

**Verwachte waterkwaliteit in  
een verbonden en zout  
Grevelingen - Volkerak-  
Zoommeer met getij**





# **Verwachte waterkwaliteit in een verbonden en zout Grevelingen - Volkerak-Zoommeer met getij**

resultaten van 1D en 3D modellering

Ies de Vries  
Chris Sprengers  
Arno Nolte  
Bas Stengs  
Otto Weiler  
Tom Jongeling

1207783-000



## Titel

Verwachte waterkwaliteit in een verbonden en zout Grevelingen - Volkerak-Zoommeer met getij

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1207783-000	1207783-000-VEB-0011	31

## Trefwoorden

Grevelingen, Volkerak-Zoommeer, getijdenwerking, waterkwaliteit

## Samenvatting

In de alternatieven 'zout, getij' voor het Grevelingenmeer en het Volkerak-Zoommeer (VZM) die in de Rijksstructuurvisie worden onderzocht krijgen beide meren beperkte getijdenwerking.

Dit rapport presenteert de consequenties voor de waterkwaliteit.


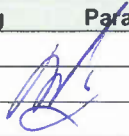
In het Grevelingenmeer veroorzaakt getijdenwerking een effectieve verversing waardoor de huidige zuurstofuitputting in de bodemwaterlaag nagenoeg geheel zal verdwijnen. Door aanvoer van nutriënten vanuit het VZM zal de hoeveelheid algen kunnen verdubbelen.

In het VZM is de verversing door getijdenwerking geringer. In het Volkerak ontstaat, mede door de grote zoetwatertoevoer, een sterke en vrijwel permanente stratificatie. In het oostelijke deel van het Volkerak zal daardoor zuurstofuitputting in de bodemwaterlaag optreden. Langdurige zuurstofuitputting, langer dan 1 maand continu, treedt alleen op in een beperkt areaal in de diepere geulen

Het VZM blijft eutroof, met potentieel hoge algenconcentraties. In Krammer en Zoommeer zal naar verwachting begrazing door mariene schelpdieren de algen in toom houden. In het Volkerak kan de graascontrole wegvallen doordat mariene schelpdieren het lagere zoutgehalte niet overleven. De hoeveelheid algen zal dan sterk kunnen toenemen.

## Referenties

-

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	okt. 2013	Ies de Vries		Willem Stolte		Rinus Vis	
2.0	nov. 2013	Ies de Vries		Willem Stolte		Rinus Vis	

## Status

definitief



## Inhoud

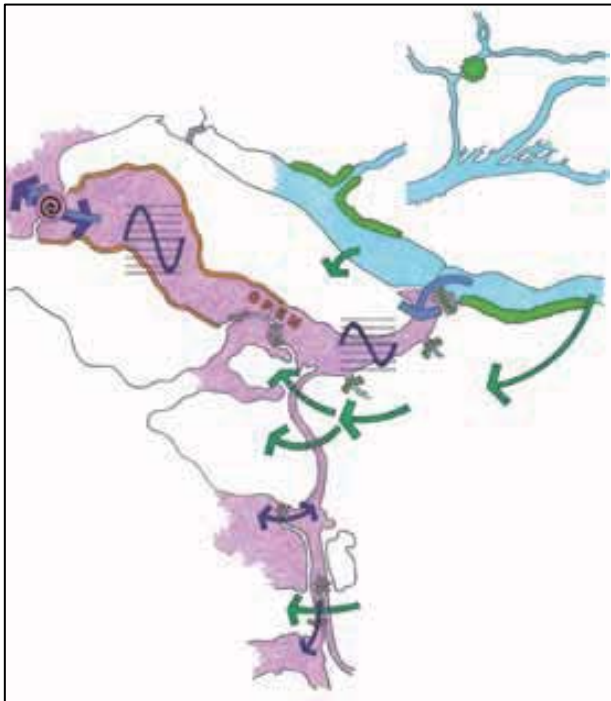
<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2 Doorlaatmiddel noordelijk deel Grevelingendam</b>	<b>3</b>
<b>3 Getijslag en debieten</b>	<b>9</b>
3.1 Dimensies doorlaatmiddel Grevelingendam	9
3.2 Sturing op een constante middenstand	11
3.3 Jaarsom 2008: debieten en getijdenwerking in voorkeursalternatief	13
3.3.1 Analyse verhoogde waterstanden en de periodiciteit daarvan	14
3.4 Extra getij variant	16
3.5 Conclusies van dit hoofdstuk	16
<b>4 3D modellering van de waterkwaliteit (RGV 3D som)</b>	<b>19</b>
4.1 Water en zout	21
4.1.1 Horizontale verschillen in zoutconcentratie	21
4.1.2 Zoutstratificatie	22
4.2 Zuurstof	24
4.3 Meststoffen en algen	25
4.4 Invloed van begrazing door mariene schelpdieren	26
4.5 Conclusies van dit hoofdstuk	27
<b>5 Samenvattende systeembeschrijving</b>	<b>29</b>
<b>6 Referenties</b>	<b>31</b>





## 1 Inleiding

In de alternatieven 'zout, getij' voor het Grevelingenmeer en het Volkerak-Zoommeer die in de Rijksstructuurvisie worden onderzocht krijgen beide meren beperkte getijdenwerking (Figuur 1.1, Ministerie I&M, 2013). In de Grevelingen komt getijdenwerking via een doorlaatmiddel in de Brouwersdam, al of niet in combinatie met een getijcentrale. In twee van de alternatieven (5<sup>OV</sup>, als variant op 5, en 8) komen de twee meren in open verbinding met elkaar te staan via een opening in de Grevelingendam, waardoor de getijdenwerking en het zoute water vanuit de Noordzee ook doordringen in het Volkerak-Zoommeer.



Figuur 1.1 Alternatief 8 van de RGV: zout, getij, waterberging

Dit rapport doet verslag van onderzoek aan de beide alternatieven met een open verbinding tussen Grevelingen en VZM. Het betreft product 1.1 uit de requirements van het KPP project Zuidwestelijke Delta 2013:

*Extra modelberekeningen met 3D modelinstrumentarium Grevelingen-Volkerak-Zoommeer. Optimalisatiesom met een getijslag op de Grevelingen van 50 cm en op het VZM van 30 cm, met een doorlaatopening in de Grevelingendam van ongeveer 1000-2000 m<sup>2</sup>. Wat betekent deze variant voor het behalen van de gewenste waterkwaliteit? Product bestaat uit een modelsimulatie inclusief een integrale rapportage.*

**Hoofdstuk 2** doet verslag van een expert workshop naar de randvoorwaarden voor en de contouren van een ontwerp van het doorlaatmiddel in de Grevelingendam.

**Hoofdstuk 3** presenteert de resultaten van de 1D SOBEK modellering waarmee de debieten zijn gegenereerd voor de 3D modellering.

**Hoofdstuk 4** presenteert de resultaten van de 3D waterkwaliteitsmodellering.

**Hoofdstuk 5** formuleert in de vorm van een samenvattende systeembeschrijving de verwachtingen ten aanzien van waterkwaliteit.



## 2 Doorlaatmiddel noordelijk deel Grevelingendam

Dit hoofdstuk gaat over een mogelijk toekomstig doorlaatmiddel<sup>1</sup> in de Grevelingendam. De randvoorwaarden voor het ontwerp, contouren van een ontwerp en nog te maken verkennende numerieke berekeningen voor de waterbeweging zijn besproken op een overleg bij Deltares op 23 mei 2013. Deelnemers aan het overleg waren: les de Vries (per telefoon), Otto Weiler, Chris Sprengers, Arno Nolte en Tom Jongeling (allen Deltares).

### 2.1 Het watersysteem

Het doorlaatmiddel in de Grevelingendam vormt de verbinding tussen Grevelingen en Volkerak. Met deze verbinding en een nieuw aan te leggen doorlaatmiddel in de Brouwersdam ontstaat een aaneengesloten watersysteem van Grevelingen, Volkerak, en Zoommeer, dat bij de Brouwersdam in open verbinding staat met de zee. Op verschillende plaatsen langs de randen van het systeem stroomt water toe, wordt water ingelaten of afgelaten. Het beoogde doel van deze inrichtingsvariant is het verbeteren van de waterkwaliteit van zowel Grevelingen als Volkerak-Zoommeer. Door de open verbindingen ontstaat een zoutwatermilieu op het Volkerak en wordt meer dynamiek gecreëerd (de getijbeweging op zee plant zich door de Grevelingen voort tot in het Volkerak en het Zoommeer).

Het nieuwe doorlaatmiddel in de Brouwersdam is aanvullend op een bestaand spuisluis in de dam (dat overigens een beperkte capaciteit heeft); het doorlaatmiddel zal worden voorzien van hydroturbines en schuiven. Voorshands wordt er vanuit gegaan dat de schuiven onder normale omstandigheden open staan, zodat zowel bij inkomend getij als uitstromend water energie kan worden opgewekt.

De Volkeraksluizen aan de noordoostzijde vormen in het nieuwe systeem de overgang tussen zout en zoet water. Als onderdeel van de bestrijding van zoutindringing op het zoete Hollands Diep zal met zoet water worden doorgespoeld richting het Volkerak en zal zoet water worden gebruikt in waterschermen (daggemiddeld debiet  $25\text{m}^3/\text{s}^2$ ).

Aan de zuidzijde van het systeem bevindt zich de spuisluis Bath. Deze spuisluis heeft in het nieuwe verbonden systeem (vanaf de start) niet de functie van afvoer van overtollig water, maar wordt ingezet om een circulatiestroom richting Zoommeer en Bathse Spuikanaal te genereren. Spuien zal dus structureel plaatsvinden, in plaats van incidenteel zoals nu. Dit gebeurt onder vrij verval, bij voldoende lage waterstand op de Westerschelde.

Bij de Krammersluizen, de Kreekraksluizen en de Bergsediepsluis zijn op dit moment zout-zoetscheidingssystemen in gebruik; deze systemen kunnen bij de nieuwe inrichting komen te vervallen. Dit zal dan tot aanzienlijke tijdswinst bij het schutten leiden.

Alle genoemde kunstwerken kunnen in geval van tijdelijke berging van rivierwater worden ingezet om het geborgen water, na voldoende daling van de zeewaterstand, af te voeren naar zee.

Het gewenste operationele beheer van het geschakelde watersysteem bestaande uit Grevelingen, Volkerak en Zoommeer is nog niet uitgewerkt.

---

<sup>1</sup> Waarbij moet worden gedacht aan een 'opening' zonder beweegbare onderdelen zoals schuiven of deuren

<sup>2</sup> Dit debiet van  $25\text{ m}^3/\text{s}$  bij de Volkeraksluizen is het totaal van schutverlies, lekdebet, en waterschermdebet.

Een mogelijk beheervariant waarbij door middel van getijde-afhankelijke sturing van de schuiven van het inlaatmiddel in de Brouwersdam en de schuiven in de Bathse spuisluis zoveel mogelijk water wordt ingelaten, door het systeem geleid, en bij Bath wordt afgelaten, wordt in dit hoofdstuk niet beschouwd (zie daarvoor hoofdstuk 3).

## 2.2 Het doorlaatmiddel in de Grevelingendam

### *Waterkwaliteitsfunctie*

Het streven is om op de Grevelingen een getijslag van 0,5m te realiseren bij gemiddelde getijcondities op zee. Het doorlaatmiddel in de Grevelingendam dient een zodanige capaciteit te hebben dat bij de getijslag van 0,5m op de Grevelingen een getijslag van 0,3m ontstaat op het Volkerak-Zoommeer. De grootte van de getijslag zal overigens van plaats tot plaats variëren afhankelijk van de algehele geometrie en bodemligging van de geschakelde gebieden. De getijbeweging zal vanaf de Brouwersdam als een lange golf door het systeem heen en weer lopen, waarbij de amplitude in delen van het systeem kan worden versterkt of afgezwakt. Om de hydraulische karakteristieken van het systeem goed te leren kennen is het nodig dat output van numerieke berekeningen wordt gepresenteerd in de vorm van tijdsfuncties voor een flink aantal representatieve "observatiepunten" in het gebied (in ieder geval bij de kunstwerken, maar ook op tussenpunten in de verschillende bekkens en bij bruggen). Bij springtij condities op zee zal de getijslag op Grevelingen en Volkerak-Zoommeer groter zijn dan bij gemiddelde getijcondities. Van belang is dat in het gebied zowel de doorvaarhoogte onder vaste bruggen als de vaardiepte voldoende groot blijft. Eventueel moeten pieken worden voorkomen door een goede sturing op de in- en uitlaat (Brouwersdam en Bath).

### *Bergingsfunctie*

Het doorlaatmiddel in de Grevelingendam dient tevens voldoende capaciteit te hebben om het Grevelingenmeer op adequate wijze mee te laten werken als tijdelijk bergingsgebied voor rivierwater bij stormvloed op zee. In Deltares-rapport 1207303 (Slootjes, 2013) wordt gesteld dat een doorlaatmiddel met opening van 1350 m<sup>2</sup> eenzelfde effect heeft op de waterstanden als een doorlaatmiddel met opening van 540 m<sup>2</sup>, en dat de kritische factor voor de constructie van het doorlaatmiddel de stroomsnelheid in de opening is (er wordt een maximum van 5 m/s genoemd). Hier moet als kanttekening bij geplaatst worden dat naarmate de opening van het doorlaatmiddel kleiner is een groter verval nodig is om eenzelfde debiet te realiseren. Er is daarom – in het geval van een kleinere opening en bij inzet als bergingsgebied – een effect op het verloop van de waterstanden te verwachten: de waterstand van Volkerak-Zoommeer loopt in eerste instantie sterker op en het Grevelingenmeer vult zich trager.

