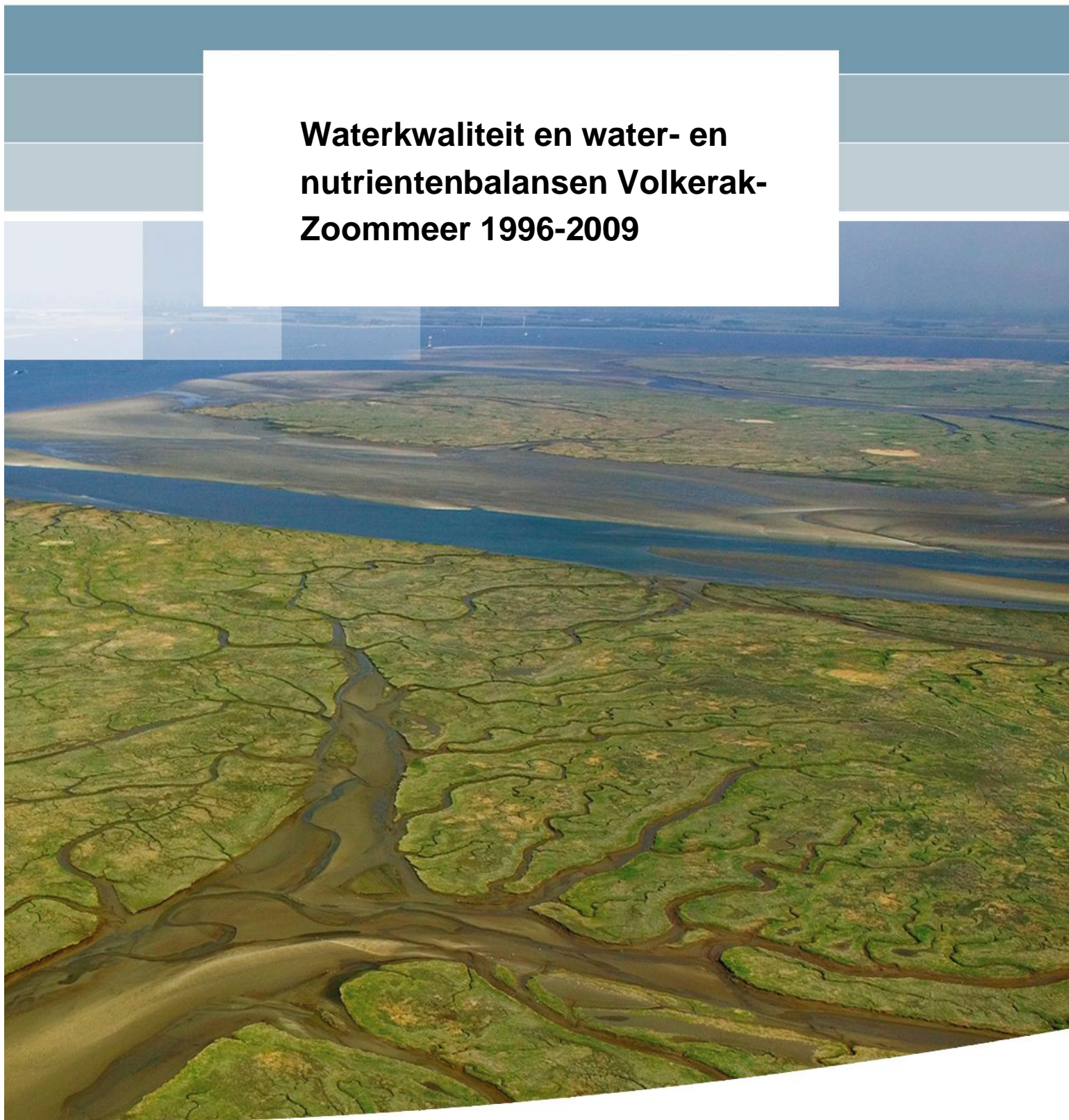


**Waterkwaliteit en water- en
nutrientenbalansen Volkerak-
Zoommeer 1996-2009**



**Waterkwaliteit en water- en
nutrientenbalansen Volkerak-
Zoommeer 1996-2009**

Ies de Vries
Johannes Smits
Arno Nolte
Chris Sprengers

1203266-000

Titel

Waterkwaliteit en water- en nutriëntenbalansen Volkerak-Zoommeer 1996-2009

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Waterdienst RWS-Zeeland	1203266-000	1203266-000-VEB-0003	65

Titel

Waterkwaliteit en water- en nutriëntenbalansen Volkerak-Zoommeer 1996-2009Opdrachtgever

Waterdienst

RWS-ZeelandProject

1203266-000Kenmerk

1203266-000-VEB-0003Pagina's

65

Trefwoorden

Volkerak-Zoommeer, waterkwaliteit, nutriënten, zoutgehalte, waterbalans, nutriëntenbalans, blauwalgen, eutroof, oligotroof

Samenvatting

Dit rapport analyseert de waterkwaliteit en de blauwalgoverlast van het huidige zoete Volkerak-Zoommeer (VZM). De volgende vraag staat centraal: Wordt de recente verbetering van de waterkwaliteit veroorzaakt door minder aanvoer van nutriënten (externe belasting) of door processen in het Volkerak-Zoommeer zelf (interne belasting en andere ecosysteemprocessen)? De gehalten van de nutriënten stikstof en fosfaat vertonen een lichte daling vanaf 2000 - 2004. Na het ontstaan van het VZM in 1987 is de algenconcentratie (chlorofyl) en daardoor de troebelheid sterk toegenomen (0,5 m doorzicht). Vanaf 2005 is de algenconcentratie veel lager en wordt het water helder (2 m doorzicht). De zoetwateraanvoer naar het VZM van jaargemiddeld 25 m³/s is voor de helft afkomstig uit Brabant (afvoeren van Dintel en Steenbergse Vliet). In de zomer is deze natuurlijke aanvoer vanuit Brabant veel lager en wordt er, ten behoeve van peilbeheer en doorspoeling, extra water vanuit het Hollandsch Diep ingelaten. Met de zoetwateraanvoer worden nutriënten aangevoerd. Omgerekend naar hectares wateroppervlak is de jaarlijkse 'mestgift' aan het Krammer-Volkerak bijna 1000 kg stikstof per hectare en 25 kg fosfaat per hectare. De stikstofconcentratie in het VZM wordt geheel bepaald door de externe belasting en door denitrificatie, waardoor 50% van de externe belasting uit het systeem wordt verwijderd. De fosfaatconcentratie wordt naast de externe belasting, ook bepaald door bodemnalevering in de zomer (interne belasting). Deze bodemnalevering is in de recente jaren met 75% afgenomen, van 60% naar 20% van de externe belasting. De waterkwaliteit van het VZM verbetert sinds 2005: er zijn minder algen, de helderheid van het water neemt toe en blauwalgoverlast komt minder vaak voor. Waarschijnlijk is deze verbetering in gang gezet door de afgenomen fosfaatvrachten vanuit Brabant. De lagere externe fosfaatbelasting kan de verbetering slechts ten dele verklaren. De lage algengehaltes, en daardoor de toenemende helderheid worden waarschijnlijk vooral veroorzaakt door 'graascontrole' door driehoeksmosselen (de gewone driehoeksmossel en/of de quagga mossel). En deze gunstige toestand wordt in stand gehouden en versterkt door een systeemrespons van vastlegging van fosfaat in de bodem, waardoor de interne fosfaatbelasting en daarmee het fosfaatgehalte verder afneemt. Overigens is met de recente kwaliteitsverbetering het risico van blauwalgoverlast niet (direct) verdwenen. Nader onderzoek en systeemmonitoring naar (1) fosfaatspeciatie en seizoensgedrag van fosfaat in de waterbodem en (2) de aanwezigheid van driehoeksmosselen zijn nodig om de hypothese te toetsen en om vervolgens een toekomstverwachting te kunnen formuleren.

Referenties

--

Deltares

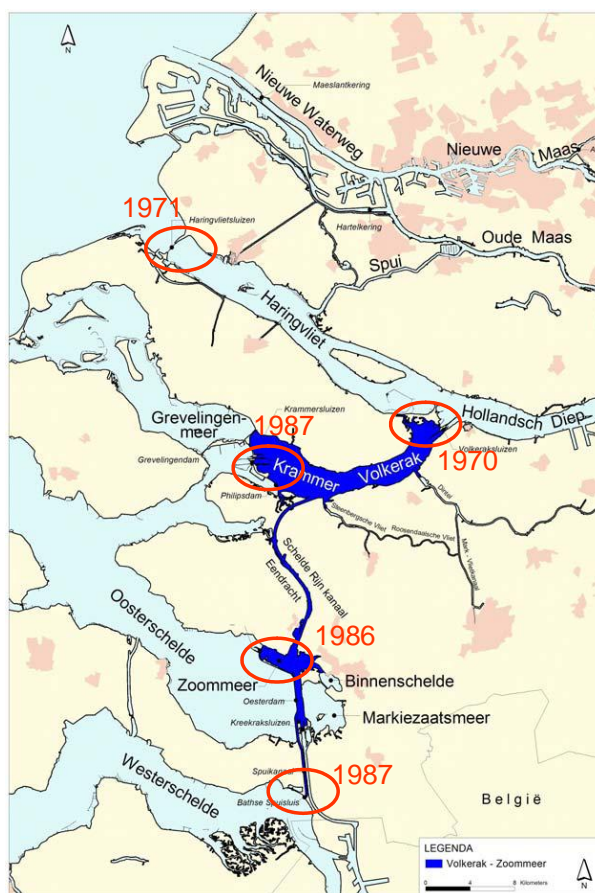
Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	juli 2011	Ies de Vries		Jos van Gils		Ipo Ritsema	

Status
definitief

Samenvatting

Inleiding

Dit rapport analyseert de waterkwaliteit en de blauwalgoverlast van het huidige zoete Volkerak-Zoommeer (VZM). De volgende vraag staat centraal: Wordt de recente verbetering van de waterkwaliteit (toegenomen helderheid, lagere algenconcentraties) veroorzaakt door minder aanvoer van nutriënten (externe belasting) of door processen in het Volkerak-Zoommeer zelf (interne belasting en andere ecosysteemprocessen)?



Het zoete Volkerak-Zoommeer bestaat nu bijna 25 jaar en is ontstaan door de Deltawerken: afscheiding van Hollandsch Diep en Haringvliet door de Volkerakdam met spui- en schutsluizen (1970) en afscheiding van de Oosterschelde door de Philipsdam en Oosterdam (1986-1987). Het Krammer-Volkerak en het Zoommeer zijn verbonden door de Eendracht, als onderdeel van de Rijn-Schelde vaarverbinding tussen de havens van Rotterdam en Antwerpen.

Waterkwaliteit

De waterkwaliteit van het meer wordt gekenmerkt door een enorme relatieve overmaat aan stikstof ten opzichte van fosfaat vergeleken met de verhouding waarin deze nutriënten door algen worden opgenomen. De gehalten van beide nutriënten vertonen een lichte daling, stikstof vanaf 2000 en fosfaat vanaf 2004. Na de afsluiting is de algenconcentratie (chlorofyl) gaandeweg sterk toegenomen, en is het doorzicht,

de helderheid van het water, afgenomen (tot 0,5 m doorzicht). Vanaf 2005 en vooral in de laatste twee jaren 2008 en 2009 is de algenconcentratie veel lager en neemt de helderheid weer toe (2 m doorzicht). Een andere recente verandering betreft het zoutgehalte. De chlorideconcentratie in het VZM is na 2003 en vooral na 2007, ook in hydrologisch normale jaren, zomers 100-150 mg/l hoger dan daarvoor; er is blijkbaar recent sprake van een grotere zoutlekkage in/naar het VZM.

Water- en nutriëntenbalansen

De zoetwateraanvoer naar het VZM van jaargemiddeld $25 \text{ m}^3/\text{s}$ is voor de helft afkomstig uit Brabant (afvoeren van Dintel en Steenbergse Vliet). In de zomer is deze natuurlijke aanvoer vanuit Brabant veel lager en wordt er, ten behoeve van peilbeheer en doorspoeling, extra water vanuit het Hollandsch Diep ingelaten (gemiddeld ruim $17 \text{ m}^3/\text{s}$, oplopend tot $30 \text{ m}^3/\text{s}$ in droge periodes tot zelfs $50 \text{ m}^3/\text{s}$ na de extreme droogte in het voorjaar van 2011). Op grond van de restterm van de waterbalans wordt de zomergemiddelde polderwateruitslag geschat op bijna $5 \text{ m}^3/\text{s}$. De bijdrage van directe neerslag en verdamping op/vanuit het VZM aan de waterbalans is kleiner dan 10%. De waterverblijftijd (verversingstijd) van het Krammer-Volkerak is gemiddeld 140 dagen, van het Zoommeer 70 dagen.

Met de zoetwateraanvoer worden nutriënten aangevoerd. Omgerekend naar hectares wateroppervlak is de jaarlijkse 'mestgift' aan het Krammer-Volkerak bijna 1000 kg stikstof per hectare en 25 kg fosfaat per hectare. De stikstofvracht is voor het overgrote deel afkomstig uit Brabant (84%) en varieert sterk tussen natte (hoog) en droge (laag) jaren en tussen winter (hoog) en zomer (laag). Ook de externe fosfaatbelasting is grotendeels afkomstig uit Brabant, maar de aanvoer vanuit het Hollandsch Diep is relatief groter (25 %) en de verschillen tussen natte en droge jaren en tussen winter en zomer zijn kleiner.

Modelresultaten

Met een balansmodel is geanalyseerd (1) in hoeverre de externe aanvoer van nutriënten de waargenomen concentraties in het Krammer-Volkerak kan verklaren (conservatieve stofberekening), (2) welke interne processen (bron- en puttermen, interne belasting en 'retentie') minimaal nodig zijn om het verschil tussen conservatieve en gemeten concentratie op te vullen en (3) in hoeverre de waargenomen trends in de gemeten concentraties (waterkwaliteitsverbetering) worden veroorzaakt door veranderingen in externe belasting dan wel interne belasting (of retentie).

Voor stikstof geeft het balansmodel een consistent beeld dat alle waargenomen jaartrends en seizoensvariaties nagenoeg exact, volledig en gedetailleerd kan verklaren:

1. gemeten debiet-concentratie- en debiet-vrachtrelaties kunnen gemeten concentraties in het VZM volledig verklaren, zowel de verschillen en trends in jaargemiddelde concentraties als de (zeer geringe) trends in de gemiddelde seizoensvariatie.
2. vrachten, concentraties en de permanente 'verdwijning' van stikstof uit het VZM zijn in de recente jaren (2005-2009) een kleine 20% lager dan in 2000-2004 en 30-40% lager dan in 1996-1999.
3. Dit verschil wordt voor een belangrijk deel veroorzaakt door het weer, dus variatie ten gevolge van natte en droge jaren, en verder door de dalende concentraties in de aanvoerende debieten, vooral vanuit Brabant.
4. de stikstofconcentratie in het VZM wordt geheel bepaald door de externe belasting en door denitrificatie, waardoor 50% van de externe belasting uit het systeem wordt verwijderd.

Voor fosfaat is het beeld minder consistent, zijn de mogelijke verklaringen minder volledig en vooral ook ingewikkelder en verschillend van stikstof:

1. er is geen debiet-concentratie relatie in de aanvoerende debieten, en de vracht-debiet relatie kan noch de variatie van de jaargemiddelde concentraties in het VZM, noch de (sterke trends in de) gemiddelde seizoensvariatie verklaren

2. waargenomen verschillen en trends kunnen niet worden gerelateerd aan de variatie ten gevolge van natte en droge jaren, en wel grotendeels aan de dalende concentraties in de aanvoerende debieten, vóór 2000 het Hollandsch Diep en ná 2003 Brabant
3. De concentratiedaling van orthoP na 2004 (34%) is sterker dan de vrachtvermindering (16%). Om dit te verklaren 'moet' worden verondersteld dat de interne belasting (bodemmobilisatie) in de recente jaren met 75% is afgenomen. De interne belasting bestaat geheel uit (bodemmobilisatie van) orthofosfaat
4. Een flink deel van de externe aanvoer (30% voor orthoP en 40% voor totP) 'verdwijnt' permanent uit het systeem. Deze putterm moet voor het overgrote deel (80%) bestaan uit sedimentatie van AAP (anorganisch geadsorbeerd P).
5. een deel van de waargenomen trends en variaties blijft onbeschreven en dus onverklaard

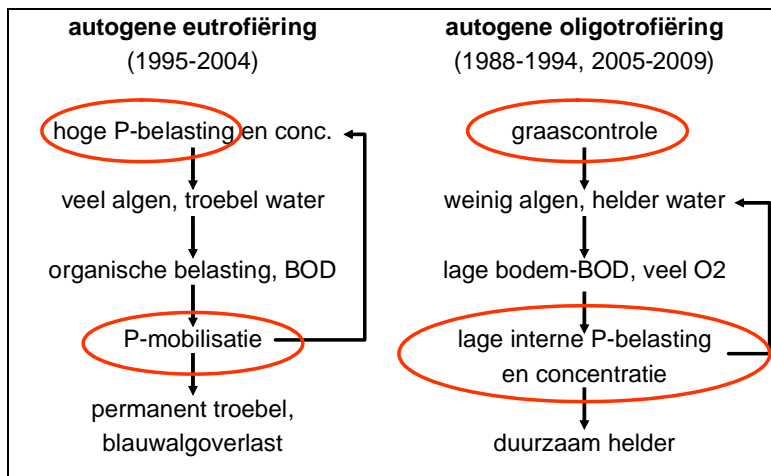
Het 2D waterkwaliteits- en ecologisch model van het VZM dat voor de planstudie waterkwaliteit VZM is opgezet en toegepast voor het referentiejaar 2000, is met de uitkomsten van het balansmodel opnieuw toegepast voor de periode 2004-2009 ("aangepaste referentie").

Met deze voorlopige en ongekalibreerde toepassing wordt voor stikstof het consistente beeld bevestigd. De concentratie in het VZM reageert proportioneel op de lagere externe belasting. De concentratie blijft echter hoog en is (in het model) nooit limiterend voor de algenproductie. Stikstof is in het model dus niet sturend voor het systeemgedrag, in casu de algenontwikkeling.

Voor fosfaat kan het algemene beeld van een geringe afname van de winterconcentratie en een sterke afname van de nazomerconcentratie door het model worden gereproduceerd, wanneer de 75% afname van de interne belasting in het model wordt doorgevoerd. Er blijft echter een duidelijk verschil tussen model en werkelijkheid: afnemende externe en interne belasting van fosfaat zou een afname van een fosfaatgelimiteerde algenconcentratie met 30% kunnen verklaren, de waargenomen algenafname is twee keer zo sterk en wordt niet veroorzaakt door fosfaat- (of stikstof) limitatie. Dit verschil kan (alleen) worden verklaard door aan te nemen dat de algen worden 'begrasd' door zoöplankton (watervlooien) of schelpdieren (driehoeksmosselen).

Verklarende hypothesen systeemgedrag

Het geheel van waarnemingen en daarvoor genoemde verklaringen duiden op een opeenvolging van in zichzelf stabiele systeemtoestanden, die vrij plotseling kunnen omklappen naar een andere toestand: van helder naar troebel en weer terug naar helder. Deze alternatieve toestanden lijken ook zelf-genererend te zijn, ze houden zichzelf in stand door positieve terugkoppelingen in de oorzaak-gevolg relaties. In de figuur zijn de, vooralsnog hypothetische, oorzaak-gevolg schema's voor zowel de troebele toestand (autogeen eutroof) als de heldere toestand (autogeen oligotroof) weergegeven. In beide toestanden is de positieve terugkoppeling en daarmee de autogenese gebaseerd op de bodem-wateruitwisseling van fosfaat, en de afwezigheid dan wel aanwezigheid van grascontrole.



Conclusie en aanbeveling

De waterkwaliteit van het VZM verbetert sinds 2005: er zijn minder algen, de helderheid van het water neemt toe en blauwwieroverlast komt minder vaak voor. Waarschijnlijk is deze verbetering in gang gezet door de afgenomen fosfaatvrachten vanuit Brabant.

De lagere externe fosfaatbelasting kan de verbetering slechts ten dele verklaren. De lage algengehaltes, en daardoor de toenemende helderheid worden waarschijnlijk vooral veroorzaakt door 'graascontrole' door driehoeksmosselen (de gewone driehoeksmossel en/of de quagga mossel). En deze gunstige toestand wordt in stand gehouden en versterkt door een systeemrespons van vastlegging van fosfaat in de bodem, waardoor de interne fosfaatbelasting en daarmee het fosfaatgehalte verder afneemt. Overigens is met de recente kwaliteitsverbetering het risico van blauwalgoverlast niet (direct) verdwenen.

De twee aannames waar deze conclusie op is gebaseerd, namelijk (progressieve) vastlegging van fosfaat in de bodem en graascontrole door driehoeksmosselen, kunnen niet aan veldwaarnemingen worden getoetst; de daarvoor noodzakelijke gegevens ontbreken. Vooral blijft er dus sprake van een hypothese.

Nader onderzoek en systeemmonitoring naar (1) fosfaatspeciëatie en seizoensgedrag van fosfaat in de waterbodem en (2) de aanwezigheid van driehoeksmosselen zijn nodig om de hypothese te toetsen en om vervolgens een toekomstverwachting te kunnen formuleren.

Inhoud

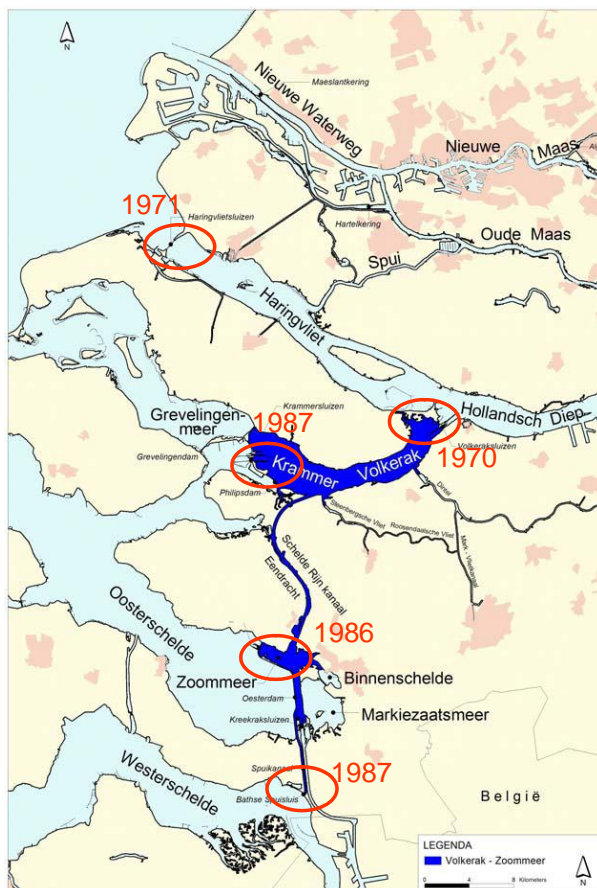
Samenvatting	a
Inleiding	a
Waterkwaliteit	a
Water- en nutriëntenbalansen	b
Modelresultaten	b
Verklarende hypothesen systeemgedrag	c
Conclusie en aanbeveling	d
1 Inleiding	1
2 Waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer (1972-)1996-2009	3
2.1 Vergelijking Krammer-Volkerak en Zoommeer	4
2.2 Chloride	5
2.3 Stikstof	6
2.4 Fosfaat	7
2.5 N/P ratio	8
2.6 Silicaat	8
2.7 Chlorofyl, doorzicht en zwevend stof	9
2.8 Conclusies waterkwaliteit VZM	10
3 Water- en nutriëntenbalansen 1996-2009	11
3.1 Waterbalans en zoetwatervraag van het VZM	11
3.2 Nutriëntenbalansen	17
3.2.1 Kwaliteit van de dataset	18
3.2.2 Stikstofvrachten	18
3.2.3 Fosfaatvrachten	19
4 Balansmodel	21
4.1 Stikstof	22
4.2 Fosfaat	23
4.3 Conclusies balansmodel	26
5 2D waterkwaliteitsmodellering nieuwe referentie situatie	27
6 Verklarende hypothese afnemende P-concentratie	29
7 Discussie, conclusie en aanbeveling	33
7.1 De heldere periode 1988-1994	33
7.2 Algenafname sterker dan daling P-concentratie, geen nutriëntenlimitatie	34
7.3 Verklarende hypothesen systeemgedrag	35
7.4 Update waterkwaliteitsgegevens tot en met 2010	36
7.5 Waterplanten	37
7.6 Conclusie en aanbeveling	38
8 Referenties	41

Bijlage(n)

A	Wateraanvoer vanuit het VZM naar Brabant en andere (polder)gebieden.	A-1
A.1	Schatting wateraanvoer uit de restterm van de waterbalans	A-1
A.2	Schatting wateraanvoer uit negatieve debieten Dintel en Vliet	A-1
A.3	Conclusies wateraanvoer vanuit het VZM	A-5
B	Debiet-concentratie relatie tussen Dintel en VZM	B-1
B.1	Inleiding	B-1
B.2	Neerslag – afvoer relatie voor de Dintel	B-1
B.3	Debiet – concentratie relaties voor de Dintel	B-4
B.4	Concentratie relaties tussen Dintel en Volkerak-Zoommeer	B-6
B.5	Samenvatting en conclusies.	B-8
C	Verslag expert review	C-1
C.1	Aanleiding voor een review	C-1
C.2	Opzet van de review	C-1
C.3	Uitkomsten van de review	C-2

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft de ontwikkeling van de waterkwaliteit van het Volkerak-Zoommeer (VZM) in de periode 1996-2009 (Hoofdstuk 2). Vervolgens worden de water- en nutriëntenbalansen voor deze periode op maandbasis gepresenteerd (Hoofdstuk 3) en wordt geanalyseerd in hoeverre de veranderingen in de waterkwaliteit kunnen worden verklaard door de externe aanvoer van nutriënten (externe belasting) dan wel door processen in het meer zelf (interne belasting) (Hoofdstuk 4). Hiertoe is een spreadsheet – balansmodel opgesteld. In de analyse van de externe aanvoer 1996-2009 zijn ook de oorspronkelijke gegevens opgenomen en verwerkt van de water- en stoffenbalans voor de periode 1996-2000¹. Het 2D waterkwaliteitsmodel van het VZM waarmee de referentie situatie en de



Figuur 1. Het Volkerak-Zoommeer

vanuit het Hollandsch Diep (Volkeraksluizen). Het systeem watert behalve naar de Westerschelde ook af via de Krammersluizen (naar de Oosterschelde).

De figuur geeft ook de bouwjaren weer van de deltawerken die het VZM hebben gevormd. Zo is de Volkerakdam met spui- en schutsluizen die het VZM van de rivier scheidt meer dan 15 jaar eerder gebouwd (1970) dan de dammen die het VZM van de Oosterschelde scheiden en daardoor getijloos, stagnant en zoet hebben gemaakt.

¹ Kouer, R.M. & A. Griffioen, 2003. Water- en stoffenbalans Volkerak-Zoommeer periode 1996-2000. Microverontreinigingen en nutriënten. RIZA-werkdocument 2003.204X

(zoete) alternatieven zijn doorgerekend ten behoeve van de mer/planstudie waterkwaliteit VZM is opnieuw toegepast om de uitkomsten van deze balansstudie (afnemende in- en externe belasting) te analyseren betreffende de effecten op blauwalgontwikkeling (Hoofdstuk 5).

Vervolgens is een hypothese geformuleerd die de recente trends van afnemende (interne) belasting zou kunnen verklaren (Hoofdstuk 6). Hoofdstuk 7 tenslotte behandelt de discussiepunten en formuleert de finale conclusies.

In een conceptfase is deze analyse onderwerp van gesprek geweest van een expert review meeting (Delft, 25 november 2010), waarbij de resultaten en conclusies van de fact finding van een kritische reflectie zijn voorzien. Bijlage C doet verslag van de expert review.

Figuur 1 geeft het VZM weer, bestaande uit (van noord naar zuid) het Krammer-Volkerak, de Eendracht, het Zoommeer en het spuikanaal waarmee het systeem afwatert op de Westerschelde (Bathse spuisluis). Wateraanvoer vindt voornamelijk plaats via de Brabantse rivieren (Dintel en Steenbergse Vliet) en

2 Waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer (1972-)1996-2009

De analyse van de waterkwaliteit begint met het vergelijken van het centrale meetpunt Steenbergens in het Krammer-Volkerak met het meetpunt Oesterdam in het Zoommeer (Figuur 2).

