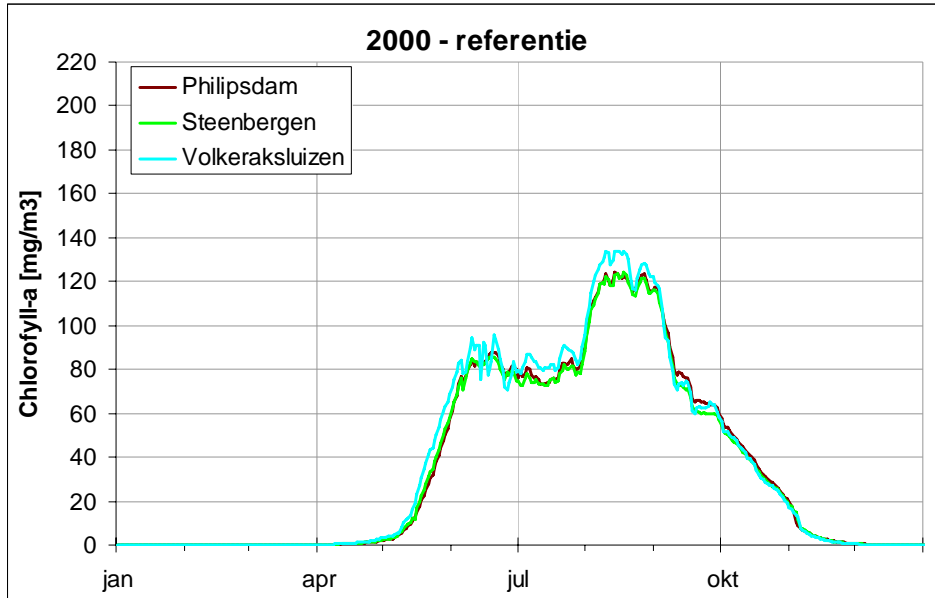
Het Volkerak-Zoommeer is in zijn huidige toestand een hoog-belast en eutroof watersysteem, waarbij de beschikbare nutriënten niet beperkend zijn voor de groei van algen. In Figuur 4.3 en 4.4 zijn respectievelijk de stikstof en fosfaat gehalten weergegeven, waarbij kan worden opgemerkt dat de berekende gehalten goed overeenkomen met de gemeten concentraties.



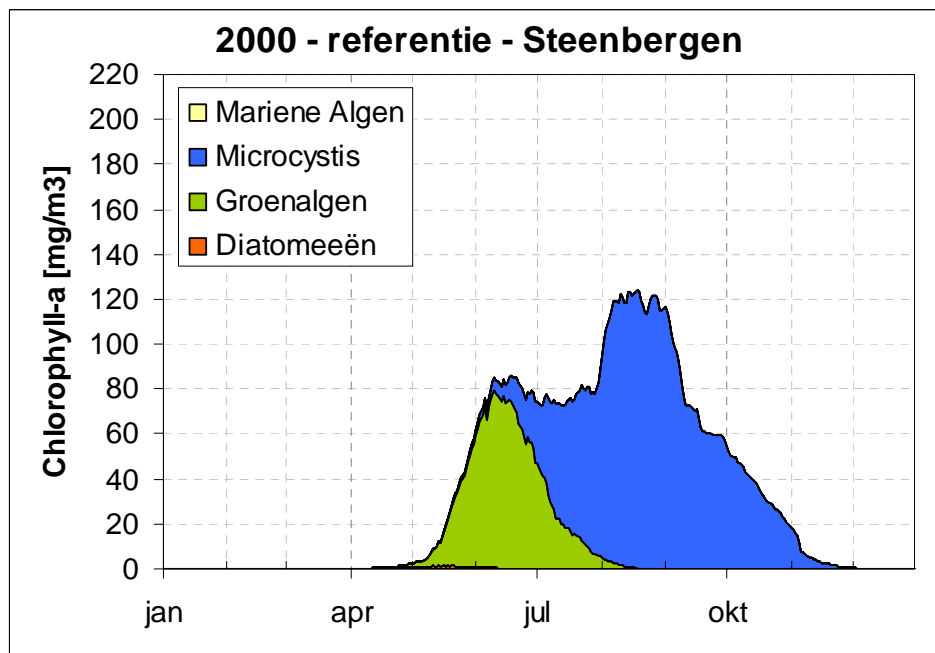
Figuur 4.2a: Chlorofyl-gehalten in het Volkerak-Zoommeer voor de huidige situatie.



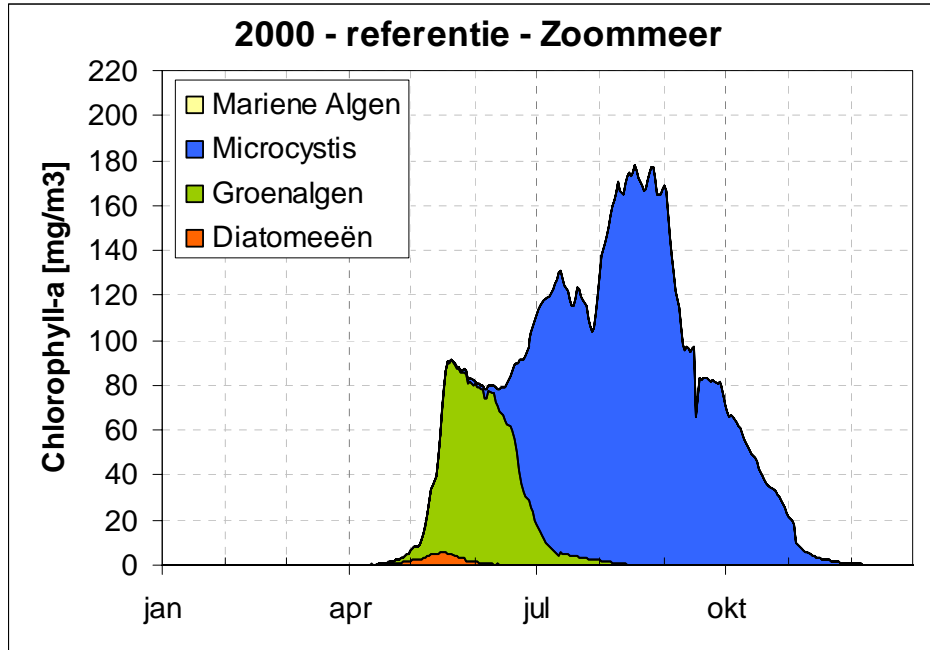
Figuur 4.2b: Chlorofyl-gehalten op meetpunt Steenbergen voor de huidige situatie.



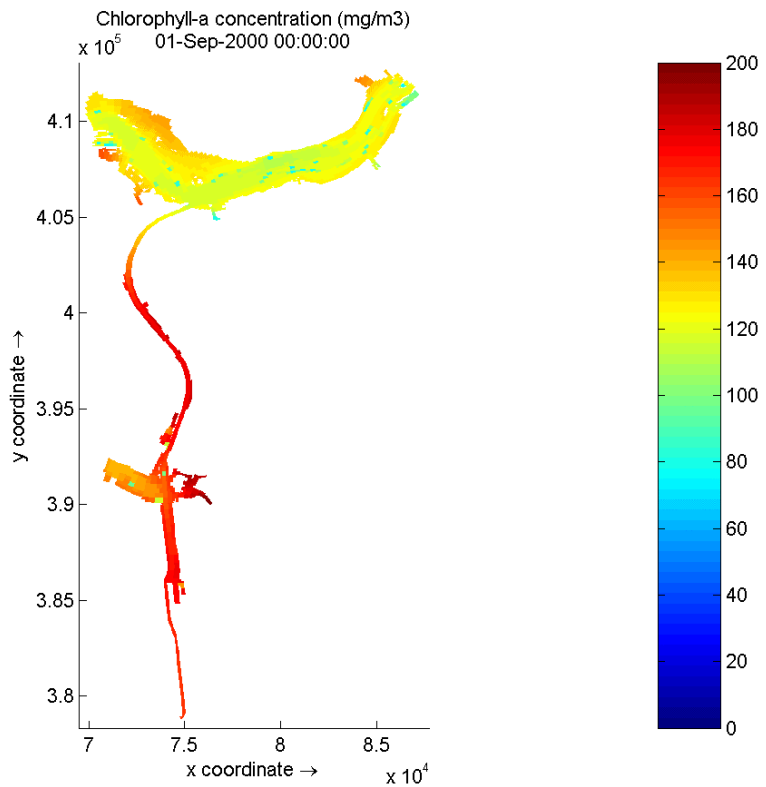
Figuur 4.2c: Ruimtelijke variatie van chlorofyl-gehalten in het Krammer-Volkerak voor de huidige situatie.



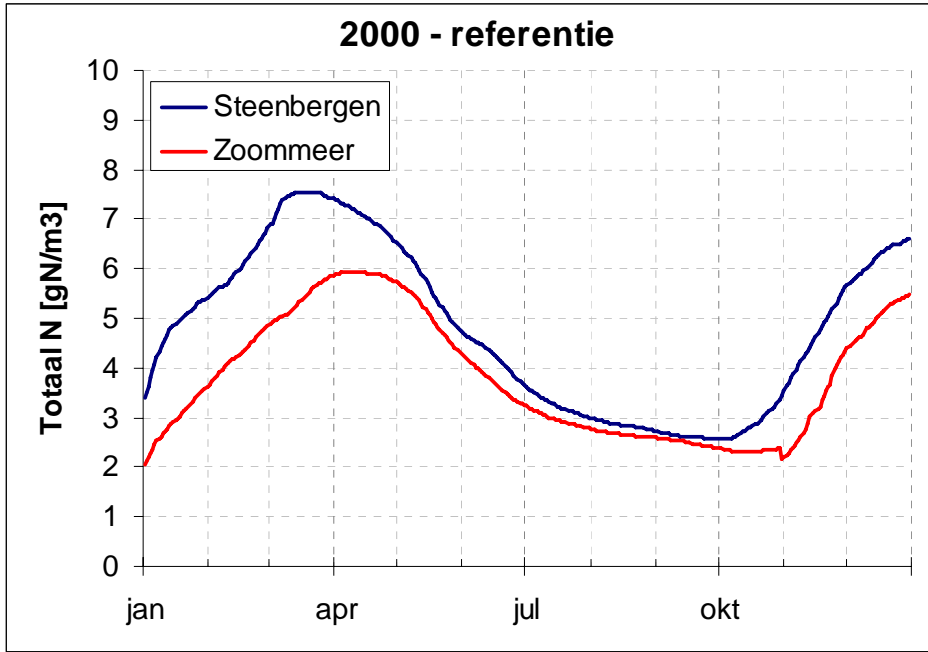
Figuur 4.2d: Algensoortensamenstelling op het meetpunt Steenbergen voor de huidige situatie.



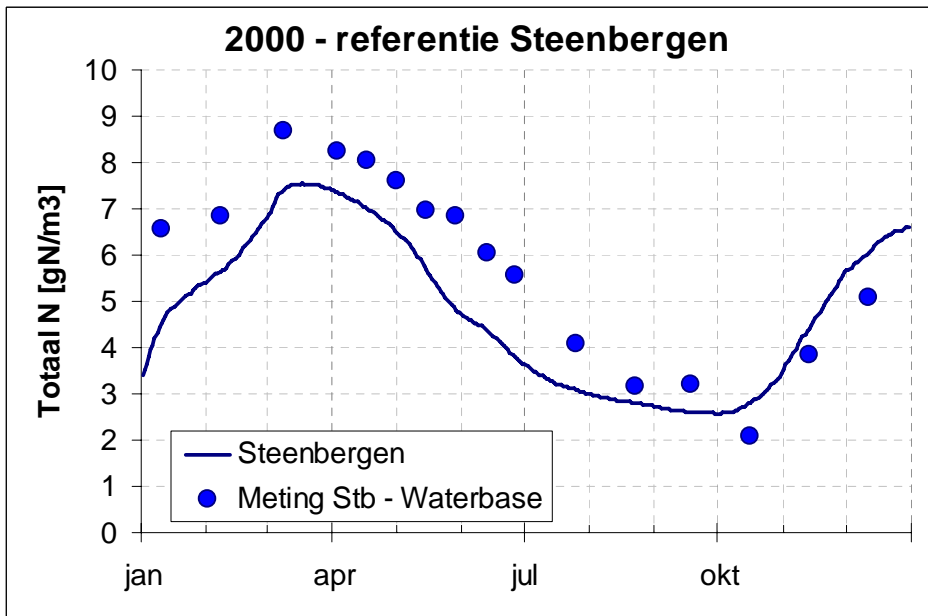
Figuur 4.2e: Algensoortensamenstelling op het meetpunt Zoommeer voor de huidige situatie.



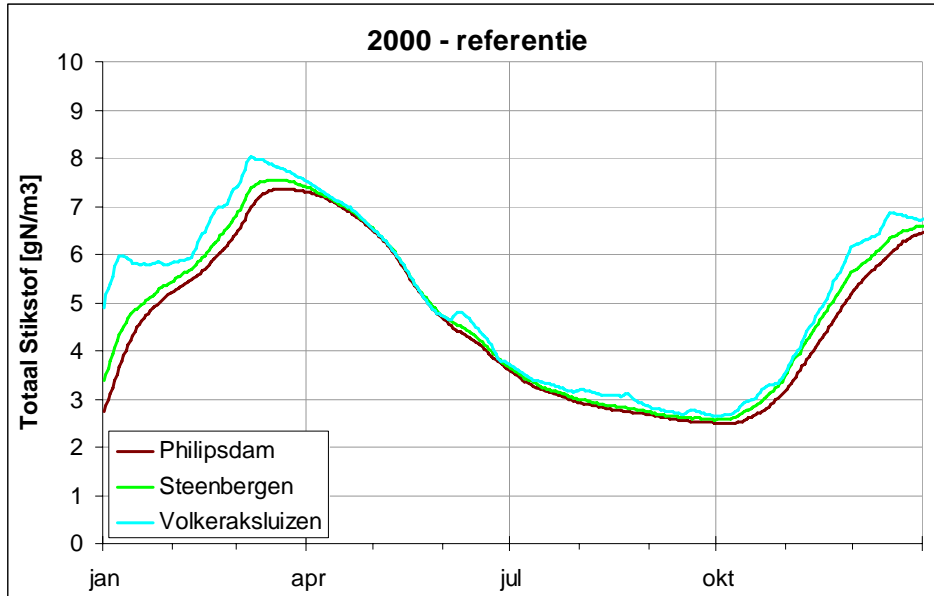
Figuur 4.2f: Chlorofyl-gehalten in het Volkerak-Zoommeer voor de huidige situatie op 1-9-2000.



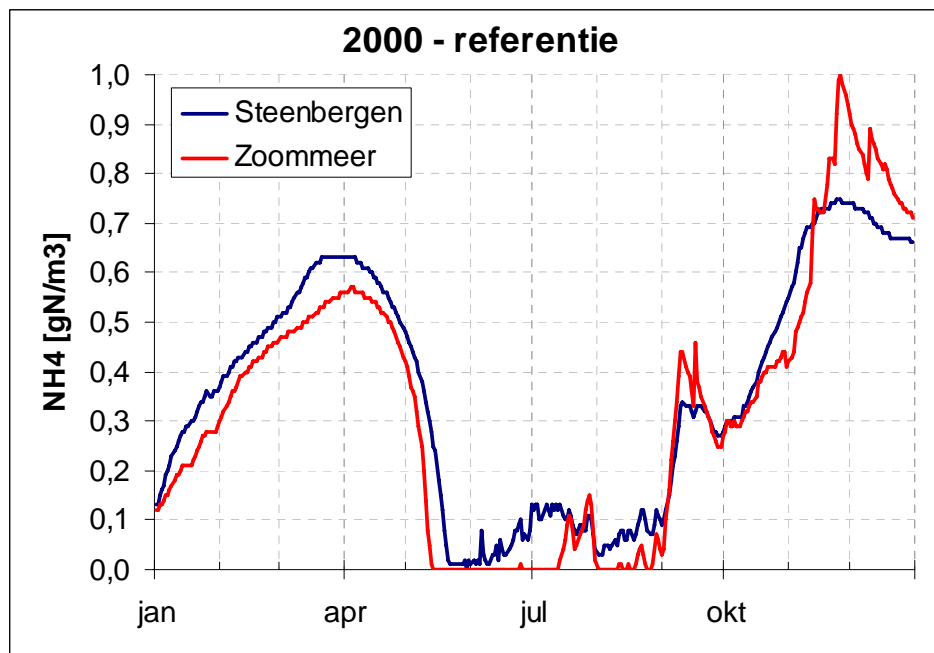
Figuur 4.3a: Totaal stikstof-gehalten in het Volkerak-Zoommeer voor de huidige situatie.



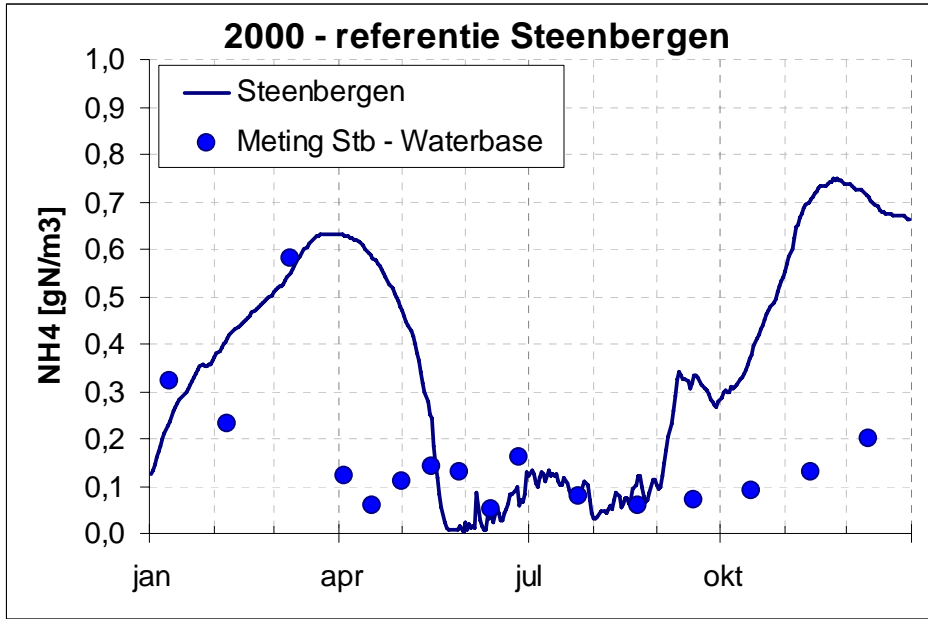
Figuur 4.3b: Totaal stikstof-gehalten op meetpunt Steenbergen voor de huidige situatie.



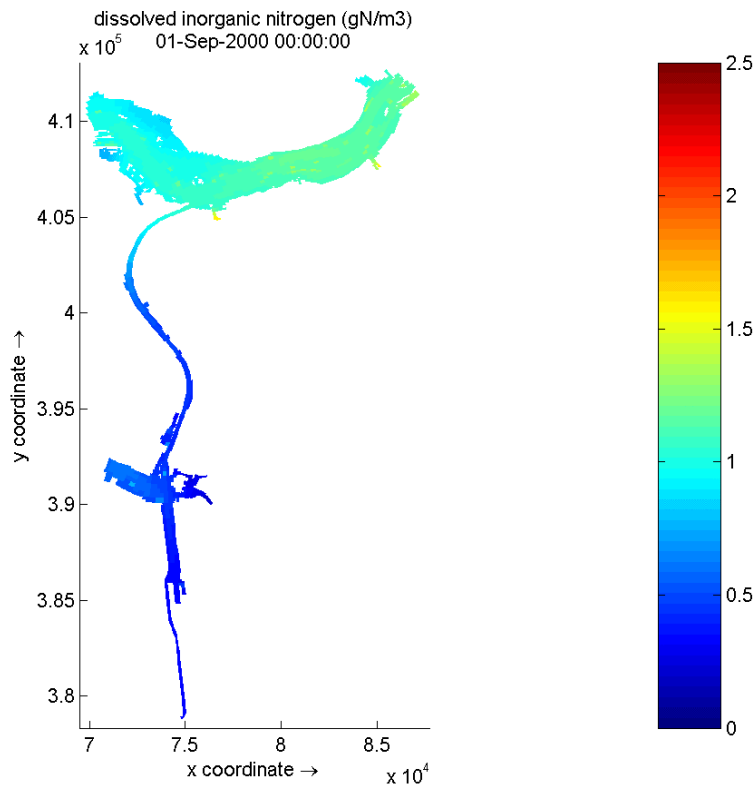
Figuur 4.3c: Ruimtelijke variatie van totaal stikstof in het Krammer-Volkerak voor de huidige situatie.



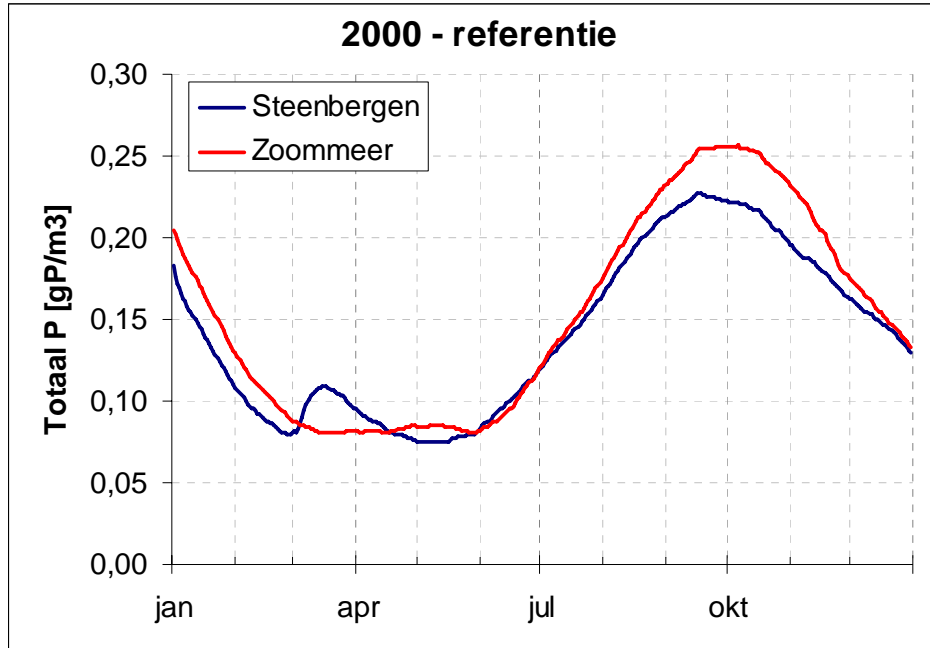
Figuur 4.3d: Ammonium stikstof-gehalten in het Volkerak-Zoommeer voor de huidige situatie.



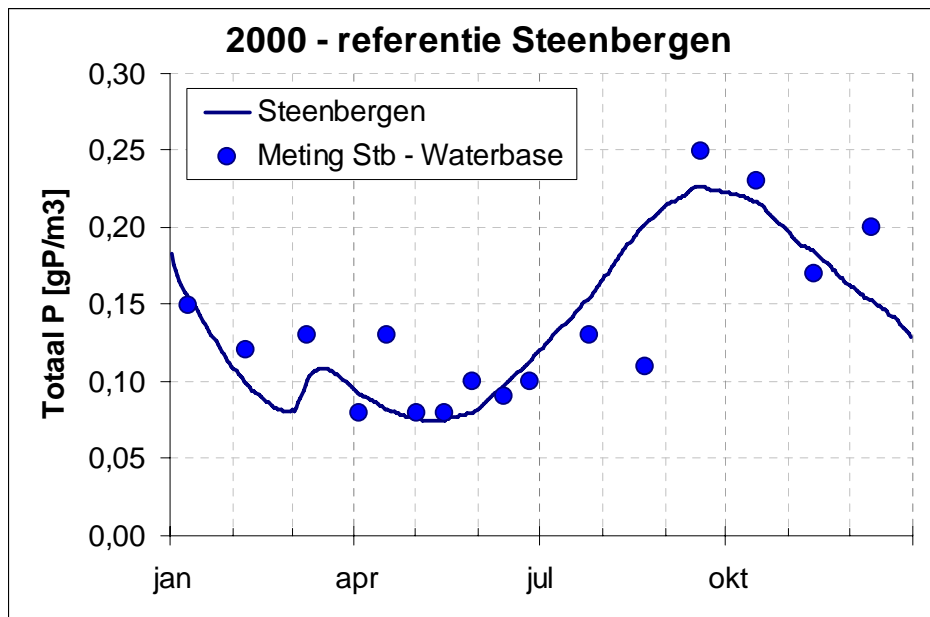
Figuur 4.3e: Ammonium stikstof-gehalten op meetpunt Steenbergen voor de huidige situatie.



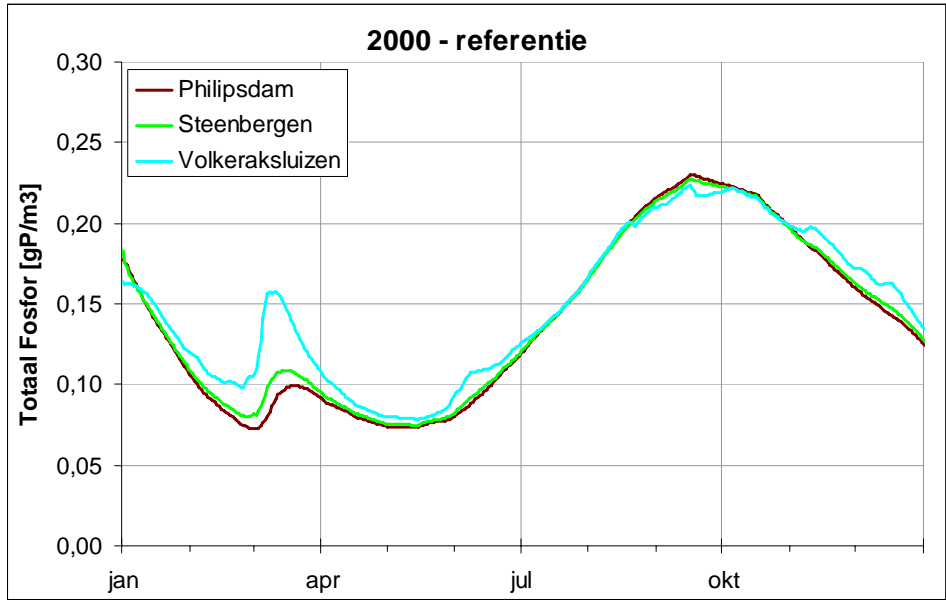
Figuur 4.3f: Ammonium+Nitraat stikstof in het Volkerak-Zoommeer voor de huidige situatie op 1-9-2000.