De capaciteitseis voor het doorlaatmiddel in de Grevelingendam is nu in feite gedefinieerd in termen van een maximaal toegestane stroomsnelheid van 5 m/s in het doorlaatmiddel. Deze stroomsnelheid wordt volgens het genoemde rapport bereikt bij een opening van 540 m<sup>2</sup>. Constructie-technisch gezien hoeven hogere stroomsnelheden dan 5m/s overigens geen belemmering te zijn voor een goed ontwerp. Veelal zijn het de financiële randvoorwaarden die bepalen wat mogelijk is (bij kleinere opening is vaak een zwaardere bodemverdediging nodig die over een grotere lengte wordt doorgezet, maar er staat tegenover dat de constructie compacter is).

### *Scheepvaartfunctie*

Het doorlaatmiddel in de Grevelingendam moet doorvaarbaar zijn. Dit betekent dat stroomsnelheden in het doorlaatmiddel bij dagelijkse omstandigheden niet te hoog mogen zijn, en dat de vaardiepte en vrije ruimte boven de waterspiegel voldoende groot moeten zijn.

Vooralsnog wordt aangehouden dat de doorvaart geschikt moet zijn voor de recreatievaart, waarvoor een drempeldiepte van NAP-3,0 m wordt aangehouden. Dit is iets dieper dan de drempel van de Krammerjachtensluis (aan de zijde van Volkerak) die op NAP -2,70 m ligt. Het verschil geeft ruimte voor de getijslag. Er is nog niet gekeken naar de marge voor bewegingen in golven. Dieper stekende schepen kunnen omvaren via de Krammersluizen. Ook de vrije doorvaarthoogte kan worden gebaseerd op de Kramerjachtensluis, waar een hoogte van NAP +18,40 m beschikbaar is. Vanwege het getij en een marge voor bewegingen zal deze boven de opening moeten worden verhoogd naar ca. +19 m.

Stroomsnelheden zijn afhankelijk van het getij; mogelijk zal een getijvenster met geschikte condities voor doorvaart moeten worden ingesteld.

Grevelingen en Volkerak zijn ondiep langs de noordelijke oever; het ligt daarom voor de hand om het doorlaatmiddel zoveel mogelijk aan de zuidzijde van de dam te positioneren, in de lijn van de vroegere getijgeul.

#### *Regelbaarheid van het doorlaatmiddel*

Gezien de hoge kosten van beweegbare afsluitingsmiddelen wordt er vanuit gegaan dat het doorlaatmiddel in de Grevelingendam niet zal worden voorzien van schuiven of deuren. De vereiste opening van het doorlaatmiddel moet daarom met zorg worden gekozen. Voor de dagelijkse omstandigheden met getij-gedreven stroming en scheepvaart kan een andere opening nodig blijken te zijn dan is vereist voor de incidentele vraag naar waterberging. Vooralsnog lijkt het verstandig om de opening te dimensioneren op de dagelijkse omstandigheden. Mocht een grotere doorstroomopening nodig zijn voor de waterbergingsfunctie dan zou deze grotere opening kunnen worden gerealiseerd in de vorm van extra openingen die in dagelijkse omstandigheden met bijvoorbeeld schotbalken zijn afgesloten. Een andere mogelijkheid is dat de kruin van de dam over een flinke lengte wordt verlaagd en overstroombaar wordt gemaakt bij hogere waterstanden op het Volkerak (de capaciteit bij geringe overstromingsdiepte is echter niet zo groot, zodat van deze optie niet te veel moet worden verwacht).

Wanneer bij dagelijkse omstandigheden een verschil tussen instroomhoeveelheid en uitstroomhoeveelheid is gewenst kan dit worden gerealiseerd door de stromingsweerstand van het doorlaatmiddel bij de ene stroomrichting hoger te maken dan bij de andere stroomrichting (vooral een kwestie van vormgeving van toe leidende (dam)constructies).

#### *Verkeersweg over de Grevelingendam*

Uitgangspunt is dat de bestaande verkeersweg over de Grevelingendam zal worden gehandhaafd. Waarschijnlijk zal ook het verkeer tijdens de aanleg van het doorlaatmiddel door moeten kunnen gaan. Het doorlaatmiddel zal of via een tunnel of via een brug moeten worden gekruist.

#### *Compact doorlaatmiddel versus brievenbus*

Een compacte smalle constructie resulteert in concentratie van de stroming en dus in meer energieverlies bij afstroming, en tevens in een groter debiet en een grotere impuls per strekkende meter constructie dan bij een brede, platte constructie (brievenbus). Daardoor ontstaat de noodzaak van een sterkere en verder doorgezette bodemverdediging. Ook zal de scheepvaart mogelijk meer hinder ondervinden.

Voordelen van de compacte constructie zijn dat de dam over een kleinere lengte moet worden afgegraven en dat de fundering van het doorlaatmiddel minder uitgebreid hoeft te zijn. Ook zal de brug of tunnel een minder breed gat hoeven te overspannen.

De uiteindelijke keuze zal volgen uit een kostenbeschouwing, waarbij als randvoorwaarden gelden dat de te kiezen diepte van de drempel (nu gekozen op NAP -3,0 m) voldoende moet zijn voor de scheepvaart en de effectieve doorstroombopening  $\mu A$  voldoende groot moet zijn voor de genoemde waterkwaliteit- en bergingfuncties.

#### *De grootte $\mu A$ van de opening*

In Deltares-rapport 1201650 (Nolte en Spiteri, 2011) wordt verslag gedaan van numerieke berekeningen van de waterkwaliteit van het Grevelingenmeer in geval van openingen in Brouwersdam en Grevelingendam. De berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van een 3D model. Later zijn aanvullende waterbewegingsberekeningen gemaakt met een 2D model (naar aanleiding van geconstateerde opslingeringseffecten in het 3D model, Nolte, 2011). De grootte van de effectieve doorstroombopening van het doorlaatmiddel in de Grevelingendam is daarbij gevarieerd ( $4500 \text{ m}^2 - 1000 \text{ m}^2 - 500 \text{ m}^2$ ). Het debiet door de Brouwersdam werd in de berekeningen sinusvormig opgelegd.

Als eerste verkenning in het huidige project zijn berekeningen uitgevoerd met behulp van een 1D Sobek model (met verschillende parallelle takken in de bekkens). In deze berekeningen zijn de getijbewegingen op zee bij de Brouwersdam en in de Westerschelde bij de spuisluis Bath meegenomen. De afvoercoëfficiënten van de openingen in Brouwersdam ( $\mu A = 400 \text{ m}^2$ ) en Grevelingendam ( $\mu A = 300 \text{ m}^2$ ) zijn op 1 gesteld. De berekeningen bij gemiddeld getij geven aan dat effectieve openingen van  $400 \text{ m}^2$  in de Brouwersdam en van  $300 \text{ m}^2$  in de Grevelingendam al voldoende groot zijn om op de Grevelingen een getijslag van ca. 0,5m (Herkingen) en op het Volkerak van ca. 0,35m (Steenbergen) te laten ontstaan. Omdat er verschillen zijn met de 2D berekeningen dienen de resultaten van beide soorten berekeningen nog eens naast elkaar te worden gelegd.

Op basis van de overwegingen zijn enkele aanvullende Sobek berekeningen gedefinieerd waarin de variatie over een springtij-doodtij cyclus wordt verkend. De afvoercoëfficiënt van de opening in de Brouwersdam wordt voorlopig op 0,8 gesteld (in verband met energieonttrekking door de hydroturbines; er geldt: hoe effectiever de turbines, hoe meer energie wordt onttrokken, hoe lager de te hanteren afvoercoëfficiënt  $\square$  in de berekeningen, en hoe kleiner de getijslag op het Grevelingenmeer zal zijn).

De afvoercoëfficiënt van het doorlaatmiddel in de Grevelingendam wordt voorlopig op 1 gesteld. De effectieve opening zal in de Sobek-berekeningen worden gevarieerd als  $500 \text{ m}^2$ ,  $400 \text{ m}^2$  en  $300 \text{ m}^2$ .

In de berekening wordt er niet gestuurd op de inlaat bij de Brouwersdam (deze staat steeds volledig open) en de sturing bij Bath is conform de huidige situatie.

In de Sobek-berekeningen worden nu niet de effecten door wind (opwaaiing en afwaaiing) meegenomen. Deze effecten kunnen wel van invloed zijn op de debieten door de doorlaatmiddelen en dus op de waterbeweging, en dienen in een vervolgfase te worden mee beschouwd.

### 2.3 Conclusies van dit hoofdstuk

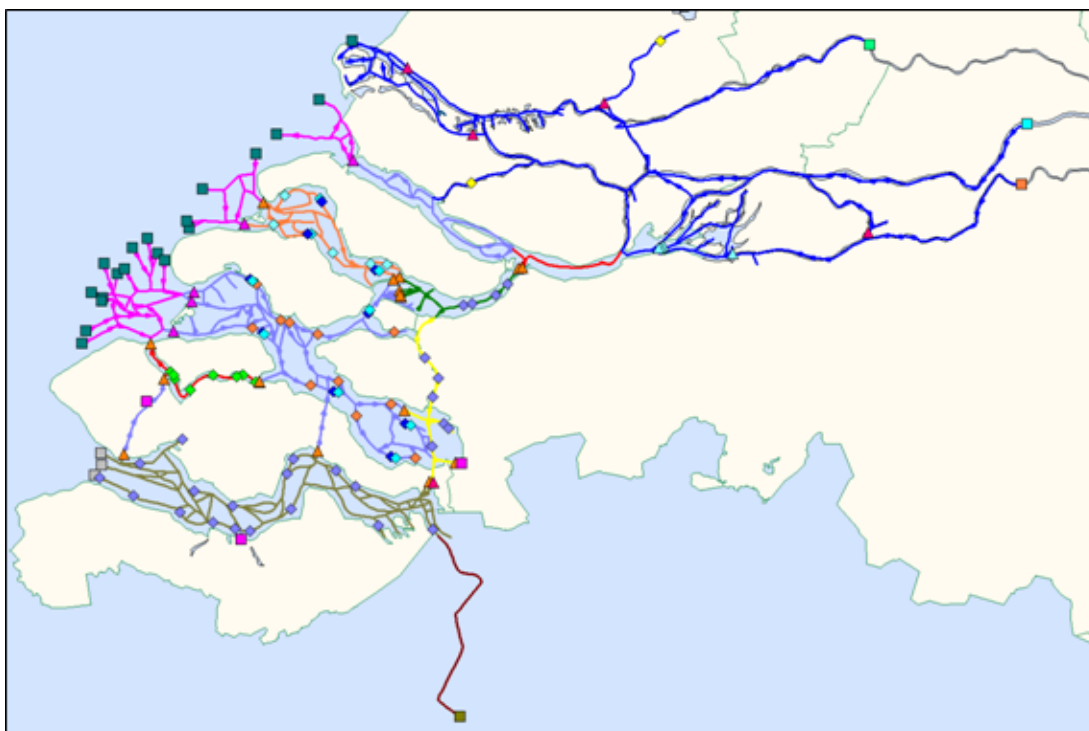
- 1 Met een doorlaatmiddel zonder beweegbare afsluitingsmiddelen (schuiven of deuren) kan waarschijnlijk aan de primaire ontwerpeis worden voldaan: een getijslag van 50 cm op het Grevelingenmeer en 30 cm op het Volkerak-Zoommeer.
- 2 Met een goed ontwerp van het doorlaatmiddel is veel mogelijk, bijvoorbeeld een richtingsafhankelijk verschil in stromingsweerstand waardoor een netto doorstroming van zeewater van het Grevelingenmeer naar het Volkerak-Zoommeer kan worden gerealiseerd.
- 3 Een (kleine) doorlaatopening voor dagelijks gebruik kan ook voldoende zijn voor waterberging; het grotere verval en hoge stroomsnelheden ( $> 5$  m/s) zijn geen belemmering voor een goed ontwerp.
- 4 Een grotere opening voor waterberging kan bijvoorbeeld met (1) extra openingen met schotbalken of (2) een overspoelbare dam met lage kruinhoogte. Van de laatste optie moet niet teveel worden verwacht, omdat de capaciteit door de geringe overstromingsdiepte niet groot is.





### 3 Getijslag en debieten

Met een uitsnede uit het 1D (SOBEK) model van de Zuidwestelijke Delta (Figuur 3.1) is met een aantal testberekeningen (voor de maand januari 2005) onderzocht hoe groot het doorlaatmiddel in de Grevelingendam moet zijn om te voldoen aan de primaire ontwerp eis: een getijslag van 50 cm in het Grevelingenmeer en van 30 cm in het Volkerak-Zoommeer (paragraaf 3.1). Vervolgens is onderzocht hoe door middel van sturing van de getijuitwisseling via de Brouwersdam de middenstand op beide meren zo constant mogelijk kan worden gehouden op NAP-10 cm (paragraaf 3.2). Tenslotte is met deze instellingen een volledige jaarsom (voor het jaar 2008) gedraaid, waarmee de debieten door alle kunstwerken zijn gegenereerd als input voor de 3D som (paragraaf 3.3).