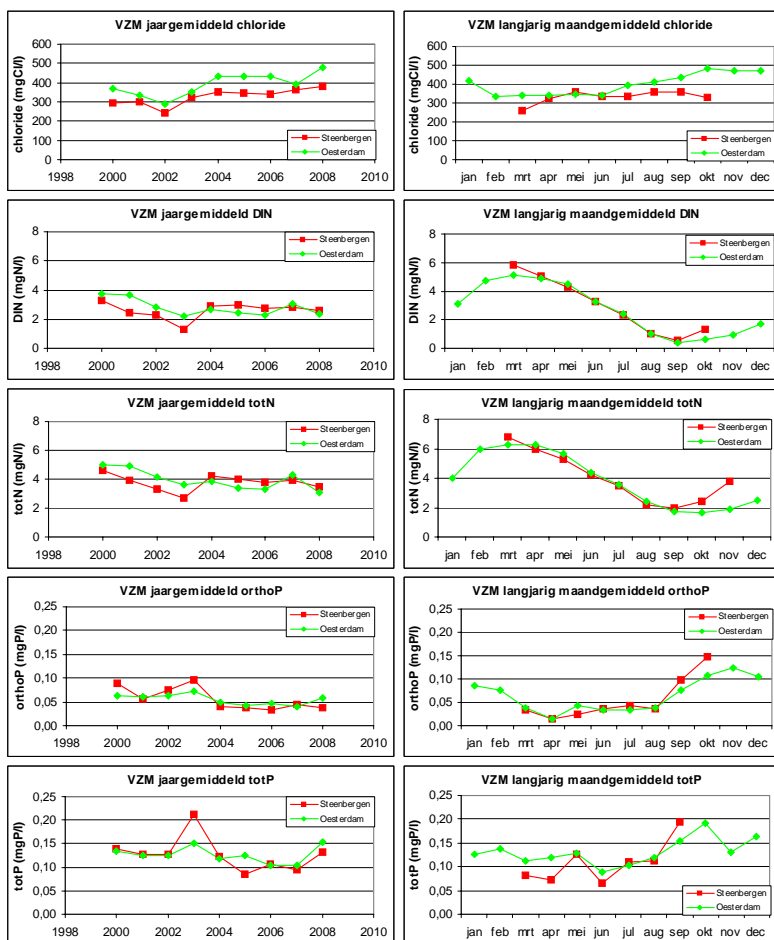
Vervolgens wordt voor het Krammer-Volkerak (meetpunt Steenbergens) voor elk van de waterkwaliteitskenmerken (chloride, stikstof, fosfaat, silicaat, doorzicht en chlorofyl) een standaard samengestelde figuur weergegeven en besproken, met als subfiguren:

- De complete tijdserie met alle meetwaarden voor de periode 1972-2009
- Het verloop van de jaargemiddelde concentratie voor de gehele periode (voor doorzicht en chlorofyl het (na)zomergemiddelde voor de maanden juli t/m oktober)
- Het seizoensverloop aan de hand van meerjarig maandgemiddelde waarden voor opeenvolgende subperiodes van 5 jaren:
 - 1972-1984 (de estuariene periode vóór de afsluiting met de Philipsdam)
 - 1990-1994
 - 1995-2000
 - 2001-2004
 - 2005-2009
- Voor stikstof en fosfaat worden zowel de (direct voor algenopname beschikbare) anorganisch opgeloste fractie (orthofosfaat en DIN (de som van nitraat, nitriet en ammonium)) als de totaalconcentratie (totN en totP) weergegeven. Het verschilplaatje (totN-DIN en totP-orthoP) geeft de fractie weer die niet (direct) beschikbaar is voor opname door algen (particulaire en organisch opgeloste fracties).



Figuur 2. Krammer-Volkerak (links) en Zoommeer (rechts) met aanduiding meetpunten en locaties van in- en uitgaande debieten

2.1 Vergelijking Krammer-Volkerak en Zoommeer



Figuur 3. Vergelijking waterkwaliteit Krammer-Volkerak en Zoommeer²

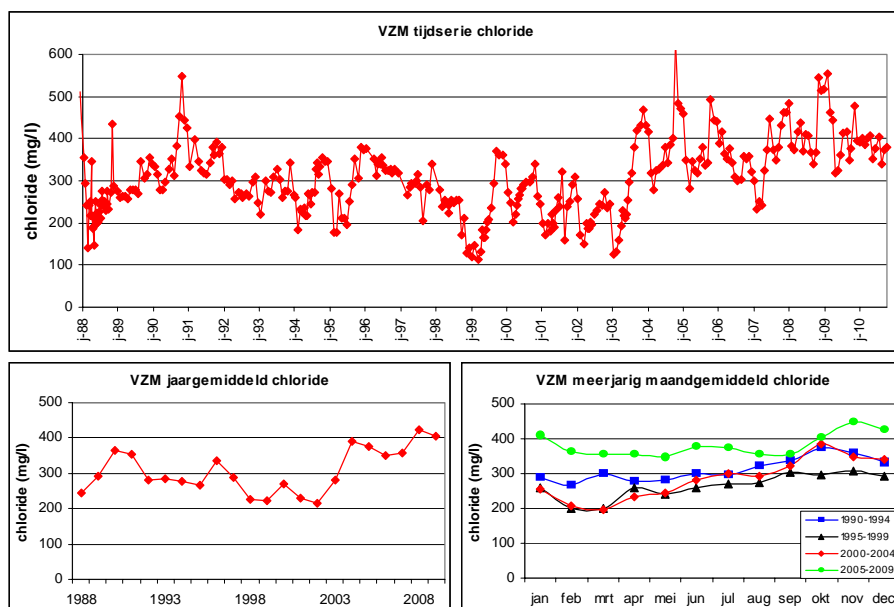
Volgens Figuur 3 zijn zowel de jaargemiddelde als de meerjarig maandgemiddelde concentraties (periode 2000-2008) op beide meetpunten nagenoeg gelijk. In het Zoommeer is de chlorideconcentratie iets hoger (waarschijnlijk veroorzaakt door zoutlekage door de Bergse Diepsluis in de Oesterdam). In het Krammer-Volkerak zijn de afwijkingen van het gemiddelde (bijvoorbeeld het droge jaar 2003: fosfaat hoger en stikstof lager dan in andere jaren) meer geprononceerd dan in het Zoommeer.

De algemene conclusie is dat er geen structurele concentratieverschillen zijn tussen beide deelsystemen, omdat er jaargemiddeld voldoende uitwisseling is om dergelijke verschillen te voorkomen. Een analyse m.b.t. het ene deelsysteem is ook geldig is voor het andere deelsysteem.

In de volgende paragrafen wordt de beschrijving van de waterkwaliteit uitsluitend gebaseerd op de dataset van het meetpunt Steenberg, die als representatief voor het gehele VZM wordt beschouwd.

² de vergelijking is gebaseerd op een door RWS-Zeeland geleverde dataset. Deze dataset bevat vooral voor het meetpunt Steenberg minder gegevens dan de dataset (uit waterbase) die in het vervolg is gebruikt. Er zijn daardoor marginale verschillen tussen deze figuur en de volgende figuren.

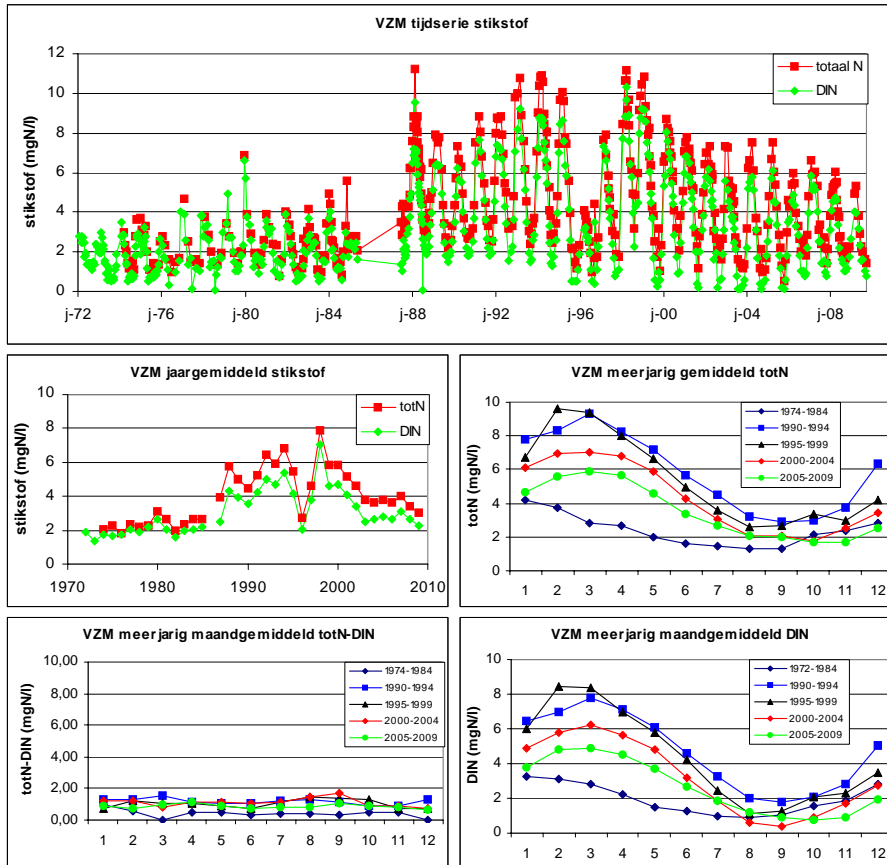
2.2 Chloride



Figuur 4. Chloride in het VZM

De chlorideconcentraties in het VZM na de afsluiting zijn weergegeven in Figuur 4. Relatief lage respectievelijk hoge chlorideconcentraties kunnen worden gerelateerd aan natte periodes met hoge rivierafvoer (najaar 1998) respectievelijk droge periodes met lage afvoeren (de jaren 1996-1997, 2003) (vergelijk met de afvoer van de Dintel – Figuur 10). Na 2003 is het chloridegehalte vooral 's zomers 100-200 mg/l hoger dan daarvoor, terwijl zelfs in de hydrologisch normale jaren 2008 en 2009 steeds meer doorspoeldebiet nodig is om het chloridegehalte niet verder te laten stijgen. Er is blijkbaar sprake van recent toegenomen 'zoutlekkage' in/naar het VZM (zie verder paragraaf 3.1 en memo Leen Dekker, 2008).

2.3 Stikstof



Figuur 5. Stikstof in het VZM

De stikstofconcentraties in het VZM (Figuur 5) zijn na de afsluiting meer dan verdubbeld. Dit komt vooral tot uiting in het geprononceerd seizoensgedrag: hoge en toenemende concentraties in winter en voorjaar en een geleidelijke afname gedurende de gehele zomer. Vanaf ongeveer 2000 is er een gestage afname van de jaargemiddelde concentraties (afgezien van de 'afwijkende' droge jaren 1995-1997 met lage en natte 1998 met hoge concentraties – zie verder paragraaf 3.2.2), waarbij het seizoensgedrag gelijk blijft.

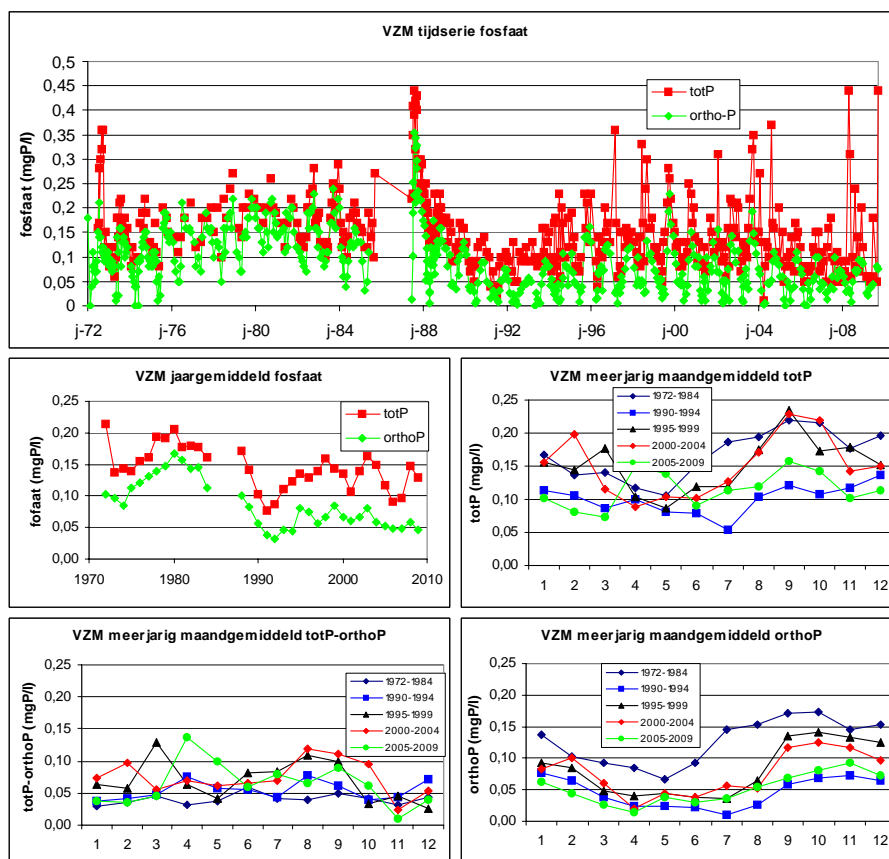
Het verschil tussen de totaalconcentratie en de anorganisch opgeloste fractie (totN-DIN) is klein en door de jaren heen constant (ongeveer 20%, zie Tabel 1).

De iets hogere DIN-concentratie van 2005-2009 t.o.v. 2000-2003 in de maanden 7-10 zou verklaard kunnen worden door in deze periode toenemende P-limitatie van algen.

Tabel 1. Fractie niet (direct) beschikbaar stikstof in het VZM

	1972-1984		1990-2009	
	mg/l	%	mg/l	%
totN	2,33	100	4,78	100
DIN	1,92	82	3,73	78
totN-DIN	0,42	18	1,05	22

2.4 Fosfaat



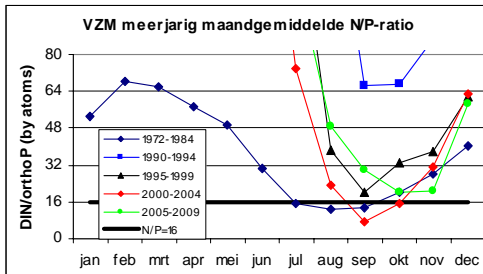
Figuur 6. Fosfaat in het VZM

Fosfaat vertoont (Figuur 6) vier opvallende verschillen met stikstof. (1) na de afsluiting zijn vooral de orthofosfaatconcentraties aanzienlijk lager dan ervoor in de estuariene situatie; (2) vanaf 2004 is de orthofosfaatconcentratie constant heel laag, evenals in de periode 1990-1994; (3) het seizoensgedrag van (vooral) orthofosfaat is met stijgende concentraties gedurende de (na)zomer nagenoeg tegengesteld aan dat van stikstof en (4) het verschil tussen de totaalconcentratie en de anorganisch opgeloste fractie (totP-orthoP) is behoorlijk variabel maar met 50% in de periode 1990-2009 vooral veel groter dan bij stikstof (zie Tabel 2).

Tabel 2. Fractie niet (direct) beschikbaar fosfaat in het VZM

	1972-1984		1990-2009	
	mg/l	%	mg/l	%
totP	0,17	100	0,13	100
orthoP	0,13	76	0,06	49
totP-orthoP	0,04	24	0,07	51

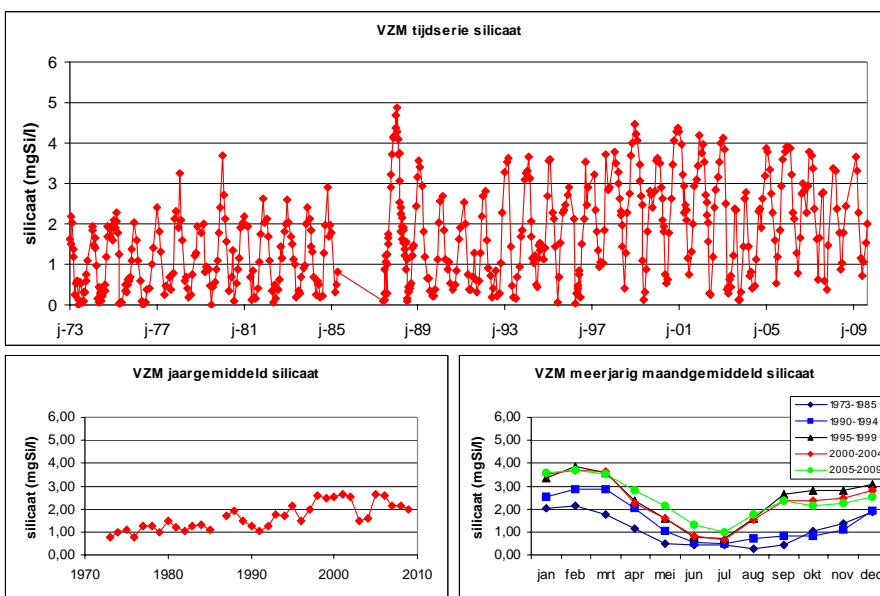
2.5 N/P ratio



Figuur 7. N/P ratio in het VZM

Figuur 7 illustreert de enorme (relatieve) overmaat van stikstof ten opzichte van fosfaat in het VZM. De zwarte lijn in de figuur ($N/P=16$) geeft de verhouding weer waarin de beide nutriënten door algen worden opgenomen, de zg. Redfield-ratio. $N/P>16$ impliceert een overmaat aan stikstof en dus potentiële fosfaatlimitatie van de algenproductie, $N/P<16$ impliceert een potentiële stikstoflimitatie van de algenproductie. Door de recente daling van de orthofosfaatconcentratie is de algenproductie gedurende het gehele jaar, dus ook in de (na)zomer, potentieel gelimiteerd door fosfaat (groene lijn in Figuur 7), en in het geheel niet meer door stikstof.

2.6 Silicaat

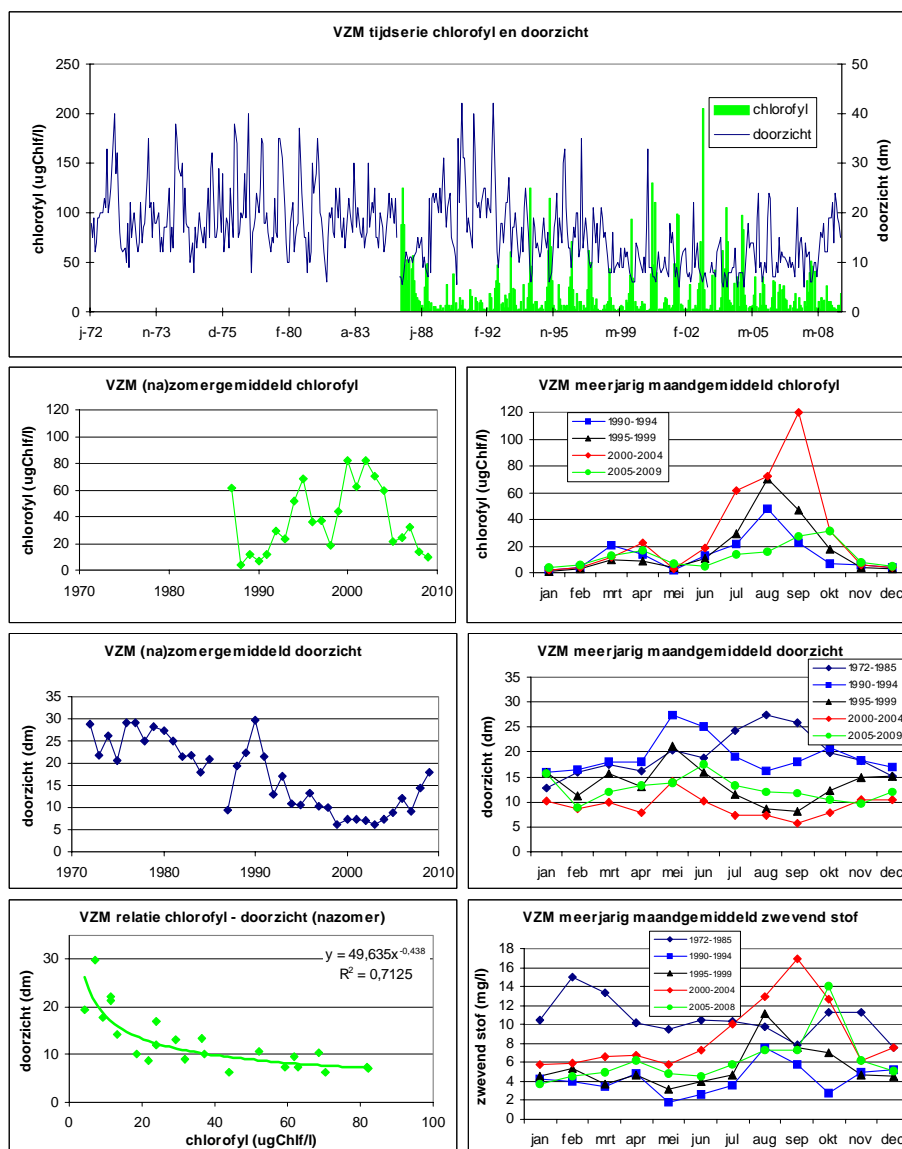


Figuur 8. Silicaat in het VZM

De silicaatconcentratie (Figuur 8) is, net als stikstof, na de afsluiting hoger dan ervoor, en lijkt daarna heel licht verder te stijgen. Het seizoensgedrag zit, met dalende concentraties tot juni-juli en stijgende concentraties vanaf augustus, tussen stikstof en fosfaat in.

Figuur 8 bevat geen aanwijzing voor toenemende diatomeeën productie relatief t.o.v. blauwwieren/groenwieren, maar wel een aanwijzing voor toenemende accumulatie van silicaat in het watersysteem, die mogelijk wordt veroorzaakt door het wegvallen van aanvankelijke Si-limitatie in mei-juli.

2.7 Chlorofyl, doorzicht en zwevend stof



Figuur 9. Chlorofyl, doorzicht en zwevend stof in het VZM

Vóór de afsluiting van de Philipsdam, in de estuariene situatie (maar na de bouw van de Volkerakdam), was het water in het Krammer-Volkerak in de (na)zomer heel helder, met een doorzicht van zo'n 2,5 m. Na de afsluiting is met de toename van de algenconcentratie de helderheid gaandeweg afgenomen tot minder dan 1 m gedurende 1999-2005. Er is een duidelijke correlatie tussen het doorzicht en de chlorofylconcentratie, Vanaf 2005 en vooral in de laatste twee jaren 2008 en 2009 is de algenconcentratie laag en neemt de helderheid weer toe (Figuur 9).

2.8 Conclusies waterkwaliteit VZM

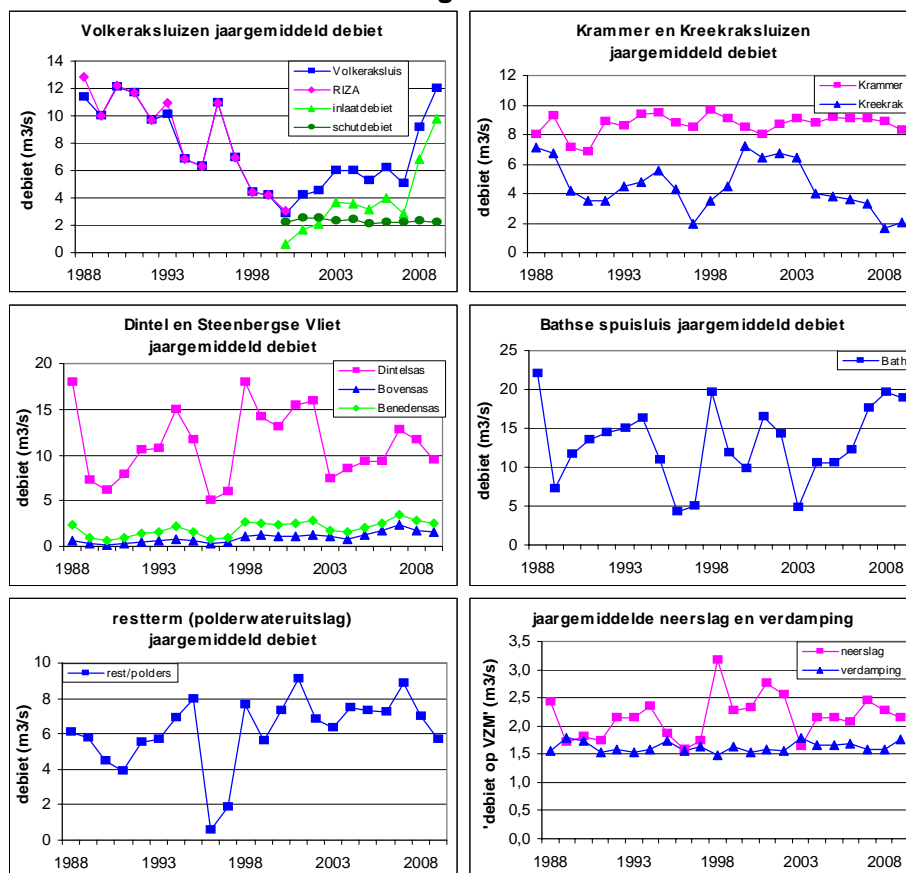
1. Krammer-Volkerak en Zoommeer zijn onderdelen van één volledig gemengd Volkerak-Zoommeer systeem, met vergelijkbare waterkwaliteit. Het meetpunt Steenbergen wordt representatief geacht voor het gehele VZM.
2. De chlorideconcentratie in het VZM is na 2003 en vooral na 2007, ook in hydrologisch normale jaren, 's zomers 100-150 mg/l hoger dan daarvoor; er is blijkbaar recent sprake van een hogere zoutlekkage in/naar het VZM.
3. De stikstofconcentratie in het VZM is na de afsluiting (eind 1987) meer dan verdubbeld, met uitzonderlijk hoge concentraties in winter en voorjaar; vanaf 2000 dalen de concentraties gestaag, bij gelijkblijvend seizoensgedrag. De totaal-stikstof concentratie is een goede indicatie van de voor algengroei beschikbare hoeveelheid stikstof, omdat de niet direct beschikbare fractie constant en klein is (20%).
4. De fosfaat concentratie in het VZM is na de afsluiting behoorlijk lager dan voorheen in de estuariene situatie. Sinds 2005 is de orthofosfaatconcentratie (verder) afgenomen, door een verandering van het seizoensgedrag: de concentratie in de (na)zomer is vanaf 2005 ongeveer gehalveerd, evenals in de periode 1990-1994. De totaal-fosfaat concentratie is geen goede indicatie van de voor algengroei beschikbare hoeveelheid fosfaat, omdat de niet direct beschikbare fractie variabel en vooral groot is (50%).
5. Het VZM heeft een enorme relatieve overmaat aan stikstof ten opzichte van fosfaat met betrekking tot de verhouding waarin deze nutriënten door algen worden opgenomen. Door de recente daling van de orthofosfaatconcentratie is de algenproductie gedurende het gehele jaar, dus nu ook in de (na)zomer, potentieel gelimiteerd door fosfaat, en in het geheel niet meer door stikstof.
6. Na de afsluiting is de algenconcentratie (chlorofyl) gaandeweg sterk toegenomen, en is het doorzicht, de helderheid van het water, afgenomen. Vanaf 2005 en vooral in de laatste twee jaren 2008 en 2009 is de algenconcentratie laag en neemt de helderheid weer toe.

