

**De waterkwaliteit van een zout
Volkerak-Zoommeer zonder
spui naar de Westerschelde**

Modelmatig onderzoek



Titel

De waterkwaliteit van een zout Volkerak-Zoommeer zonder spui naar de Westerschelde

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Zee en Delta	1220103-003	1220103-003-VEB-0001	34

Trefwoorden

Zuidwestelijke Delta, model, stofstromen, zout Volkerak-Zoommeer, Westerschelde

Samenvatting

Een modelmatige analyse is uitgevoerd met betrekking tot de waterkwaliteit van het zoute Volkerak-Zoommeer (VZM) bij de afwezigheid van het spuien van water uit het VZM bij Bath. In het eerder gedefinieerde voorkeurscenario P300 bedraagt deze spui ca. 90 m³/s. Dit hoge debiet geeft echter problemen bij lage afvoer van de Schelde, zoals blijkt uit eerder 3D model-onderzoek. Er kunnen dan onwenselijk hoge zoutgehalten in de Zeeschelde optreden. De analyse is uitgevoerd door middel van scenarioberekeningen met het 1D Sobek model voor de Zuidwestelijke Delta en met een 3D Delft3D-FLOW hydrodynamisch model voor het VZM. Het voorliggende rapport bevat een beschrijving van de aanpak van de modellering, de resultaten van de uitgevoerde scenarioberekeningen en de daaruit getrokken conclusies. De voorgenomen modellering werd maar ten dele uitgevoerd, omdat tijdens de studie bleek dat het gewenste zoutgehalte van minimaal 20 ppt in het VZM niet kan worden gerealiseerd zonder een debiet door de Bathse spuisluis van ca. 90 m³/s. Daarom werd besloten de beoogde 3D waterkwaliteitsmodellering niet uit te voeren.

De uitgevoerde scenarioberekeningen verschaffen een indicatie van de te verwachten saliniteit en stratificatie in het zoute VZM bij de uitwisseling van water tussen Oosterschelde en VZM via de Philipsdam bij niet of zo minimaal mogelijk spuien van water uit het Zoommeer.

Gebleken is dat het 1D Sobek model de zoutgehalten in het VZM onderschat door het ontbreken van stratificatie en dichtheidsstromingen. Het 3D Delft3D-FLOW model berekent aanzienlijk hogere zoutgehalten, omdat deze verschijnselen daarin wel worden gemodelleerd. Het 3D model onderschat mogelijk de zoutgehalten in het VZM ook enigszins, omdat het 1D model mogelijk iets te lage zoutgehalten in de noordelijke tak van de Oosterschelde berekent. Deze zijn een randvoorwaarde voor het 3D model.

Referenties

Requirementsformulier KPP project "Advisering beleidsondersteuning IJsselmeergebied, ZW-Delta en MIRT Eems-Dollard (2015 WR01)", maart 2015.

Offerte notitie vraagstelling, aanpak en uitvoering, versie 2, 06-03-2015: Modelonderzoek zoute Zuidwestelijke Delta zonder spui bij Bath (Deltares, Johannes Smits en Arno Nolte).

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	Juli 2015	Johannes Smits		Jos van Gils		Frank Hoozemans	
		Erwin Meijers					
		Meinard Tiessen					

Status

definitief

Inhoud

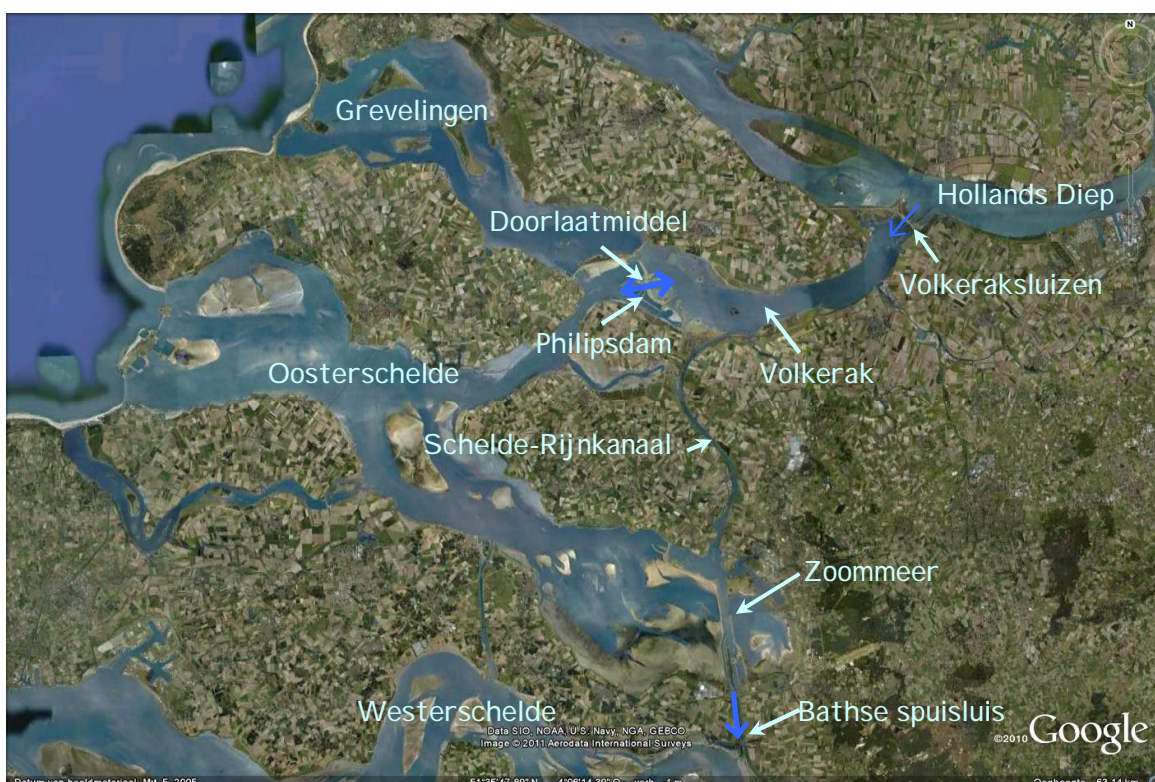
1	Inleiding en doelstelling	1
2	De vraagstelling	3
3	Aanpak van de modellering	5
3.1	Uitgangspunten	5
3.2	Gebruikte modellen en werkwijze	6
4	Berekeningsresultaten voor het scenario zonder spuien	8
4.1	Het 1D Zuidwestelijke Delta waterbewegingsmodel	8
4.1.1	Beschrijving van het model	8
4.1.2	De simulatieresultaten voor waterbalans en waterstanden	9
4.2	Het 1D Zuidwestelijke Delta waterkwaliteitsmodel	11
4.2.1	Beschrijving van het model	11
4.2.2	De simulatieresultaten voor zoutgehalten	11
4.2.3	Discussie van de modelresultaten	13
4.3	Het 3D Volkerak-Zoommeer hydrodynamische model	14
4.3.1	Beschrijving van het model	14
4.3.2	De simulatieresultaten voor waterstanden	14
4.3.3	De simulatieresultaten voor zoutgehalten	16
4.3.4	De simulatieresultaten voor temperatuur	18
4.3.5	De gesimuleerde stratificatie	20
4.3.6	Discussie van de simulatieresultaten	22
5	Berekeningsresultaten voor scenario's met spui	24
5.1	Het 1D Zuidwestelijke Delta waterbewegingsmodel	24
5.1.1	Beschrijving van het model	24
5.1.2	De simulatieresultaten voor waterbalans en waterstanden	24
5.2	Het 1D Zuidwestelijke Delta waterkwaliteitsmodel	25
5.2.1	De simulatieresultaten voor zoutgehalten	25
5.2.2	Discussie van de simulatieresultaten	27
6	Samenvatting, conclusies en discussie	29
7	Literatuur referenties	31

Appendix A: De gebruikte modellen

1 Inleiding en doelstelling

Het voornemen bestaat om het Volkerak-Zoommeer (VZM) van zout water en een beperkte getijbeweging te voorzien door uitwisseling met de Oosterschelde. Hierbij wordt twee keer per etmaal Oosterscheldewater via een doorlaatmiddel in de Philipsdam ingelaten op het VZM (Figuur 1.1). Het merendeel hiervan wordt ook weer via dit doorlaatmiddel naar de Oosterschelde afgevoerd. Het resterende deel wordt tezamen met het naar het VZM aangevoerde zoete water via het Schelde-Rijnkanaal (Eendracht), het Zoommeer en het Bathse Spuikanaal bij Bath in de Westerschelde gespuid via de Bathse spuisluis (ca 90 m³/s conform voorkeur-scenario P300; Deltares, 2008). Het zoete water is afkomstig van de Brabantse rivieren en polders en van het Hollands Diep via de Volkeraksluizen (onderdeel van het toekomstige zoet-zout scheidingssysteem).