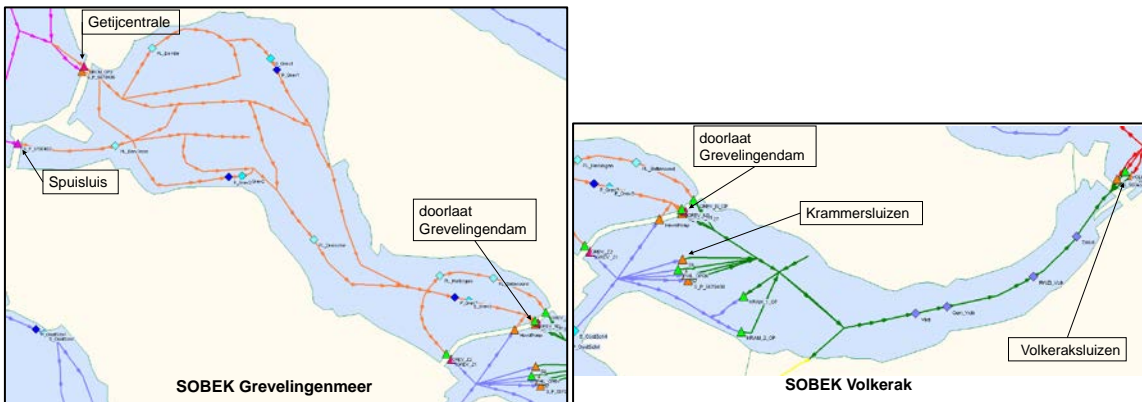
Figuur 3.1 Schematisatie van het 1D ZWD model

#### 3.1 Dimensies doorlaatmiddel Grevelingendam

Voor het simuleren van getijdenwerking in het verbonden Grevelingen-Volkerak-Zoommeer zijn in de schematisatie van het 1D model een aantal wijzigingen aangebracht (Figuur 3.2). In de testberekeningen zijn de volgende instellingen gehanteerd:

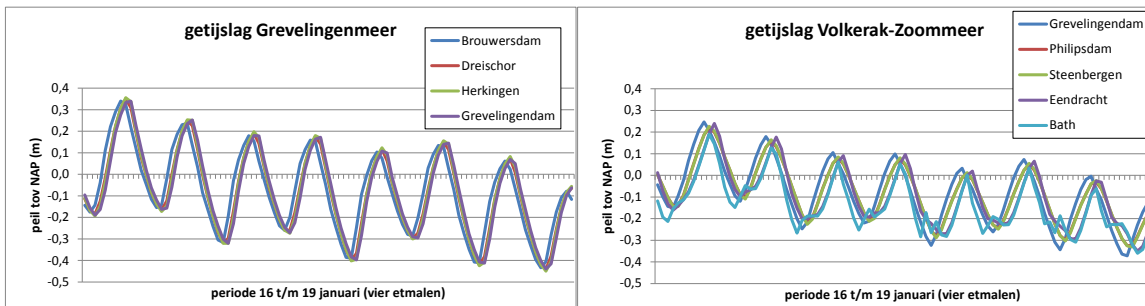
- Brouwersspuisluis: ongewijzigd, doorstroomopening 65 m<sup>2</sup>;
- Getijcentrale: effectieve<sup>3</sup> doorstroomopening 640 m<sup>2</sup>;
- Doorlaat Grevelingendam: geteste doorstroomopeningen 300, 400 en 500 m<sup>2</sup>;
- Krammersluizen: ongeveer 9 m<sup>3</sup>/s netto spuidebiet (naar de Oosterschelde);
- Volkeraksluizen: continu inlaatdebiet 25 m<sup>3</sup>/s vanuit Hollandsch Diep (en 10 m<sup>3</sup>/s extra zoetwaterdebiet via Dintel en Steenbergse Vliet), totaal 35 m<sup>3</sup>/s;
- Bathse spuisluis: opening 66 m<sup>2</sup>, alleen spui bij laagwater op Westerschelde.

<sup>3</sup> De bruto opening is dan afhankelijk van de afvoer coëfficiënt in verband met energieonttrekking door de hydroturbines. Bij een afvoer coëfficiënt van  $\mu=0,8$  is de bruto opening 800 m<sup>2</sup>, bij  $\mu=0,6$  is de bruto opening ruim 1000 m<sup>2</sup>



Figuur 3.2 Details 1D ZWD model met aanpassingen (details Zoommeer niet getoond)

Uit de testberekeningen blijkt dat een opening in de Grevelingendam van 500 m<sup>2</sup> minimaal noodzakelijk is, maar ook voldoende, voor een getijslag van 50 cm in het Grevelingenmeer en, met een faseverschil, 30 cm in het VZM (Figuur 3.3). Bij een kleinere opening blijft de getijslag in het VZM kleiner. Bij een grotere opening wordt de getijslag in het VZM groter, en in het Grevelingenmeer een beetje kleiner.



Figuur 3.3 Getijslag en overige peilvariatie in het Grevelingenmeer (links) en het Volkerak-Zoommeer (rechts) bij een doorlaatopening in de Grevelingendam van 500 m<sup>2</sup>.

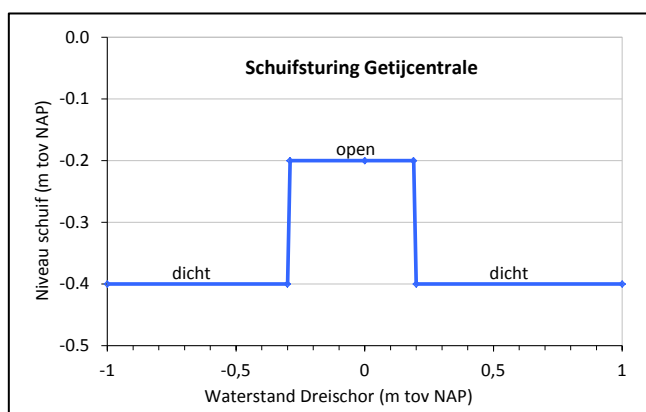
Figuur 3.3 toont echter ook een ongewenst effect. De peilvariatie per getij is weliswaar nagenoeg exact 50 cm in het Grevelingenmeer en 30 cm in het VZM, maar de totale peilvariatie, het verschil tussen de hoogste en de laagste waterstand, is in beide meren veel groter: ongeveer 80 cm in het Grevelingenmeer en 60 cm in het VZM. Dit is het gevolg van de variatie in de middenstand op zee gedurende de springtij – doottij cyclus, en door windopzet, die door de vrije ongestuurde uitwisseling wordt doorgegeven in de beide meren. Deze peilvariatie is veel groter dan gewenst; in verband de bijzondere zoetwaterafhankelijke flora op de eilanden in het Gevelingenmeer en de vereiste vaardiepte/geulbreedte en doorvaarhoogte op de Schelde-Rijn verbinding in het VZM.

De testberekeningen leiden zo tot een aanvullende ontwerp eis: een zo constant mogelijk middenpeil op NAP-10 cm, en daarmee een maximale peilvariatie tussen:

- NAP+20 cm en NAP-30 cm in het Grevelingenmeer;
- NAP+ 5 cm en NAP-25 cm in het Volkerak-Zoommeer.

### 3.2 Sturing op een constante middenstand

Met een extra serie testberekeningen is onderzocht of door middel van sturing van de wateruitwisseling door de getijcentrale (knijpen van de opening bij dreigend onder- of overschrijding van de maximaal gewenste peilvariatie) kan worden voldaan aan de ontwerpeis van een constante middenstand.

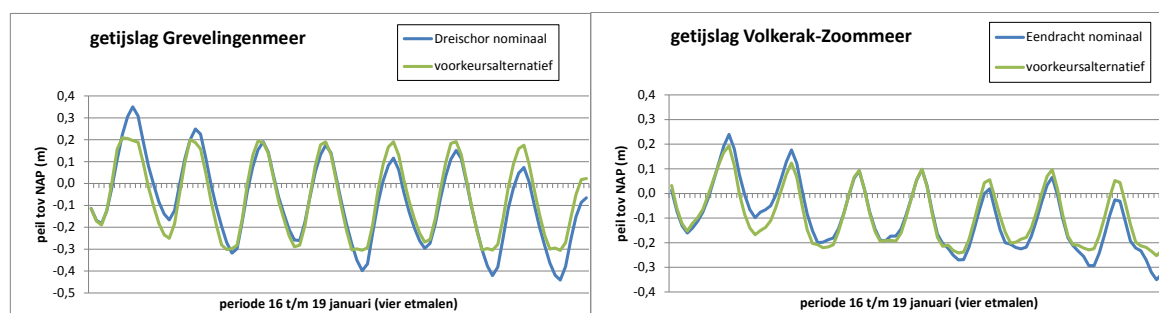


Figuur 3.4 Sturing van de doorlaatopening van de getijcentrale

De gekozen sturing is heel direct (Figuur 3.4). Bij een berekende waterstand bij Dreischor van NAP-29 cm respectievelijk NAP+19 cm gaat de opening van de getijcentrale van helemaal open naar helemaal dicht bij een berekende waterstand van NAP-30 cm respectievelijk NAP+20 cm. Voordeel van deze directe 'bloksturing' is de effectiviteit ervan en het geringe rendementsverlies van de getijcentrale; nadeel is een zaagtand effect op de peilvariaties, dat zich door het hele systeem voortplant (zie verder paragraaf 3.3).

Naast de bloksturing zijn nog enkele wijzigingen van de modelinstellingen doorgevoerd:

- De effectieve doorlaatopening van de getijcentrale is vergroot van  $640 \text{ m}^2$  naar  $960 \text{ m}^2$  (oftewel een bruto opening van  $1200 \text{ m}^2$  bij  $\mu=0,8$ ). Dit is een noodzakelijke compensatie voor de debiet- en dus getijslagreductie ten gevolge van de sturing.
- Het netto spuidebiet van de Krammersluizen is veranderd van  $9 \text{ m}^3/\text{s}$  naar  $0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Reden: dit (huidige) spuidebiet is niet meer nodig bij een zout VZM.
- De doorstroomopening van de Bathse spuisluis is vergroot van  $66 \text{ m}^2$  naar  $94 \text{ m}^2$ , overeenkomend met de maximale opening (bij NAP) van de huidige spuisluis. Reden: door meer te (kunnen) spuien bij Bath ontstaat een netto doorstroming van Grevelingenmeer naar VZM naar de Westerschelde, en daardoor een effectieve verzouting van het VZM ('zoutspoelen').



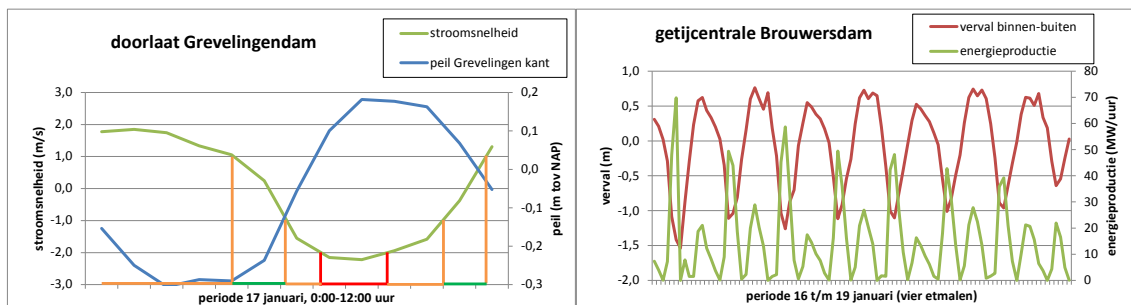
Figuur 3.5 Effect van sturing op getijslag en overige peilvariatie. Nominaal (blauwe lijnen) = zonder sturing; voorkeursalternatief (groene lijnen) = met sturing

Figuur 3.5 illustreert de effectiviteit van de sturing. Zowel de toppen als de dalen worden afgekapt tot binnen de grenzen van de toegestane peilvariatie (behoudens een enkele uitzondering, zie verder paragraaf 3.3).

Figuur 3.6 toont enkele andere resultaten. De linker grafiek illustreert het verloop van de stroomsnelheid in de doorlaatopening in de Grevelingendam gedurende één getijperiode:

- Bij inkomend tij (dus bij stroming van Grevelingen naar VZM, negatieve waarden in de grafiek, linker y-as) is de stroomsnelheid ongeveer 5 uur lang >1 m/s (>3,6 km/uur), waarvan ongeveer 2 uur lang >2 m/s (>7,2 km/uur). Deze periodes zijn op de x-as oranje respectievelijk rood gemarkeerd.
- Bij uitgaand tij blijft de stroomsnelheid <2 m/s, maar is wel langdurig > 1 m/s
- Rondom de kentering (dus tweemaal per getijperiode) is gedurende ongeveer 1,5 uur de stroomsnelheid < 1 m/s. Deze periodes zijn op de x-as groen gemarkeerd.

De energieproductie van de getijcentrale is, uiteraard, erg discontinu (rechter grafiek in Figuur 3.6). De productie is het hoogst bij instromend water omdat dan het verval het grootst is door de sturing op een lagere middenstand dan NAP.



Figuur 3.6 Gemiddelde stroomsnelheid in de doorlaatopening in de Grevelingendam in relatie tot de peilvariatie (links) en energieproductie van de getijcentrale in relatie tot het verval (rechts).

Tabel 3.1 vat de resultaten van de 1D testberekeningen samen en vergelijkt deze met eerdere onderzoeken (RWS Zeeland, 2012, Nolte en Spiteri, 2011). Het effect van sturing op het debiet door de getijcentrale is marginaal, doordat de debietreductie ten gevolge van sturing is gecompenseerd door een grotere effectieve doorstroomopening (van 640 m<sup>2</sup> naar 960 m<sup>2</sup>). Het uitwisselingsdebiet door de doorlaat in de Grevelingendam is groter dan het vergelijkbare debiet door de Philipsdam volgens de planstudie VZM (RWS Zeeland, 2013). Het netto doorstroomdebiet van Grevelingen naar VZM (365-317=48 m<sup>3</sup>/s) is niet veel kleiner dan het netto doorstroomdebiet van de P300 variant van de planstudie<sup>4</sup>. Het spuidebiet van de Bathse spuisluis is eveneens vergelijkbaar (102 versus 91 m<sup>3</sup>/s). Deze combinatie van een netto doorstroomdebiet en een groot spuidebiet zal naar verwachting een effectieve verzouting en verversing van het VZM bewerkstelligen (zie verder hoofdstuk 4). De energieproductie van de getijcentrale met gestuurde in- en uitstroom wordt geschat op ruim 10.000 MWh/maand.