3 Water- en nutriëntenbalansen 1996-2009

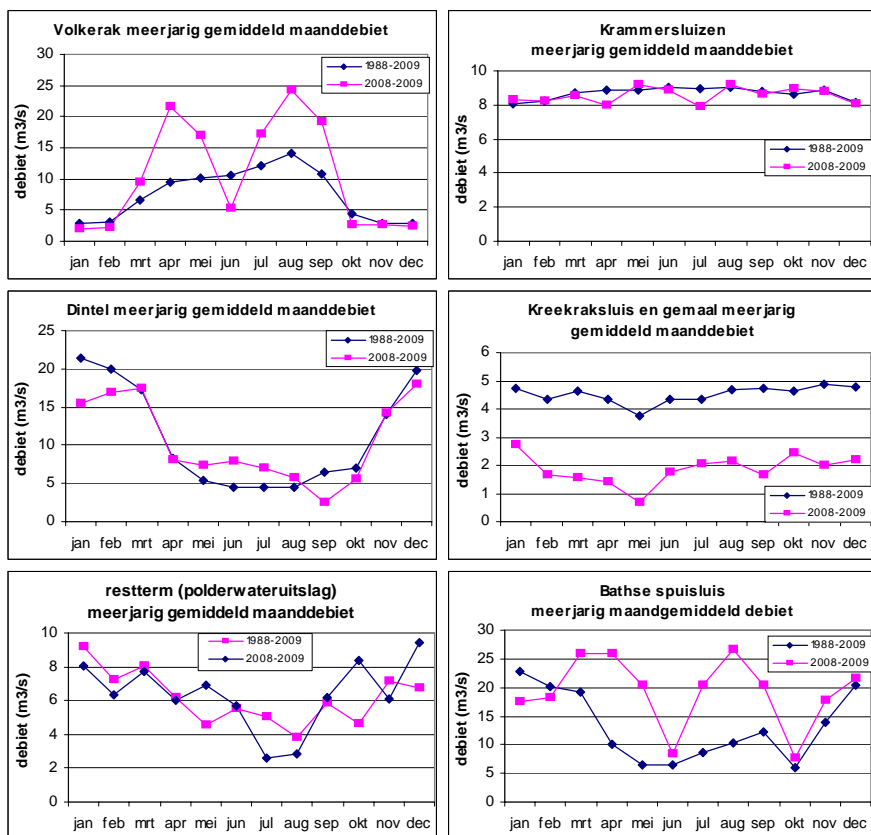
Voor de water- en nutriëntenbalansen zijn standaard sets figuren gemaakt, met jaargemiddelde en meerjarig maandgemiddelde waarden. Daarnaast wordt speciaal aandacht besteed aan:

- de consistentie (en de verschillen) tussen de nieuwe balansen voor de periode 1996-2009 en de water- en nutriëntenbalansen voor de periode 1996-2000 van Kouer en Griffioen. Door de oorspronkelijke gegevens van Kouer en Griffioen in deze nieuwe analyse op te nemen, en waar nodig oude gegevens opnieuw op te vragen, kon een continue reeks maanbalansen voor 14 jaren worden opgesteld. Voor de eerste jaren na de estuariene periode (1989-1995) zijn door Kouer en Griffioen alleen jaarbalansen opgesteld, waarvan alleen de resultaten (en niet de invoergegevens) beschikbaar zijn. Bovendien zijn door Kouer en Griffioen alleen totaal-stikstof en totaal-fosfaat balansen opgesteld, en geen balansen voor de anorganisch opgeloste fracties (DIN en orthofosfaat).
- de kwaliteit van de dataset. Voor de vrachten vanuit Brabant zijn van zowel WSBD als van RWS-Zeeland metingen beschikbaar. Deze zijn onderling vergeleken.

3.1 Waterbalans en zoetwatervraag van het VZM



Figuur 10. Jaargemiddelde externe aan- en afvoerdebieten Volkerak-Zoommeer. Aanvoer staat links, afvoer staat rechts (m.u.v. neerslag op het VZM, rechtsonder)



Figuur 11. Meerjarig maandgemiddelde externe aan- en afvoerdebieten VZM. Aanvoer links, afvoer rechts

Figuur 10 en Figuur 11 geven alle beschikbare metingen weer van de aan- en afvoerdebieten naar en van het Volkerak-Zoommeer, vanaf het ontstaan van het meer tot en met 2009 (zie Figuur 2 voor de locaties). De aanvoerdebieten staan links, de afvoerdebieten rechts. In Figuur 10 staan de jaargemiddelde debieten. In Figuur 11 staan meerjarig gemiddelde maanddebieten, voor de gehele periode 1988-2009 en voor de twee meest recente jaren in de dataset, 2008-2009.

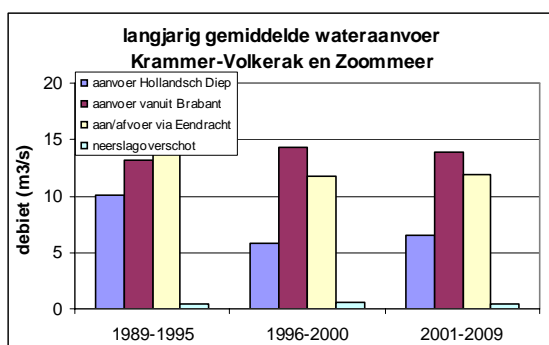
De jaargemiddelde debieten van de Volkeraksluizen vóór 2000 volgens Kouer en Griffioen ('RIZA' in Figuur 10) en dit rapport (nieuwe gegevens van RWS-Zeeland) zijn nagenoeg gelijk. Ook voor de Dintel zijn de debieten volgens Kouer en Griffioen nagenoeg identiek aan de complete tijdserie dagdebieten 1988-2009 die voor deze analyse door WSBD is aangeleverd. Voor de Steenbergse Vliet zijn alleen debietgegevens beschikbaar voor het meetpunt Bovensas (complete tijdserie dagdebieten 1988-2009 van WSBD), en niet van de poldergemalen tussen Boven- en Benedensas. In overleg met WSBD is het debiet van deze gemalen langjarig gemiddeld vastgesteld op 1 m³/s, met een debietvariatie conform de afvoer van de Dintel³. De overall conclusie is dat de debietgegevens van Kouer en Griffioen en dit rapport onderling consistent zijn.

De tijdreeksen neerslag en verdamping zijn ontleend aan de complete dataset aan- en afvoerdebieten van RWS-Zeeland (HMCZ) en betreffen de KNMI stations Tholen (neerslag) en Vlissingen (gewasverdamping * 1.33).

³ het maanddebit van de poldergemalen tussen boven- en benedensas is dan gelijk aan 1 * maanddebit Dintelsas / langjarig gemiddeld debiet Dintelsas (alles in m³/s)

De wateraanvoer vanuit Brabant is het grootst; met veel variatie tussen natte en droge jaren en tussen zomer ($5 \text{ m}^3/\text{s}$) en winter ($20 \text{ m}^3/\text{s}$). Met het inlaatdebiet van de Volkeraksluizen (bovenop het nagenoeg constante schutdebiet van $2 \text{ m}^3/\text{s}$) wordt deze variatie over de jaren en tussen de seizoenen deels gecompenseerd; voor peilhandhaving (in zomer en winter) en voor het handhaven van een laag zoutgehalte (alleen in de zomer, max. $450 \text{ mgCl}^-/\text{l}$ volgens het waterakkoord) wordt in droge jaren in de zomer meer water vanuit het Hollandsch Diep ingelaten ($> 10 \text{ m}^3/\text{s}$) dan in natte jaren in de winter ($2 \text{ m}^3/\text{s}$).

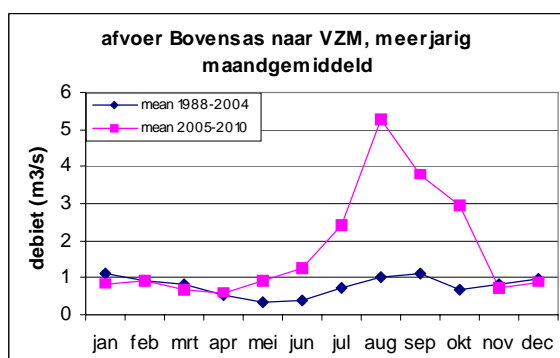
In de beginperiode werd een fors debiet vanuit het Hollandsch Diep ingelaten. In de jaren daarna halveerde dit debiet maar is in de laatste jaren weer terug op het oude niveau van ongeveer $10 \text{ m}^3/\text{s}$ jaargemiddeld. Een reden voor het hoge inlaatdebiet vanuit het Hollandsch Diep in de beginperiode is, dat de Kreekraksluizen toen nog volledig in werking waren als zout/zoet-sluis. In 1996 is de zout/zoet-scheiding uitgeschakeld. Met het gemaal wordt middels een zoete propstroom naar het Antwerpse kanaalpand het zout buiten het VZM gehouden. Verder is vanaf 1993 bij de Bergsediepsuis een zoet-zout-scheidingssysteem in bedrijf gekomen.



Figuur 12. Wateraanvoer naar Krammer-Volkerak en -doorvoer naar het Zoommeer

resterende zoutlek is ongeveer $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ oftewel 3 kg zout/s. Door verschillende oorzaken neemt de verzilting achter de Krammersluizen en de Bergsediepsuis echter toe vanaf 2007 (minder neerslagafvoer pieken die worden gespuid via de Krammersluizen en het Kreekrakgemaal, minder goed functioneren van de zoet-zoutscheidingen), waardoor een groter doorspoeldebiet nodig is (memo Leen Dekker, nov. 2008).

Een andere recente verandering in de waterbalans van het VZM wordt veroorzaakt door het zogenaamde 'doorspoelregime' van de Mark-Vliet boezem. Het waterschap (WSBD) hanteert



Figuur 13. Afvoer van de Steenbergse Vliet naar het VZM, voor en na 2005

Figuur 12 illustreert dat de totale jaargemiddelde aanvoer vanuit Brabant en Hollandsch Diep van ruim $20 \text{ m}^3/\text{s}$ voor ruim de helft via de Eendracht wordt doorgevoerd naar het Zoommeer, en vervolgens via de Bathse spuisuis en de Kreekraksluizen wordt afgevoerd naar België en de Westerschelde. De andere (kleine) helft ($9 \text{ m}^3/\text{s}$) komt als schutverlies van de Krammersluizen op de Oosterschelde terecht. Dit schutverlies is de zoetwatervraag van het zoet-zout scheidingssysteem waarmee de zoutindringing vanuit de Oosterschelde grotendeels wordt tegengehouden; het resterende zoutlek is ongeveer $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ oftewel 3 kg zout/s. Door verschillende oorzaken neemt de verzilting achter de Krammersluizen en de Bergsediepsuis echter toe vanaf 2007 (minder neerslagafvoer pieken die worden gespuid via de Krammersluizen en het Kreekrakgemaal, minder goed functioneren van de zoet-zoutscheidingen), waardoor een groter doorspoeldebiet nodig is (memo Leen Dekker, nov. 2008). Een andere recente verandering in de waterbalans van het VZM wordt veroorzaakt door het zogenaamde 'doorspoelregime' van de Mark-Vliet boezem. Het waterschap (WSBD) hanteert dit regime sinds 2005: bij Oosterhout wordt in de zomer vanuit het Wilhelminakanaal (Maas)water ingelaten ten behoeve van de waterkwaliteit, blauwalgbestrijding en peilhandhaving in het beheergebied van het waterschap. Figuur 13 illustreert dat dit doorspoelwater via de Steenbergse Vliet (meetpunt Bovensas) naar het VZM wordt afgevoerd.

Tabel 3 vergelijkt het zomergemiddeld continue inlaatdebiet bij Oosterhout met het zomerse afvoerdebiet van Bovensas (m^3/s), voor drie homogene periodes qua Bovensasafvoer (inlaat Oosterhout ontleent aan memo Klaas-Jan Douben, januari 2011).

Tabel 3. Doorspoelregime Mark-Vlietboezem en afvoer naar VZM (m^3/s)

	inlaat Oosterhout	afvoer Bovensas
1988-1997	0,32	0,51
1998-2004	0,91	1,31
2005-2010	2,81	2,84

Hoewel de inlaat bij Oosterhout sterk fluctueert tussen de jaren en niet synchroon varieert met de Bovensasafvoer, kan toch worden geconcludeerd dat de afvoer van de Steenbergse Vliet naar het VZM ongeveer proportioneel is toegenomen met de inlaat bij Oosterhout.

Zowel de polderwateruitslag als de waterinlaat naar en van het VZM van/naar de aangrenzende poldergebieden (West-Brabant, Oostflakkee, Tholen, St. Philipsland) ten behoeve van peilbeheer, zoetspoelen en beregening wordt niet gemeten. Alleen de negatieve debieten in de tijdseries debieten van Dintel- en Bovensas geven een indicatie van het 'terugstromen' van water vanuit het VZM naar de Mark-Vliet boezem bij een laag peil op de boezem en daardoor een negatief verhang. Gebaseerd op negatieve kwartierdebieten van Dintel en Vliet is de gemiddelde totale jaaraanvoer in de periode 1988-2007 $13,5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (memo Klaas-Jan Douben, januari 2011, zie verder bijlage A). Op basis van (negatieve) daggemiddelde debieten is de gemiddelde totale jaaraanvoer aanvoer in de periode 1988-2010 $4,25 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$, een factor 3 lager. De geschatte range voor het jaargemiddelde continue terugstroomdebiet vanuit het VZM naar de Mark-Vlietboezem is daarmee $0,27-0,85 \text{ m}^3/\text{s}$. Door het doorspoelregime komen lage peilen en negatief verhang vanaf 2005 nauwelijks meer voor in de zomer en is de zomerse 'inlaat' naar de Mark-Vlietboezem nagenoeg nul.

De restterm (of 'sluitfout') van de waterbalans van het VZM, waarin ook neerslag en openwaterverdamping zijn verdisconteerd, kan worden toegeschreven aan het netto resultaat van waterinlaat en polderwateruitslag, en andere 'vergeten' debieten. Deze restterm is jaargemiddeld vrij constant over de jaren (behalve de twee droge jaren 1996 en 1997, zie Figuur 10), gemiddeld over de periode 1988-2009 ruim $6 \text{ m}^3/\text{s}$. Jaargemiddeld is de restterm 20% van de waterbalans, in het zomerhalfjaar 15%.

Tabel 4 vat de gegevens samen in een waterbalans voor de twee meest recente jaren waarvoor gegevens beschikbaar zijn.

Tabel 4. Waterbalans VZM 2008-2009, m³/s

	jaargemiddeld	zomergemiddeld ⁴
Volkeraksluizen	10,50	17,44
Dintel	10,53	6,48
Steenbergse Vliet (Bovensas)	1,71	2,54
Neerslag op VZM	2,20	2,04
Openwaterverdamping VZM	-1,67	-2,72
Krammersluizen	-8,56	-8,64
Kreekraksluis en -gemaal	-1,86	-1,62
Bathse spuisluis	-19,22	-20,31
inlaat Mark-Vlietboezem	0,00	0,00
peilverschil ((eindvolume-beginvolume)/tijd)	0,00	-0,26
restterm (o.a. polderwateruitslag of -inlaat) ⁵	6,36	5,06
Totaal	0,00	0,00

Het inlaatdebiet van de Volkeraksluizen is de feitelijke actuele watervraag van het zoete VZM-systeem (het meer en alle daaraan verbonden watervragende functies) aan het hoofdwatersysteem (HD/HV). De huidige jaargemiddelde watervraag is ruim 10 m³/s, maar loopt in het zomerseizoen gemiddeld op tot 17,5 m³/s. Met uitschieters tot maandgemiddeld meer dan 30 m³/s (augustus 2009). Deze grote zomerse watervraag wordt vooral veroorzaakt door de directe en indirecte zoutlekbestrijding, namelijk:

- de directe zoetwatervraag van het zoet-zout scheidingssysteem van de Krammersluizen (en Bergse Diepsluis) en de propstroom van het Kreekrakgemaal naar het Antwerpse Kanaalpand (ongeveer 10,5 m³/s, zie Tabel 4), en nog 1 m³/s van de Bergsediepsluis en de Krammerjachtensluis⁶.
- de indirecte zoetwatervraag voor peilhandhaving en door de noodzaak om de resterende zoutlast van Krammer- en Bergsediepsluis door te spoelen en af te voeren naar de Westerschelde.

Deze gecombineerde zoetwatervraag van de zoutlekbestrijding, naar schatting 30 m³/s⁷, is groter dan het zomergemiddelde inlaatdebiet. En is dus voor een deel afhankelijk van de afvoeren van Dintel en Vliet (en de doorvoer van Maaswater via de inlaat Oosterhout).

⁴ periode april t/m september, 183 dagen

⁵ deze resttermschatting van de polderwateruitslag op het VZM en andere vergeten debieten is inclusief het debiet van de 7 poldergemalen tussen Boven- en Benedensas op de Steenbergse Vliet (jaargemiddeld geschat op 1 m³/s)

⁶ de directe zoetwatervraag van de zout/zoet-sluizen Krammer en Bergsediep is niet zozeer vanwege zoutlekbestrijding. Het is een ingesteld zoetwaterverlies, een optimum uit oogpunt van schuttijd, zoetlast op de Oosterschelde en energiekosten van de pompen. Voorwaarden bij de instelling van het zoetwaterverlies zijn: geen zoutlast op het VZM en geen zoet water in de riolen(Krammer) en kelder(Bergsediep). Het zoetwaterverlies is voor de Krammerduwvaartsluizen in zomer en winter gelijk. Voor de Krammerjachtensluizen en de Bergsediepsluis bedraagt het zoetwaterverlies resp. 0,8 m³/s en 0,15 m³/s in de zomerperiode, in de winter is dat nagenoeg 0 m³/s.

⁷ deze schatting is gebaseerd op de zomergemiddelde som van de uitlaatdebieten in 2008-2009, 30,6 m³/s. Deze doorspoeling, met bijbehorend inlaatdebiet door de Volkeraksluizen van 17,5 m³/s, was immers nodig om onder de norm van 450 mgCl/l te blijven. Met deze schatting van de actuele zoetwatervraag kan terugredenerend de feitelijke zoutbelasting van het VZM worden geschat: Met een uitlaatconcentratie van (maximaal) 450 mgCl/l en een inlaatconcentratie van 100 mgCl/l (achtergrondconcentratie van de Rijn) wordt per m³ netto 350 g Cl oftewel 630 g zout afgevoerd. Met 30 m³/s wordt dan maximaal 19 kg zout/s afgevoerd. Deze (maximale) schatting van de

In (extreem) droge periodes zoals het voorjaar/vroege zomer 2011 zijn deze zomergemiddelde getallen voor normale jaren niet van toepassing. Het debiet van de Dintel neemt verder af en er is een netto watervraag vanuit de omringende polders. De zoetwatervraag voor de directe en indirecte zoutlekbestrijding neemt zeker niet af (ook niet toe) en moet in deze omstandigheden geheel vanuit het Hollandsch Diep worden voldaan. In het begin van de droogteperiode 2011 met lage rivieraanvoer werd al enige tijd 15 tot 20 m³/s water uit het Hollandsch Diep via de Volkerakspuisluizen naar het VZM aangevoerd. Hiermee lukte het niet om het afgesproken chloridegehalte van maximaal 450 mg/l te handhaven. Daarna is de inlaat gereduceerd tot 8-16 m³/s (verminderde capaciteit door de lage rivierwaterstand en opgelegde inlaatbeperking) en nam het zoutgehalte verder toe⁸. Na de droogteperiode kon door de hogere Rijnafvoer het VZM vanaf de tweede helft van juni versterkt wordt doorgespoeld (met 50 m³/s). Maar na een maand versterkt doorspoelen is het zoutgehalte op de Eendracht en in het spuikanaal nog steeds hoger dan 450 mgCl⁻/l (LCW, droogteberichten 2011). Deze waarnemingen illustreren dat de zoutlast via Krammer- en Bergsediepsuis zich verzamelt in de putten achter de sluisen, waardoor vertraging- en 3D-effecten een rol spelen.

In dit rapport zijn de volgende waterbalansen gehanteerd:

- Krammer-Volkerak:
 $Q_{\text{Volkeraksluizen}} + Q_{\text{Brabant}} + Q_{\text{neerslagoverschot KV}} = Q_{\text{Krammersluizen}} + Q_{\text{Eendracht}}$
- Zoommeer:
 $Q_{\text{Eendracht}} + Q_{\text{neerslagoverschot ZM}} = Q_{\text{spuikanaal}} + Q_{\text{Kreekraksluis}}$

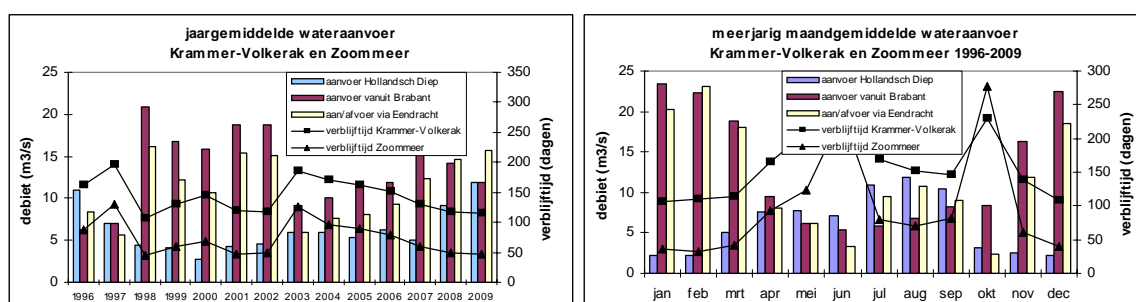
Andere debieten zijn verwaarloosd, en deze verwaarloosde debieten moeten tezamen de restterm van de waterbalans (jaargemiddeld ruim 6 m³/s, zomergemiddeld 5 m³/s) kunnen verklaren:

- RWZI effluenten: volgens Kouer en Griffioen 0,1-0,2 % van de waterbalans, een verwaarloosbaar debiet
- Debieten van de Zoom en vanuit Markiezaat: tezamen 3 % van de waterbalans van het Zoommeer (gemiddeld 2000-2008), 0,5-1,0 m³/s
- polderwateruitslagen inclusief de poldergemalen tussen Boven- en Benedensas (1 m³/s), jaargemiddeld ongeveer 5,5 m³/s, zomergemiddeld 4,5 m³/s

feitelijke totale zoutlast op het VZM is aanzienlijk hoger dan het 'officiële' zoutlek van de zoet-zoutscheidingen van de schutsluisen van 3-5 kg zout/s.

⁸ voor het spoedadvies dat Deltares voor deze droogteperiode aan de Waterdienst heeft geleverd is ook de verzilting van het VZM geanalyseerd. Volgens de memo spoedadvies verzilting – Volkerak-Zoommeer (Nolte, 2011) worden met het 2D-model de metingen van voorjaar 2011 het best gereproduceerd met exact dezelfde totale zoutlast van 19 kg zout/s. De best-guess onderverdeling van deze totale zoutlast is 3 kg/s zoute kwel, 2,5 kg/s indirecte zoutvracht door indamping (bij een dagelijkse verdamping van 5 mm), 1,5 kg/s zoutlek Bergsediepsuis en 12 kg/s zoutlek Krammersluizen.

In Figuur 14 worden de gegevens van de wateraanvoer naar het VZM samengevat⁹. Door de grote aanvoerdebieten vanuit Hollandsch Diep en Brabant is het aandeel van neerslag en verdamping in de waterbalans nagenoeg verwaarloosbaar en daarom niet in de figuur opgenomen (vergelijk Figuur 12). De jaargemiddelde verblijftijd van het Krammer-Volkerak varieert tussen 110 en bijna 200 dagen, van het Zoommeer tussen 40-125 dagen. In voor- (juni) en nazomer (oktober) kan de verblijftijd in beide meren oplopen tot ver boven de 200 dagen; in de echte zomermaanden wordt de verblijftijd gereduceerd door extra wateraanvoer vanuit het Hollandsch Diep.



Figuur 14. Jaargemiddelde en langjarig maandgemiddelde aanvoer- en doorvoerdebieten naar het VZM, en resulterende verblijftijden

3.2 Nutriëntenbalansen

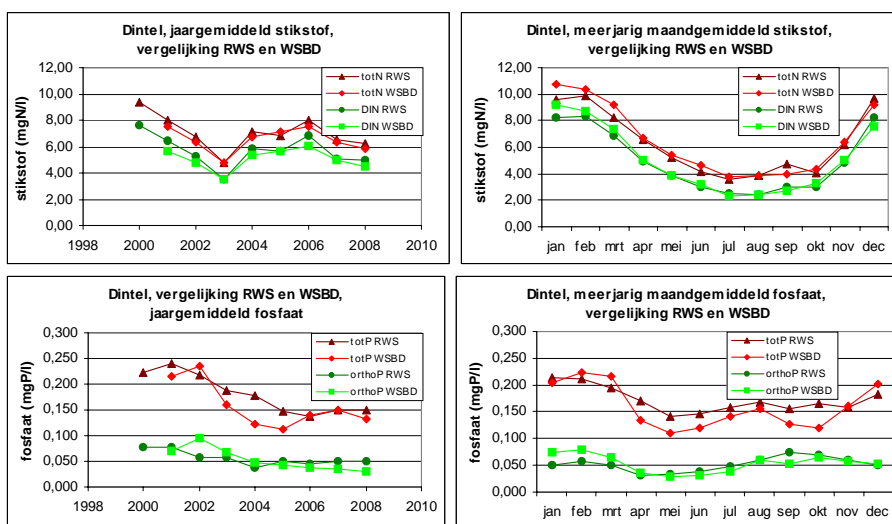
Met de volgende rekenprocedure zijn de nutriëntenbalansen berekend:

1. de tijdreeksen debieten en de (bijbehorende) tijdreeksen concentraties zijn omgerekend naar standaard matrices van 14 jaren (1996-2009) en 12 maanden met maandgemiddelde waarden. De maandgemiddelde concentraties zijn vaak op slechts één meting gebaseerd. Voor de jaren 1996-1999 zijn de oorspronkelijke invoergegevens van Kouer en Griffioen gebruikt; deze betreffen alleen totaal-N en totaal-P. Voor de Steenbergse Vliet zijn voor 2000 geen gegevens beschikbaar voor DIN en ortho-P. De maandgemiddelde concentraties zijn voor dit jaar gelijk gesteld aan de meerjarig maandgemiddelde concentraties van 2001-2009.
2. vermenigvuldiging van debiet (m^3/s) en concentratie (mg/l oftewel g/m^3) levert maandgemiddelde vrachten (g/s).
3. 'missing values' zijn geïnterpoleerd volgens 'langjarig maandgemiddelde * jaargemiddelde / langjarig jaargemiddelde'. Het aantal missing values was over het algemeen beperkt tot 0-1-enkele procenten.
4. Voor natte en droge depositie, direct op het wateroppervlak, is de neerslag (tijdreeks station Gilze-Rijen) vermenigvuldigd met 3,6 mg/l voor stikstof en 0,06 mg/l voor fosfaat (Smits en van Beek, 2009).
5. in de balansfiguren hierna zijn de vrachten weergegeven in de eenheid g/m^2 per maand of jaar (deze getallen *10 geeft kg/ha , de gebruikelijke maat voor mestgiften in de landbouw). Daartoe zijn de maandgemiddelde vrachten (g/s) vermenigvuldigd met het aantal seconden per maand of jaar en vervolgens gedeeld door het oppervlak van het Krammer-Volkerak.

⁹ De Eendracht verbindt, als onderdeel van de Schelde-Rijnverbinding, het Krammer/Volkerak met het Zoommeer (zie figuur 1). Het Eendracht debiet betreft dus de doorvoer van water binnen het VZM en geen externe aanvoer.

6. de jaarvrachten voor de periode 1989-1995 volgens Kouer en Griffioen zijn omgerekend naar dezelfde eenheid waardoor onderlinge vergelijking (van alleen de jaarvrachten en alleen de totaal-N en totaal-P) mogelijk is.

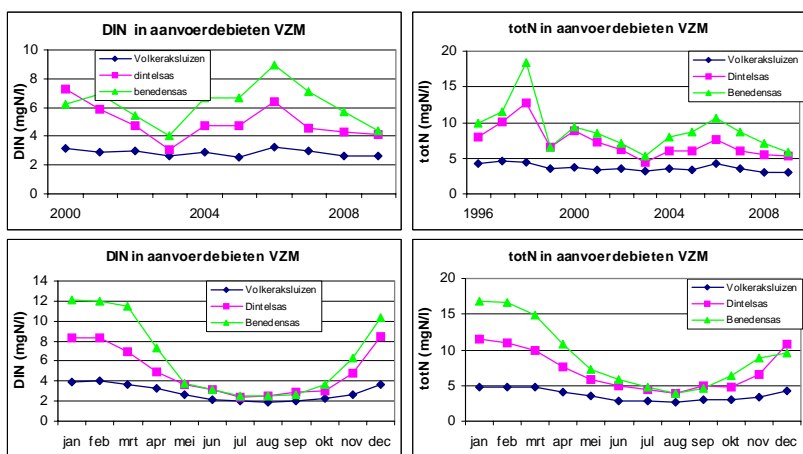
3.2.1 Kwaliteit van de dataset



Figuur 15. Vergelijking meetgegevens RWS en WSBD voor de Dintel

Voor de vrachten vanuit Brabant naar het VZM via de Dintel zijn concentratiegegevens beschikbaar van zowel RWS (meetpunt 'Dintelsas schutsluis') als WSBD (meetpunt 'mark en dintel brug in weg dinteloord-heijningen') (zie Figuur 2 voor de locaties). Figuur 15 vergelijkt de beide meetreeksen. De gemeten concentraties zijn voor alle vier onderzochte stoffen nagenoeg identiek. Alleen voor totaalfosfaat zijn de verschillen in enkele jaren (2003-2005) iets groter. De conclusie is dat de datasets onderling consistent en dus betrouwbaar zijn. Voor de vrachtberekening (zie verder) is de dataset van RWS gebruikt.