Door de uitwisseling van water met de Oosterschelde ontstaat twee keer per dag een netto stroming van zout water naar de oostelijke en zuidelijke delen van het VZM. Dit levert daar dagelijks verversing van het water op en een korte verblijftijd, wat een positieve bijdrage levert aan het in stand houden van de gewenste waterkwaliteit.



Figuur 1.1 De Zuidwestelijke Delta met het Volkerak-Zoommeer. De Philipsdam is in de scenario's van de onderhavige studie van een doorlaatmiddel voorzien. De blauwe pijlen geven de richting van debieten aan.

Het spuien van zout water bij Bath kan echter negatieve effecten hebben op de Westerschelde, de Zeeschelde en de Schelde stroomopwaarts in Vlaanderen: verhoging van het zoutgehalte van het water in de Schelde en de daaraan gekoppelde havendokken van Antwerpen, toename van de sedimentatie van slib, en schade aan zoete natuur op schorren en slikken (Deltares, 2014a).

Om deze effecten te vermijden is de optie onderzocht om in plaats van te spuien bij Bath op de Westerschelde, het water af te voeren via een doorlaat in de Oesterdam (naast de Bergsediepsuis) op de Oosterschelde (Deltares, 2014c). Deze optie is echter kostbaar. De kosten liggen in de orde van tientallen miljoenen euro's.

Een mogelijk alternatief is om af te zien van het spuien van water uit het zuidelijk deel van het VZM op de Westerschelde of de Oosterschelde. In deze situatie zou de wateruitwisseling met de Oosterschelde geheel via het doorlaatmiddel in de Philipsdam plaatsvinden.

In dit licht verleende Rijkswaterstaat Deltares de opdracht tot uitvoering van een modelmatig onderzoek met betrekking tot de waterbeweging en de waterkwaliteit in het VZM die verwacht kunnen worden bij het ontbreken van de spuimogelijkheid in het zuidelijk deel van dit systeem. Indien wordt ingeschat dat de waterkwaliteit in het VZM systeem bij deze conditie ontoereikend is, dient tevens te worden onderzocht bij welk minimale spuidebiet naar de Westerschelde een acceptabele waterkwaliteit kan worden verwacht. Aanvullend diende te worden onderzocht wat de effecten zijn op het zoutgehalte, de nutriëntenaanvoer en het waterstandsverloop in de noordelijke tak van de Oosterschelde (de Zijpe-zijde van de Krammersluizen).

Het voorliggende rapport beschrijft de vraagstelling, aanpak van de modellering, de gebruikte modellen, de resultaten van de uitgevoerde scenarioberekeningen, en de conclusies die daar uit worden getrokken met betrekking tot waterkwaliteit. Appendix A bevat de specificaties van de gebruikte modellen.

2 De vraagstelling

In de inleiding is de vraagstelling op hoofdlijnen beschreven. Om tot een adequate aanpak van het onderzoek te komen werd de vraagstelling nader uitgewerkt op basis van te verwachten effecten.

Indien spuien bij Bath niet plaatsvindt wordt het water in het Zoommeer veel minder ververst met zout Oosterschelde-water dan in een situatie met spui. Er zal zich daar een zekere mate van stagnantie voordoen, waarbij onder invloed van lokale instroming van zoet water en seizoensverschillen in de aanvoer van zoet water naar het VZM lagere zoutgehalten en zout-stratificatie denkbaar zijn. Bij aanhoudende zout-stratificatie kan deze worden versterkt door thermische stratificatie. Dergelijke condities zouden kunnen leiden tot:

- zodanig lagere zoutgehalten dat het ecosysteem instabiel wordt;
- geleidelijke accumulatie van nutriënten en verhoogde teruglevering van nutriënten door de bodem;
- versterkte algengroei in de bovenste waterlaag;
- lagere zuurstofgehalten in de onderste waterlaag.

Echter, verminderde doorspoeling zou ook kunnen leiden tot verlaagde nutriëntenaanvoer in het Zoommeer, en daarmee een per saldo betere waterkwaliteit. In dit licht was de vraagstelling met betrekking tot het VZM systeem als volgt:

- Welke zoutgehalten zijn te verwachten in het VZM, met name in het Zoommeer en nabij bij de Volkeraksluizen, o.a. in het licht van het voorkómen van de groei van blauwalgen en zoute plaagalgen?
- In welke mate kan stratificatie optreden, in zowel het Volkerak als het Zoommeer?
- Welke stabiele waterkwaliteit kan worden verwacht met betrekking tot zoutgehalte, nutriëntengehalten (N, P, Si), zuurstofgehalte en de biomassa en soortensamenstelling van fytoplankton in zowel het Zoommeer als het Volkerak?
- Welke effecten zijn hiervan te verwachten met betrekking tot het functioneren van het aquatische ecosysteem?

Indien spuien bij Bath niet plaatsvindt, zullen door de noordelijke tak van de Oosterschelde via de Philipsdam meer water en nutriënten worden afgevoerd naar de Noordzee. De vraagstelling ten aanzien van de effecten op deze tak was als volgt:

- In welke mate wijzigt het waterstandsverloop op de noordelijke tak van de Oosterschelde?
- Treden hogere waterstanden, lagere zoutgehalten en hogere nutriëntengehalten op?

Bovenstaande vragen moesten worden beantwoord voor de situatie, waarin spuien bij Bath in het geheel niet plaatsvindt, en voor de situatie waarin bij minimaal spuien een acceptabele waterkwaliteit in het Zoommeer kan worden verwacht. De resultaten voor deze situaties werden met elkaar en met de resultaten van de bestaande simulatie van de voorkeurs-variant met spui vergeleken.

Met betrekking tot de noordelijke tak van de Oosterschelde is in de analyse ook aandacht worden besteed aan het verschil in waterstandsverloop met de situatie zonder koppeling met het VZM (T0). Dit is relevant met het oog op de zandhonger in de Oosterschelde en het netto verlies van een klein areaal intergetijdengebied vanwege een licht verminderde getijslag.

3 Aanpak van de modellering

3.1 Uitgangspunten

De modellering van de waterbeweging ging uit van een globale waterbalans conform de onderstaande tabel.

Tabel 3.1 Gewenste globale waterbalans (Rijkswaterstaat, R. Boeters, offerteaanvraag, februari 2014).

Debieten (getij)gemiddeld	In (m ³ /s)	Uit (m ³ /s)
Philipsdam	300	347
Volkeraksluizen	25	
Mark en Dintel	12 + 5 = 17	
Steenbergse Vliet	3 + 5 = 8	
Kreekraksluizen		3
Bathse spui		0
Doorlaat Oesterdam		0
Totaal	350	350

Voor de waterstanden op het VZM geldt: gemiddeld waterpeil NAP -0,10 meter; LW NAP - 0,25 en HW NAP +0,05 meter. De debieten door de Philipsdam (Krammersluizen) werden afgeregeld op deze waterstanden, o.a. door de breedte van de opening in het gebruikte model in te stellen.