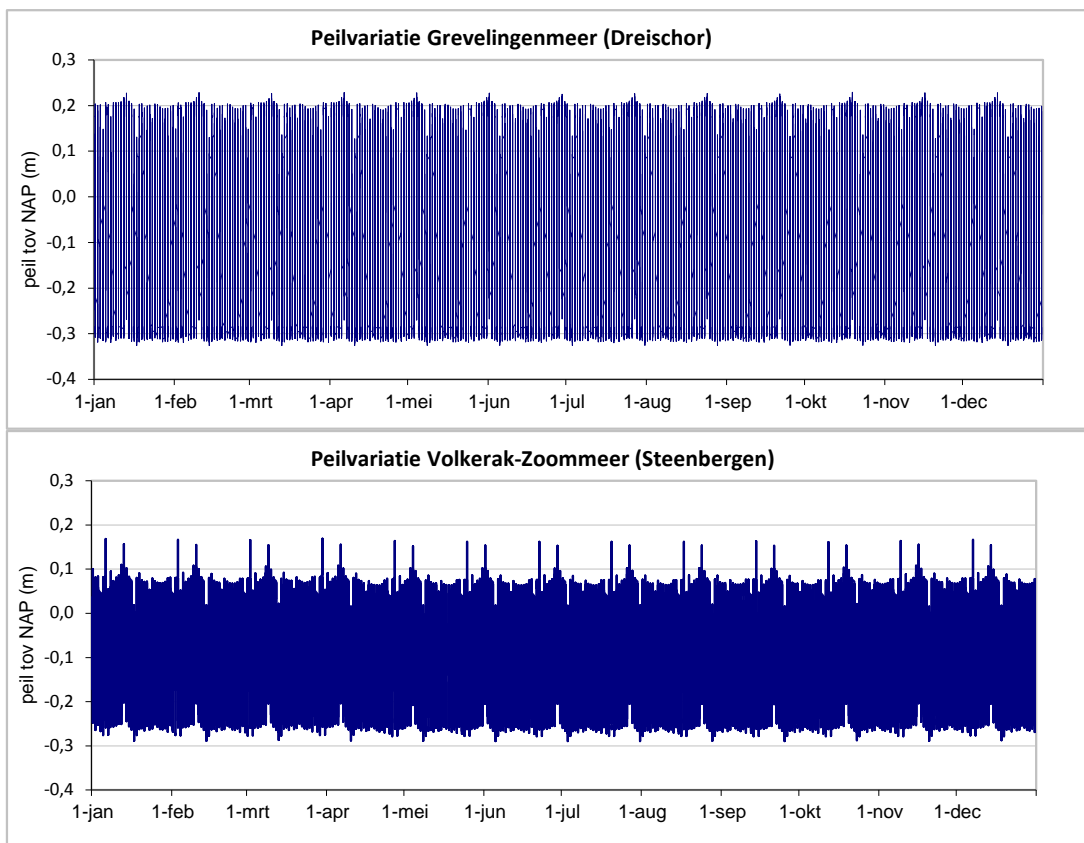
<sup>4</sup> P300 is de naam van de voorkeursvariant van de planstudie Waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer. Zie verder hoofdstuk 4.

Tabel 3.1 Vergelijking van daggemiddelde debieten zonder sturing ('nominaal') en met sturing ('voorkeursalternatief') en vergelijking met eerdere studies

daggemiddelde debieten (m <sup>3</sup> /s) januari 2005						
	nominaal		voorkeursalternatief		% verandering	
	in	uit	in	uit	in	uit
<b>RGV</b>						
Getijcentrale Brouwersdam	1498	1443	1456	1445	-3	0
spuisluis Brouwersdam	51	109	72	62	42	-43
Doorlaat Grevelingendam	342	317	365	317	7	0
Bathse spuisluis		79		102		28
<b>Planstudie VZM</b>						
Philipsdam P300			270	204		
Bathse spuisluis P300				91		
<b>MIRT Grevelingen</b>						
Getijcentrale Brouwersdam			925	875		
spuisluis Brouwersdam			125	125		
Doorlaat Grevelingendam			335	285		
Bathse spuisluis				+ 50		
<b>energieproductie (MWh/maand)</b>						
		11088		10535		-5

### 3.3 Jaarsom 2008: debieten en getijdenwerking in voorkeursalternatief

Met de instellingen volgens het voorkeursalternatief (paragraaf 3.2) is met het 1D SOBEK model een heel jaar doorgerekend. Gekozen is voor het jaar 2008. Voor dat jaar zijn invoergegevens beschikbaar, en de waterkwaliteitsmodellering voor de MIRT-verkenning Grevelingen is onder andere op dat jaar gebaseerd (Nolte en Spiteri, 2011).



Figuur 3.7 Berekende peilvariatie in het voorkeursalternatief in het Grevelingenmeer (boven) en in het Volkerak-Zoommeer (onder).

Figuur 3.7 illustreert dat de berekende peilen in het Grevelingenmeer nagenoeg exact variëren tussen NAP+20 cm en NAP-30 cm, oftewel een gemiddelde getijslag van 50 cm. Het berekende jaargemiddelde peil is NAP-8 cm (middenstand).

In het VZM is de getijslag duidelijk kleiner dan in het Grevelingenmeer, maar wel iets groter dan de gewenste maximale peilvariatie tussen NAP+5 cm en NAP-25 cm.

Tabel 3.2 Uitwisselings- en spuidebieten in het voorkeursalternatief ( $m^3/s$ )

	in	uit	in – uit (doorspoeling)	max. in	max. uit
Getijcentrale Brouwersdam	1489	1443	47	6385	4849
Spuisluis Brouwersdam	72	68	4	1083	664
Doorlaat Grevelingendam	376	322	54	1177	923
Bathse spuisluis	0	101	-101	0	343

De jaargemiddelde daggemiddelde en maximale debieten van de diverse doorlaten zijn weergegeven in Tabel 3.2. Het Bathse spuidebiet (daggemiddeld  $100 m^3/s$ ) is ongeveer het dubbele van het netto ingaande debiet door de Brouwersdam en de Grevelingendam.

De oorzaak van het grotere Bathse spuidebiet is dat ook de natuurlijke zoetwaterafvoeren van Dintel en Vliet (gemiddeld ongeveer  $14 m^3/s^5$ ), het inlaat debiet van de Volkeraksluizen, de extra zoetwaterdebieten van Dintel en Vliet voor de zoutlekbestrijding (samen  $35 m^3/s$ , zie paragraaf 3.1) en de polderuitmalingen van de omringende eilanden (enkele  $m^3/s$ ) via Bath naar de Westerschelde worden gespuid.

Figuur 3.7 toont, vooral in het VZM, vreemde peilpieken, met een frequentie en regelmaat die wijzen op samenhang met de 14-daagse springtij-doodtij cyclus. Dit verschijnsel is nader onderzocht (paragraaf 3.3.1).

### 3.3.1 Analyse verhoogde waterstanden en de periodiciteit daarvan

Als randvoorwaarde op de Noordzee is een periode met de historische waterstanden van 11-05-1995 t/m 07-06-1995 (28 dagen) genomen. Deze wordt elke 4 weken herhaald zolang de simulatieperiode duurt. Bijzondere pieken en dalen in deze historische periode worden dan ook steeds in de simulatieperiode herhaald. Dit verklaart de exacte periodiciteit ( $2 \cdot 13$  keer per jaar) van verschijnselen in het modelgebied voor zover die gerelateerd zijn aan de zeerandvoorwaarde.

Om na te gaan welk mechanisme de mogelijke oorzaak is van de waterstandsverhoging in het Volkerak ter hoogte van Steenberg (en waarschijnlijk ook op andere locaties) en om mogelijke verschillen met de maandsom aan te wijzen, is naast de bestaande maand- en jaarsommen (resp. jan-2005 en 2008) nog een jaarsom gedraaid voor 2008 maar dan met de tijdstappen zoals gebruikt in de maandsom. Een overzicht:

- Maandsom januari 2005: rekentijdstap=20 minuten, uitvoertijdstap=1 uur;
- Jaarsom 2008 origineel: rekentijdstap=10 minuten, uitvoertijdstap=10 minuten;
- Jaarsom 2008 extra: rekentijdstap=20 minuten, uitvoertijdstap=1 uur.

<sup>5</sup> De jaargemiddelde afvoer van de Dintel en de Steenbergse Vliet was in 2008  $14 m^3/s$ ; dit is ongeveer gelijk aan de meerjarig gemiddelde afvoer ( $13 m^3/s$ , gemiddeld over 1989-2009). De gemiddelde winterafvoer was in deze periode  $19 m^3/s$ , de gemiddelde zomerafvoer  $7 m^3/s$ . De verschillen tussen de jaren zijn groot, van jaargemiddeld  $6 m^3/s$  in een droog jaar (1996) tot jaargemiddeld  $21 m^3/s$  in een nat jaar (1998).

Wat opvalt aan de vorm van het signaal:

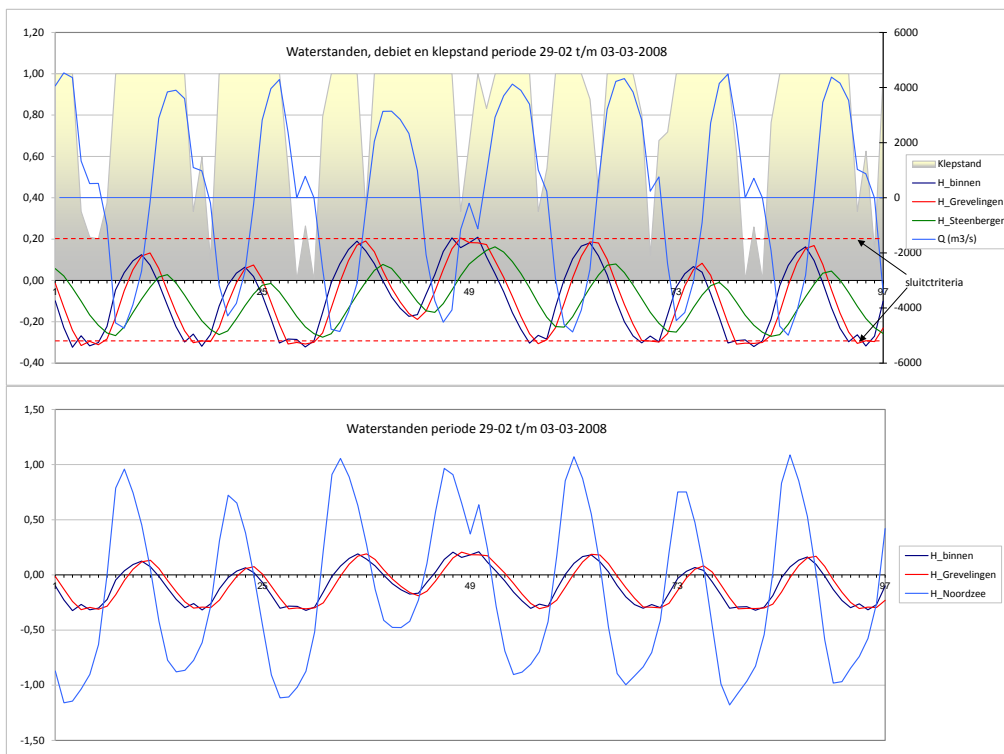
- De sturing van de klep in de getijcentrale reageert heel direct vanwege de blokfunctie, zie bovenste grafiek van Figuur 3.8, van grijs (dicht) naar geel (open).
- Dit leidt tot zaagtandvormige fluctuaties in de waterstanden en het debiet door de centrale. Bij de kleinere tijdstap (10 minuten) is dit nog beter te zien dan bij de grotere tijdstap (1 uur).
- Gladdere signalen zijn dus te verkrijgen met een trager reagerende sturing, maar dan kan het gebeuren dat de referentie waterstand buiten de gestelde grenzen treedt (rood gestippelde lijnen in de bovenste grafiek van Figuur 3.8).

Waarom loopt de waterstand nou zo op rond 2 maart, en elke 4 weken weer?

Vlak voor deze piek daalt de waterstand op de Noordzee niet zover als anders: tot -0.50 m, terwijl dat normaal tot rond -1.00 m is. Daardoor is er tijdelijk minder verval over de getijcentrale met als gevolg minder uitstroom vanuit de Grevelingen. De waterstand op de Grevelingen zakt vervolgens slechts tot -0.20 m terwijl dat normaal tot -0.30 m is. Ook op het Volkerak zie je dit verschijnsel. De klep blijft langer open, het ondergrenscriterium wordt niet bereikt. Het bovengrenscriterium wordt wel bereikt en de klep gaat even dicht maar ook gelijk weer open. De biedt voldoende verklaring voor de verdere stijging van de waterstand in het Volkerak. Dit verschijnsel herhaalt zich iedere 4 weken.