3.2.2 Stikstofvrachten



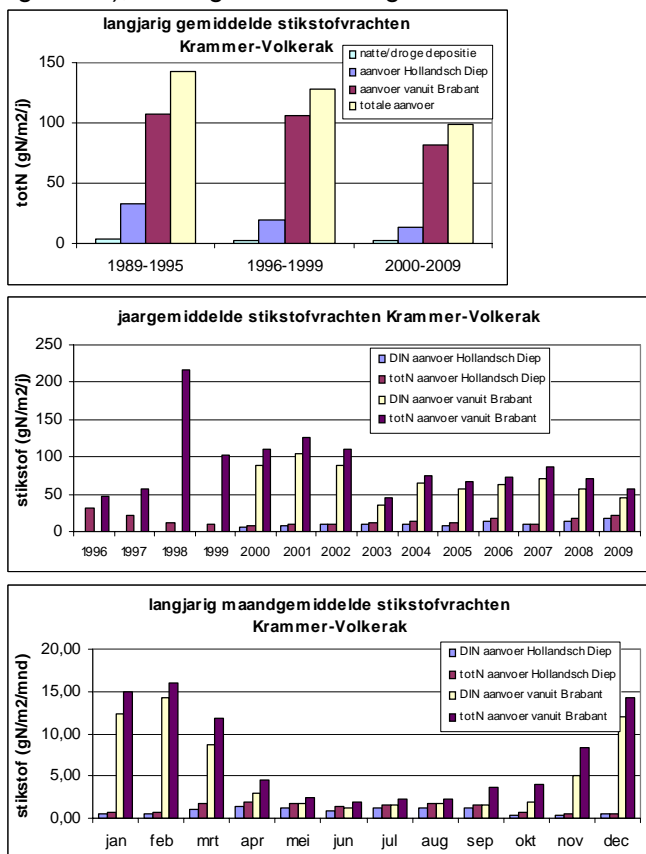
Figuur 16. Stikstofconcentraties in de aanvoerdebielten van het VZM

De stikstofconcentraties in de aanvoerdebielten vanuit Brabant (zie Figuur 16) zijn zowel jaargemiddeld als maandgemiddeld positief gecorreleerd met de debieten (vgl Figuur 10 en Figuur 11): hoge concentraties bij hoge debieten (1998, winter) en lage concentraties bij lage debieten (2003, zomer). De vraag is of deze correlatie een oorzakelijke achtergrond heeft, of een

onafhankelijke co-variantie betreft (zie verder bijlage B).

De stikstofvrachten naar het Krammer-Volkerak (Figuur 17) worden gedomineerd door de aanvoer vanuit Brabant.

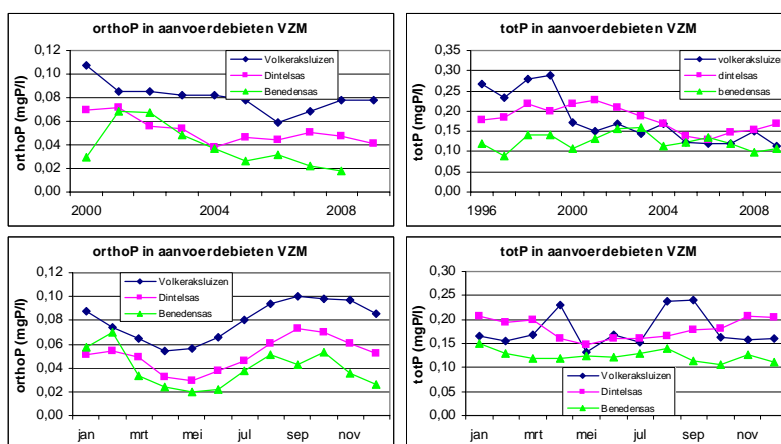
Vergeleken met de periode 1996-1999 is de totN vracht in de periode 2000-2009 een kleine 30% lager. Deze lagere vracht wordt niet veroorzaakt door lagere debieten (vgl Figuur 10 en Figuur 12), maar geheel door lagere concentraties in het aangevoerde Brabantse water.



Figuur 17. Stikstofvrachten naar het Krammer-Volkerak

Over de hele periode 1996-2009 is de variatie over de jaren groot, en consistent direct proportioneel gerelateerd aan de jaargemiddelde debietvariatie. De seizoensvariatie van de vrachten is meer dan proportioneel gerelateerd aan de debieten: de februari vracht vanuit Brabant is 11,4 keer groter dan de juni vracht, het debietverschil is een factor 5,3. Dit wordt veroorzaakt door de relatief lage zomerconcentratie (zie Figuur 15 rechtsboven). De totale jaarlijkse stikstofvracht (periode 2000-2009) naar het Krammer-Volkerak is 480-1150 (gemiddeld 820) kgN/ha voor DIN en 610-1380 (gemiddeld 990) kgN/ha voor totN.

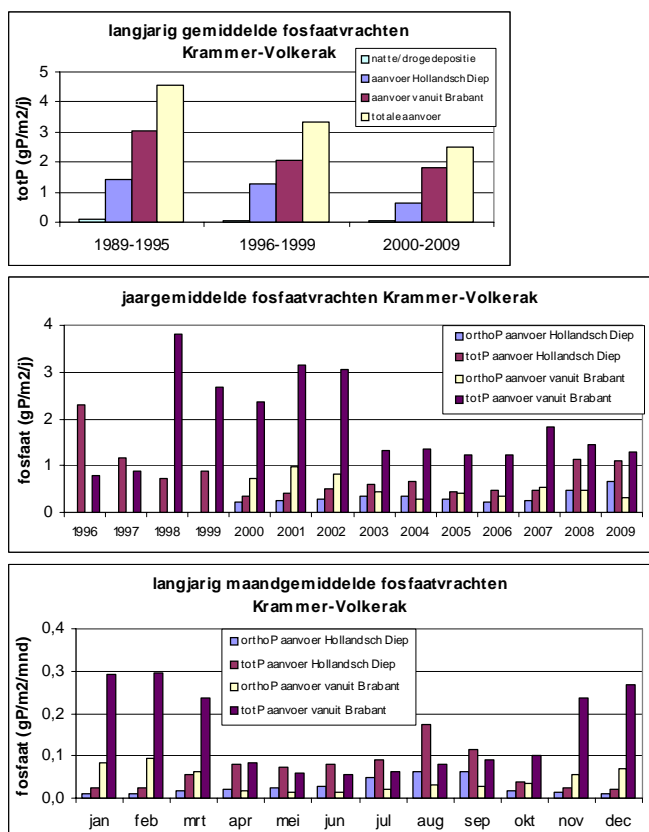
3.2.3 Fosfaatvrachten



Figuur 18. Fosfaatconcentraties in de aanvoerdebieten van het VZM

De fosfaatconcentraties in de aanvoerdebieten (Figuur 18) zijn noch jaargemiddeld noch maandgemiddeld gecorreleerd met de debieten. Er is wel een duidelijke afnemende trend van de jaargemiddelde concentraties. Vooral de orthoP-concentraties vanuit Brabant zijn laag, lager dan vanuit het Hollandsch Diep.

Ook de fosfaatvrachten naar het Krammer-Volkerak (Figuur 19) worden gedomineerd door de aanvoer vanuit Brabant. Echter, het aandeel van de aanvoer vanuit het Hollandsch Diep is relatief groter dan bij stikstof, vooral voor orthofosfaat in droge jaren en in de zomermaanden. Vergeleken met de periode 1996-1999 is de totP vracht in de periode 2000-2009, net als stikstof, een kleine 30% lager.



Figuur 19. Fosfaatvrachten naar het Krammer-Volkerak

En ook deze lagere vracht wordt niet veroorzaakt door lagere debieten maar door lagere concentraties in de Brabantse wateraanvoer. Over de hele periode 1996-2009 is de variatie over de jaren groot, en ongeveer proportioneel gerelateerd aan de jaargemiddelde debietvariatie (vgl Figuur 10). Dit geldt ook voor de seizoensvariatie: mede door het relatief grotere aandeel van het Hollandsch Diep zijn de maandvrachten van zowel totP als orthoP nagenoeg exact proportioneel gerelateerd aan de maanddebieten. De totale jaarlijkse fosfaatvracht (periode 2000-2009) naar het Krammer-Volkerak is 6,2-12,6 (gemiddeld **9,1**) **kgP/ha voor orthoP** en 17,2-36,2 (gemiddeld **24,9**) **kgP/ha voor totP**.

4 Balansmodel

Met een balansmodel voor het Krammer-Volkerak is geanalyseerd:

- in hoeverre de berekende vrachten de waargenomen concentraties in het Krammer-Volkerak kunnen verklaren (conservatieve stofberekening)
- welke interne processen (bron- en puttermen, interne belasting en 'retentie') minimaal nodig zijn om het verschil tussen conservatieve en gemeten concentratie op te vullen
- in hoeverre de waargenomen trends in de gemeten concentraties (waterkwaliteitsverbetering) in de periode 1996-2009 worden veroorzaakt door veranderingen in externe belasting dan wel interne belasting (of retentie).

De algemene vergelijking¹⁰ van het balansmodel is:

$$C_t = ((V_{KV} - \Sigma Q_{in}) * C_{t-1} + \Sigma(Q_{in} * C_{in})) / V_{KV} + k * C_{t-1}$$

waarin

- C_t = de maandgemiddelde concentratie in maand t (g.m^{-3})
- V_{KV} = het watervolume van het Krammer-Volkerak (m^3)
- ΣQ_{in} = de som van inkomende debieten in maand t (m^3/maand)
- k = procescoëfficiënt voor de bron- of putterm ($1/\text{maand}$)
- $C_{(t-1)}$ = de maandgemiddelde concentratie in de voorafgaande maand (g.m^{-3})
- C_{in} = de concentratie in elk van de inkomende debieten in maand t (g.m^{-3})

Met het model is de gehele periode van 14 jaren (1996-2009, totP en totN) respectievelijk 10 jaren (2000-2009, DIN en orthoP) doorgerekend. De startconcentraties zijn iteratief vastgesteld. Het model is voor alle vier stoffen twee keer toegepast, één keer zonder en één keer met de processterm (de laatste term in de vergelijking). De eerste toepassing geeft als resultaat de verwachte concentratie onder invloed van uitsluitend de externe belasting. Dit is de zogenaamde conservatieve concentratie (de paarse lijnen in de navolgende figuren). In de tweede toepassing, met processterm, is de procescoëfficiënt zodanig gefit dat de berekende concentratie zoveel mogelijk gelijk is aan de gemeten concentratie (de groene lijnen in de navolgende figuren). De gemeten concentraties zijn met blauwe lijnen weergegeven.

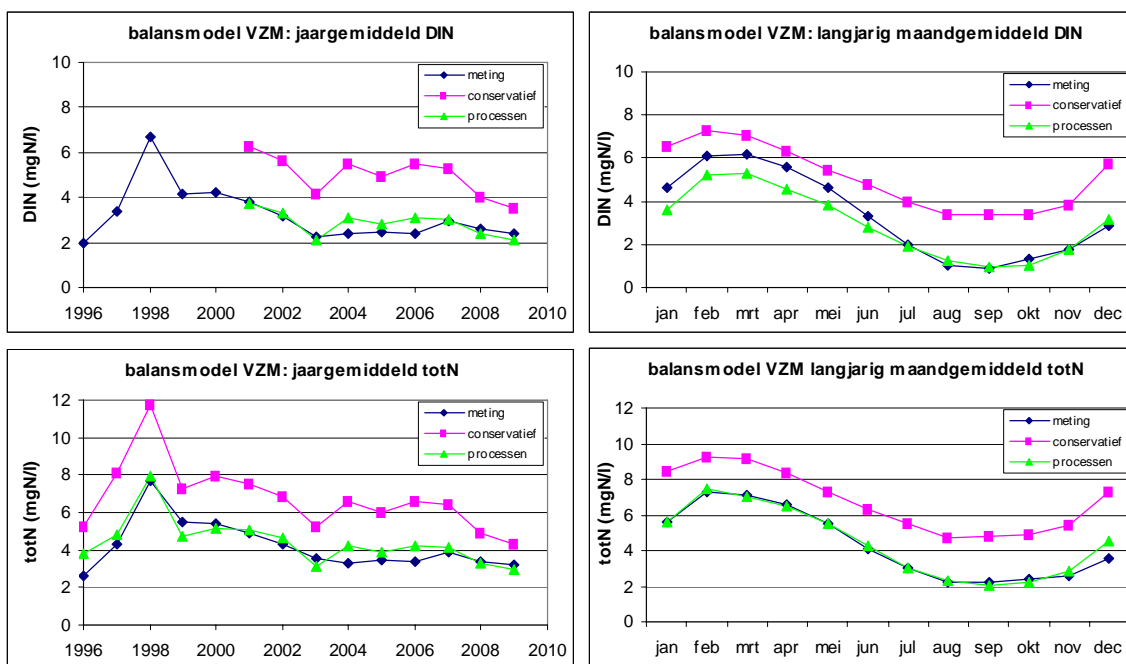
Met nadruk wordt hier opgemerkt dat het balansmodel slechts beschrijvend en op geen enkele manier verklarend is. Daarmee is het gebruik van het balansmodel precies omgekeerd vergeleken met een verklarend model. In een verklarend model zijn code en coëfficiënten gebaseerd op werkelijke fysische, chemische en/of biologische processen en wordt daarmee het gemeten systeemgedrag, de werkelijkheid, gereproduceerd (na kalibratie en verificatie). Met het balansmodel wordt door middel van een fitprocedure het onbekende proces gekwantificeerd dat nodig is om het gemeten systeemgedrag te reproduceren.

¹⁰ Bij een aanzienlijk verschil tussen C_t en C_{t-1} , zoals kan optreden bij de lange tijdstap van een maand, kan een orde 15% nauwkeuriger resultaat worden bereikt door de uitstroming te kwantificeren met $\Sigma Q_{in} * (C_t + C_{(t-1)})/2$ ipv $\Sigma Q_{in} * C_{(t-1)}$, en dan de termen met C_t naar links van het = teken te brengen. Iets soortgelijks kan worden gedaan met de eerste-orde processen: $k * (C_t + C_{(t-1)})/2$. Deze nauwkeurige formulering is in de hier gerapporteerde resultaten van het balansmodel doorgevoerd.

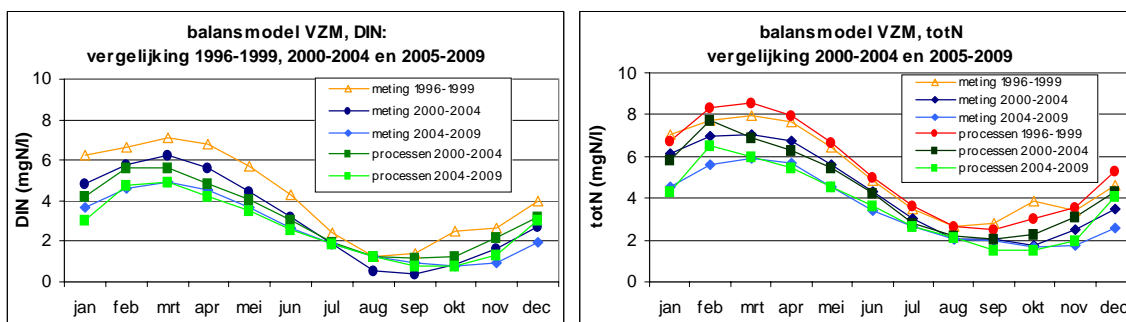
En dit gekwantificeerde proces (de berekende flux) zal vervolgens achteraf moeten worden geïnterpreteerd: welk fysisch, chemisch of biologisch proces (of combinatie van processen) kan de betreffende flux veroorzaken?

4.1 Stikstof

De berekende conservatieve concentraties van zowel DIN als totN zijn in alle jaren en alle seizoenen hoger dan de gemeten concentraties. Het verschil neemt in de loop van de zomer toe, en in herfst en winter weer af. Met één eenvoudig 1^e orde retentieproces, voor alle jaren gelijk en variërend van 0,1/maand (jan-apr) tot 0,5/maand (aug) voor DIN en van 0,02/maand (jan) tot 0,38/maand (aug) voor totN kunnen zowel de gemeten jaargemiddelde concentraties als het gemeten gemiddelde seizoensverloop nagenoeg exact worden gereproduceerd (Figuur 20). Te denken valt aan de combinatie van (temperatuurafhankelijke) denitrificatie waardoor nitraat (DIN) uit het systeem verdwijnt (een echte putterm) en de biologische cyclus van productie en mineralisatie: omzetting van DIN in organisch gebonden stikstof en vice versa, en bodem-water uitwisseling.



Figuur 20. Balansmodel stikstof 1996-2009



Figuur 21. Balansmodel stikstof, seizoensverloop 1996-1999, 2000-2004, 2005-2009

Figuur 21 geeft dezelfde meerjarig maandgemiddelde resultaten weer als Figuur 20, maar dan opgedeeld in drie subperiodes 1996-1999, 2000-2004 en 2005-2009. De verschillen tussen de drie periodes zijn klein, vooral voor DIN; en worden toch nagenoeg exact gereproduceerd door het model. Tabel 5 vat de resultaten samen.

Tabel 5. Samenvatting stikstofbalans

stikstof - externe en interne belasting						
	concentratie	externe aanvoer	interne 'bron'		interne 'put'	
	mg/l	g/m ² /jaar	g/m ² /jaar	% van extern	g/m ² /jaar	% van extern
DIN						
1. 1996-1999	4,05					
2. 2000-2004	3,17	81			-41	-51%
3. 2005-2009	2,58	70			-35	-50%
verschil 1-2	-22%					
verschil 2-3	-19%	-13%			-15%	
totN						
1. 1996-1999	5,02	123			-55	-44%
2. 2000-2004	4,29	99			-45	-46%
3. 2005-2009	3,45	86			-38	-45%
verschil 1-2	-15%	-20%			-17%	
verschil 2-3	-20%	-13%			-16%	

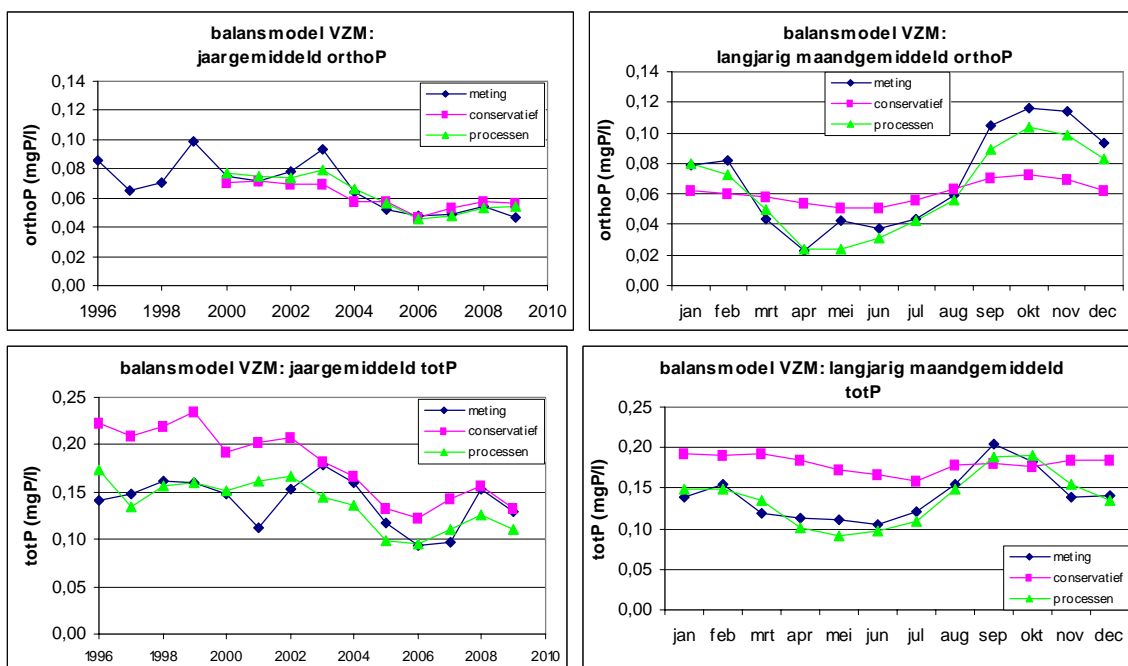
- het verschil (afname) tussen de gemiddelde gemeten stikstofconcentraties van de drie opeenvolgende subperiodes is ongeveer 20% per 5 jaar. Alleen voor totN is de afname van periode 1 naar periode 2 kleiner (15%). Deze overall afnemende trend komt redelijk overeen met de afname van de externe belasting van 13-20% per 5 jaar
- er is geen interne belasting van stikstof; de 'bronterm' is 0
- de helft van DIN 'verdwijnt' uit het systeem door denitrificatie. De absolute grootte van de putterm voor DIN en totN is nagenoeg gelijk (35-38 g/m²/j in 2005-2009), en kan dus nagenoeg geheel door denitrificatie worden verklaard. Deze 'putterm' neemt ook proportioneel af met de afname van de concentratie en de externe belasting (15 %).

Deze volledige consistentie van het beeld van de stikstofbalans is voor een deel toevallig, want afhankelijk van de gekozen periode indeling (drie periodes van gelijke lengte). Bij een andere indeling vallen de getallen van trendmatige daling anders uit. Maar die toevalligheid accentueert juist de echte consistentie van het beeld dat voor stikstof naar voren komt: De verschillen tussen natte en droge jaren (met de extremen 1998 als nat jaar en 2003 als droog jaar) leiden tot grote vrachten in natte en lage vrachten in droge jaren, die doorwerken in de jaargemiddelde concentraties in het VZM: hoge concentraties in natte en lage in droge jaren. Daaroverheen zit een geleidelijke trendmatige afname van de concentraties in zowel de aangevoerde debieten als in het VZM zelf. En dit alles wordt exact gereproduceerd met het balansmodel: Trends en variaties in concentraties zijn geheel consistent met trends en variaties in externe belasting, en verschillen tussen conservatieve en gemeten concentraties zijn geheel verklaarbaar met denitrificatie als verdwijnpocess.

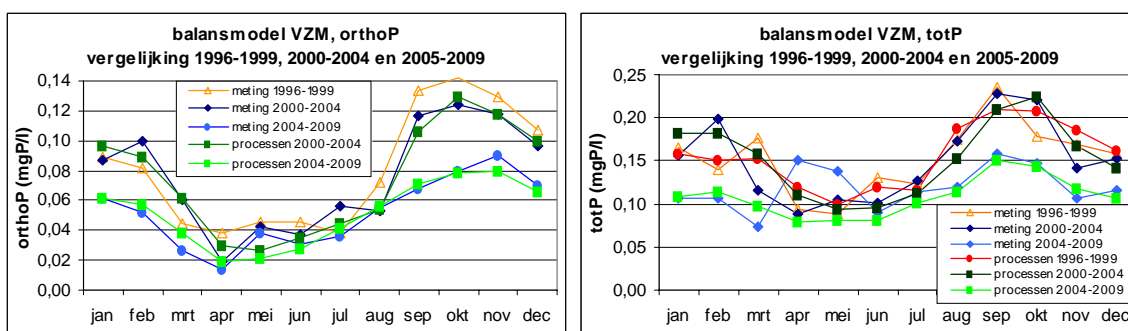
4.2 Fosfaat

De berekende conservatieve concentraties verschillen op allerlei manieren, dus allerminst eenduidig, van de gemeten concentraties. Voor orthoP zijn de jaargemiddelde conservatieve concentraties opmerkelijk in overeenstemming met de gemeten concentraties. Maar achter dit jaargemiddelde schijnbare conservatieve gedrag schuilt een maandgemiddelde "waarheid", waarbij vanaf september tot februari negatieve verschillen optreden (hogere gemeten concentratie dan je op basis van conservatief gedrag zou verwachten) en in de zomer juist positieve verschillen.

Voor totP zijn er zowel grote verschillen tussen de jaargemiddelde als de maandgemiddelde concentraties (Figuur 22). Zo is de jaargemiddelde conservatieve concentratie van 1996-2001 veel hoger dan de gemeten concentratie. Er is blijkbaar een behoorlijke netto retentie van totP, die wel trendmatig afneemt. De gemeten concentratiestijging van totP in 2001-2003 is niet te verklaren uit de externe belasting, die na 2002 afneemt. Bovendien is de seizoensvariatie, vooral de zomerse toename, voor zowel orthoP als totP sterk verschillend tussen 1996-2004 enerzijds en 2005-2009 anderzijds (Figuur 23). De intensiteit van de interne processen is blijkbaar verschillend in de twee subperiodes.



Figuur 22. Balansmodel fosfaat 1996-2009



Figuur 23. Balansmodel fosfaat, seizoensverloop 1996-1999, 2000-2004, 2005-2009

Met de volgende veronderstelde interne 1^e orde processen werd de beste 'fit' verkregen in alle plaatjes:

- een 'put'term voor totP van 10-30% per maand gedurende bijna het gehele jaar in de periode 1996-1999 en van november t/m mei in de periode 2000-2009. Voor orthoP is de putterm 20-50% per maand, maar beperkt tot 3 maanden in het vroege voorjaar (februari-april). Gedacht kan worden aan adsorptie van orthoP en opname van orthoP door algen in het voorjaar, afvoer van dit org-P naar de bodem in de zomer en sedimentatie van AAP (anorganisch geadsorbeerd P) (vooral) in de winter.
- een 'bron'term voor ortho-P met een afnemende intensiteit over de jaren, gedurende aug-jan (0,1-0,6/maand in 2000 en afnemend tot 0,0-0,1/maand in 2007-2009). Gedacht kan worden aan netto nalevering van de bodem (desorptie en mineralisatie)
- de bronterm voor totP is veel kleiner (0,1-0,3/maand in 2000-2004, afnemend tot 0,0-0,2/maand in 2005-2007) en beperkt tot een kortere periode (aug-okt).

Tabel 6 vat de resultaten samen.

Tabel 6. Samenvatting fosfaatbalans

fosfaat - externe en interne belasting						
	concentratie	externe aanvoer	interne 'bron'		interne 'put'	
	mg/l	g/m ² /jaar	g/m ² /jaar	% van extern	g/m ² /jaar	% van extern
orthoP						
1. 1996-1999	0,080					
2. 2000-2004	0,076	0,92	0,56	61%	-0,30	-32%
3. 2005-2009	0,050	0,78	0,14	18%	-0,22	-28%
verschil 1-2	-5%					
verschil 2-3	-34%	-16%	-76%		-27%	
totP						
1. 1996-1999	0,153	3,26	0,02	1%	-1,33	-41%
2. 2000-2004	0,150	2,73	0,49	18%	-1,23	-45%
3. 2005-2009	0,118	2,10	0,12	6%	-0,81	-39%
verschil 1-2	-1%	-16%			-7%	
verschil 2-3	-22%	-23%	-75%		-34%	

- het algemene beeld voor orthoP is dat de gemeten daling van de concentratie na 2004, jaargemiddeld en vooral in de nazomer (34%), voor minder dan de helft kan worden verklaard uit de afgenomen externe belasting (16%). Om de gemeten concentraties te reproduceren 'moet' worden verondersteld dat de interne belasting (bodemmobilisatie) in de recente jaren met 75% is afgenomen. Deze interne belasting bestaat geheel uit (bodemmobilisatie van) orthofosfaat, omdat de absolute grootte van de bronterm nagenoeg gelijk is voor orthoP en totP (0,49-0,56 g/m²/j in 2000-2004 en 0,12-0,14 g/m²/j in 2005-2009)
- een flink deel van de externe aanvoer 'verdwijnt' permanent uit het systeem. Deze 'putterm' is 30% van de externe belasting voor orthoP en 40% van de externe belasting voor totP, en neemt meer dan proportioneel af vergeleken met de afname van de externe belasting (ongeveer 30%). De absolute grootte van de putterm is voor orthoP veel kleiner dan voor totP en moet dus voor het overgrote deel (80%) bestaan uit sedimentatie van AAP (anorganisch geadsorbeerd P)
- het balansmodel, en bovengenoemde fluxen en interpretaties laten voor fosfaat een aantal waarnemingen onbeschreven en dus onverklaard.