De met betrekking tot waterbeweging en waterkwaliteit vast te stellen parameters in het VZM zijn conform Deltares (2013b):

- waterstanden
- stroomsnelheden
- zoutgehalten
- temperatuur
- zuurstof
- nutriënten (N,P,Si)
- fytoplankton

In de analyse moest aandacht worden besteed aan:

- de verversingstijd, met name van het (aanvankelijk zoete) water in de zuidelijke tak;
- de invloed van begrazing door mariene schelpdieren; en
- het minimale zoutgehalte dat benodigd is voor aquacultuur in het VZM (20 ppt volgens opgave van Rijkswaterstaat).

De met betrekking tot waterbeweging en waterkwaliteit vast te stellen parameters in de Oosterschelde aan de Zijpe-zijde van de Krammersluizen zijn conform Deltares (2014b/c):

- waterstanden
- zoutgehalten
- nutriënten aanvoer naar de Oosterschelde vanuit het VZM

Het zoutgehalte wordt in dit rapport primair uitgedrukt in de eenheid ppt (parts per thousand), die overeenkomt met de eenheid psu (practical salinity unit). Saliniteit en chloridegehalte hebben een vaste verhouding bij saliniteiten groter dan 1 ppt, zodat ze eenvoudig in elkaar kunnen worden omgerekend.

3.2 Gebruikte modellen en werkwijze

Voor de modellering is zo veel mogelijk gebruik gemaakt van beschikbare modellen. Er waren meerdere modellen beschikbaar:

- 1 Een 1D model voor de waterbeweging en waterkwaliteit van de gehele Zuidwestelijke Delta dat recentelijk werd gemodificeerd, gekalibreerd en gevalideerd. Met dit SOBEK model zijn de jaren 2005-2009 doorgerekend (Deltares, 2014b/c).
- 2 Een 3D (sigma-lagen) model voor de hydrodynamica en waterkwaliteit van het Volkerak-Zoommeer dat is ingezet voor de MER Waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer. Hierin zijn de jaren 2000-2003 doorgerekend.
- 3 Een 3D Delft3D-FLOW (z-lagen) model voor de hydrodynamica van het Volkerak-Zoommeer geconstrueerd ter bestudering van de verspreiding van zoutlekage door de Krammersluizen (Deltares, 2012, 2013a en 2015b). Voor dit model zijn de jaren 2000, 2001, 2006 en 2007 beschikbaar. Afgezien van zoutgehalte en temperatuur is er geen waterkwaliteit met dit model doorgerekend.

Model 2 is sterk verouderd en is ongeschikt voor de huidige vraagstelling omdat een z-lagen schematisatie nodig is om stratificatie in zwak-dynamische wateren – dat wil zeggen met weinig getij – accuraat te berekenen. Daarom is gekozen voor gebruik van modellen 1 en 3. Bij de gebruikte modellen kunnen de volgende kanttekeningen worden gezet:

- Ten aanzien van het 1D Sobek WAQ model voor de Zuidwestelijke Delta zijn in Deltares (2014b) aanbevelingen gedaan met betrekking tot verbetering van de systeemdefinitie. Deze betreffen:
 - de vervanging van module CONSBL voor de forcering van graasdruk door de grazersmodule DEBGRZ, waarmee de ontwikkeling van de schelpdierbiomassa dynamisch wordt gemodelleerd; en
 - de vervanging van de S1/2 module voor bodem-water interactie door de “gelaagde bodem” module, waarmee de samenstelling van de bodem en de teruglevering van nutriënten aan de waterkolom in hoge mate realistisch kunnen worden gemodelleerd.
- Eind 2013 is WAQ voorzien van een geoptimaliseerde processenbibliotheek (Deltares, 2015a). Ten behoeve van onderhoud en beheer van de modellen voor Rijkswateren is het raadzaam bestaande modellen over te zetten naar de nieuwe standaard processenbibliotheek.

In de huidige studie zijn deze verbeteringen niet doorgevoerd, en de aanbevelingen blijven onverminderd van kracht.

De modellering zou in twee fases worden opgesplitst. In fase 1 zou met het 1D model de waterbeweging en de waterkwaliteit worden berekend en met het 3D model alleen de waterbeweging, het zoutgehalte en de temperatuur. Op basis van deze resultaten kon reeds een inschatting van het al dan niet optreden van waterkwaliteitsproblemen worden gemaakt. De waterkwaliteit zou met een nieuw 3D detailmodel worden gemodelleerd in fase 2. Echter in fase 1 bleek uit een reeks simulaties met het 1D model, dat omvangrijk spuien vanuit het VZM nodig is om in de buurt van minimaal acceptabele zoutgehalten (20 ppt) in het VZM te komen. Het benodigde spuidebiet bleek onacceptabel hoog vanwege te verwachten negatieve gevolgen voor de Westerschelde. Daarmee schoot de modelstudie zijn doel voorbij. In overleg met opdrachtgever Rijkswaterstaat is besloten fase 2 niet uit te voeren.

Uit de vraagstelling blijkt het belang van het wel of niet substantieel optreden van stratificatie. De eerste stap richtte zich daarom op de modellering van waterbeweging, zoutgehalten, temperatuur en stratificatie.

Het 1D SOBEK waterbewegingsmodel en waterkwaliteitsmodel werd gebruikt om de randvoorwaarden voor het Delft3D-FLOW hydrodynamisch model te leveren (tabellen A.1 en A.2, Appendix A). De randvoorwaarden betreffen tijdreeksen voor de debieten van instroming en uitstroming en voor zoutgehalten. Afgezien van de zoutgehalten werd aan de modellering van de waterkwaliteit met het 1D model uiteindelijk geen aandacht besteed.

Een aandachtspunt betrof de dispersiecoëfficiënten in het 1D waterkwaliteitsmodel. Deze werden niet van het 1D waterbewegingsmodel overgenomen, maar apart voor het 1D waterkwaliteitsmodel van het zoete VZM bepaald. In de zoute situatie zouden deze kunnen veranderen, vooral onder invloed van stratificatie. Dit kan echter niet worden gekwantificeerd, en daarom is gerekend met de dispersiecoëfficiënten van het zoete model.

Voor de forcering van het 1D model werd gebruikt gemaakt van de forcering voor de periode 2005-2009, die in 2013 werd opgesteld (Deltares, 2014b). De eigenlijke 1D simulatie voor de dynamische steady state werd voorafgegaan door een spin-up simulatie voor een periode van vijf jaren, die tevens duidelijk maakte wat de verversingstijd van het water in het VZM is.

Hoewel het 1D waterbewegingsmodel niet is gevalideerd voor waterstanden, is het ook voor de bepaling van het waterstandsverloop in de noordelijke tak van de Oosterschelde gebruikt, omdat dit naar verwachting realistische resultaten oplevert.

Ten behoeve van de temperatuurmodellering met het Delft3D-FLOW model is de forcering voor de periode 2005-2009 aangevuld met gegevens voor meteorologische parameters en de gemeten temperatuur op de randen (Oosterschelde en Hollands Diep). Ook in het geval van het 3D model werd een spin-up simulatie voor een periode van vijf jaren uitgevoerd.

Het Delft3D-FLOW model voor het VZM (tabel A.3, Appendix A) kan niet worden gekalibreerd of gevalideerd, omdat voor een zout VZM geen meetgegevens voorhanden zijn. Bij de toepassing van het model werd vertrouwd op het intrinsieke voorspellend vermogen van Delft3D-FLOW. In de vele toepassingen voor sterk uiteenlopende watersystemen is gebleken dat het intrinsieke voorspellend vermogen groot is.