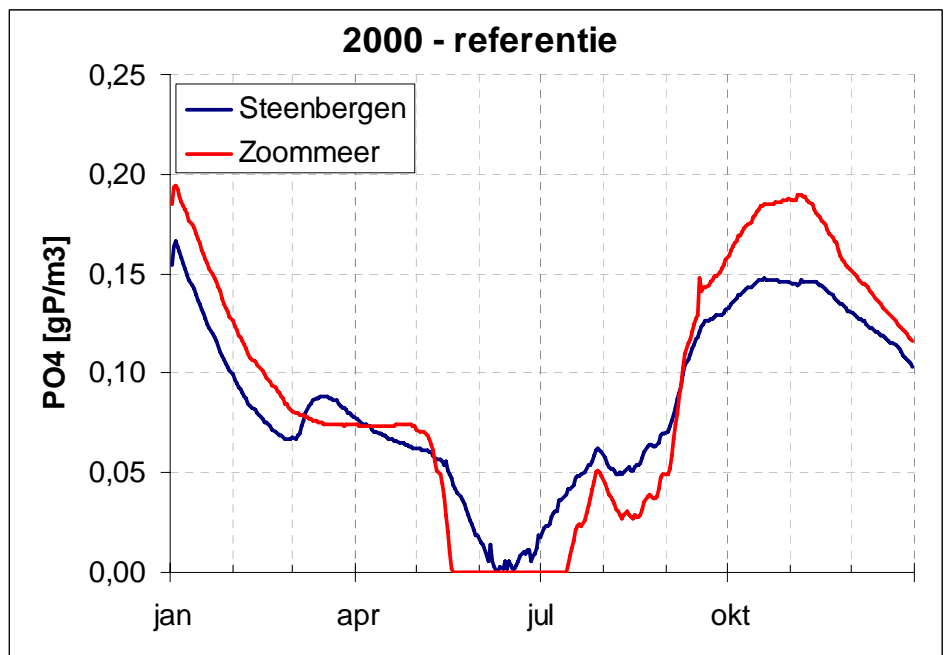
Figuur 4.4a: Totaal fosfaat-gehalten in het Volkerak-Zoommeer voor de huidige situatie.



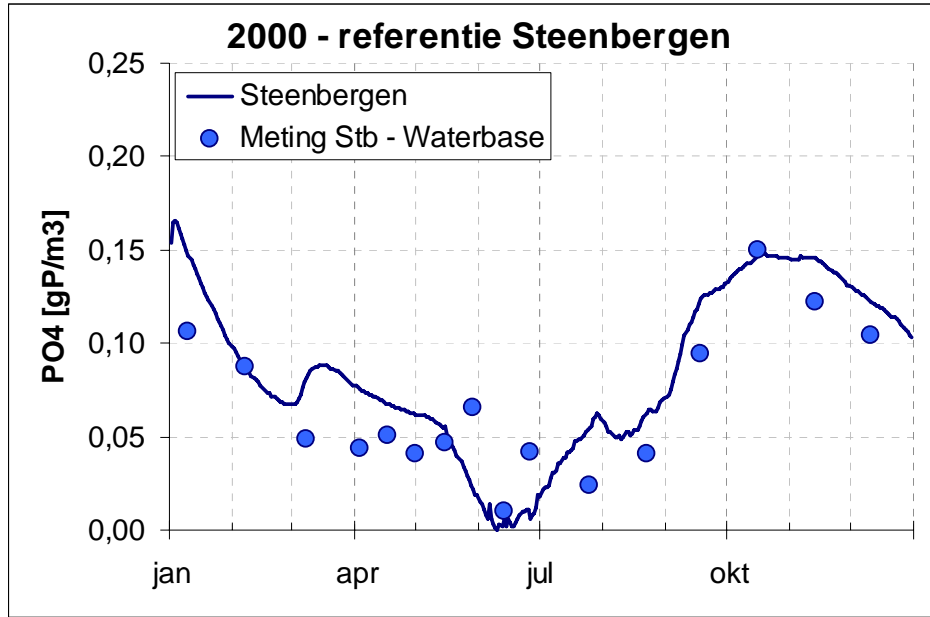
Figuur 4.4b: Totaal fosfaat-gehalten op meetpunt Steenbergen voor de huidige situatie.



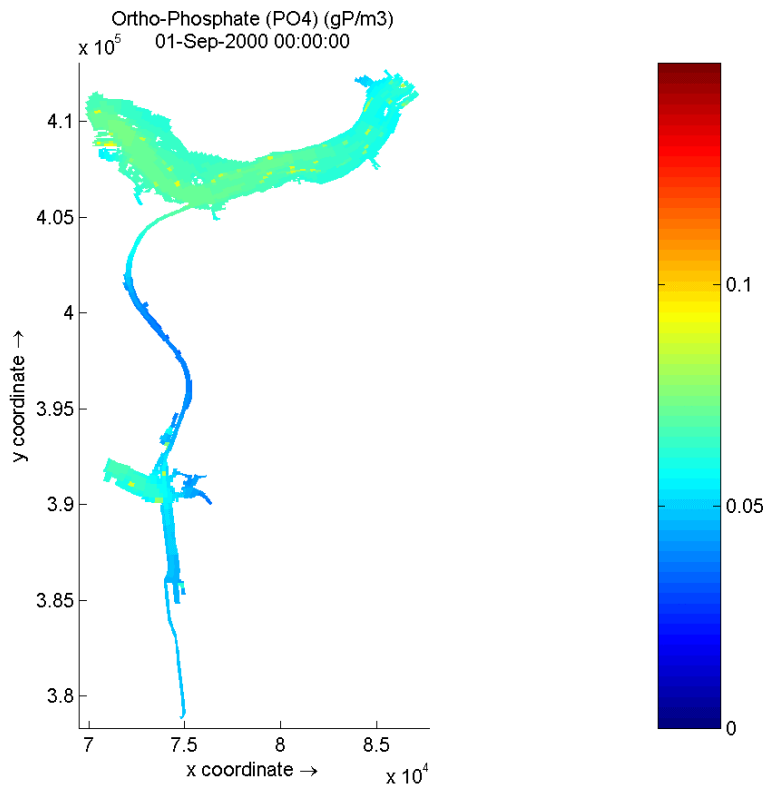
Figuur 4.4c: Ruimtelijke variatie van totaal fosfaat in het Krammer-Volkerak voor de huidige situatie.



Figuur 4.4d: Orthofosfaat-gehalten in het Volkerak-Zoommeer voor de huidige situatie.

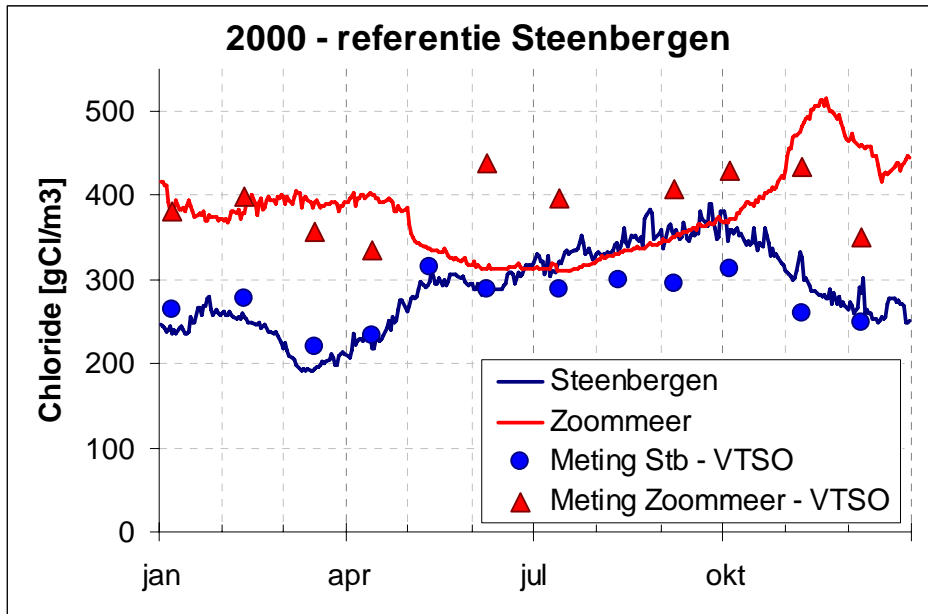


Figuur 4.4e: Orthosfosfaat-gehalten op meetpunt Steenberg voor de huidige situatie.



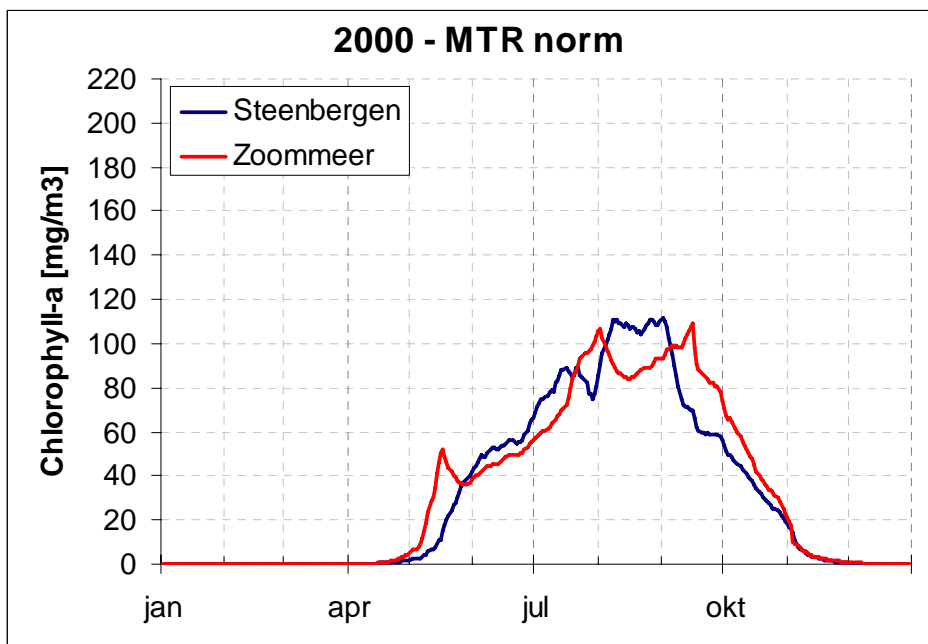
Figuur 4.4f: Orthosfosfaat-gehalten in het Volkerak-Zoommeer voor de huidige situatie op 1-9-2000.

In Figuur 4.5 zijn de berekende en gemeten chloridegehalte weergegeven voor het meetpunt nabij Steenberg en in het Zoommeer. De berekende en gemeten waarden wijken weliswaar enigszins af, maar de (relatief) lage chloridegehalten zijn niet van invloed op de berekende algenbiomassa of andere waterkwaliteitsvariabelen.

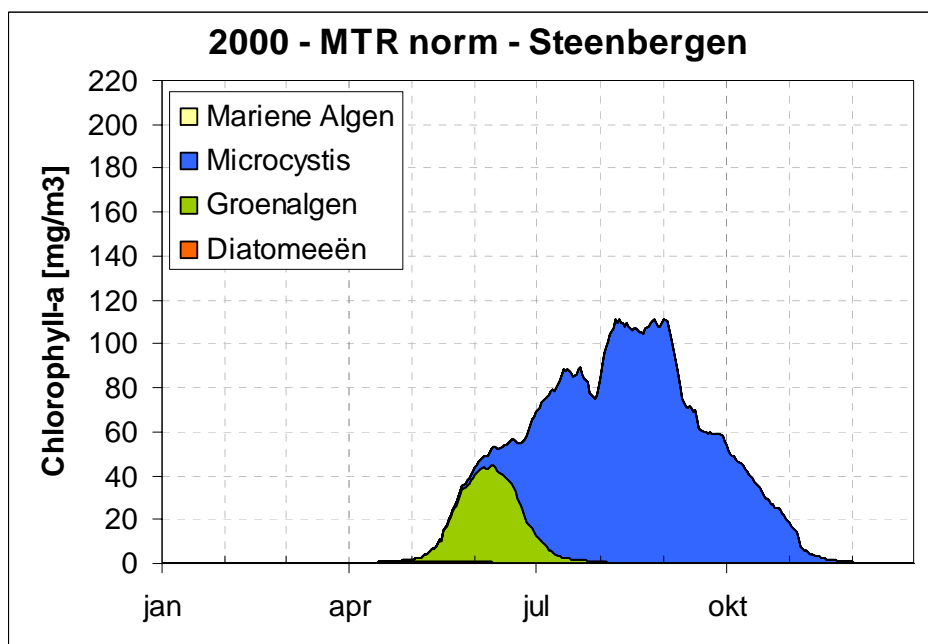


Figuur 4.5: Chloridegehalten in de huidige situatie.

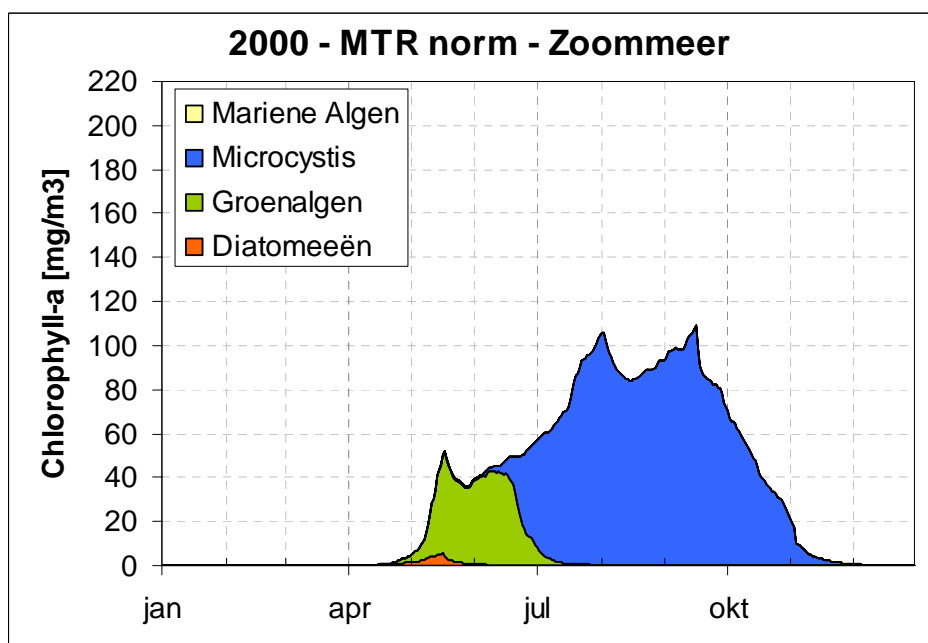
Zoals weergegeven in Figuur 4.6 heeft bronreductie tot MTR-niveau enig effect op het chlorofyl-gehalte, maar de omvang is onvoldoende om van een oplossing van het blauwalgenprobleem te spreken: er is met name in de (na)zomer een aanzienlijke bloei van (blauw)algen tot een niveau van 100 µg/l in zowel Zoommeer als nabij het meetpunt Steenbergen. Het gehalte orthofosfaat wordt in de zomer weliswaar beperkend voor de groei van (blauw)algen, maar de bodemflux van fosfaat zorgt voor een extra beschikbaarheid van fosfaat die wordt omgezet in algenbiomassa. Concluderend kan gesteld worden dat het maximale effect dat van bronsanering van nutriënten kan worden verwacht een halvering van de concentratie blauwalgen in het Zoommeer is en nabij punt Steenbergen zelfs minder.



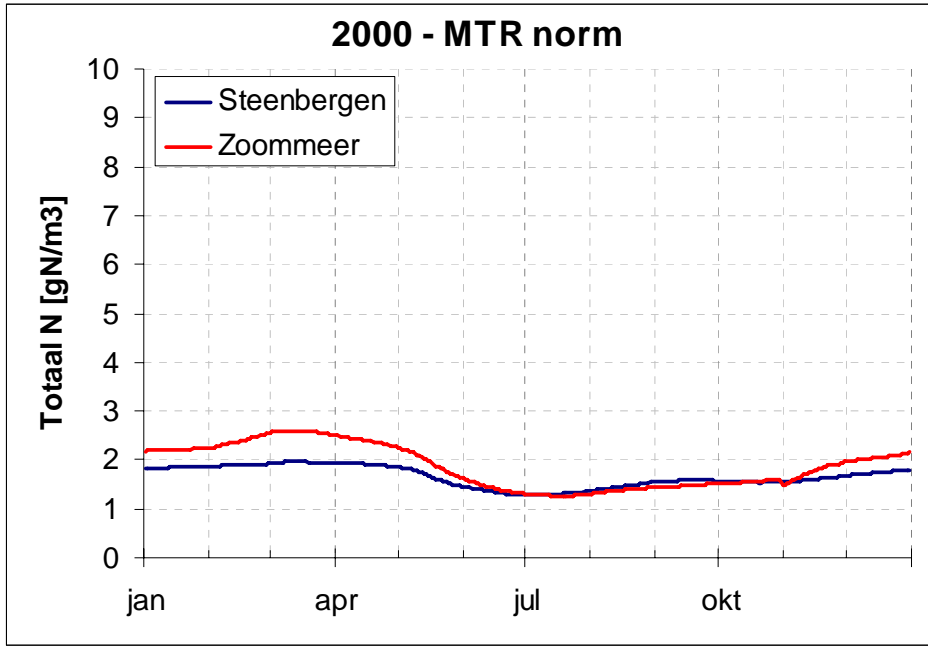
Figuur 4.6a: Chlorofyl-gehalten in het Volkerak-Zoommeer bij bronsanering tot MTR-normen.



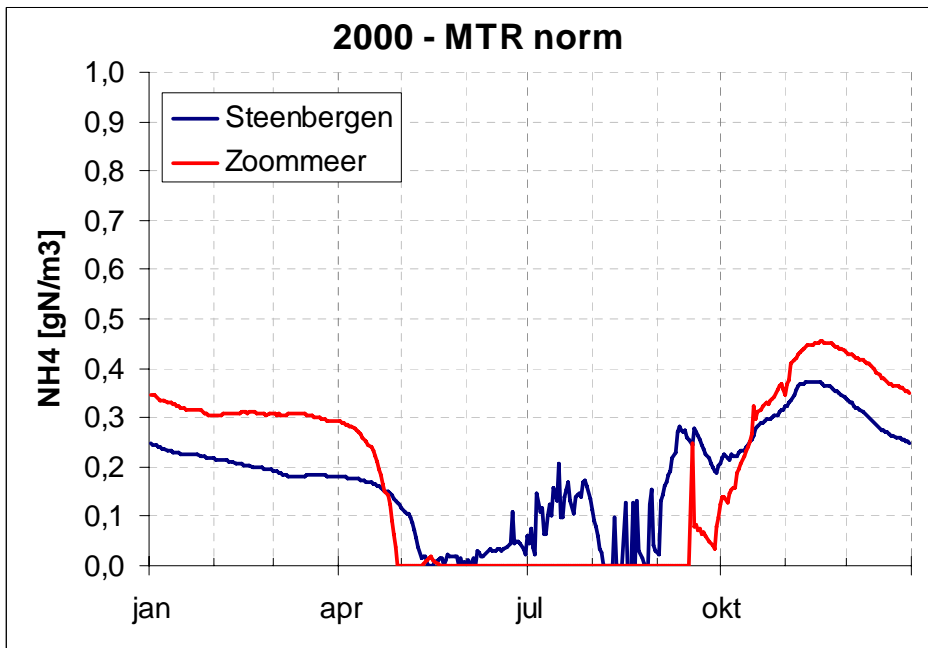
Figuur 4.6b: Algensoortensamenstelling op het meetpunt Steenbergen bij bronsanering tot MTR-normen.



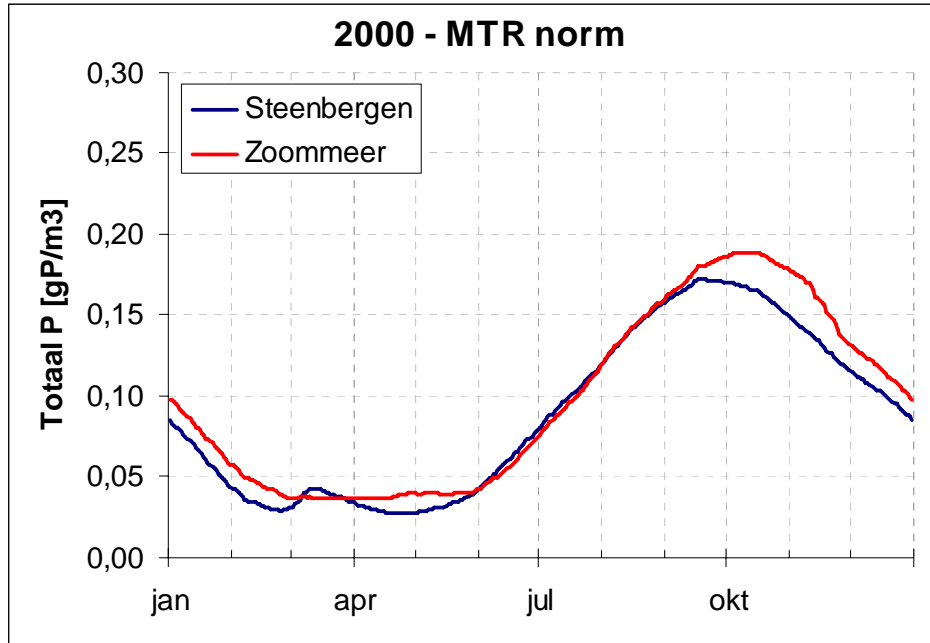
Figuur 4.6c: Algensoortensamenstelling in het Zoommeer bij bronsanering tot MTR-normen.



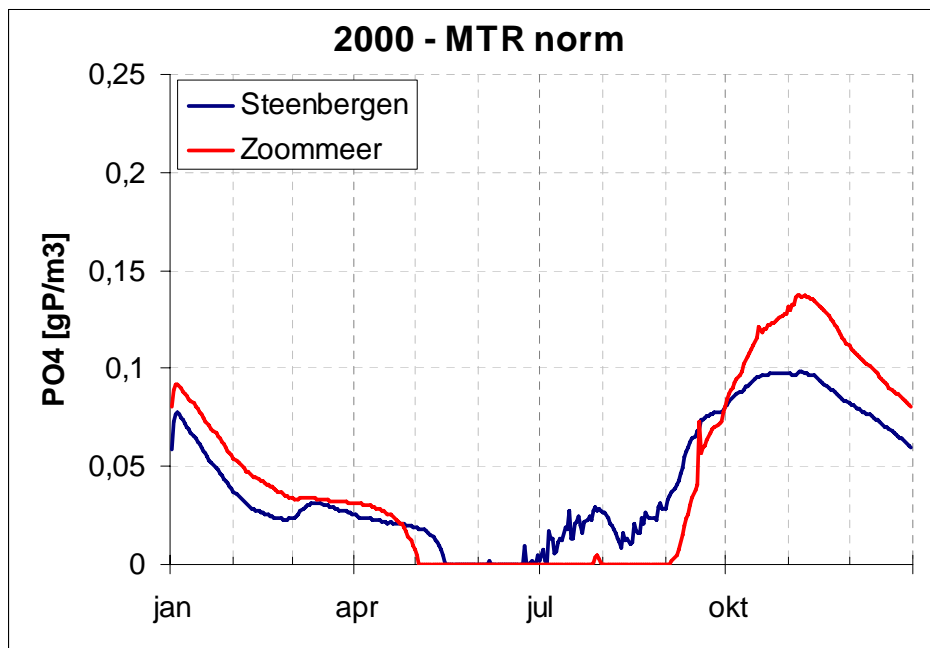
Figuur 4.6d: Totaal stikstof-gehalten in de huidige situatie bij bronsanering tot MTR-normen.



Figuur 4.6e: Ammonium stikstof-gehalten in de huidige situatie bij bronsanering tot MTR-normen.



Figuur 4.6f: Totaal fosfaat-gehalten in de huidige situatie bij bronsanering tot MTR-normen.

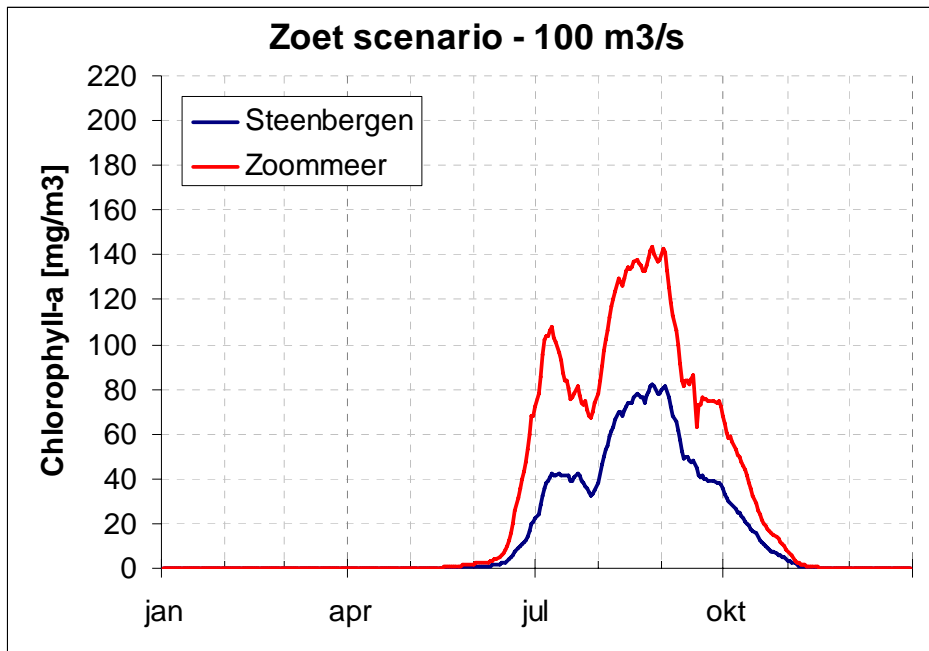


Figuur 4.6g: Orthofosfaat-gehalten in de huidige situatie bij bronsanering tot MTR-normen.