4.3 Conclusies balansmodel

Voor stikstof kan een eenvoudig en consistent beeld worden geschetst dat alle waargenomen jaartrends en seizoensvariaties nagenoeg exact, volledig en gedetailleerd kan verklaren:

1. gemeten debiet-concentratie- en debiet-vrachtrelaties kunnen gemeten concentraties in het VZM volledig verklaren, zowel de verschillen en trends in jaargemiddelde concentraties als de (zeer geringe) trends in de gemiddelde seizoensvariatie.
2. vrachten, concentraties en de permanente 'verdwijning' van stikstof uit het VZM zijn in de recente jaren (2005-2009) een kleine 20% lager dan in 2000-2004 en 30-40% lager dan in 1996-1999
3. Dit verschil wordt voor een belangrijk deel veroorzaakt door het weer, dus variatie ten gevolge van natte en droge jaren, en verder door de dalende concentraties in de aanvoerende debieten, vooral vanuit Brabant.
4. de stikstofconcentratie in het VZM wordt geheel bepaald door de externe belasting en door denitrificatie, waardoor 50% van de externe belasting uit het systeem wordt verwijderd

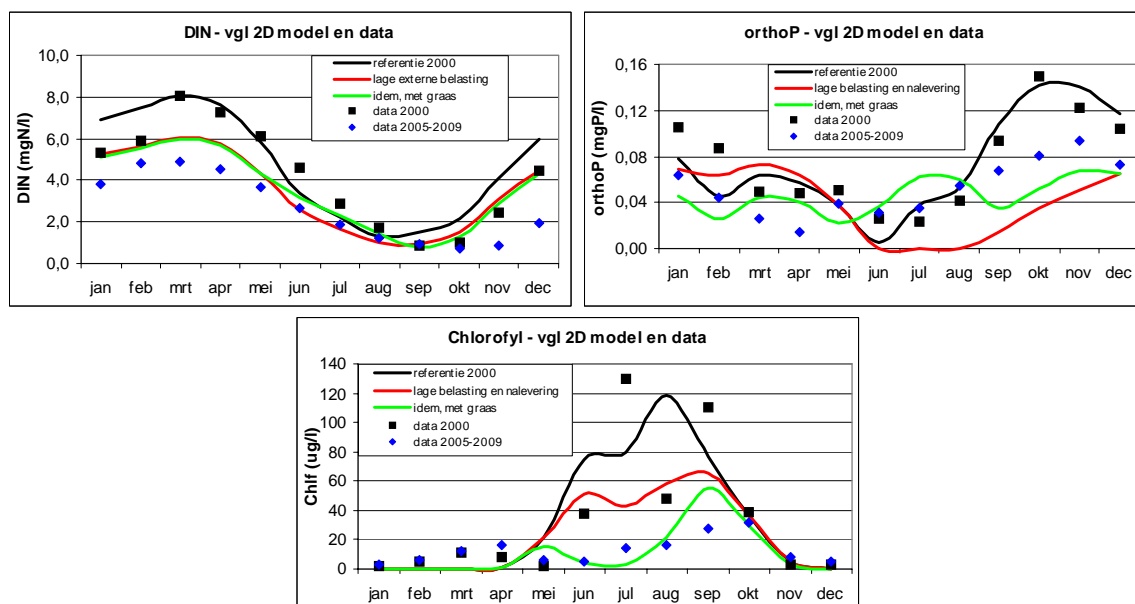
Voor fosfaat is het beeld minder consistent, zijn de mogelijke verklaringen minder volledig en vooral ook ingewikkelder en verschillend van stikstof:

1. er is geen debiet-concentratie relatie in de aanvoerende debieten, en de vracht-debiet relatie kan noch de variatie van de jaargemiddelde concentraties in het VZM, noch de (sterke trends in de) gemiddelde seizoensvariatie verklaren
2. waargenomen verschillen en trends kunnen niet worden gerelateerd aan de variatie ten gevolge van natte en droge jaren, en wel grotendeels aan de dalende concentraties in de aanvoerende debieten, vóór 2000 het Hollandsch Diep en ná 2003 Brabant
3. De concentratiedaling van orthoP na 2004 (34%) is sterker dan de vrachtvermindering (16%). Om dit te verklaren 'moet' worden verondersteld dat de interne belasting (bodemmobilisatie) in de recente jaren met 75% is afgenomen. De interne belasting bestaat geheel uit (bodemmobilisatie van) orthofosfaat
4. Een flink deel van de externe aanvoer (30% voor orthoP en 40% voor totP) 'verdwijnt' permanent uit het systeem. Deze putterm moet voor het overgrote deel (80%) bestaan uit sedimentatie van AAP (anorganisch geabsorbeerd P).
5. een deel van de waargenomen trends en variaties blijft onbeschreven en dus onverklaard

5 2D waterkwaliteitsmodellering nieuwe referentie situatie

Het bestaande 2D waterkwaliteits- en ecologisch model van het VZM is opgezet voor het referentiejaar 2000. Met de nu beschikbare uitkomsten van het balansmodel is dit model opnieuw toegepast voor de periode 2004-2009 ("aangepaste referentie"). Dit brengt de volgende aanpassingen met zich mee (vgl Tabel 5 en Tabel 6):

- lagere externe belasting voor zowel stikstof (ongeveer 20%) als fosfaat (ongeveer 30%), ten gevolge van de lagere concentraties in de aanvoerende debieten, vooral uit Brabant
- een kleinere interne put voor fosfaat in winter en voorjaar, 28% minder
- een veel kleinere interne bron (nalevering) voor fosfaat in de nazomer, 75% minder



Figuur 24. Ongekalibreerde uitkomsten 2D VZM model aangepaste referentie

Figuur 24 vat de resultaten samen, de figuur vergelijkt de oude modeluitkomst voor de referentiesituatie zoals gerapporteerd in de mer-studie (zwarte lijnen), met de modeluitkomst waarin de bovenstaande 3 wijzigingen zijn doorgevoerd (rode lijnen). Vervolgens is het model nog een keer gedraaid, met:

- een sterke graas door zooplankton (ontleend aan Michielsens, 1996, zie ook Hoofdstuk 7)

Ook dit is weergegeven in Figuur 24 (groene lijnen). Ter vergelijking zijn ook de meetgegevens voor het oude referentiejaar 2000 (zwarte punten) en de meerjarig maandgemiddelde data voor de periode 2005-2009 (blauwe punten) in de figuur weergegeven.

De volgende zaken vallen op wat betreft het effect van een lagere externe en interne belasting (vergelijking van de zwarte en rode lijnen in Figuur 24):

- voor stikstof wordt het consistente beeld bevestigd; de concentratie in het VZM reageert proportioneel op de lagere externe belasting. De concentratie blijft echter hoog en is (in het model) nooit limiterend voor de algenproductie. Stikstof is in het model dus niet sturend voor het systeemgedrag, in casu de algenontwikkeling. In het VZM zelf is er volgens de metingen overigens wel een indicatie voor stikstoflimitatie, kortdurend in de nazomer (augustus-oktober) en beperkt tot de jaren 2001-2005; daarna niet meer (vgl ook Figuur 5).
- voor fosfaat wordt het algemene beeld van een geringe afname van de winterconcentratie en een sterke afname van de nazomerconcentratie door het model gereproduceerd. Maar er is een overduidelijk verschil tussen modelgedrag en metingen, en dat is de langdurige uitputting van orthofosfaat gedurende de zomer, die niet te zien is in de metingen (vgl ook Figuur 6). In werkelijkheid is er wel sprake van fosfaat uitputting, maar altijd kortdurend, beperkt tot het vroege voorjaar. Bovendien lijkt in de recente jaren de orthofosfaatuitputting eerder te verdwijnen dan sterker te worden.
- deze discrepantie tussen modelgedrag en werkelijkheid hangt samen met de algenontwikkeling: in het model neemt de algenconcentratie minder af (ongeveer 30%) dan volgens de metingen (meer dan 60%, vgl. ook Figuur 9).
- in één zin het verschil tussen model en werkelijkheid: afnemende externe en interne belasting van fosfaat zou een afname van een fosfaatgelimiteerde algenconcentratie met 30% kunnen verklaren, de waargenomen algenafname is twee keer zo sterk en wordt niet veroorzaakt door fosfaat- (of stikstof) limitatie.

De derde modelrun illustreert dat graas dit verschil kan verklaren (groene lijnen in Figuur 24):

- onder invloed van graas kan de algenbiomassa zeer sterk worden gereduceerd
- voor stikstof heeft dit nauwelijks effect. Er is zo'n overmaat aan stikstof aanwezig dat het grote verschil in de hoeveelheid algen, en dus opname en vastlegging van DIN, bijna niet zichtbaar is als ander DIN-gedrag
- voor orthofosfaat is het verschil wel heel groot; blijkbaar wordt de cyclus van P-opname door algenproductie en het weer vrijkomen van orthoP door excretie en mineralisatie geïntensiveerd en versneld: de langdurige P-limitatie (volgens de rode lijn) is geheel verdwenen en de berekende orthoP concentratie komt ongeveer uit op het gemeten niveau in de recente jaren.

6 Verklarende hypothese afnemende P-concentratie

De gehalten ortho-P en totaal-P in het Volkerakmeer en het Zoommeer ontwikkelen zich na de afsluiting gelijksoortig, zowel over de jaren heen als seizoensmatig. De concentraties zijn overeenkomstig, maar in het Zoommeer zijn ze wel meer constant, vermoedelijk omdat de nutriëntenbelasting vanuit het Volkerakmeer minder gepiekt is dan de nutriëntenbelasting op het Volkerakmeer vanuit West-Brabant. Er doen zich dus vergelijkbare ontwikkelingen voor in beide meren.

Na de afsluiting gaat ortho-P na aanvankelijke kortdurende stijging aanzienlijk omlaag, en deze daling gaat gepaard met lagere algengehalten en verhoogd doorzicht. De stikstofgehalten nemen juist toe. Een mogelijke verklaring is verhoogde vastlegging van fosfaat in de bodem door toegenomen adsorptiecapaciteit van de bodem als gevolg van de zout-zoetomslag, en daardoor minder nalevering. Deze situatie duurt van 1989 tot 1992. Daarna stijgt ortho-P weer tot 1995, waarschijnlijk door verhoogde nalevering. Dan doet zich stabilisatie voor tot 2004, waarna ortho-P opnieuw duidelijk lager wordt, mogelijk als gevolg van teruglopende P-belasting en toenemende vastlegging in de bodem. In recente jaren is de P concentratie weer ongeveer net zo laag als in de periode 1990-1994 en gaat weer gepaard met lagere algengehalten en toenemend doorzicht. Zijn de blauwalgen op de terugtocht?

De nutriëntenbelastingen op het VZM worden gedomineerd door de vrachten vanuit Brabant (Dintel en Steenbergse Vliet), voor fosfaat in iets mindere mate dan voor stikstof. De stikstof- en fosfaatbelastingen zijn in de periode 2005-2009 20% resp. 30% lager dan in de periode 2000-2004. De gehele periode 1996-2009 overziend zijn voor zowel stikstof als fosfaat de externe vrachten hoog in de periode 1998-2002 en dalen van 2002 naar 2003 'plotseling' naar een lager niveau gedurende 2003-2009. Niveauverschil en plotselinge daling zijn voor fosfaat veel groter dan voor stikstof: meer dan 50% voor P en orde 30% voor N, en worden vooral veroorzaakt door debietvariatie en niet door (plotseling) dalende concentraties in de aanvoerdebieten.

Voor stikstof zijn de concentraties in het VZM zowel wat betreft de verschillen tussen de jaren als de seizoensvariatie direct en consistent gerelateerd aan de externe belasting. Voor fosfaat zijn de relaties tussen externe belasting en concentratie in het VZM hooguit indirect (uitgestelde respons 2003-2004), meestal afwezig (1996-1998) of zelfs tegengesteld (seizoensvariatie).

De nalevering van fosfaat door de bodem (interne bron) is in de periode 2005-2009 ten opzichte van de periode 2000-2004 mogelijk zo'n 75% afgenomen. De nalevering lijkt dus veel sterker af te nemen dan de externe belasting.

In de gehele periode 1996-2009 is sprake van continue netto accumulatie van P in de bodem. De interne put (afvoer naar de bodem) is aanzienlijk, ongeveer 40% van de externe vracht voor totaal-P en ongeveer 30% van de externe vracht voor ortho-P¹¹. De interne belasting (nalevering) is volgens het balansmodel voor ortho-P in de jaren 2000-2004 bijna twee keer zo groot als de accumulatie (bijna 60% van de externe vracht) en is in de jaren 2005-2009 twee keer zo klein als de accumulatie (minder dan 20% van de externe vracht).

¹¹ dit verschil is gerelateerd aan het verschil in speciatie: de externe belasting bestaat voor slechts 30 % uit ortho-P, in het VZM is de ortho-P concentratie 50% van totaal-P

Dit alles leidt tot de hypothese dat de goed mobiliseerbare c.q. mobiele fosfaatfractie in de bodem van het VZM geleidelijk wordt omgezet naar een slecht mobiliseerbare c.q. immobiele fractie.

Bekend is dat fosfaat in de waterbodem kan voorkomen in de volgende vormen:

1. organisch gebonden fosfaat (hoofdzakelijk algendetritus in zandige en slibbige bodems, voor een groot deel ook plantendetritus in veenbodems);
2. geadsorbeerd fosfaat (primair gebonden aan ijzer(III)oxyhydroxiden, maar ook aan aluminiumhydroxiden en klei);
3. fosfaat geprecipiteerd in ijzer(II)fosfaat (vivianiet); en
4. fosfaat geprecipiteerd in en chemisch gebonden (adsorptie) aan apatiet-achtige mineralen (calciumfosfaten) in combinatie met calciumcarbonaat.

Organisch fosfaat wordt deels traag afgebroken, dat wil zeggen afgesplitst van de organische matrix, en is deels zeer refractair, soms ook aanwezig in polymere vorm. Geadsorbeerd fosfaat is reversibel gebonden, en desorbeert gemakkelijk bij verlaagd opgelost gehalte of bij de chemische reductie van ijzer en mangaan in de vaste stofmatrix. Vivianiet is een deels amorf en deels kristallijn mineraal, dat weer kan oplossen bij onderverzadiging. Vivianiet zal vrij snel oplossen door oxidatie van ijzer in een zuurstofhoudende omgeving. Het mineraal is dus alleen stabiel in een anaerobe omgeving. Apatiet-achtige fosfaten zijn in hoge mate amorf doch stabiele mineralen, die een van watersysteem tot watersysteem variërende gemiddelde samenstelling hebben, en die zeer traag oplossen bij onderverzadiging (pH-afhankelijk). De vorming van de mineralen is traag.

Dit leidt tot het volgende algemene beeld van de speciatie van fosfaat in de waterbodem. De fracties organisch gebonden en geadsorbeerd fosfaat nemen af vanaf het sediment-water grensvlak. Geadsorbeerd fosfaat neemt steil af rond het grensvlak geoxideerd-gereduceerd dat zich gemiddeld op een diepte van zo'n halve centimeter in de bodem bevindt¹². Vivianiet neemt vanaf deze diepte in concentratie toe. De concentratie van vivianiet stabiliseert op een bepaald niveau in de onderste helft van de actieve bodemlaag, die voor zoet water zo'n 10 cm dik is. Indien de waterbodem calciumcarbonaat bevat, wat in het VZM in aanzienlijke mate het geval is, kan zich zeer stabiel apatiet-achtig fosfaat vormen in de gehele actieve bodemlaag,

Voor fosfaat in het VZM wordt nu de volgende hypothese geformuleerd:

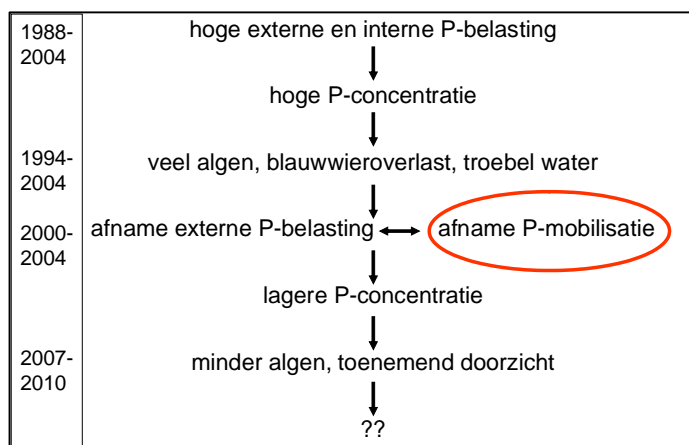
Gegeven het aanzienlijke calciumcarbonaatgehalte van het bodemsediment vormt zich daarin zeer stabiel apatiet-achtig fosfaat. Dit leidt tot de netto vastlegging van fosfaat in de waterbodem. Met het voortschrijden van de tijd en het afnemen van de externe fosfaatbelasting wordt een steeds groter deel van het in de bodem opgeslagen fosfaat immobiel. De nalevering van fosfaat neemt bij gelijkblijvende of dalende externe belasting verder af. De fosfaatlimitatie van algen neemt toe, de algengehalten af. Dit proces is progressief totdat de precipitatieflux van apatiet-achtig fosfaat weer in balans is met de externe fosfaatbelasting.

¹² Dit grensvlak vertoont een sterkte seizoensvariatie onder invloed van de biologische productie-mineralisatiecyclus. In voorjaar en zomer schuift het grensvlak omhoog door een toenemende zuurstofvraag en desorbeert fosfaat onder het grensvlak, in de winter schuift het grensvlak omlaag doordat de zuurstofvraag afneemt en adsorbeert fosfaat in de toplaag boven het grensvlak.

Deze hypothese kan worden onderzocht door bemonstering en chemische analyse van het bodemsediment in het VZM, en een modelmatige analyse kan de interpretatie van deze gegevens ondersteunen. Wellicht zijn er nog in het lab geconserveerde sedimentkernen en/of bodemmonsters beschikbaar die bruikbare indicaties met betrekking tot de historische ontwikkeling van de fosfaatspeciatie kunnen opleveren. Een nieuwe bemonsteringsronde kan voorzien in een beeld van de huidige fosfaatspeciatie.

De modelanalyse kan worden uitgevoerd met Delft3D-ECO op basis van "Delwaq-G". Dit behelst de expliciete modellering van de kwaliteit van de chemisch gestratificeerde actieve sedimentlaag binnen een integraal eutrofiëringsmodel van het VZM. Het betreffende model met daarin de 4 bovengenoemde fosfaatcomponenten is al met goed gevolg gekalibreerd voor het Veluwemeer (1976-1992), waarin zich een soortgelijke ontwikkeling van nalevering en fosfaatspeciatie heeft voorgedaan (Smits, pers. mededeling).

7 Discussie, conclusie en aanbeveling



Figuur 25. Lineair oorzaak-gevolg schema eutrofiering VZM

De normale opeenvolging van en proportionele relaties tussen oorzaak en gevolg waarmee in eerste instantie is geprobeerd de waargenomen trends te verklaren is in schema weergegeven in Figuur 25. In woorden: Hoge externe fosfaatbelasting en nalevering van fosfaat uit de bodem veroorzaken hoge P-concentraties, een hoge algenproductie, blauwwieroverlast en vertroebeling van het water. De trendmatige afname van de externe P-belasting vanuit het Hollandsch Diep sinds 2000 en vanuit Brabant sinds 2004 veroorzaakt zowel een

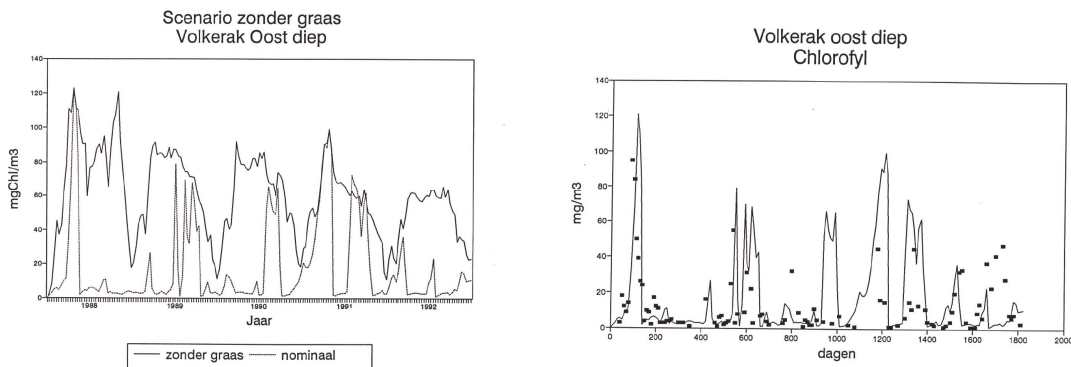
afnemende nalevering evenals daardoor lage P-concentraties, minder algen en toenemende helderheid van het water. De verwachting is dan dat, bij een blijvend lage externe belasting, de kwaliteitsverbetering zal doorzetten en de blauwwieroverlast geleidelijk geheel zal verdwijnen.

Er zijn echter waarnemingen die niet sporen met deze verklaring:

1. de eerste heldere periode met lage fosfaatgehaltenes en weinig algen, 1988-1994
2. de recente alganafname is veel sterker dan de afname van de fosfaatgehaltenes
3. de huidige kleine hoeveelheid algen wordt niet door N, P, of licht gelimiteerd

7.1 De heldere periode 1988-1994

De eerste 5-7 jaren na de afsluiting was het VZM helder, en was de algenconcentratie laag, terwijl de P-concentraties in de aanvoerende debieten hoog waren. Er lijkt zelfs sprake van een omgekeerde oorzaak-gevolg relatie: lage P-concentraties ($\leq 0,05$ mg/l, vanaf 1990) volgen met twee jaren vertraging op de lage algenconcentraties (vanaf 1988) (vergelijk Figuur 6 met Figuur 9). In deze periode was de witvisstand (Brasem) nog laag en ontwikkelde zich een hoge zoöplanktonbiomassa, die een sterke graasdruk uitoefende op het fytoplankton. Beschikbare metingen komen uit op een maximale zoöplanktonbiomassa van $0,3$ gC/m³ en een filtratiesnelheid van 3 l/mgC/dag (na kalibratie verhoogd tot 3,5 l/mgC/dag, Michielsen, 1996). Bij een dergelijke graasdruk wordt het gehele watervolume van het meer binnen één dag gefilterd, en dat elke dag opnieuw!



Figuur 26. DBS-toepassing VZM 1988-1992, hoeveelheid algen zonder (links) en met (rechts) graasdruk. Gemeten chlorofyl in rechter figuur (punten)

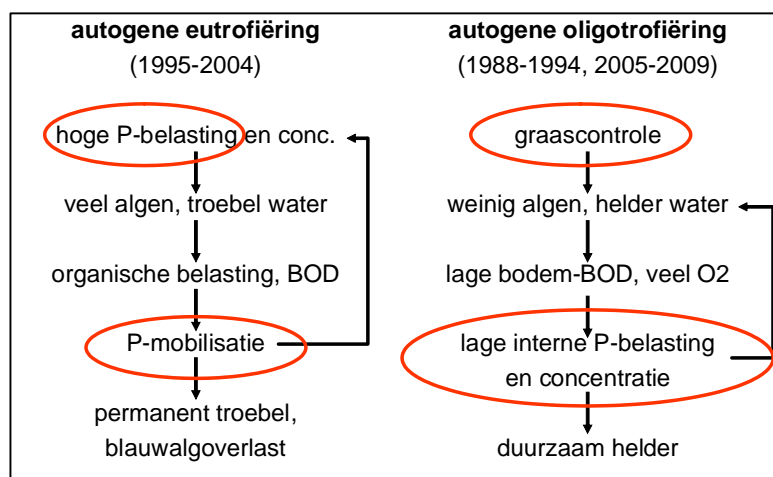
Figuur 26 toont het resultaat van modelberekeningen voor het VZM voor de periode 1988-1992 waarin deze intense graasdruk is gesimuleerd (Michielsen, 1996). Graasdruk door zoöplankton kan continue hoge algenconcentraties ($>100 \mu\text{g/l}$) reduceren tot sporadische kortdurende pieken bij overigens zeer lage algenniveaus ($\leq 20 \mu\text{g/l}$). Dit oorzakelijke verband tussen graasdruk, weinig algen en helder water in het VZM kan voor de periode 1988-1994 bewezen worden geacht.

7.2 Algenafname sterker dan daling P-concentratie, geen nutriëntenlimitatie

Door de toename van de brasem viel na 1994 de graasdruk weg en werd de hoeveelheid algen niet meer door de groeisnelheid beperkt. Door de hoge concentraties nutriënten is er alleen heel kort in het voorjaar sprake van P-limitatie, en heel kort in de nazomer (soms) N-limitatie. Maar gedurende het overgrote deel van het seizoen worden algen beperkt door de hoeveelheid licht in de waterkolom. En die lichtbeperking treedt pas op bij $>100 \mu\text{g/l}$ chlorofyl en een zichtdiepte $< 0,5 \text{ m}$. Deze troebele, eutrofe periode met toenemende blauwwieroverlast duurt van 1994-2004.

Vanaf 2005 treedt verbetering in, die vooral voor de hoeveelheid algen het karakter heeft van een systeemomslag. Simultaan dalen de fosfaatgehalten, vooral van orthofosfaat in de nazomer; en met enige vertraging neemt ook de helderheid van het water weer toe. De daling van het algengehalte (met 60%) is veel sterker dan de daling van het fosfaatgehalte (met 30%) en kan daar niet (geheel) mee worden verklaard. Er is voldoende fosfaat in het VZM voor twee keer zoveel algen als wordt gemeten. De voorraad fosfaat wordt niet opgebruikt, ook stikstof raakt niet op en er is ook genoeg licht voor veel meer algen. Er is met andere woorden geen 'resource' limitatie (N, P of licht). Net als in de eerste heldere periode moet er daarom sprake zijn van 'groeilimitatie'. De verblijftijd van het meer (minimaal 3 maanden) is veel te lang voor groeilimitatie door uitspoeling en verdunning. De brasemstand is te hoog voor de terugkeer van zoöplankton; tenzij de watervlooien voldoende refugium vinden tussen de waterplanten. Maar dat lijkt onwaarschijnlijk. De enige andere mogelijke veroorzaker van de recente graasdruk is de gewone driehoeksmossel (*Dreissena polymorpha*) en/of de recente exoot, de quagga mossel (*Dreissena bugensis*). Er is beperkte reguliere biologische monitoring in het VZM. Deze duidt op de aanwezigheid en een forse toename van de quagga mossel (mededeling Robert Jentink, Rijkswaterstaat Zeeland). Graascontrole door mosselen en daardoor lage algengehalten is daarmee waarschijnlijk, maar niet bewezen. Over de aan- of afwezigheid van zoöplankton zijn geen gegevens beschikbaar.

7.3 Verklarende hypothesen systeemgedrag



Figuur 27. Verklarende hypothesen voor zelfgenererende vertroebeling en opheldering in het VZM

(autogeen eutroof) als de heldere toestand (autogeen oligotroof) staan weergegeven in Figuur 27. In beide toestanden is de positieve terugkoppeling en daarmee de autogenese gebaseerd op de bodem-wateruitwisseling van fosfaat, en de afwezigheid dan wel aanwezigheid van grascontrole. Bij een hoge organische belasting van de bodem (veel algen, eutroof, geen begrazing) is er veel nalevering van fosfaat uit de bodem (hoge interne belasting). Enerzijds door mineralisatie van het organisch materiaal waarbij orthofosfaat vrijkomt, anderzijds door zuurstofverbruik (BOD in Figuur 27) waardoor de geoxideerde bovenste bodemlaag dunner wordt en geadsorbeerd fosfaat wordt gemobiliseerd. Mutatis mutandis leidt een lage organische belasting van de bodem (weinig algen door grascontrole, oligotroof) tot weinig nalevering van fosfaat (lage interne belasting). En de lange termijn langzame immobilisatie van fosfaat door mineraalvorming (apatiet, zie Hoofdstuk 6) kan de trendmatige vermindering van de interne P-belasting versterken.

De enige nu nog overblijvende vraag is: wat veroorzaakt de systeemomslag, wat is daarvoor de trigger? Voor de verslechtering, de overgang naar de troebele periode vanaf 1995 is die vraag eenduidig te beantwoorden: Verbrasming is, in combinatie met een hoge fosfaatbelasting, voor veel ondiepe meren beschreven als de oorzaak van vertroebeling. Daarbij speelt nog een tweede versterkende terugkoppeling die de eutrofe toestand in stand houdt: bodemomwoeling door brasem veroorzaakt extra fosfaatmobilisatie.

De nog steeds grote brasemstand in het VZM¹³ maakt het vinden van de trigger voor de recente omslag naar helder water (2005) dus extra lastig. De enig mogelijke verklaring voor deze recente omslag is de afnemende, en inmiddels erg lage externe fosfaatbelasting. Vergelijkbare meren (IJsselmeer, randmeren) laten bij dezelfde lage fosfaatgehalten ook verbetering zien. Het huidige lage fosfaatgehalte is dan weliswaar geen voldoende verklaring voor het huidige lage algenniveau, maar is waarschijnlijk wel de trigger die de omslag naar opheldering in gang heeft gezet.