Conclusies:

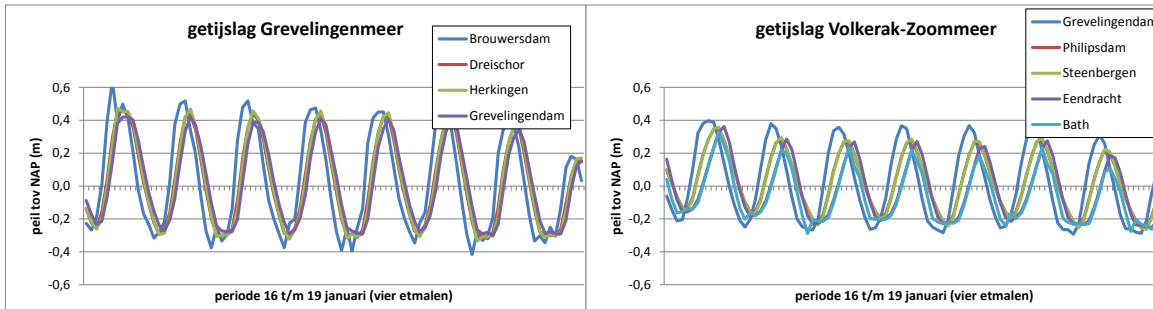
- Onrust (zaagtandvormen) in signalen is gevolg van de zeer directe bloksturing;
- Waterstandspieken Volkerak zijn gevolg van signaal op de Noordzee;
- Periodiciteit is gevolg van periodiciteit in de Noordzee randvoorwaarde.



Figuur 3.8 Analyse peilpieken en de periodiciteit daarvan

### 3.4 Extra getij variant

Naast de testberekeningen en de jaarsom voor het voorkeursalternatief (getijslag Grevelingen 50 cm, getijslag VZM 30 cm, middenstand beide meren NAP -10 cm) zijn testberekeningen uitgevoerd om de mogelijkheden voor een grotere getijslag te onderzoeken. De resultaten staan weergegeven in Figuur 3.9.



Figuur 3.9 Getijslag en overige peilvariatie in het Grevelingenmeer (links) en het Volkerak-Zoommeer (rechts) bij een doorlaatopening in de Grevelingendam van 1500 m<sup>2</sup> en een effectieve doorlaatopening van de getijcentrale van 1920 m<sup>2</sup>.

Met grotere doorlaatopeningen in de Brouwersdam en in de Grevelingendam is een getijslag mogelijk in het Grevelingenmeer van 70-80 cm en in het VZM van 50-60 cm. Zonder sturing zal de middenstand variëren rond NAP. De dimensies van de doorlaatopeningen zijn daarbij:

- Doorlaatopening Grevelingendam: 1500 m<sup>2</sup>.
- Effectieve doorlaatopening getijcentrale: 1920 m<sup>2</sup> (bij  $\mu=0,8$  is de bruto opening dan 2400 m<sup>2</sup>).

### 3.5 Conclusies van dit hoofdstuk

1. Aan de primaire ontwerpeis, namelijk een getijslag van 50 cm in het Grevelingenmeer en 30 cm in het VZM, kan worden voldaan met een doorlaatopening in de Grevelingendam van 500 m<sup>2</sup> in combinatie met een effectieve doorlaatopening van 640 m<sup>2</sup> van de getijcentrale in de Brouwersdam.
2. Een min of meer constante middenstand op ongeveer NAP-10 cm in beide meren, en daarmee een maximale peilvariatie die gelijk is aan de getijslag, kan effectief worden gehandhaafd door middel van sturing ('knijpen') van de doorlaatopening van de getijcentrale. Ter compensatie van het debietverlies door sturing moet de effectieve doorlaatopening van de getijcentrale worden vergroot naar 960 m<sup>2</sup>.
3. Met deze combinatie van doorlaatopening, debieten en peilvariatie zal de gemiddelde stroomsnelheid in de doorlaatopening in de Grevelingendam bij inkomend tij ongeveer 2 uur lang (per getijperiode) hoger zijn dan 2 m/s (> 7,2 km/uur). Bij uitgaand tij blijft de stroomsnelheid lager dan 2 m/s, maar is wel langdurig hoger dan 1 m/s (> 3,6 km/uur). Rondom kentering (dus twee maal per getijperiode) is de stroomsnelheid ongeveer 1,5 uur lang lager dan 1 m/s (< 3,6 km/uur).
4. Directe sturing, dat wil zeggen het plotseling helemaal dichtzetten van de doorlaatopening van de getijcentrale bij dreigende onder- of overschrijding van toegestane peilen, kan leiden tot zaagtandeffecten in de peilvariatie en in het VZM tot ongewenste peilpieken.



5. Met het benutten van de volledige huidige doorlaatopening van de Bathse spuisluis (94 m<sup>2</sup> bij NAP) kan een netto (getijgemiddelde) doorstroming van het VZM via de doorlaat in de Grevelingendam van ongeveer 50 m<sup>3</sup>/s worden bewerkstelligd, en daarmee een effectieve 'zoutspoeling'.
6. De energieproductie van getijcentrale, met een effectieve opening van 960 m<sup>2</sup> en sturing op een constante middenstand van NAP-10 cm, wordt geschat op ruim 10.000 MWh/maand.
7. Voor extra getij in het Grevelingenmeer (70-80 cm) en het VZM (50-60 cm) zijn grotere doorlaatopeningen nodig: een doorlaatopening in de Grevelingendam van 1500 m<sup>2</sup> en een effectieve doorlaatopening van de getijcentrale van 1920 m<sup>2</sup>. De middenstand zal daarbij variëren rond NAP.



## 4 3D modellering van de waterkwaliteit (RGV 3D som)

Dit hoofdstuk presenteert de resultaten van de 3D waterkwaliteitsmodellering van het verbonden zoute Grevelingen-Volkerak-Zoommeer met getijdenwerking.

Deze RGV 3D som is uitgevoerd met het 3D model zoals opgezet en gebruikt in Nolte en Spiteri (2011) in het kader van de MIRT verkenning Grevelingen. Voor de 3D hydrodynamische berekening is het model gemigreerd naar de meest recente versie van Delft3D-FLOW. Voor de 3D waterkwaliteitsberekening is de migratie niet uitgevoerd, omdat er te grote verschillen tussen de oude en de nieuwe versie zaten. Deze worden nog onderzocht, maar zijn waarschijnlijk het gevolg van een grote 'redesign' als gevolg van het open-source worden van Delft3D-DELWAQ. De resultaten met de oude versie worden vertrouwd.

Voor alle ingaande en uitgaande debieten (sluizen, polderlozingen, RWZI, neerslag en verdamping) zijn de tijdseries van het 1D model met een frequentie van 10 minuten aan het 3D model opgelegd. De waterbalans is in het 3D model dus exact gelijk aan de waterbalans in de SOBEK jaarsom 2008 (paragraaf 3.3).

De RGV 3D som die in dit hoofdstuk worden gepresenteerd wordt vergeleken (met woorden, niet met plaatjes) met twee relevante eerdere studies, namelijk:

1. Planstudie waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer. Voor deze planstudie is de waterkwaliteit gemodelleerd van een toekomstig zout VZM (Meijers et al, 2008). De resultaten zijn opgenomen in het definitieve ontwerp MER (BOKV, 2012).  
In de voorkeursvariant van het ontwerp MER ('P300') heeft het VZM een vergelijkbare getijdenwerking met de RGV 3D som (zie figuur 5.23 in BOKV, 2012 en Tabel 3.1 in dit rapport). Het verschil is dat in de P300 variant van de planstudie verzouting en getijdenwerking in het VZM tot stand komt door uitwisseling met de Oosterschelde via een doorlaatmiddel in de Philipsdam.
2. MIRT verkenning Grevelingen. In Nolte en Spiteri (2011) is de variant "Grevelingen-Volkerak-Zoommeer met doorlaatmiddel 50/30 cm getij" beschreven. Deze variant is qua getijdenwerking equivalent met de hier gepresenteerde RGV 3D som (zie Tabel 3.1)

In vergelijking met deze twee eerdere studies is er in de RGV 3D som één groot verschil in de hydrologie van het systeem. Dat verschil is de extra inlaat van totaal 35 m<sup>3</sup>/s zoet water vanuit het Hollandsch Diep:

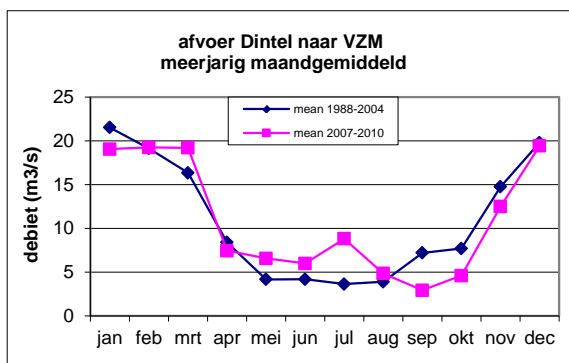
- 25 m<sup>3</sup>/s voor de zoutlekbestrijding (en schutverlies) van de Volkeraksluizen;
- 10 m<sup>3</sup>/s (2 \* 5 m<sup>3</sup>/s) voor de bestrijding van de zoutindringing via de mondingen van de Dintel en de Steenbergse Vliet.

Deze extra inlaat van 35 m<sup>3</sup>/s zoet water is meer dan het dubbele van de natuurlijke afvoer van Dintel en Vliet (jaargemiddeld 14 m<sup>3</sup>/s), en betekent dus een verdrievoudiging van de zoetwaterinlaat in het zoute systeem<sup>6</sup>.

Hierbij wordt opgemerkt dat de 10 m<sup>3</sup>/s extra debiet via Dintel en Steenbergse Vliet structureel is toegevoegd bovenop de natuurlijke afvoer van deze Brabantse rivieren. De praktijk zal zijn dat er geen extra debiet nodig is als de natuurlijke afvoer groot genoeg is.

<sup>6</sup> In de modelberekeningen voor de planstudie waterkwaliteit VZM en de MIRT verkenning Grevelingen is de 10 m<sup>3</sup>/s extra debiet via Dintel en Vliet al wel meegenomen. Ten opzichte van deze berekeningen is in de RGV 3D som alleen de 25 m<sup>3</sup>/s voor de zoutlekbestrijding van de Volkeraksluizen (grotendeels) extra debiet, en is de zoetwaterinlaat dus ongeveer verdubbeld.

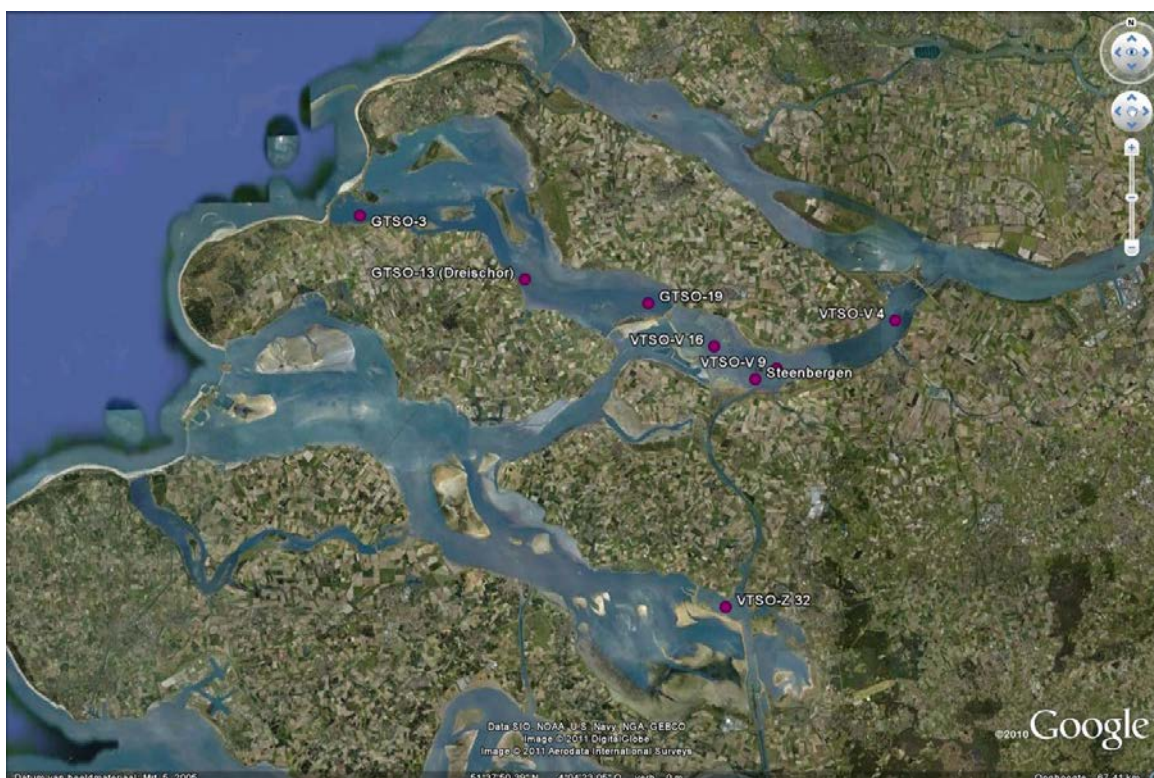
Figuur 4.1 toont het seizoenspatroon van de afvoer van de Dintel. Bij normale hydrologische omstandigheden zal de hele zomer (april-oktober) het extra debiet voor de bestrijding van de zoutindringing nodig zijn (zie ook voetnoot <sup>5</sup> op pagina 3).



Figuur 4.1 Meerjarig gemiddeld seizoenspatroon van de afvoer van de Dintel naar het VZM

In de volgende paragrafen worden voor een aantal locaties modelresultaten weergegeven. Deze locaties en hun naamgeving staan weergegeven in Figuur 4.2. De naamgeving van de locaties in de figuren is als volgt:

- GTSO3: 'Scharendijke';
- GTSO13: 'Dreischor';
- VTSO-V 4: 'Volkerak';
- Steenberg: 'Steenbergen';
- VTSO-Z 32: 'Zoommeer'.