4 Berekeningsresultaten voor het scenario zonder spuien

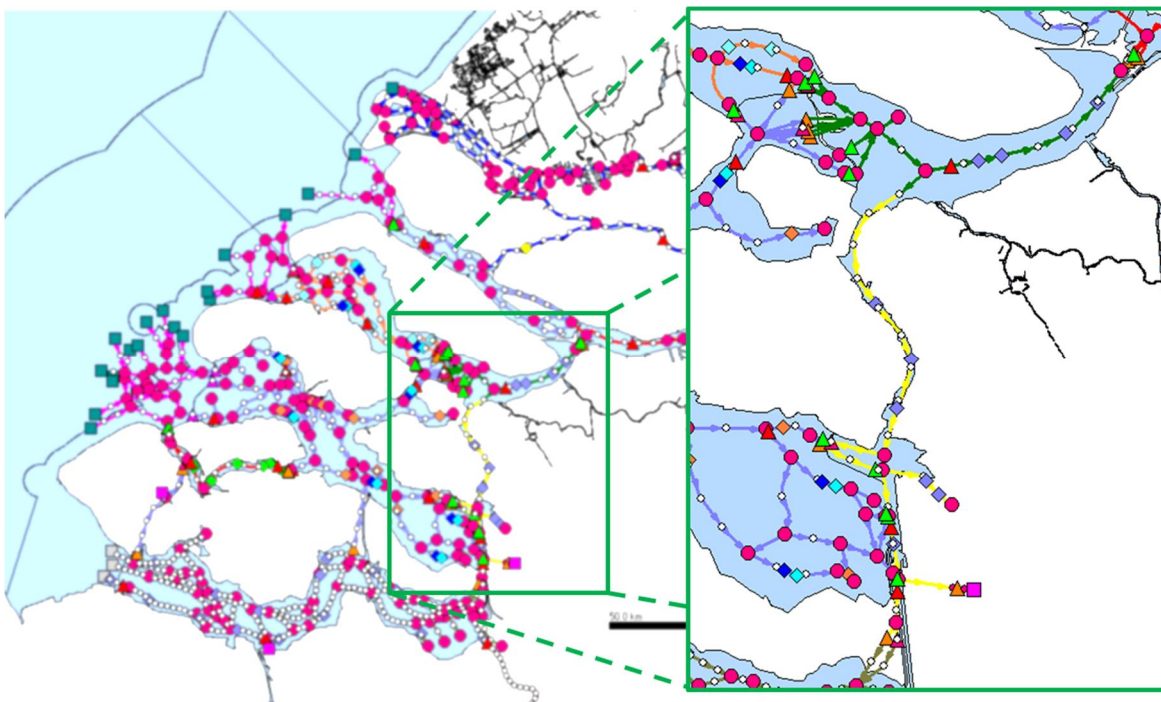
4.1 Het 1D Zuidwestelijke Delta waterbewegingsmodel

4.1.1 Beschrijving van het model

De schematisatie van het 1-D Sobek hydrodynamische model van de Zuid-Westelijke Delta met daarin het Volkerak-Zoommeer en de Oosterschelde is weergegeven in Figuur 4.1 De hoofdkenmerken van dit model zijn vermeld in Tabel A.1 (Appendix A).

In het model zijn een constante aanvoer van 25 m³/s vanuit het Hollands Diep via de Volkeraksluizen, en tijdseries voor 2005-2009 van de afvoeren van de Mark en Dintel en de Steenbergse Vliet opgedrukt conform Deltares (2014c). Elke aanvoer heeft zijn eigen geografisch correcte lozingspunt. De uitwisseling met de Oosterschelde wordt aangestuurd door middel van een sturingsregel op het doorlaatmiddel in de Phillipsdam. Dit doorlaatmiddel heeft twee vrijheidsgraden die een onderlinge samenhang hebben.

De eerste vrijheidsgraad in het doorlaatmiddel is het moment van openen en sluiten. Het doorlaatmiddel laat stroming in twee richtingen toe en kan afgesloten worden op het moment dat de waterstanden de kritische grenswaarden overschrijden. In het model zijn grenswaarden iteratief bepaald op basis van de maximale en minimale toelaatbare waterstanden op het Volkerak-Zoommeer. De tweede vrijheidsgraad van het model is de breedte van het doorlaatmiddel. Door de breedte aan te passen wordt het uitwisselingsdebiet beïnvloed.



Figuur 4.1 Zuid-Westelijk Deltamodel. Een overzicht van de modelschematisatie. De twee takken aan de oostzijde van het Zoommeer betreffen de inham bij Bergen op Zoom en de aftakking naar de Kreekraksluizen (onderste tak).

Bij grote doorlaatopeningen worden de kritische waterstanden (zowel de onder als bovengrens) snel benaderd. Als reactie hierop zal de sturingsregel het doorlaatmiddel sluiten. Het doorlaatmiddel is in het model dusdanig afgesteld dat een natuurlijk getijde regime gesimuleerd wordt, zonder al te veel sluitingen van het kunstwerk.

4.1.2 De simulatieresultaten voor waterbalans en waterstanden

Bij de afregeling van de debieten door de Philipsdam werden deze getoetst aan de gewenste globale waterbalans voor het Volkerak-Zoommeer (zie Tabel 3.1). Uitgangspunt is dat bij benadering een instroming vanuit de Oosterschelde van 300 m³/s gehaald wordt. Tabel 4.1 geeft de uitwisselingsdebieten die resulteren na de afregeling.

De waterstanden zijn beschouwd op het meetpunt Steenberg en midden op het Zoommeer. Figuur 4.2 laat het gesimuleerde verloop van de waterstand in de tijd zien op het Volkerak en het Zoommeer. De waterstanden voor het scenario zonder spui liggen gemiddeld rond de -0.10 m NAP. De getijdeslag is bij benadering 30 cm. In Tabel 4.2 zijn enkele karakteristieken ten aanzien van de waterstanden weergegeven. In de tabel zijn ook de resultaten van de eerdere simulaties van de huidige zoete situatie (T0-situatie) en de scenario's S2 en S3 weergegeven (Deltares, 2014c). Daaruit blijkt dat een doorlaatmiddel in de Phillipsdam slechts kleine effecten (orde +/- 3 cm) heeft op de getijslag in de Oosterschelde.

NB: De gesimuleerde waterstanden voor het VZM voor de huidige zoete situatie wijken enigszins af van de werkelijk opgetreden waterstanden.

Tabel 4.1 Model instelling en uitwisselingsdebieten.

