

**Verkenning zoet-  
zoutgradiënten in het  
Volkerak-Zoommeer gericht  
op ecologische kwaliteit**





# **Verkenning zoet-zoutgradiënten in het Volkerak-Zoommeer gericht op ecologische kwaliteit**

**Modelstudie**

dr. M.C.H. Tiessen  
drs. A.J. Nolte

11201168-000



## Titel

Verkenning zoet-zoutgradiënten in het Volkerak-Zoommeer gericht op ecologische kwaliteit

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	11201168-000	11201168-000-ZKS-0008	49

## Trefwoorden

Volkerak-Zoommeer, zoet-zoutovergang, hydrodynamische modelering, waterkwaliteitsmodellering

## Samenvatting

De voorkeursvariant in de Rijksstructuurvisie Grevelingen-Volkerak-Zoommeer is een zout Volkerak-Zoommeer met 30 cm getij. In dit rapport wordt onderzocht met welke waterbeheermaatregelen optimalisatie van de zoet-zoutgradiënt mogelijk is gericht op het maximaliseren van de ecologische kwaliteit van de onderwaternatuur en intergetijdengebieden. De beschouwde maatregelen zijn debieten door de Volkeraksluizen, de Philipsdam, de Oesterdam en de Bathse spuisluis.




Als eerste zijn steady-steady berekeningen uitgevoerd met een regelmatig getij en constante zoetwateraanvoerdebieten. Hieruit bleek dat een debiet van 100 m<sup>3</sup>/s door de Volkeraksluizen niet leidt tot een zoetwaterbel en dus niet tot een volledig zoet-zoutgradiënt. Grote zoetwaterdebieten leiden bovendien tot sterke zoutstratificatie. Geconstateerd is dat er geen aanleiding is om het debiet van 25 m<sup>3</sup>/s door de Volkeraksluizen conform de voorkeursvariant aan te passen.

Daarna is een jaarberekening uitgevoerd voor een geselecteerde variant met 25 m<sup>3</sup>/s zoetwateraanvoer via de Volkeraksluizen, doorlaatmiddelen in de Philipsdam (80% bijdrage aan zoutwateruitwisseling) en de Oesterdam (20% bijdrage) en 10 m<sup>3</sup>/s afvoer via de Bathse spuisluis naar de Westerschelde. De afvoer van de Brabantse rivieren Dintel en Vliet is variabel. De jaarberekening laat zien dat er een variabele, dynamische zoet-zoutgradiënt ontstaat met een permanente zoutstratificatie in het Krammer-Volkerak. In het Zoommeer is er nauwelijks zoutstratificatie. De stratificatie leidt tot een beperkt areaal met zuurstofuitputting bij de Volkeraksluizen. Dit areaal is kleiner dan in een eerdere modelstudie wat in vervolg nader verklaard dient te worden. Door de beperkte afvoer naar de Westerschelde is er minder wateruitwisseling tussen het Krammer-Volkerak en het Zoommeer en krijgen beide delen een verschillend karakter. Het Krammer-Volkerak heeft een zoet-zoutgradiënt, waarbij de gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag een laagste waarde van 15 psu (ongeveer 8 g/l chloride) bij de Volkeraksluizen heeft. Het Zoommeer lijkt qua waterkwaliteit op de Kom van de Oosterschelde.

Door WMR is in een parallelle opdracht van LNV de ecologische kwaliteit van de zoet-zoutgradiënt geëvalueerd. De evaluatie is integraal in dit rapport overgenomen.

## Referenties

Onderdeel van KPP 2017 WR10 BOA Zuidwestelijke Delta

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf Goedkeuring	Paraaf
Conc.	dec. 2017	dr. M.C.H. Tiessen drs. A.J. Nolte		dr.ir. W.M.Kranenburg	ir. B.G.T.M. Peters	
Def.	feb. 2018	dr. M.C.H. Tiessen drs. A.J. Nolte		dr.ir. W.M.Kranenburg dr. ir. F.M.K. Kleissen	ir. B.G.T.M. Peters	

## Status

definitief



## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Aanleiding	1
1.2 Doelstelling	1
1.3 Aanpak	1
1.4 Leeswijzer	2
<b>2 Steady-state zoet-zoutgradiënten bij constante aanvoer</b>	<b>3</b>
2.1 Definitie van varianten	3
2.2 Modelopzet	6
2.2.1 Rooster en bathymetrie	6
2.2.2 Randvoorwaarden voor debieten	7
2.2.3 Randvoorwaarden voor het zoutgehalte	11
2.2.4 Wind	11
2.2.5 Introductie van het debiet vanuit de Volkeraksluizen en de andere kunstwerken	11
2.2.6 Gesimuleerde periode	12
2.3 Resultaten steady-stateberekeningen	12
2.3.1 Overzicht van presentatiewijzen	12
2.3.2 Locatie van de zoet-zoutgradiënt	13
2.3.3 Stratificatie	17
2.3.4 Areaal van zoutzones	20
2.3.5 Effect van wind	21
<b>3 Variatie zoet-zoutgradiënt en waterkwaliteit in een jaar</b>	<b>23</b>
3.1 Selectie jaarberekening	23
3.2 Opzet jaarberekening	23
3.3 3D hydrodynamische modellering	24
3.4 3D waterkwaliteit en primaire productie modellering	33
3.4.1 Modelopzet	33
3.4.2 Modelresultaten	33
3.4.3 Discussie en beoordeling van modelresultaten	37
<b>4 Ecologische evaluatie van de zoet-zoutgradiënt (WMR)</b>	<b>41</b>
<b>5 Conclusies</b>	<b>45</b>
5.1 Afsluitende samenvatting en opmerkingen	45
5.2 Beantwoording kennisvragen	46
<b>6 Referenties</b>	<b>49</b>





# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

In het kader van het beleidsondersteunend advies Zuidwestelijke Delta zijn er voor het Volkerak-Zoommeer in 2017 verdiepende kennisvragen geformuleerd die relevant zijn voor de huidige en mogelijk toekomstige ontwikkeling van het bekken. Dit rapport gaat in op enkele kennisvragen over het optimaliseren van de zoet-zout gradiënt in een zout Volkerak-Zoommeer. Deltares (2018) gaat in op kennisvragen over de ontwikkeling van het huidige, zoete Volkerak-Zoommeer, in het bijzonder op het voorkomen van blauwalgen en Quagga mosselen en hun mogelijke onderlinge relatie.

## 1.2 Doelstelling

Doelstelling van dit rapport is om antwoord te geven op of het inzicht te vergroten in de volgende door Rijkswaterstaat geformuleerde kennisvragen:

1. Wat zijn mogelijkheden om met inzet van waterbeheermaatregelen het zoute voorkeursalternatief uit de Rijkstructuurvisie Grevelingen-Volkerak-Zoommeer te optimaliseren, zodanig dat de ecologische kwaliteit gemaximaliseerd wordt?
2. Hoe kan het spuibeheer van de Volkerakspuisluizen worden gekoppeld aan de Lobith afvoer om een dynamische zoet-zout gradiënt te bereiken?
3. Hoe ontwikkelt de zoet-zoutgradiënt zich bij verschillende aanvoeren via de Volkeraksluizen?
4. Wat is een minimaal zoetwaterdebiet door de Volkeraksluizen om een zoet-zout gradiënt te handhaven bij een lage rivierafvoer?
5. Wat is het verschil tussen nieuwe varianten en het voorkeursalternatief in termen van effectiviteit (waterkwaliteitsverbetering) en uitwisseling met aangrenzende wateren (Oosterschelde en Westerschelde)?

## 1.3 Aanpak

Het onderzoek is uitgevoerd met een verkennende aanpak in een samenwerking van Rijkswaterstaat, LNV, Deltares en Wageningen Marine Research (WMR). De verkennende aanpak houdt in dat het onderzoek stapsgewijs is uitgevoerd, waarbij de volgende stap gedefinieerd is op basis van de uitkomsten van de vorige stap. Daarbij is de beantwoording van de kennisvragen uit §1.2 wel als richtpunt gehouden, maar is gedurende het onderzoek een afweging gemaakt in welke mate (volledige) beantwoording gerealiseerd kon worden binnen de randvoorwaarden van beschikbare tijd en middelen. In het afsluitende hoofdstuk 5 komen we hierop terug.

In de verkenning naar zoet-zoutgradiënten zijn drie stappen uitgevoerd:

1. Steady-state berekeningen met een 3D hydrodynamisch model om te onderzoeken hoe de zoet-zoutgradiënt afhangt van de belangrijkste stuurfactoren. De steady-state berekeningen gaan uit van een regelmatig 30 cm getij en een constante zoetwateraanvoer.

2. Berekening van de jaarvariatie van de zoet-zoutgradiënt, waterkwaliteit en primaire productie voor een geselecteerde variant met een 3D hydrodynamisch model en een 3D waterkwaliteitsmodel.
3. Evaluatie van de ecologische kwaliteit van de zoet-zoutgradiënt door WMR.

In stap 1 wordt met behulp van verschillende steady-state berekeningen bepaald wat de zoutindringing en -dynamiek zijn afhankelijk van verschillende waterbeheervarianten. De drie parameters die gevarieerd worden zijn de zoetwateraanvoer door de Volkeraksluizen, de zoetwateraanvoer door de Dintel en de verdeling van de zoutwateraanvoer via doorlaatmiddelen in de Philipsdam en de Oesterdam. De getijslag in het Volkerak-Zoommeer is in alle gevallen gelijk aan 30 cm.

In samenwerking met WMR en de resultaten uit hun parallelle studie aangaande ecologisch waarde en kwaliteit is voor stap 2 één variant van stap 1 geselecteerd voor een jaarberekening met in de tijd variabele zoetwateraanvoer via de Brabantse rivieren. In de geselecteerde jaarberekening is de zoetwateraanvoer via de Volkeraksluizen constant op 25 m<sup>3</sup>/s en is de verdeling van de zoutwateraanvoer via doorlaatmiddelen in de Philipsdam en de Oesterdam gelijk aan 80%:20%. In deze jaarberekening is naast de hydrodynamica ook de waterkwaliteit berekend gericht op nutriënten, primaire productie en zuurstofconcentratie.

Voor de modellering in deze 2<sup>e</sup> stap is een nieuw 3D model opgezet gebaseerd op beschikbare bouwstenen, waarvan het beschikbare 3D model van het huidige, zoete Volkerak-Zoommeer de belangrijkste is (Deltares, 2016). De jaarberekening is een eerste opzet van het 3D hydrodynamisch model en het 3D model voor waterkwaliteit en primaire productie voor het zoute Volkerak-Zoommeer. Uit de eerste modelopzet worden resterende vragen geconstateerd die in een vervolg meegenomen kunnen worden.

De 3<sup>e</sup> stap is uitgevoerd door WMR in een aparte, parallelle studie in opdracht van LNV en betreft de evaluatie van de potentiële zout-zoutgradiënt in het Volkerak-Zoommeer voor de ecologische waarde en kwaliteit. De evaluatie maakt onderdeel uit van een breder onderzoek naar de ecologie van zoet-zoutgradiënten en is als eerste daar gerapporteerd (WMR, 2017). Voor de samenhang is het betreffende hoofdstuk in dit rapport overgenomen.

#### 1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat de beschrijving van de modelopzet en de resultaten van de steady-state berekeningen. In Hoofdstuk 3 wordt voor de geselecteerde variant een jaarberekening van de hydrodynamica en van de waterkwaliteit en primaire productie gepresenteerd. Hoofdstuk 4 is een passage uit WMR (2017) waarin de ecologische kwaliteit van de potentieel te realiseren zoet-zoutgradiënt wordt geëvalueerd. Tenslotte zijn in Hoofdstuk **Error! Reference source not found.** een afsluitende samenvatting en afsluitende opmerkingen opgenomen.

Dit rapport is tot stand gekomen in samenwerking met en met waardevolle inbreng van René Boeters (Rijkswaterstaat Zee en Delta), Herman Haas (Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving) en Tom Ysebaert (Wageningen Marine Research). Wij danken hen daarvoor.

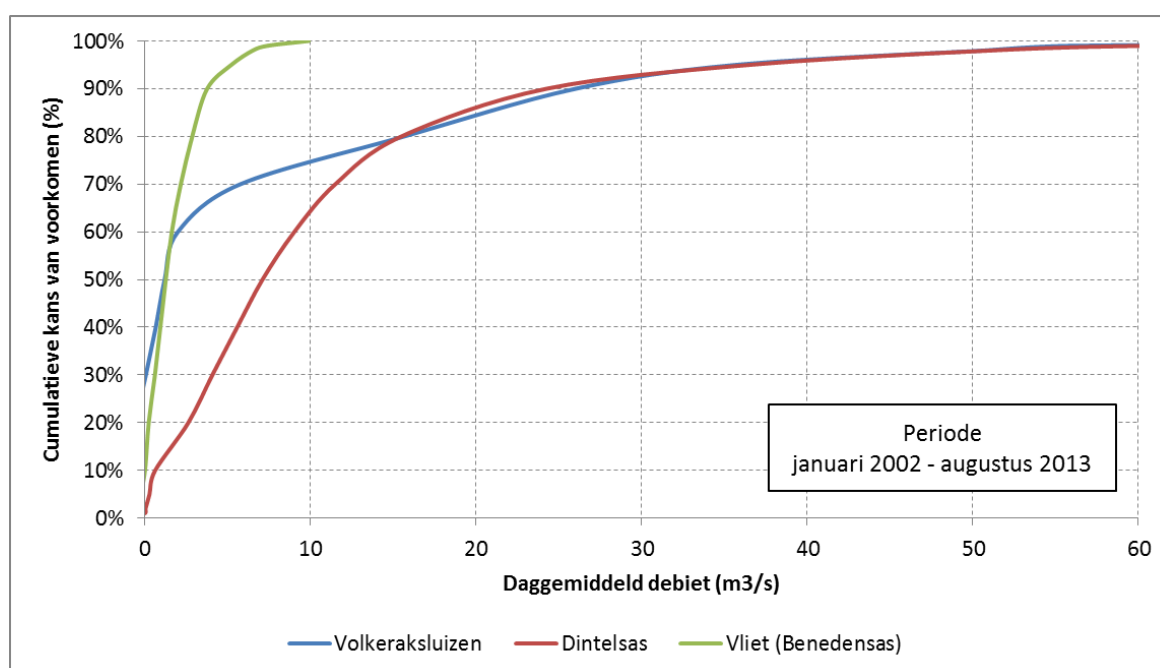
## 2 Steady-state zoet-zoutgradiënten bij constante aanvoer

### 2.1 Definitie van varianten

Zoet-zoutgradiënten ontstaan in het samenspel van zoetwateraanvoer en zoutwateraanvoer. De belangrijkste bronnen voor zoetwater zijn de Volkeraksluizen en de Brabantse rivieren Dintel en Vliet. De overige zoetwaterbronnen zoals polderlozingen en neerslag zijn kleiner en worden hier verder buiten beschouwing gelaten.

Figuur 2.1 toont de cumulatieve verdeling van de zoetwateraanvoer door de drie belangrijkste bronnen, waarvan de Vliet duidelijk de kleinste is. Voor de definitie van varianten wordt daarom alleen gevarieerd met het zoetwaterdebiet door de Volkeraksluizen en van de Dintel.

De geanalyseerde periode loopt van januari 2002-augustus 2013, omdat deze gegevens al voor een andere studie beschikbaar waren (Deltares, 2013). We verwachten niet dat de cumulatieve verdeling erg verschillend zal zijn bij uitbreiding tot en met 2017.



Figuur 2.1 Cumulatieve verdeling van de daggemiddelde zoetwateraanvoer via de Volkeraksluizen, de Dintel en de Vliet over de periode januari 2002 tot en met augustus 2013. Databron: Rijkswaterstaat HMC.

Conform de voorkeursvariant uit de Rijksstructuurvisie Grevelingen-Volkerak-Zoommeer gaat deze studie uit van 30 cm getijslag rondom een middenpeil van NAP -0,10 m. De hoeveelheid water die daarvoor tijdens de vloedfase moet instromen en tijdens de eb fase moet uitstromen, ligt daarmee vast op circa 16,8 miljoen m<sup>3</sup> (= 5600 ha<sup>1</sup> x 0,3 m). Dat komt overeen met een getijgemiddelde in- en uitstroom van circa 325 m<sup>3</sup>/s door doorlaten in de Philipsdam en Oesterdam en circa 40 m<sup>3</sup>/s via Volkeraksluizen, Dintel en Vliet. In de voorkeursvariant wordt zout water van de Oosterschelde ingelaten via een doorlaatmiddel in de Philipsdam. In deze studie wordt een tweede inlaatlocatie in de Oesterdam meegenomen. Omdat het totale zoutwaterdebiet gelijk blijft, werken we in de varianten met een verdeling.

<sup>1</sup> Deze waarde is opnieuw afgeleid uit de modelbathymetrie te weten circa 4200 ha in het Krammer-Volkerak en circa 1400 ha in Eendracht en Zoommeer. Deze waarde is 9% lager dan de veel gebruikte waarden van respectievelijk 4570 ha en 1580 ha optellend tot in totaal 6150 ha. Een reden voor het verschil is niet bekend.

Op basis van de drie belangrijkste variabelen voor waterbeheer – debiet Volkeraksluizen, debiet Dintel en verdeling Philipsdam:Oesterdam – en rekening houdend met het debiet door de Bathse spuisluis zijn 27 varianten gedefinieerd (Tabel 2.1). Een extra variant met code 28 is toegevoegd overeenkomend met de voorkeursvariant in de Rijksstructuurvisie.

Het debiet door de Volkeraksluizen varieert tussen 25 m<sup>3</sup>/s, 50 m<sup>3</sup>/s en 100 m<sup>3</sup>/s. Het laagste debiet 25 m<sup>3</sup>/s komt overeen met de hoeveelheid water die beschikbaar is voor de zoet-zoutscheiding ter minimalisering van de zoutlek naar het Hollands Diep. De minimale aanvoer van 25 m<sup>3</sup>/s zal gegarandeerd moeten zijn, omdat anders de zoutlek naar het Hollands Diep gaat toenemen. Het hoogste debiet van 100 m<sup>3</sup>/s is haalbaar door inzet van de Volkerakspuisluizen. In deze stap van het onderzoek wordt nog geen rekening gehouden met de eventuele beschikbaarheid van zoet water die gekoppeld is aan de aanvoer bij Lobith.

Het debiet via de Dintel varieert tussen 10 m<sup>3</sup>/s, 20 m<sup>3</sup>/s en 40 m<sup>3</sup>/s. De extra aanvoer via de Rode Vaart (maatregel zoetwatervoorziening West Brabant) is hierin meegenomen.

De verdeling over Philipsdam en Oesterdam is pragmatisch gekozen op 100%:0%, 80%:20% en 60%:40%. In dit onderzoek wordt geen rekening gehouden met eventuele beperkingen in constructie en/of dimensionering. Voor de operationele aansturing van de doorlaatmiddelen wordt aangenomen dat te allen tijde voldoende zout water geleverd kan worden.

Tenslotte worden varianten voor het debiet door de Bathse spuisluis gebruikt. In de voorkeursvariant (28) uit de Rijksstructuurvisie wordt gemiddeld 90 m<sup>3</sup>/s naar de Westerschelde afgevoerd. Dit zoute debiet wordt als een potentieel negatief effect op de Westerschelde gezien (bij lage afvoer van de Schelde) door verschuiving van de zoet-zoutgradiënt met ecologische gevolgen en door mogelijke impact op havenaanslibbing. In het kader van het beperken van het effect op de zoet-zoutgradiënt, de ecologie en mogelijk havenaanslibbing in de Westerschelde wordt een kleiner zoutwaterdebiet via de Bathse spuisluis als positief gezien. Bij alleen een doorlaat in de Philipsdam is verversing van het Zoommeer nodig door doorspoeling naar de Westerschelde (zie bijvoorbeeld Deltares (2015b)). In die varianten (1-9) is gekozen voor een debiet van gemiddeld 50 m<sup>3</sup>/s naar de Westerschelde. Als er ook een doorlaat in de Oesterdam is, vindt verversing van het Zoommeer via die doorlaat plaats en zou het debiet naar de Westerschelde kunnen worden gereduceerd. In die varianten (10-27) is gekozen voor een debiet van gemiddeld 10 m<sup>3</sup>/s naar de Westerschelde via de Bathse spuisluis.

In Tabel 2.1 is voor alle varianten een sluitende waterbalans opgegeven. Het debiet door de Philipsdam is gebruikt om de waterbalans te sluiten, waarbij de sluitpost in paars is aangeduid. Uit de tabel blijkt dat als het zoetwaterdebiet toeneemt, de sluitpost verschuift van het instromende debiet naar het uitstromende debiet. Ofwel als er meer zoet water ingelaten wordt, is minder zout water nodig om 30 cm getij te realiseren.

Tabel 2.1 Overzicht van 27 varianten voor de steady-state berekeningen. Variant 28 is toegevoegd en komt overeen met de voorkeursvariant uit de Rijksstructuurvisie. Voor de Philipsdam geeft de groen gearceerde cel het opgelegde debiet aan en fungeert de paars gearceerde cel als sluitpost voor de waterbalans.