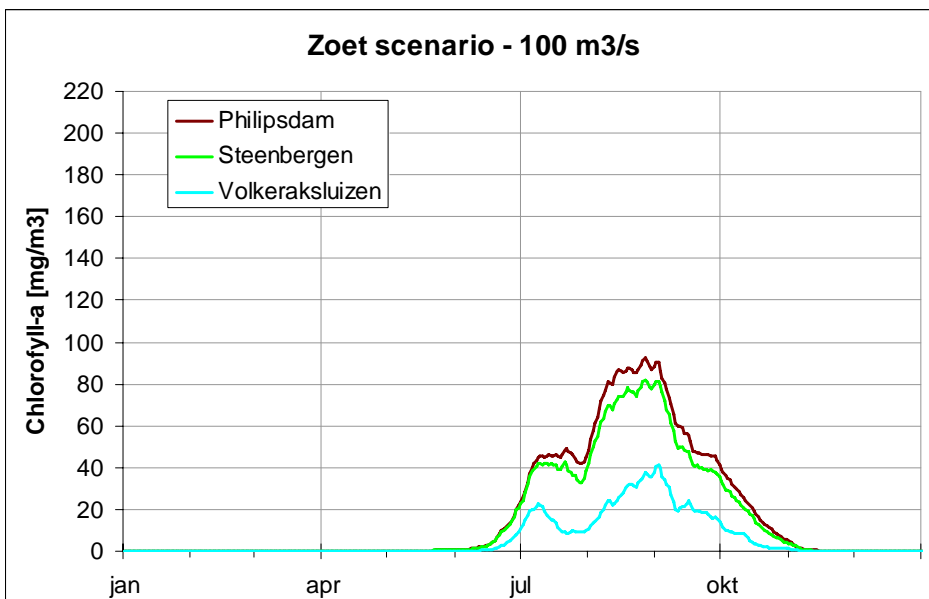
4.2.2 De zoete varianten

Bij de zoete varianten wordt de verblijftijd met name in het Volkerak, en in mindere mate in het Zoommeer, aanzienlijk verkort (zie Figuur 4.1). Bij een alternatief met 100 m³/s via de Volkeraksluizen wordt de verblijftijd in het Volkerak-Krammer zo'n 3 weken en in het Zoommeer 5 weken. Toch hebben de (blauw)algen in een dergelijke situatie nog voldoende tijd om een aanzienlijke bloei in het Zoommeer te realiseren (Figuur 4.7). Het watersysteem blijft eutroof, mede door de enorme aanvoer van nutriënten via het eutrofe water vanuit het

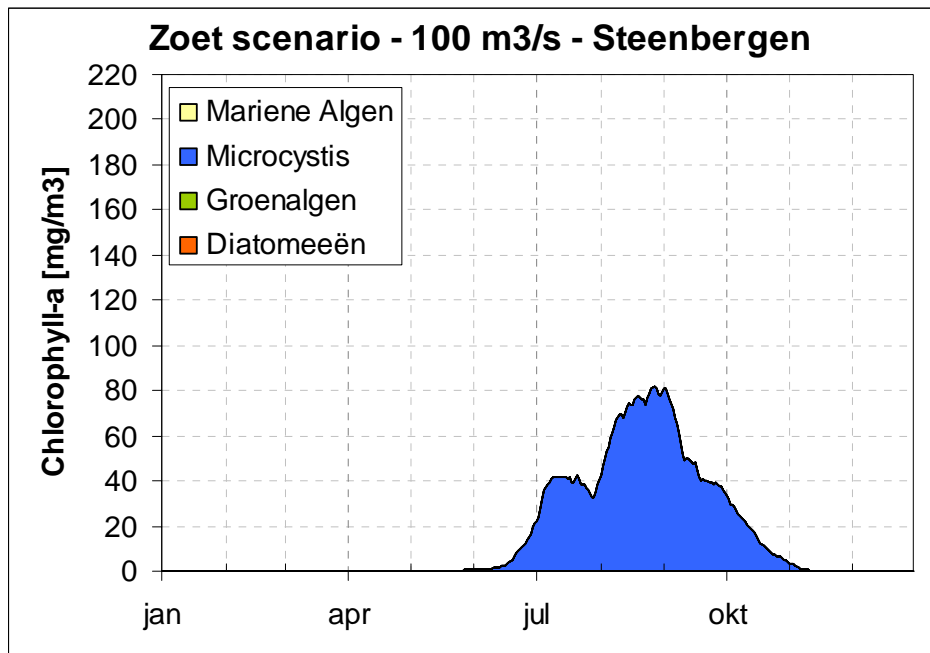
Hollandsch Diep (zie Figuur 4.8 en 4.9). De beschikbare nutriënten zijn niet beperkend voor de groei van algen en er is alleen in het Volkerak-Krammer een beperkte vermindering van de algenbiomassa door het doorspoelen met zoet water en de daardoor kortere verblijftijd. Afgaande op de ruimtelijke variaties is deze invloed in het Zoommeer niet meer merkbaar. De hoogte van het chlorophyll-a gehalte wordt bepaald door de beschikbare tijd om biomassa te produceren bij het aanwezige lichtniveau. Doorrekenen van het zoete alternatief met 150 m³/s levert een vergelijkbaar resultaat (Figuur 4.10). Bronreductie, zelfs tot MTR-niveau, heeft in deze variant geen effect op de omvang van de biomassa omdat de aanvoer vanuit het Hollandsch Diep zorgt dat nutriënten niet beperkend worden.



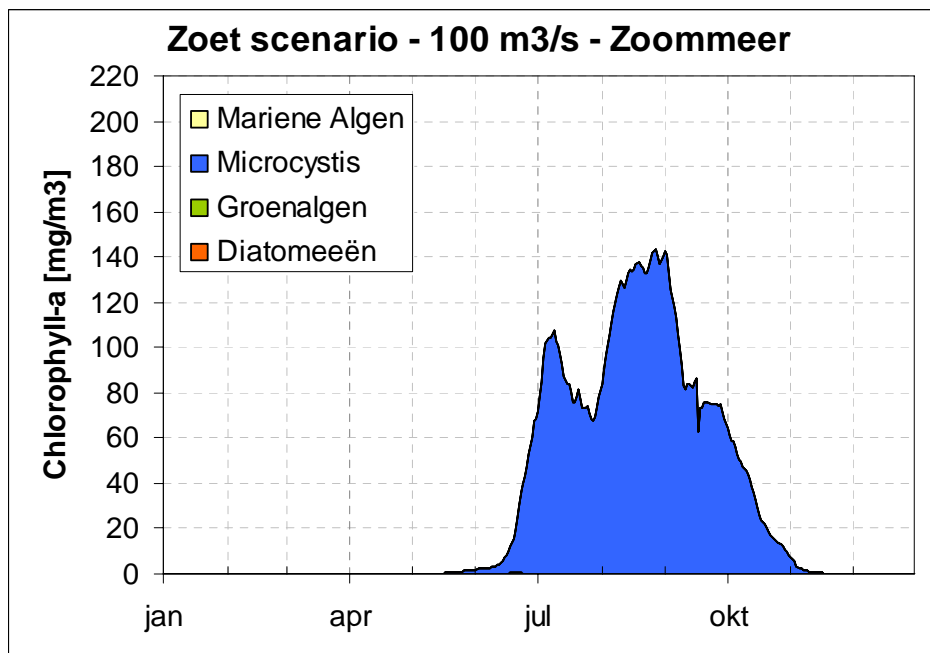
Figuur 4.7a: Chlorofyl-gehalten in het Volkerak-Zoommeer in de zoete variant.



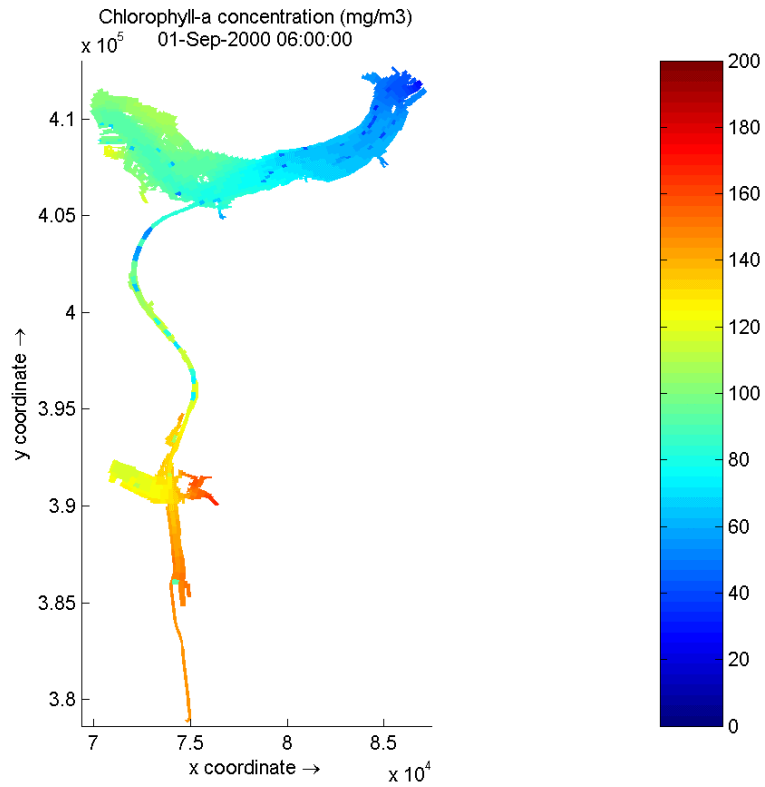
Figuur 4.7b: Ruimtelijke variatie van chlorofyl in het Krammer-Volkerak voor de zoete variant.



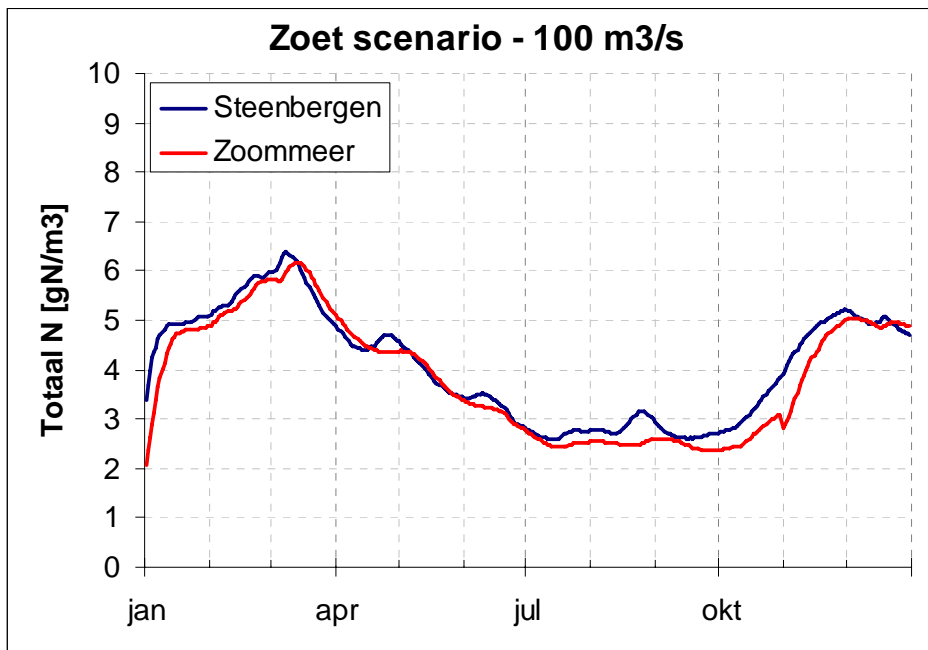
Figuur 4.7c: Algensoortensamenstelling op meetpunt Steenberg in de zoete variant.



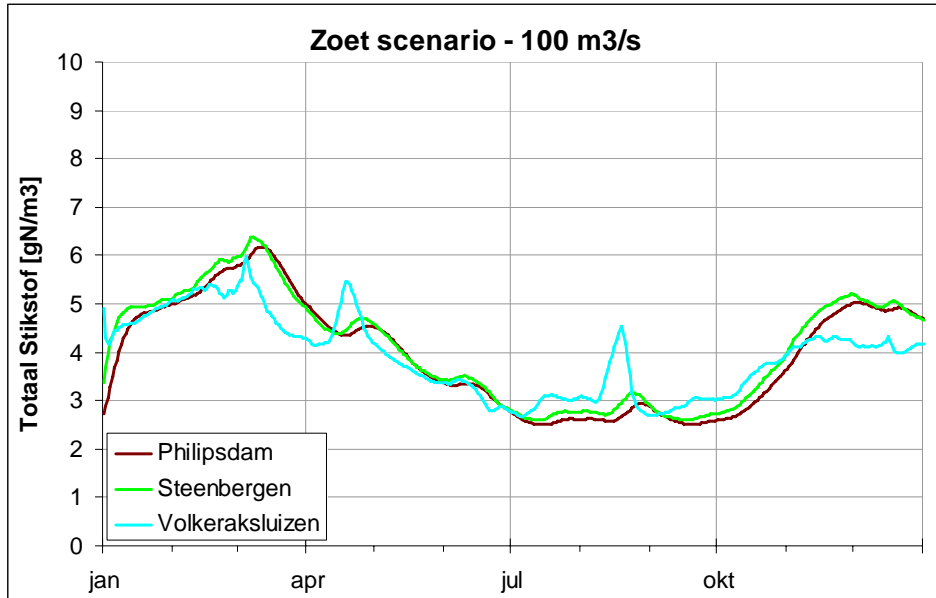
Figuur 4.7d: Algensoortensamenstelling in het Zoommeer in de zoete variant.



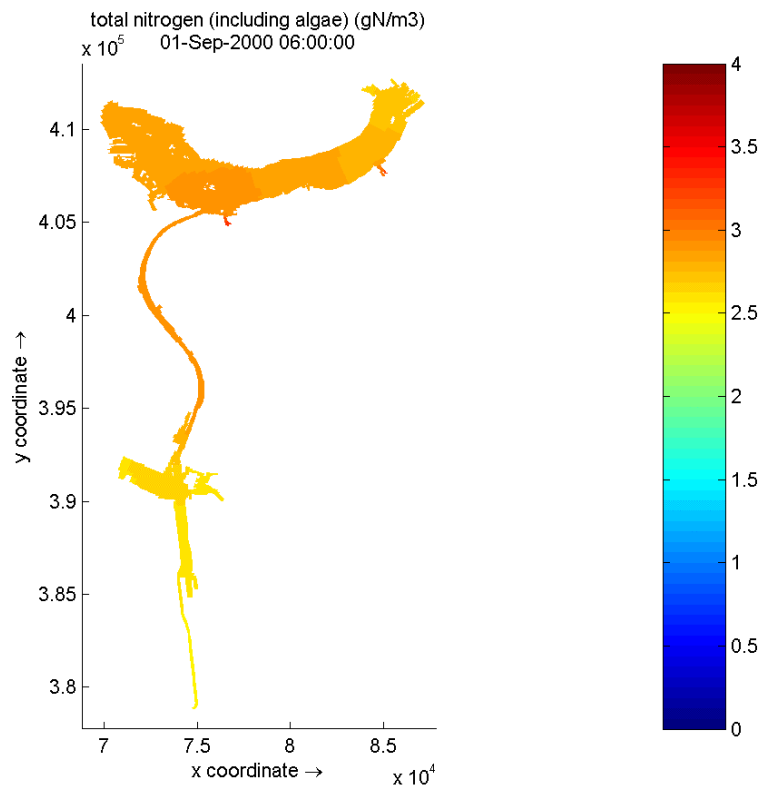
Figuur 4.7e: Chlorofyl-gehalten in de zoete variant (100 m³/s vanuit het Hollandsch Diep) op 1-9-2000.



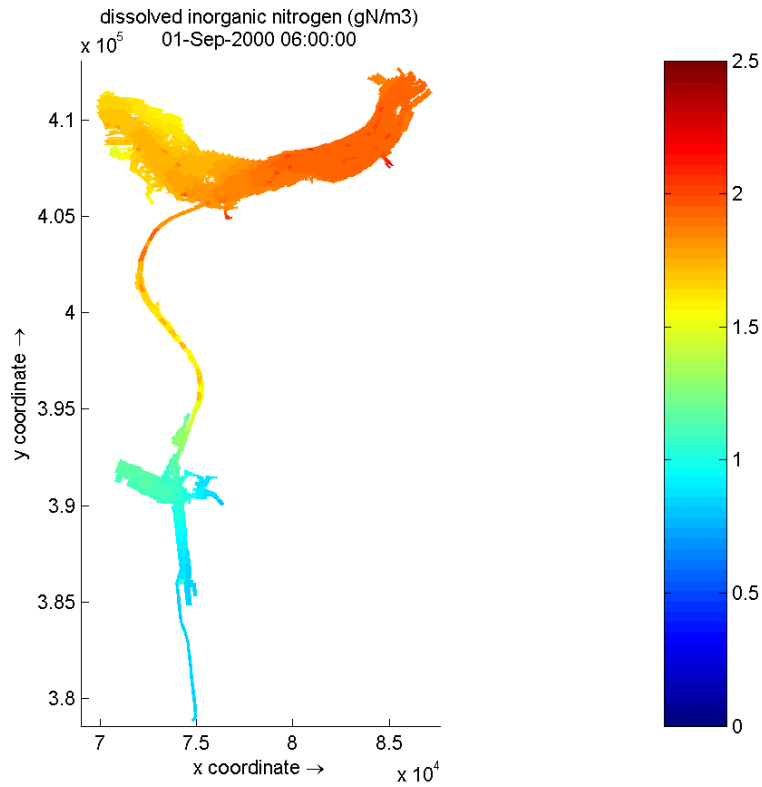
Figuur 4.8a: Totaal stikstof-gehalten in het Volkerak-Zoommeer in de zoete variant.



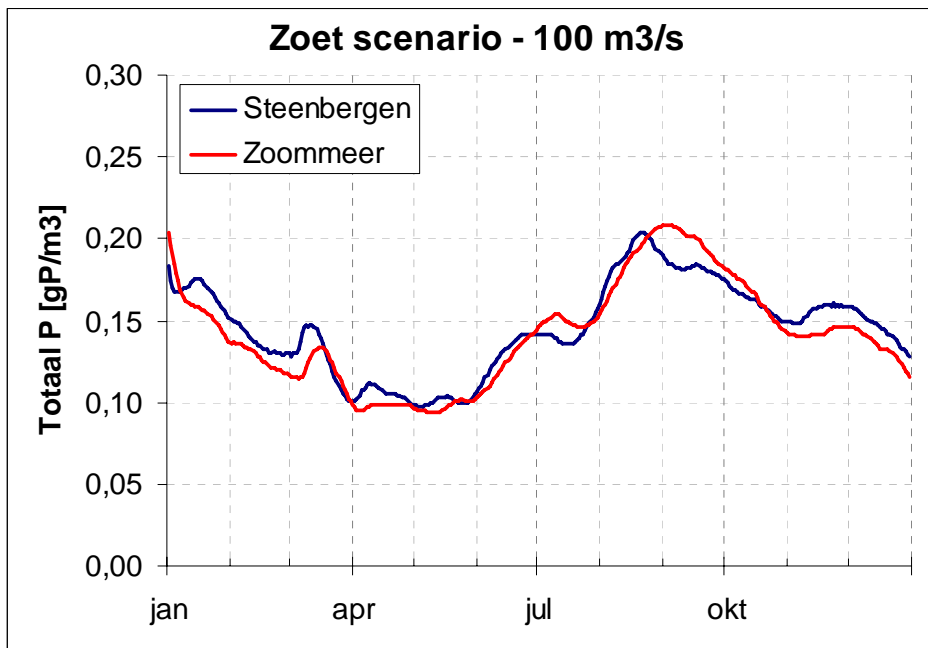
Figuur 4.8b: Ruimtelijke variatie van totaal stikstof in het Krammer-Volkerak voor de zoete variant.



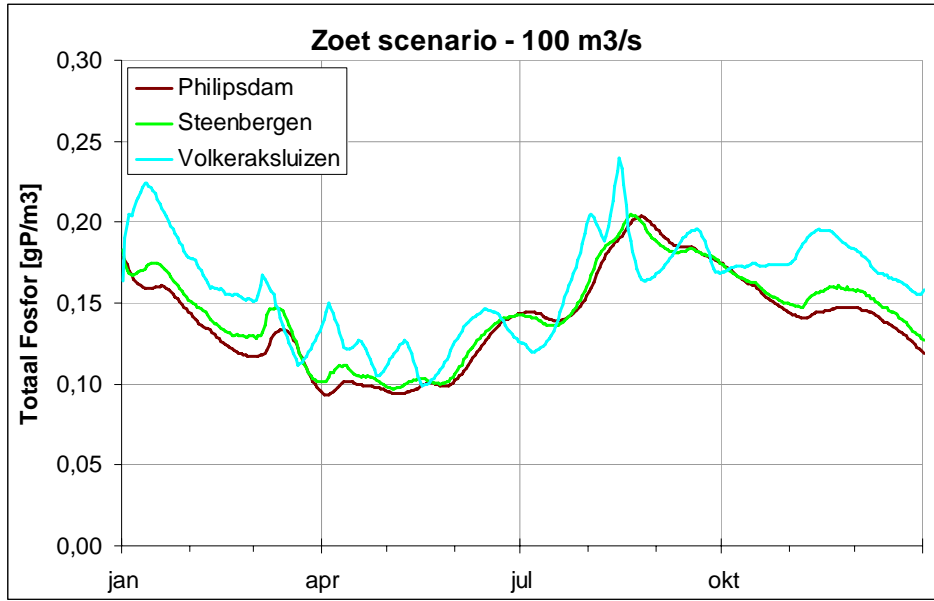
Figuur 4.8c: Totaal stikstof-gehalten in de zoete variant (100 m³/s vanuit het Hollandsch Diep) op 1-9-2000.



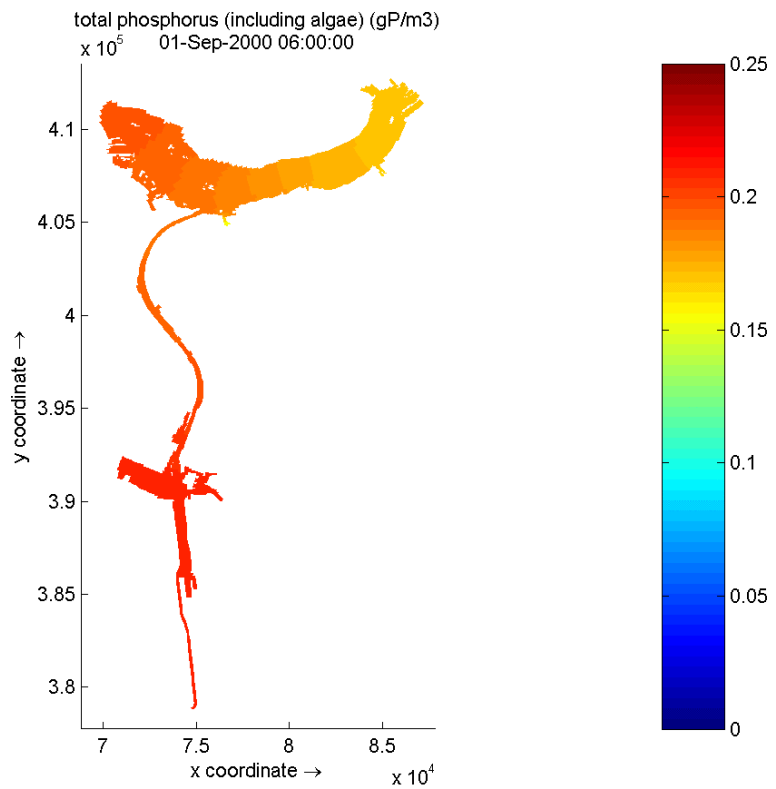
Figuur 4.8d: Ammonium+nitraat-gehalten in de zoete variant (100 m³/s vanuit het Hollandsch Diep).



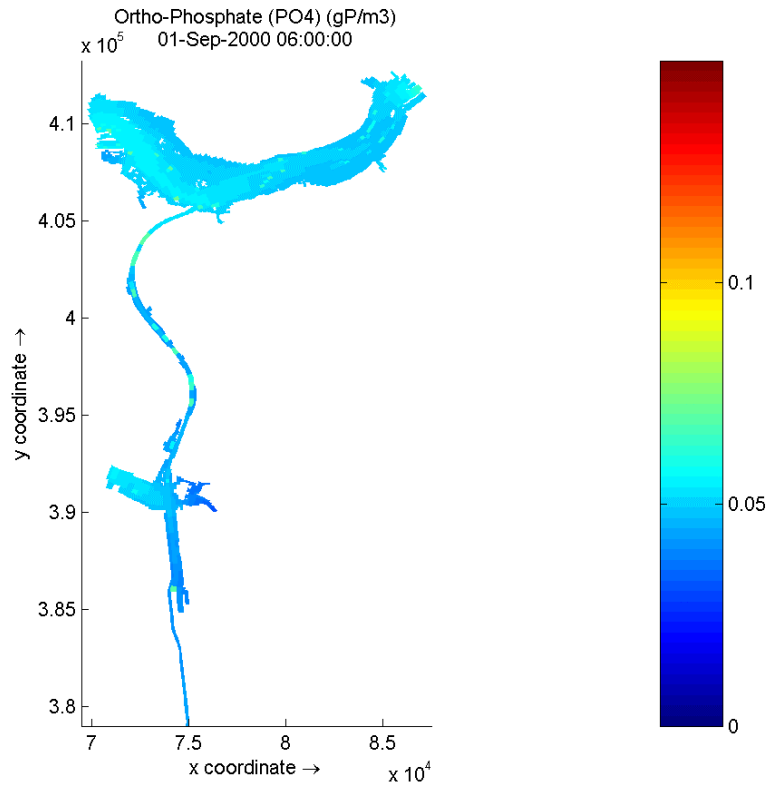
Figuur 4.9a: Totaal fosfaat-gehalten in het Volkerak-Zoommeer in de zoete variant.



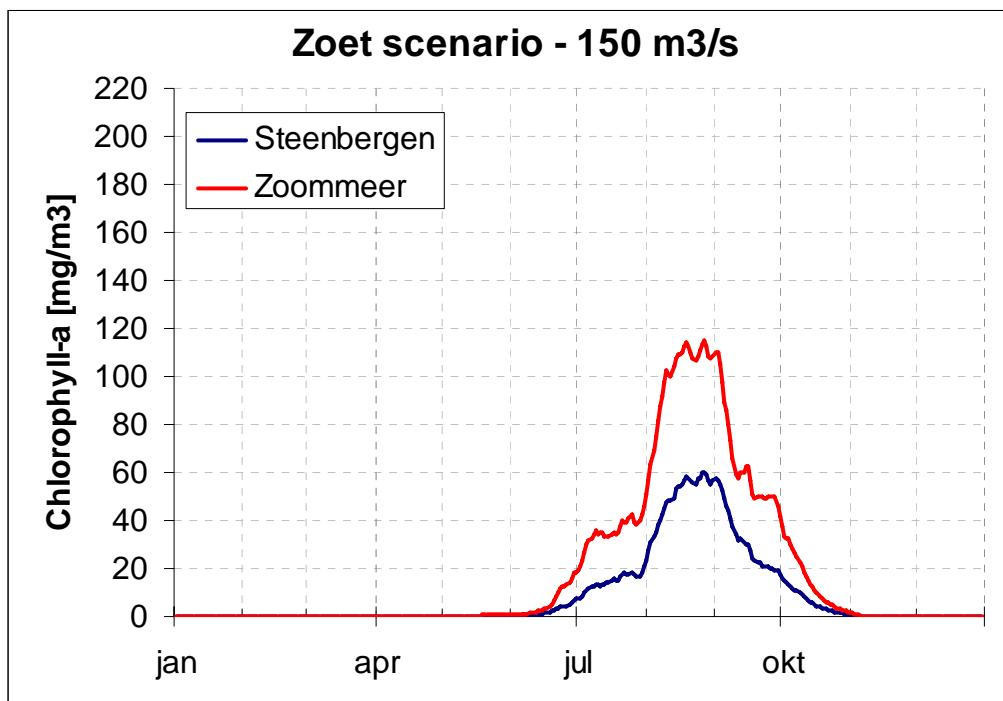
Figuur 4.9b: Ruimtelijke variatie van totaal fosfaat in het Krammer-Volkerak voor de zoete variant.