Figuur 4.2 Locatie van observatiepunten.

## 4.1 Water en zout

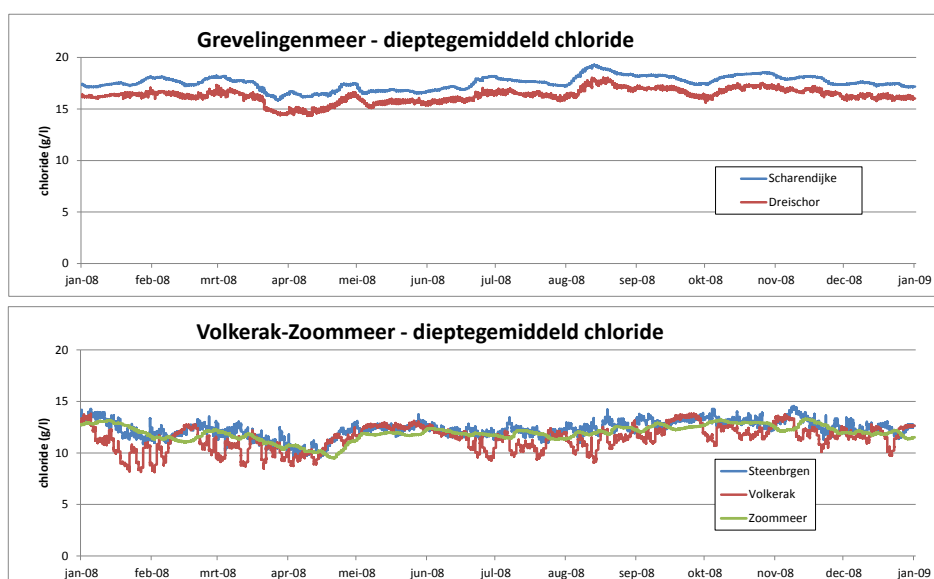
Zoals hierboven opgemerkt, is de waterbalans in het 3D model exact gelijk aan de waterbalans in de SOBEK jaarsom 2008 (paragraaf 3.3). Het volledige lijstje netto zout- en zoetwaterdebieten is weergegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Netto daggemiddelde zoet- en zoutwaterdebieten in de 3D som ( $m^3/s$ )

Getijcentrale Brouwersdam	47
Spuisluis Brouwersdam	4
Doorlaat Grevelingendam	54 (naar VZM)
Spuisluis Bath	-101
Volkeraksluizen	25
Dintel <sup>7</sup>	17
Vliet	8
Krammersluizen	1 (van O'schelde)

### 4.1.1 Horizontale verschillen in zoutconcentratie

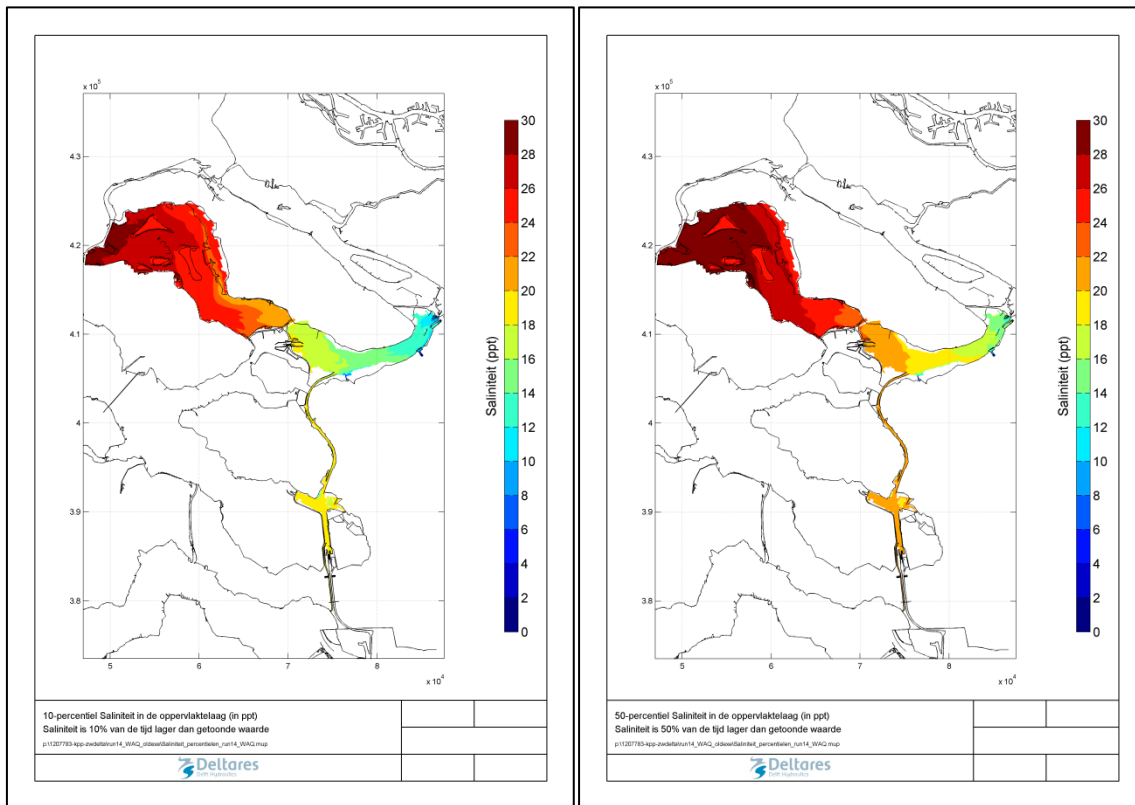
In Figuur 4.3 en Figuur 4.4 zijn de modelresultaten weergegeven voor de horizontale verspreiding van saliniteit/chloride<sup>8</sup>. Het chloridegehalte in het Grevelingenmeer is bijna altijd hoger dan 15 g/l, en het verschil tussen de twee locaties is klein, ongeveer 1 g/l (Figuur 4.3, boven). Het chloridegehalte in het Volkerak-Zoommeer ligt altijd ruim onder 15 g/l, en ook hier zijn de ruimtelijke verschillen klein. Behalve in het Volkerak, waar het chloridegehalte (episodisch) duidelijk lager is (Figuur 4.3 onder). In het Krammer-Volkerak veroorzaakt de aanvoer van zoetwater vanuit het Hollandsch Diep via de Volkeraksluizen en via de Dintel en de Steenbergse Vliet in 10% van de tijd lagere chloridegehalten dan 10 g/l (= 18 ppt saliniteit) (Figuur 4.4, links). Langdurige onderschrijding van 10 gCl/l (50% van de tijd) blijft beperkt tot het oostelijk deel van het Volkerak (Figuur 4.4, rechts).



Figuur 4.3 Berekende dieptegemiddelde chlorideconcentraties in Grevelingenmeer (boven) en Volkerak-Zoommeer (onder).

<sup>7</sup> De debieten van Dintel en Vliet zijn inclusief de extra  $2 \cdot 5 = 10 m^3/s$  voor bestrijding van de zoutindringing in de mondingen. De 'natuurlijke' debieten zijn dus  $12 + 3 = 15 m^3/s$

<sup>8</sup> Voor de verhouding tussen het zoutgehalte (saliniteit, ppt) en chlorideconcentratie (gCl/l) geldt  $S = 1,807 \cdot Cl$



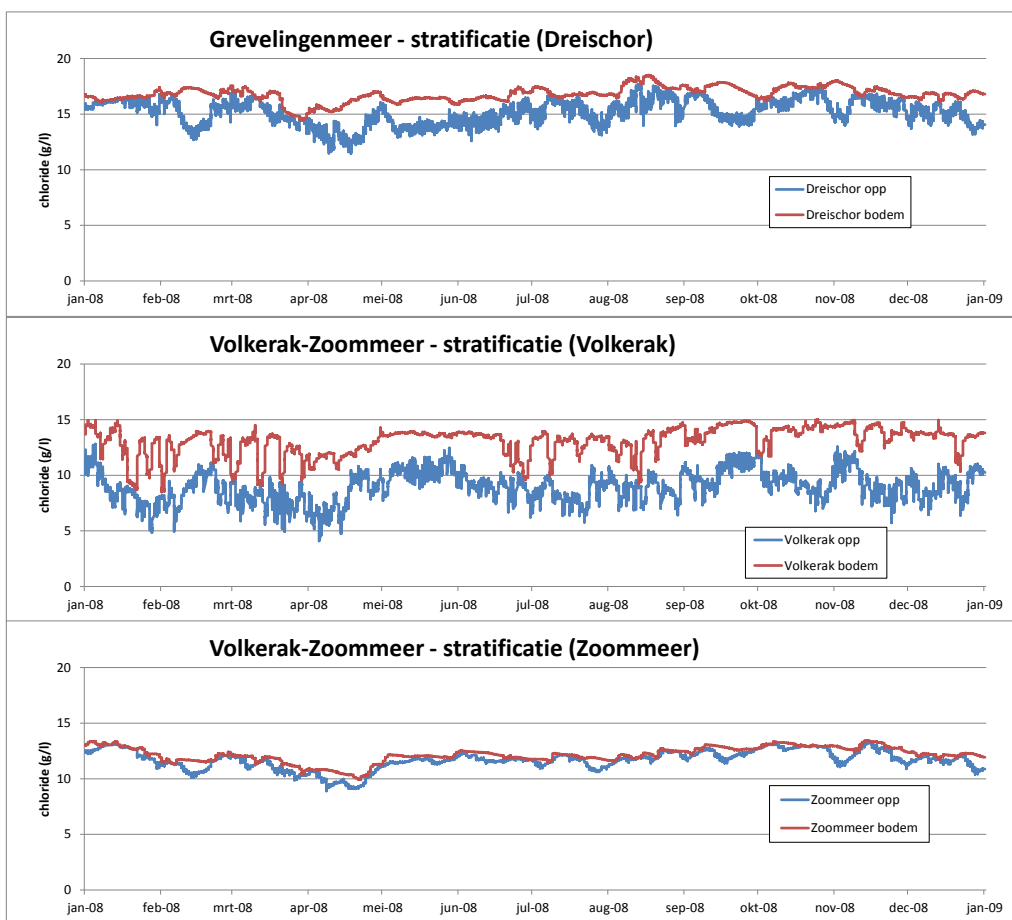
Figuur 4.4 Verspreiding van het zoete water vanuit het Hollandsch Diep via de Volkeraksluizen en vanuit Dintel en Steenbergse Vliet in de oppervlaktelaag (zie tekst voor uitleg)

#### 4.1.2 Zoutstratificatie

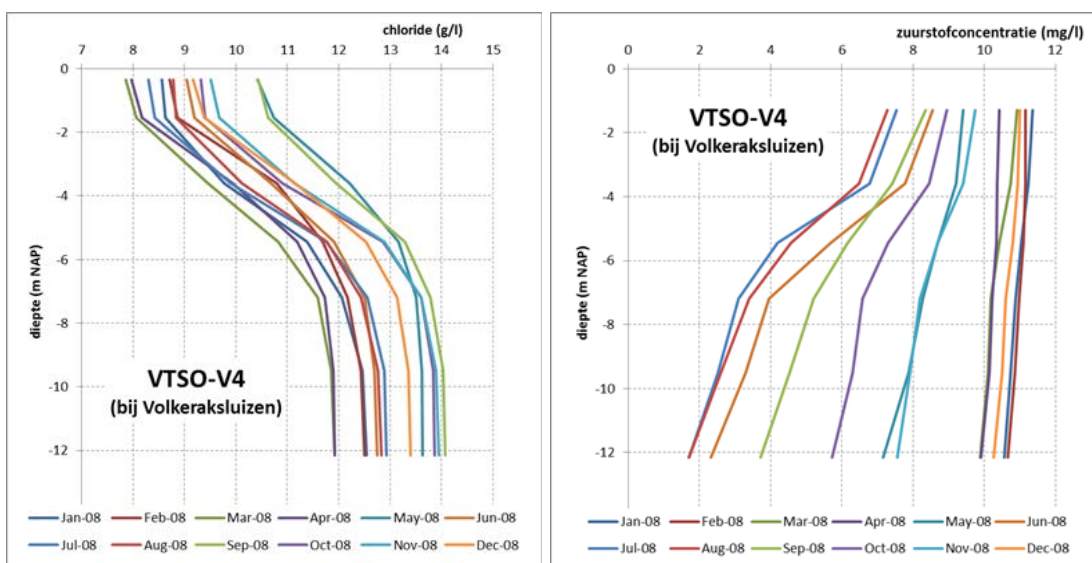
Stratificatie is verschil in dichtheid of soortelijke massa van water over de verticaal. Dat kan worden veroorzaakt door verschil in zoutgehalte en/of door verschil in temperatuur. Zout water heeft een hogere dichtheid dan zoet water, en koud water heeft een hogere dichtheid dan warm water. Zoeter en/of warmer water drijft op zouter en/of kouder water. En verschil in zoutgehalte geeft veel meer dichtheidsverschil dan temperatuurverschil: 1 ppt zoutverschil ongeveer evenveel als 10 graden temperatuurverschil. Zoutstratificatie is daardoor veel stabiel en permanenter dan temperatuurstratificatie.