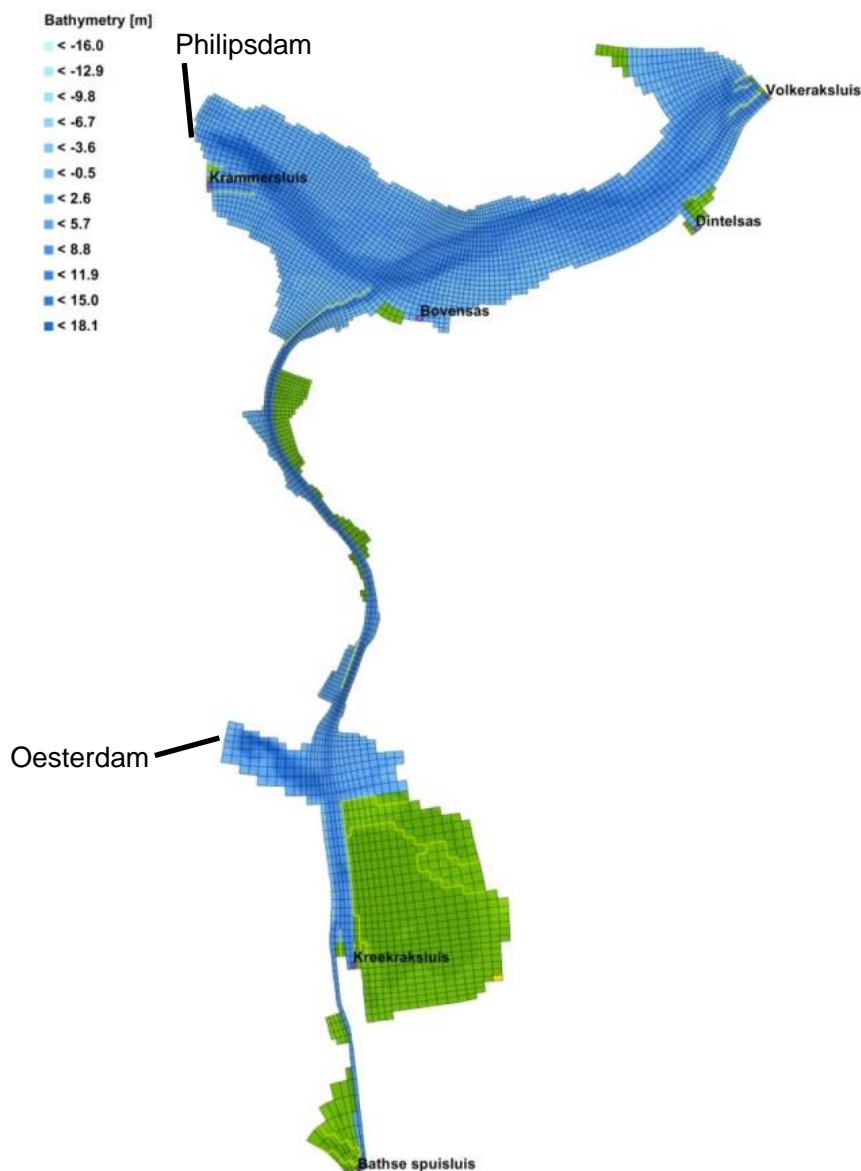
ID	Inkomende debieten					Uitgaande debieten		
	Volkerakluizen	Dintel	Vliet	Philipsdam	Oesterdam	Philipsdam	Oesterdam	Bathse spuisluis
28	25	10	5	300	0	250	0	90
1	25	10	5	300	0	290	0	50
2	25	20	5	300	0	300	0	50
3	25	40	5	280	0	300	0	50
4	50	10	5	285	0	300	0	50
5	50	20	5	275	0	300	0	50
6	50	40	5	255	0	300	0	50
7	100	10	5	235	0	300	0	50
8	100	20	5	225	0	300	0	50
9	100	40	5	205	0	300	0	50
10	25	10	5	240	60	230	100	10
11	25	20	5	240	60	240	100	10
12	25	40	5	220	60	240	100	10
13	50	10	5	225	60	240	100	10
14	50	20	5	215	60	240	100	10
15	50	40	5	195	60	240	100	10
16	100	10	5	175	60	240	100	10
17	100	20	5	165	60	240	100	10
18	100	40	5	145	60	240	100	10
19	25	10	5	180	120	170	160	10
20	25	20	5	180	120	180	160	10
21	25	40	5	160	120	180	160	10
22	50	10	5	165	120	180	160	10
23	50	20	5	155	120	180	160	10
24	50	40	5	135	120	180	160	10
25	100	10	5	115	120	180	160	10
26	100	20	5	105	120	180	160	10
27	100	40	5	85	120	180	160	10

Naast de zoet- en zoutwaterdebieten spelen meteorologische condities een rol bij de menging en dus bij de resulterende zoet-zoutgradiënt. Twee aspecten spelen vooral een rol. Ten eerste is de menging door wind van belang. Hoe harder het waait, hoe meer de horizontale stromingen zorgen voor menging. Dat wordt versterkt door de windrichting, ofwel door de strijklengte (de lengte die de wind onbelemmerd over een wateroppervlak waait). Hoe langer de strijklengte, hoe groter de menging. Het tweede aspect is de combinatie van luchttemperatuur en zonstraling en de mate waarin deze voor temperatuurstratificatie zorgen en zo de menging beïnvloedt. Naar verwachting is de temperatuurstratificatie ondergeschikt aan de zoutstratificatie en dit meteorologisch aspect wordt in deze steady-state berekeningen dan ook buiten beschouwing gelaten. De windsterkte en windrichting zijn wel meegenomen. In de volgende paragraaf wordt toegelicht hoe.

## **2.2 Modelopzet**

### 2.2.1 Rooster en bathymetrie

Voor het rooster en de bathymetrie wordt gebruik gemaakt van het 3D (z-lagen) hydrodynamisch Volkerak-Zoommeermodel dat is opgezet voor de periode 2011-2013 (Deltares, 2016). Het betreft dus een model voor de huidige, zoete situatie. Het rekenrooster en de modelranden worden getoond in Figuur 2.2. Het model heeft 49 verticale lagen.



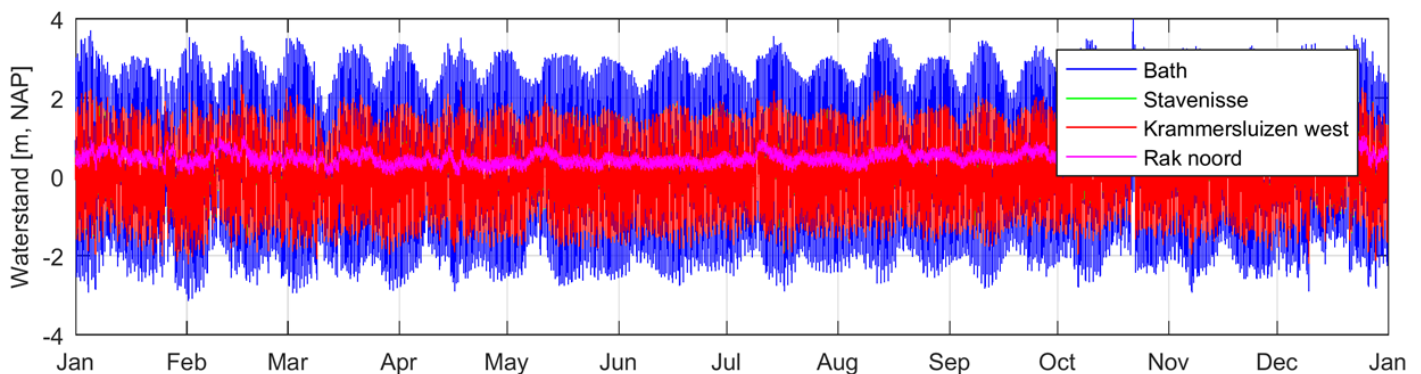
*Figuur 2.2 Rekenrooster van het 3D Volkerak-Zoommeer model en locatie van de randen voor de oorspronkelijke zoete modelopzet. In de steady-stateberekeningen zijn de Krammersluizen vervangen door de Philipsdam, de Oesterdam toegevoegd en de Kreekraksluis verwijderd. De geelbruine cellen zijn droge cellen in het rekenrooster.*

### 2.2.2 Randvoorwaarden voor debieten

In de vorige paragraaf is de waterbalans beschreven op basis van daggemiddelde debieten. Voor de steady-stateberekeningen worden tijdseries van debieten opgelegd die zijn bepaald met behulp van een waterbalans op basis van representatieve tijdseries voor de waterstanden bij de doorlaatmiddelen.

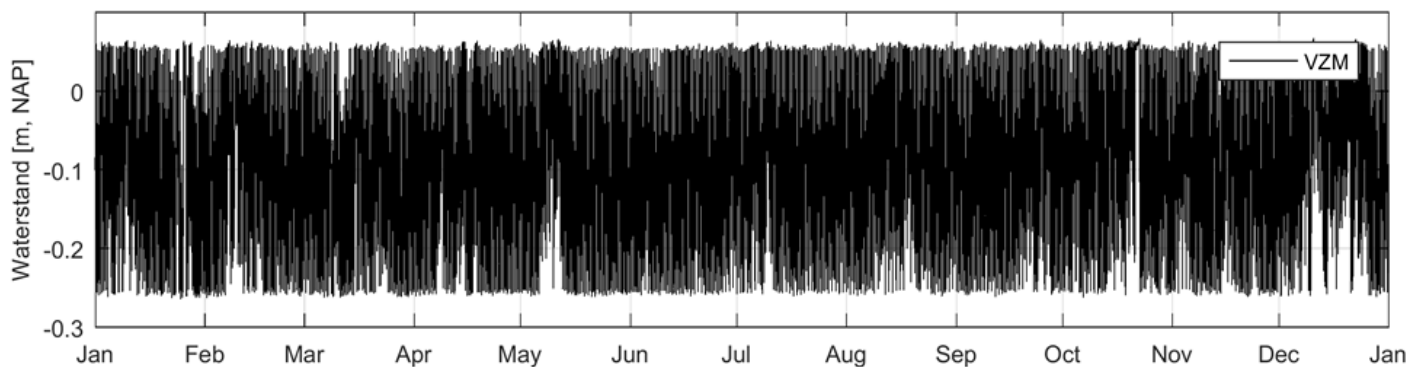
De representatieve tijdseries voor debieten zijn in een aantal stappen afgeleid:

1. Allereerst zijn de waterstand in het Volkerak-Zoommeer berekend op basis van:
  - a. Eenvoudige Q-h relatie<sup>2</sup> om het debiet door de doorlaatmiddelen te bereken afhankelijk van de waterstand in het buitenwater.
  - b. Opgetreden waterstanden voor het jaar 2012 in stations Krammersluizen West voor debiet Philipsdam, Stavenisse voor Oesterdam (NB: de dichterbij gelegen locatie Marollegat was niet beschikbaar voor deze periode), Bath voor Bathse spuisluis en Rak Noord voor Volkeraksluizen (Figuur 2.3)



Figuur 2.3 Waterstandsvariatie in 2012 op meetlocaties in Oosterschelde (Krammersluizen west, Stavenisse (niet zichtbaar), Westerschelde (Bath) en Hollands Diep (Rak noord). Databron: Rijkswaterstaat

- c. Een uniforme afvoercoëfficiënt van 0,85.
- d. Het doorstroomoppervlak per doorlaatmiddel is gebruikt als regelaar voor het voldoen aan de gewenste getijslag van 30 cm en aan het gewenste daggemiddelde debiet per doorlaatmiddel volgens Tabel 2.1.



Figuur 2.4 Resulterende waterstand (voorbeeld) in het Volkerak-Zoommeer voor 2012 op basis van eenvoudige waterbalans

2. Uit de berekende waterstand in het Volkerak-Zoommeer (Figuur 2.4) blijkt dat er geen steady-state situatie ontstaat: Er is geen regelmatige getijslag die ieder getij varieert tussen NAP -0,25 m en NAP +0,05 m. De reden hiervoor is dat het waterstandsverschil ieder getij verschilt en dat bij een vaste afvoercoëfficiënt en een vast doorstroomoppervlak ieder getij dus in verschillend instromend en uitstromend debiet voorkomt. Een regelmatige getijslag is alleen mogelijk door per getij het

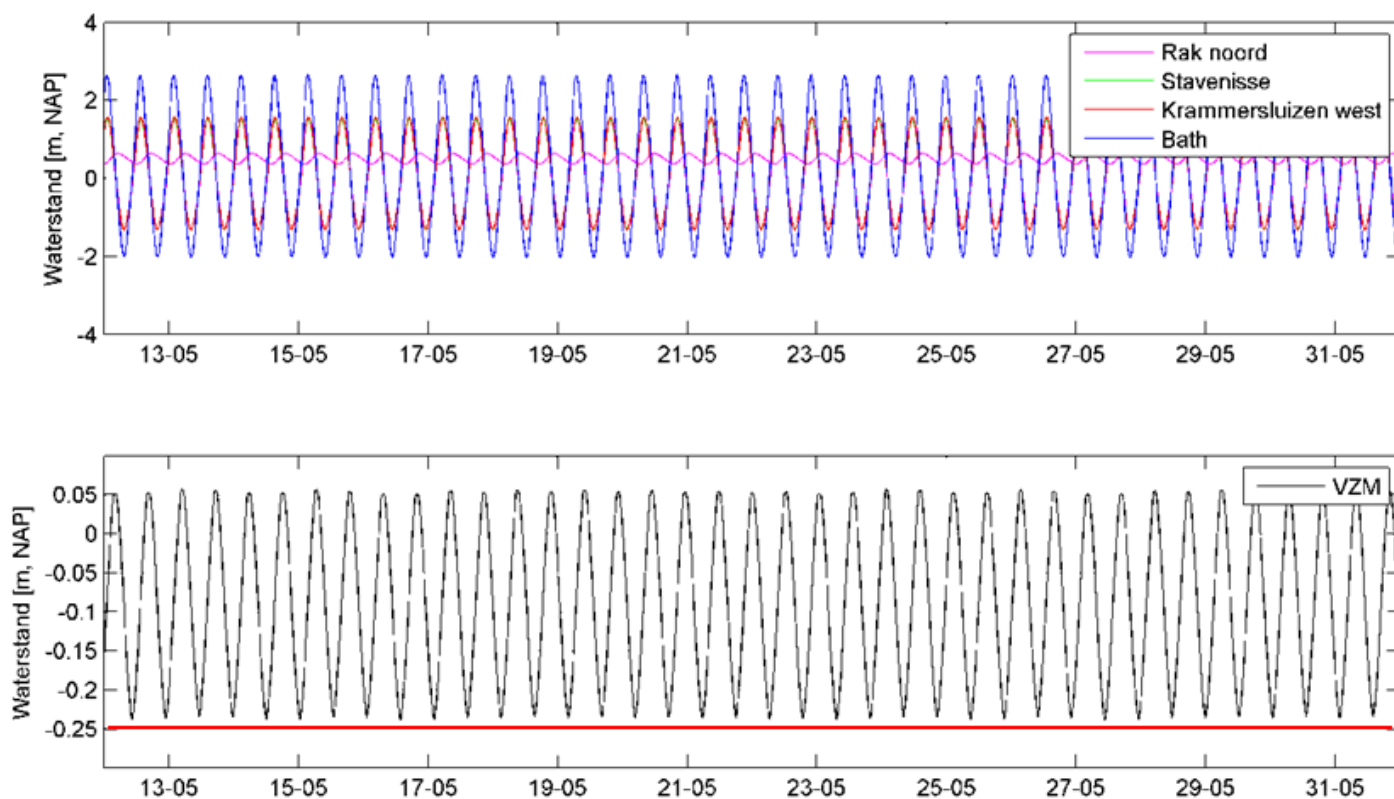
$$^2 Q = \mu \times A \times \sqrt{2 \times g \times \Delta h}$$

Met Q = debiet (m<sup>3</sup>/s);  $\mu$  = afvoercoëfficiënt (0,85); A = doorstroomoppervlak (m<sup>2</sup>); g = zwaartekrachtsversnelling (m/s<sup>2</sup>);  $\Delta h$  = waterstandsverschil (m)



doorstroomoppervlak aan te passen. In de praktijk zal dat overigens niet gebeuren en is variatie binnen het maximum en minimum peil acceptabel.

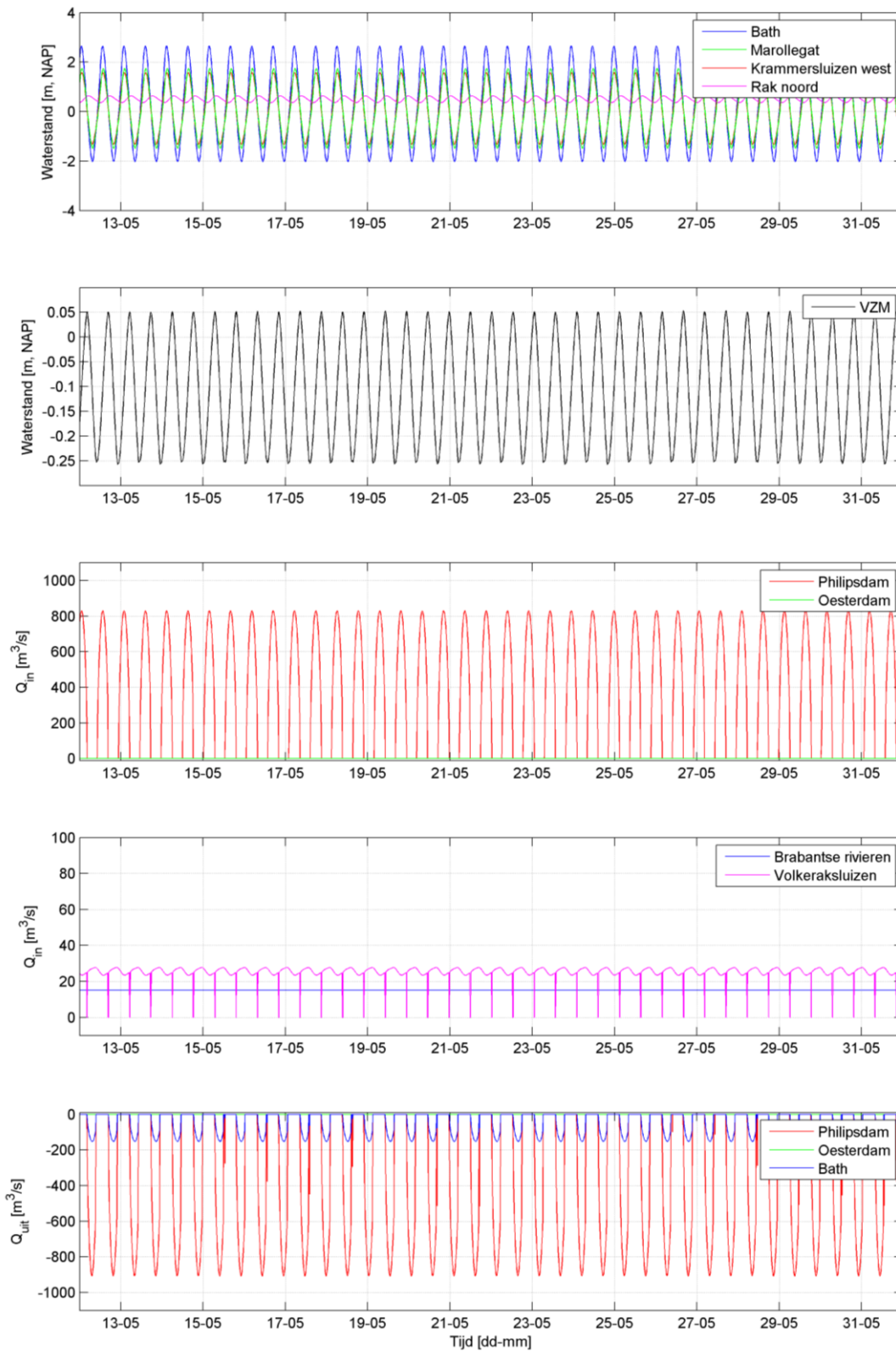
- Om toch een regelmatig getij op te kunnen leggen aan de steady-stateberekeningen zijn de harmonische constanten M2, M4 en M6 bepaald van de gemeten tijdseries. Door deze vervolgens op te leggen volgt een regelmatig waterstandsverloop op het Volkerak-Zoommeer (Figuur 2.5).



Figuur 2.5 Representatieve tijdseries voor de waterstanden in de omliggende wateren op basis van harmonische getijcomponenten M2, M4 en M6 (boven) en resulterend regelmatig waterstandsverloop in het Volkerak-Zoommeer (onder).

- Omdat de getijslag nu net iets minder dan 30 cm is, is een laatste correctie op de doorstroomoppervlakte van het doorlaatmiddel in de Philipsdam toegepast. Dit resulteert in tijdseries van instromende en uitstromende debiet die aan het 3D model worden opgelegd (Figuur 2.6).