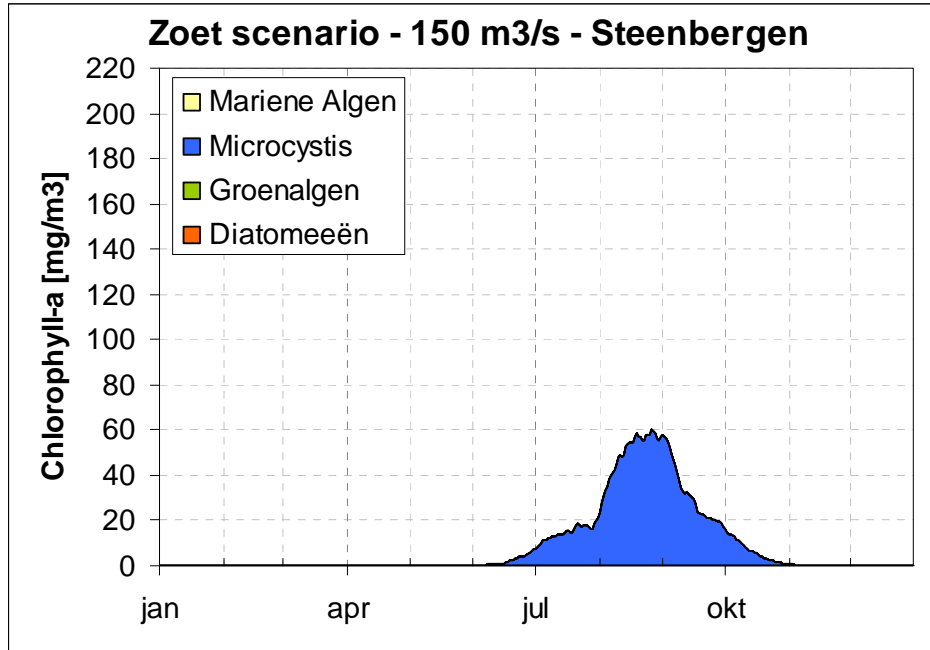
Figuur 4.9c: Totaal fosfaat-gehalten in de zoete variant (100 m³/s vanuit het Hollandsch Diep) op 1-9-2000.



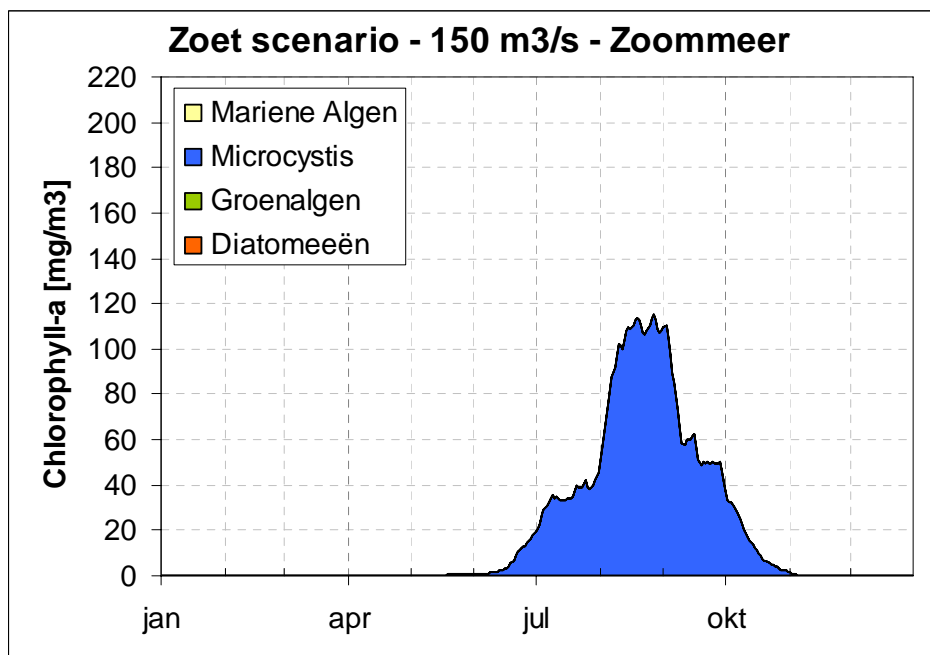
Figuur 4.9d: Orthofosfaat-gehalten in de zoete variant (100 m³/s vanuit het Hollandsch Diep) op 1-9-2000.



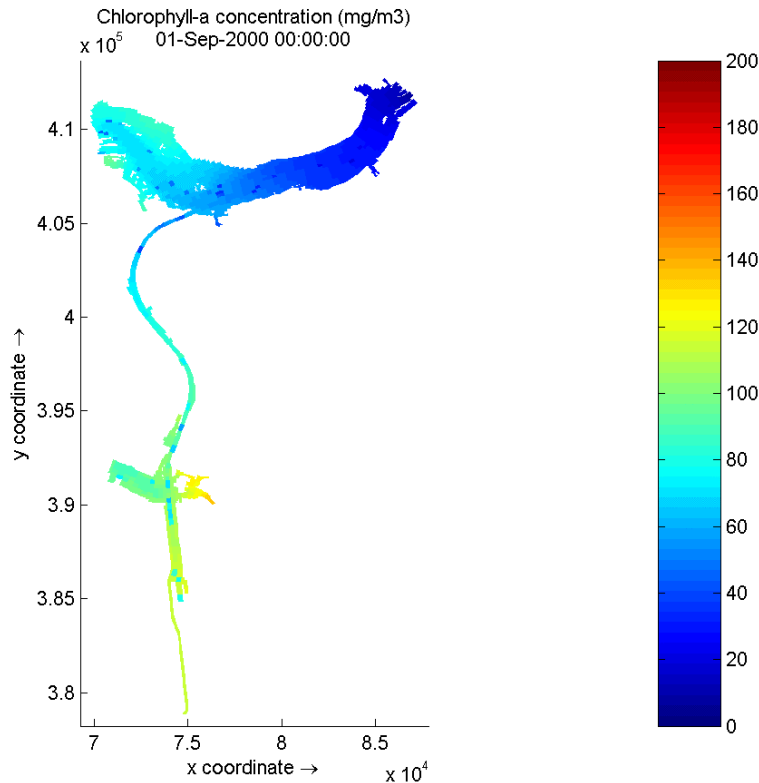
Figuur 4.10a: Chlorofyl-gehalten in het Volkerak-Zoommeer in de zoete variant (150 m³/s vanuit het Hollandsch Diep).



Figuur 4.10b: Algensoortensamenstelling op meetpunt Steenberg in de zoete variant (150 m³/s).



Figuur 4.10c: Algensoortensamenstelling in het Zoommeer in de zoete variant (150 m³/s).



Figuur 4.10d: Chlorofyl-gehalten in de zoete variant ($150 \text{ m}^3/\text{s}$ vanuit het Hollandsch Diep) op 1-9-2000.

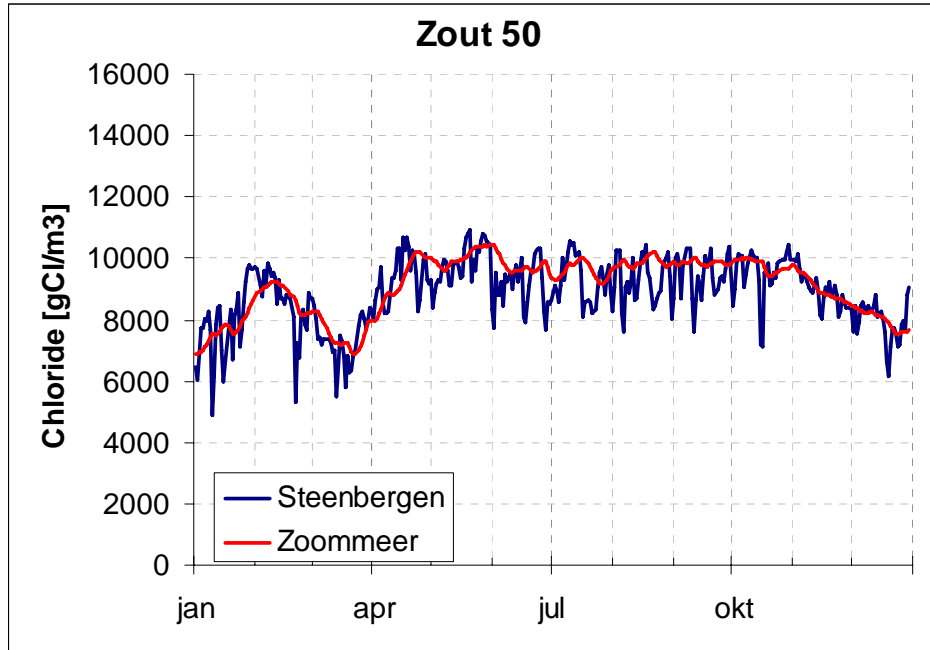
Het aangevoerde water zorgt dus wel voor het doorspoelen van het watersysteem, maar niet voor het schoonsoelen ervan. Voor het doorspoelen is een grote hoeveelheid zoet water uit het Hollandsch Diep nodig. Nadere analyse van de beschikbaarheid van water heeft aangetoond dat een dergelijke aanvoer tijdens de zomermaanden lang niet altijd mogelijk is. De beschikbaarheid is met name twijfelachtig in de zoete variant waarbij $150 \text{ m}^3/\text{s}$ water vanuit het Hollandsch Diep wordt aangevoerd, terwijl daarbij de algenniveaus in het Volkerak-Krammer slechts beperkt en in het Zoommeer zelfs nauwelijks verminderen.

Het maximaal toelaatbare chlorofyl niveau van $50 \mu\text{g}/\text{l}$ wordt in vrijwel het gehele Volkerak-Krammer-Zoommeer overschreden. Uit de ruimtelijke verdeling van de algenbiomassa blijkt doorspoelen niet effectief in de ondiepe delen en dode hoeken van de Krammer en het Zoommeer.

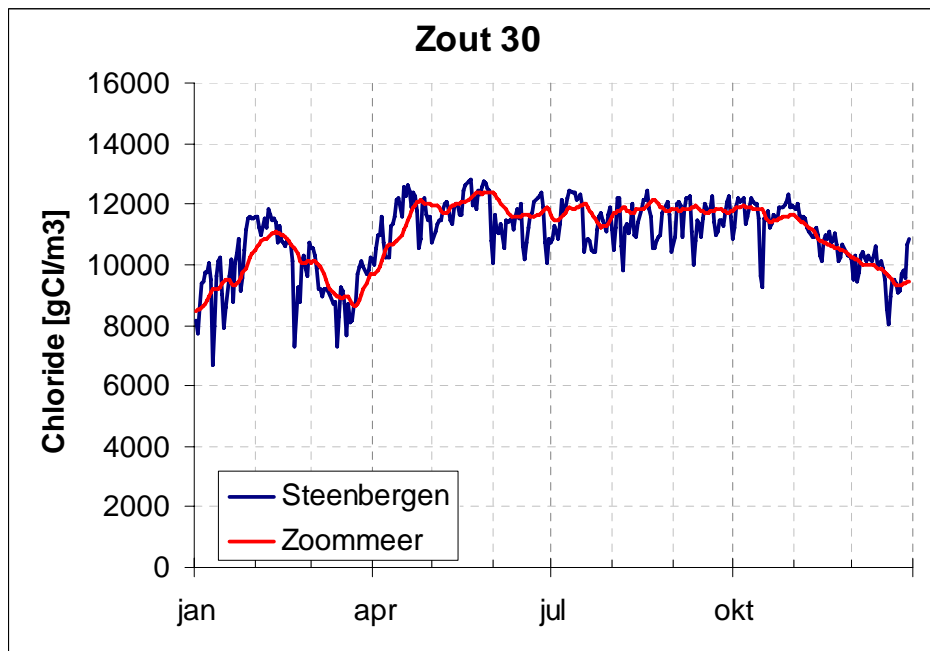
Zoet doorspoelen is daarmee zeer riskant, omdat bij een plotseling optredende geringe beschikbaarheid van doorspoelwater zich direct weer een grote(re) biomassa kan ontwikkelen. Bronsanering in combinatie met doorspoelen is vanwege de grote aanvoer van nutriënten vanuit het Hollandsch Diep zinloos.

4.2.3 De zoute varianten

In de huidige situatie is de karakteristieke chloride concentratie in de orde van $300 \text{ mg}/\text{l}$ omdat er wordt gestuurd op een chloride concentratie van maximaal $450 \text{ mg}/\text{l}$ in het Bathse Spuikanaal, maar in de zoute varianten loopt het chloridegehalte op tot 8.000 à $12.000 \text{ mg}/\text{l}$ (zie Figuur 4.11 en 4.12).



Figuur 4.11: Chloridegehalten in de zoute variant (50 m³/s zoet water vanuit het Hollandsch Diep).

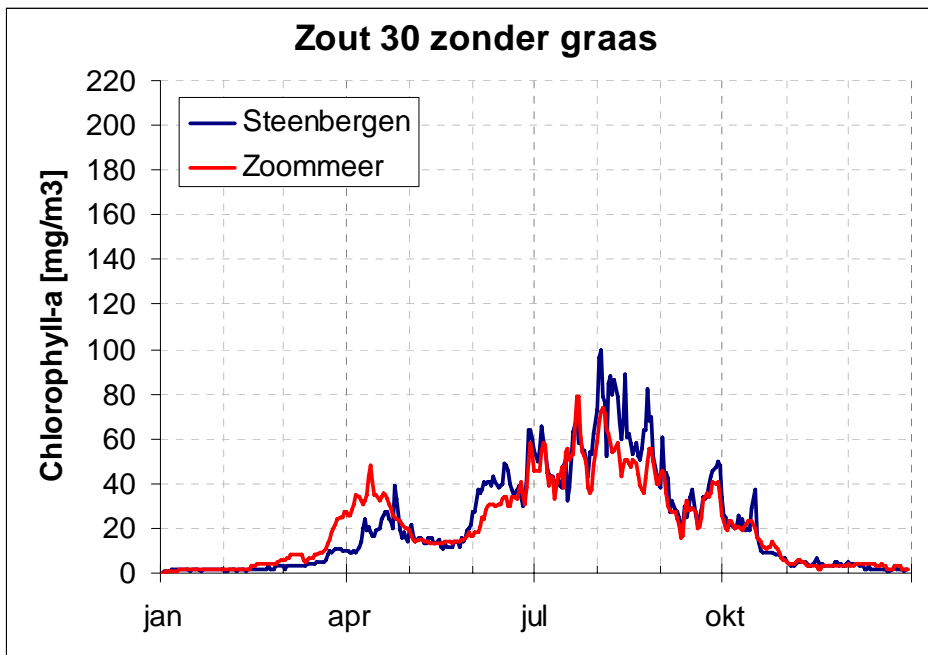


Figuur 4.12: Chloridegehalten in de zoute variant (30 m³/s zoet water vanuit het Hollandsch Diep).

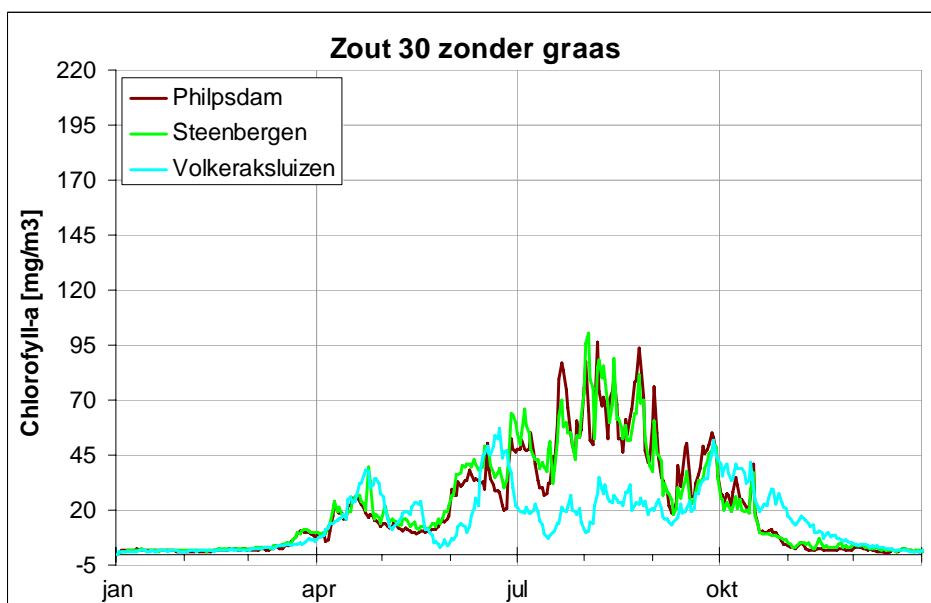
Omdat het watersysteem wordt doorspoeld met zout(er) water vanuit de Oosterschelde, ontstaat een vrij zout watersysteem waarin blauwalgen **niet** meer kunnen groeien. Er zullen mariene algensoorten gaan voorkomen, die voldoende tijd en nutriënten krijgen om te kunnen groeien. Het blauwalgen probleem wordt dus effectief opgelost, al blijft de primaire productie (fytoplankton productiviteit) op een vrij hoog niveau vanwege de beschikbare nutriënten. Net als bij de zoete variant wordt de verblijftijd in het Volkerak-Zoommeer in de zoute varianten aanzienlijk verkort tot ruwweg vijf weken. Zoals verwacht vermindert de algenbiomassa in een dergelijke situatie en komen er geen blauwalgen meer voor (Figuur

4.13). In dynamische zoute watersystemen wordt meestal een typische seizoensdynamiek waargenomen: een kortdurende vroege voorjaarspiek gevolgd door een voortdurend laag zomerniveau en een korte najaarspiek. In het gesimuleerde verloop van de algenbiomassa voor het zoute scenario is de voorjaarspiek inderdaad zichtbaar, maar komt de biomassa in het zomer- en najaarsseizoen tot vergelijkbare chlorofyl gehalten.

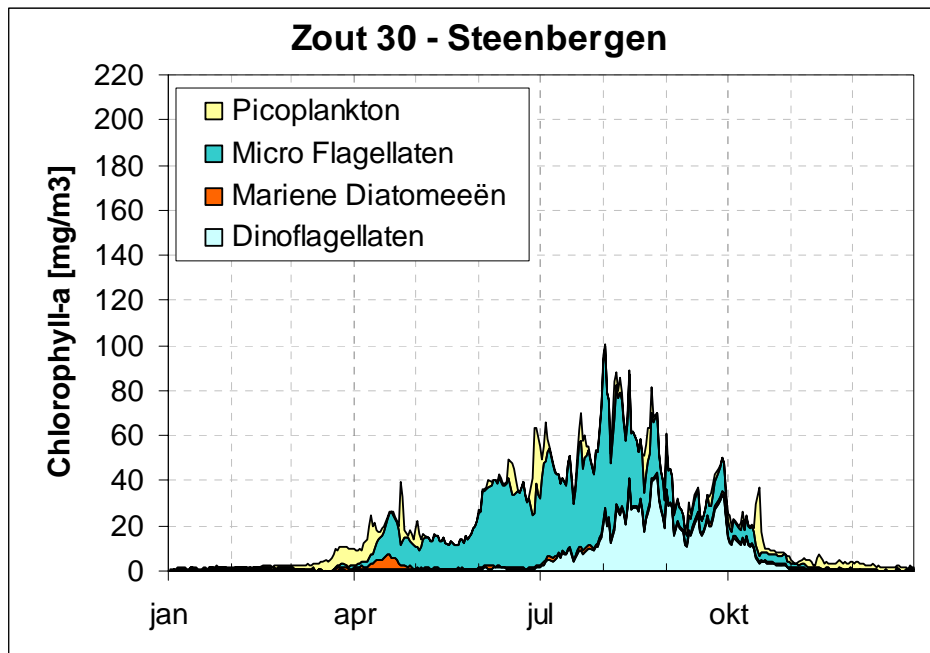
Bij een debiet van 30 m³/s wordt het Volkerak-Zoommeer iets zouter dan bij 50 m³/s. Bij 50 m³/s hebben zowel de zoete als zoute algen last van sub-optimale groeiomstandigheden. Een mengsel van hele kleine algensoorten ('picoplankton') kan in deze omstandigheden echter wel optimaal groeien en domineert in dat geval het watersysteem (Figuur 4.18a t/m 4.18c).



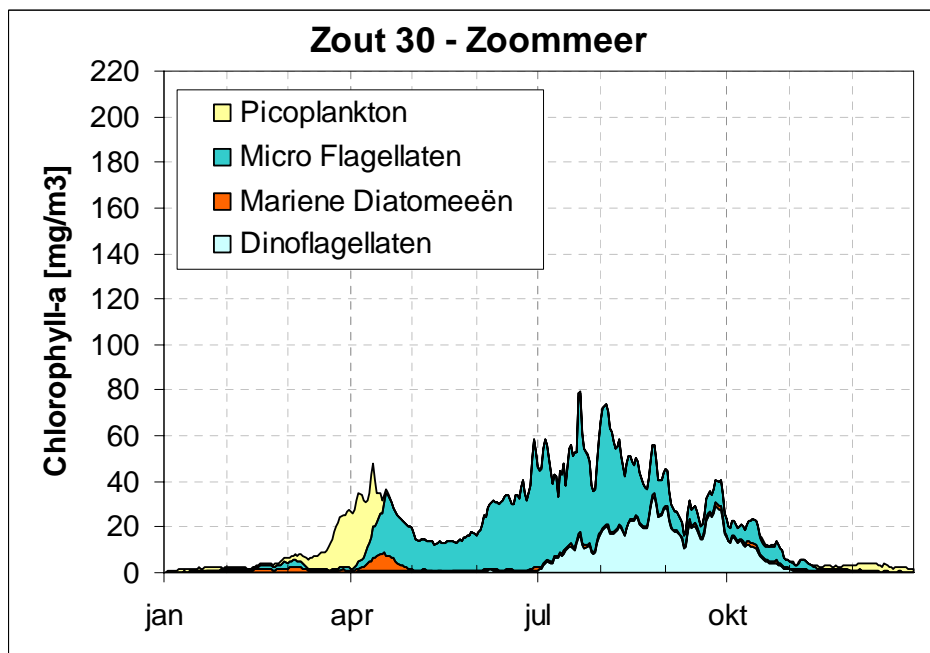
Figuur 4.13a: Chlorofyl-gehalten in het Volkerak-Zoommeer in de zoute variant.



Figuur 4.13b: Ruimtelijke variatie van chlorofyl in het Krammer-Volkerak voor de zoute variant.

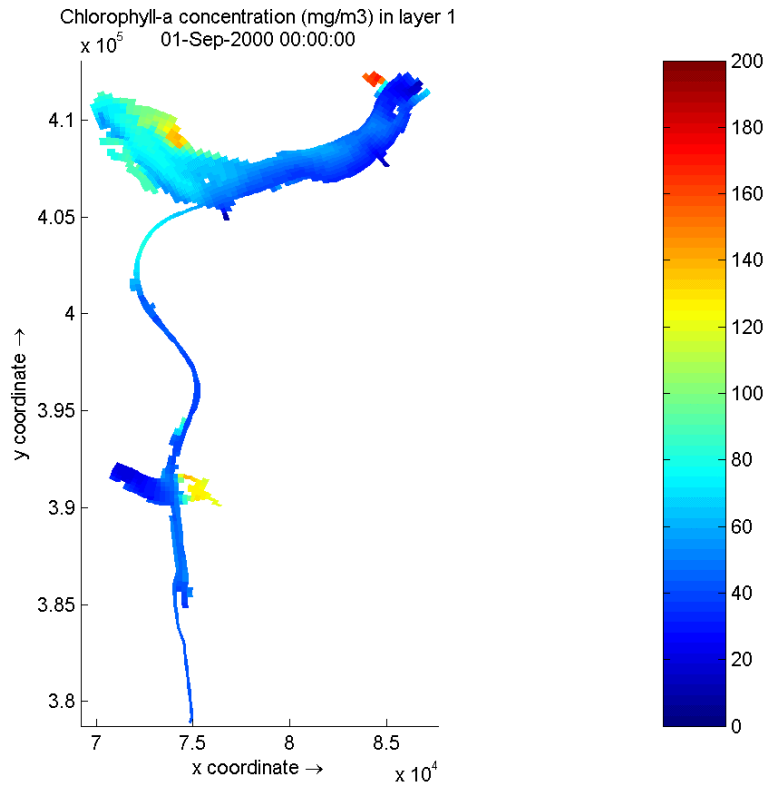


Figuur 4.13c: Algensoortensamenstelling op meetpunt Steenbergen in de zoute variant.



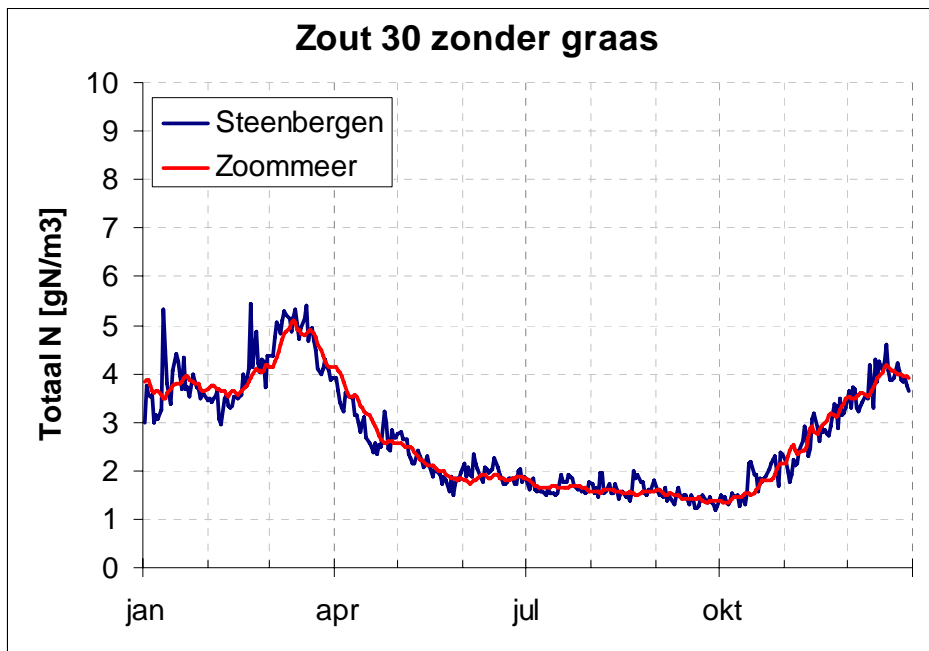
Figuur 4.13d: Algensoortensamenstelling in het Zoommeer in de zoute variant.

Het met zout water doorspoelen blijkt effectief voor de bestrijding van blauwalgen. De biomassa niveaus komen in een dergelijk watersysteem zowel nabij Steenbergen als in het Zoommeer nauwelijks boven de 50 $\mu\text{g/l}$ chlorofyl. Echter, bij met name een inlaat van 50 m^3/s bij de Volkeraksluizen krijgen brakwater algensoorten (zoals ‘picoplankton’) de kans om zich te manifesteren (zie Figuur 4.18a t/m 4.18c). Bij een inlaatdebiet van 30 m^3/s is het aandeel ‘picoplankton’ veel beperkter (vergelijk Figuur 4.13c en 4.13d).