In het Grevelingenmeer is de stratificatie gering, en veelal kortdurend doordat er periodiek opmenging plaatsvindt (Figuur 4.5, bovenste grafiek). Het Zoommeer is nagenoeg niet gestratificeerd (Figuur 4.5 onderste grafiek). In het Volkerak is de stratificatie veel sterker door een bijna permanent verschil van 3-5 g Cl/l tussen de bovenste en de onderste waterlaag (Figuur 4.5 middelste grafiek). Er zijn in voorjaar en zomer slechts schaarse events van opmenging (de neerwaartse pieken in de rode lijn). De zoutstratificatie is daardoor stevig en nagenoeg permanent in het voorjaar en de vroege zomer. De stratificatie wordt ook continu gevoed door de continue zoetwaterdebieten voor zoutlekbestrijding en van de Dintel. In de modelberekening is geen rekening gehouden met menging door (de schroefwerking van) de beroepsscheepvaart. Dit effect is lastig in te schatten, maar waarschijnlijk beperkt.

Figuur 4.6 (linker grafiek) bevestigt de bovenstaande waarnemingen. Bij stratificatie ligt de spronglaag tamelijk ondiep, niet veel dieper dan 5 meter. Deze figuur illustreert de lage zoutgehaltes en sterke stratificatie in het Volkerak ten gevolge van de grote zoetwaterdebieten door zoutlekbestrijding en van de Dintel. Maar in ondiepe gebieden (ondieper dan 5 m) is er dus geen stratificatie.



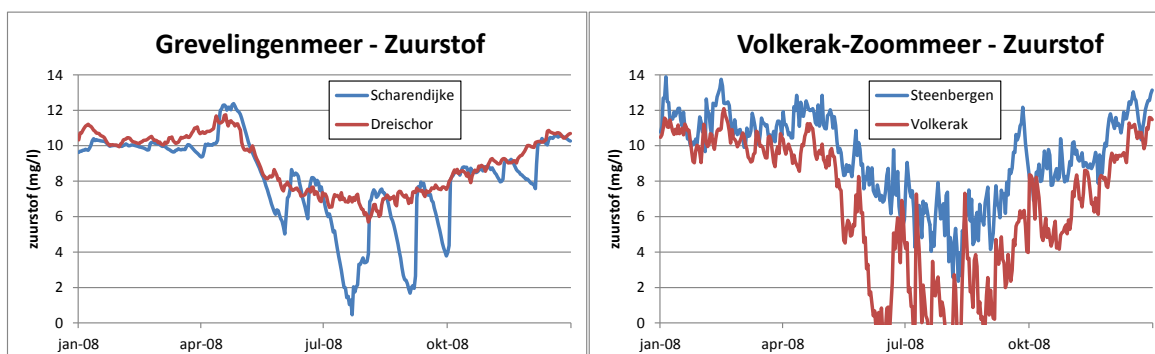
Figuur 4.5 Berekende chlorideconcentraties in bovenste (blauw) en onderste (rood) waterlaag in het Grevelingenmeer (boven), Volkerak (midden) en het Zoommeer (onder).



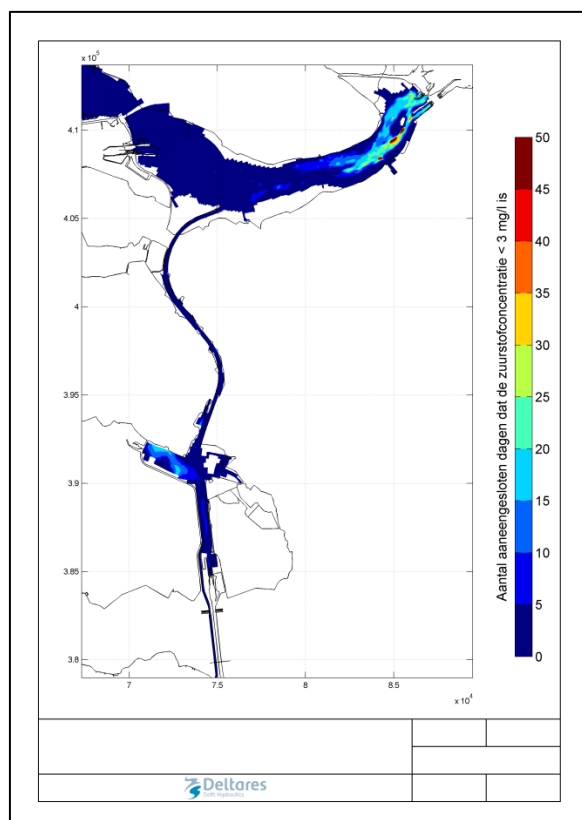
Figuur 4.6 Berekende maandgemiddelde verticale verdeling van chloride (mg/l) (links) en zuurstof (mg/l) (rechts) bij de Volkeraksluizen.

4.2 Zuurstof

Figuur 4.7 toont de berekende zuurstofconcentratie in de onderste waterlaag bij de bodem. In het Grevelingenmeer zal de zuurstofsituatie aanzienlijk verbeteren in vergelijking met de huidige situatie. Zuurstofuitputting zal nagenoeg volledig verdwijnen. Alleen in de diepe put bij Scharendijke zullen kortdurend lage zuurstofgehalten kunnen voorkomen. Maar bijvoorbeeld bij Dreischor, waar in de huidige situatie vanaf medio juni zuurstofloze condities worden bereikt en tot en met september verlaagde concentraties optreden (Deltares, 2010), zal geen zuurstofuitputting meer optreden. De oorzaak is de uitwisseling met de Noordzee via de getijcentrale, waardoor vooral de onderste waterlagen continu worden verversd met zuurstofrijk water.



Figuur 4.7 Berekende concentraties van zuurstof in de onderste waterlaag op locaties in het Grevelingenmeer (links) en het Volkerak-Zoommeer (rechts)



Figuur 4.8 Duur en areaal van zuurstofuitputting in de onderste waterlaag van het VZM

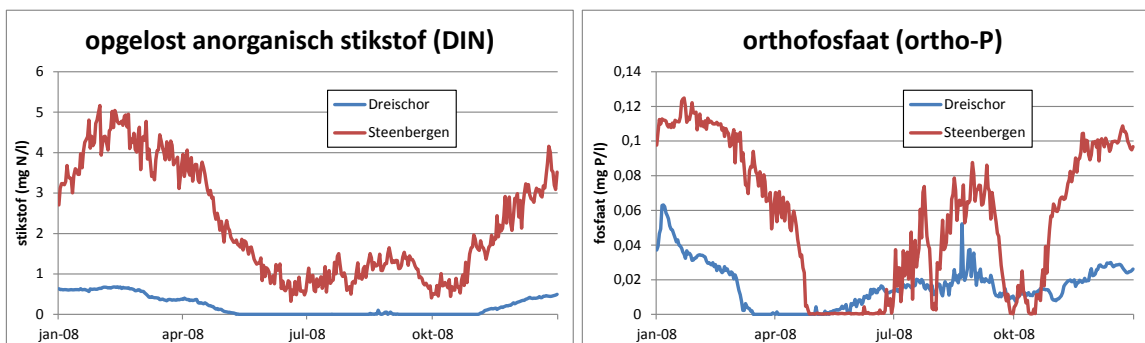


Voor het Volkerak-Zoommeer geldt een ander verhaal. Ook dit meer wordt doorgespoeld en ververst door de getijdenwerking vanuit de Noordzee via de getijcentrale en de doorlaat in de Grevelingendam. Maar vooral het Volkerak is sterk en langdurig gestratificeerd, waardoor geen verversing van de onderlaag door verticale menging meer optreedt. Bovendien is de 'looptijd' van het zoute water door de onderlaag vanaf de doorlaat in de Grevelingendam lang, en raakt de zuurstofvoorraad in die afgesloten onderlaag gaandeweg op. In het Krammer deel van het VZM geeft dit volgens de modelresultaten nog weinig problemen. Op de locatie Steenberg is de zuurstofconcentratie wel verlaagd, maar is er nog geen sprake van zuurstofuitputting. Maar in het oostelijk deel van het Volkerak treedt vanaf juni tot en met september regelmatig zuurstofuitputting op (Figuur 4.6, rechter grafiek en Figuur 4.7, rechter grafiek).

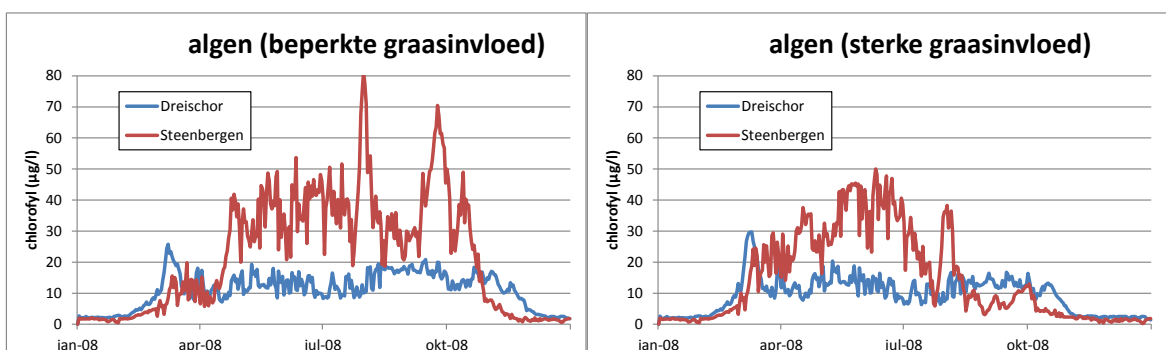
Figuur 4.8 toont de ruimtelijke verspreiding van de zuurstofuitputting; deze treedt op in de diepere gestratificeerde gebieden. Langdurige continue zuurstofuitputting (langer dan 1 maand) treedt alleen op in een beperkt areaal in de diepe geulen. In het Zoommeer is in een beperkt areaal de zuurstofconcentratie kortdurend verlaagd.

Het risico van zuurstofuitputting in het Volkerak is ook beschreven in de twee eerdere studies, maar is in deze RGV 3D som wel groter ten gevolge van de sterkere stratificatie door het extra zoetwaterdebiet voor de zoutlekbestrijding.

### 4.3 Meststoffen en algen



Figuur 4.9 Berekende concentraties opgelost anorganisch stikstof (links) en orthofosfaat (rechts) in Grevelingen (locatie Dreischor) en Volkerak-Zoommeer (locatie Steenberg).



Figuur 4.10 Berekende hoeveelheid fytoplankton (chlorofyl-a) met beperkte begrazing door schelpdieren (links) en met sterke begrazing door schelpdieren (rechts) in Grevelingen (Dreischor, blauwe lijnen) en Volkerak-Zoommeer (Steenbergen, rode lijnen)

Figuur 4.9 en Figuur 4.10 tonen een selectie van de modelresultaten voor meststoffen en algen. De figuren illustreren dat de beide meren, hoewel verbonden, toch duidelijk van elkaar blijven verschillen.

In het Grevelingenmeer blijven de concentraties meststoffen laag, hoewel ze ten opzichte van de huidige situatie wel zullen stijgen door de aanvoer van voedselrijk water vanuit het VZM. De berekende verhoging (van de winterconcentraties) ten opzichte van de huidige gemeten concentraties bij Dreischor is ongeveer 50% voor stikstof (DIN) en 25% voor orthofosfaat. Daardoor is ook de berekende hoeveelheid algen duidelijk hoger dan de huidige gemeten hoeveelheden. In de huidige situatie wordt de hoeveelheid algen gedurende de hele zomer gelimiteerd door stikstof, en kortdurend in het voorjaar door fosfaat. Volgens de modelresultaten blijft dat zo als de twee meren worden verbonden. Meer meststoffen betekent dan direct ook meer algen (ondanks de graasinvloed van schelpdieren – zie verder). Volgens de modelresultaten kan de hoeveelheid algen in het Grevelingenmeer ongeveer verdubbelen (van 8 naar 15  $\mu\text{g}$  chlorofyl/l).

In het huidige zoete VZM zijn de winterconcentraties van DIN en ortho-P ongeveer 5 mgN/l en 0,1 mgP/l (het huidige VZM heeft dus een absolute en relatieve overmaat aan stikstof). Volgens de modelresultaten blijft dit ongeveer zo in een zout VZM (Figuur 4.9, rode lijnen). De oorzaak is de grote aanvoer van zoet water ten gevolge van de zoutlekbestrijding<sup>9</sup>. De berekende concentraties meststoffen zijn daardoor ook aanzienlijk hoger dan in de twee eerdere studies (planstudie VZM en MIRT verkenning Grevelingen). De berekende potentiële hoeveelheid algen (die in tegenstelling tot het Grevelingenmeer door fosfaat wordt gelimiteerd) in een zout VZM ligt daardoor rond 50  $\mu\text{g}$  chlorofyl/l, met uitschieters naar 70-80  $\mu\text{g}$  chlorofyl/l in de (na)zomer (Figuur 4.10, rode lijnen).

#### 4.4 Invloed van begrazing door mariene schelpdieren

In alle huidige zoute deltawateren wordt het fytoplankton intensief begraasd door schelpdieren (mosselen, oesters, kokkels, enz.). Daardoor is de hoeveelheid algen (de chlorofylconcentratie) veel lager dan op grond van de beschikbare hoeveelheid meststoffen kan worden verwacht. In de Oosterschelde (en het Grevelingenmeer) is waarschijnlijk zelfs sprake van overbegrazing, waardoor de draagkracht voor schelpdierteelt wordt beperkt (Smaal et al, 2013, Nolte en de Vries, 2013).

Hoe zal graas door schelpdieren zich gaan ontwikkelen in een voedselrijker Grevelingenmeer en in een eutroof zout VZM? Een definitief en stellig antwoord op deze vraag is niet mogelijk. Maar, vergelijkbaar met de twee eerdere studies, is met extra modelberekeningen verkend wat deze invloed zou kunnen zijn<sup>10</sup>. Het resultaat is weergegeven in Figuur 4.10 (rechter grafiek).