Het geheel van waarnemingen en daarvoor genoemde verklaringen duiden op een opeenvolging van in zichzelf stabiele systeemtoestanden, die vrij plotseling kunnen omklappen naar een andere toestand: van helder naar troebel en weer terug naar helder. Deze alternatieve toestanden lijken ook zelf-genererend te zijn, ze houden zichzelf in stand door positieve terugkoppelingen in

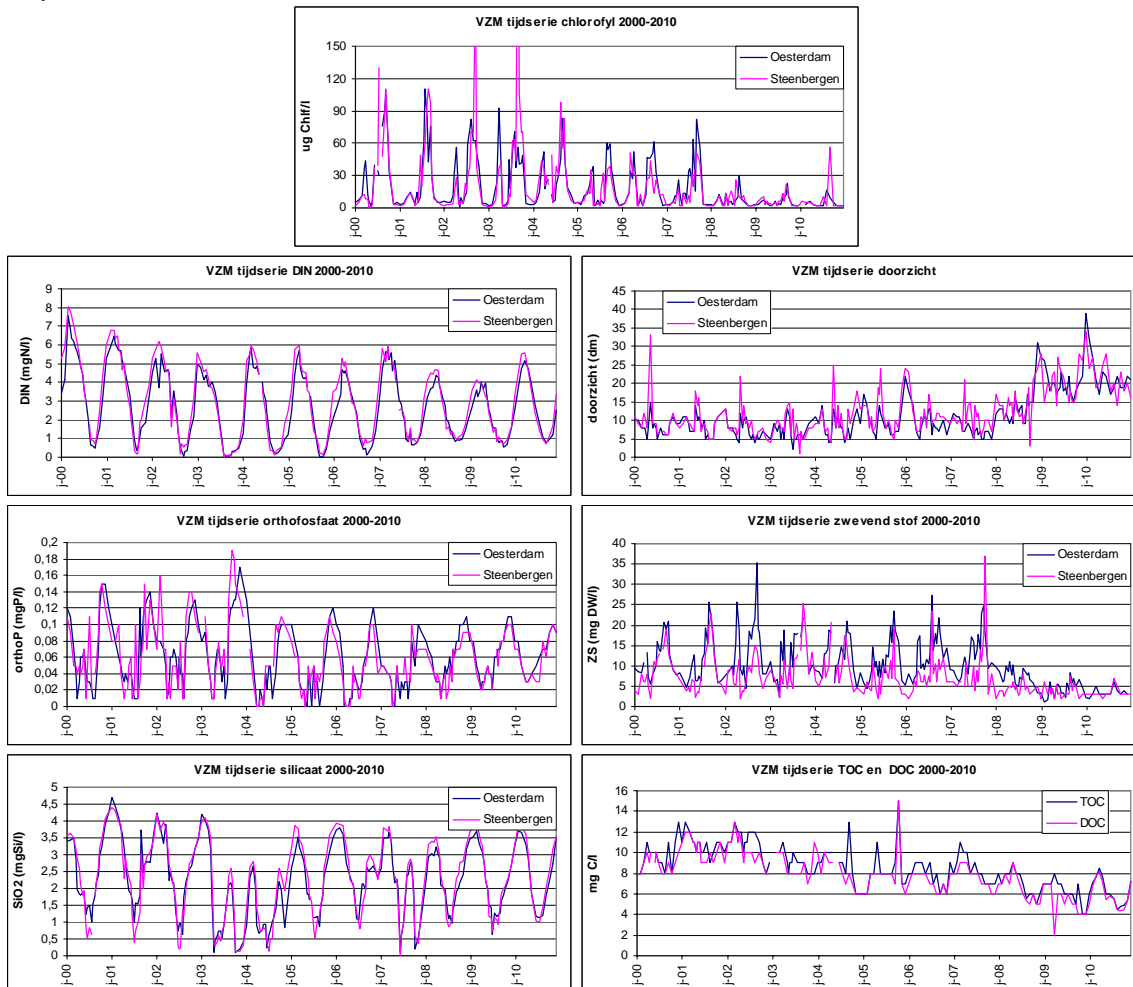
de oorzaak-gevolg relaties. De, vooralsnog hypothetische, oorzaak-gevolg schema's voor zowel de troebele toestand

¹³ ATKB, *Visstandbemonstering Volkerak-Zoommeer*, oktober 2008

ATKB, *Visstandonderzoek Volkerak-Zoommeer november – december 2008*, januari 2009

7.4 Update waterkwaliteitsgegevens tot en met 2010

Figuur 28 presenteert de tijdseries van een aantal waterkwaliteitsvariabelen in het VZM voor de periode 2000-2010.



Figuur 28. Waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer 2000-2010

De gegevens zijn weergegeven voor het meetpunt Oesterdam (Zoommeer) en het meetpunt Steenberg (Krammer-Volkerak). Er zijn geen systematische verschillen tussen de twee meetpunten; de conclusie dat het Krammer-Volkerak-Zoommeer als één volledig gemengd systeem kan worden beschouwd, wordt bevestigd.

Alle variabelen bevestigen de verandering naar een helder meer met een lage algenconcentratie. Specifiek valt het volgende op:

- vanaf 2008 zijn de algenconcentratie en de zwevend stofconcentratie opeens veel lager, en het doorzicht, de helderheid van het water, veel hoger. Ook de concentraties organisch koolstof (TOC, DOC) nemen af, maar meer geleidelijk. Het totaal organisch koolstof (TOC) blijkt voor het grootste deel uit opgelost materiaal (DOC) te bestaan, en weinig particulier materiaal (POC, niet gemeten). Dat moet ook wel, want de TOC concentratie is hoger dan de zwevend stof concentratie (alle, ook niet organische partikels).

- De plotselinge lage algenconcentratie vanaf 2008 valt exact samen met het niet meer uitputten van de nutriënten. Geen enkel nutriënt, N, P, of Si is vanaf 2008 limiterend, alle drie concentraties komen 'los van de x-as'. Gecombineerd met de toegenomen helderheid (geen lichtlimitatie) betekent dit dat er bij steeds lagere algenconcentraties geen enkele resourcelimitatie (licht, N, P, Si) meer is.

Er moet daarom definitief sprake zijn van groeilimitatie, en bij de lange verblijftijd van het VZM (geen groeilimitatie door uitspoeling) is de enige mogelijke verklaring: groeilimitatie door graas. Gegeven de hoge braseemstand is graas door zooplankton onwaarschijnlijk. Blijft als enige plausibele verklaring over: graas door driehoeksmosselen, de gewone en/of de quagga mossel. En die laatste is ook exact rondom de datum van systeemomslag (2007-2008) voor het eerst waargenomen. Graascontrole kan heel goed de specifieke combinatie van verschijnselen verklaren: algen (chlorofyl) en daarmee zwevend stof worden wel begraasd (plotselinge sterke afname) en DOC niet (geringe geleidelijke afname). Daarbij kan worden opgemerkt dat graascontrole door bodemfauna, waaronder driehoeksmosselen, een stabiel systeem geeft dan graascontrole door zooplankton, zoals in de periode 1990-1994 in het VZM. De reden is de langzame populatiedynamica van bodemfauna vergeleken met zooplankton. Bodemfauna is jaarrond aanwezig, en kan dus ook een beginnende algenbloei onderdrukken. Zooplanktonpopulaties ontwikkelen als respons op algenbloei, en graas door zooplankton is daardoor pas met een zekere vertraging ten opzichte van een algenbloei effectief.

7.5 Waterplanten

Vanaf de start van de monitoring (1992) is de aanwezigheid van waterplanten tot 2002 sterk achteruit gegaan. De interne bedekking¹⁴ met waterplanten op het Krammer-Volkerak neemt af van meer dan 60% in 1992 naar 20% in 1995 en verder naar een minimum van 2% in 2002, om daarna weer licht te stijgen. Op het Zoommeer zet de daling veel later in (1998) en is iets minder dramatisch (van 30% in 1998 naar 5% in 2002) en is het herstel sterker (25% in 2004). In 2005-2006 is de interne bedekking van de ondiepe zones op het Krammer-Volkerak toegenomen tot ongeveer 15%, op het Zoommeer tot 20-28%. Naast (submerse) waterplanten (voornamelijk fonteinkruiden en Zannichellia) komen op een kleiner oppervlak wieren voor (draadwieren en darmwier) (Kerkum en van Schie, 2005 en 2008). Voor de jaren na 2006 is geen rapportage beschikbaar. In de zomer van 2009 is er een massale en overlast gevende ontwikkeling van Zannichellia (Figuur 29). De ontwikkeling van waterplanten, zowel de afname als de recente toename, is daarmee qua timing exact tegengesteld aan de ontwikkeling van fytoplankton/blauwalgen. Waterplanten zijn daarbij waarschijnlijk volgend en niet sturend, gezien de grotere affiniteit van fytoplankton voor zowel nutriënten als licht en de veel hogere groeisnelheid (dus kortere reactietijd op gewijzigde omstandigheden). De recente toename van waterplanten kan dus, ondanks de overlast, worden gezien als een teken van herstel van de waterkwaliteit.

¹⁴ de interne bedekking is het deel (van het bodemoppervlak) wat werkelijk begroeid is en is in feite een benadering van de waterplantenbiomassa.



Figuur 29. *Zannichellia sp.* in het Volkerak-Zoommeer in 2009. Links: havenkanaal Oude Tonge, rechts: detail

7.6 Conclusie en aanbeveling

De waterkwaliteit van het VZM verbetert sinds 2005: er zijn minder algen, de helderheid van het water neemt toe en blauwwieroverlast komt minder vaak voor. Waarschijnlijk is deze verbetering in gang gezet door de afgenomen fosfaatvrachten vanuit Brabant.

De lagere externe fosfaatbelasting kan de verbetering slechts ten dele verklaren. De lage algengehaltes, en daardoor de toenemende helderheid worden waarschijnlijk vooral veroorzaakt door 'graascontrole' door driehoeksmosselen (de gewone driehoeksmossel en/of de quagga mossel). En deze gunstige toestand wordt in stand gehouden en versterkt door een systeemrespons van vastlegging van fosfaat in de bodem, waardoor de interne fosfaatbelasting en daarmee het fosfaatgehalte verder afneemt. Overigens is met de recente kwaliteitsverbetering het risico van blauwalg(overlast) niet (direct) verdwenen. In 2010 zijn weer drijfslagen van blauwalgen opgetreden en was er vanaf half augustus een innamestop als gevolg van blauwalgen. In 2011 was er in juli een kortdurende innamestop.



Figuur 30. Drijfslagen van blauwalgen in het Volkerak-Zoommeer in 2010. Links: 20 augustus, rechts 4 september.
Bron: provincie Zeeland

De twee aannames waar deze conclusie op is gebaseerd, namelijk (progressieve) vastlegging van fosfaat in de bodem en graascontrole door driehoeksmosselen, kunnen niet aan veldwaarnemingen worden getoetst; de daarvoor noodzakelijke gegevens ontbreken. Vooralsnog blijft er dus sprake van een hypothese.

Nader onderzoek en systeemmonitoring naar (1) fosfaatspeciatie en seizoensgedrag in de waterbodem en (2) de aanwezigheid van driehoeksmosselen zijn nodig om de hypothese te toetsen en om vervolgens een toekomstverwachting te kunnen formuleren.

8 Referenties

- Berner, R.A., 1980.
Early diagenesis – a theoretical approach. Princeton University Press, Princeton, New York, 241 pp.
- Boers, P.C.M., W. van Raaphorst, and D.T. van der Molen, 1998.
Phosphorus retention in sediment. *Wat. Sci. Tech.* 37 (3): 31-39.
- Dekker, L, 2008.
Doorspoelen Volkerak-Zoommeer. Memo RWS-Zeeland
- Delft Hydraulics, 1994.
Switch, a model for sediment-water exchange of nutrients; Part 3: Reformulation and recalibration for Lake Veluwe. Research report T584 (J.G.C. Smits).
- Deltares, 2010.
Delft3D-ECO, Model documentation (J.G.C. Smits).
- DiToro, D.M., 2001.
Sediment Flux Modeling. John Wiley & Sons, Inc. Publication, New York.
- Douben, KJ, 2011.
Analyse negatieve (inlaat) debieten Dintelsas en Bovensas 1988 t/m 2009 – concept. Memo Waterschap Brabantse Delta
- Emerson, S., and G. Widmer, 1978.
Early diagenesis in anaerobic lake sediments – II Thermodynamic and kinetic factors controlling the formation of iron phosphate. *Geochimica & Cosmochimica Acta* 42: 1307-1316.
- Golterman, H.L., 1997.
The distribution of phosphate over iron-bound and calcium-bound phosphate in stratified sediments. *Hydrobiologia* 364(1): 75-81.
- Hieltjes, A.H.M., 1980.
Eigenschappen en gedrag van fosfaat in sedimenten. Proefschrift Technische Hogeschool Twente.
- Kerkum, F.C.M. en J. van Schie, 2005
Primaire rapportage waterplantenmonitoring Zoete Rijkswateren. Een overzicht van 13 jaar monitoring (1992-2004). RIZA werkdocument 2005.174X
- Kerkum, F.C.M. en J. van Schie, 2008
Primaire rapportage MWTL waterplantenmonitoring Zoete Rijkswateren. Monitoringsjaren 2005 en 2006. Rapport Rijkswaterstaat, 2008
- Landelijke Coördinatiecommissie Waterverdeling (LCW), 2011.
Droogteberichten 2011-8t/m15.
- Lucassen, E., H. Castelijns, A. Wagenvoort en A. Smolders, 2008.
Oorzaken en oplossing interne eutrofiëring in spaarbekken De Braakman. *H₂O/11*: 33-36.
- Michielsen, B.F., 1996.
Toepassing van DBS op het Volkerak Zoommeer. Waterloopkundig Laboratorium, rapport T1440
- Nolte, A, 2011.
Spoedadvies verzilting – Volkerak-Zoommeer. Deltares memo 1205046-000-VEB-0001
- Santschi, P., P.Höhener, G. Benoit, and M. Buchholtz-ten Brink, 1990.
Chemical processes at the sediment water-interface. *Mar. Chem.* 30: 269-315.
- Slomp, C.P., 1997.
Early diagenesis of phosphorus in continental margin sediments. Ph. D. Thesis, Wageningen University, the Netherlands.
- Slomp, C.P., J.F.P. Malschaert, and W. van Raaphorst, 1998.
The role of adsorption in sediment-water exchange of phosphate in North Sea continental margin sediments. *Limnol. Oceanogr.* 43(5): 832-846.
- Smits, J.C. en J.van Beek, 2009.

Ontwikkeling screeningsmodel eutrofiëring. Deltares rapport 1200235-008-ZWS-0001

Vries, A.de, J. Veraart, I. de Vries, G Oude Essink, GJ Zwolsman, R Creusen en H, Buijtenhek, 2009.

Vraag en aanbod van zoetwater in de Zuidwestelijke Delta. Een verkenning. Stuurgroep Zuidwestelijke Delta en Kennis voor Klimaat.

A Wateraanvoer vanuit het VZM naar Brabant en andere (polder)gebieden.

Hoe groot is de wateraanvoer vanuit het VZM naar de aangrenzende poldergebieden ten behoeve van (onder andere) landbouwwatervoorziening?

A.1 Schatting wateraanvoer uit de restterm van de waterbalans

Zowel de polderwateruitslag als de waterinlaat naar en van het VZM van/naar de aangrenzende poldergebieden (West-Brabant, Oostflakkee, Tholen, St. Philipsland) ten behoeve van peilbeheer, zoetspoelen en beregening wordt niet gemeten. Een eerste indirecte schatting kan daardoor slechts worden gebaseerd op de restterm van de waterbalans. Het gedeelte van de restterm dat aan polderwateruitslag dan wel –inlaat kan worden toegeschreven is (in 2008-2009) jaargemiddeld $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ en zomergemiddeld $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie hoofdstuk 3). In hydrologisch normale jaren wordt dus, ook 's zomers, meer water uitgeslagen dan ingelaten. In de hele periode van 22 jaar (1988-2009) zijn er 9 zomermaanden met een maandgemiddeld inlaatdebiet. Dit is 7% van de zomermaanden. Vooral 1996 en 1997 springen eruit met resp. drie (juli, augustus, oktober) en twee (mei, juni) zomermaanden met netto waterinlaat (maandgemiddeld $0,2\text{-}3,9 \text{ m}^3/\text{s}$). Een eerste conclusie is dat langdurige netto waterinlaat (\geq een maand) gedurende de zomer zelden voorkomt en, gemiddeld over alle poldergebieden, na 2000 helemaal niet meer heeft plaatsgevonden.

A.2 Schatting wateraanvoer uit negatieve debieten Dintel en Vliet

Een schatting van de waterinlaat naar het peilbeheerste gebied van de Mark-Vliet boezem in West-Brabant kan worden ontleend aan de tijdseries debieten van Dintel- en Bovensas. Negatieve debieten in deze tijdseries geven een indicatie van het 'terugstromen' van water vanuit het VZM naar de Mark-Vliet boezem bij een laag peil op de boezem en daardoor een negatief verhang. Gebaseerd op gesommeerde negatieve kwartierdebieten van Dintel en Vliet is de gemiddelde totale jaaraanvoer in de periode 1988-2007 $13,5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (memo Klaas-Jan Douben, januari 2011). Op dagbasis is de jaargemiddelde aanvoer in de periode 1988-2010 voor de Dintel $1,28 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ en voor Bovensas $2,97 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$, samen $4,25 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$, een factor 3 lager. De geschatte range voor het jaargemiddelde continue terugstroomdebiet vanuit het VZM naar de Mark-Vlietboezem is daarmee $0,27\text{-}0,85 \text{ m}^3/\text{s}$.

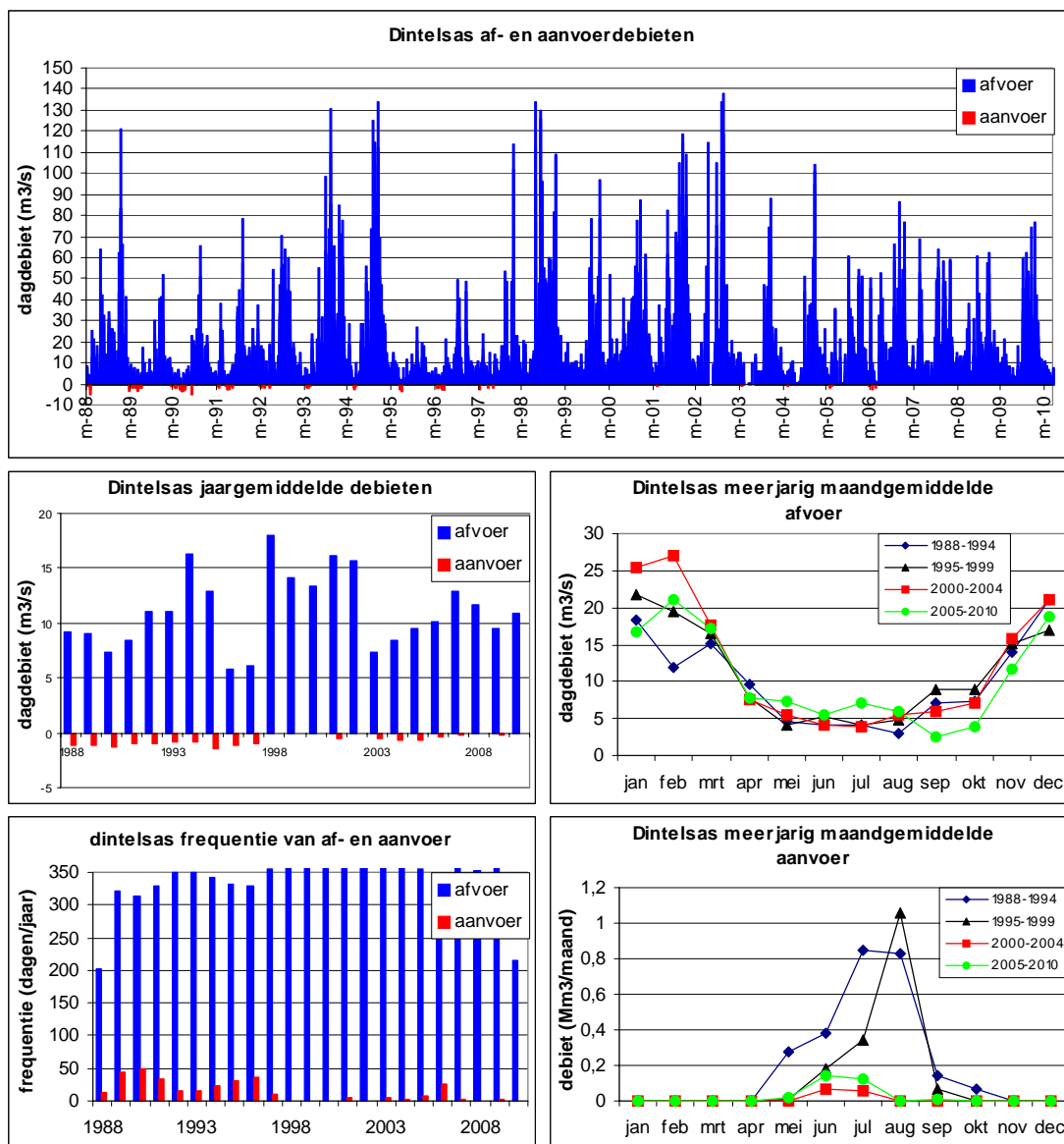
De oorzaak van het verschil is simpel: op dagbasis middelen kwartieren met een negatief debiet weg tegen kwartieren met een positief debiet. Dat geldt voor ongeveer de helft van het aantal dagen met negatieve kwartierdebieten: het gemiddelde aantal dagen per jaar met negatieve kwartierdebieten is respectievelijk 102 dagen (Bovensas) en 49 dagen (Dintelsas); het gemiddelde aantal dagen per jaar met negatieve dagdebieten is respectievelijk 70 dagen (Bovensas) en 15 dagen (Dintelsas). En ook op die dagen is het negatieve dagdebiet meestal lager dan de som van de negatieve kwartierdebieten.

Wat is nu de relevante tijdschaal? Wat is de buffercapaciteit in het systeem, wat is de responstijd van de watervragende functies? Korter een maand, maar zeker langer dan een kwartier. De tijdsconstante van de neerslag-afvoerrelatie in het stroomgebied van de Dintel is volgens bijlage B 1-2 dagen.

Op grond hiervan (en na mondeling overleg met Klaas-Jan Douben – WSBD) wordt verondersteld dat gesommeerde negatieve kwartierdebieten een overschatting geven van de waterinlaat, en daggemiddelde negatieve debieten misschien een kleine onderschatting. De navolgende analyse neemt daarom daggemiddelde negatieve debieten als vertrekpunt.

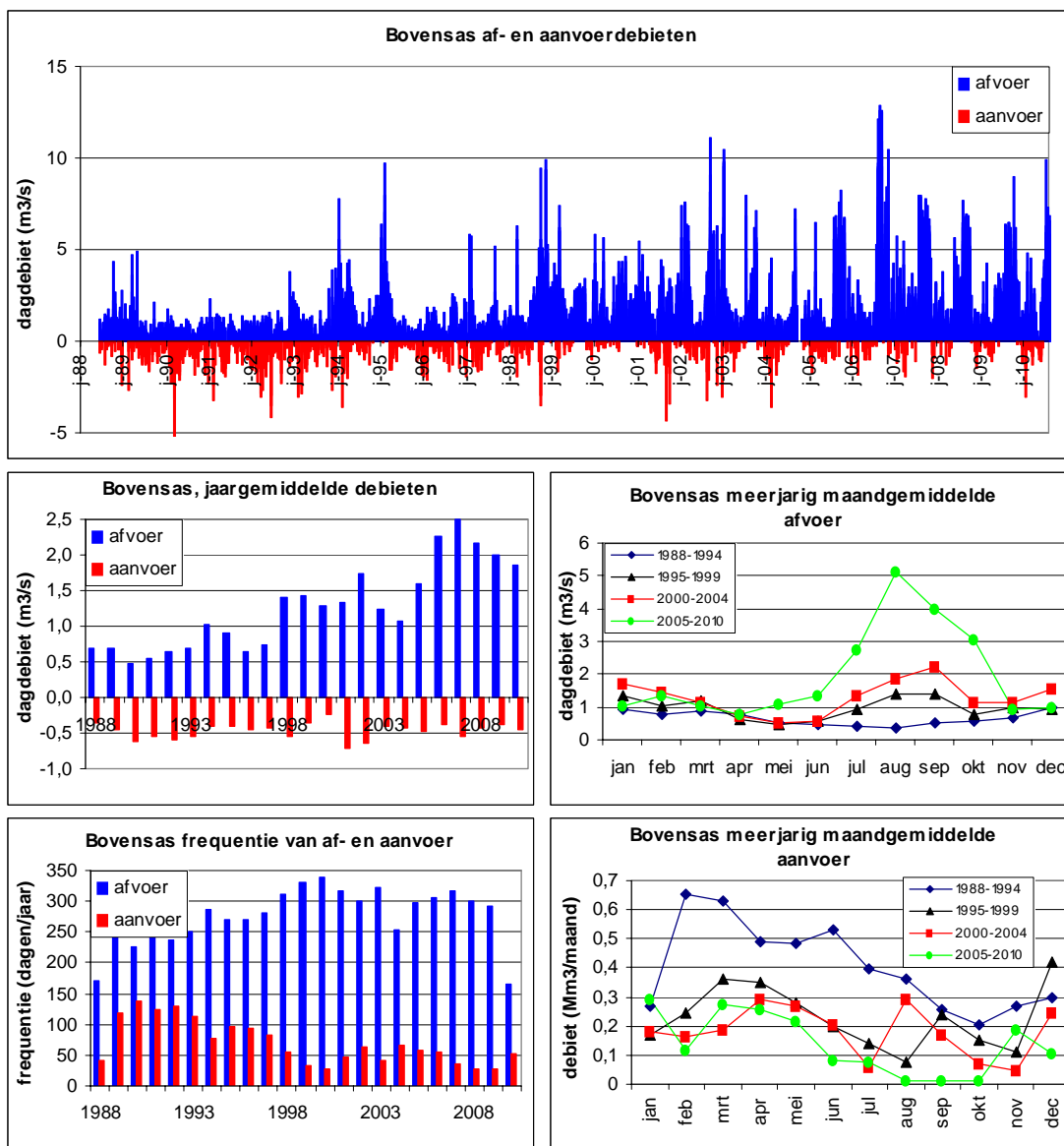
Daarbij is van belang om onderscheid te maken tussen echte (gestuurde) inlaat van water, zoals bij de inlaat vanuit het Wilhelminakanaal bij Oosterhout en vrije (ongestuurde) uitwisseling van water zoals het geval is bij de open uitmondingen van Dintel en Vliet naar het VZM. Bij Oosterhout kan het ingelaten water niet terugstromen (het kan alleen weer uitgemalen worden), bij de mondingen van Dintel en Vliet gebeurt dat wel en bepaalt het waterstandsverschil de richting van de stroming. Bij Oosterhout kun je de inlaat openzetten, bij Dintel en Vliet kun je alleen de uitwisseling stoppen door de sluis dicht te zetten.

Figuur 31 en Figuur 32 illustreren de aanvoer, afvoer en doorvoerdebieten op dag-, maand- en jaarbasis voor Dintelsas en Bovensas. De meerjarig maandgemiddelde afvoergrafiek (rechts-midden) toont alleen de afvoerdebieten, niet de aanvoer (namelijk maandgemiddeld dagdebiet op afvoerdagen * aantal afvoerdagen per maand / aantal dagen per maand (28, 30 of 31)). De eenheid van deze maandafvoergrafiek, evenals van de dag- en jaargrafieken is daggemiddeld debiet in m^3/s . Als laatste grafiek is de meerjarig maandgemiddelde aanvoer weergegeven. De hier gekozen eenheid is aanvoervolume in $Mm^3/maand$ (dus de meerjarig gemiddelde maandsom van de negatieve dagdebieten).



Figuur 31. Af- en aanvoerdebieten van de Dintel op dagbasis, jaargemiddeld en meerjarig maandgemiddeld

De figuren voor Dintelsas illustreren het natuurlijke karakter van de hydrologie van deze 'rivier' met hoge winterse en lage zomerse afvoeren. Aanvoer vindt alleen plaats in de zomermaanden als bij lage afvoeren het peil zover uitzakt dat het lager is dan het VZM-peil en bij dit negatieve verhang de stroomrichting omdraait. De aanvoer is (verhoudingsgewijs) zeer gering en sporadisch, vooral na 1998, als door de inlaat vanuit Oosterhout het peilbeheer verbetert en retourstroming nauwelijks meer voorkomt. Het doorspoeldebiet van de inlaat bij Oosterhout (vanaf 2005) heeft geen effect op de afvoer van de Dintel.



Figuur 32. Af- en aanvoerdebieten van de Steenbergse Vliet op dagbasis, jaargemiddeld en meerjarig maandgemiddeld

De figuren voor Bovensas illustreren dat de hydrologie van de Steenbergse Vliet vanaf 1998 in toenemende mate wordt gedomineerd door de inlaat vanuit Oosterhout. De ‘natuurlijke’ afvoer van de Vliet was (voor 1998) 0,5 m³/s in de zomer en is na 2005 t.g.v. het doorspoelregime meerjarig maandgemiddeld vertienvoudigd tot 5 m³/s in augustus. De aanvoer die zowel absoluut als relatief belangrijk was, neemt af vanaf 1998 en is sinds 2005 tijdens de zomer t.g.v. het doorspoelregime gewoon nul (de groene curve in het figuurtje rechtsonder). Vanaf 2005 is er alleen nog aanvoer in het voorjaar, als er nog geen water wordt ingelaten bij Oosterhout en de natuurlijke afvoer van de Vliet laag is (kan zijn).

Overall kan worden geconcludeerd dat de (landbouw)watervoorziening vanuit het VZM naar West-Brabant in het groeiseizoen in meerdere opzichten gering – zeer gering is (Nb. dit is exclusief de directe aanvoer van water naar de polders grenzend aan het VZM, namelijk de polders Auvergne en Nieuw-Vossemeer).