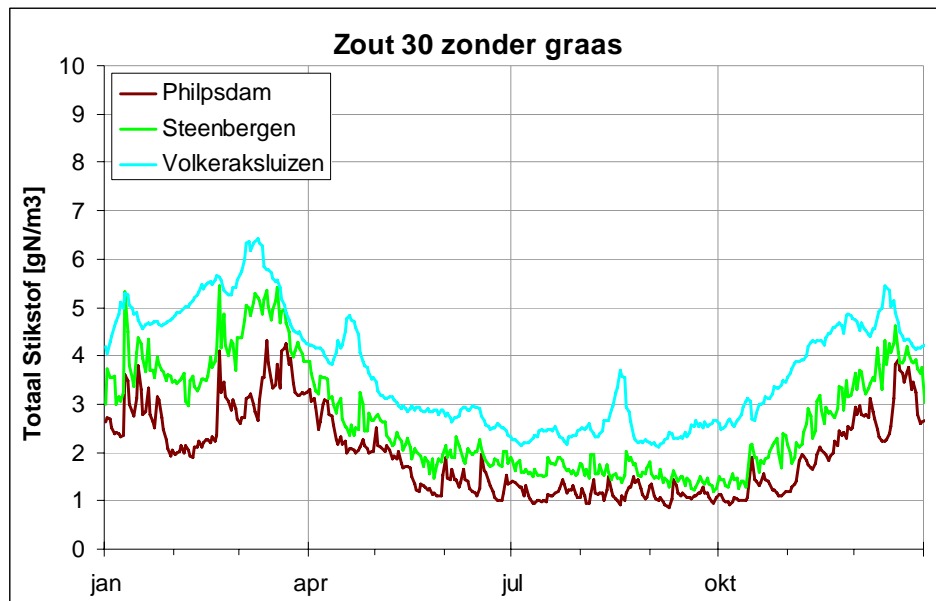


Figuur 4.13e: Chlorofyl-gehalten in de zoute variant (30 m³/s zoet water vanuit het Hollandsch Diep).

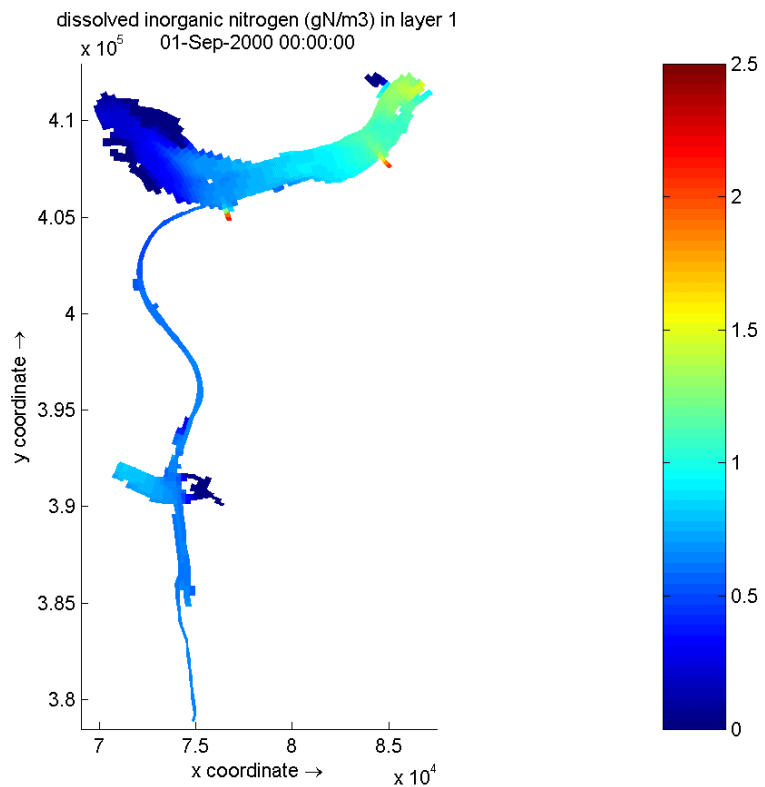
De benodigde nutriënten voor algengroei worden vooral vanuit de Brabantse rivieren en het Hollandsch Diep aangevoerd. De diverse stikstof en fosfaatgehalten zijn gepresenteerd in Figuur 4.14 en 4.15. Verdergaande bronreductie is nodig om in het gehele Volkerak-Zoommeer watersysteem tot algenbiomassa's onder de 50 µg/l chlorofyl te komen.



Figuur 4.14a: Totaal stikstof-gehalten in het Volkerak-Zoommeer in de zoute variant.



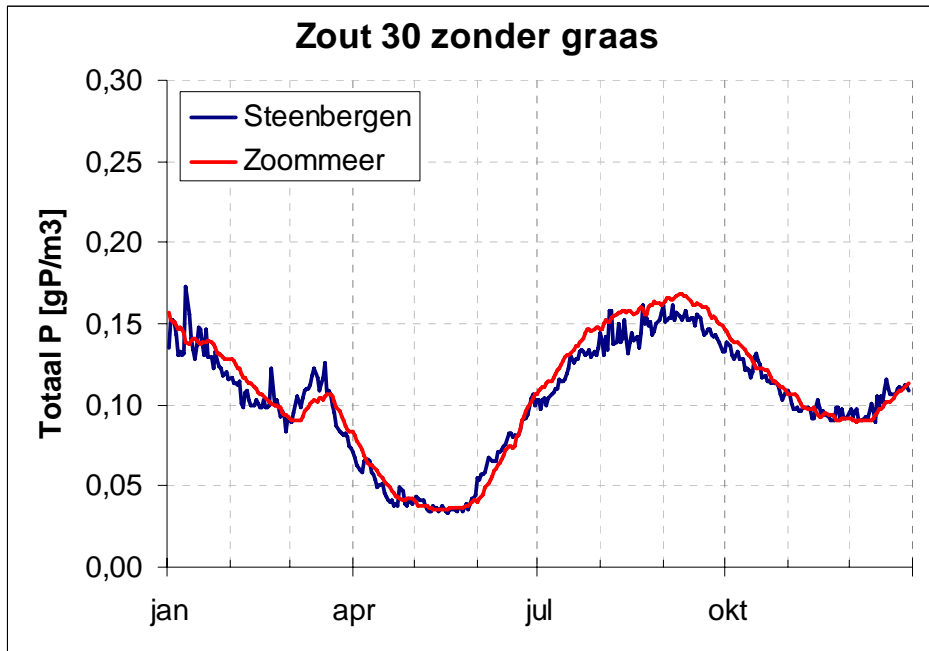
Figuur 4.14b: Ruimtelijke variatie van totaal stikstof in het Krammer-Volkerak voor de zoute variant.



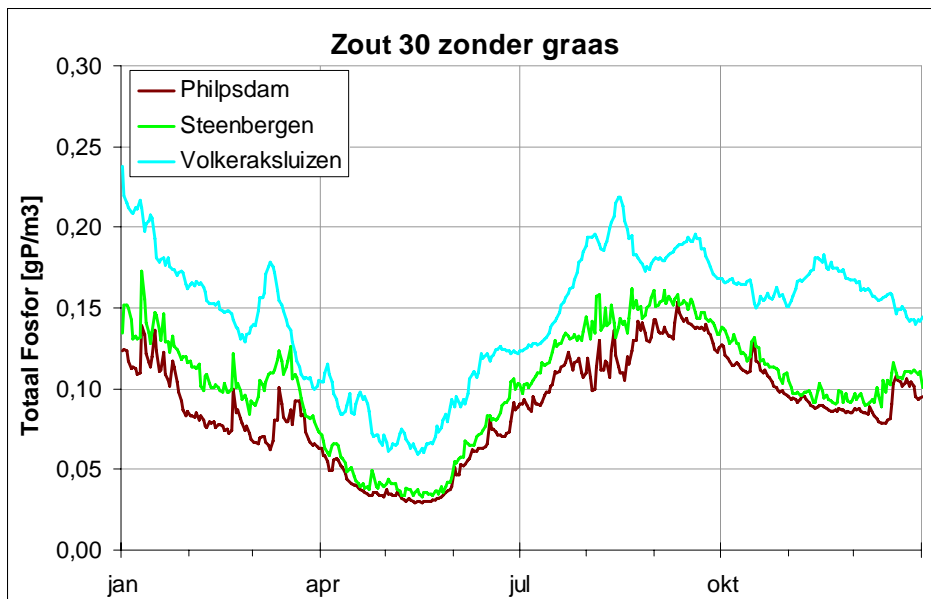
Figuur 4.14c: Ammonium+nitraat-gehalten in de zoute variant ($30 \text{ m}^3/\text{s}$ zoet water vanuit het Hollandsch Diep).

De berekeningsresultaten geven aan dat de stikstofgehalten in de zoute variant nog behoorlijk hoog blijven, en dat de fosfaatconcentratie lager is dan bij de zoete varianten. De berekende seizoensdynamiek is redelijk conform die van zoute watersystemen, waarbij de algenconcentraties zijn afgenomen en blauwalgen zijn verdwenen.

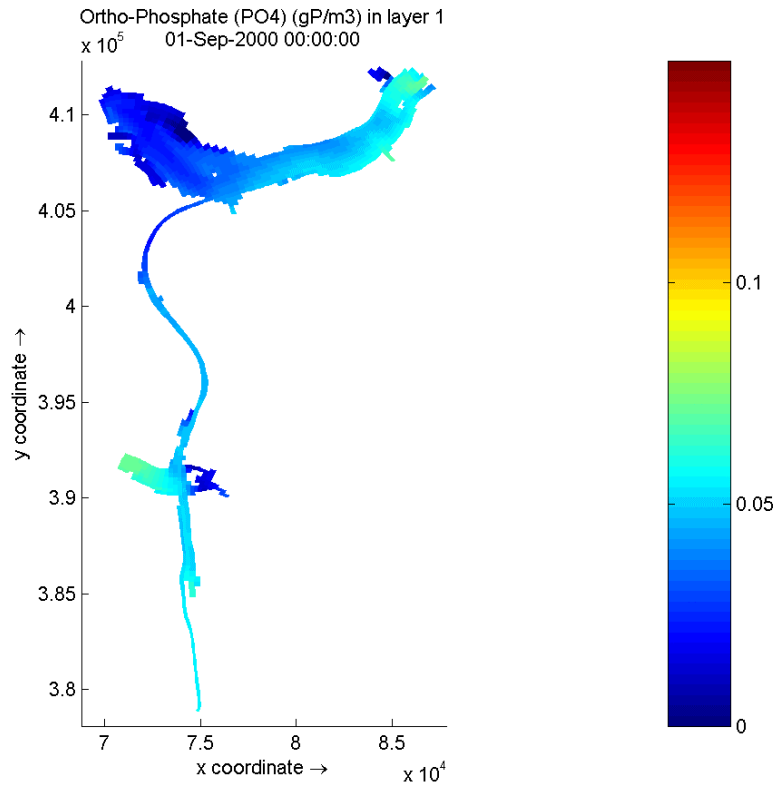
Uit de figuren met de ruimtelijke verspreiding blijkt dat de algenbiomassa in het Volkerak relatief laag is vanwege de snelle overgang van brak naar zout water. Beperking van de zoetwater inlaat via de Volkeraksluizen is gewenst om groei van brakwater algensoorten tegen te gaan. In de ondiepe delen van Krammer en Zoommeer is het algenniveau nog hoog, hetgeen kan worden tegengegaan door meer inlaat en uitwisseling van zout water in de Krammer en door het aanbrengen van een mogelijkheid om zout water uit te wisselen tussen het Zoommeer en de Oosterschelde via een doorlaatmiddel in de Oosterdam.



Figuur 4.15a: Totaal fosfaat-gehalten in het Volkerak-Zoommeer in de zoute variant.

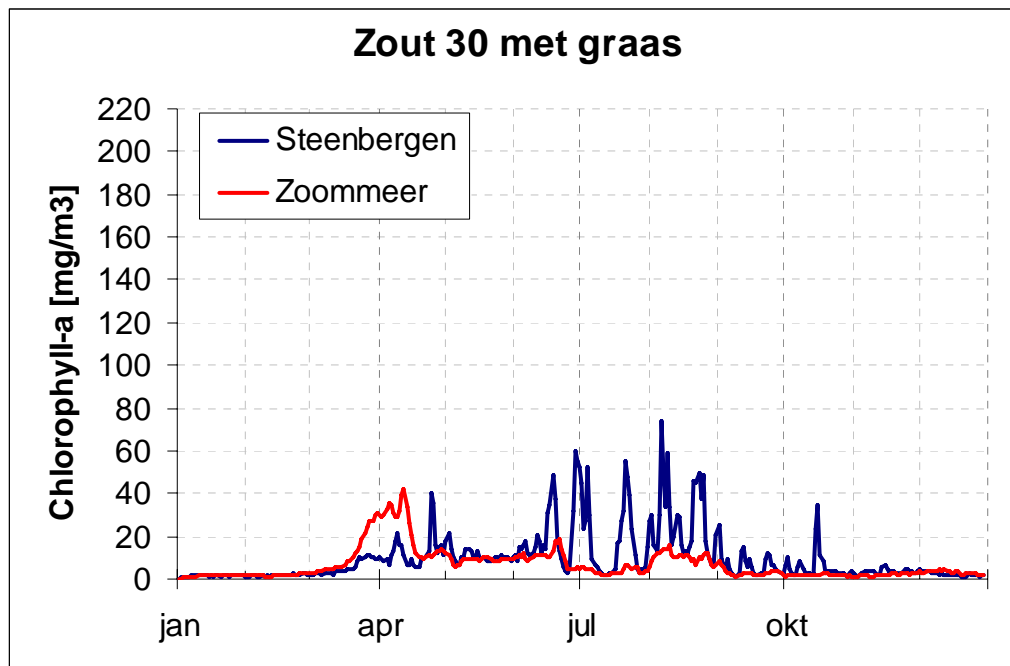


Figuur 4.15b: Ruimtelijke variatie van totaal fosfaat in het Krammer-Volkerak voor het zoute scenario.



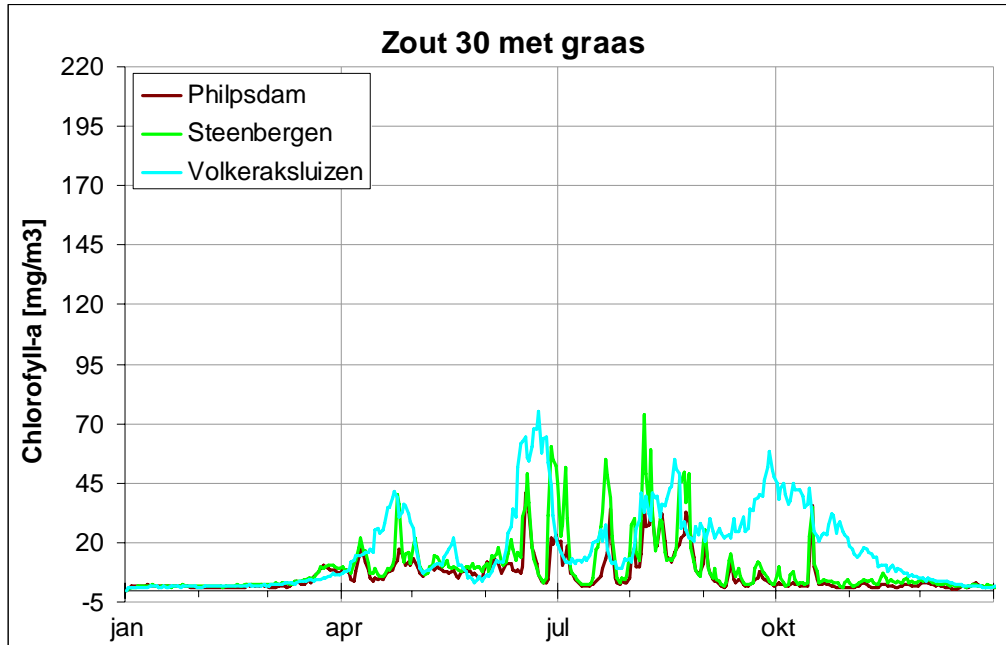
Figuur 4.15c: Fosfaat-gehalten in de zoute variant (30 m³/s zoet water vanuit het Hollandsch Diep).

Bij de zoute varianten moet bedacht worden dat het de nodige tijd zal duren om van het huidige zoete watersysteem te komen tot een volwaardig zout of brak watersysteem. Het valt moeilijk in te schatten hoe lang deze overgangsperiode zal zijn, maar kan mogelijk enkele jaren bedragen.

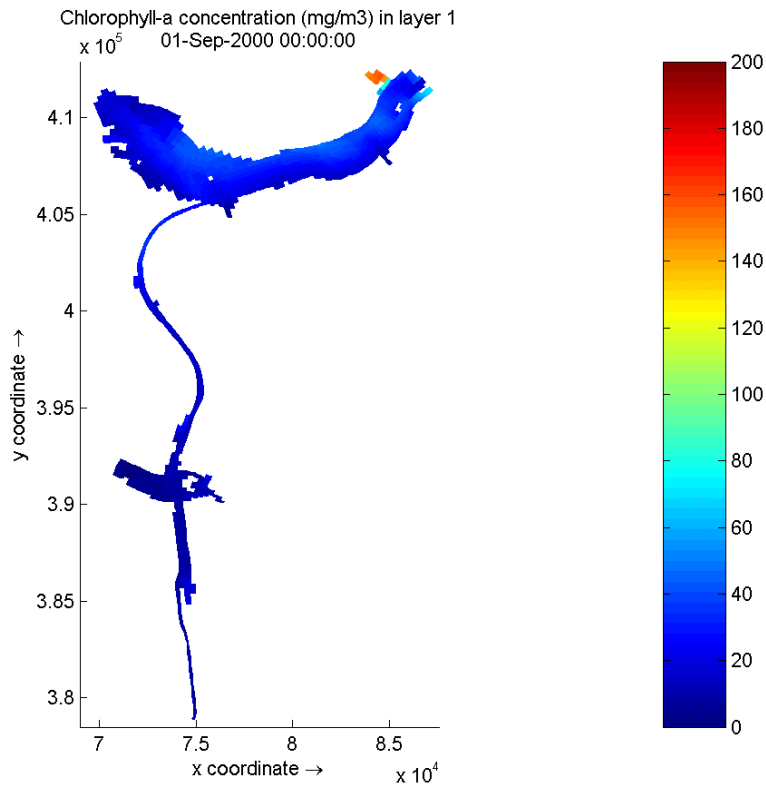


Figuur 4.16a: Chlorofyl-gehalten in het Volkerak-Zoommeer in de zoute variant met graas.

Mocht in de uiteindelijke situatie de graas door mosselen van dezelfde omvang zijn als in het huidige Veerse Meer, dan zal deze graas zorgen voor een aanzienlijke reductie van de algen-biomassa. Dit effect is weergegeven in Figuur 4.16a t/m 4.16c (vergelijk met Figuur 4.13a t/m 4.13e).

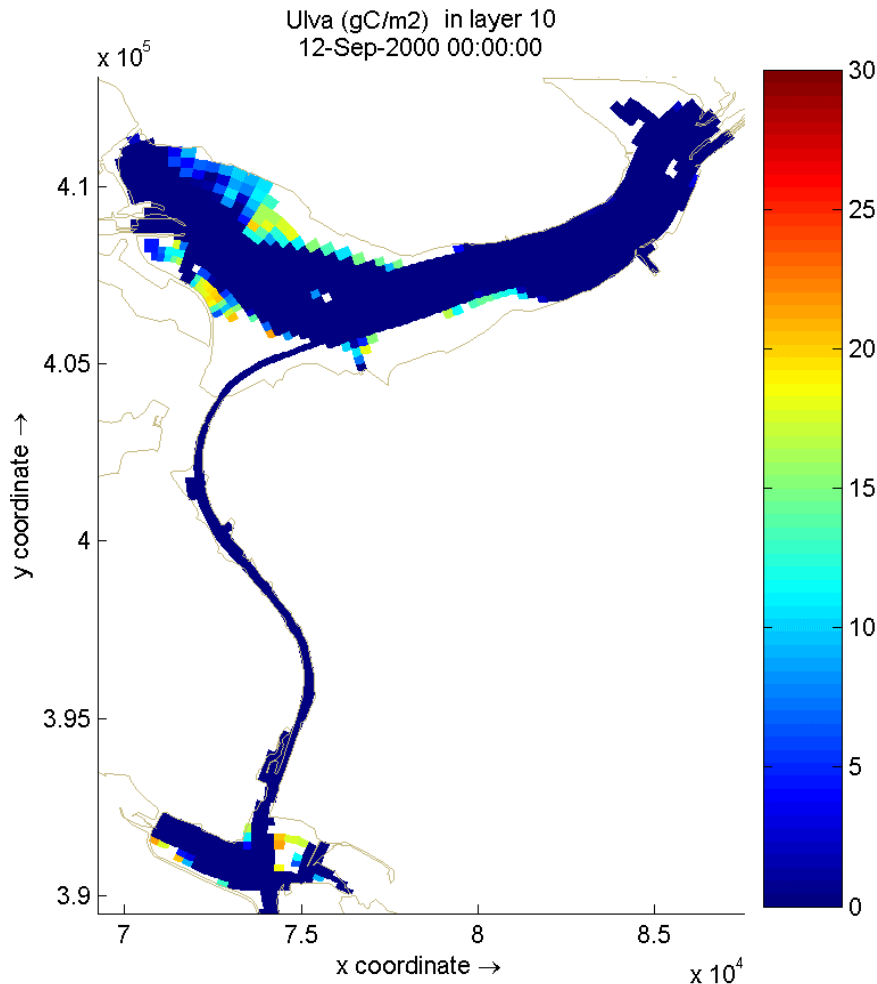


Figuur 4.16b: Ruimtelijke variatie van chlorofyl in het Krammer-Volkerak voor het zoute scenario met graas.



Figuur 4.16c: Chlorofyl-gehalten in de zoute variant met de invloed van graas (omvang Veerse Meer).

Daarnaast bestaat er echter de kans op groei van zeesla (*Ulva*) in de ondiepe delen van het Volkerak-Zoommeer. In Figuur 4.17a is de gesimuleerde omvang van *Ulva* weergegeven zonder graas, terwijl de simulatie inclusief graas is weergegeven in Figuur 4.17b. De situatie waarbij rekening wordt gehouden met graas levert een hogere *Ulva* biomassa op door betere lichtomstandigheden en de grotere hoeveelheid nutriënten die door de activiteit van onder andere mosselen beschikbaar komt voor de groei van *Ulva*.

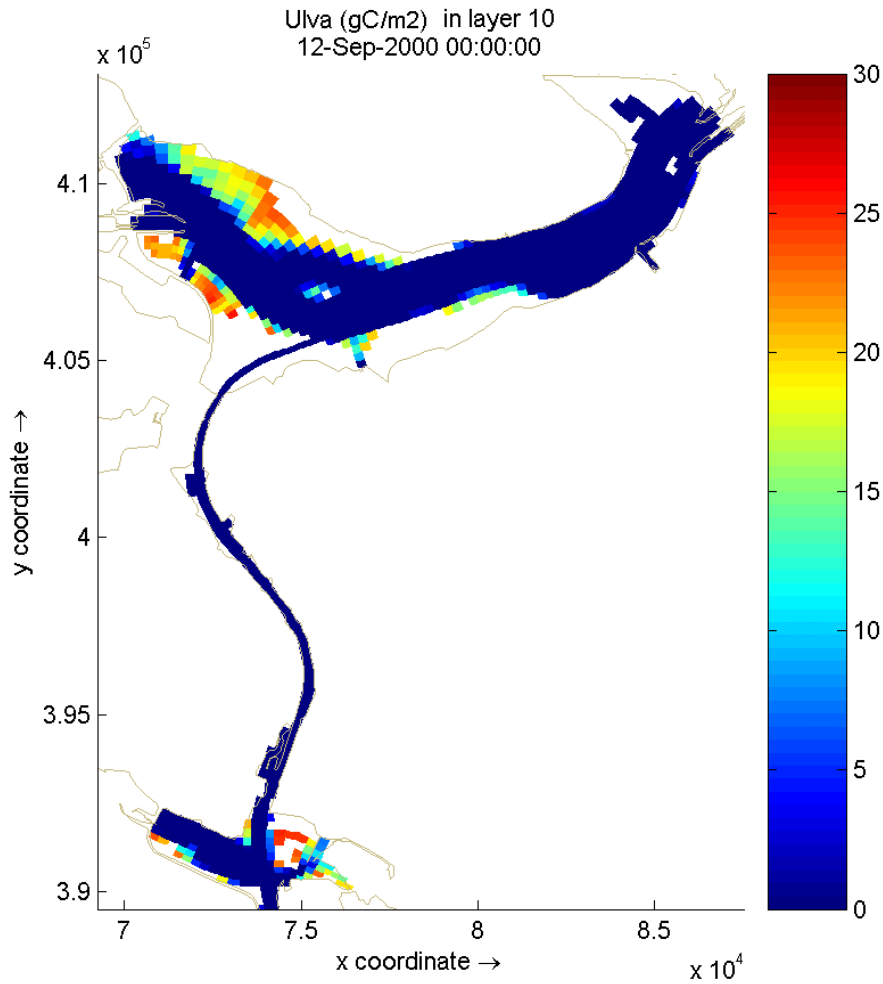


Figuur 4.17a: Omvang en verspreiding van zeesla (in gC/m^2) in de zoute variant zonder graas.

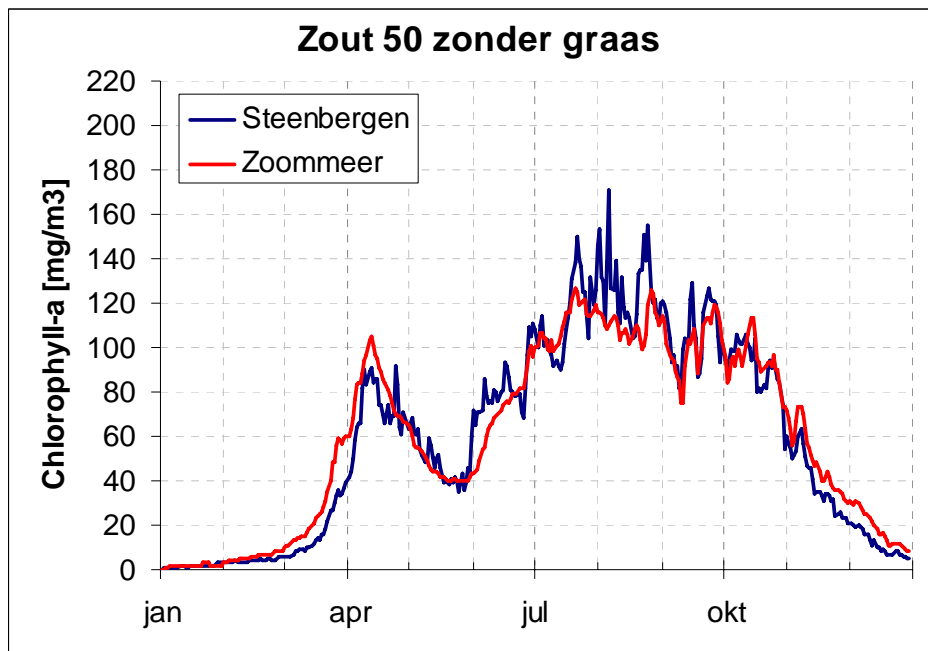
De maximale berekende *Ulva* biomassa is zo'n 25 gC/m^2 . Is dit veel en is er dan sprake van overlast? Waarschijnlijk niet. In het Veerse was de gemiddelde biomassa *Ulva* in de ondiepe gebieden waar *Ulva* voorkwam (gemiddeld 650 ha) in de periode 1987-1999 een kleine 50 gC/m^2 . Het gemiddelde over een groot gebied in het Veerse Meer was dus twee keer zo hoog als het berekende maximum op enkele plaatsen in een toekomstig zout Volkerak-Zoommeer. In het huidige Veerse Meer, na ingebruikname aan de Katse Heule, waardoor de winterconcentratie van stikstof sterk verlaagd is ($1-1,5 \text{ gN/m}^3$) blijft de *Ulva* ontwikkeling voorsnog beperkt tot ongeveer 5 gC/m^2 , dus 10 keer zo laag als in de 90-er jaren. Aan de *Ulva*-berekening kleef wel een grote mate van onzekerheid.