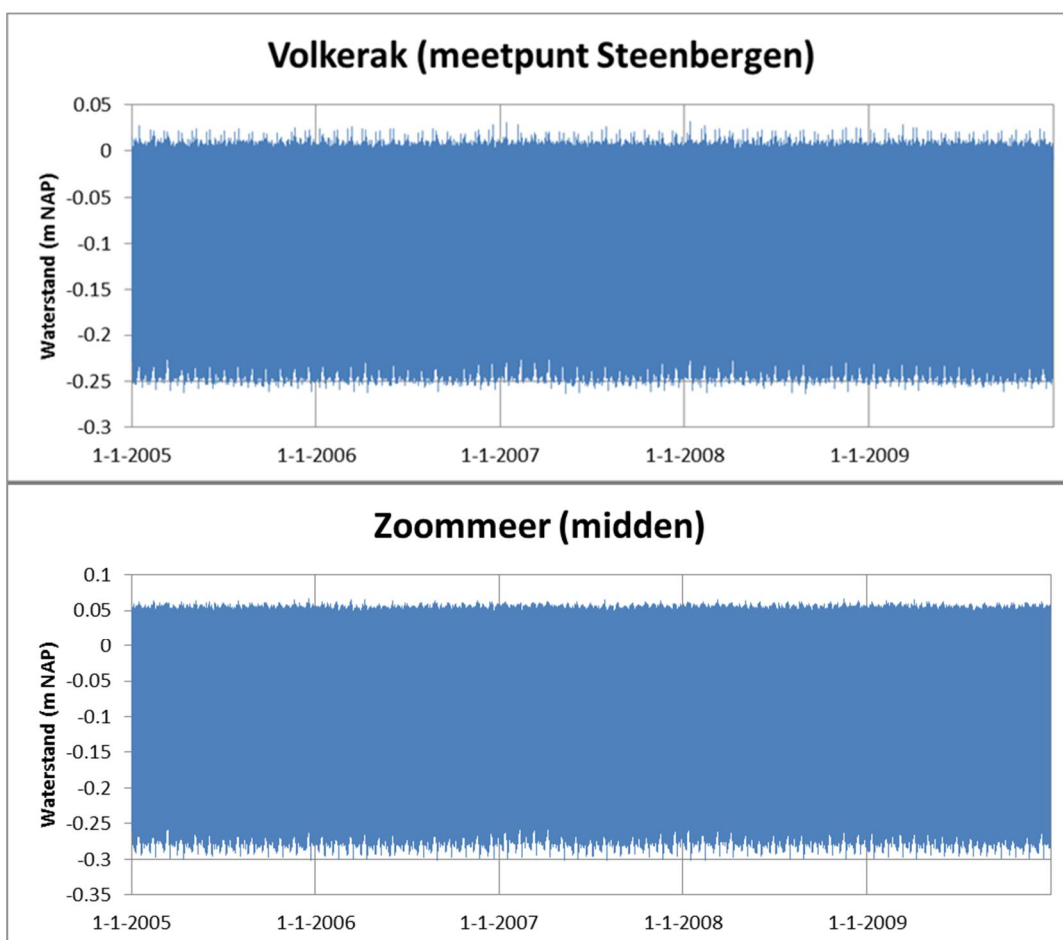
Parameter	Phillipsdam
Q in (m ³ /s)	-303
Q uit (m ³ /s)	351
Breedte doorlaatwerk (m)	70
Trigger laag peil Volkerak (m NAP)	-0.25
Trigger hoog peil Volkerak (m NAP)	0
Verval	n.v.t.

Tabel 4.2 Waterstanden op het Volkerak, Zoommeer en de noordelijke tak van de Oosterschelde (periode 2005-2009).

Waterstand	Volkerak			
	Scenario (zonder spui)	Huidige situatie (model)	Scenario S2	Scenario S3
Gemiddelde waarde	-0.10	-0.22	-0.09	-0.10
Mediane waarde	-0.08	-0.21	-0.08	-0.10
Standaard deviatie	0.09	0.03	0.11	0.12
max (95 percentiel)	0.01	-0.20	0.05	0.06
min (5 percentiel)	-0.24	-0.31	-0.26	-0.28

Waterstand	Zoommeer			
	Scenario (zonder spui)	Huidige situatie (model)	Scenario S2	Scenario S3
Gemiddelde waarde	-0.10	-0.22	-0.11	-0.14
Mediane waarde	-0.09	-0.21	-0.13	-0.12
Standaard deviatie	0.11	0.03	0.12	0.14
max (95 percentiel)	0.05	-0.20	0.07	0.05
min (5 percentiel)	-0.27	-0.31	-0.27	-0.36

Waterstand	Oosterschelde			
	Scenario (zonder spui)	Huidige situatie (model)	Scenario S2	Scenario S3
Gemiddelde waarde	0.01	0.01	0.01	0.01
Mediane waarde	-0.03	-0.03	-0.04	-0.04
Standaard deviatie	0.95	0.97	0.94	0.94
max (95 percentiel)	1.46	1.49	1.45	1.46
min (5 percentiel)	-1.33	-1.35	-1.32	-1.32



Figuur 4.2 Gemodelleerde waterstanden op het Volkerak en het Zoommeer voor het scenario met uitwisseling via de Philipsdam en zonder spui bij Bath.

4.2 Het 1D Zuidwestelijke Delta waterkwaliteitsmodel

4.2.1 Beschrijving van het model

Op basis van het 1D Sobek hydrodynamische model van de Zuid-Westelijke Delta is een 1D waterkwaliteits-model opgezet. De ruimtelijke schematisatie is gelijk aan die van het hydrodynamische model. Dit waterkwaliteitsmodel bevat alle relevante lozingen in het gebied ten aanzien van saliniteit, eutrofiëring en zwevend stof. De hoofdkenmerken van het waterkwaliteitsmodel zijn vermeld in Tabel A.2 (Appendix A).

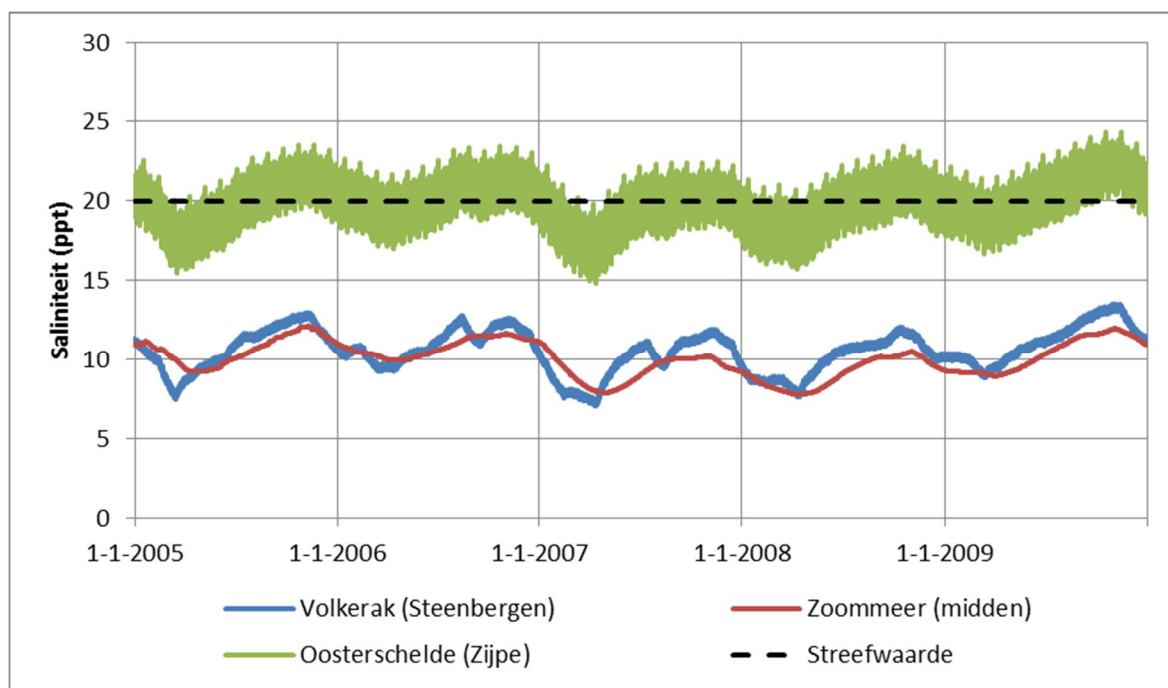
4.2.2 De simulatieresultaten voor zoutgehalten

In deze studie wordt alleen het resultaat van de saliniteit gepresenteerd op het Volkerak, het Zoommeer en noordelijke tak van de Oosterschelde. De resultaten voor de saliniteit zijn weergegeven in Figuur 4.3 en Tabel 4.3. De gewenste streefwaarde van 20 ppt wordt bij lange na niet gehaald in zowel het Volkerak als het Zoommeer.

Bij het meetpunt Steenbergens is een sterke seizoensdynamiek te zien. In de natte winter en voorjaarsmaanden stroomt er veel zoetwater toe, vooral vanuit de Dintel en de Vliet die afwateren op het Volkerak. In de zomer nemen de afvoeren af, waardoor het zoutgehalte toeneemt.

Het zoutgehalte in het Zoommeer is gemiddeld 0.5 ppt lager dan in het Volkerak. Het getij dringt via het Schelde-Rijnkanaal (Eendracht) beperkt door in het Zoommeer. De seizoensvariatie is minder sterk dan voor het Volkerak. Een verklaring hiervoor is dat naar het Zoommeer minder zoetwater wordt aangevoerd dan naar het Volkerak.