## Scenario 1



Figuur 2.6 Modelinvoer voor steady-stateberekening voor variant 1

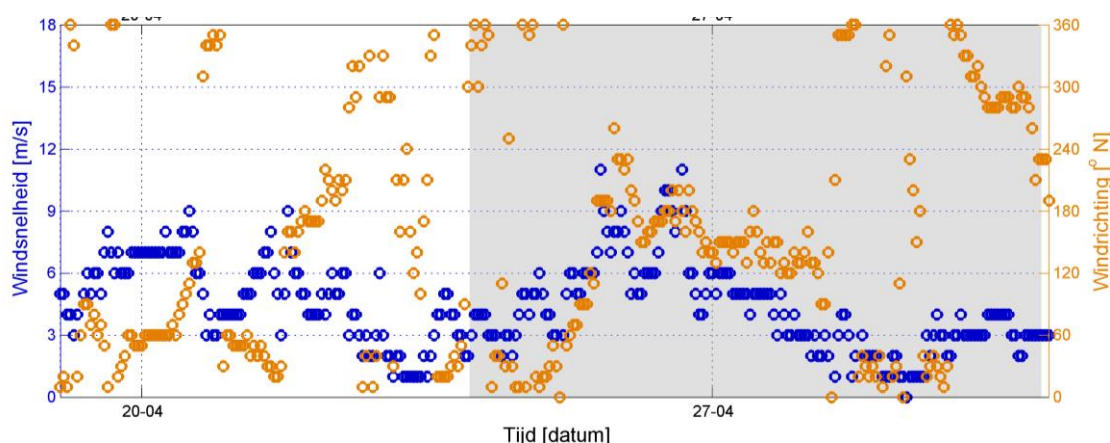
### 2.2.3 Randvoorwaarden voor het zoutgehalte

Het zoutgehalte in de Oosterschelde is gebaseerd op metingen op meetlocatie Oude Tonge en dat in het Hollands Diep op metingen op de locatie Volkerak spuisluis. Voor de steady-stateberekeningen wordt een jaargemiddelde saliniteit van 29,0 psu voor de Oosterschelde opgelegd. De invloed van de uitstroming op het zoutgehalte in de Oosterschelde wordt in deze verkennende studie verwaarloosd. Vooral bij grotere zoetwaterdebieten zal de verwaarlozing niet terecht zijn. In een detailstudie is deze verwaarlozing waarschijnlijk dan ook niet toegestaan.

Een saliniteit van 0,14 psu (80 mg/l chloride) wordt voor het Hollands Diep opgelegd. Deze laatste waarde wordt gemakshalve ook voor de Dintel en Vliet opgelegd.

### 2.2.4 Wind

Voor de windrichting en windsnelheid wordt de gemeten tijdserie over de periode 1 januari 2014 tot 1 mei 2014 op meetstation Vlissingen gebruikt. Een vergelijking van simulaties zonder wind met simulaties met gemeten wind laat zien dat wind een belangrijke invloed heeft op de zoet-zoutgradiënt.



Figuur 2.7 Gemeten windsnelheid (blauw) en windrichting (oranje) op meetstation Vlissingen. Modelresultaten worden gepresenteerd over de laatste dag en over de laatste week (grijs gearceerd). Databron: KNMI

### 2.2.5 Introductie van het debiet vanuit de Volkeraksluizen en de andere kunstwerken

De menging van het ingelaten zoetwaterdebiet in de eerste tientallen tot honderden meters bij de Volkeraksluizen is onderzocht met het near-field model CORMIX. Deze initiële zogenaamde near-field menging valt binnen het 3D rooster binnen een of een paar rekencellen. Omdat initiële menging van belang is voor de verdere menging en verspreiding in het Volkerak-Zoommeer is onderzocht of de wijze waarop dat in het 3D model gebeurt van invloed is op de uitkomst. Het resultaat van deze stap is dat ondanks de beperkte roosterresolutie van een paar roosterzellen, de instroom overeenkomt met CORMIX. Er zijn daarom geen aanpassingen aan of correcties in het 3D model doorgevoerd.

Voor de andere kunstwerken in de Philipsdam en Oesterdam is geen near-field onderzoek gedaan. Omdat deze debieten veel hoger zijn en het verschil in saliniteit kleiner, is aangenomen dat introductie over de gehele waterdiepte mogelijk is om de menging te representeren.

## 2.2.6 Gesimuleerde periode

De simulaties worden gerund voor vijf maanden, waarbij we kijken naar de resultaten voor de laatste dag en laatste week. Met deze simulatieperiode is het model voldoende ingespeeld en zijn de initiële condities ( $C = 29$  psu) niet meer van invloed op het eindresultaat.

## 2.3 Resultaten steady-stateberekeningen

### 2.3.1 Overzicht van presentatiewijzen

De modelresultaten van de in totaal 28 varianten (Tabel 2.1) zijn op vele manieren te presenteren. In dit rapport wordt slechts een beperkt aantal resultaten getoond om de belangrijkste kenmerken te beschrijven. Tabel 2.2 geeft een overzicht van alle figuren die aan Rijkswaterstaat digitaal zijn opgeleverd. Naast saliniteit zijn figuren voor stroomsnelheid beschikbaar gesteld. Deze worden in dit rapport niet besproken. Ook op waterstand wordt beperkt ingegaan. Aangezien 30 cm getijslag als randvoorwaarde aan alle varianten is opgelegd, is de variatie in de modelresultaten gering.

Tabel 2.2 Overzicht van opgeleverde figuren voor de zoet-zoutgradiënt in het Volkerak-Zoommeer per variant

Parameter	Ruimte	Tijd	Statistiek
Saliniteit (psu)	Oppervlaktelaag en doorsnede door de geul	Laatste 25 uur van de simulatie	Minimum Gemiddeld Maximum
		Laatste 7 dagen van de simulatie	Minimum Gemiddeld Maximum
	Verticale profielen bij - Volkeraksluizen - Steenbergen - Philipsdam - Nieuwe Vossemeer - Oesterdam - Molenplaat - Bathse spui	Laatste 25 uur van de simulatie	Minimum Gemiddeld Maximum
Saliniteitsverschil (psu)	Verschil tussen oppervlakte- en bodemlaag als maat voor stratificatie	Laatste 25 uur van de simulatie	Gemiddeld
		Laatste 7 dagen van de simulatie	Gemiddeld
Stroomsnelheid (m/s)	Oppervlaktelaag en doorsnede door de geul	Laatste 25 uur van de simulatie	Minimum Gemiddeld Maximum
		Laatste 7 dagen van de simulatie	Minimum Gemiddeld Maximum
Waterstand (m NAP)	Oppervlaktelaag	Laatste 25 uur van de simulatie	Minimum Gemiddeld Maximum

		Laatste 7 dagen van de simulatie	Minimum Gemiddeld Maximum
	MWTL Steenbergem MWTL Oesterdam	Laatste 14 dagen van de simulatie	Niet van toepassing
Oppervlakte saliniteitszones (ha)	Oppervlaktelaag Cumulatief over Volkerak-Zoommeer	Laatste 25 uur van de simulatie	Minimum Gemiddeld Maximum
		Laatste 7 dagen van de simulatie	

### 2.3.2 Locatie van de zoet-zoutgradiënt

De horizontale en verticale locatie van de zoet-zoutgradiënt wordt eerst getoond voor varianten 1-9, waarin alleen een doorlaatmiddel in de Philipsdam zorgt voor uitwisseling met de Oosterschelde (Figuur 2.8). Hierin is het effect van een grotere zoetwateraanvoer via de Volkeraksluizen, van de Dintel en van de combinatie te zien. Vervolgens laat Figuur 2.9 zien, wat het effect van een doorlaatmiddel in de Oesterdam is.

De figuren tonen voor de oppervlaktelaag de ruimtelijke variatie van de saliniteit gemiddeld over de laatste 25 uur van de simulatie, ofwel de laatste twee getijden. De saliniteit van de oppervlaktelaag is van belang voor de intergetijdengebieden en ondiepe wateren die als belangrijke ecotopen worden onderscheiden. Boven en rechts naast ieder bovenaanzicht staat het bijbehorende zijaanzicht of doorsnede van de geul, waarin het verticale profiel van de gemiddelde saliniteit te zien is. De doorsnede boven toont de geul van de Philipsdam tot de Volkeraksluizen (van links naar rechts). De doorsnede rechts toont de geul van het begin van de Eendracht tot aan de Bathse spuisluis (van boven naar beneden).

In variant 1 met 25 m<sup>3</sup>/s zoetwateraanvoer via de Volkeraksluizen, 10 m<sup>3</sup>/s Dintelaanvoer en alleen een doorlaatmiddel in de Philipsdam (Figuur 2.8) is de gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag van het Krammer-Volkerak ongeveer 21 psu. Bij de uitstroom van de Dintel en de Vliet is een duidelijke zoet-zoutgradiënt zichtbaar. Bij de Volkeraksluizen is ondanks dat de zoetwateraanvoer groter is dan de uitstroom van Dintel en Vliet, geen sterke verlaging van de saliniteit, laat staan zoet water zichtbaar. Dit komt omdat het zoete water snel mengt met het zoutere water dat in de onderlaag aanwezig is. De Dintel stroomt in een vrij ondiep deel in het model, waardoor initiële verticale menging in het model beperkt blijft. Nader bekeken zal moeten worden of deze modelaannname juist is.

Bij de Philipsdam is de saliniteit in de oppervlaktelaag iets hoger, maar duidelijk lager dan de saliniteit van de Oosterschelde (29 psu). Gaande van de Volkeraksluizen naar de Philipsdam is dus (getijgemiddeld) slechts een beperkte zoet-zoutgradiënt aanwezig. De gemiddelde saliniteit van circa 21 psu wordt overigens voldoende geacht om blauwalgen te voorkomen.

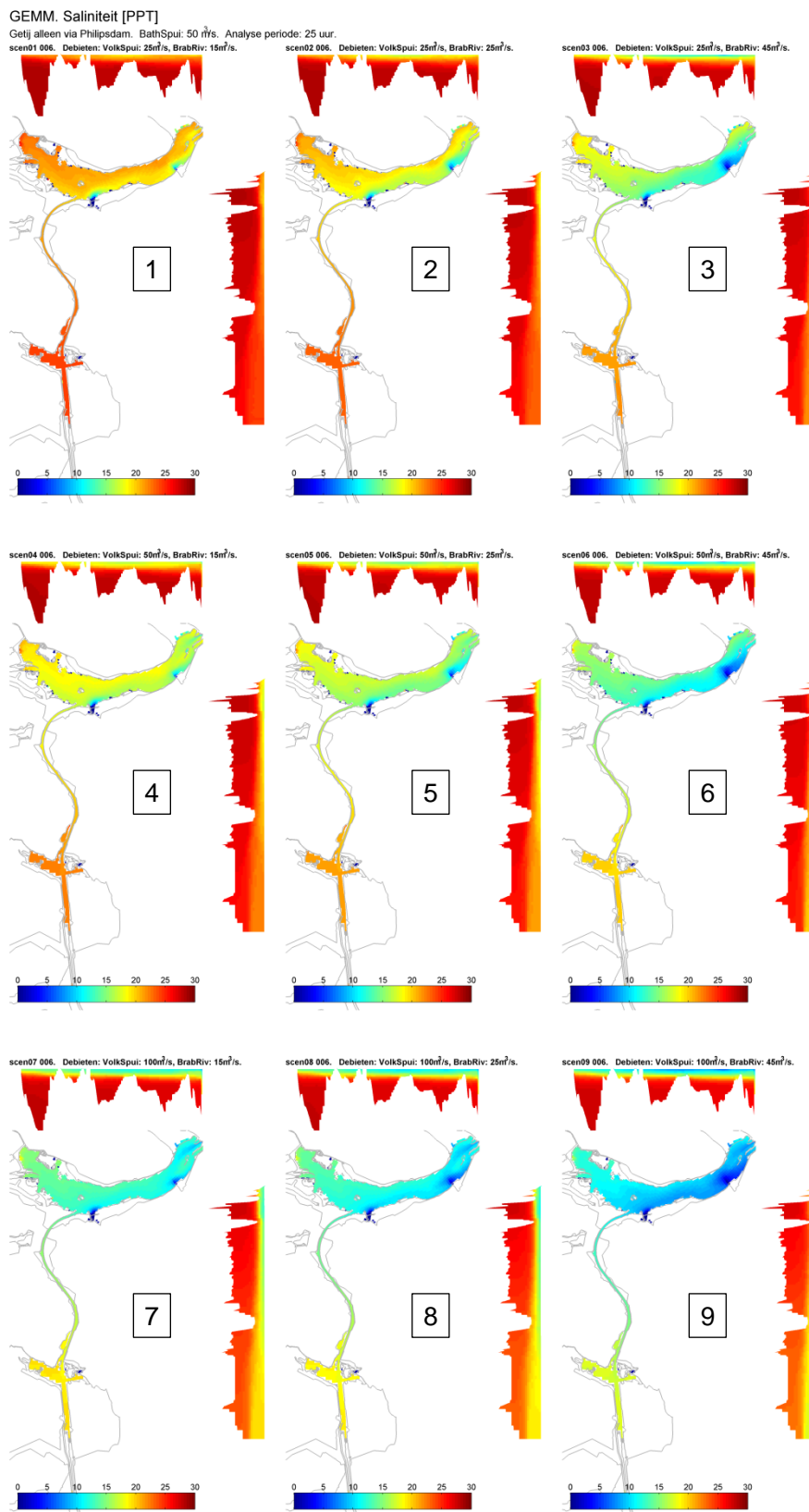
De gemiddelde saliniteit in de diepere geul van het Krammer-Volkerak benadert de saliniteit van het ingelaten Oosterscheldewater. De menging met ingelaten zoete water bij de Volkeraksluizen treedt voor het grootste deel direct lokaal bij de Volkeraksluizen op. Terwijl de brakke bovenlaag netto in westelijke richting stroomt, vindt een verdere zij het relatief beperkte menging met de onderlaag op. In §2.3.3 gaan we uitgebreider in op het voorkomen en de mate van stratificatie.

In het Zoommeer is de gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag met circa 25 psu hoger dan in het Krammer-Volkerak. De toename van deze gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag komt door verticale menging. Aan de verticale doorsnede is te zien dat bij de

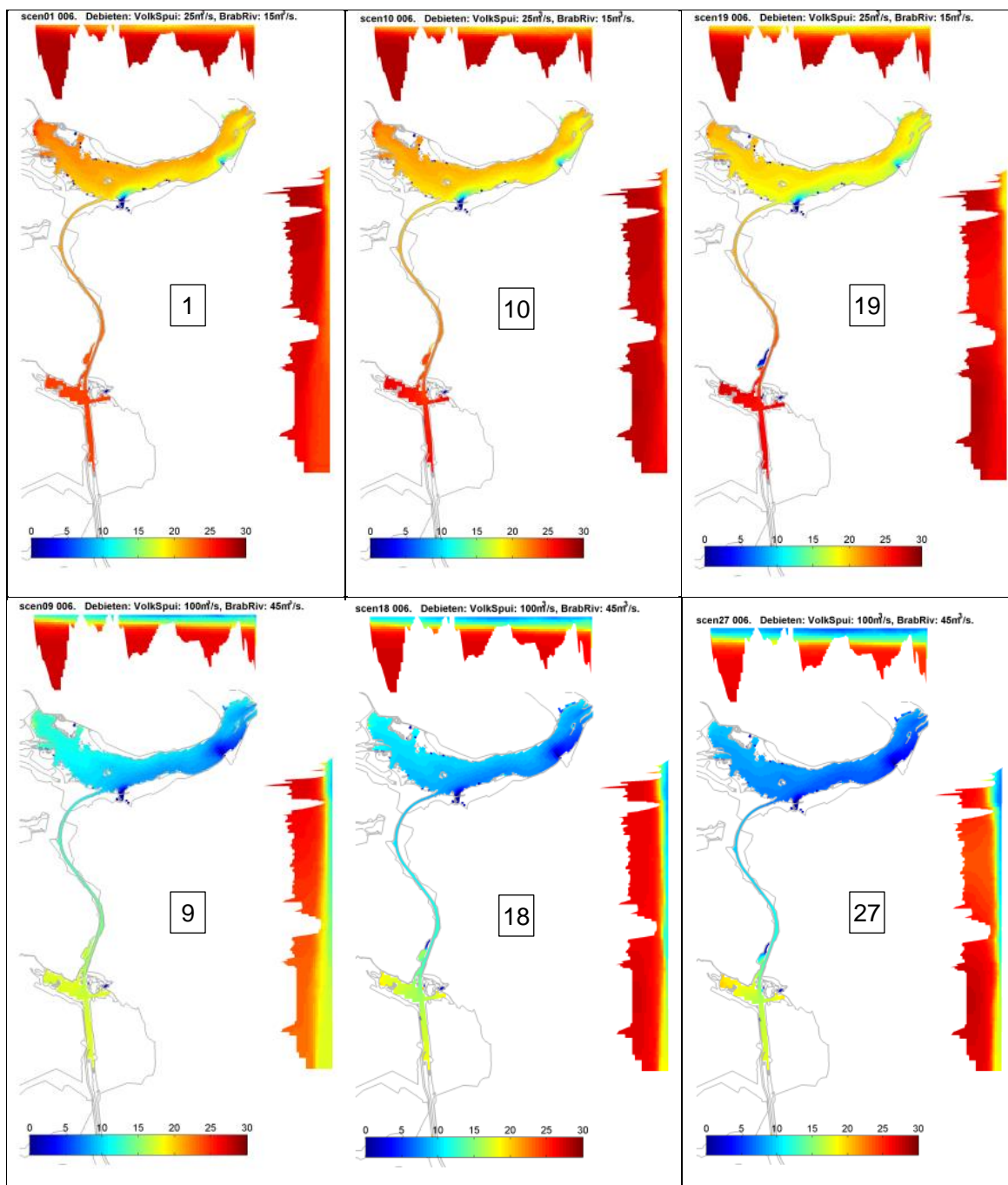
noordelijke ingang van de Eendracht een verschil is tussen boven- en onderlaag van circa 7 psu. In het Zoommeer is nauwelijks een verticale gradiënt meer aanwezig en is er dus verticale menging opgetreden.

Een grotere zoetwateraanvoer via de Volkeraksluizen resulteert in een lagere gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag. Dit komt overigens ook doordat de zoutwateraanvoer afneemt om de getijslag van 30 cm niet te overschrijden (zie Tabel 2.1). Bij gelijkblijvende Dintelafvoer zorgt meer zoetwateraanvoer via de Volkeraksluizen voor een beperkte verlaging van de gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag van het Krammer-Volkerak. Bij 50 m<sup>3</sup>/s daalt de gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag naar circa 18 psu en bij 100 m<sup>3</sup>/s naar circa 14 psu. De zoet-zoutgradiënt bij de Volkeraksluizen blijft beperkt. Een grotere zoetwateraanvoer door de Volkeraksluizen zorgt dus niet voor een zoetwaterbel bij de Volkeraksluizen. Het Zoommeer laat een vergelijkbare relatieve daling zien tot respectievelijk circa 22 psu en circa 19 psu zien. Bij grotere aanvoer via de Volkeraksluizen is ook het Zoommeer gestratificeerd.

Een grotere Dintelafvoer zorgt voor een grotere brakwaterzone bij de Dintelmonding. Het effect van een grotere Dintelafvoer op de zoet-zoutgradiënt lijkt groter dan een grotere aanvoer via de Volkeraksluizen. Dit heeft mogelijk te maken met de positie van de laterale instroming, dat wil zeggen niet aan het uiteinde van de gradiënt maar op zo'n 4 km van het oostelijke uiteinde bij de Volkeraksluizen en op circa 14 km van het westelijke uiteinde bij de Philipsdam. Verder is in het model zichtbaar dat de uitstroming van de Dintel als een relatief dunne laag op het oppervlak blijft drijven. De lokale menging direct bij de monding is zeer relevant voor de verspreiding in het Krammer-Volkerak. Mogelijk wordt deze lokale menging bij de monding van de Dintel onderschat en daardoor de zoet-zoutgradiënt overschat.



Figuur 2.8 Gemiddelde saliniteit over de laatste 25 uur van de simulatie voor varianten 1-9 (zie Tabel 2.1 voor beschrijving). Boven en rechts naast ieder bovenaanzicht van de oppervlaktelaag staat de verticale verdeling getoond in een dwarsdoorsnede. Van links naar rechts neemt de Dintelafvoer toe (10 m<sup>3</sup>/s, 20 m<sup>3</sup>/s en 40 m<sup>3</sup>/s; Vlietafvoer is constant 5 m<sup>3</sup>/s). Van boven naar beneden neemt de aanvoer via de Volkeraksluizen toe (25 m<sup>3</sup>/s, 50 m<sup>3</sup>/s en 100 m<sup>3</sup>/s).



Figuur 2.9 Gemiddelde saliniteit over de laatste 25 uur van de simulatie voor varianten 1 & 9, 10 & 18 en 19 & 27 (zie Tabel 2.1 voor beschrijving). Boven en rechts naast ieder bovenaanzicht van de oppervlaktelaag staat de verticale verdeling getoond in een dwarsdoorsnede. Van links naar rechts neemt de bijdrage van een doorlaatmiddel in de Oesterdam toe (0%, 20% en 40%). In de bovenste rij is de gecombineerde zoetwateraanvoer minimaal (40 m<sup>3</sup>/s) en in de onderste rij maximaal (145 m<sup>3</sup>/s).

Figuur 2.9 laat het effect van een doorlaatmiddel in de Oesterdam zien. Bij een minimale zoetwateraanvoer (25 m<sup>3</sup>/s Volkeraksluizen, 10 m<sup>3</sup>/s Dintel en 5 m<sup>3</sup>/s Vliet) is het effect op de gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag beperkt. Bij 20% bijdrage van de Oesterdam daalt de gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag in het Krammer-Volkerak circa 1 psu tot circa 20 psu en bij 40% bijdrage nogmaals circa 1 psu tot 19 psu. In het Zoommeer neemt de gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag omgekeerd toe. Het grootste verschil is zichtbaar



in de onderlaag van het Zoommeer waar de gemiddelde saliniteit toeneemt tot circa 28 psu door de directe uitwisseling met de Oosterschelde.