Op de risicoplekken voor zeesla in een toekomstig zout Volkerak-Zoommeer (de ondiepe delen van Krammer en Zoommeer) zijn de berekende winterconcentraties van stikstof zo'n

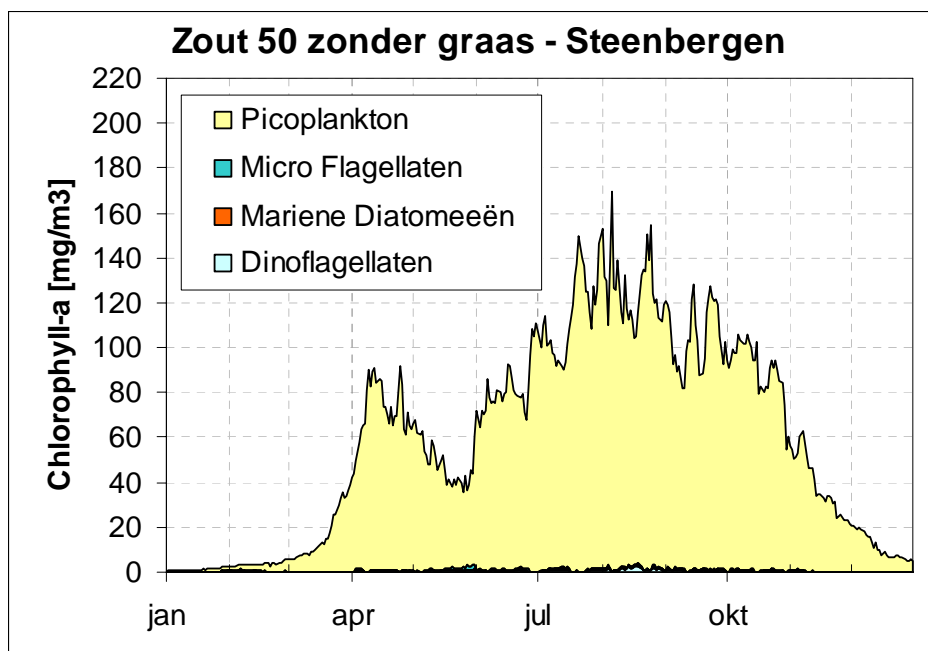
3-4 gN/m³, veel hoger dan in het huidige Veerse Meer en zelfs nog wat hoger dan in het Veerse Meer vóór de Katse Heule. Het risico van zeesla-overlast is wellicht wat groter dan wordt aangegeven met het modelresultaat.



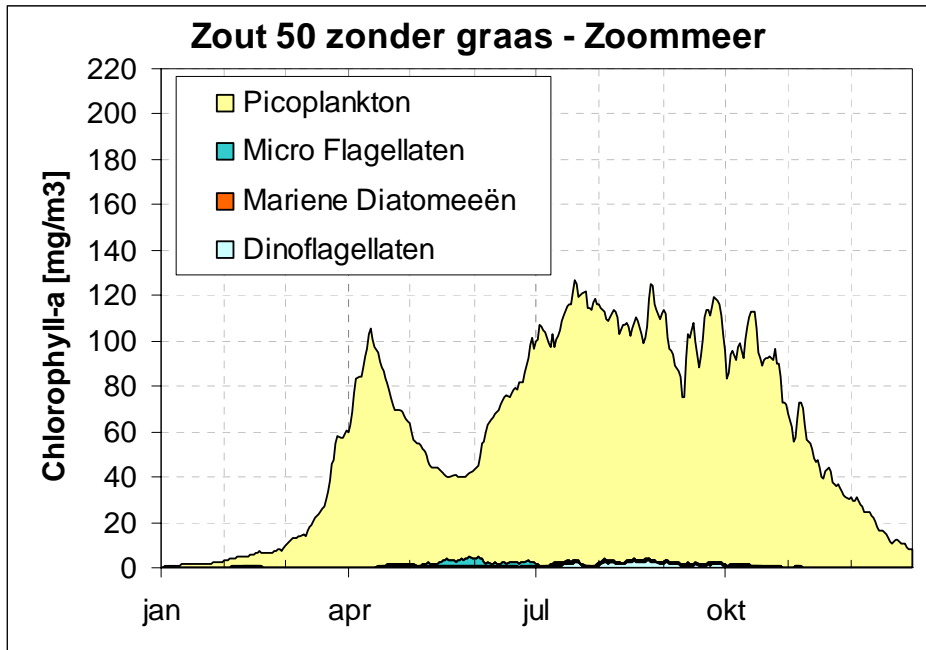
Figuur 4.17b: Omvang en verspreiding van zeesla (in gC/m²) in de zoute variant met graas.



Figuur 4.18a: Chlorofyl-gehalten in het Volkerak-Zoommeer in de zoute variant (50 m³/s zoet water vanuit het Hollandsch Diep).



Figuur 4.18b: Algensoortensamenstelling op meetpunt Steenbergen in de zoute variant (50 m³/s zoet water vanuit het Hollandsch Diep).



Figuur 4.18c: Algensoortensamenstelling in het Zoommeer in de zoute variant (50 m³/s zoet water vanuit het Hollandsch Diep).

4.3 Aanvullende berekeningen

Onder andere op basis van de resultaten van de in de voorgaande hoofdstukken beschreven varianten, is een viertal aanvullende berekeningen met het modelinstrumentarium op basis van Delft3D geformuleerd. Dat betreft twee berekeningen om de invloed van het inlaten van extra water vanuit de Oosterschelde na te gaan en twee berekeningen waarbij zowel het water als de nutriëntenbelasting vanuit de Brabantse rivieren wordt afgeleid.

Doel van deze nieuwe berekeningen is om de waterbeweging via extra aanvoer/menging van water vanuit de Oosterschelde zodanig in te richten dat er een totaal stikstof gehalte van 2 mg/l in de Eendracht wordt gerealiseerd. De gedachte daarachter is dat de omvang van mariene algen in een dergelijke situatie op een acceptabel laag niveau zal uitkomen (minder dan 50 µg/l chlorofyl, en wellicht nabij de 10 µg/l chlorofyl). Voor alle extra berekeningen wordt de capaciteit van de Bathse spuisluis maximaal benut (ongeveer 125 m³/s).

De berekeningen zijn uitgevoerd op basis van gegevens voor het jaar 2000, waarbij er **geen graas** wordt verondersteld (worst case) en waarbij er voor de zoute varianten met dezelfde fosfaat bodemflux wordt gerekend als in de eerdere scenario-berekeningen (gebaseerd op de bestaande situatie in het Veerse Meer). Bij de enige extra zoete variant is de fosfaat bodemflux wel procentueel geschaald conform de verminderde fosfaatbelasting.

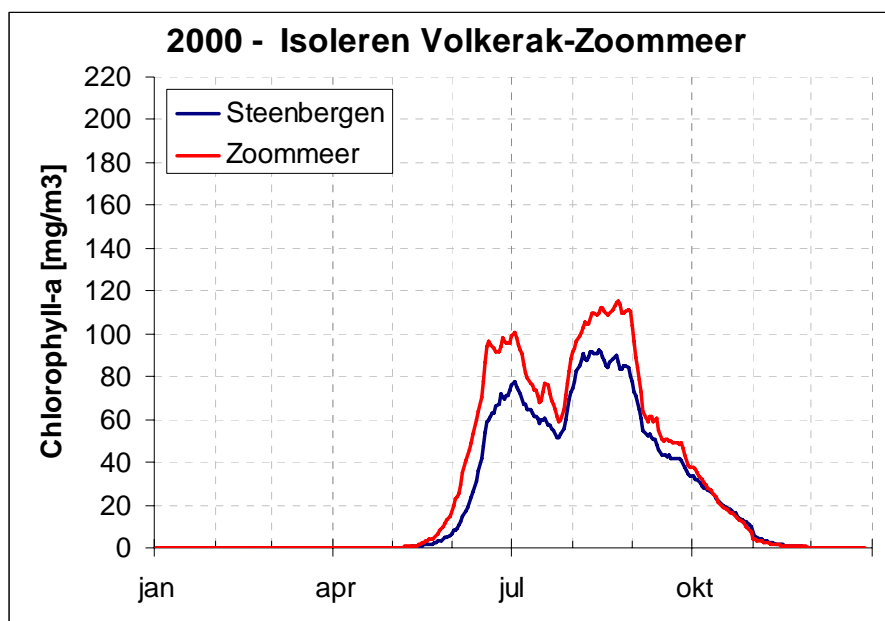
4.3.1 Aanvullend zoet scenario

Bij de beschouwing van de huidige/referentie-situatie met een sanering van de nutriëntenbelasting vanuit de Brabantse rivieren, bleek dat er bij sanering tot het niveau van de MTR-normen enig effect op de algenbiomassa optrad (zie hoofdstuk 4.2.1). Om na te gaan wat het effect van een nog drastischer sanering van de Brabantse rivieren zou

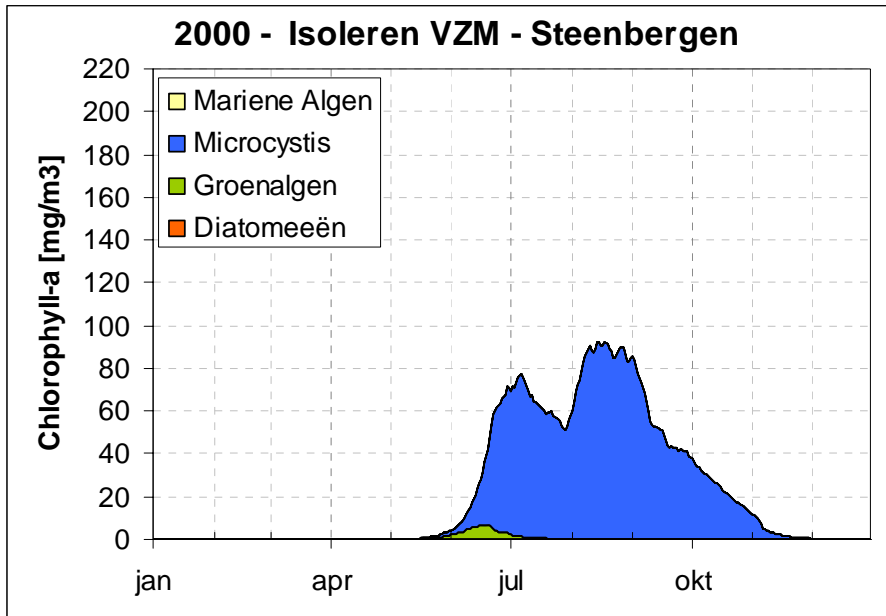
betekenen voor het algenprobleem in het Volkerak-Zoommeer, is een berekening uitgevoerd waarbij zowel de afvoer als de belasting via de Brabantse rivieren wordt afgeleid (100% reductie). Bij deze variant is de zoete referentie-situatie als uitgangspunt genomen.

Omdat het voor de diverse belangen noodzakelijk is om het waterpeil in het Volkerak-Krammer-Zoommeer binnen nauwe grenzen te houden, moet er bij deze (onvolledige) hydrologische isolatie van het watersysteem toch af en toe water worden ingelaten. Gekozen is om een dergelijke inlaat vanuit het Hollandsch Diep te doen plaatsvinden. Belangrijke constatering bij deze zoete isolatie-variant is dat het chloridegehalte in 14 maanden oploopt tot bijna 1000 mg/l vanwege de geringe aanvoer van zoet water ten opzichte van de lekverliezen van zout water door met name de Krammersluizen. En dat terwijl een chloridegehalte van 450 mg/l in het Bathse Spuikanaal het maximaal toelaatbare is vanuit het waterakkoord. Het verhoogde chloridegehalte is niet voldoende hoog om de groei van *Microcystis* te beperken, maar te hoog voor diverse gebruiksfuncties.

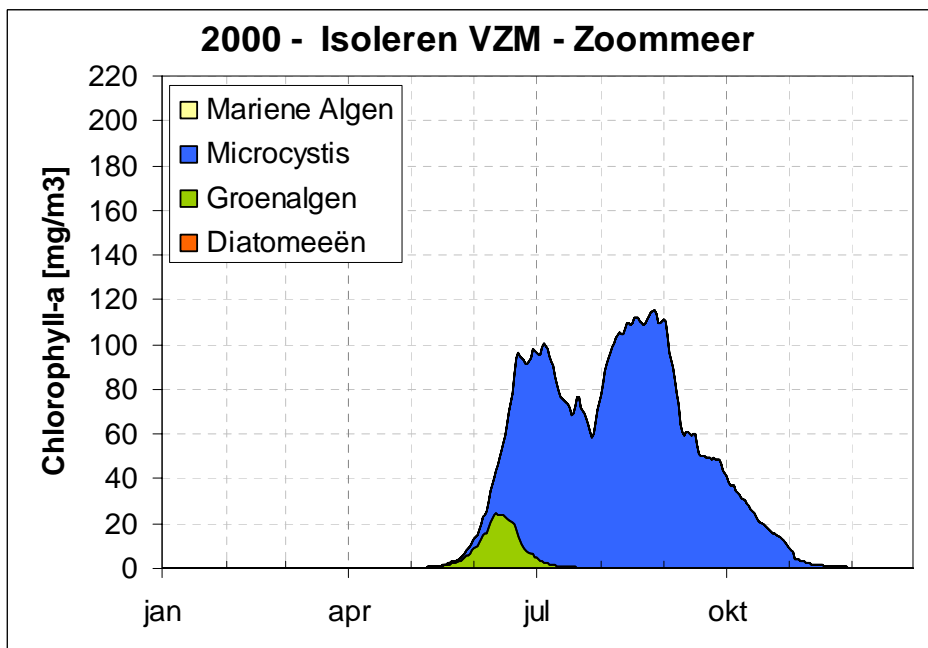
De nutriëntengehalten worden in deze variant aanzienlijk lager dan in de oorspronkelijke situatie zoals weergegeven in Figuur 4.3 en 4.4. Met de oorspronkelijk opgelegde bodemflux van fosfaat gebaseerd op de huidige situatie (jaar 2000) werden de gehalten orthofosfaat negatief in het voorjaar. Na de eerder beschreven schaling van de bodemfosfaat nalevering worden gehalten berekend zoals weergegeven in Figuur 4.21. Het orthofosfaatgehalte wordt daarbij net niet beperkend voor algengroei. Mede daardoor zijn de chlorofylgehalten weliswaar drastisch lager dan in de referentiesituatie, maar worden in het Zoommeer nog algenniveaus bereikt van rond de 100 µg/l (Figuur 4.19).



Figuur 4.19a: Chlorofyl-gehalten in de zoete variant zonder belasting via de Brabantse rivieren.

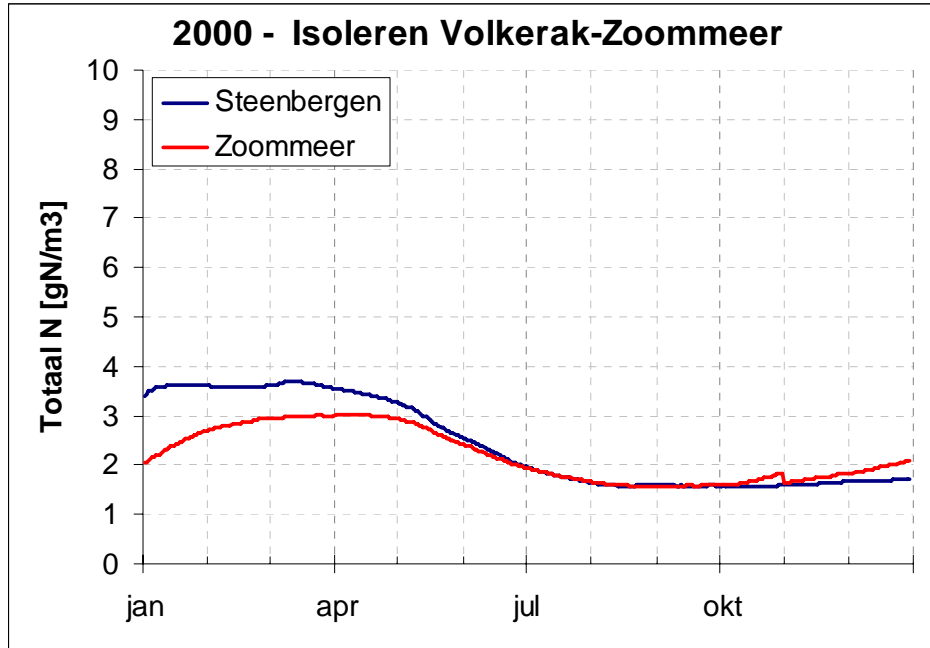


Figuur 4.19b: Algensoortensamenstelling op meetpunt Steenberg bij isolatie van de Brabantse rivieren.

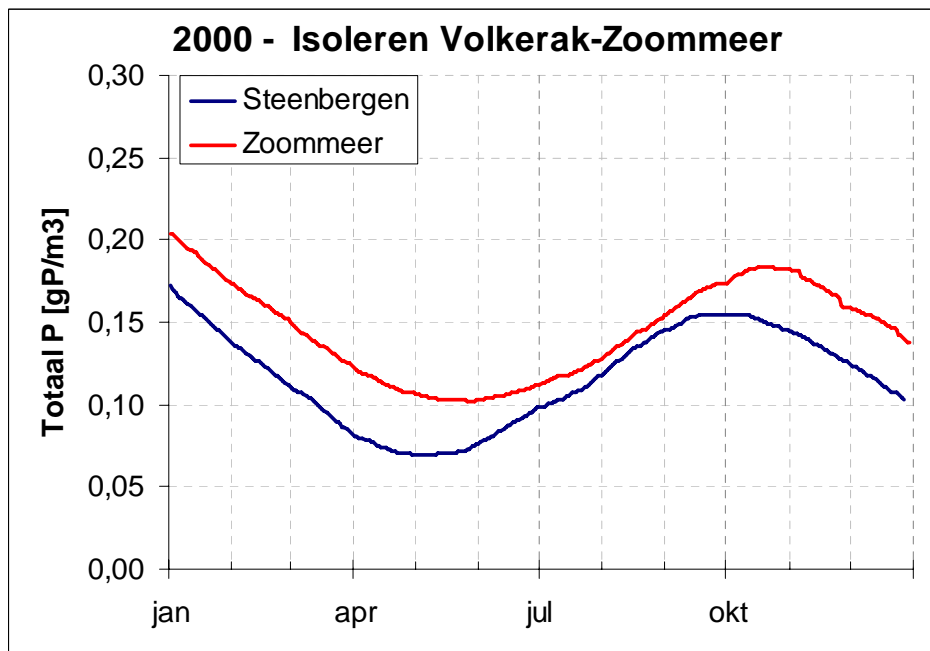


Figuur 4.19c: Algensoortensamenstelling in het Zoommeer zonder belasting via de Brabantse rivieren.

De totaal stikstofgehalten zijn in deze variant verlaagd tot een voorjaarsniveau van ongeveer 3 mgN/l en een zomerniveau van minder dan 2 mgN/l (Figuur 4.20). Vergaande sanering van nutriëntenbronnen zoals onvolledige isolatie van de Brabantse rivieren heeft in de zoete variant dus duidelijk effect maar voorkomt geen algenbloei. De algensoort die met deze omstandigheden het best overweg kan is de blauwalg *Microcystis*.



Figuur 4.20: Stikstof-gehalten in de zoete variant zonder belasting via de Brabantse rivieren.



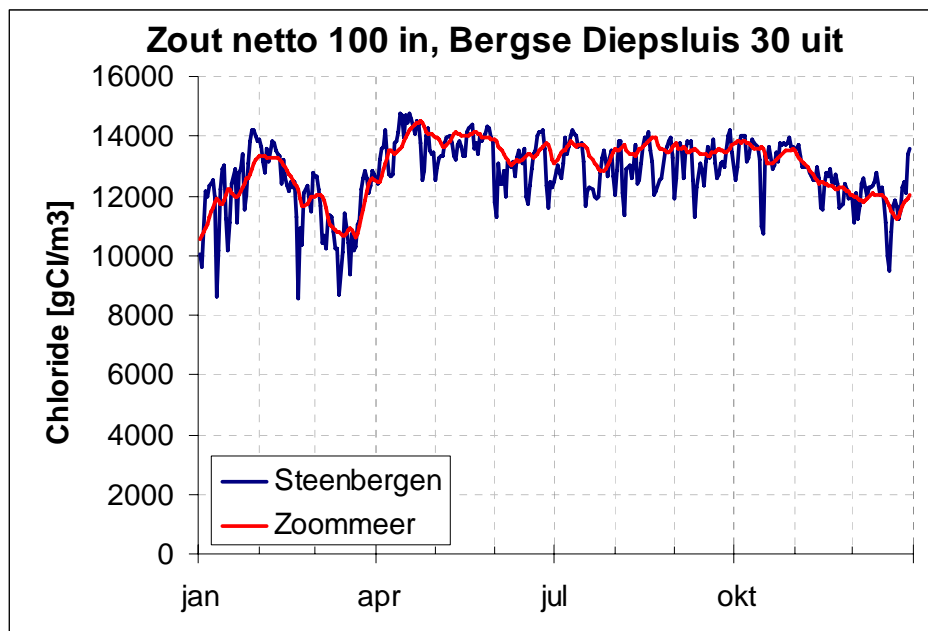
Figuur 4.21: Fosfaat-gehalten in de zoete variant zonder belasting via de Brabantse rivieren.

4.3.2 Aanvullende zoute scenario's

Er zijn ook een aantal aanvullende zoute varianten onderzocht met een geringe getijdendynamiek. Bij deze dynamiek vindt een grotere uitwisseling plaats tussen het Volkerak-Zoommeer en de Oosterschelde en zal de daarmee gepaard gaande peilfluctuatie hooguit centimeters af kunnen wijken van de onder- en bovengrens van de waterstanden

volgens het interim peilbesluit. Met deze berekeningen worden de uiterste grenzen van de mogelijkheden binnen huidig beleid en regelgeving benut.

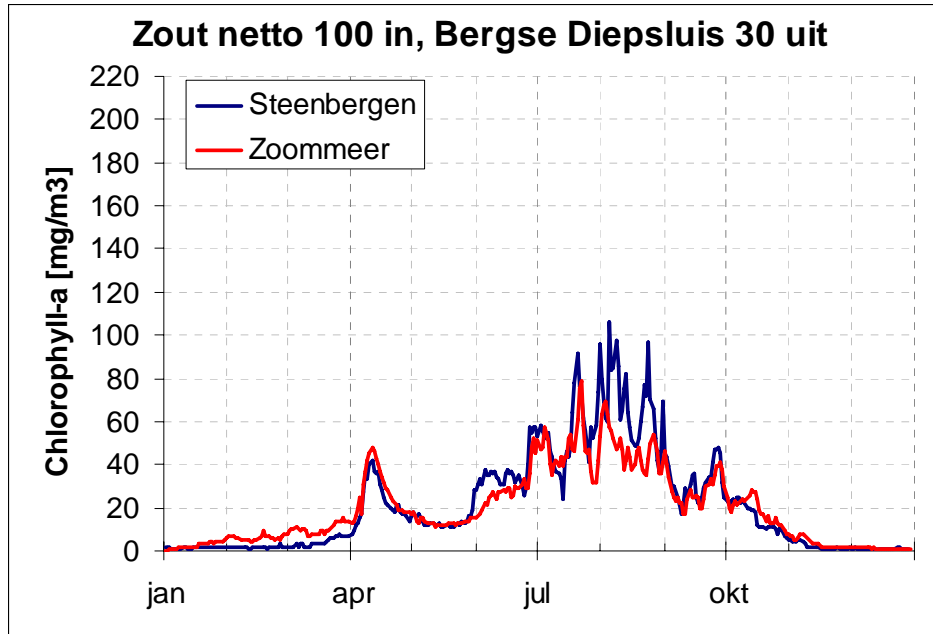
De eerste aanvullende zoute variant beschouwt een situatie met een uitwisseling tussen de Oosterschelde en het Volkerak-Zoommeer via een vergroot doorlaatmiddel in de Philipsdam. De capaciteit van dit doorlaatmiddel is 250 m³/s (daggemiddeld). Daarnaast wordt gebruik gemaakt van een spuimiddel in de Oesterdam dat evenveel water afvoert naar de Oosterschelde als er bij de Volkeraksluizen wordt ingelaten. Van deze variant worden twee situaties bekeken, namelijk een debiet van 30 of 50 m³/s via de Oesterdam. Deze varianten impliceren dat er weliswaar daggemiddeld ongeveer 250 m³/s wordt ingelaten, maar dat er bij eb weer ongeveer 150 m³/s naar de Oosterschelde stroomt. Netto is er derhalve een instroom van 100 m³/s. Bij deze mate van uitwisseling zal er naar verwachting een getijverschil ontstaan van ongeveer 25 cm. De bedoeling van deze varianten is om via menging met Oosterscheldewater, stikstof-gehalten van niet meer dan 2 mgN/l te bereiken in het Volkerak-Zoommeer, waardoor de biomassa van mariene algensoorten voldoende kan worden beperkt.



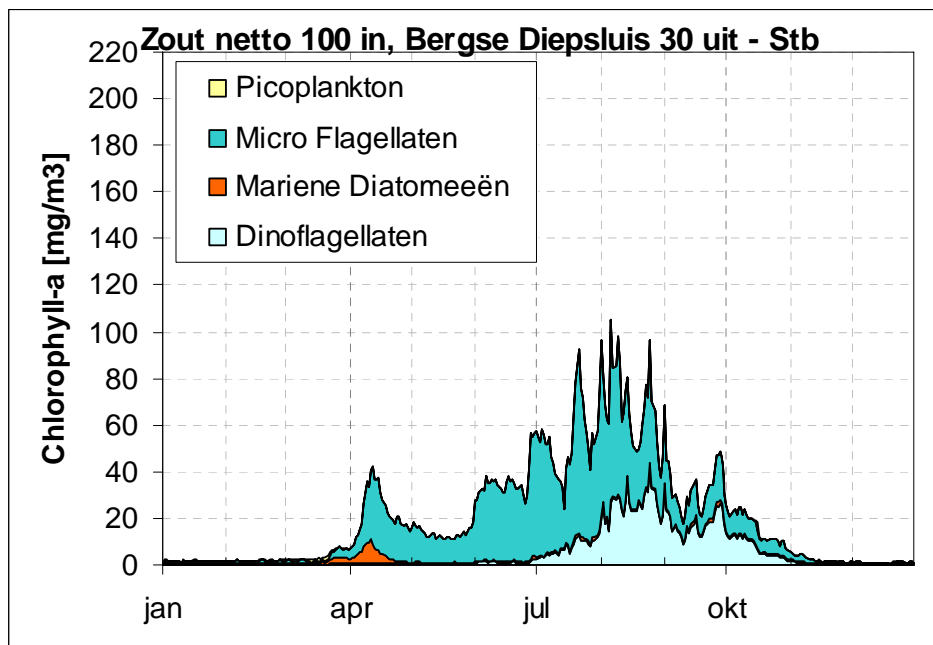
Figuur 4.22: Chloridegehalten in de zoute variant (30 m³/s zoet water vanuit het Hollandsch Diep).