In de noordelijke tak van de Oosterschelde is een duidelijk getij-effect te zien (bandbreedte in de modelresultaten). De seizoensvariatie in deze tak volgt die van het Volkerak.



Figuur 4.3 Berekende saliniteit in ppt voor 3 observatiepunten (Volkerak, Zoommeer en de noordelijke tak van de Oosterschelde). De initiële zoutgehalten zijn bepaald door middel van een spin-up simulatie.

Tabel 4.3 Overzicht van berekende saliniteit op 3 locaties in het model (periode 2005-2009).

Saliniteit (ppt) station	Gemiddelde	Standaard deviatie
Volkerak (Steenbergen)	10.6	1.4
Zoommeer (Midden)	10.1	1.1
Oosterschelde (Zijpe)	19.8	1.5

4.2.3 Discussie van de modelresultaten

De hoogte van de voorspelde zoutgehalten

De zoutgehalten op het Volkerak Zoommeer vallen lager uit dan zou kunnen worden verwacht. Bij een hypothetische volledig gemengde situatie zou een zoutgehalte verwacht worden dat voor 6/7 deel ($300 \text{ m}^3/\text{s}$ instroom / $350 \text{ m}^3/\text{s}$ uitstroom) lijkt op het zoutgehalte in de Oosterschelde. Een saliniteit van 23 ppt op de noordelijke tak van de Oosterschelde zou dan resulteren in een saliniteit van orde $23 \cdot 6/7 = 20$ ppt in het Volkerak-Zoommeer. Het 1D model haalt een dergelijke uitwisselingsefficiëntie niet, vooral omdat er geen sprake is van een volledig gemengde situatie. Een belangrijke additionele oorzaak is dat dichtheidseffecten door het 1D model niet worden gemodelleerd, waardoor de uitwisseling minder efficiënt verloopt. Dichtheids-stromingen zijn in het 3D model wel gemodelleerd.

Vergelijking met de eerdere simulatie van het voorkeurscenario P300

In het voorkeurscenario P300 (Deltares, 2008) wordt $90 \text{ m}^3/\text{s}$ via de Bathse spuisluis geloosd op de Westerschelde. Dit resulteerde in gemiddelde zoutgehalten van 27 ppt (15 g Cl/l) in het Volkerak en 23 ppt (13 g Cl/l) in het Zoommeer. Het voorkeursalternatief werd doorgerekend met behulp van een 3D Delft3D-FLOW model. Daarnaast werd het zoutgehalte in de Oosterschelde bij het doorlaatmiddel bij de Philipsdam gebaseerd op metingen in de Oosterschelde. Deze waren niet gecorrigeerd voor de extra toevoer van zoet water vanuit het Volkerak, waardoor de randconcentratie in het 3D model enigszins overschat werd.

Vergelijking met andere eerdere scenariosimulaties

Zoals beschreven in Deltares (2014c) zijn eerder 3 scenario's gemodelleerd met de volgende karakteristieken:

1. Een enkel doorlaatmiddel ter plaatse van de Oesterdam. Grevelingen en Volkerak staan in open verbinding.
2. Twee doorlaatmiddelen. Ter plaatse van de Phillipsdam wordt $300 \text{ m}^3/\text{s}$ en ter plaatse van de Oesterdam $100 \text{ m}^3/\text{s}$ doorgelaten.
3. Een doorlaatmiddel ter plaatse van de Oesterdam en een bij de Phillipsdam (gebaseerd op scenario P300 80/20 (Deltares, 2008)).

In alle drie gevallen is sprake van aanzienlijke spui via het Zoommeer.

Scenario 2 en 3 lenen zich goed voor een vergelijking met in deze studie gemodelleerde scenario. De gemiddelde zoutgehalten komen in deze scenario's uit op 16-18 ppt voor het Volkerak en het Zoommeer. Deze hogere zoutgehalten waren primair het gevolg van een hogere efficiëntie van de doorlaatmiddelen in de Philipsdam en de Oesterdam bij de aanwezigheid van spui. Op het moment dat er op slechts één locatie uitwisseling plaatsvindt (in dit geval de bij de Phillipsdam) dan wordt een groot deel van het ingelaten water gedurende dezelfde getijcyclus ook weer uitgelaten. De efficiëntie van het doorlaatmiddel neemt hierdoor sterk af.

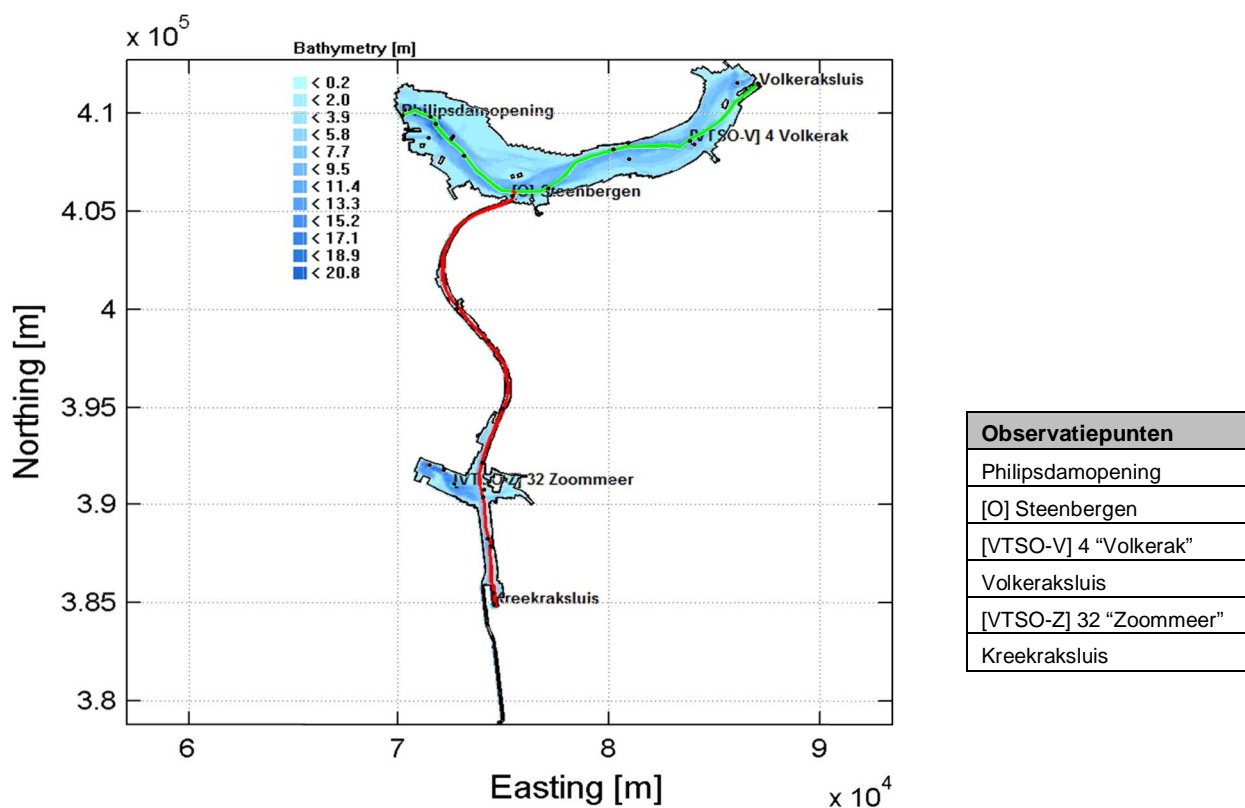
De gesimuleerde waterstanden op het Volkerak komen overeen met scenario S2 en S3. De middenstand is in het huidige scenario en de scenario's S2 en S3 ca. -0,10 m. NAP met een getij van 30 cm.