Bij maximale zoetwateraanvoer (100 m<sup>3</sup>/s Volkeraksluizen, 40 m<sup>3</sup>/s Dintel en 5 m<sup>3</sup>/s Vliet) zijn twee aspecten relevant. De oppervlaktelaag in het Krammer-Volkerak verzoet sterk. Bij 40% bijdrage van de Oesterdam is de gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag van het hele Krammer-Volkerak lager dan 10 psu. De veel lagere aanvoer van zoutwater via de Philipsdam is hiervan de reden. De gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag van het Zoommeer blijft nagenoeg gelijk. De stratificatie in het Zoommeer neemt wel aanzienlijk toe met toenemende zoetwateraanvoer.

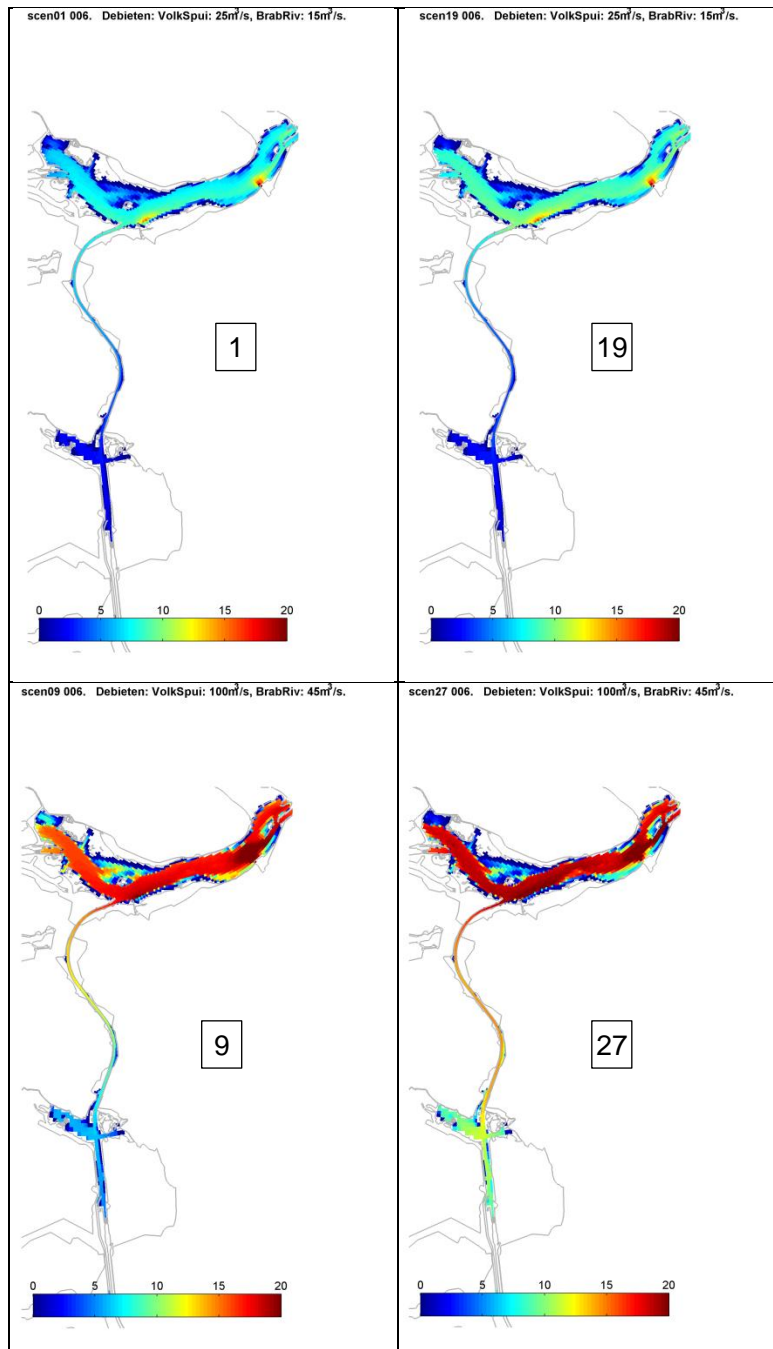
### 2.3.3 Stratificatie

Figuur 2.10 toont voor de uiterste varianten de mate van stratificatie als het verschil in gemiddelde saliniteit tussen de oppervlaktelaag en de bodemlaag van het model.

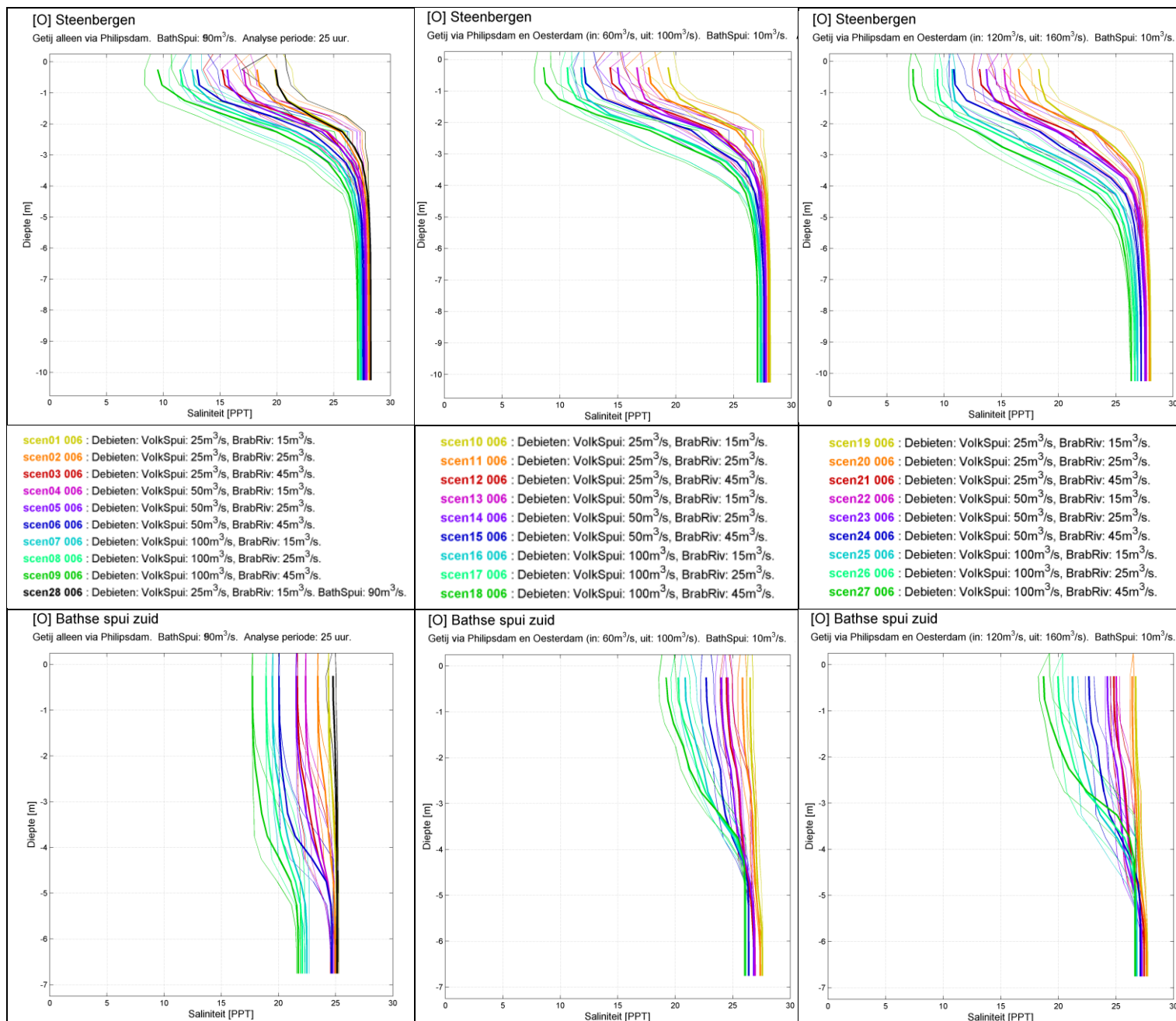
In alle gevallen is sprake van een aanzienlijke stratificatie in het Krammer-Volkerak. Bij minimale zoetwateraanvoer van gezamenlijk 40 m<sup>3</sup>/s en geen doorlaat in de Oesterdam (variant 1) is dat gelijk aan circa 7 psu en neemt toe tot circa 10 psu bij een 40% bijdrage van de Oesterdam (variant 19). In deze varianten is de stratificatie in het Zoommeer beperkt tot circa 2-3 psu.

Bij een maximale zoetwateraanvoer van cumulatief 145 m<sup>3</sup>/s neemt de stratificatie in het Krammer-Volkerak en het Zoommeer toe. In het Krammer-Volkerak wordt een groot gemiddeld saliniteitsverschil voorspeld oplopend van 17 psu zonder doorlaat in de Oesterdam (variant 9) tot 20 psu bij 40% bijdrage van de Oesterdam (variant 27). In het Zoommeer is wederom de stratificatie aanzienlijk minder. Zonder doorlaat in de Oesterdam is het gemiddelde saliniteitsverschil met circa 6 psu kleiner dan bij een 40% bijdrage van de Oesterdam met circa 11 psu. Dit komt doordat de directe verbinding met zout Oosterscheldewater dat via een doorlaatmiddel in de Oesterdam het diepe deel van het Zoommeer instroomt.

Ook de verticale saliniteitsprofielen op locaties Steenberg en Bathse spui zuid als typische representatie voor het Krammer-Volkerak en Bathse spui zuid als typische representatie voor het Zoommeer laten zien dat de toename van de zoetwateraanvoer meer bijdraagt aan een toename van de stratificatie dan een groter aandeel van de Oesterdam (Figuur 2.11).



Figuur 2.10 Verschil in gemiddelde saliniteit over de laatste 25 uur van de simulatie tussen de oppervlaktelaag en de onderlaag voor varianten 1 & 9 en 19 & 27 (zie Tabel 2.1 voor beschrijving). Boven en rechts naast ieder bovenaanzicht van de oppervlaktelaag staat de verticale verdeling getoond in een dwarsdoorsnede. In de linker kolom is er alleen een doorlaatmiddel in de Philipsdam, in de rechterkolom is de bijdrage van de Oesterdam 40%. In de bovenste rij is de zoetwateraanvoer minimaal (cumulatief  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ ), in de onderste rij maximaal (cumulatief  $145 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



Figuur 2.11 Verticale saliniteitsprofielen over de laatste 25 uur van de simulatie op locaties Steenberg (boven) en Bathse spui zuid (onder). De dikke lijn is het gemiddelde; de dunne lijnen geven de bandbreedte aan. Van links naar rechts neemt de bijdrage van de Oesterdam toe, terwijl binnen de figuren van geel naar groen het totale zoetwaterdebiet toeneemt. (NB: 006 in de code van de berekening.)

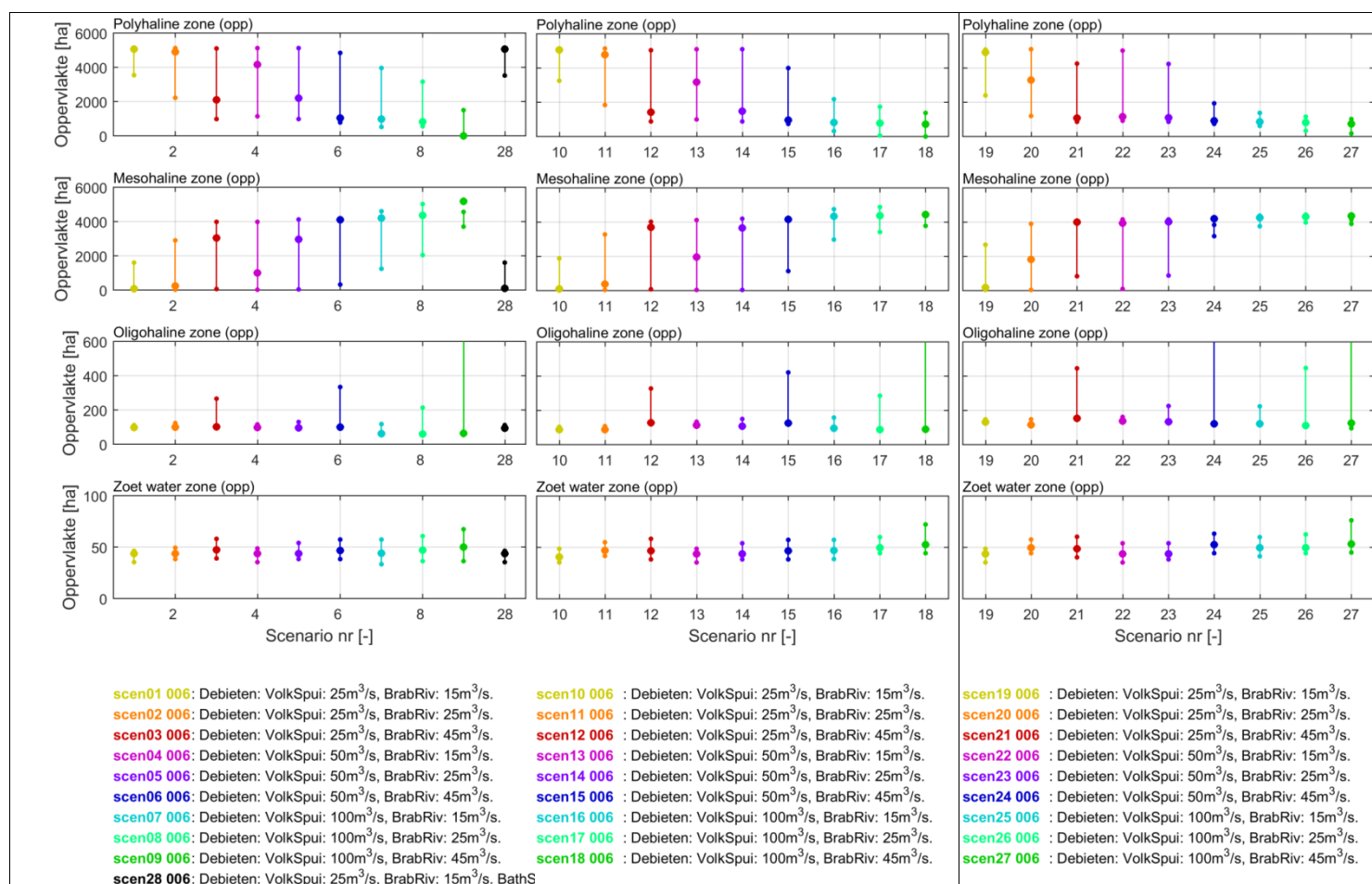
## 2.3.4 Areaal van zoutzones

In overleg met Wageningen Marine Research zijn de volgende saliniteitszones gedefinieerd:

- Zoet water [0-0,5 psu]
- Oligohalien [0,5-5 psu]
- Mesohalien [5-18 psu]
- Polyhalien [18-30 psu]

Vervolgens is op basis van de berekende saliniteit in de oppervlaktelaag het areaal van deze saliniteitszone bepaald (Figuur 2.12), ten behoeve van de intergetijdengebieden en ondiepe ecotopen. In alle varianten blijkt de zoete zone beperkt tot rond de 50 ha. De oligohaliene zone is ook gering met gemiddeld circa 100 ha. Bij maximale zoetwateraanvoer van cumulatief 145 m<sup>3</sup>/s wordt binnen het getij oligohaliene arealen tot meer dan 600 ha gerealiseerd.

Het belangrijkste effect dat zichtbaar is tussen de varianten is een verschuiving of uitwisseling tussen de mesohaliene zone en de polyhaliene zone. Deze fungeren als communicerende vaten. Toename van de een betekent afname van de ander. Bij toename van de zoetwateraanvoer en een grotere bijdrage van de Oesterdam neemt de mesohaliene zone toe en (dus) de polyhaliene zone af. Bij minimale zoetwateraanvoer valt uitgaande van gemiddelde saliniteit nagenoeg het hele oppervlak van het Volkerak-Zoommeer binnen de polyhaliene zone.



Figuur 2.12 Areaal van saliniteitszones op basis van saliniteit in de oppervlaktelaag over de laatste 25 uur van de simulatie. Aangegeven zijn het gemiddelde (dikke stip) en de range met minimum en maximum (dunne stippen).

### 2.3.5 Effect van wind

Wind zorgt voor menging en heeft zo een effect op de zoet-zoutgradiënt. Alle gepresenteerde figuren zijn ook beschikbaar over de laatste 7 dagen van de simulatie, waarin een grotere variatie van windsnelheid en windrichting resulteert in een grotere variatie van de zoet-zoutgradiënt. Omdat de kernobservaties niet wijzigen, worden de figuren hier niet besproken. In de jaarberekening wordt het effect van wind expliciet meegenomen (zie hoofdstuk 3).



### 3 Variatie zoet-zoutgradiënt en waterkwaliteit in een jaar

#### 3.1 Selectie jaarberekening

Op basis van de steady-stateberekeningen zijn in samenwerking met Rijkswaterstaat en Wageningen Marine Research de volgende observaties gedaan voor de zoet-zoutgradiënt in relatie tot waterkwaliteit en ecologische kwaliteit:

- Een sterke stratificatie is onwenselijk in verband met het risico op zuurstofuitputting in de onderlaag. De stratificatie neemt toe bij een grotere zoetwateraanvoer.
- Een saliniteit van minder dan 20 psu is onwenselijk, omdat dan de kans van voorkomen van blauwalgen toeneemt. Bij een grote zoetwateraanvoer is de gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag in een groot deel van het Krammer-Volkerak lager dan 20 psu.
- De zoete en de oligohaliene saliniteitszone zijn ecologisch interessant, omdat zijn relatief zeldzaam zijn in de zuidwestelijke delta. Het areaal van deze zones dat in de varianten gerealiseerd kan worden, is zeer klein. Veel meer zoetwateraanvoer leidt nauwelijks tot een areaaltoename.

Geen van deze drie observaties geven aanleiding om de zoetwateraanvoer via de Volkeraksluizen te verhogen ten opzichte van het debiet in de voorkeursvariant van de Rijksstructuurvisie. Alleen deze aanvoer is te sturen, aangezien voor de Brabantse rivieren sprake is van natuurlijke afvoer. Voor de jaarberekening wordt daarom niet afgeweken van het uitgangspunt in de voorkeursvariant die uitgaat van maximaal 25 m<sup>3</sup>/s zoetwateraanvoer via de Volkeraksluizen.

In de voorkeursvariant is sprake van alleen een doorlaatmiddel in de Philipsdam. Van deze variant zijn eerdere berekeningen beschikbaar. Een jaarberekening met een doorlaatmiddel in de Oesterdam draagt daarom meer bij aan nieuwe inzichten. De variant met 20% bijdrage wordt geselecteerd. De verhouding 80% Philipsdam en 20% Oesterdam komt het best overeen met de achterliggende komberging van respectievelijk Krammer-Volkerak (circa 75%) en Zoommeer (circa 25%, op basis van wateroppervlak).

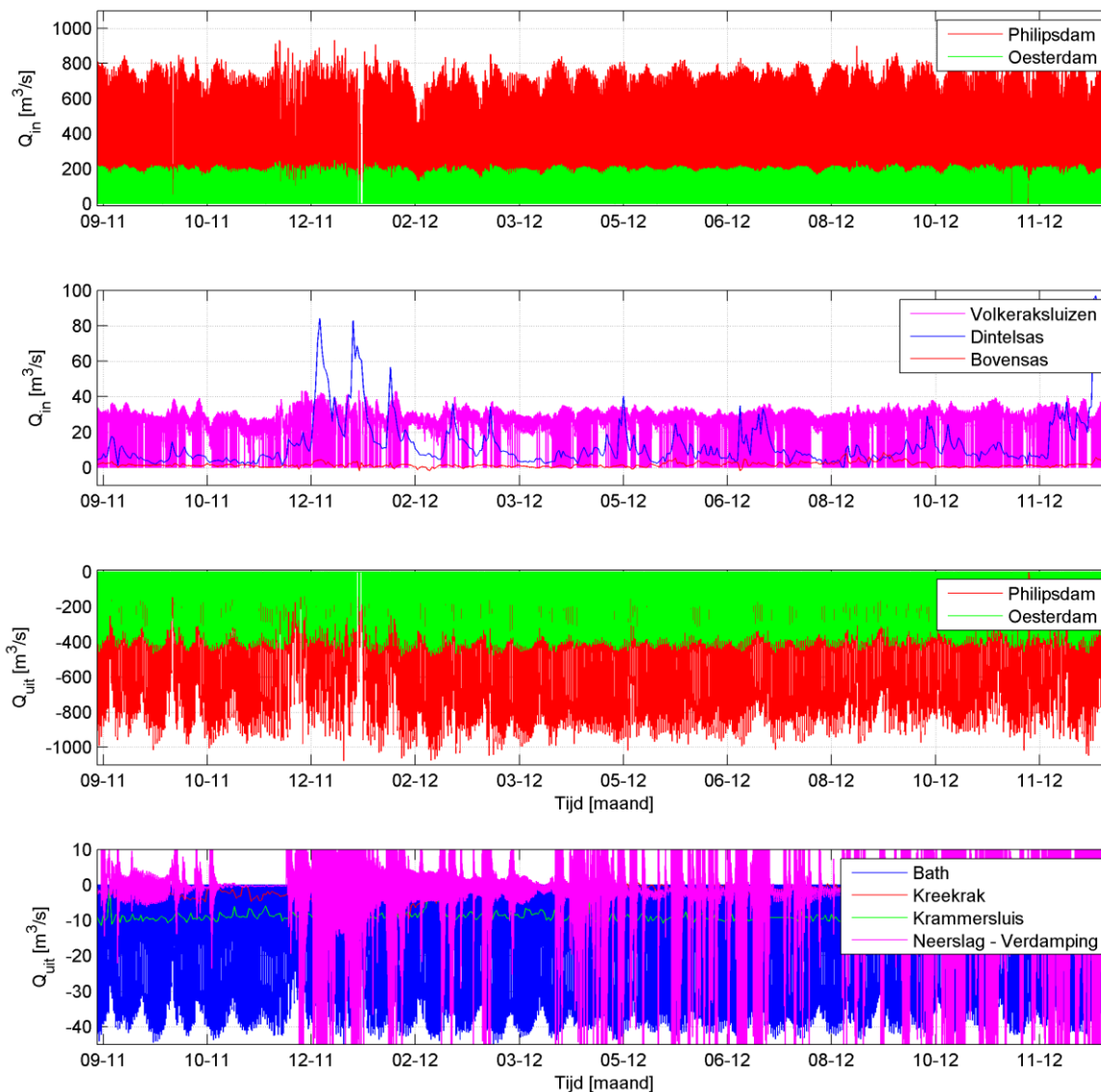
De verversing van het Zoommeer wordt bereikt door uitwisseling met de Oosterschelde via de Oesterdam. De in de voorkeursvariant opgenomen doorspoeling van 50 m<sup>3</sup>/s en de resulterende grote afvoer naar de Westerschelde via de Bathse spuisluis daarmee overbodig. De afvoer naar de Westerschelde wordt beperkt tot 10 m<sup>3</sup>/s.