Het peilbeheerste gebied van West-Brabant is ook in droge jaren nagenoeg geheel zelfvoorzienend qua zoetwaterbeschikbaarheid en wordt bovendien vanaf 2005 in de (na)zomer van zoet water voorzien vanuit het oosten. De betekenis van het VZM als zoetwatervoorraad voor de landbouw is voor Brabant marginaal-verwaarloosbaar.

De wateraanvoer vanuit het VZM naar Brabant is eveneens gering vergeleken met de aanvoer naar andere gebieden. Bijvoorbeeld naar ZO-Tholen wordt in het groeiseizoen meer dan 30 Mm³ aangevoerd (vanuit het VZM), en naar Goeree-Overflakkee zo'n 60-100 Mm³ (grotendeels vanuit het Haringvliet). In beide gevallen vooral voor peilbeheer en zoetspoelen (de Vries et al, 2009).

In deze metastudie zijn de verborgen kosten van landbouwwatergebruik uit het VZM geschat op €1,50/m³. Deze schatting ging uit van de veronderstelling dat aanvoer vanuit het VZM voorziet in 30% van de landbouwwaterbehoefte in Brabant. Met deze gegevens over de feitelijke aanvoer blijkt dat het aandeel van het VZM in de landbouwwatervoorziening van Brabant verwaarloosbaar is. Een nieuwe schatting van de verborgen kosten van landbouwwatergebruik uit het VZM komt daarmee uit op €3,00/m³, dubbel zo duur als water uit de kraan¹⁵.

A.3 Conclusies wateraanvoer vanuit het VZM

Samengevat zijn de conclusies over wateraanvoer vanuit het VZM:

- langdurige waterinlaat (≥ een maand) vanuit het VZM naar de aangrenzende poldergebieden gedurende de zomer komt zelden voor en heeft, gemiddeld over alle poldergebieden, na 2000 helemaal niet meer plaatsgevonden.
- de jaargemiddelde wateraanvoer naar West-Brabant van 4,25-13,5 Mm³/jaar (=0,27-0,85 m³/s) is een klein percentage van de totale waterbalans van het VZM (1-3 %)
- de zomerse aanvoer vanuit het VZM naar West-Brabant is ten gevolge van het doorspoelregime van de Mark-Vliet boezem vanaf 2005 nagenoeg nul.
- de verborgen kosten van landbouwwatergebruik uit het VZM worden geschat op €3,00/m³ beregeningswater, dubbel zo duur als water uit de kraan.

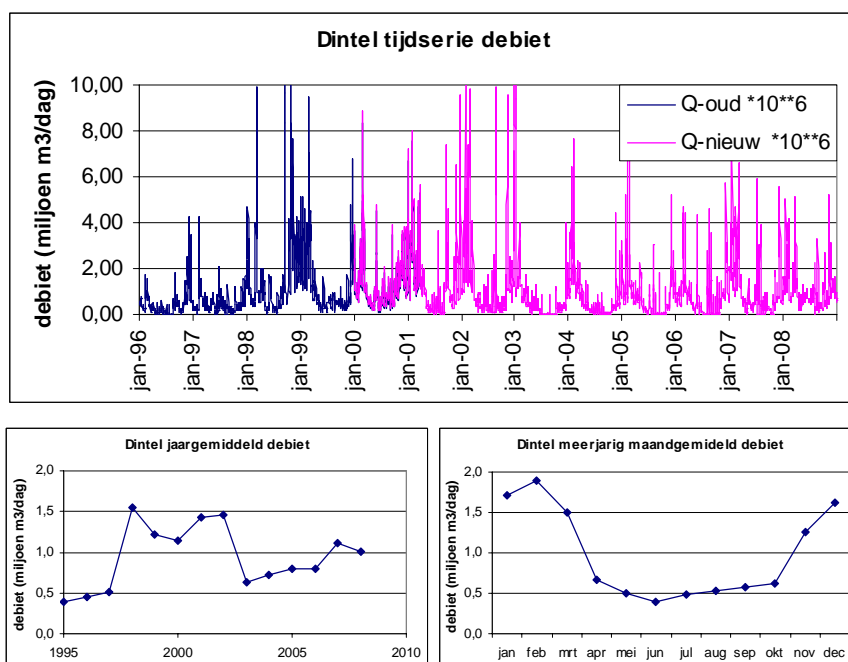
¹⁵ Onderhoud en operationele kosten van de zoet-zoutscheiding op de Krammersluizen bedragen 4,5 miljoen euro per jaar (cf planstudie). Geschatte berekening met water uit het VZM: 30% van berekening Goeree-Overflakkee (0,8 Mm³, alleen Oostflakkee betreft water uit het VZM), 0,70 Mm³ berekening op Tholen (cf metastudie)

B Debiet-concentratie relatie tussen Dintel en VZM

B.1 Inleiding

De in dit rapport gepresenteerde gegevens over concentraties, vrachten en massabalansen voor water en nutriënten van het Volkerak-Zoommeer zijn tenminste maandgemiddeld, en vaak jaargemiddeld of meerjarig maandgemiddeld. Momentane debiet-concentratie relaties, zoals concentratiepieken door afstromende neerslag na een zomerse regenbui, zijn dan niet meer zichtbaar. Deze bijlage presenteert de beschikbare gegevens voor de Dintel. Neerslag gegevens in het stroomgebied van het Mark-Vlietstelsel zijn niet direct beschikbaar. In deze bijlage worden de wel direct beschikbare neerslaggegevens van de KNMI-stations Wilhelminadorp (Noord-Beveland) en Gilze-Rijen (Noord-Brabant) gebruikt.

B.2 Neerslag – afvoer relatie voor de Dintel



Figuur 33. Debiet van de Dintel 1996-2008

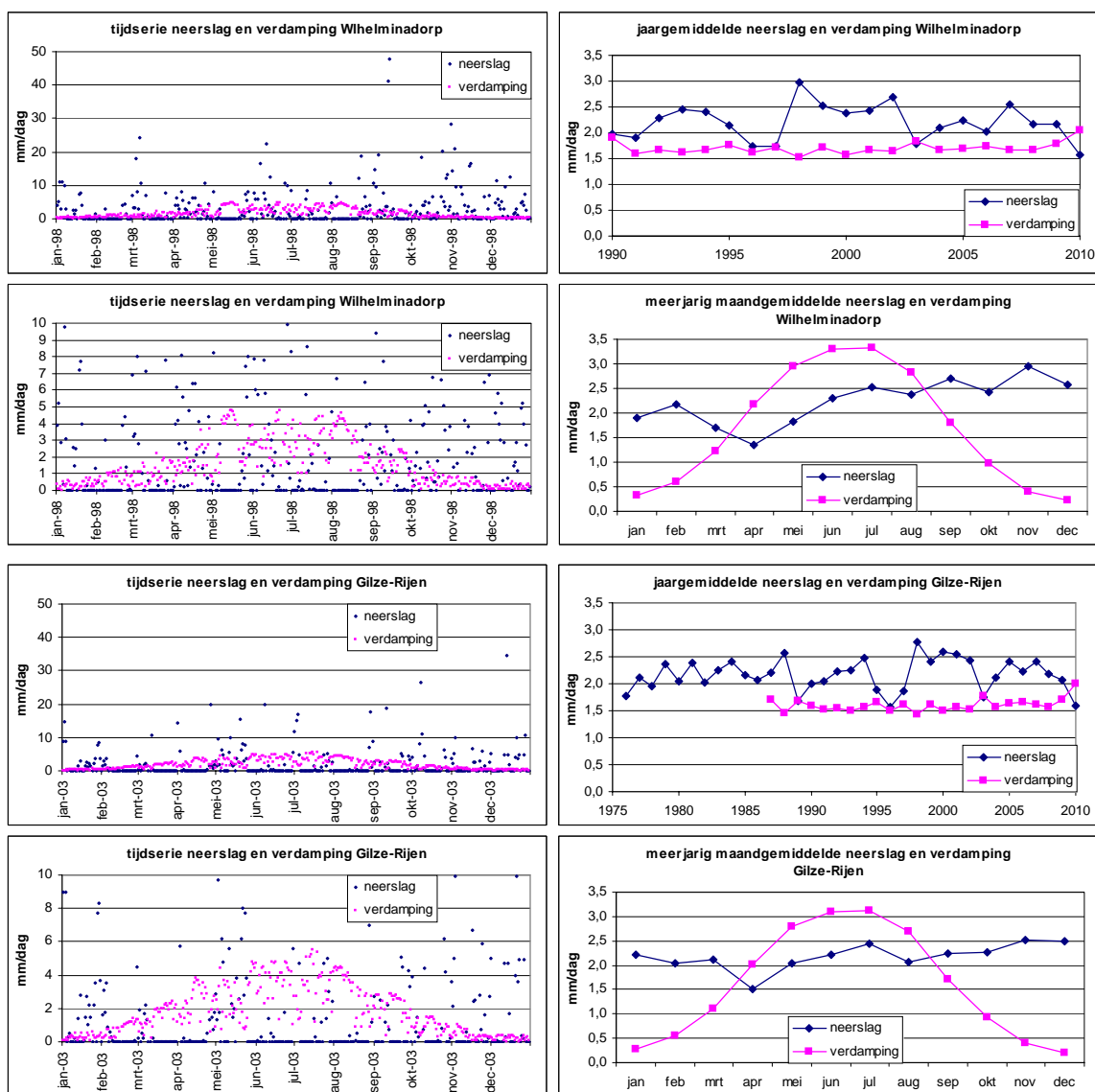
en droge (2003) jaren en tussen de vijf wintermaanden (november-maart) en de zeven zomermaanden (april-oktober) (beide met een factor 3).

Voor de afvoer van de Dintel naar het VZM is een complete tijdserie van dagdebieten beschikbaar voor de periode 1996-2008 (Figuur 33). De serie is samengesteld uit twee databestanden: 'oud' (Kouer en Griffioen) en 'nieuw' (deze bijlage)¹⁶. De bestanden overlappen voor het jaar 2000, en zijn voor dat jaar marginaal verschillend. Het jaargemiddelde debiet verschilt sterk tussen natte (1998)

¹⁶ deze bijlage is eerder geschreven en afgerond dan de rest van dit rapport. Daardoor zijn eerdere versies van de debietreeksen van de Dintel gebruikt. De verschillen met de recente dataset met complete debietreeksen zijn marginaal (vgl. Figuur 10 en Figuur 11 met Figuur 33)

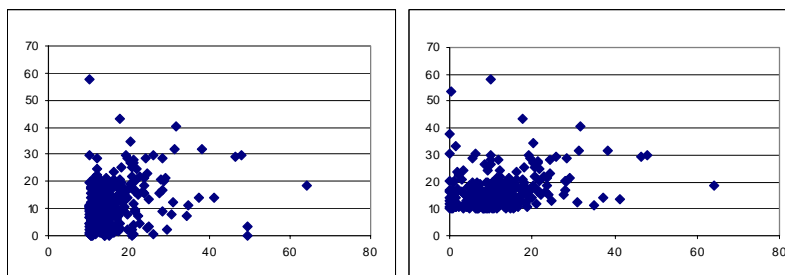
Figuur 34 toont de KNMI daggegevens over neerslag en verdamping voor de stations Wilhelminadorp en Gilze-Rijen¹⁷. Niet de gehele tijdseries van de daggegevens worden weergegeven, maar als voorbeeld het natte jaar 1998 voor Wilhelminadorp en het droge jaar 2003 voor Gilze-Rijen.

Deze twee jaren zijn elk tweemaal weergegeven, geschaald op 10 resp. 50 mm/dag, om de enkele natte dagen met > 10 mm/dag neerslag apart zichtbaar te maken (6 %, oftewel gemiddeld 22 dagen per jaar). De verschillen tussen de twee stations zijn klein wat betreft de jaargemiddelde en meerjarig maandgemiddelde waarden.



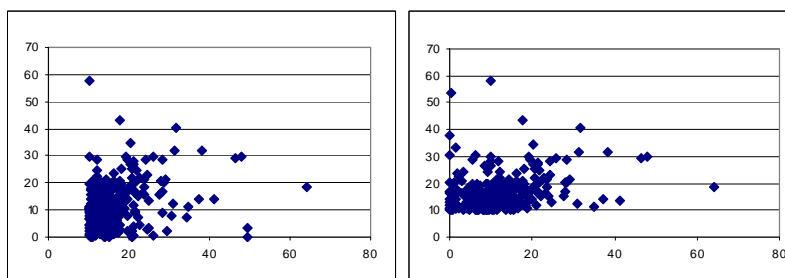
Figuur 34. Neerslag en verdamping Wilhelminadorp (1998 en 1990-2010) en Gilze-Rijen (2003 en 1975-2010)

¹⁷ de verdamping is de zogenaamde 'referentie gewasverdamping'. Dit is de potentiële verdamping als er geen sprake is van vochttekort in de bodem. In de zomer (in droge jaren) is de werkelijke verdamping veel kleiner.

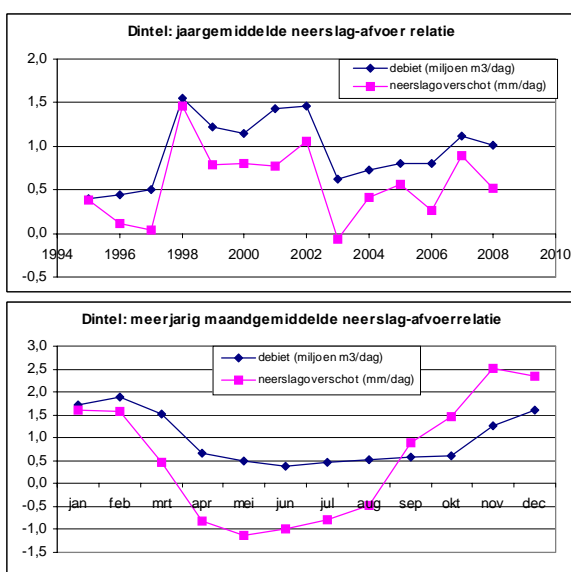


Figuur 35. Correlatie tussen neerslag Wilhelminadorp en Gilze-Rijen voor W'dorp >10mm/dag (links) en G-Rijen >10mm/dag (rechts).

De jaargemiddelde neerslag toont het verschil tussen natte (1998) en droge (2003) jaren. Meerjarig gemiddeld is de neerslag tamelijk gelijkmatig over de seizoenen verdeeld; gemiddeld wat lager in het voorjaar (april) en wat hoger in het najaar (november).



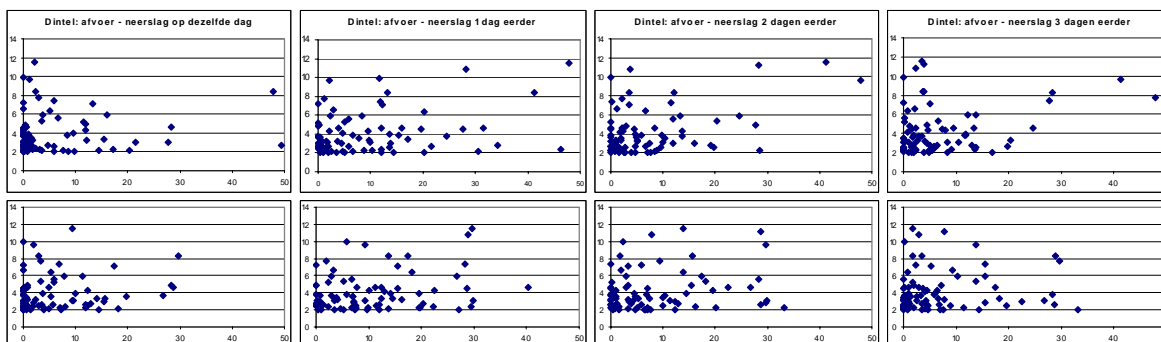
Figuur 35 vergelijkt de twee stations voor de 6% natte dagen. Er is geen enkele correlatie. De natte dagen per station overlappen voor slechts 50%, en ook voor de overige 50% (beide stations >10mm/dag neerslag) is er geen correlatie. Voor de 'timing' van de neerslag zijn de stations niet representatief voor elkaar, en dus waarschijnlijk ook niet voor het stroomgebied van het Mark-Vlietstelsel.



Figuur 36. Jaar- en meerjarig maandgemiddelde neerslag-afvoerrelatie van de Dintel

Figuur 36 geeft jaargemiddeld en meerjarig maandgemiddeld voor de periode 1995-2008 de relatie weer tussen neerslagoverschot (= neerslag - verdamping, maar zie voetnoot 17) enerzijds (gegevens Wilhelminadorp) en de afvoer van de Dintel anderzijds. Uiteraard is op deze tijdschalen de relatie evident. De baseflow van de Dintel (zomergemiddeld 0,54 Mm³/dag, 6,2 m³/s), vergeleken met het neerslagtekort (zomergemiddeld 0,5-1,0 mm/dag) en de vertraagde afname resp. toename van de afvoer in voorjaar resp. najaar, illustreren de buffering in de bodem. Echter, net als voor de neerslag zelf, is de neerslag-afvoer relatie op dagbasis veel minder eenduidig of zelfs nagenoeg afwezig.

En dit zal grotendeels worden veroorzaakt door het feit dat de beschikbare neerslaggegevens op dagbasis qua timing niet representatief zijn voor het stroomgebied van het Mark-Vlietstelsel. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 37.

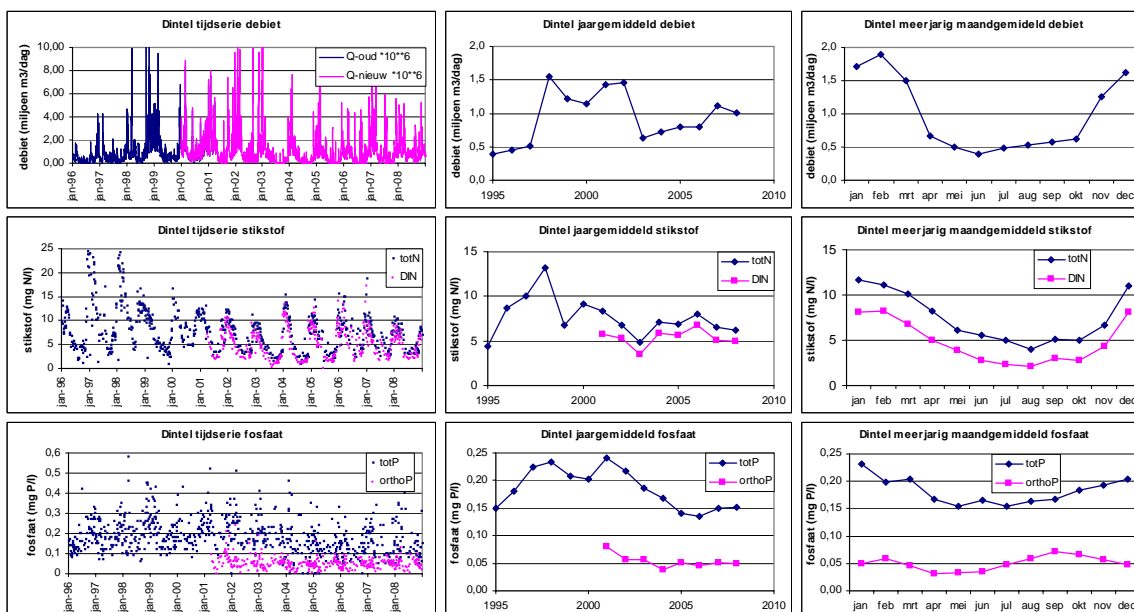


Figuur 37. Neerslag – afvoerrelatie van de Dintel voor zomerse hoge dagdebieten; met neerslag Wilhelminadorp (boven) en Gilze-Rijen (onder)

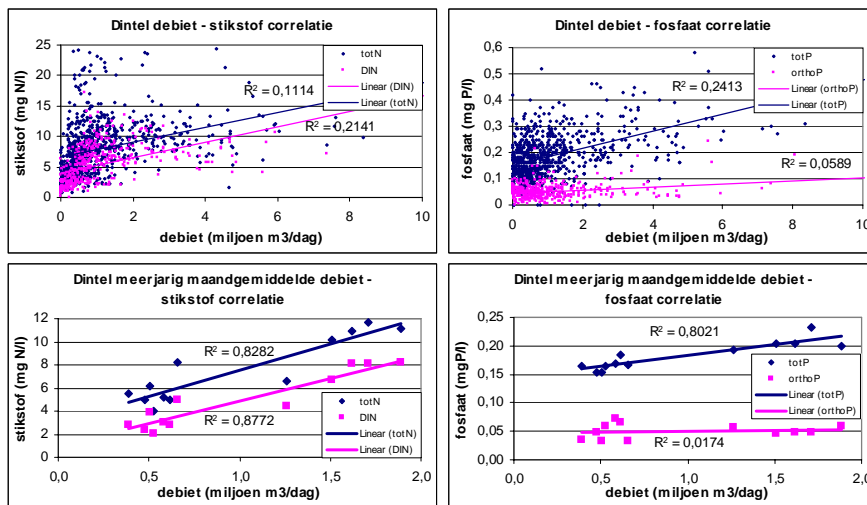
De figuur geeft voor alle hoge zomerse dagdebieten van de Dintel (> 2 Mm³/dag, dit is > 23 m³/s daggemiddeld) de correlatie met de neerslag in Wilhelminadorp en Gilze-Rijen, op dezelfde dag en op 1, 2 en 3 dagen voorafgaand aan de afvoergolf. Elk figuurtje bevat 78 punten: in de periode van ruim 13 jaren (eind 1995 t/m 2008) was gedurende de zomer (april-oktober) op 78 dagen de Dintel afvoer groter dan 2 Mm³/dag (1,6 % van de tijd).

Er is eigenlijk geen enkele correlatie tussen veel neerslag en hoge afvoer. Het aantal punten met een combi van veel neerslag (> 20 mm/dag) en hoge afvoer (> 2 miljoen m³/dag) is het grootst in de middelste figuurtjes: afvoer gecombineerd met de neerslag van 1-2 dagen eerder. De tijdsconstante van de neerslag-afvoerrelatie in het stroomgebied van het Mark-Vlietstelsel zou dan 1-2 dagen zijn.

B.3 Debiet – concentratie relaties voor de Dintel



Figuur 38. Debiet en nutriëntconcentraties van de Dintel, 1996-2008

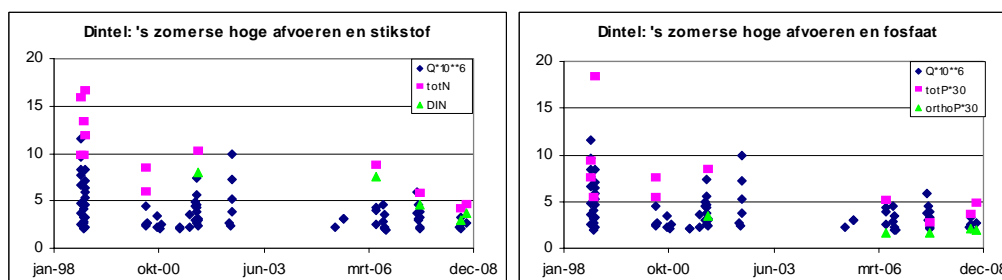


Figuur 39. Debiet-concentratie correlaties voor de Dintel; waarnemingsparen per dag (boven) en meerjarig maandgemiddeld (onder)

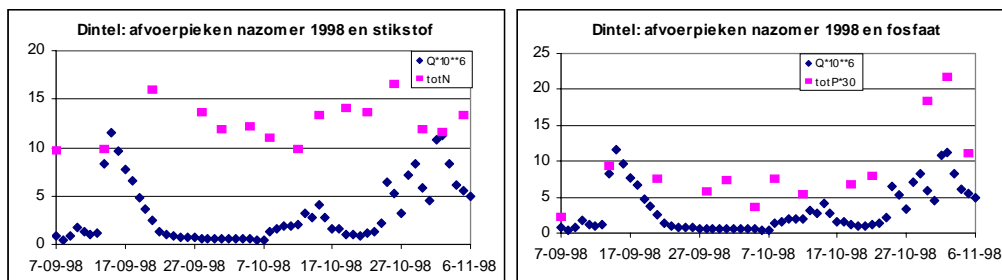
Figuur 38 geeft de volledige tijdseries weer van het debiet van de Dintel (vgl. Figuur 33) in combinatie met de stikstof- en fosfaatconcentraties, zowel de totaalconcentraties als de anorganisch opgeloste concentraties (alleen beschikbaar vanaf 2001). Naast de complete tijdseries zijn ook de jaargemiddelde en de over de gehele periode maandgemiddelde concentraties weergegeven.

Op het oog zijn zowel de verschillen tussen de jaren als de seizoensvariatie van het debiet en de stikstofconcentraties meer eenduidig en overeenkomstig ('s winters hoog, 's zomers laag) dan van de fosfaatconcentraties. De stikstofconcentraties lijken positief gecorreleerd aan het debiet, zowel wat betreft de verschillen tussen natte (1998) en droge (2003) jaren als wat betreft de seizoensvariatie. En dit geldt niet voor de fosfaatconcentraties. Vooral de orthofosfaatconcentraties zijn over de waarnemingsperiode 2001-2008 zowel erg laag (0,05 mgP/l), als constant over de jaren, en met weinig seizoensvariatie.

Dit beeld wordt bevestigd met de correlatiegrafieken in Figuur 39. De stikstofconcentraties zijn positief gecorreleerd met het debiet, maar deze correlatie is door de grote spreiding niet significant voor de oorspronkelijke waarnemingsparen per dag. Voor fosfaat is alleen de meerjarig maandgemiddelde totaalfosfaat concentratie positief gecorreleerd met het debiet door het, overigens geringe, verschil tussen lagere zomer- en hogere winterconcentraties. De trendlijnen voor orthofosfaat lopen bijna horizontaal tussen 0,05 – 0,10 mgP/l.



Figuur 40. Zomerse (april t/m oktober) afvoergolven (> 2 miljoen m³/dag) van de Dintel en gelijktijdige concentratiemetingen. Nb: de fosfaatconcentratie is geschaald (mgP/l * 30)



Figuur 41. Afvoergolven van de Dintel nazomer 1998, met tussenliggende lage debieten en alle concentratiemetingen. Nb.: de fosfaatconcentratie is geschaald ($\text{mgP/l} * 30$)

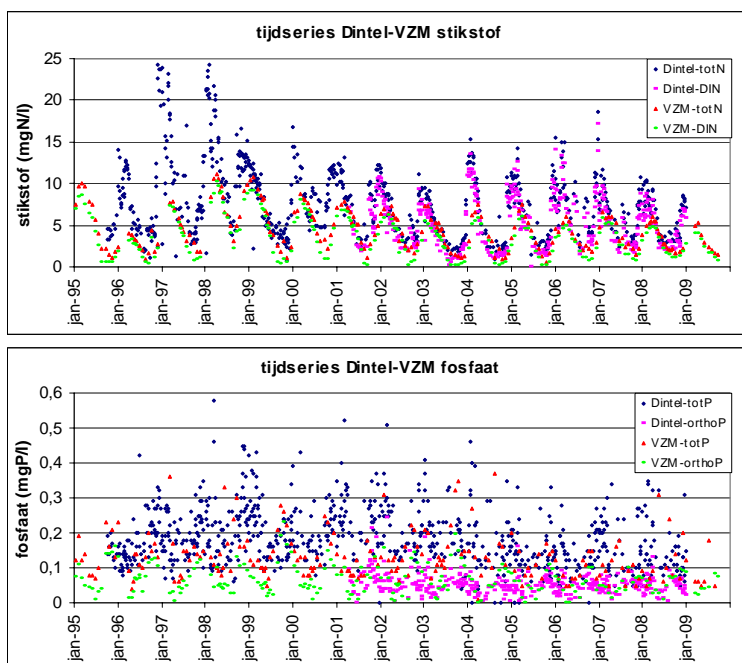
Om te onderzoeken of de correlatieve verbanden ook oorzakelijk zijn is gericht gezocht naar zomerse afvoergolven en bijbehorende concentratiegegevens. Figuur 40 toont alle afzonderlijke zomerse debietwaardes $> 2 \text{ m}^3/\text{s}$ (periode april t/m oktober) met de bijbehorende gemeten concentraties. Hoge zomerse debieten komen niet vaak voor: 78 dagen in 13 zomers (2,8% van de tijd). Helaas zijn gelijktijdige concentratiemetingen nog zeldzamer; voor slechts 13 van de 78 dagen zijn concentratiemetingen beschikbaar. Voor de meeste afvoergolven is (zijn) geen of slechts 1 concentratiemeting(en) beschikbaar. Alleen de hoge afvoeren in de nazomer van 1998 zijn goed 'bemeten'. Figuur 41 geeft voor die periode van 60 dagen (september-oktober) alle gegevens weer, ook de tussenliggende lage debieten en concentratiemetingen.