4.3 Het 3D Volkerak-Zoommeer hydrodynamische model

4.3.1 Beschrijving van het model

Het 3D hydrodynamische model Delft3D-FLOW van het Volkerak-Zoommeer is toegepast met een gecontroleerde getij-slag via een opening in de Philipsdam, zonder afvoerdebiet door de Bathse spuisluis. De algemene opzet van het model komt verder overeen met die beschreven in Deltares (2012). Alle ingaande en uitgaande debieten (Philipsdam, Volkeraksluizen, polderlozingen, RWZI, neerslag en verdamping) zijn afkomstig uit het 1D Zuidwestelijke Delta model. Door deze debieten op te leggen aan het 3D model is de waterbalans in dit model exact gelijk aan de waterbalans in het SOBEK model (zie sectie 4.1.2). De hoofdkenmerken van het 3D hydrodynamische model zijn vermeld in Tabel A.3 (Appendix A).

De model-resultaten worden in de secties 4.3.1-4 voor verschillende locaties en twee transecten weergegeven in Figuur 4.4. Station [VSTO-V] 4 wordt in de tekst "Volkerak" genoemd, terwijl [VSTO-Z] 32, "Zoommeer" wordt genoemd.

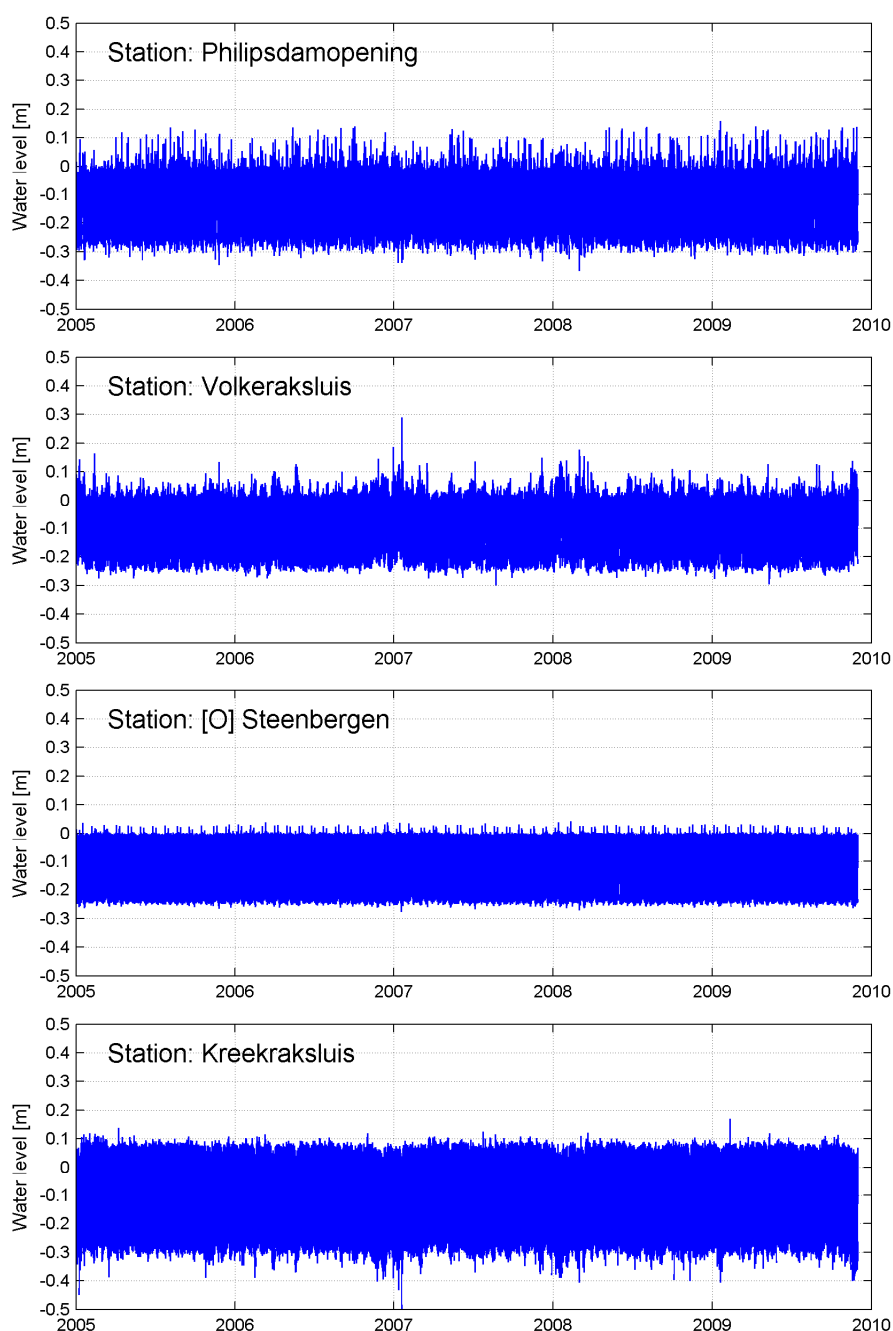


Figuur 4.4 Overzicht van model domein, de observatiepunten en de transecten (in rood en groen).

4.3.2 De simulatieresultaten voor waterstanden

Door de herintroductie van een beperkte getijslag via de Philipsdam zullen de waterstanden in het Volkerak-Zoommeer een grotere variatie gaan vertonen dan in de huidige situatie. De

in het 1D Zuidwestelijke Delta model bepaalde getijde-debietten leiden tot een waterstandsvariatie van tussen de -0,25 en 0,05 m NAP. Meer extreme waterstanden treden in de uithoeken van het modeldomein op (vooral voor de Volkeraksluizen, Figuur 4.5) als gevolg van windopzet. Voor een station in het midden van het domein (Steenbergen) is de waterstandsvariatie in overeenstemming met de doelstelling. De gemiddelde waterstand ligt voor alle stations rondom of op -0,1 m NAP (Tabel 4.4). Als indicatie voor de variatie in de waterstanden is de standaard deviatie weergegeven. Deze is opgebouwd uit een getijde en een wind-gedreven component.



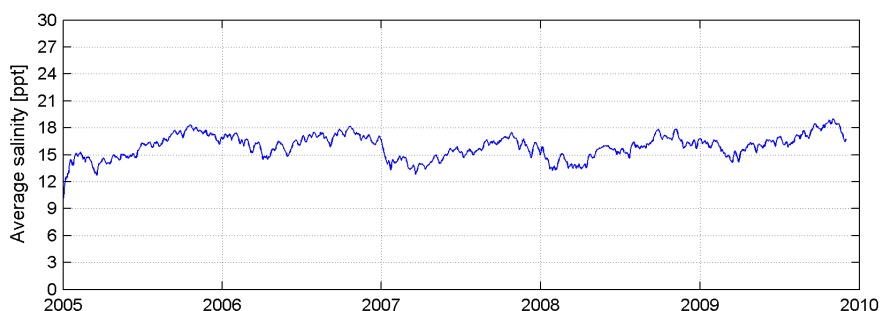
Figuur 4.5 Berekende waterstandsvariatie voor de verschillende observatiepunten op de randen van het modeldomein en in het midden van het Volkerak-meer (Steenbergen).

Tabel 4.4 Berekende gemiddelde waterstand en standaard deviatie voor de meetlocaties (2005-2009).

Waterstand [m]	Gemiddelde	Standaard deviatie
Station		
Philipsdamopening	-0.133	0.158
[O] Steenberg	-0.098	0.084
[VTSO-V] 4 (Volkerak)	-0.088	0.087
Volkeraksluis	-0.077	0.089
[VTSO-Z] 32 (Zoommeer)	-0.105	0.121
Kreekraksluis	-0.107	0.124

4.3.3 De simulatieresultaten voor zoutgehalten

Het volume-gemiddelde zoutgehalte over het hele model-domein is weergegeven in Figuur 4.6. Na een opstartfase van enkele maanden waarin het zoutgehalte oploopt van de initiële waarde van 10 ppt, is er in de tweede helft van 2005 en de jaren daarop een duidelijke seizoensvariatie te zien, met minimale zoutgehalten in het voorjaar (rond 13 ppt) en in het najaar een maximum van rond de 18 ppt. Het gemiddelde zoutgehalte ligt door de gemodelleerde jaren heen rond de 16 ppt.