Variant 10 uit Tabel 2.1 is derhalve geselecteerd om uit te werken als jaarberekening.

#### 3.2 Opzet jaarberekening

Voor de jaarberekening wordt in principe hetzelfde model gebruikt als voor de steady-stateberekeningen. Informatie voor de Brabantse rivieren en voor de meteorologische condities (wind, zoninstraling, luchtvochtigheid) wordt overgenomen uit het beschikbare 3D model voor het Volkerak-Zoommeer (Deltares, 2016). Het jaar 2012 is gekozen voor de jaarberekening.

De debieten door de Volkeraksluizen, de Philipsdam, de Oesterdam en de Bathse spuisluis worden afgeleid volgens de in §2.2.2 beschreven methodiek. De tijdseries worden opgelegd aan het model (Figuur 3.1). Naast deze debieten worden neerslag en verdamping meegenomen. Vooral verdamping is relevant voor het optreden van temperatuurstratificatie.



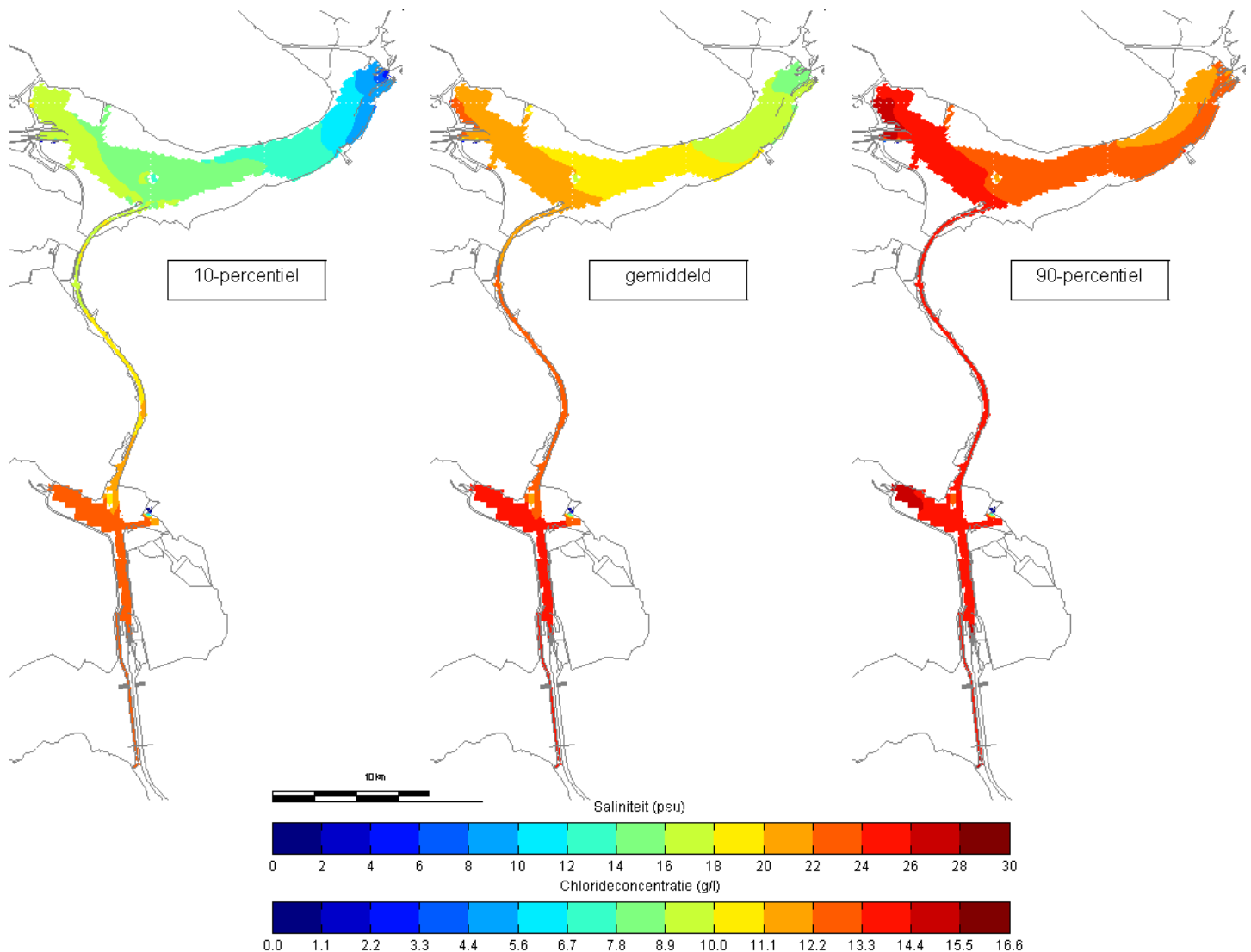
Figuur 3.1 Tijdreeksen van debieten voor de jaarberekening van 1 september 2011 tot 31 december 2012

### 3.3 3D hydrodynamische modellering

Dit hoofdstuk richt zich op de modelresultaten voor de zoet-zoutgradiënt. De ruimtelijke variatie in de oppervlaktelaag wordt getoond in Figuur 3.2 en Figuur 3.3 op basis van statistiek over het hele jaar. Dat wil bijvoorbeeld zeggen dat voor de gemiddelde saliniteit per locatie alle saliniteitswaarden voor het hele jaar zijn gemiddeld.

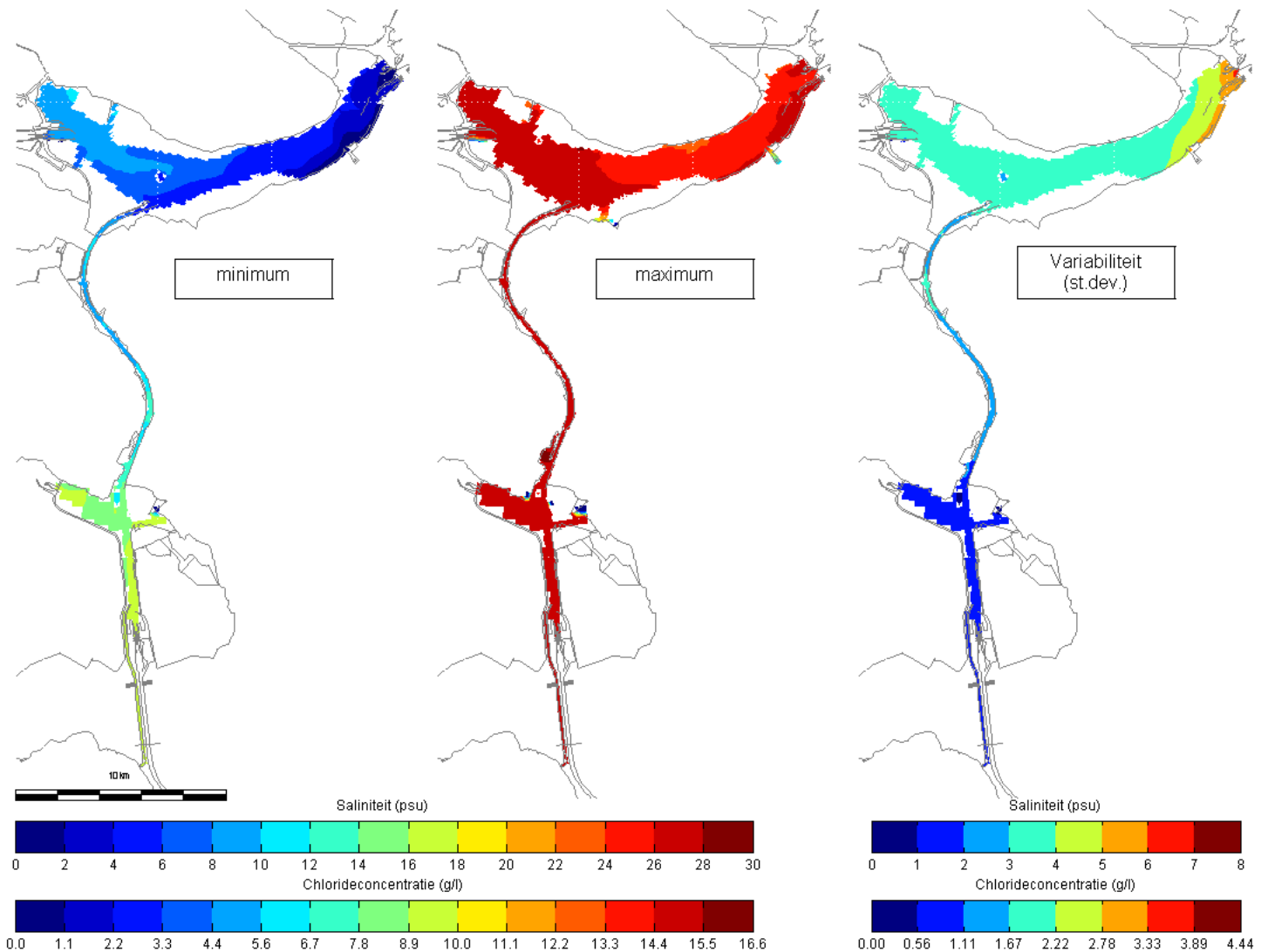
Tijdseries op een raai van locaties gaande van de Volkeraksluizen naar de Philipsdam en via Nieuw Vossemeer in de Eendracht naar het Zoommeer worden getoond in Figuur 3.5. Deze tijdseries geven een beeld van de ruimtelijke verdeling in de onderlaag.





Figuur 3.2 Jaarstatistiek van saliniteit / chlorideconcentratie in de oppervlaktelaag van het Volkerak-Zoommeer (10-percentiel, gemiddelde en 90-percentiel) voor de variant met  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  zoetwateraanvoer via de Volkeraksluizen, doorlaatmiddelen in de Philipsdam (80% bijdrage aan uitwisseling) en de Oesterdam (20% bijdrage) en  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  afvoer via de Bathse spuisluis naar de Westerschelde. De afvoer van de Brabantse rivieren Dintel en Vliet is variabel.

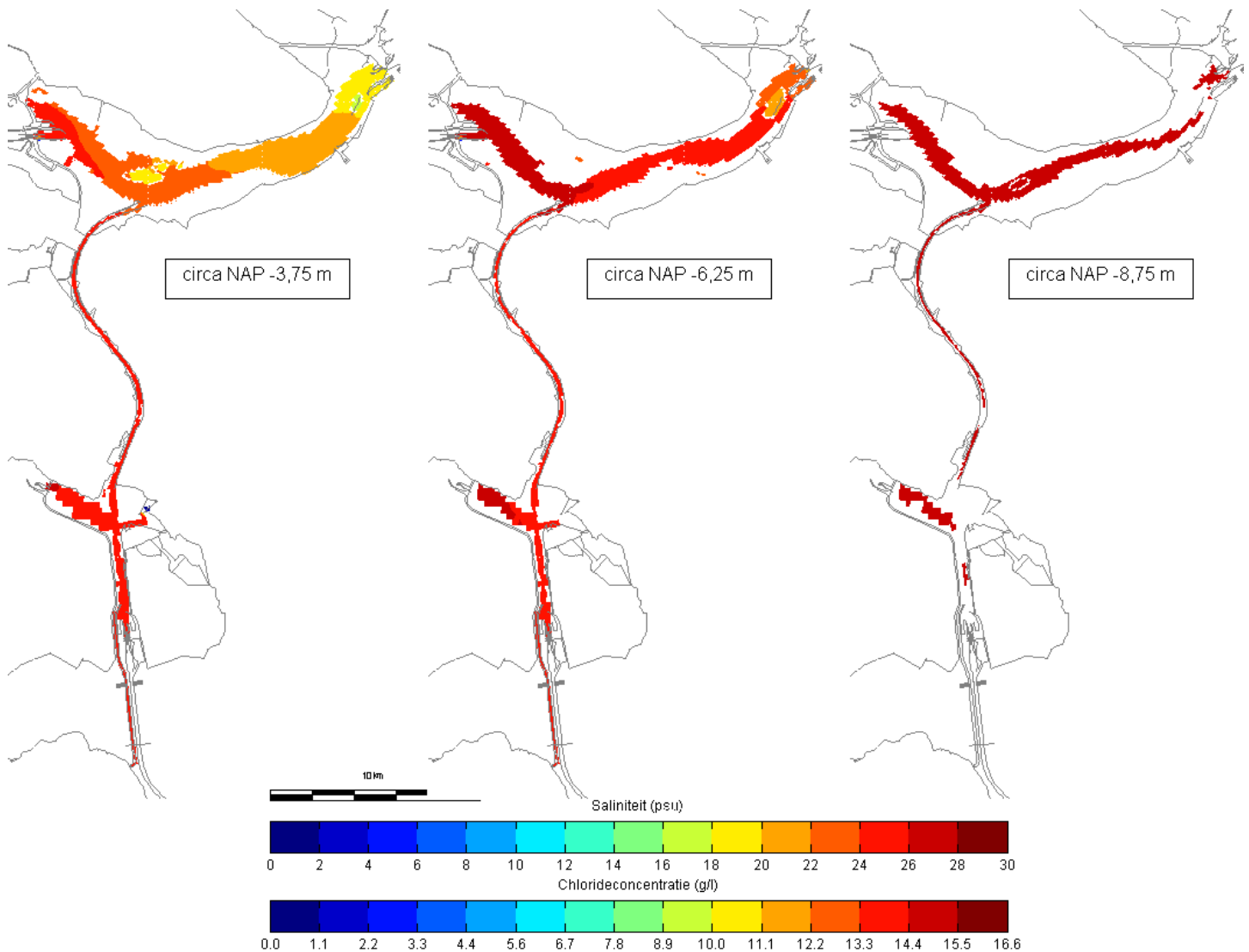
We kijken naar de saliniteit en chlorideconcentratie in de oppervlaktelaag, omdat deze representatief zijn voor de belangrijke geachte intergetijdengebied-ecotopen. De gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag varieert van 15 psu (ongeveer 8 g/l chloride) bij de Volkeraksluizen tot 22 psu (12 g/l chloride) bij de Philipsdam en loopt verder op tot 25 psu (14 g/l chloride) in het Zoommeer (Figuur 3.2). De instroom van zoetwater via de Volkeraksluizen is dus duidelijk herkenbaar. Gemiddeld is geen zoet-zoetgradiënt in de monding van Dintel en Vliet zichtbaar. Zo'n zoet-zoutgradiënt zal er in de praktijk wel zijn, maar de roosterresolutie van dit model is te grof om die te visualiseren. Als we het 10- en 90-percentiel beschouwen als representatief voor de meer alledaagse variatie dan blijkt dat de saliniteit bij de Volkeraksluizen het meest varieert, namelijk tussen 8 en 22 psu (4 en 12 g/l chloride). De variatie bij de Philipsdam is beperkter tussen 17 en 27 psu (9 en 15 g/l chloride). In het Zoommeer is de saliniteitsvariatie maar een paar psu tussen 21 en 25 psu (12 en 14 g/l chloride). Dit ruimtelijke patroon van variatie wordt ook getoond in de standaarddeviatie in Figuur 3.3, al is de variatie kleiner.



*Figuur 3.3* Jaarstatistiek van saliniteit/ chlorideconcentratie in de oppervlaktelaag van het Volkerak-Zoommeer (minimum, maximum en standaarddeviatie) voor de variant met 25 m<sup>3</sup>/s zoetwateraanvoer via de Volkeraksluizen, doorlaatmiddelen in de Philipsdam (80% bijdrage aan uitwisseling) en de Oesterdam (20% bijdrage) en 10 m<sup>3</sup>/s afvoer via de Bathse spuisluis naar de Westerschelde. De afvoer van de Brabantse rivieren Dintel en Vliet is variabel.

Uit de minimumwaarde gedurende het jaar 2012, getoond in Figuur 3.3, blijkt dat de oppervlaktelaag in het Krammer-Volkerak sterk kan verzoeten tot (vrijwel) zoet bij de Volkeraksluizen en vooral de Dintelmonding en tot 9 psu (5 g/l chloride) bij de Philipsdam. De minimale saliniteit in het Zoommeer is met circa 15 psu (8 g/l chloride) hoger. De maximumconcentratie is in het hele Volkerak-Zoommeer ongeveer gelijk tussen 25 en 27 psu (14 tot 15 g/l chloride).

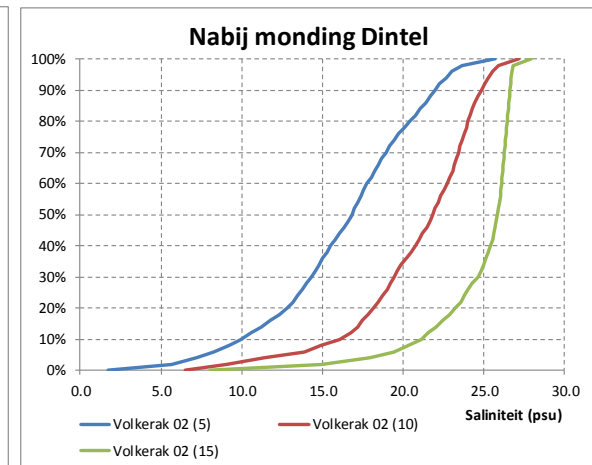
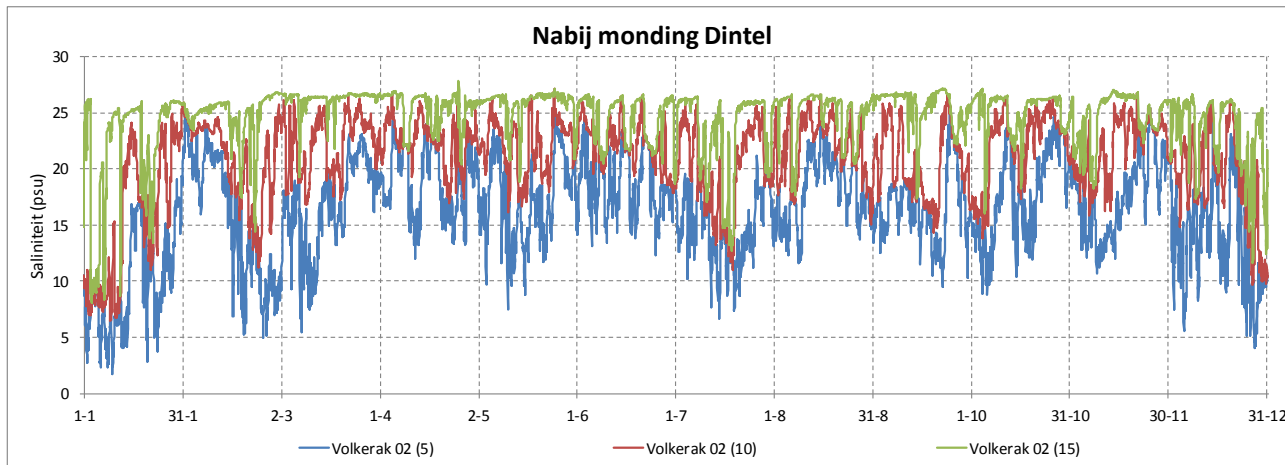
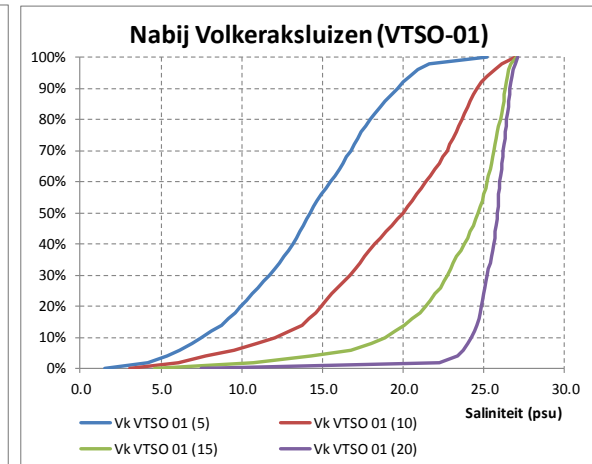
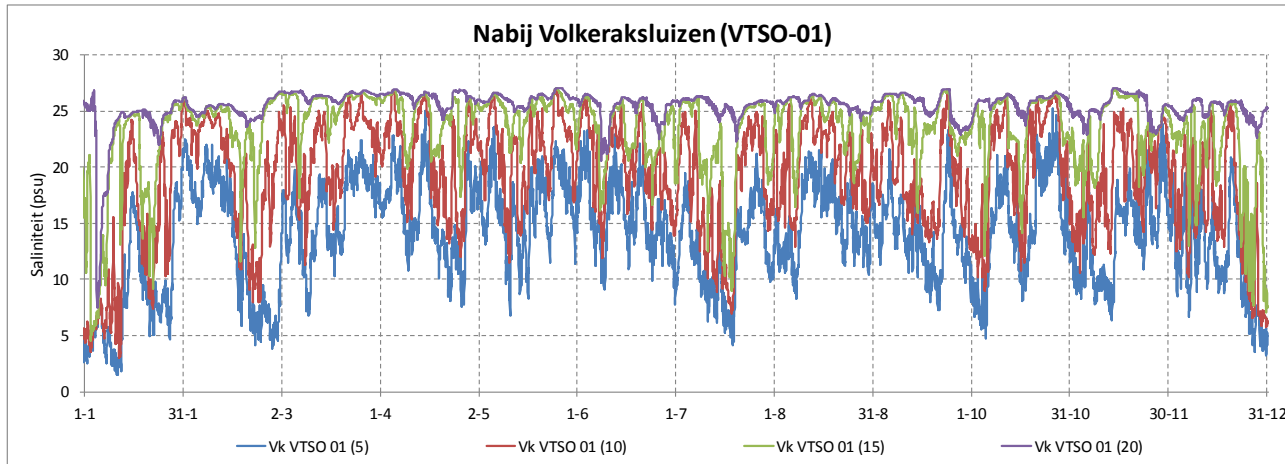
De tijdseries in Figuur 3.5 tonen dat er met name in het Krammer-Volkerak stratificatie optreedt en dat de saliniteit in de onderlaag veel minder variabel is. In het Zoommeer is stratificatie beperkt. Figuur 3.4 laat daarom alleen het jaargemiddeld zien. De jaargemiddelde saliniteit op een diepte van circa -8,75 m NAP is vrijwel gelijk rond 26 psu (14,5 g/l chloride) in het hele meer. Ook op -3,75 m NAP is de gradiënt beperkt van 19 tot 25 psu (10,5 tot 14 g/l chloride). Dit houdt in dat grote zoet-zoutgradiënten in het model alleen voorkomen in een relatief dunne bovenlaag van enkele meters dikte.