Het chloridegehalte loopt in deze 30 m³/s variant vanwege de verhoogde uitwisseling met de Oosterschelde verder op dan in de eerdere zoute varianten, en bereikt in de zomerperiode waarden tussen de 12.000 en 14.000 mg/l. Bij de 50 m³/s variant varieert het chloridegehalte tussen de 10.000 en 13.000 mg/l (Figuur 4.22). In deze varianten heeft *Microcystis* geen kans om te groeien en komen alleen mariene algensoorten voor (flagellaten). De chlorofyl niveaus bereiken daarbij waarden tussen 60 en 80 µg/l in de zomerperiode. Wat opvalt, is dat zowel de algenniveaus als de nutriëntengehalten niet al te veel verschillen van die in de zout-30 variant. De inspanningen die nodig zijn voor de aanzienlijk grotere uitwisseling tussen Krammer en Oosterschelde resulteren dan ook slechts in beperkte mate in een vermindering van de algenbiomassa. De geringe verschillen in nutriëntengehalten worden veroorzaakt doordat het systeem dan wordt gedictieerd door de combinatie van de randconcentratie in de Oosterschelde en de nalevering van fosfaat vanuit de bodem. In het

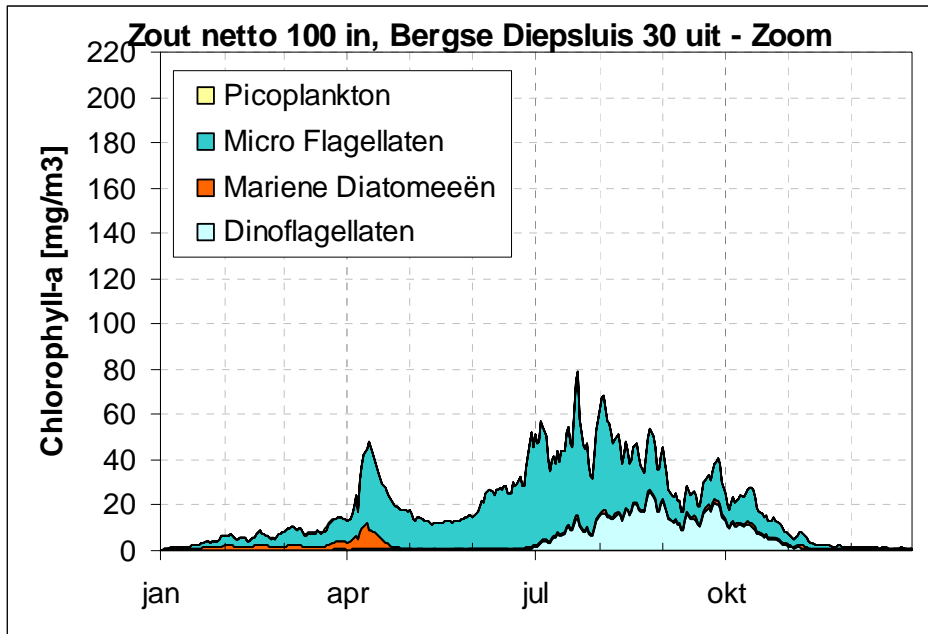
voorjaar is uiteraard nog de instroom van de Brabantse rivieren van belang. Vanwege de geringe verschillen in eindresultaten zijn hieronder alleen de resultaten met een debiet van $30 \text{ m}^3/\text{s}$ door de Oesterdam opgenomen (zie Figuur 4.23 tot en met Figuur 4.25).



Figuur 4.23a: Chlorofyl-gehalten in de zoute variant met geringe getijdendynamiek.

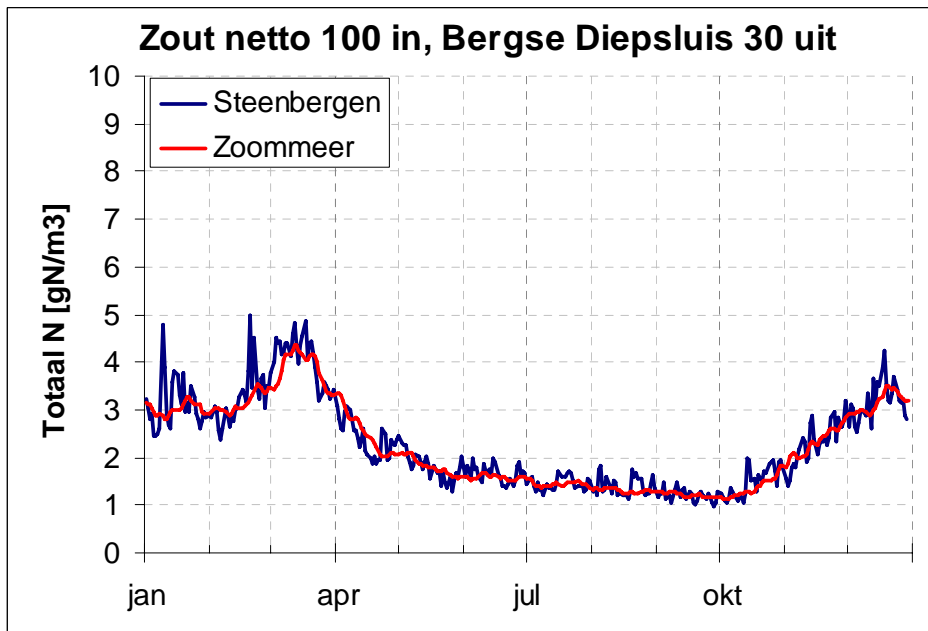


Figuur 4.23b: Algensoortensamenstelling nabij Steenbergen in de zoute variant met geringe getijdendynamiek.

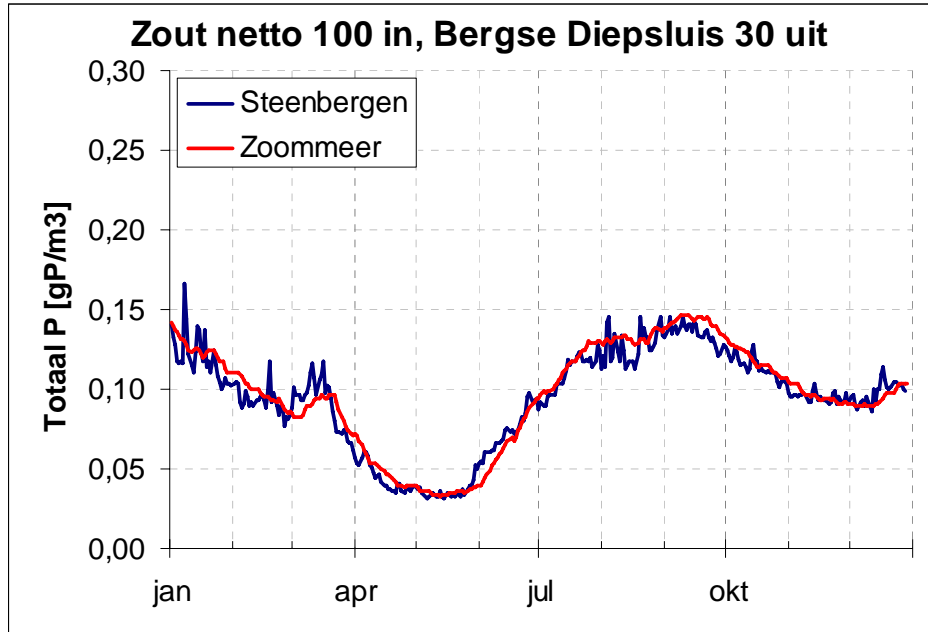


Figuur 4.23c: Algensoortensamenstelling in het Zoommeer in de zoute variant met geringe getijdendynamiek.

Voor een goed begrip van de verversingscapaciteit van het doorlaatmiddel in deze varianten, is nader onderzocht hoe groot de efficiëntie van de uitwisseling van zout water via dit doorlaatmiddel is. Op basis van de beschikbare simulaties mag geconcludeerd worden dat de efficiëntie van de uitwisseling vrij hoog is (ordegrootte 60%). Dat betekent globaal dat zo'n 60% van het water dat via het doorlaatmiddel bij vloed ingelaten wordt, voor langere tijd in het systeem blijft en niet bij de volgende getijslag weer uit het systeem spoelt.

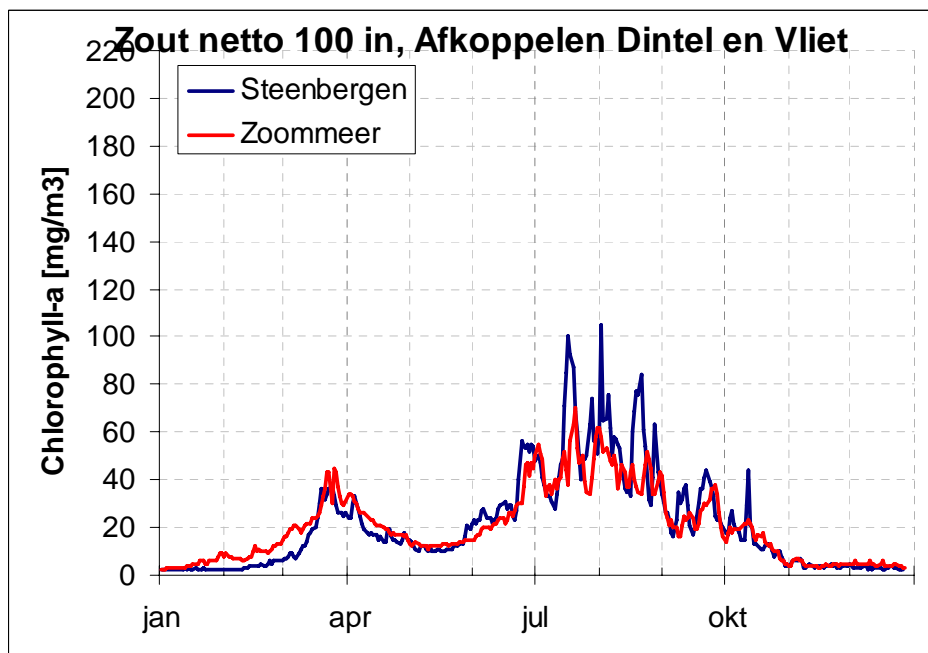


Figuur 4.24: Totaal stikstof-gehalten in de zoute variant met geringe getijdendynamiek.

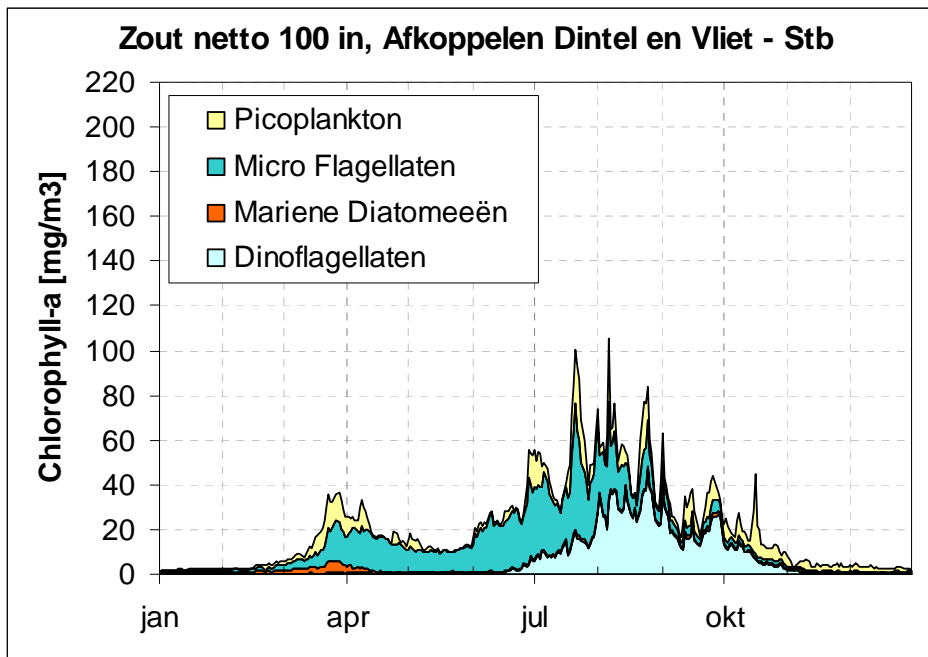


Figuur 4.25: Totaal fosfaat-gehalten in de zoute variant met geringe getijdendynamiek.

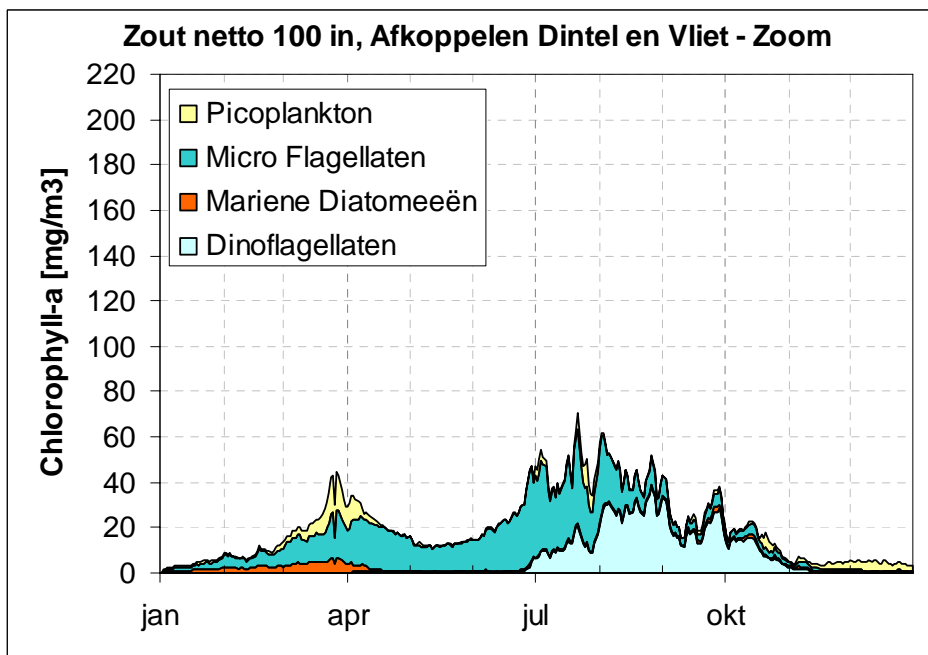
Daarnaast zijn er nog twee aanvullende zoute varianten doorgerekend waarbij de afvoer en belasting door de Brabantse rivieren wordt weggenomen (afgeleid). Bij de eerste variant is uitgegaan van de variant met verhoogde inlaat via het vergrote doorlaatmiddel in de Philipsdam. Bij de tweede variant heeft het doorlaatmiddel in de Philipsdam een capaciteit van 100 m³/s (waarvan orde 45 m³/s voor uitwisseling). Daarnaast wordt er via de Volkeraksluizen 30 m³/s aangevoerd. Deze laatste variant kan worden gezien als de zoute tegenhanger van de zoete variant die is beschreven in hoofdstuk 4.3.1. Het doel van deze zoute variant is om na te gaan wat het afkoppelen van de Brabantse rivieren zou betekenen voor het algenprobleem in een zout Volkerak-Zoommeer.



Figuur 4.26a: Chlorofyl-gehalten in de zoute variant zonder belasting via de Brabantse rivieren.



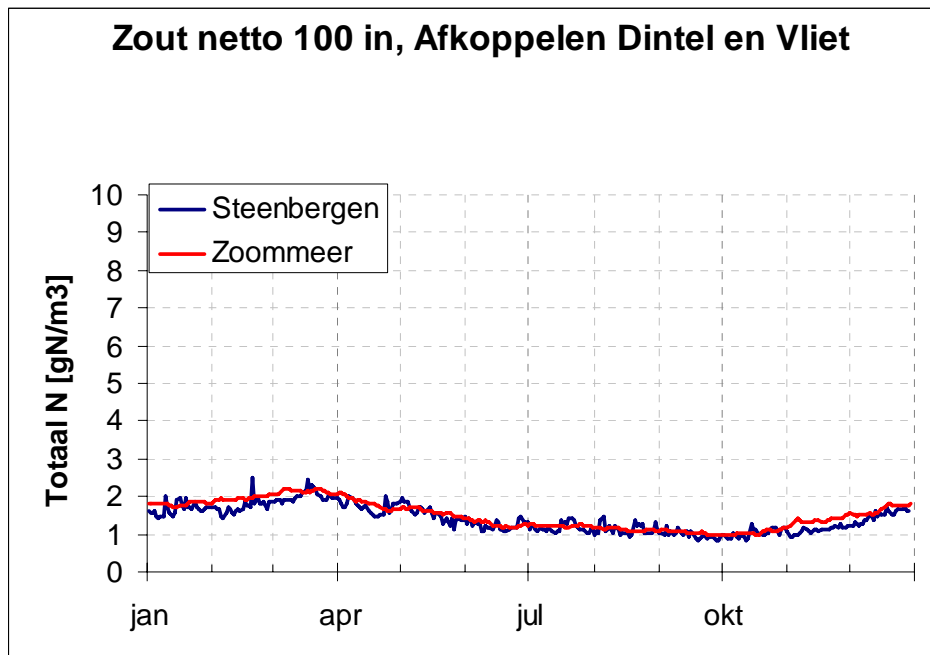
Figuur 4.26b: Algensoortensamenstelling nabij Steenberg en zonder belasting via de Brabantse rivieren.



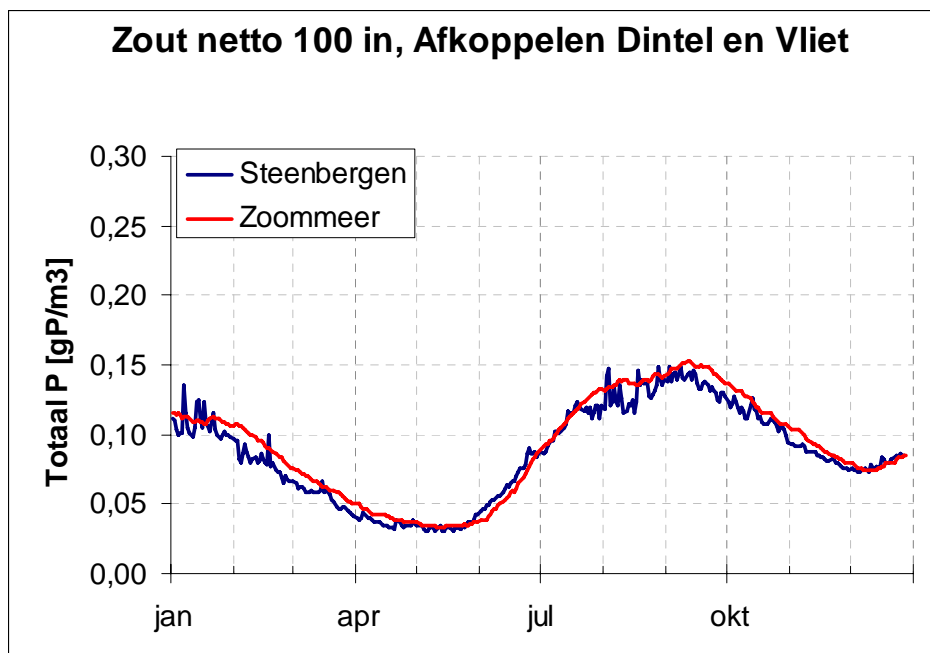
Figuur 4.26c: Algensoortensamenstelling in het Zoommeer zonder belasting via de Brabantse rivieren.

In de variant met het hoge spoeldebiet via het vergrote doorlaatmiddel loopt het chloridegehalte verder op met waarden tussen de 12.000 en 15.000 mgCl/l. Bij de nutriëntengehalten neemt vooral het stikstofgehalte in het voorjaar en zomer verder af (Figuur 4.27). Voor fosfaat is de afname iets geringer, mede door de invloed van de fosfaat bodemflux (Figuur 4.28). Door de afname van de nutriëntengehalten ontstaan er in de zomer stikstof-limitaties en is de limitatie van orthofosfaat langduriger. De resulterende chlorofylgehalten nemen slechts beperkt af. In deze ‘worst case’ benadering zonder graas door

mosselen resteert een biomassa-niveau van rond de 60 µg/l chlorofyl (Figuur 4.26) en verschilt daarmee qua algenbiomassa niveau slechts gering van de overige zoute varianten.



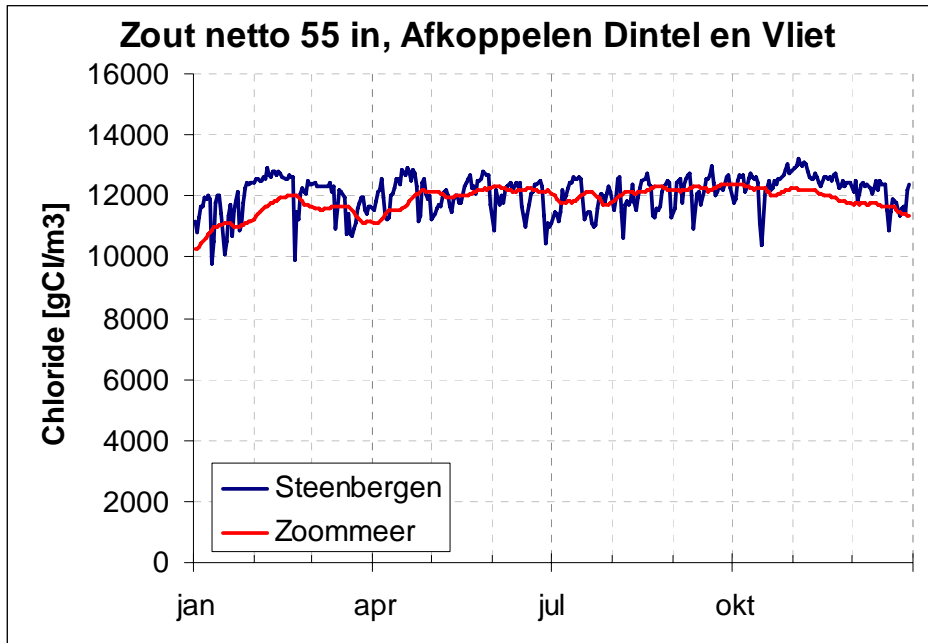
Figuur 4.27: Totaal stikstof-gehalten in de zoute variant zonder belasting via de Brabantse rivieren.



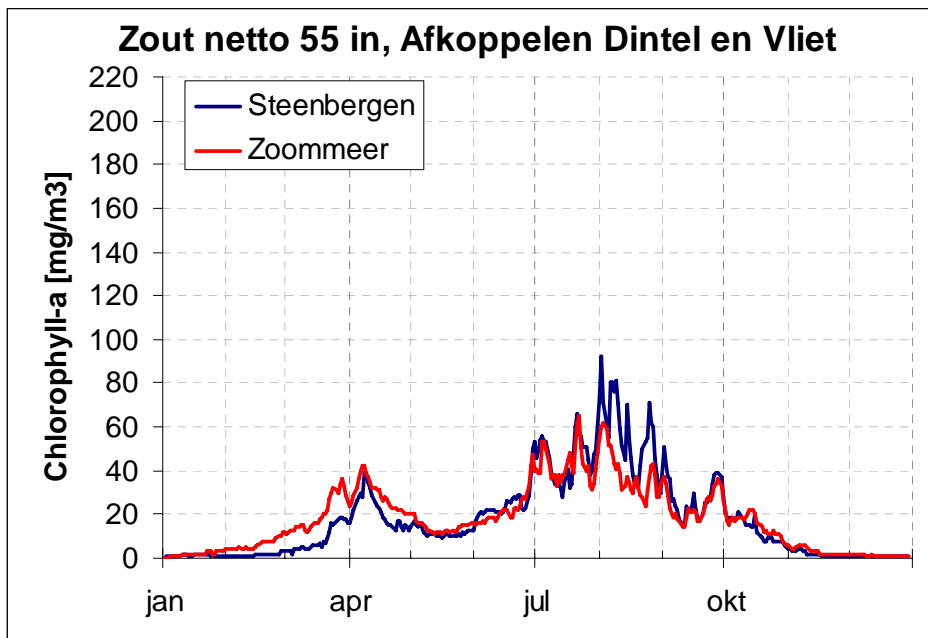
Figuur 4.28: Totaal fosfaat-gehalten in de zoute variant zonder belasting via de Brabantse rivieren.

In de zoute variant met een lager doorspoel- en uitwisselingsdebiet via het doorlaatmiddel levert het afkoppelen van de Brabantse rivieren zoals verwacht een iets lager chloridegehalte op dat varieert tussen de 10.000 en 12.000 mg/l (Figuur 4.29). Daarnaast verloopt het chloridegehalte iets constanter over het jaar door het ontbreken van de omvangrijke instroom van Brabants water in het voorjaar. Om dezelfde reden zijn de variaties in de

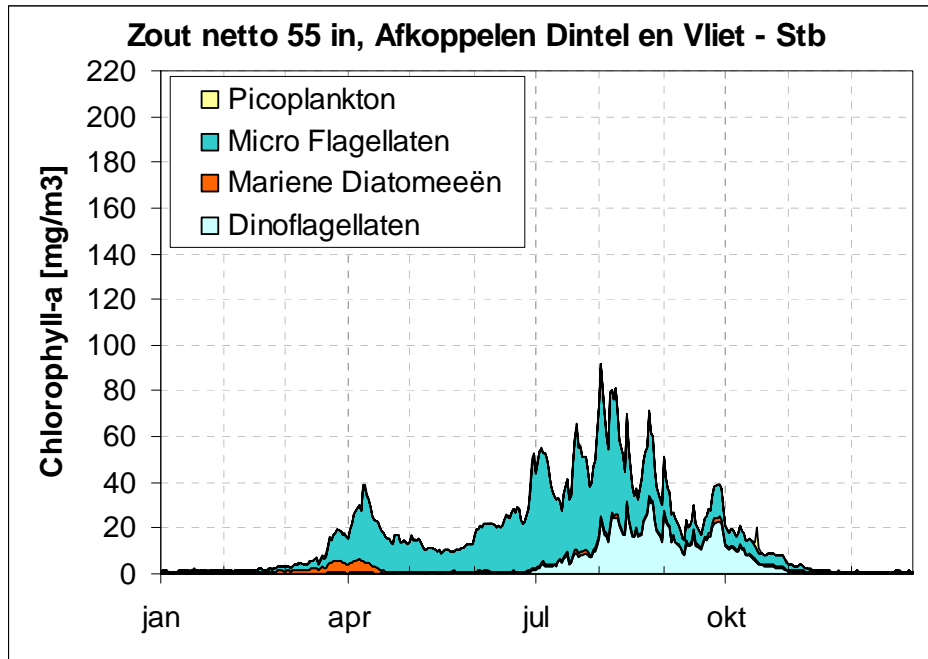
stikstof-gehalten in Figuur 4.31 geringer èn op een lager niveau. Daarentegen zijn de jaarlijkse variaties van de fosfaatgehalten iets groter, hetgeen wordt veroorzaakt door de opgelegde fosfaat bodemflux. Bij een geringere doorspoeling is het effect van deze vast opgelegde fosfaatflux groter dan bij een variant met hoge doorspoel debieten (Figuur 4.32).