De gesimuleerde invloed van graas in het Grevelingenmeer is beperkt. Ook met graas blijft de algenbiomassa langdurig gelimiteerd door stikstof in de zomer en bovendien kortdurend door fosfaat in het vroege voorjaar. De verwachting blijft dat in een met het VZM verbonden Grevelingenmeer de hoeveelheid algen zal toenemen ten gevolge van de extra aanvoer van meststoffen vanuit het VZM.

In het VZM is de gesimuleerde invloed van begrazing groot. De seizoen gemiddelde algenbiomassa zou kunnen halveren. Een onzekere factor is echter de overlevingskans van (mariene) schelpdieren in het zoute VZM. Ter vergelijking:

<sup>9</sup> Hier moet worden opgemerkt dat vooral de stikstofconcentratie in de RGV 3D som is overschat. Oorzaak: het extra zoetwaterdebiet van Dintel en Vliet van 10 m<sup>3</sup>/s heeft in het model dezelfde hoge concentratie gekregen als de huidige gemeten concentratie in deze wateren (voor stikstof: 8-12 mg/l). Het extra debiet is echter afkomstig uit het Hollandsch Diep (doorvoer via de Roode Vaart) met een veel lagere concentratie (4 mg/l). De extra vracht via Dintel en Vliet is dus met een factor 2 tot 3 overschat. Deze overschatting betreft alleen stikstof, omdat de fosfaatconcentraties van Hollandsch Diep, Dintel en Vliet wel vergelijkbaar zijn.

<sup>10</sup> Voor de hier gepresenteerde modelresultaten is de graasinvloed nagebootst door middel van een extra grote en seizoen afhankelijke valsnelheid van algen.

In het eveneens eutrofe Veerse Meer, vóór de opening van de Katse Heule, was het chloridegehalte langdurig (meerdere jaren achtereen, 1999-2003) lager dan 10 g/l (variërend van 6-10 gCl/l). Gevolg was het verdwijnen van mariene schelpdieren, vooral mosselen. Gevolg daarvan waren hoge algenconcentraties, tot > 200 µg chlorofyl/l (Craeymeersch en de Vries, 2007). Ook in het Volkerak deel van het VZM zal in de bovenste waterlaag (0-5 m) het chloridegehalte lager zijn dan 10 g/l (Figuur 4.5, midden, blauwe lijn), maar niet zo laag als in het Veerse Meer vóór de Katse Heule. Het risico op het wegvallen van de graasdruk is dan aanwezig, maar wordt minder groot geacht dan destijds in het Veerse Meer.

Voor het zoute VZM kan worden verwacht dat in de delen Krammer en Zoommeer de hoeveelheid algen relatief laag zal kunnen blijven ten gevolge van begrazing (seizoen gemiddeld 30 µg chlorofyl/l). In het Volkerak deel is het risico aanwezig van wegvallen van de graasdruk ten gevolge van een te laag zoutgehalte (< 10 g Cl/l), waardoor de algenconcentratie kan toenemen tot 50 µg chlorofyl/l, met uitschieters naar 70-80 µg chlorofyl/l in de (na)zomer (zoals in Figuur 4.10, linker grafiek).

#### 4.5 Conclusies van dit hoofdstuk

- 1 In een verbonden Grevelingen-Volkerak-Zoommeer hebben het Grevelingenmeer enerzijds en het VZM anderzijds elk een eigen karakteristiek, met grote onderlinge verschillen.
- 2 Het Grevelingenmeer is en blijft echt zout, met slechts geringe zoutstratificatie. De nutriëntenconcentraties, vooral stikstof, zullen aanzienlijk kunnen toenemen. De hoeveelheid algen zal daardoor ook toenemen, volgens de modelresultaten ongeveer verdubbelen, van 8 naar 15 µg chlorofyl/l. Door de getijdenwerking zal de huidige zuurstofuitputting in de bodemwaterlaag (nagenoeg geheel) verdwijnen.
- 3 Het Volkerak-Zoommeer wordt minder zout, met vooral in het Volkerak een sterke en langdurige zoutstratificatie. Door de extra zoetwatertoevoer ten gevolge van de zoutlekbestrijding is de stratificatie sterker en het zoutgehalte in de bovenste waterlaag in het Volkerak lager dan volgens eerdere studies (planstudie MER VZM).
- 4 In het oostelijk deel van het Volkerak zal naar verwachting zuurstofuitputting in de bodemwaterlaag optreden. Langdurige continue zuurstofuitputting (langer dan 1 maand) treedt alleen op in een beperkt areaal in de diepe geulen. In het Zoommeer is in een beperkt areaal de zuurstofconcentratie kortdurend verlaagd.
- 5 De nutriëntenconcentraties in het VZM blijven ongeveer even hoog als in het huidige zoete meer. Het VZM blijft eutroof, met potentieel hoge algenconcentraties. Naar verwachting zal begrazing door schelpdieren in het Krammer en in het Zoommeer de hoeveelheid algen in toom kunnen houden, tot seizoen gemiddeld 30 µg chlorofyl/l. In het oostelijk deel van het Volkerak bestaat het risico dat door het lage zoutgehalte (periodiek < 10 gCl/l) mariene schelpdieren niet overleven, de graascontrole zou in dat geval kunnen verdwijnen, en de hoeveelheid algen daardoor sterk toenemen, tot 50 µg chlorofyl/l en hogere pieken in de (na)zomer.



## 5 Samenvattende systeembeschrijving

In de alternatieven 'zout, getij' voor het Grevelingenmeer en het Volkerak-Zoommeer die in de Rijksstructuurvisie worden onderzocht krijgen beide meren beperkte getijdenwerking (Figuur 1.1, Ministerie I&M, 2013). In de Grevelingen komt getijdenwerking via een doorlaatmiddel in de Brouwersdam, al of niet in combinatie met een getijcentrale. In twee van de alternatieven (5<sup>OV</sup>, als variant op 5, en 8) komen de twee meren in open verbinding met elkaar te staan via een opening in de Grevelingendam, waardoor de getijdenwerking en het zoute water vanuit de Noordzee ook doordringen in het Volkerak-Zoommeer.

Technisch is dit systeem goed te realiseren. 'Met een goed ontwerp is veel mogelijk'. Met een opening, zonder kleppen of schuiven, in de Grevelingendam van 500 m<sup>2</sup> in combinatie met een effectieve opening van de getijcentrale van 960 m<sup>2</sup> ontstaat getijdenwerking met een getijslag van 50 cm in het Grevelingenmeer en 30 cm in het Volkerak-Zoommeer. En met sturing van de opening van de getijcentrale ('knijpen') kan bovendien de middenstand min of meer constant worden gehouden op NAP-10 cm. Hierdoor ontstaat bijna exact de gewenste peilvariatie tussen NAP+20 cm en NAP-30 cm in het Grevelingenmeer en tussen NAP+5 cm en NAP-25 cm in het Volkerak-Zoommeer.

Een kleine doorlaatopening in de Grevelingendam van 500 m<sup>2</sup> voor dagelijks gebruik kan ook voldoende zijn voor waterberging; het grotere verval en hoge stroomsnelheden (> 5 m/s) die dan zullen optreden zijn geen belemmering voor een goed ontwerp.

Er is één evident zorgpunt, namelijk de doorvaarbaarheid. De stroomsnelheid in de doorlaatopening in de Grevelingendam zal bij inkomend tij oplopen tot meer dan 2 m/s, oftewel tot 8 km/uur (bij stroming van Grevelingen naar VZM). Rondom de kentering (dus tweemaal per getijperiode) is gedurende ongeveer 1,5 uur de stroomsnelheid lager dan 1 m/s (minder dan 3,6 km/uur).

Voor extra getij in het Grevelingenmeer (70-80 cm) en het VZM (50-60 cm) zijn grotere doorlaatopeningen nodig: een doorlaatopening in de Grevelingendam van 1500 m<sup>2</sup> en een effectieve doorlaatopening van de getijcentrale van 1920 m<sup>2</sup>. De middenstand zal daarbij variëren rond NAP.

Door de getijdenwerking blijft het Grevelingenmeer echt zout, is de stratificatie gering en wordt de bodemwaterlaag effectief ververst. Daardoor zal de huidige zuurstofuitputting nagenoeg geheel verdwijnen. Door de verbinding met het VZM zullen de gehalten aan nutriënten in het Grevelingenmeer significant kunnen toenemen, en daarmee de hoeveelheid algen. De algenconcentratie is in de huidige situatie erg laag (< 10 µg chlorofyl/l) en zal naar verwachting kunnen verdubbelen (15 µg chlorofyl/l).

Het Volkerak-Zoommeer krijgt, ondanks de open verbinding, een eigen karakteristiek die afwijkt van het Grevelingenmeer. Er zijn twee oorzaken. In de eerste plaats is de uitwisseling met het Grevelingenmeer beperkt, waardoor getijdenwerking en verversing geringer zijn. Deze beperking is nodig om binnen de grenzen te blijven van de toegestane peilvariatie (in verband met de vaardiepte, geulbreedte en doorvaarhoogte voor de beroepsvaart). In de tweede plaats is de zoetwatertoevoer naar het toekomstige zoute VZM veel groter (ongeveer twee keer zo groot) dan in eerdere planstudies en verkenningen werd aangenomen. Dit komt door de maatregelen tegen de zoutlekage van de Volkeraksluizen naar het Hollandsch Diep en de maatregelen tegen zoutindringing bij de mondingen van de Dintel en de Steenbergse Vliet.

Door deze combinatie van randvoorwaarden wordt het Volkerak-Zoommeer minder zout, met vooral in het Volkerak een sterke en langdurige zoutstratificatie, en ook vooral in het Volkerak in de bovenste waterlaag een lager zoutgehalte dan eerder werd voorzien. De gevolgen zijn tweërlei.

Het eerste gevolg betreft de zuurstofuitputting in de onderste waterlaag. In het oostelijk deel van het Volkerak zal naar verwachting in de zomer zuurstofuitputting in de bodemwaterlaag optreden. Langdurige continue zuurstofuitputting (langer dan 1 maand) treedt alleen op in een beperkt areaal in de diepe geulen. In het Zoommeer zal in de zomer in een beperkt areaal de zuurstofconcentratie kortdurend lager zijn.

Het tweede gevolg is dat de nutriëntenconcentraties in het toekomstige zoute VZM ongeveer even hoog zullen blijven als in het huidige zoete meer. Het VZM blijft eutroof, met potentieel hoge algenconcentraties. Naar verwachting zal begrazing door mariene schelpdieren in het Krammer en in het Zoommeer de hoeveelheid algen in toom kunnen houden, tot seizoen gemiddeld 30 µg chlorofyl/l.

Maar in het oostelijk deel van het Volkerak bestaat het risico dat door het lage zoutgehalte (periodiek < 10 gCl/l) mariene schelpdieren niet overleven, de graascontrole zou in dat geval kunnen verdwijnen, en de hoeveelheid algen daardoor sterk toenemen, tot 50 µg chlorofyl/l en hogere pieken in de (na)zomer.

## 6 Referenties

Craeymeersch, Johan en Ies de Vries, 2007. Waterkwaliteit en ecologie Veerse Meer: het tij is gekeerd. Rapport RIKZ/2007-008.

BOKV, 2012. Milieueffectrapportage waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer. Ontwerp-MER. April 2012

Deltares, 2010: 3D model van het Grevelingenmeer voor hydrodynamica, waterkwaliteit en primaire productie – Kalibratie- en validatiedocument; C. Spiteri en A.J. Nolte; Rapport 1201650 in opdracht van Natuur- en Recreatieschap de Grevelingen; december 2010.

Meijers, Erwin, Simon Groot, Marjolijn Haasnoot, Bregje van Wesenbeeck, Ies de Vries, 2008. Waterkwaliteit en ecotopen in een zout Volkerak-Zoommeer. Planstudie Volkerak-Zoommeer. Deltares rapport Q4448.

Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2013. Afbakening van de Rijksstructuurvisie Grevelingen en Volkerak-Zoommeer. Notitie reikwijdte en detailniveau | juni 2013.

Nolte, A.J. en C. Spiteri, 2011. Effect van herintroductie van getij op waterkwaliteit en ecologische toestand van het Grevelingenmeer. Scenarioberekeningen ten behoeve van de MIRT-Verkenning. Deltares rapport 1201650-000.

Nolte, A.J., 2011. Nadere verkenning getij in een verbonden Grevelingen-Volkerak-Zoommeer. Deltares memo 1201650-000-ZKS-0034.

Nolte, A.J. en I. de Vries, 2013. Overzicht van kennisbijdrage Deltares in de Green Deal Oosterschelde. Ecosysteemkennis, nutriëntenstromen, primaire productie en draagkracht.

Nolte, A.J., C.J. Sprengers en J.A.G. van Gils, 2013. Samenhang in de Zuidwestelijke Delta: Integrale beschouwing en kwantificering van estuariëne dynamiek. Deltares rapport 1208082-000.

Rijkswaterstaat Zeeland, 2012. Milieueffectrapportage Waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer.

Slootjes, Nadine, 2013. Kosten en effecten van waterberging Grevelingen. Deltaprogramma Zuidwestelijke Delta en Rijnmond-Drechtsteden. Deltares rapport 1207303-000.

Smaal, A.C., T. Schellekens, M.R. van Stralen, J.C. Kromkamp, 2013. Decrease of the carrying capacity of the Oosterschelde estuary (SW Delta, NL) for bivalve filter feeders due to overgrazing? *Aquaculture* 404–405 (2013) 28–34.