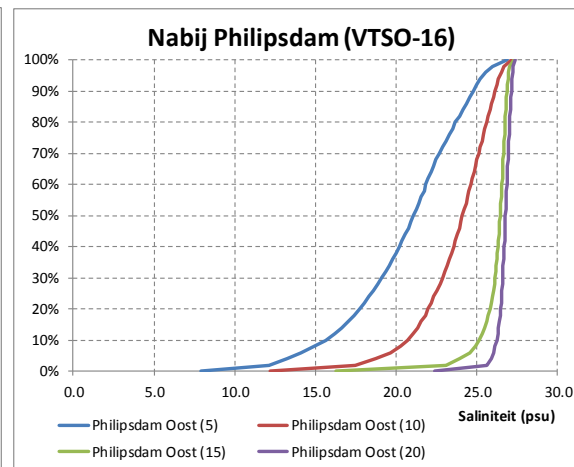
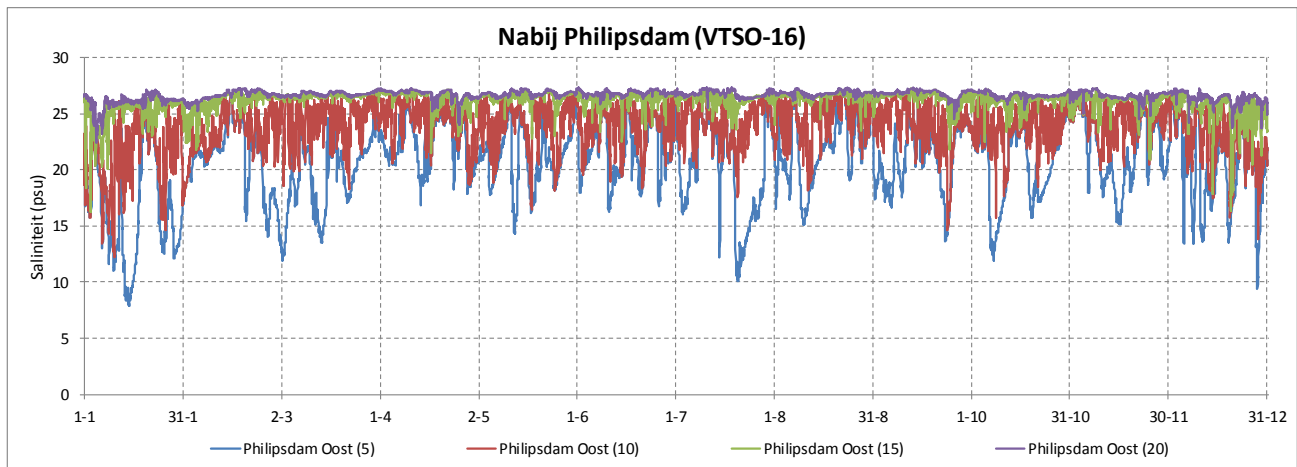
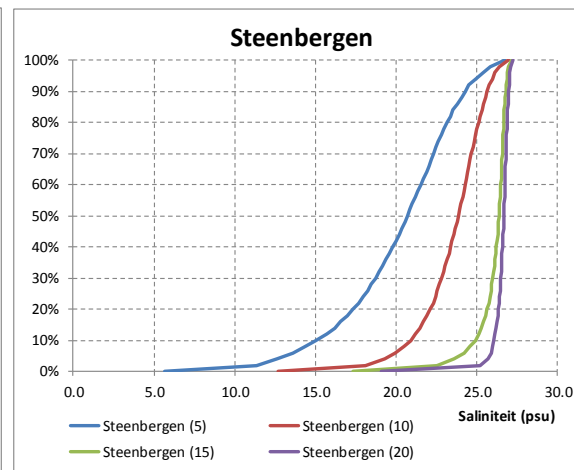
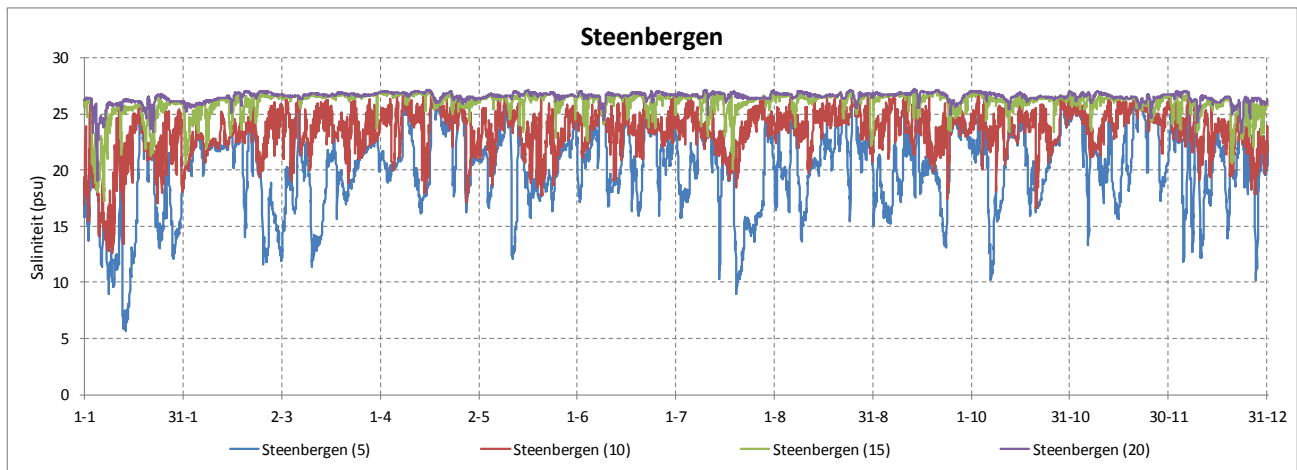


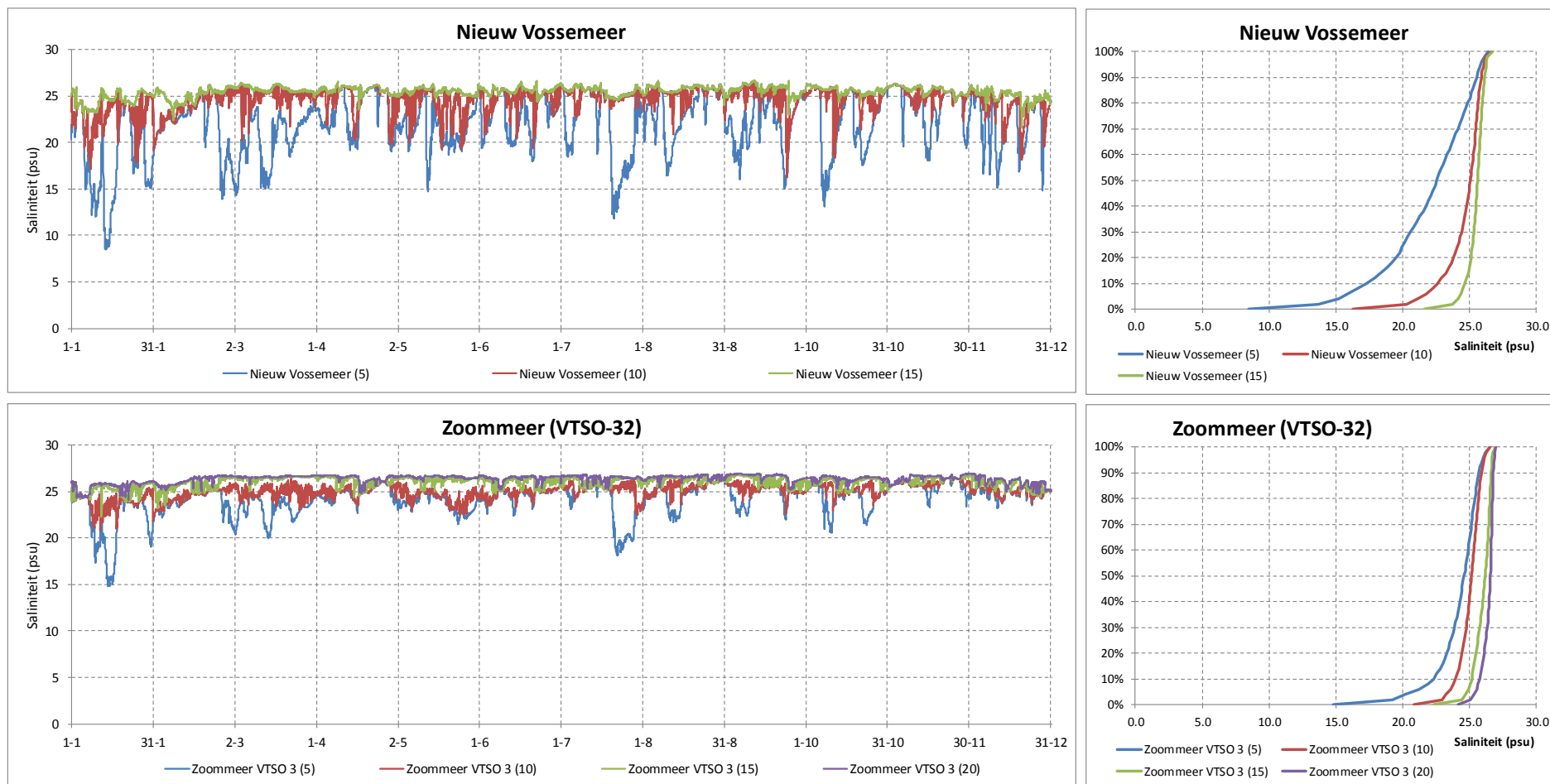
Figuur 3.4 Jaarstatistiek van gemiddelde saliniteit / chlorideconcentratie op verschillende dieptes van het Volkerak-Zoommeer (circa -3,75 m NAP, -6,25 m NAP en -8,75 m NAP) voor de variant met  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  zoetwateraanvoer via de Volkeraksluizen, doorlaatmiddelen in de Philipsdam (80% bijdrage aan uitwisseling) en de Oesterdam (20% bijdrage) en  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  afvoer via de Bathse spuisluis naar de Westerschelde. De afvoer van de Brabantse rivieren Dintel en Vliet is variabel.

De locaties van de tijdseries zijn aangegeven in Figuur 3.8. Bij de Volkeraksluizen is de waterkolom permanent gestratificeerd, waarbij stratificatie kan oplopen tot meer dan 20 psu (11 g/l chloride) (Figuur 3.5 locatie VTSO-01). Het minimale stratificatieniveau is ongeveer 7 psu (4 g/l chloride). De mate van saliniteitsstratificatie is iets minder, maar nog ongeveer gelijk nabij Dintelmonding (locatie VTSO-04). Verder naar het westen neemt de mate en duur van saliniteitsstratificatie af. Bij Steenbergen piekt saliniteitsstratificatie tot 15 psu (8 g/l chloride) en heeft een minimaal niveau van 5 psu (3 g/l chloride). De stratificatie in de Eendracht (locatie Vossemeer) en het Zoommeer is beperkt tot pieken van brakker water die in een laag van enkele meters dik in de modelresultaten zichtbaar is.









Figuur 3.5 Tijdsreeën en cumulatieve verdeling van saliniteit op enkele locaties in het Volkerak-Zoommeer. Diepteklasse (5) = circa NAP -1,25 m, (10) = circa NAP -3,75 m, (15) = circa NAP -6,25 m en (20) = circa NAP -8,75 m





### 3.4 3D waterkwaliteit en primaire productie modellering

#### 3.4.1 Modelopzet

Het 3D waterkwaliteitsmodel is een toepassing van DELWAQ en maakt gebruik van de resultaten van het 3D hydrodynamisch model. Dezelfde horizontale roosterresolutie is gebruikt met uitzondering van aggregatie van enkele segmenten bij de Bathse spuisluis om lokale instabiliteit te voorkomen. In de verticaal zijn de bovenste vier lagen samengenomen om droogvallende lagen – die in het model numerieke problemen kunnen veroorzaken – te voorkomen. Het samennemen van deze lagen heeft geen gevolgen voor de modeluitkomst.

De keuze van toestandsvariabelen (Tabel 3.1), waterkwaliteitsprocessen en parameters is overgenomen uit Deltares (2009), waarin een verbinding tussen het Volkerak-Zoommeer en het Grevelingenmeer is onderzocht.

Tabel 3.1 Geselecteerde toestandsvariabelen in het (zoute) Volkerak-Zoommeer model

	Volkerak-Zoommeer
Fysische grootheden	Saliniteit
Anorganisch zwevend stof (in waterkolom en sediment)	–
Zuurstof	Opgelost zuurstof
Nutriënten (anorganisch)	$\text{NO}_3^-$ , $\text{NH}_4^+$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , Si
Organisch materiaal (in waterkolom en sediment)	Detritus C, N, P, Si
Algen	Dinoflagellaten (zout) Diatomeeën (zout) Flagellaten (zout) Groenalgen (zoet) Microcystis (zoet)

De instromende en uitstromende debieten zijn overgenomen uit het hydrodynamisch model (zie paragraaf 3.2). De concentraties in de instromende debieten zijn voor de Volkeraksluizen (Hollands Diep), de Dintel en de Vliet identiek aan en dus overgenomen uit het gekalibreerde 3D model voor het huidige, zoete Volkerak-Zoommeer, om precies te zijn het jaar 2012 (Deltares, 2016). Voor de instroom via de Philipsdam en de Oesterdam zijn meetwaarden van respectievelijk de MTWL-locaties Zijpe en Lodijkse Gat uit 2012 gebruikt (<http://waterinfo.rws.nl>).

De initiële conditie is bereikt door het model een jaarberekening te laten uitvoeren om in te spelen en het eindresultaat te gebruiken als herstart te gebruiken.

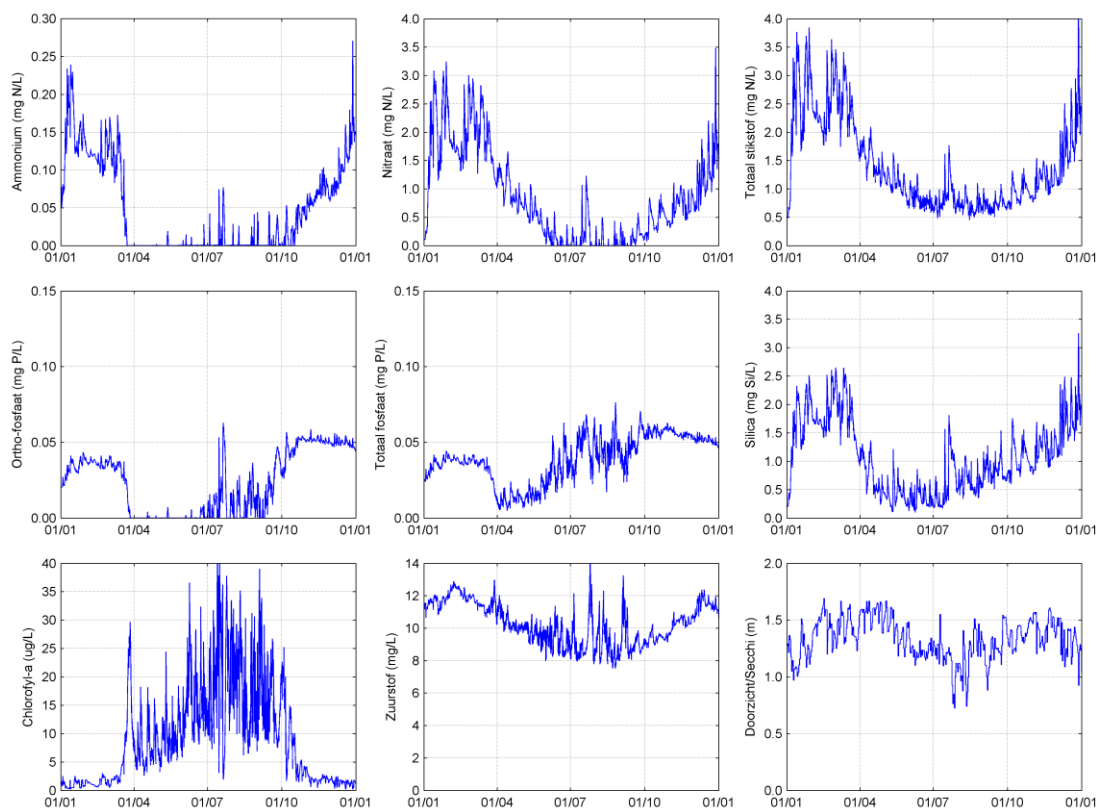
#### 3.4.2 Modelresultaten

Figuur 3.6 presenteert de berekende concentraties in de oppervlaktelaag op MWTL-locatie Steenberg; Figuur 3.7 op MWTL-locatie Oesterdam. We geven hier puntsgewijs kort de kenmerken:

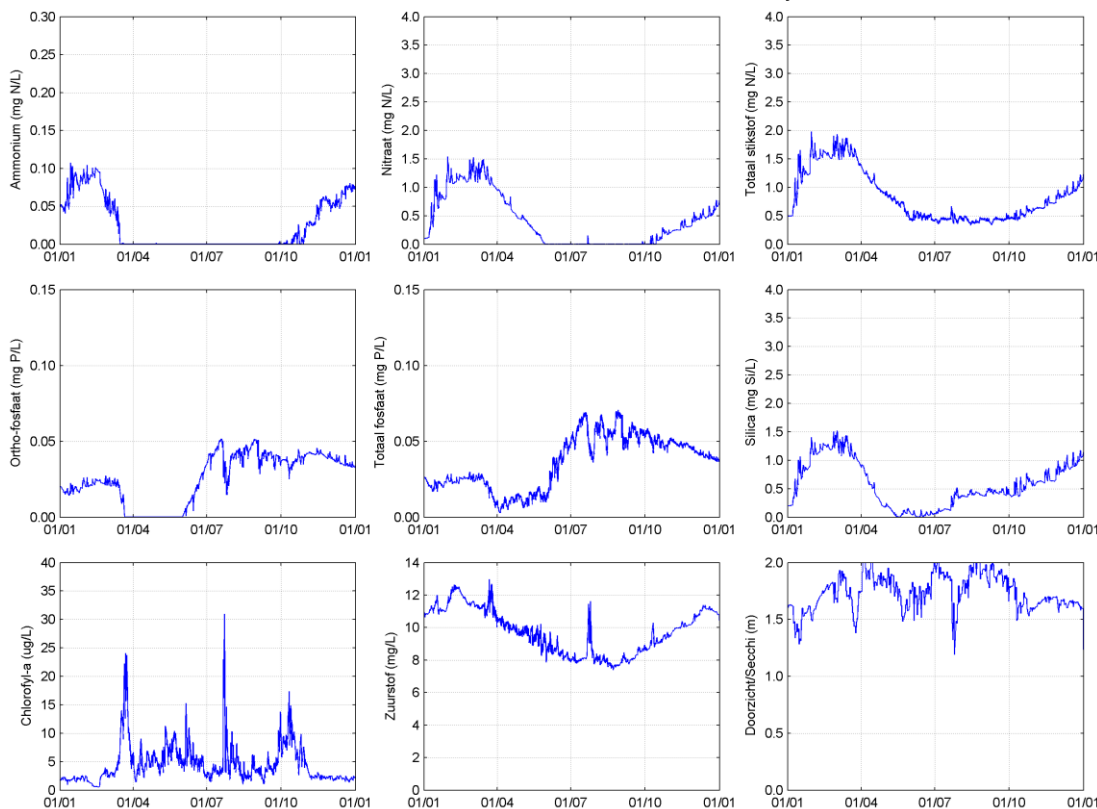
- De seizoenspatronen zijn gebruikelijk voor de Nederlandse wateren: Nutriëntenconcentraties zijn het hoogst in de winter en nemen af in het voorjaar en zomer. De chlorofylconcentratie neemt toe in het voorjaar en zakt in het najaar weer terug naar het winterniveau. De zuurstofconcentratie in de oppervlaktelaag reflecteert de temperatuurafhankelijke verzadigingswaarde (hoger in het koudere winterwater en lager in het warmere zomerwater) met daarbij enkele pieken veroorzaakt door

algenbloei. In de oppervlaktelaag treedt geen zuurstofuitputting op. Het doorzicht is relatief constant door het jaar heen.