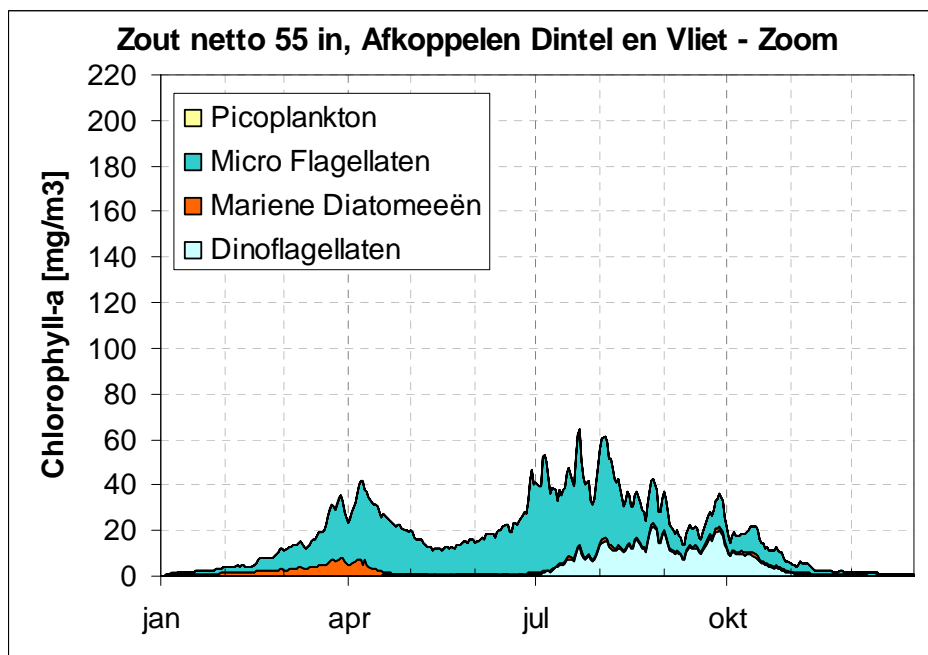
Figuur 4.29: Chloridegehalten in de gedempte zoute variant zonder belasting via de Brabantse rivieren.



Figuur 4.30a: Chlorofyl-gehalten in de gedempte zoute variant zonder belasting via de Brabantse rivieren.

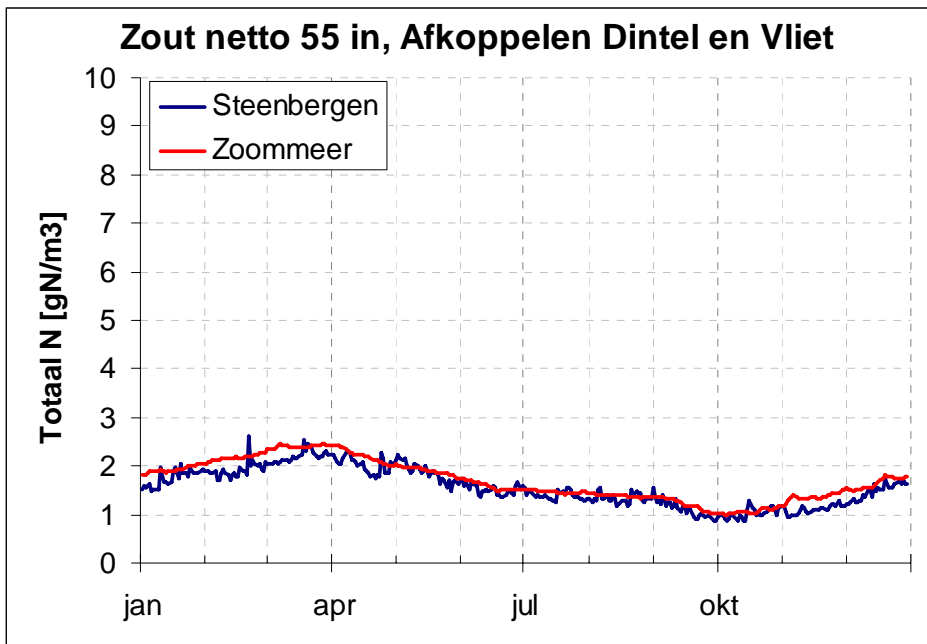


Figuur 4.30b: Algensoortensamenstelling nabij Steenberg en zonder belasting via de Brabantse rivieren.

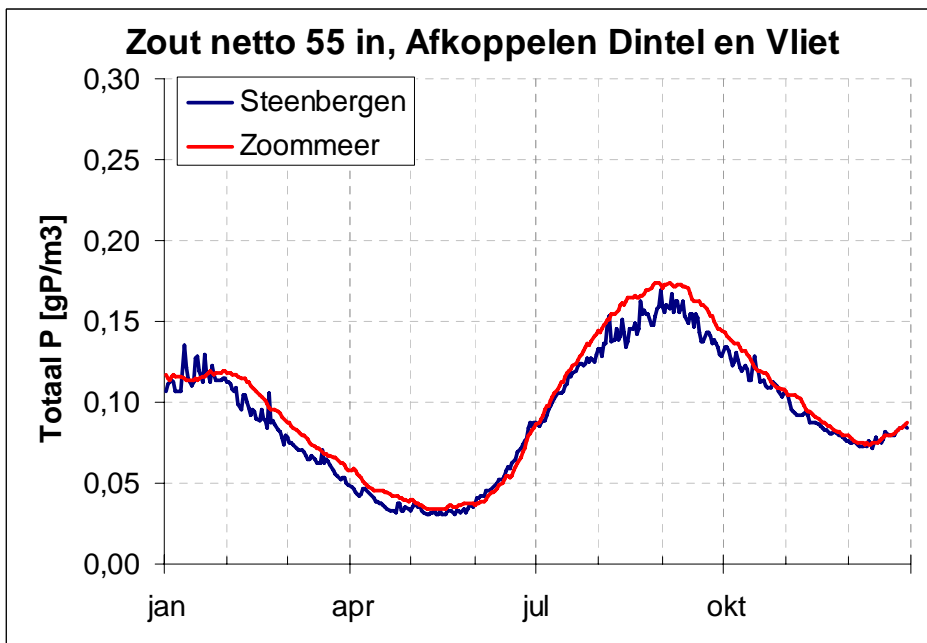


Figuur 4.30c: Algensoortensamenstelling in het Zoommeer zonder belasting via de Brabantse rivieren.

De resulterende chlorofyl-gehalten nemen (net als bij de variant met een hoog doorspoeldebiet) beperkt af. In deze ‘worst case’ benadering zonder graas door mosselen resteert een biomassa-niveau van rond de 60 $\mu\text{g/l}$ chlorofyl (Figuur 4.30) en verschilt daarmee niet significant van de overige zoute varianten. De verwachting is dat als de graas door mosselen zich na de overgangperiode eenmaal heeft ontwikkeld tot niveaus als in het huidige Veerse Meer, dat de chlorofyl gehalten dan zullen afnemen tot waarden die zeker onder de 60 $\mu\text{g/l}$ chlorofyl zullen liggen. De snelheid waarmee het graasniveau in een zoute variant zich zal ontwikkelen is echter onbekend en verdient daarom nadere aandacht.



Figuur 4.31: Totaal stikstof-gehalten in de gedempte zoute variant zonder belasting via de Brabantse rivieren.



Figuur 4.32: Totaal fosfaat-gehalten in de gedempte zoute variant zonder belasting via de Brabantse rivieren.0

5 Samenvatting en conclusies

5.1 Huidige / referentie situatie

In de huidige of referentie situatie is het Volkerak-Zoommeer een watersysteem met een relatief lange verblijftijd die kan oplopen tot 100 dagen. De bloei van algen (en blauwalgen in het bijzonder) heeft daardoor voldoende tijd om flinke biomassa's te produceren, hetgeen overschrijding van normen en klachten over stankoverlast en dergelijke tot gevolg heeft. In een dergelijke situatie is het Volkerak-Zoommeer een hoog-belast en eutroof watersysteem, waarbij de beschikbare nutriënten niet beperkend zijn voor de groei van algen. Bronreductie tot MTR-niveau heeft effect, en zal op termijn leiden tot afname van de frequentie en ernst van overlast door blauwalgen. Echter, het maximaal te bereiken effect is een halvering van de algenconcentraties.

Bronsanering door bijvoorbeeld het afkoppelen van de Brabantse rivieren (ook wel hydrologische isolatie genoemd) heeft een belangrijk positief effect op de gehalten aan nutriënten, chlorofyl en (blauw)algen. De chlorofyl-gehalten in het Zoommeer halveren daardoor in de referentiesituatie, en zal op termijn leiden tot afname van de frequentie en ernst van overlast door blauwalgen. Voor peilhandhaving en zoutbestrijding bij de Krammersluizen blijft het nodig om water vanuit het Hollands Diep in te laten, waardoor het Volkerak-Zoommeer toch weer met nutriënten wordt belast.

Neveneffect van de afkoppeling van de Brabantse rivieren is echter dat het chloridegehalte door de geringe toestroom van zoet water oploopt tot ordegrrootte 1000 mg/l, met name vanwege de lekverliezen door de Krammersluizen. Uitgaande van het waterakkoord is maximaal 450 mg/l in het Bathse Spuikanaal toegestaan. Hoewel geen berekening is gemaakt van het afkoppelen van de Brabantse rivieren in combinatie met de sanering van alle overige bronnen tot MTR-niveau, wordt daarvan weinig extra effect verwacht omdat het Hollandsch Diep de belangrijkste nutriëntenbron is die momenteel al fosfaatgehalten heeft die dicht tegen de MTR-norm aanzitten.

5.2 De zoete varianten

Bij de zoete varianten wordt de verblijftijd in het Volkerak-Zoommeer aanzienlijke verkort tot ongeveer vijf weken in het Zoommeer en drie weken in het Volkerak-Krammer. Toch hebben de (blauw)algen in een dergelijke situatie nog voldoende tijd om een aanzienlijke bloei in met name het Zoommeer te realiseren. Doorspoelen is gedeeltelijk effectief voor het Krammer-Volkerak. Het watersysteem blijft eutroof, mede door de enorme aanvoer van eutroof water vanuit het Hollandsch Diep. Daardoor zijn de beschikbare nutriënten niet beperkend voor de groei van algen en is er slechts enige vermindering van de algenbiomassa door de kortere verblijftijd.

Bronreductie, zelfs tot MTR-niveau, heeft nauwelijks effect op de omvang van de biomassa omdat de aanvoer vanuit het Hollandsch Diep en de bodemfosfaat nalevering er voor zorgen

dat nutriënten niet beperkend worden. Het aangevoerde water zorgt dus wel voor het doorspoelen van het watersysteem, maar niet voor het schoonsoelen ervan. Daarnaast is voor het doorspoelen een grote hoeveelheid zoet water uit het Hollandsch Diep nodig. Nadere analyse van de beschikbaarheid van water heeft aangetoond dat een dergelijke aanvoer tijdens de zomermaanden niet altijd mogelijk is, zeker voor de zoete variant waarbij 150 m³/s water vanuit het Hollandsch Diep wordt aangevoerd. Zoet doorspoelen is daarmee riskant, want doorspoelen laadt het meer op met nutriënten en als vervolgens bij lage rivierafvoer het doorspoelen moet worden vermindert of gestopt kan zich direct een grote blauwalgenbloei ontwikkelen. De vermindering van de verblijftijd in de zoete varianten biedt onvoldoende perspectief voor het daadwerkelijk oplossen van het overlast door blauwalgen in het Zoommeer.

5.3 De zoute varianten

Omdat het watersysteem wordt doorspoeld met zout(er) water vanuit de Oosterschelde, ontstaat een vrij zout watersysteem waarin blauwalgen niet meer kunnen groeien. Zout doorspoelen is gegarandeerd effectief voor de bestrijding van blauwalgen. Er zullen mariene algensoorten gaan voorkomen, die voldoende tijd en nutriënten krijgen om te groeien. Het blauwalgen probleem wordt dus effectief opgelost, al blijft de primaire productie (fytoplankton productiviteit) op een vrij hoog niveau vanwege de beschikbare nutriënten. Net als bij de zoete variant wordt de verblijftijd in het Volkerak-Zoommeer in de zoute varianten aanzienlijk verkort tot ruwweg vijf weken of minder. Naar verwachting vermindert de algenbiomassa in een dergelijke situatie. De benodigde nutriënten worden vooral vanuit de Brabantse rivieren en het Hollandsch Diep aangevoerd. Bronreductie werkt ook in deze variant niet voldoende om tot een drastische beperking van de algen groei en biomassa te komen.

In de ondiepe delen van het Volkerak-Zoommeer zal zich zeesla (*Ulva*) ontwikkelen, hetgeen naar verwachting niet tot omvangrijke problemen zal leiden. Zeegras zal naar verwachting niet voorkomen vanwege de eutrofe omstandigheden.

In de werkelijkheid zal de graas door met name mosselen zorgen voor een aanzienlijke reductie van de mariene algen. Uitgaande van de graas die optreedt in het Veerse Meer, zullen de chlorofyl-gehalten dalen tot zeer acceptabele waarden onder de 50 µg/l. Het valt echter moeilijk in te schatten hoe lang de periode zal duren om van het huidige zoete watersysteem te komen tot een volwaardig zout of brak watersysteem waarin de graas door mosselen voldoende is ontwikkeld.

Er zijn ook een aantal aanvullende zoute varianten onderzocht met een grotere (maar nog steeds geringe) getijdendynamiek. Bij deze dynamiek vindt een grotere uitwisseling plaats tussen het Volkerak-Zoommeer en de Oosterschelde en zal de daarmee gepaard gaande peilfluctuatie hooguit centimeters af kunnen wijken van de onder- en bovengrens van de waterstanden volgens het interim peilbesluit. Naar verwachting veranderen de niveaus aan nutriënten, chlorofyl en mariene algensoorten door zo'n zwak getijdenregime nauwelijks.

Concluderend kan gesteld worden dat iedere zoute variant het blauwalgenprobleem effectief oplost. De daarbij optredende biomassa-niveau's van mariene algensoorten liggen naar verwachting onder de 50 µg/l chlorofyl, zeker nadat graas door met name mosselen voldoende is ontwikkeld. De duur van deze overgangperiode is onbekend, maar omvat

wellicht 1 tot 2 jaar. Afkoppelen van de belasting via de Brabantse rivieren heeft een positief effect op de optredende nutriëntengehalten, maar levert weinig op in termen van een aanvullende vermindering aan biomassa van mariene algensoorten.

De sleutel tot verdere verbetering van de situatie is het verlagen van de stikstofconcentraties. Dat kan door bronsanering van de belasting via de Brabantse rivieren tot MTR-niveau, bij voorkeur in combinatie met een zo groot mogelijk netto doorspoeldebiet van zout water. Specifiek voor het Zoommeer is een aanmerkelijke verbetering mogelijk door niet alleen water te spuien via de Bergse Diepsluis, maar er ook water uit te wisselen met de Oosterschelde via een doorlaatmiddel in de Oesterdam. Daarmee worden naast het Zoommeer ook in de kom van de Oosterschelde gunstiger condities gecreëerd voor ecosysteemontwikkeling (productiviteit, draagkracht, zeegras, etc.), zoals aan de Oosterscheldezijde van het doorlaatmiddel in de Philipsdam.

5.4 Conclusies

De waterkwaliteit van het Volkerak-Krammer-Zoommeer watersysteem wordt bepaald door:

- De hydrodynamica (via de verblijftijd / verversingstijd);
- Het chloridegehalte en de daardoor eventueel optredende gelaagdheid;
- De belasting door nutriënten die via de randen (Rijn & Maas, Brabantse rivieren, Oosterschelde) het watersysteem binnenkomt;
- De invloed van de bodem (nalevering van bodemfosfaat en effect van zout hierop);
- De invloed van biota (graas door mosselen, oesters, etc.).

Op basis van de modelsimulaties met als uitgangspunt de situatie in het jaar 2000 kan worden geconcludeerd dat het blauwalgen probleem in een **zoet** watersysteem kan worden verminderd door de reductie van de nutriëntenbelasting of door een drastische verkorting van de verblijftijd (of beide), maar dat het blauwalgen probleem niet kan worden opgelost.

Een effectieve verkorting van de verblijftijd vergt echter de aanvoer van dermate veel water, dat deze oplossing in de praktijk niet uitvoerbaar is. Uit de beschouwde zoete doorspoel scenario's blijkt grofweg een halvering van de blauwalgen gehalten in het Zoommeer haalbaar. Een reductie van de belasting is daarentegen ook lastig te realiseren, en bovendien kostbaar en tijdrovend. Gezien de eigenschap van de blauwalg *Microcystis* om zelfs bij relatief nutriënt-arme omstandigheden in zeer korte tijd een aanzienlijke bloei te realiseren, moet gevreesd worden dat bij iedere haalbare zoete variant rekening moet worden gehouden met een blauwalgenprobleem. Deze eigenschap van *Microcystis* werd in de extreem warme maand juli 2006 in diverse nutriënt-arme watersystemen in Nederland zichtbaar. Alleen onder rivier-achtige omstandigheden is er in zoet water de garantie dat blauwalgen niet tot bloei kunnen komen.

Tenslotte wordt opgemerkt dat een overgangperiode naar een nutriënt-arme situatie door de nalevering van bodemfosfaat de nodige jaren kan duren. Een nutriënt-arme situatie kan overigens worden bereikt door zowel hydrologische isolatie van het watersysteem waarbij er geen lozingen of afwatering plaatsvinden (stagnant watersysteem met een hoge verblijftijd en een lage nutriëntenbelasting) of middels doorspoelen met nutriënt-arm water vanuit een naburig watersysteem. Helaas is zo'n watersysteem niet voorhanden.

Als wordt gekozen voor een **zout** watersysteem met voldoende hoge chloridegehalten dan kunnen er geen blauwalgen meer tot bloei komen en is het blauwalgenprobleem opgelost. Simulaties geven aan dat in een zout milieu nog steeds een redelijke biomassa van mariene algen kan ontstaan als er geen graas door bijvoorbeeld mosselen is. Als zich na een aantal jaren mosselen in dit zoute watersysteem hebben gevestigd, dan zal graas door mosselen van een omvang zoals die momenteel in het Veerse Meer optreedt zorgen voor chlorofyl gehalten van minder dan 50 µg/l. Omvangrijke problemen met zeesla worden niet verwacht. Daarnaast wordt er vanwege de eutrofe omstandigheden geen zee gras verwacht (uitkomst van een recente workshop over zee gras in het Volkerak-Krammer-Zoommeer). Verdere optimalisatie van het zoute alternatief is mogelijk door directe uitwisseling tussen Zoommeer en Oosterschelde via een doorlaatmiddel in de Oesterdam.

6 Literatuur

Breukers C. P. M., E. M. van Dam en S. A. de Jong. 1997. Lake Volkerak-Zoom: A lake shifting from the clear to the turbid state. *Hydrobiologia* **342**:367-376.

Duin, Elisabeth H.S. van, Gerard Blom, F. Johannes Los, Robert Maffione, Richard Zimmerman, Carl F. Cerco, Mark Dorth, and Elly P.H. Best, Modelling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth, *Hydrobiologia*, 444, 2001, pp. 25-42.

Falconer I., J. Bartram, I. Chorus, T. Kuiper-Goodman, H. Utkilen, M. Burch and G. A. Codd. 1999. Chapter 5. Safe levels and safe practice. In: Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management. Chorus I. and Bartram J. (Eds.). Taylor & Francis Group.

Gill A. E. 1982. Atmosphere-Ocean dynamics, International Geophysics Series, Vol 30, Academic Press.

Haas H. A. en M. Tosserams. 2001. Balanceren tussen zoet en zout. Ruimte voor veerkracht en veiligheid in de Delta. Rapport RIKZ/2001.18, Rapport RIZA/2001.014.

Hilton J. 1985. A conceptual framework for predicting the occurrence of sediment focusing and sediment redistribution in small lakes. *Limnology and Oceanography* **30**:1131-1143.

Huisman J., J. Sharples, J. M. Stroom, P. M. Visser, W. E. A. Kardinaal, J. M. H. Verspagen and B. Sommeijer. 2004. Changes in turbulent mixing shift competition for light between phytoplankton species. *Ecology* **8**: 2960-2970.

Huisman, J., H. C. P. Matthijs, and P. M. Visser, eds. 2005. Harmful Cyanobacteria. Springer, Berlin, Germany.

Ibelings, Bas W., Marijke Vonk, Hans F.J. Los and Diederik T. v.d. Molen and Wolf M. Mooij, Fuzzy modelling of Cyanobacterial waterblooms, validation with NOAA-AVHRR satellite images, *Ecological Applications*, 13(5), 2003, pp. 1456-1472.

Kouer R. M. & A. Griffioen 2003. Water- en stoffenbalans Volkerak-Zoommeer; microverontreinigingen en nutriënten 1996 – 2000. RIZA werkdocument 2003.204X, Lelystad.

Lane A. 1989. The heat balance of the North Sea, Proudman Oceanographic Laboratory, Report No. 8.

Lieverse P. 2002. WAQUA-model Volkerak-Zoommeer 2002 – presentatie 2DH waterbewegingsmodel voor het Volkerak-Zoommeer. Rijkswaterstaat, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directie Zeeland, Middelburg.

Los, F.J., 1991. Mathematical Simulation of algae blooms by the model BLOOM II, Version 2, T68, WL | Delft Hydraulics Report.

Los, F.J., M.T. Villars and M.R.L. Ouboter. Model Validation Study DBS in networks. WL | Delft Hydraulics, Research Report, T1210, 1994.

Los, F.J., and J. Passarge, Impact of the size of the innoculum on summer levels of *Microcystis* in Lake Volkerak - Zoom. WL | Delft Hydraulics report, T2208, October 1998.

Los, Hans and Sharon Tatman, 2001, Description and modelrepresentation T0 situation, Part 2: Transport, nutrients and primary production. Perceel 3, Deelproduct 2, project Z3030.10, MARE consortium. Prepared for the Flyland project.

Los, F.J., 2005. An algal biomass prediction model. In: Louks, D.P. and Van Beek, E. (Eds.), Water Resources Systems Planning and Management - an introduction to methods, models and applications. UNESCO.

Los, F.J. and J.W.M. Wijsman, Application of a validated primary production model (BLOOM) as a screening tool for marine, coastal and transitional waters. Journal of Marine Systems, accepted.

Los, F.J., M.T. Villars and M.W.M. van der Tol, A 3-dimensional primary production model (BLOOM/GEM) and its applications to the (southern) North Sea (coupled physical-chemical-ecological model). Journal of Marine Systems, submitted.

Michielsen, B.F., F.J. Los and D.T. van der Molen, Modelling van eutrofiëring: toepassing op het beheer van het Veluwemeer van DELWAQ-BLOOM-SWITCH, H2O, Vol. 29, No. 12, 1996, pp. 361-364 (in Dutch).

Molen, D.T. van der, F.J. Los, L. van Ballegooijen, M.P. van der Vat. Mathematical modelling as a tool for management in eutrophication control of shallow lakes. Hydrobiologia, Vol. 275/276, 1994, pp. 479-492.

Musters G. (2004). Verzilting van het Volkerak-Zoommeer. Analyse van doorspoelscenario's, stofstromen en eutrofiëringrisico's. G. Musters. Werkdocument RIKZ/OS/2004.828.x. Juni 2004.

Nehring S. 1996. Recruitment of planktonic dinoflagellates: importance of benthic resting stages and resuspension events. Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie **81**:513-527.

NIOO/CEMO. 1993. MOSES: Model of the Scheldt estuary. Report of NIOO/CEMO. Yerseke, The Netherlands.

Peperzak L. 2003. Effect van chlorideconcentratie op de groei van vier cyanobacteriën. Werkdocument RWS/RIKZ.

Rengefors K., S. Gustafsson and A. Ståhl-Delbanco. 2004. Factors regulating the recruitment of cyanobacterial and eukaryotic phytoplankton from littoral and profundal sediments. Aquatic Microbial Ecology **36**:213-226.

Rip, Winnie J., Maarten Ouboter, Hans J. Los, Impact of climatic fluctuations on Characeae biomass in a shallow, restored lake in The Netherlands, Hydrobiologia, accepted.

Vat M. P. van der en D. T. van der Molen. 1996. CONVER, Balansprogramma voor oppervlaktewatersystemen, Gebruikershandleiding, versie 2.00, juni 1996. Waterloopkundig Laboratorium, Delft en RIZA, Lelystad.

Verspagen, J. M. H., E. O. F. M. Snelder, P. M. Visser, J. Huisman, L. R. Mur, and B. W. Ibelings. 2004. Recruitment of benthic *Microcystis* (Cyanophyceae) to the water column: internal buoyancy changes or resuspension? *Journal of Phycology* **40**:260-270.

Verspagen, J. M. H., E. O. F. M. Snelder, P. M. Visser, K. D. Jöhnk, B. W. Ibelings, L. R. Mur, and J. Huisman. 2005a. Benthic-pelagic coupling in the population dynamics of the harmful cyanobacterium *Microcystis*. *Freshwater Biology* **50**: 854-867.

Verspagen J. M. H., H. J. Laanbroek, J. Huisman en P. Boers. 2005b. Doorspoelen of opzouten? Bestrijding van blauwalgen in het Volkerak-Zoommeer. Rapport in opdracht van Rijkswaterstaatsdirectie Zeeland.

Verspagen J. M. H., J. Passarge, K. D. Jöhnk, P. M. Visser, L. Peperzak, P. Boers, H. J. Laanbroek and J. Huisman. 2006. Water management strategies against toxic *Microcystis* blooms in the Dutch delta. *Ecological Applications* **16**: 313-327.

WHO-website. http://www.who.int/docstore/water_sanitation_health/bathwater/ch13.htm.

WL | Delft Hydraulics (2005a). Ontwikkeling 1-D Stofstromenmodel Noordelijk en Zuidelijk Deltabekken en 2-D Blauwalgenmodel Volkerak Zoommeer. Deltabreed rapportage. Boderie, Kuijper, Icke, Meijers (WL | Delft Hydraulics), en Verspagen en Huisman (UvA). December 2005.

WL | Delft Hydraulics (2005b). Delft3D-WAQ: detailed description of processes. Technical Reference Manual. September 2005.