Voor stikstof kan worden waargenomen dat de concentraties tijdens de afvoergolven eerder lager dan hoger zijn vergeleken met de tussenliggende periode met lagere debieten. De overall positieve correlatie tussen stikstof en debiet (hoog in winter en natte jaren, laag in zomer en droge jaren) is blijkbaar niet oorzakelijk, maar bepaald door onderling onafhankelijke co-variatie.

Voor fosfaat kan worden waargenomen (Figuur 41) dat tijdens de laatste afvoerpiek de totP-concentratie ($0,61\text{-}0,72 \text{ mgP/l}$ op 30-10 en 02-11 1998) twee keer zo hoog is dan in de voorafgaande periode met lage debieten. Deze waarneming kan worden geïnterpreteerd als een concentratiepiek ten gevolge van afstromende neerslag (van fosfaatverzadigde gronden) na een (na)zomerse regenbui. Het is echter de enige waarneming in de totale periode van 13 jaren die vatbaar is voor deze interpretatie. Voor de andere zomerse afvoerpieken zijn geen gelijktijdige concentratiemetingen beschikbaar en/of worden geen verhoogde concentraties waargenomen (Figuur 40).

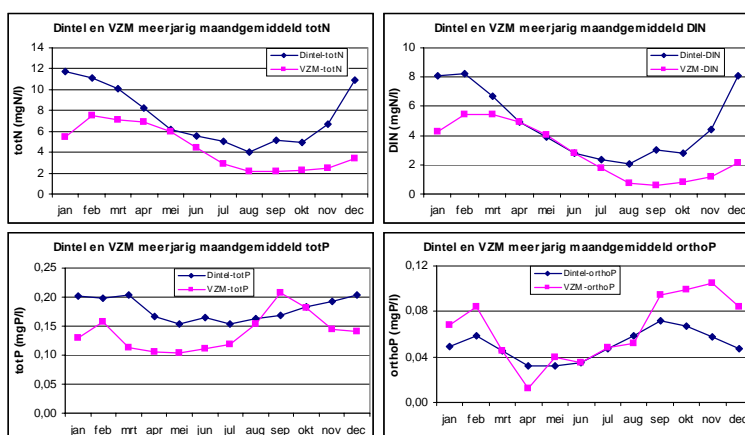
B.4 Concentratie relaties tussen Dintel en Volkerak-Zoommeer

De uiteindelijke hamvraag is: veroorzaken hoge concentraties of vrachten van de Dintel hoge concentraties van nutriënten in het Volkerak-Zoommeer die vervolgens aanleiding zijn voor blauwalgbloeiën.



Figuur 42. Meerjarig maandgemiddelde nutriëntconcentraties in Dintel en VZM (totN en totP 1995-2009, DIN en orthoP 2001-2008)

Figuur 43 presenteert de volledige tijdseries van alle concentratiemetingen van stikstof en fosfaat in de Dintel (meetpunt Dintelsas) en in het Volkerak-Zoommeer (meetpunt Steenberg) voor de periode 1995-2009. Voor stikstof is de seizoensvariatie duidelijk, en wordt vooral de stijging in het najaar in de Dintel met enige vertraging gevolgd in het VZM. Voor fosfaat is de seizoensvariatie minder eenduidig en is een vertraagde reactie van het VZM niet zichtbaar. Dit wordt bevestigd door het meerjarig maandgemiddelde beeld in Figuur 42. De vertraagde reactie van stikstof in het VZM is 1-2 maanden. Voor fosfaat is een vertraagde reactie niet zichtbaar, en stijgt vooral de orthofosfaatconcentratie tot hogere waarden dan in de Dintel. Dit is alleen verklaarbaar door interne belasting.



Figuur 43. Tijdseries nutriëntconcentraties in Dintel en VZM

De verhoogde totP concentratie in de Dintel tijdens de afvoergolf najaar 1998 is niet terug te vinden als verhoogde concentraties in het VZM in een periode van 40-150 dagen na de afvoergolf.

Een directe relatie tussen fosfaatconcentraties en –vrachten van de Dintel en fosfaatconcentraties in het VZM, laat staan het optreden van blauwalgbloeiën, is met de beschikbare gegevens niet aantoonbaar. Gezien het autonome gedrag van fosfaat in het VZM, mede onder invloed van interne belasting, is zo'n directe relatie tussen Dintel en VZM voor fosfaat ook erg onwaarschijnlijk.

B.5 Samenvatting en conclusies.

Aan de hand van neerslaggegevens voor Zeeland en Noord-Brabant, debietgegevens van de Dintel en gegevens over nutriëntenconcentraties in Dintel en VZM voor de periode 1995-2009 is gezocht naar directe (en indirecte) relaties tussen concentraties en vrachten van de Dintel enerzijds met concentraties in het VZM anderzijds.

De conclusies zijn:

- 1 Het debiet van de Dintel verschilt sterk tussen natte (1998) en droge (2003) jaren en tussen vijf natte wintermaanden (november-maart) en zeven droge zomermaanden (april-oktober) (beide met een factor 3). De gemiddelde afvoer is nagenoeg exact 1 Mm³/dag (11,3 m³/s). De gemiddelde baseflow (droog weer afvoer) is ruim 0,5 Mm³/dag (6,2 m³/s).
- 2 Het jaargemiddelde en meerjarig maandgemiddelde debiet is (uiteraard) sterk gecorreleerd met het neerslagoverschot. De neerslag-afvoer relatie is op deze tijdschalen evident. De neerslag-afvoer relatie op dagbasis is met de beschikbare meteo-gegevens (Wilhelminadorp en Gilze-Rijen) veel minder eenduidig of zelfs nagenoeg afwezig. Dit zal grotendeels worden veroorzaakt door het feit dat de beschikbare neerslaggegevens op dagbasis qua timing niet representatief zijn voor het stroomgebied van het Mark-Vlietstelsel. Uit de zomerse hoge dagdebieten (78 dagen in 13 jaren, 1,6% van de tijd > 2 Mm³/dag) van de Dintel en de correlatie met veel neerslag in Zeeland en/of Brabant (> 20 mm/dag) kan worden afgeleid dat de tijdsconstante van de neerslag-afvoerrelatie in het stroomgebied van het Mark-Vlietstelsel 1-2 dagen zou zijn.
- 3 De stikstofconcentraties in de Dintel zijn positief gecorreleerd met het debiet: hoog in de winter en laag in de zomer. Maar deze correlatie is door de grote spreiding niet significant voor de oorspronkelijke waarnemingsparen per dag. De stikstofconcentraties zijn tijdens zomerse afvoerpieken eerder lager dan hoger vergeleken met de tussenliggende periode met lagere debieten. De overall positieve correlatie tussen stikstof en debiet is blijkbaar niet oorzakelijk, maar bepaald door onderling onafhankelijke co-variantie.

- 4 Voor fosfaat is alleen de meerjarig maandgemiddelde totaalfosfaat concentratie positief gecorreleerd met het debiet door het, overigens geringe, verschil tussen lagere zomer- en hogere winterconcentraties. De trendlijnen voor orthofosfaat lopen bijna horizontaal tussen lage waarden (0,05 – 0,10 mgP/l) en hebben dus geen debietcorrelatie. De totaalfosfaatconcentratie was tijdens één van de zomerse afvoerpieken (eind oktober 1998) verdubbeld t.o.v. de voorafgaande periode met lage debieten. Deze waarneming kan worden geïnterpreteerd als een concentratiepiek ten gevolge van afstromende neerslag (van fosfaatverzadigde gronden) na een (na)zomerse regenbui. Het is echter de enige waarneming in de totale periode van 13 jaren die vatbaar is voor deze interpretatie.
Voor de andere zomerse afvoerpieken zijn geen gelijktijdige concentratiemetingen beschikbaar en/of worden geen verhoogde concentraties waargenomen.
- 5 De seizoensvariatie van stikstof in de Dintel wordt met een vertraging van 1-2 maanden gevolgd in het VZM. Voor fosfaat is een vertraagde reactie niet zichtbaar, en stijgt vooral de orthofosfaatconcentratie tot hogere waarden dan in de Dintel. Dit is alleen verklaarbaar door interne belasting.
- 6 Een directe relatie tussen fosfaatconcentraties en –vrachten van de Dintel enerzijds en fosfaatconcentraties in het VZM anderzijds, laat staan het optreden van blauwalgbloeiën, is met de beschikbare gegevens niet aantoonbaar. Gezien het autonome gedrag van fosfaat in het VZM, mede onder invloed van interne belasting, is zo'n directe relatie tussen Dintel en VZM voor fosfaat ook erg onwaarschijnlijk.

C Verslag expert review

C.1 Aanleiding voor een review

Het Volkerak-Zoommeer is jarenlang geplaagd door blauwalgen. Verschillende studies hebben uitgewezen dat de problemen alleen zijn op te lossen door het meer zout te maken. Aan verzilting hangt een fiks prijskaartje, onder meer omdat daarbij een alternatieve zoetwatervoorziening nodig is. Toch hebben de meeste bestuurders zich in 2007 achter verzilting geschaard: zij willen na jarenlange studies en discussies een knoop doorhakken en de problemen daadkrachtig aanpakken. Op dit moment lopen een planstudie en een m.e.r.-procedure.

Tegen de verwachting in zijn de problemen met blauwalgen in 2008 en 2009 sterk verminderd. Ook het fosfaatgehalte is afgenomen. Dit heeft de vraag opgeroepen of de overlast misschien 'vanzelf' zal verdwijnen, ook in zoete toestand. Om hier een antwoord op te krijgen, heeft Deltares de recente ontwikkelingen verwerkt in de 'balansstudie'.¹⁸ De studie geeft nieuwe inzichten in de fosfaathuishouding, de oorzaken van de blauwalgenbloei en de toekomstige ontwikkeling in het Volkerak-Zoommeer.

Deltares wil zeker zijn van de deugdelijkheid van de balansstudie en de verklaringen voor de geconstateerde ontwikkelingen, omdat de resultaten vergaande consequenties kunnen hebben voor de besluitvorming over het beheer van het Volkerak-Zoommeer. Daarom is op 25 november 2010 een review uitgevoerd met externe deskundigen. Dit verslag geeft de uitkomsten weer.

C.2 Opzet van de review

Deelnemers

Aan de review hebben zes *deskundigen* deelgenomen, afkomstig van verschillende organisaties. Ze beschikken allemaal over specialistische kennis over het gedrag van fosfaat en algen in water en waterbodems:

Paul Boers	Waterdienst
Roos Loeb	Katholieke Universiteit Nijmegen / B-ware
Hans Los	Deltares
Willem van Riemsdijk	Wageningen Universiteit
Caroline Slomp	Rijksuniversiteit Utrecht
Fons Smolders	Katholieke Universiteit Nijmegen / B-ware

¹⁸ Vries, I. de, J. Smits, A. Nolte en C. Sprengers (2010) *Waterkwaliteit en water- en nutriëntenbalansen Volkerak-Zoommeer 1996-2009*. Deltares 1203266-000. Concept.

Bij de bespreking waren ook vertegenwoordigers van *partijen* die betrokken zijn bij de Planstudie Waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer:

René Boeters (vz)	Rijkswaterstaat Dienst Zeeland
Vincent Klap	Provincie Zeeland
Kees-Jan Meeuse	Rijkswaterstaat Dienst Zeeland
Jaap Oosthoek	Waterschap Brabantse Delta
Wilbert van Zeventer	Ministerie Infrastructuur en Milieu, DG Water

De balansstudie en de gebruikte gegevens zijn toegelicht door de projectbegeleider van de Waterdienst en de projectleiders van *Deltares*:

Bert Bellert	Waterdienst
Ies de Vries	Deltares
Johannes Smits	Deltares

Vraagstelling

De centrale vragen aan de deskundigen luiden:

- Zit de balansstudie goed in elkaar?
- Zijn de recente ontwikkelingen te verklaren?
- Hoe zal de blauwalgenbloei zich in de toekomst ontwikkelen?

Als onderdeel daarvan is de deskundigen gevraagd een oordeel te geven over de onderzoeksmethoden, de werkhypothesen, de interpretatie van resultaten en de conclusies van de balansstudie. Ook is de noodzaak van aanvullende informatie voorgelegd.

De deskundigen is *niet* gevraagd een oordeel te geven over het toekomstige beheer van het Volkerak-Zoommeer, en ook *niet* om een uitspraak te doen over de wenselijkheid van verzilten. De insteek van de review was technisch-inhoudelijk, niet politiek-bestuurlijk.

Basismateriaal

De deskundigen hebben voorafgaand aan de bijeenkomst een concept van de balansstudie ontvangen (concept 22 november 2010). De bijeenkomst is begonnen met een presentatie over de balansen van water, stikstof- en fosfaatverbindingen en chlorofyl en een presentatie over hypothesen voor het gedrag van fosfaat in de waterbodem.

C.3 Uitkomsten van de review

Werkwijze met balansen

De ontwikkeling van de blauwalgen is met twee soorten modellen te analyseren: met een verklarend model en met een balansmodel. Een verklarend model geeft alle relevante processen weer en berekent aan de hand daarvan de concentratie van een bepaalde stof, bijvoorbeeld fosfaat. Een balansmodel geeft een vergelijking tussen de aanvoer, de afvoer en de gemeten concentratie in het systeem. Het verschil geeft aanwijzingen voor de processen die zich in het systeem afspelen (bron en/of opslag van de stof). Deltares heeft gekozen voor een balansmodel, omdat dit een snelle, eenvoudige en onbevooroordeelde methode is om veranderingen in beeld te brengen.

Klap vraagt zich af of het balansmodel een goede keuze is voor dit vraagstuk: is het geen al te mathematische benadering? Van Riemsdijk vindt het een goede keuze: het is een eenvoudige benadering die duidelijk maakt wat er gebeurt. Het gevaar van een verklarend model is volgens hem dat je blijft kalibreren tot de procestermen kloppen. Smolders vindt het balansmodel eveneens geschikt: er blijkt uit dat veel fosfaat in het systeem achterblijft, dat is relevante informatie. Hij vraagt zich wel af hoe groot de kans is dat de berekende waarden fors hoger of lager uitvallen. Ook Slomp vindt de werkwijze met de balansen een goede aanpak.

De deskundigen concluderen dat de gekozen methode met balansmodellen geschikt is.

Betrouwbaarheid van de gegevens

Het balansmodel is gebaseerd op één meetpunt in het Volkerak, in de buurt van Steenberg. Deltares heeft de meetreeks van dit punt vergeleken met gegevens van andere meetpunten in het Volkerak en het Zoommeer en geconcludeerd dat meetpunt Steenberg representatief is voor beide meren. De meetwaarden van de waterdebieten en de nutriënten zijn vergeleken met datasets van Rijkswaterstaat en Waterschap Brabantse Delta. De data komen redelijk overeen of sluiten logisch op elkaar aan, hoewel geen van de meetreeksen een sluitende waterbalans opleveren. Geconcludeerd is dat de gegevens voldoende betrouwbaar zijn. De langjarige meetreeks bestaat uit circa twee metingen per maand sinds de afsluiting.

Boeters vraagt of het gekozen meetpunt Steenberg inderdaad geschikt is. Boers heeft in de eerste jaren na de afsluiting de fosfaathuishouding van het Volkerak-Zoommeer onderzocht bij Rijkswaterstaat RIZA. Hij geeft aan dat toen ook geconstateerd is dat de fosfaatconcentraties op meetpunt Steenberg representatief zijn voor de twee meren.

Smolders vraagt zich af of bij de keuze van het meetpunt rekening is gehouden met stratificatie in het meer: in diepe waterlagen kan het fosfaatgehalte aanzienlijk hoger zijn dan in de bovenste waterlagen. Boers meldt dat het effect van stratificatie verwaarloosbaar is. In de twee meren liggen wel enkele diepe putten die gestratificeerd zijn, maar die beslaan bij elkaar een klein oppervlak. Juist als gevolg van de stratificatie vindt bovendien weinig uitwisseling plaats met eventuele fosfaatrijke diepere lagen. De gemeten concentraties op meetpunt Steenberg zijn volgens hem representatief voor de gemiddelde concentratie in de waterkolom.

Van Zeventer vraagt of uitspoeling van nutriënten uit landbouwgrond goed in de gegevens is verwerkt. Uit recente studies blijkt dat uitspoeling na hevige regenval in zijn algemeenheid groter is dan gedacht. Bestaat de kans dat dergelijke kortstondige pieken in de tweemaandelijks metingen ontbreken? De Vries heeft in de langjarige meetreeks gezocht naar metingen die tijdens of net na afvoerpieken van de Brabantse rivieren hebben plaatsgevonden. Deze metingen laten over het algemeen geen verhoging van fosfaat- en stikstofgehalten tijdens afvoerpieken zien. Slechts één meting in de periode van dertien jaar is te interpreteren als een concentratiepiek door afstroming van fosfaatverzadigde gronden langs de Dintel. De piek heeft niet tot verhoogde fosfaatconcentraties in het Volkerak-Zoommeer geleid in de vijf maanden daarna. Ook is geen verband gevonden met blauwalgenbloei. De Vries heeft daarom geconcludeerd dat uitspoeling geen factor van belang is voor deze balansstudie. Hij zal de analyse opnemen in het eindrapport.

De conclusie van de deskundigen is dat het meetpunt representatief is en dat de metingen betrouwbaar zijn.

Verklaring voor de stikstofontwikkeling

Deltares constateert de volgende ontwikkelingen in het stikstofgehalte:

- Onmiddellijk na de afsluiting is het stikstofgehalte in het Volkerak-Zoommeer sterk toegenomen. Sindsdien is er een licht dalende trend, die overeenkomt met de dalende concentraties in de Brabantse rivieren. Het lijkt erop dat het jaargemiddelde stikstofgehalte volledig bepaald wordt door externe belasting.
- Het stikstofgehalte volgt gedurende het jaar een sinusachtig verloop. De concentraties zijn het laagst in de nazomer (augustus tot oktober) en het hoogst in de winter (januari tot maart). Dit geldt voor zowel totaal stikstof als voor de anorganisch opgeloste fractie DIN (som van nitraat, nitriet en ammonium). Het seizoensverloop is volledig verklaarbaar uit de biologische cyclus van het groeien en afsterven van algen en de mineralisatie van organisch materiaal.
- Uit de analyses blijkt dat sprake is van een forse netto retentie van stikstof (ongeveer de helft van de externe belasting). Waarschijnlijk is dit een gevolg van afbraak van nitraat, de biologische cyclus van productie en mineralisatie en uitwisseling tussen bodem en water. De retentiefactor is in alle jaren gelijk en heeft een seizoensvariatie die samenhangt met de temperatuur.

De deskundigen ondersteunen de verklaring voor het stikstofverloop.

Verklaring van de fosfaatontwikkeling

Deltares constateert de volgende ontwikkelingen in het fosfaatgehalte:

- In tegenstelling tot stikstof is het fosfaatgehalte na de afsluiting (1996-2009) fors gedaald ten opzichte van de periode daarvoor. In twee perioden is het fosfaat extra laag: in 1990-1994 en 2004-2009. In deze perioden zijn vooral de concentraties in de nazomer lager. Dat wijst op verminderde nalevering uit de bodem (lagere interne belasting). Totaal fosfaat geeft hierbij een veel grilliger beeld dan anorganisch opgelost fosfaat (orthofosfaat). De veranderingen in het fosfaatgehalte zijn slechts gedeeltelijk te verklaren uit de externe belasting.
- Ook het fosfaatverloop is gedurende het jaar sinusvormig, maar de pieken en dalen vinden op andere momenten plaats. De laagste concentraties doen zich in het voorjaar voor (april), de hoogste in het najaar (september tot oktober). De sinus van orthofosfaat is geprononceerder dan die van totaal fosfaat. Ook het seizoensgedrag is niet verklaarbaar uit de externe belasting.
- Uit de analyses blijkt dat op jaarbasis vrijwel geen sprake is van een bron of opslag van orthofosfaat. Dat blijkt echter de optelsom van een forse bron tijdens de nazomer (nalevering) en forse opslag in winter en voorjaar. De nazomerbron (nalevering) is sinds 2004 afgenomen. Die afname is veel sterker dan afname van de externe belasting via Brabantse rivieren. Hetzelfde geldt voor totaal fosfaat, maar het grillige gedrag in de loop van de jaren is daarmee slechts ten dele te verklaren.

Klap vraagt of de recente dalende trend te verklaren is doordat het fosfaat in de bodem opdraakt door nalevering. Boers stelt dat bij nalevering van fosfaat maar een klein deel van het fosfaat in de bodem vrijkomt. Het fosfaat in de bovenste bodemlaag zal nooit opraken door nalevering. Oosthoek vraagt of het zeker is dat het fosfaat in de bodem wordt opgeslagen. Boers verwacht dat ook veel fosfaat in vis terecht komt. De vraag is of dat kan vrijkomen bij verandering in de visstand.

Smits geeft een mogelijke verklaring voor het grillige verloop van totaal fosfaat: een substantieel deel hiervan is gebonden aan vaste stof. Daarmee is totaal fosfaat gevoelig voor sedimentatie en resuspensie. De Vries concludeert dat de processen die leiden tot het vrijkomen of opslag van totaal fosfaat van jaar tot jaar sterk wisselen. Hij heeft daar geen verklaring voor.

Boers merkt op dat de afname van fosfaat en de afname van het chlorofyl (algen) consistent met elkaar zijn: minder fosfaat → minder algen → minder fosfaat in de bodem → minder nalevering. De Vries geeft aan dat in de periode 1990-1994 eerst de algen zijn afgenomen (vanaf 1988) en daarna pas het fosfaat (vanaf 1990). De afname van fosfaat lijkt dus niet de oorzaak van de afname in het fosfaat. De hamvraag is: waarom zijn de algen afgenomen?

De deskundigen vinden dat de analyses goed zijn uitgevoerd. Zij constateren dat het fosfaatgehalte in de afgelopen vier jaar geleidelijk is afgenomen. Ze onderschrijven de stelling dat de veranderingen in het fosfaatgehalte niet geheel verklaarbaar zijn uit de afgenomen externe belasting en de biologische cyclus. De deskundigen vinden de twee mogelijke verklaringen van Deltares plausibel: toegenomen immobilisatie van fosfaat in de bodem en toegenomen graasdruk.

Hypothese: toegenomen immobilisatie van fosfaat in de waterbodem

Een hypothese voor de recente afname van fosfaat is dat een toenemend deel van het fosfaat immobiel is geworden door processen in de waterbodem. Deltares geeft aan dat fosfaat in vier vormen kan worden vastgelegd in de waterbodem:

- a. organisch gebonden (algen- en plantendetritus);
- b. geadsorbeerd aan ijzer(III)oxyhydroxiden, aluminiumhydroxiden of klei;
- c. geprecipiteerd in ijzer(II)fosfaat (vivianiet);
- d. ingekapseld in mineralen (calciumfosfaat of apatiet).

Fosfaat dat in de eerste drie vormen is vastgelegd, kan gemakkelijk weer vrijkomen in de waterfase. Zo is b instabiel in anaerobe condities en c in aerobe condities. Rond het grensvlak van de gereduceerde en de geoxideerde bodem (enkele centimeters onder het bodemoppervlak) kan een aerobe toestand snel omslaan in een anaerobe toestand en andersom. Fosfaat dat is ingekapseld in mineralen, komt moeilijk vrij en verdwijnt daarmee langdurig uit het systeem. De bodem van het Volkerak-Zoommeer bevat veel calciumcarbonaat, waardoor apatietvorming zeer goed mogelijk is.

Van Riemsdijk vindt vooral de vraag relevant of de afname van fosfaat volledig te verklaren is met de vorming van instabiele ijzerverbindingen of dat apatietvorming daar ook voor noodzakelijk is. Slomp is van mening dat de fosfaatspecië in de waterbodem bekend moet zijn om te kunnen voorspellen of de fosfaatafname zal doorzetten. Analyse van bodemmonsters is daar noodzakelijk voor. Met die gegevens zijn de bodemprocessen volgens Slomp goed te modelleren. Smolders ondersteunt dat bodemmonsters noodzakelijk zijn om een voorspelling te kunnen doen.

De deskundigen vinden het aannemelijk dat veranderende processen in de waterbodem een verklaring kunnen vormen voor de afname van het fosfaat. Zij vinden analyse van bodemmonsters noodzakelijk om hier met enige zekerheid een uitspraak over te kunnen doen.

Hypothese: toegenomen graas van algen

Deltares geeft aan dat de hoeveelheid algen op drie manieren gelimiteerd kan zijn:

- 1 Beschikbaarheid van nutriënten. Stikstof vormde tot en met 2005 gedurende heel korte tijd een beperking in de nazomer, maar in de laatste jaren niet meer. Fosfaat vormt heel kort een beperking in het voorjaar, maar ook die limitatie lijkt de laatste jaren minder sterk. De afname van het chlorofyl is maar voor de helft te verklaren door afname van fosfaat. Als de fosfaatconcentraties blijven afnemen, kan dit nutriënt in de toekomst sterker limitatief worden.
- 2 Beschikbaarheid van licht. In de periode 1995-2004 is licht waarschijnlijk de belangrijkste limiterende factor geweest, door hoge algenconcentraties en beperkt doorzicht. Nu het water door de lage algenconcentraties weer helderder is, is dat niet meer het geval.
- 3 Graas. Dit is het enige proces dat de omslag naar lage algenconcentraties en toenemende helderheid sinds 2004 kan verklaren. Dat sluit aan bij de waarneming dat in de eerste heldere periode (1988-1994) eerst de algen afnamen en daarna pas het fosfaat. Maar het is niet duidelijk welk dier de begrazing veroorzaakt. De driehoeksmossel misschien?

De hypothese over toekomstige fosfaatlimitatie trekt Boers in twijfel. Hij ziet ook een andere mogelijkheid: door veranderingen in de visstand zou het fosfaat in de witvispopulatie vrij kunnen komen, waardoor het fosfaatgehalte en daarmee de algengroei weer kunnen toenemen.

Boers merkt op dat de algengroei direct na de afsluiting ook beperkt werd door graas, door zoöplankton. Is het zoöplankton weer toegenomen? Meeuwse denkt van niet: zoöplankton is verdwenen door sterke predatie door witvis en de witvispopulatie is niet in omvang afgenomen. Boers suggereert dat het zoöplankton zich nu misschien tussen de waterplanten kan verschuilen.

De Vries legt de vraag voor of driehoeksmosselen de begrazing kunnen veroorzaken. De quagga-mossel *Dreissena bugensis* - een exotische variant van de gewone driehoeksmossel *Dreissena polymorpha* - is gesignaleerd in het Bathse spuikanaal, maar nog niet in het Krammer-Volkerak. Boers heeft de ervaring dat de gewone driehoeksmossel zich pas vestigt als er weinig detritus op de bodem ligt, dus volgend op de afname van algen.

De deskundigen achten begrazing een plausibele verklaring voor de afname van de algengroei, maar het hoeft niet zo te zijn. Onderzoek moet uitwijzen welk dier verantwoordelijk voor de begrazing kan zijn. De deskundigen wijzen erop dat begrazing een heel instabiel proces is, waarbij de algengroei sterk kan variëren.

Conclusie over toekomstige ontwikkeling van blauwalgen

De Vries legt de deskundigen de finale vraag voor: zal de overlast door blauwalgen in de toekomst verdwijnen als het Volkerak-Zoommeer zoet blijft?

Smolders en Slomp vinden de analyse van diepe sedimentmonsters en het poriënwater een voorwaarde om die vraag te kunnen beantwoorden. Met die informatie is de hoeveelheid fosfaat die immobiel zal worden goed en vrij eenvoudig te modelleren. Van Riemsdijk wijst erop dat ook de snelheid van het proces belangrijk is: hoe groot is de verdwijflux van fosfaat in de bodem?

Slomp geeft enkele adviezen voor het nemen van de bodemmonsters:

- Gebruik verse monsters. Uit recent onderzoek blijkt dat de fosfaatspeciatie in gedroogde monsters sterk kan veranderen.
- Pas de meest recente technieken voor het nemen van monsters toe.
- Bemonster ook het poriënwater.
- Neem monsters in ten minste drie verschillende seizoenen.

Loeb onderstreept dat de huidige toestand nog niet de gewenste toestand is: de blauwalgen zijn weliswaar sterk verminderd, maar nog niet weg en er zijn te weinig waterplanten. Ook als de speciatie van fosfaat in de bodem bekend is, is het niet zeker of het meer zich naar een stabiele goede toestand ontwikkelt, zeker door de complexe combinatie met biologische processen (graas). Ook de wijze van begrazing moet nader onderzocht worden.

De deskundigen concluderen dat op dit moment niet te voorspellen is of de afname van de blauwalgenbloei verder zal doorzetten. Ze zijn het erover eens dat twee processen de recente afname van algenbloei en fosfaat kunnen verklaren: toegenomen immobilisatie van fosfaat in de waterbodem en toegenomen begrazing van algen. De deskundigen adviseren beide zaken beter te onderzoeken. Dat is een voorwaarde om met enige zekerheid een voorspelling over de toekomstige ontwikkeling van de blauwalgen te kunnen doen.

Tekstbureau Met Andere Woorden, Arnhem
december 2010