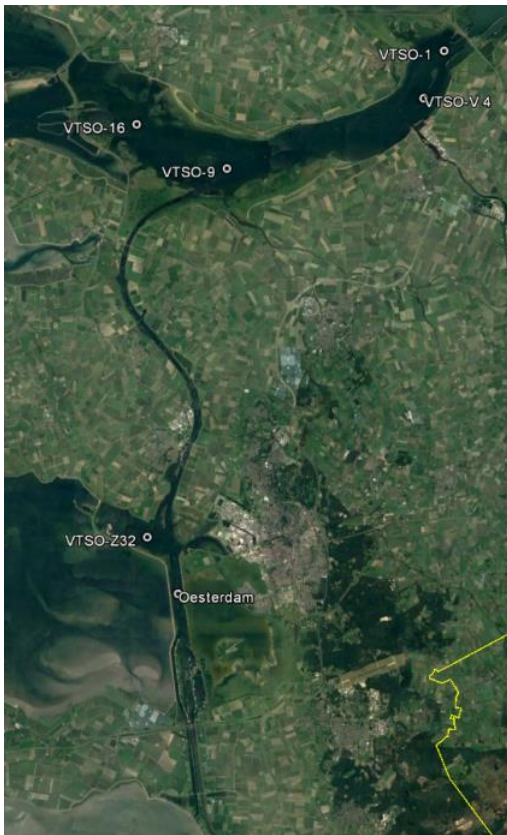
- Het model laat zowel in Steenbergen als in Oesterdam zien dat nutriëntlimitatie optreedt. In het voorjaar treedt fosfaatlimitatie op die in rond juni/juli omslaat naar stikstoflimitatie.
- De concentraties in Steenbergen zijn hoger en meer variabel dan in Oesterdam. Bijvoorbeeld de chlorofylconcentratie in Steenbergen in de zomer is gemiddeld zo'n 20 µg/l, terwijl in Oesterdam het gemiddelde tussen 5 en 10 µg/l ligt.



Figuur 3.6 Gemodelleerde stoffenconcentraties in de oppervlaktelaag bij het MWTL-meetpunt **Steenbergen** voor variant 10: debiet Volkeraksluizen 25 m<sup>3</sup>/s en Philipsdam 80% / Oesterdam 20%. Van links naar rechts en van boven naar onder: NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, Totaal N, PO<sub>4</sub>, Totaal P, Si, chlorofyl-a, O<sub>2</sub> en Doorzicht.



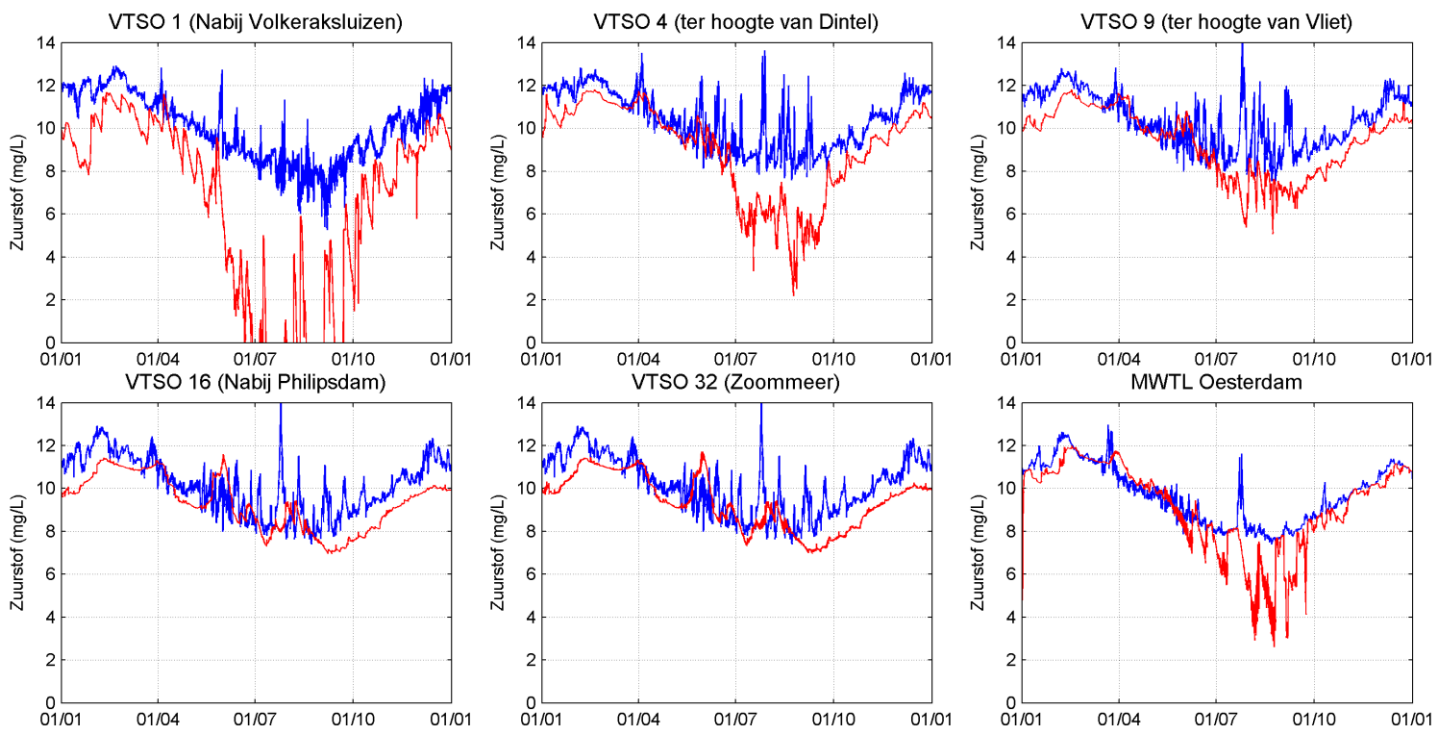
Figuur 3.7 Gemodelleerde stoffenconcentraties in de oppervlaktelaag bij het MWTL-meetpunt **Oesterdam** voor variant 10: debiet Volkeraksluizen 25 m<sup>3</sup>/s en Philipsdam 80% / Oesterdam 20%. Van links naar rechts en van boven naar onder: NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, Totaal N, PO<sub>4</sub>, Totaal P, Si, chlorofyl-a, O<sub>2</sub> en Doorzicht.



De berekende zuurstofconcentratie in de oppervlaktelaag en nabij de bodem is getoond voor een aantal locaties verspreid over het Volkerak-Zoommeer in Figuur 3.9. Gaande van oost naar west blijkt dat nabij de Volkeraksluizen (VTSO 1) in de onderlaag zuurstofloze condities voorkomen die tot enkele weken aanhouden. De zuurstofloze zone strekt zich relatief beperkt uit. Ter hoogte van de Dintel (VTSO 4) is er nog wel een duidelijke zuurstofverlaging in de onderlaag tot circa 5 mg/l met een kortdurende verlaging tot 3 mg/l, maar geen zuurstofuitputting. Verder richting het westen ter hoogte van de Vliet en bij de Philipsdam is nog slechts een verlaging van circa 1 mg/l ten opzichte van de oppervlaktelaag te zien.

In het Zoommeer (VTSO 32) wordt evenmin een substantiële zuurstofverlaging berekend. Richting de Bathse spuisluis worden op MWTL-locatie Oesterdam wel kortdurende verlagingen tot circa 4 mg/l berekend.

*Figuur 3.8 Locaties waarop de gemodelleerde concentraties wordt getoond in Figuur 3.9. 'VTSO' verwijst naar de RWS-monitoring van verticale profielen van saliniteit/chloride, temperatuur en zuurstof.*



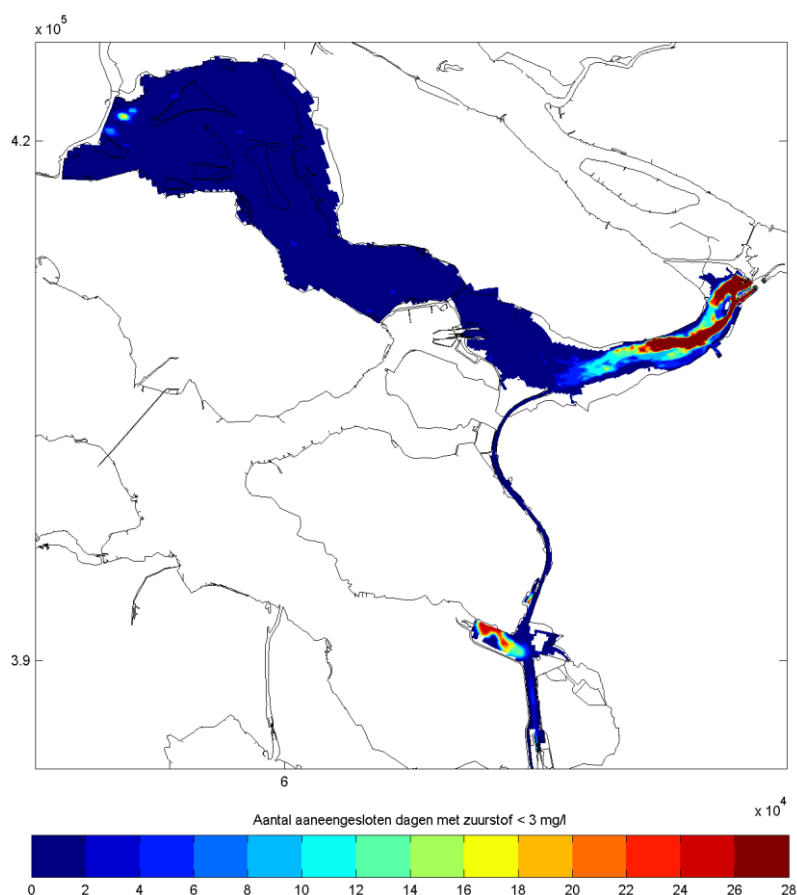
*Figuur 3.9 Gemodelleerde zuurstofconcentratie in de oppervlaktelaag (blauw) en nabij de bodem (rood) op een zestal locaties in het Volkerak-Zoommeer voor variant 10: debiet Volkeraksluizen 25 m<sup>3</sup>/s en Philipsdam 80% / Oesterdam 20%.*

### 3.4.3 Discussie en beoordeling van modelresultaten

#### Zuurstofconcentratie

De modelresultaten laten het verwachte systeemgedrag zien. Op hoofdlijnen zijn de resultaten consistent met eerdere 'zoute' modelstudies van WL | Delft Hydraulics (2006) en Deltares (2009). Een zoute variant in WL | Delft Hydraulics (2006) heeft het daggemiddeld ingelaten debiet door de Philipsdam van 269 m<sup>3</sup>/s en een uitlaat via de Oesterdam gelijk aan de instroom bij de Volkeraksluizen (30 m<sup>3</sup>/s of 50 m<sup>3</sup>/s). In Deltares (2009) is een variant doorgerekend die vergelijkbaar is met de voorkeursvariant van de Rijksstructuurvisie (dat wil zeggen 30 cm getij en 50 m<sup>3</sup>/s doorspoeling naar Westerschelde). In deze variant werd het zoute water echter via een verbinding met het Grevelingenmeer in- en uitgelaten.

Alleen in Deltares (2009) worden resultaten gepresenteerd voor de zuurstofconcentratie nabij de bodem (Figuur 3.10). Deze vorige berekening laat een zuurstofloos areaal zien dat zich tot enkele kilometers ten westen van de Dintelmonding uitstrekt. Dit areaal is in de nieuw berekende variant aanzienlijk kleiner en komt daarin niet tot de Dintelmonding (VTSO 4 in Figuur 3.9).



Figuur 3.10 Resultaat van andere modelberekening (Figuur 3.9 in Deltares, 2009): Periode van aaneengesloten dagen met een zuurstofconcentratie in de onderlaag van minder dan 3 mg/l in een vorige variant met een verbonden Grevelingenmeer en Volkerak-Zoommeer

Er zijn meerdere factoren die een rol kunnen spelen bij dit verschil:

- De berekende varianten zijn niet gelijk. Hoewel in beide gevallen het getij in het Volkerak-Zoommeer 30 cm is, wordt in de nieuwe variant de Oesterdam ook gebruikt om zout water in te laten. De afvoer naar de Westerschelde is in de nieuw berekende variant veel kleiner dan in de oude variant (daggemiddeld  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  vs.  $90 \text{ m}^3/\text{s}$ ).
- Het aantal verticale lagen in de modelopzet is niet gelijk. De oude berekening heeft 9 lagen in het Volkerak-Zoommeer, de nieuwe berekening heeft 49 lagen.
- De modellen rekenen niet hetzelfde jaar door (respectievelijk 2008 en 2012), waardoor er verschillen in meteorologische condities en nutriëntenbelasting zijn.

De reden voor de verschillende modelresultaten is niet onderzocht in dit onderzoek. Een gevoeligheidsstudie waarin factoren een voor een worden gevarieerd kan inzicht geven.

#### *Effect van de Oesterdam en minder doorspoeling naar de Westerschelde*

In dit onderzoek is een variant doorgerekend waarin 20% van de zoutwateraanvoer via de Oesterdam verloopt en waarin de afvoer naar de Westerschelde is beperkt tot  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  (ten opzichte van gemiddeld  $90 \text{ m}^3/\text{s}$  in de voorkeursvariant van de Rijksstructuurvisie). Het lijkt erop dat met deze vorm van waterbeheer het Zoommeer en het Krammer-Volkerak ieder een eigen karakter krijgen. De concentraties van stoffen en van algen zijn duidelijk verschillend tussen beide delen: Het Zoommeer heeft lagere concentraties dan het Krammer-Volkerak. Dit verschil is in vorige studies en andere varianten afwezig of veel kleiner. De veel kleinere netto doorspoeling van daggemiddeld  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  in plaats van daggemiddeld  $90 \text{ m}^3/\text{s}$  betekent dat de wateruitwisseling tussen het Zoommeer en het Krammer-Volkerak veel kleiner is in deze jaarberekening dan in de voorkeursvariant. De directe verbinding van het Zoommeer met de Oosterschelde via de Oesterdam en de beperkte doorspoeling, zorgt ervoor dat het Zoommeer qua waterkwaliteit sterk op de Oosterschelde gaat lijken. Dit kan positief als worden beoordeeld.

Het Krammer-Volkerak omvat circa 75% van het totale wateroppervlak van het Volkerak-Zoommeer en de Eendracht-Zoommeer 25% (respectievelijk 4200 ha en 1400 ha). Dat betekent dat in de berekende variant de dimensionering van de doorlaten in de Philipsdam (80%) en in de Oesterdam (20%) vrij goed past bij het achterliggende wateroppervlak. Door deze dimensionering en aansturing kunnen Krammer-Volkerak en Zoommeer tot op zekere hoogte een eigen aansturing en karakter krijgen, wat mogelijkheden zou kunnen bieden voor planvorming. In hoeverre dat daadwerkelijk beheersbaar is door waterbeheer dient verder uitgezocht te worden.

#### *Nutriëntendynamiek en begrazing*

De modelberekening geeft aan dat het zoute Volkerak-Zoommeer een nutriënt gelimiteerd systeem voor algenbloei zal worden. Dit is consistent met eerdere modelberekeningen en consistent met de huidige situatie in het Grevelingenmeer. De huidige Oosterschelde is niet nutriënt gelimiteerd, omdat graasdruk door schelpdieren daar de limiterende factor is. Deze vergelijking met huidige watersystemen geeft aan dat de ontwikkeling van begrazing een belangrijke factor is voor de ontwikkeling van de waterkwaliteit en in bijzonder de algenconcentratie.

Volgens het model zou in het voorjaar fosfaatlimitatie optreden en vanaf juni/juli stikstoflimitatie. Het modelresultaat voor fosfaat moet voorzichtig geïnterpreteerd worden, omdat de wijze waarop de fosfaatuitwisseling met het sediment op een zeer eenvoudige wijze – namelijk via een opgelegde flux – is meegenomen.

In een studie naar het Grevelingenmeer heeft Deltares (2016b) ook geïdentificeerd dat de autonome ontwikkeling van fosfaat in de Nederlandse wateren niet bekend is. In de meeste deltawateren is een dalende trend geconstateerd (bijvoorbeeld in Deltares (2015)), maar er zijn geen voorspellingen bekend van hoe de fosfaathuishouding in de deltawateren zich over de komende jaren tot decennia ontwikkelt (Deltares, 2016b).

#### *Oordeel en onzekerheden*

Wij beoordelen dat het modelresultaat een aannemelijk beeld geeft van de verwachte waterkwaliteit in een zout Volkerak-Zoommeer. De gemodelleerde seizoenspatronen zijn consistent met gemeten en gemodelleerde patronen in andere deltawateren en zijn consistent met eerdere modelberekeningen voor het Volkerak-Zoommeer.

Om het model in te zetten voor vervolgstudie naar (optimalisatie van) varianten en/of naar inzicht in het systeemgedrag van een zout Volkerak-Zoommeer, is het nodig om enkele onzekerheden te verkleinen of om het inzicht in de onzekerheden te vergroten om vervolgens in de beoordeling beter mee om te kunnen gaan. Denk bijvoorbeeld aan het kwantificeren van bandbreedtes. De volgende onderwerpen dienen in een vervolg aandacht te krijgen:

- Verklaring van het kleinere zuurstofloze areaal in de nieuwe modelberekening ten opzichte van de eerdere studie.
- Wijze waarop fosfaatuitwisseling met het sediment wordt gemodelleerd.
- Wijze waarop grazers worden gemodelleerd, zodat het effect van grazers meegenomen kan worden in bandbreedteonderzoek.
- Modelleren van meerdere jaren, zodat een grotere variatie van meteorologische condities en aanvoer van de Brabantse rivieren meegenomen wordt.





## 4 Ecologische evaluatie van de zoet-zoutgradiënt (WMR)



Onderstaande ecologische evaluatie is met permissie overgenomen uit de parallelle studie van WMR (2017) naar de ecologie van zoet-zout overgangen.

### Ecologie van zoet-zout overgangen in deltagebieden

Literatuurstudie en beoordeling van een scenario in het Volkerak-Zoommeer

Auteurs: Marijn Tangelder, Erwin Winter en Tom Ysebaert

Wageningen University & Research rapport C116/17



Vanuit ecologisch perspectief is het interessant om de resultaten van de jaarsommodellering te vergelijken met de ecologische aspecten van een natuurlijke zoet-zout overgang. Meest interessante abiotische aspecten in relatie tot de ecologische betekenis van de zoet-zout overgang:

- Zoutdynamiek: horizontale en verticale gradiënt in ruimte en tijd

Meenemen in een eventueel vervolg (niet in deze studie):

- Nutriëntendynamiek: aanvoer van N, P en organisch materiaal en relatie doorzicht / PP
- Waterdynamiek: stroomsnelheden (hoog/laag dynamisch), waterstandfluctuaties (intergetijdengebieden? Schor vegetatie?)
- Sediment dynamiek: potentie opslibben intergetijden gebieden

### Zoutdynamiek

#### Horizontale gradiënt

Uit de resultaten is op te maken dat er sprake is van een brak-zout gradiënt vanaf de Volkeraksluizen richting de Philipsdam en de Eendracht en Zoommeer. Er is sprake van een mesohaliene zone (5-18psu) van 0-2000 ha ten opzichte van een polyhaliene zone (18-30psu) van 3000-5000 ha. Bij hoge rivierafvoer kan tijdelijk een oligohaliene zone optreden waarbij het zoutgehalte van de waterlaag aan de oppervlakte beneden 5 psu daalt ter plaatse van de monding van de Dintel en de Volkeraksluizen.

### Verticale gradiënt

De rivierafvoer van voornamelijk de Dintel beïnvloedt de verticale gradiënt (Figuur 3.2). Bij hoge afvoeren, zoals in januari/februari met circa  $80\text{m}^3/\text{s}$ , zorgen voor het verzoeten van de oppervlakte laag. Dit effect is tot in het Zoommeer merkbaar. Afhankelijk van de rivierdynamiek van de Dintel (en verdamping in de zomer) is de zoet-zout gradiënt over het algemeen te omschrijven als een gedeeltelijk gemengd systeemtype. Het verschil in saliniteit is het grootst in het Volkerak en neemt af richting de Eendracht en het Zoommeer.

Verwachting ontwikkeling soortengroepen:

- Macrobenthos van zacht substraat: voorkomen van mariene soorten in het Zoommeer, Eendracht en zuidelijk Krammer-Volkerak tot meer euryhalie mariene soorten (brede zouttolerantie) in de brakke zone in het noordelijk deel van het Krammer-Volkerak. Omdat de saliniteit op de bodem in het noordelijk deel gedurende het hele jaar (op één hoogafvoer situatie na) rond de 25 psu ligt is de verwachting dat hier ook mariene soorten voor zullen komen. Het systeem zal qua soorten samenstelling meer op de Oosterschelde gaan lijken. De verwachting is dat stroomsnelheden beperkt zijn ( $<0,8\text{m/s}$ ) en dat zich overwegend laagdynamische gemeenschappen zullen ontwikkelen. Lokaal kunnen zich hoog-dynamische gemeenschappen ontwikkelen daar waar het harder stroomt, bijvoorbeeld nabij een doorlaat.
- Macrobenthos en wieren van hard substraat: de verharde dijktafstanden en oeververdedigingen zullen gebroeid raken met zoutminnende wieren soorten in het eulittoraal en met epifauna soorten variërend van gemeenschappen mogelijk met Japanse oesters (*Crassostrea gigas*) als structuurvormend organisme zoals ook in het Grevelingenmeer, Oosterschelde en Westerschelde het geval is.
- Vissen: voorkomen van estuariene residente soorten (bv. puitaal, brakwatergrondel, botervis, zeedonderpad) en ook marine juveniele soorten zoals haring, sprat, schol, tong, bot en zeebaars en seizoensgasten als harders. De betekenis van deze zone voor diadrome vissoorten is vanwege de beperkte kennis (potentieel voorkomen diadrome soorten, migratieroutes etc.) nog lastig in te schatten en hangt uiteraard ook af van de vispasseerbaarheid van de kunstwerken, maar zal zeker voor soorten die lokaal zowel paai als opgroeigebieden beschikbaar hebben zoals driedoornige stekelbaars en spiering een veel gunstigere situatie vormen dan de huidige. Wellicht dat er ook herkolonisatie door rivierprik van de West-Brabantse beken kan plaatsvinden, mits hier ook paaisubstraat (grind of stenen) in aanwezig is. Het belang van een geleidelijke zoet-zout overgang als acclimatisatie zone voor diadrome vissoorten lijkt weliswaar relatief beperkt op basis van bronnen onderzoek dat is uitgevoerd voor de vismigratie rivier (Winter, Briffioen *et al.* 2014), maar gezien de schaarste aan estuariene habitats in de huidige situatie in de Rijn-Maas-delta zal het Volkerak hierin een goede aanvullende rol kunnen spelen, waarbij een deel van de trekvispopulaties die de Maas en Rijn gebruiken ook het Volkerak kunnen benutten als opgroei habitat, voor bijvoorbeeld soorten als elft, zeeforel, houting en op termijn wellicht ook juveniele steur. In welke mate het Volkerak gebruikt zal worden door Rijn-Maas populaties is afhankelijk van het gevoerde waterbeheer en de 'aantrekkelijkheid' en vindbaarheid van het Volkerak tijdens zowel stroomopwaartse als stroomafwaartse migraties en dispersie. Dit is lastig op voorhand in te schatten, maar het Volkerak met een zoet-zout gradiënt kan een zeer waardevolle aanvulling zijn voor de delta, omdat dit nu grotendeels ontbreekt. In de Zuidwestelijke delta is deze dynamiek alleen nog aanwezig in de Westerschelde. Voor fint is waarschijnlijk grootschaliger herstel van estuariene dynamiek nodig om deze paai- en

opgroeimogelijkheden te geven dan in het Volkerak kan worden gerealiseerd. Zeker ook omdat er in het Haringvliet met een kier-beheer nog regelmatig langere perioden met een harde zoet-zout overgang zullen plaatsvinden en de continuïteit van een geleidelijke zoet-zout overgang hier maar een deel van de tijd aanwezig is (Griffioen et al. 2017).

- Vogels: visetende vogels zoals bijvoorbeeld aalscholver (*Phalacrocorax carbo*), middelste zaagbek (*Mergus serrator*) en fuut (*Podiceps cristatus*) zullen profiteren van de toename in estuariene en marine vissoorten. Daarnaast zullen vogels ook profiteren van het ontstaan van intergetijdengebieden en potentieel foerageer gebied. Omdat de focus van dit rapport ligt op zoet-zout overgangen is dit aspect verder niet beoordeeld.
- Zeegras: de ontwikkeling van zeegrasvelden is van veel verschillende factoren afhankelijk zoals lokale hydrodynamiek, aanwezigheid van zaden, etc. Het is daarom lastig om hier een uitspraak over te doen. Echter in het scenario van een zout Volkerak-Zoommeer met beperkte getijdedynamiek en zoetwaterinvloed ontstaat in potentie geschikte ondiepe delen waar zeegras tot ontwikkeling zou kunnen komen.
- Schorren: vanwege de beperkte getijslag van 30 centimeter in het scenario is de verwachting dat er geen volwaardige schorren tot ontwikkeling kunnen komen met een krekensysteem en bijbehorende transportprocessen. Wel zal onder invloed van het zoute water de oevers geleidelijk verzilten en zich mogelijk een zilte pionier vegetatie ontwikkelen met o.a. zeekraal (*Salicornia europaea*).

#### Andere aspecten:

- Toename areaal brakwater habitat en intergetijdengebied
- Toename diversiteit habitats
- Kraam- en kinderkamerfunctie
- Beperken/stoppen blauwalgen en goede zuurstofcondities op de bodem voor ontwikkeling macrobenthos



## 5 Conclusies

### 5.1 Afsluitende samenvatting en opmerkingen

Dit rapport heeft onderzocht hoe en welke zoet-zoutgradiënten in het Volkerak-Zoommeer zijn te realiseren met als enige randvoorwaarde de realisatie van 30 cm getij rondom een middelpil van NAP -0,10 m. Hiervoor is eerst een aantal steady-state berekeningen uitgevoerd, waarbij een regelmatig 30 cm getij gecombineerd is met verschillende constante zoetwateraanvoeren via de Volkeraksluizen en van de Dintel. Het getij wordt gerealiseerd door een doorlaat in de Philipsdam naar de Oosterschelde (Zijpe) al dan niet in combinatie met een doorlaat in de Oesterdam naar de Oosterschelde (Kom).

De steady-state berekeningen laten zien dat een grote zoetwateraanvoer van gezamenlijk 100 m<sup>3</sup>/s of meer zorgt voor een saliniteit in de oppervlaktelaag in het Krammer-Volkerak lager dan 10 psu (chlorideconcentratie lager dan 5 g/l), wat een risico voor het niet oplossen van blauwalgenbloei inhoudt. Daarvoor wordt een ondergrens van 20 psu saliniteit (chloride 11 g/l) als vuistregel aangehouden. Ook treedt sterke stratificatie op, wat een risico op zuurstofloosheid inhoudt. Geconcludeerd moet worden dat 30 cm getij onvoldoende getijdynamiek levert om voldoende menging van een groot zoetwaterdebiet te realiseren. Ook bij grote zoetwateraanvoer wordt bij de Volkeraksluizen nog geen substantiële oligohaliene (brakke) zone gevormd. Creëren van dit in de zuidwestelijke delta zeldzame habitat zou een positieve reden zijn voor een grote zoetwateraanvoer. In de mondingen van Dintel en Vliet ontstaan wel kleine oligohaliene zones. De modelresolutie is te grof om die arealen precies te kwantificeren, maar verwacht wordt dat het gaat om enkele tientallen hectares.

Op basis van de steady-stateberekeningen is daarom geconcludeerd dat een zoetwateraanvoer conform de voorkeursvariant in de Rijksstructuurvisie (25 m<sup>3</sup>/s via de Volkeraksluizen) het meest voldoet aan de verwachte en gewenste waterkwaliteit. Door het operationeel beheer te optimaliseren om bijvoorbeeld bepaalde seizoenspatronen te creëren, is wellicht ecologische winst te behalen. Dit is niet onderzocht in dit rapport. De verwachting is dat het optimalisatie lokaal effect kan hebben, maar niet wezenlijk de grootschalige kenmerken van het Volkerak-Zoommeer zal veranderen.

De modelberekening van een volledig jaar (condities 2012) met een doorlaat in de Philipsdam en een doorlaat in de Oesterdam in de verhouding 80%:20% laat vervolgens zien dat de zoet-zoutgradiënt door het jaar heen variabel is afhankelijk van de aanvoer van de Brabantse rivieren. De gemiddelde saliniteit in de oppervlaktelaag in het Krammer-Volkerak gaat van 15 psu (8 g/l chloride) bij de Volkeraksluizen tot 22 psu (12 g/l chloride) bij de Philipsdam en 25 psu (14 g/l chloride) in het Zoommeer. De onderlaag onder circa -8 m NAP in het Krammer-Volkerak heeft een vrijwel stabiel hogere saliniteit en er is sprake van een continue stratificatie. De brakkere bovenlaag is enkele meters dik. De berekende gemiddelde chlorideconcentratie in de oppervlaktelaag is lager dan de alom gehanteerde vuistregel voor het voorkomen van blauwalgen ligt (11 g/l chloride). Dat het waterkwaliteitsmodel geen blauwalgen berekent, wordt niet als sluitend bewijs gezien. Er zijn veel factoren die in beperkte mate met dit model voor deze situatie zijn onderzocht. Een nadere beschouwing is gewenst.

De permanente stratificatie leidt in de modelberekening niet tot uitputting van zuurstof in de onderlaag behalve vlakbij de Volkeraksluizen, doordat het zuurstofrijke water vanaf de doorlaat in de Philipsdam via de diepere geul instroomt en zodoende ververst. In de looptijd

van west naar oost neemt de zuurstofconcentratie wel af, maar de berekende zuurstofconcentratie komt vrijwel nergens langdurig onder 3 mg/l. Dit modelresultaat is afwijkend van een enigszins vergelijkbare variant (Deltares, 2009) waarin een langdurig zuurstofloos areaal in de geul tot enkele kilometers ten westen van de Dintelmonding werd berekend. Meerdere factoren kunnen een rol spelen bij dit verschil, onder andere het niet overeenkomen van de variant (dat wil zeggen een ander waterbeheer). Bij een vervolg (model)studie is het aan te bevelen om een verklaring te vinden voor het verschil.

Wat betreft berekende nutriënten- en algenconcentratie is de modelberekening consistent met eerdere modelstudies. Omdat de dimensionering van de doorlaatmiddelen aansluit bij de achterliggende komberging (Krammer-Volkerak 75% en Zoommeer 25% van het totale Volkerak-Zoommeer) en omdat de doorspoeling naar de Westerschelde met 10 m<sup>3</sup>/s minimaal is, lijken het Krammer-Volkerak en het Zoommeer onderling slechts een beperkte wateruitwisseling te hebben. De waterkwaliteit in het Zoommeer verschilt daardoor van de waterkwaliteit in het Krammer-Volkerak: de concentraties zijn substantieel lager tot wel 50% voor chlorofyl-a. Dit verschillend karakter is zo ver bekend in vorige modelstudies niet voorgekomen, omdat daarin een doorspoeling van 90 m<sup>3</sup>/s naar de Westerschelde is aangenomen met daardoor een veel grotere wateruitwisseling van Krammer-Volkerak naar Zoommeer.

## 5.2 Beantwoording kennisvragen

In deze paragraaf reflecteren we op de kennisvragen uit §1.2. We geven aan of en hoeverre de kennisvragen beantwoord zijn in dit rapport.

1. Wat zijn mogelijkheden om met inzet van waterbeheermaatregelen het zoute voorkeursalternatief uit de Rijkstructuurvisie Grevelingen-Volkerak-Zoommeer te optimaliseren, zodanig dat de ecologische kwaliteit gemaximaliseerd wordt?

Voor optimalisatie werd het creëren van een volledige zout-zoutgradiënt – dus van zoet en oligohalien naar meso- en polyhalien – als ecologisch maximale kwaliteit gezien. Dit rapport laat zien dat het areaal zoet en oligohalien niet gerealiseerd kan worden, ook niet bij grote zoetwateraanvoer, bij de Volkeraksluizen. In de mondingen van Dintel en Vliet kunnen wellicht hooguit enkele tientallen hectares gerealiseerd worden. Voor het creëren van volledige zoet-zoutgradiënten zijn dus geen waterbeheermaatregelen met de bestaande kunstwerken mogelijk.

Waterbeheermaatregelen lijken wel in staat om het Krammer-Volkerak en het Zoommeer een verschillend karakter te geven door de onderlinge wateruitwisseling via de Eendracht te minimaliseren. De doorvertaling naar ecologische kwaliteit vraagt een uitgebreidere afweging dan in dit rapport mogelijk is geweest.

2. Hoe kan het spuibeheer van de Volkerakspuisluizen worden gekoppeld aan de Lobith afvoer om een dynamische zoet-zout gradiënt te bereiken?

Omdat deze zoetwateraanvoer van 25 m<sup>3</sup>/s in de Rijkstructuurvisie als minimaal noodzakelijke aanvoer wordt gezien om de zoutlast via de Volkeraksluizen naar het Hollands Diep te beperken en dus onafhankelijk van de Lobith aanvoer gerealiseerd zou moeten worden, is in dit rapport deze kennisvraag niet nader onderzocht.

3. Hoe ontwikkelt de zoet-zoutgradiënt zich bij verschillende aanvoeren via de Volkeraksluizen?

Dit rapport heeft veel inzicht verschaft voor deze kennisvraag. De steady-state berekeningen en de jaarberekening hebben veel informatie opgeleverd over de horizontale en verticale zoet-zoutgradiënt. We verwijzen naar de vorige paragraaf voor de beantwoording van deze kennisvraag.

4. Wat is een minimaal zoetwaterdebiet door de Volkeraksluizen om een zoet-zout gradiënt te handhaven bij een lage rivierafvoer?

Omdat er geen volledige zoet-zoutgradiënt gecreëerd kan worden bij de Volkeraksluizen, is afleiding van een minimaal debiet niet van toepassing. Het minimale zoetwaterdebiet door de Volkeraksluizen wordt bepaald door de beperking van de zoutlast naar het Hollands Diep.

5. Wat is het verschil tussen nieuwe varianten en het voorkeursalternatief in termen van effectiviteit (waterkwaliteitsverbetering) en uitwisseling met aangrenzende wateren (Oosterschelde en Westerschelde)?

Het effect op de Oosterschelde en de Westerschelde is in de modellering niet meegenomen. Voor de Westerschelde wordt een groot zoutwaterdebiet van 90 m<sup>3</sup>/s als onwenselijk beoordeeld, gezien het effect op de zoet-zoutgradiënt van de Westerschelde en de mogelijke invloed op havenaanslibbing (Deltares, 2014). De variant die in dit rapport naar voren komt, heeft een zoutwaterdebiet van 10 m<sup>3</sup>/s naar de Westerschelde. Het effect van de zoutlast op de Westerschelde zal logischerwijs veel minder zijn. De nutriëntenaanvoer zal ook minder zijn. Hoewel primaire productie in de Westerschelde voornamelijk licht gelimiteerd is, is het lastig om te beoordelen of deze lagere nutriëntenaanvoer enig effect zal hebben.

Het effect op de Oosterschelde onderscheidt zich in het effect op het Zijpe en op de Kom van de Oosterschelde. Omdat er weinig doorspoeling is tussen Krammer-Volkerak en Zoommeer is te verwachten dat de Kom en het Zoommeer op elkaar gaan lijken. Door uitwisseling met het Zoommeer ontstaat meer dynamiek en (door)stroming in de anders doodlopende Kom. Dit kan gunstig zijn voor de Kom. De Kom is slibrijk waardoor via de doorlaat in de Oesterdam slib in het Zoommeer gebracht kan worden met gevolgen voor doorzicht en zuurstofvraag. Dit is niet in het model opgenomen en verdient aandacht. Tenslotte zal de extra nutriëntenaanvoer naar de Kom beperkt zijn, omdat aanvoer vanuit Hollands Diep en Brabantse rivieren voornamelijk via de Philipsdam zal worden afgevoerd naar het Zijpe.

Op het Zijpe zal via de Philipsdam de zoet-zoutgradiënt zich op de Oosterschelde doorzetten; er is meer een continuüm in plaats van de huidige harde zoet-zoutgrens. Er zal enige stratificatie kunnen ontstaan, maar omdat het saliniteitsverschil tussen Zijpe en Krammer beperkt is en omdat er door de doorlaat stroming en menging ontstaat, wordt verwacht dat stratificatie beperkt is en het effect op zuurstof eveneens. Een 3D modelberekening kan hier uitsluitsel over geven. Qua nutriëntenaanvoer wordt geen groot effect verwacht. Het enige verschil met de huidige situatie is dat de grote aanvoer via de Volkeraksluizen naar verwachting grotendeels via de doorlaat in de Philipsdam zal gaan. Zolang er geen nutriëntlimitatie in het Zijpe is, zal extra aanvoer geen effect hebben.

We constateren tenslotte dat de in dit rapport onderzochte variant met een doorlaat in de Oesterdam en lage afvoer naar de Westerschelde aspecten heeft opgeleverd, waaronder wellicht meest prominent het (positief) verschillende karakter van het Zoommeer, die een

heroverweging van de voorkeursvariant interessant maken. Of de variant 'beter' is, vraagt een uitgebreidere afweging dan in dit rapport mogelijk is.



## 6 Referenties

- Deltares, 2009: Verkenning van de waterkwaliteit en ecologische toestand bij een open verbinding tussen het Grevelingenmeer en een (zout) Volkerak-Zoommeer, auteurs A.J. Nolte en C. Spiteri, I.o.v. Rijkswaterstaat Waterdienst, Rapportnummer Z4576\_1, maart 2009.
- Deltares, 2013: Effectiviteit en effect van winterdoorspoeling van het Volkerak-Zoommeer: modelstudie en beknopte data-analyse, auteurs A.J. Nolte, B. Stengs en C.A. Schipper, I.o.v. Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, Rapportnummer 1208550, december 2013.
- Deltares, 2014: Effect zoute spui Bath op saliniteit, slibdynamica en ecologie Zeeschelde, auteurs C. Kuijper, T. van Kessel en P. Meire, I.o.v. Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, Rapportnummer 1208863, februari 2014.  
([http://publications.deltares.nl/1208863\\_000.pdf](http://publications.deltares.nl/1208863_000.pdf))
- Deltares, 2015: Waterkwaliteiten Deltawateren: datarapport N, P, Si; auteur I. de Vries, Deltares Rapport 1210859, februari 2015. ([http://publications.deltares.nl/1210859\\_000a.pdf](http://publications.deltares.nl/1210859_000a.pdf))
- Deltares, 2015b: De waterkwaliteit van een zout Volkerak-Zoommeer zonder spui naar de Westerschelde: modelmatig onderzoek, auteurs J.G.C. Smits, E.M. Meijers en M.C.H. Tiessen, Rapportnummer 1220103-003-VEB-0001, I.o.v. Rijkswaterstaat Zee en Delta, juli 2015. ([http://publications.deltares.nl/1220103\\_003.pdf](http://publications.deltares.nl/1220103_003.pdf))
- Deltares, 2016: 3D model van het Volkerak-Zoommeer voor waterkwaliteit en primaire productie: modelbeschrijving, kalibratie- en validatiedocument. Auteurs L. Kramer, H.F.J. Los, T.A. Troost, M. Genseberger, M. Tiessen en P.M.A. Boderie, I.o.v. Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, Rapportnummer 1220070-000-034, januari 2016.  
([http://publications.deltares.nl/1220070\\_000\\_0034.pdf](http://publications.deltares.nl/1220070_000_0034.pdf))
- Deltares, 2016b: Grevelingenmeer van stagnant naar beperkt getij: synthesesedocument Beschikbare kennis en resterende kennisvragen met betrekking tot het effect van introductie beperkte getijslag op het natuurlijk systeem van Grevelingenmeer en Voordelta; auteurs A.J. Nolte en O.G. Lagendijk, Rapportnummer 1230426, december 2016  
([http://publications.deltares.nl/1230426\\_000.pdf](http://publications.deltares.nl/1230426_000.pdf))
- Deltares, 2018: Data-analyse en modelvalidatie van het Volkerak-Zoommeer ecosysteem, Met focus op blauwalgen en Quaggamosselen, auteurs M.P. Weeber, L. Kramer, M. Genseberger, M.C.H. Tiessen, T.A. Troost, C.I. Eijsberg-Bak en A.J. Nolte; I.o.v. Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, Rapportnummer 11201168-000-ZKS-0012, maart 2018.
- WL | Delft Hydraulics, 2006: Resultaten scenario-berekeningen met het 2D en 3D-blauwalgenmodel voor het Volkerak, Krammer en Zoommeer: Planstudie waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer; auteurs P.M.A. Boderie, S. Groot, R.P. Hulsbergen, F.J. Los en E.M. Meijers, Rapportnummer Q4015, I.o.v. Bestuurlijk Overleg Krammer-Volkerak, december 2006.
- WMR, 2017: Ecologie van zoet-zout overgangen in deltagebieden; Literatuurstudie en beoordeling van een scenario in het Volkerak-Zoommeer in het kader van Beleidsondersteuning voor het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit; auteurs Marijn Tangelder, Erwin Winter en Tom Ysebaert, Rapportnummer BO-11-018.01-005, december 2017.