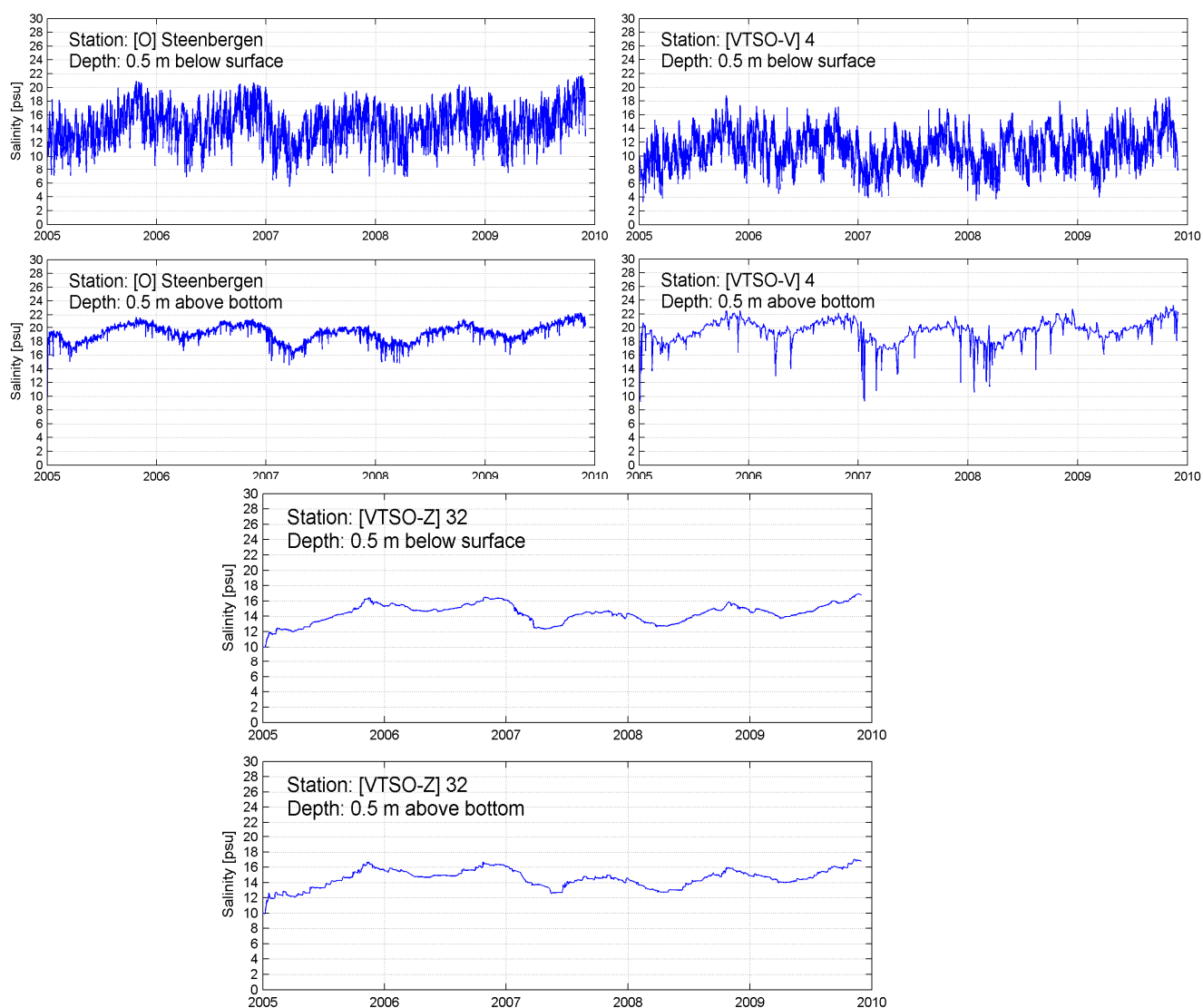


Figuur 4.6 Domein- en dieptegemiddelde zoutgehalten.

De twee takken van het model-domein (het Volkerak en het Zoommeer) vertonen zeer verschillende zoutgehalten. Het Volkerak is via een open verbinding via de Philipsdam verbonden met de zoute Oosterschelde, waardoor het zoutgehalte aan de westkant van het Volkerak hoger ligt dan in het Zoommeer, een gesloten kom waarin naar neerslag gemiddeld $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ zoet water wordt aangevoerd (Figuur 4.7). Nabij de Philipsdam (Steenbergen) is sprake van een grote getijde-variatie en een hoger gemiddeld zoutgehalte dan nabij de Volkeraksluizen (Station Volkerak, [VTSO-V] 4), waarlangs zoet water het systeem binnenkomt. Aan de oppervlakte wordt voor Steenberg een zoutgehalte tussen 8 en 20 ppt voorspeld terwijl deze voor het gehele Volkerak tussen 4 en 16 ppt varieert. Nabij de bodem zijn de getijde-effecten minder sterk en is de seizoensvariatie dominant. Zoutgehalten liggen in het Volkerak nabij de bodem gemiddeld rond 19,3 ppt. Het zoutgehalte in het Zoommeer ligt dicht bij dat van de bovenlaag in het Volkerak (gemiddeld 14,4 ppt), omdat het Zoommeer via het relatief ondiepe Schelde-Rijnkanaal van water wordt voorzien. Tabel 4.5 verschaft een overzicht van de gemiddelde zoutgehalten en de standaard deviaties.

Tabel 4.5 Gemiddelde zoutgehalten en standaard deviaties voor de meetlocaties aan het oppervlak en nabij de bodem.

Zoutconcentratie [PPT] Station	Oppervlakte		Bodem	
	Gemiddelde	Standaard deviatie	Gemiddelde	Standaard deviatie
Philipsdamopening	18.3	2.6	19.5	1.7
[O] Steenberg	14.4	2.7	19.3	1.3
[VTSO-V] 4 (Volkerak)	10.9	2.5	19.4	1.7
Volkeraksluis	6.8	3.5	12.3	2.8
[VTSO-Z] 32 (Zoommeer)	14.4	1.2	14.5	1.2
Kreekraksluis	14.3	1.2	14.3	1.2



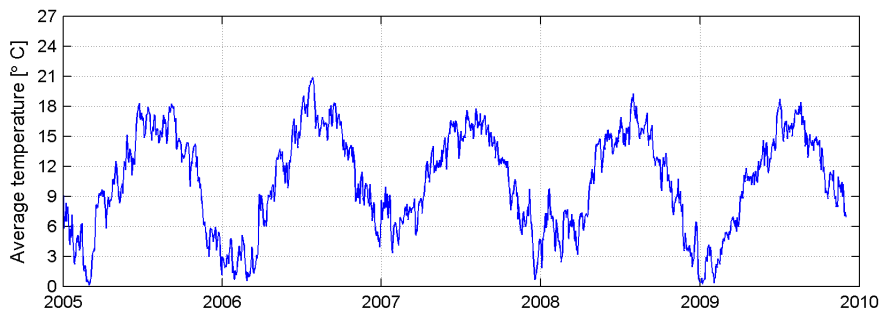
Figuur 4.7 Zoutgehalten [Saliniteit PSU = PPT] aan het oppervlak en nabij de bodem, voor verschillende observatiepunten in het Volkerak en het Zoommeer.

In het Volkerak stelt zich een vrijwel continue zoutstratificatie in met verticale zoutgradiënten die globaal variëren tussen de 5 ppt (west) en 9 ppt (oost). Voor het meetstation Volkerak zijn zoetwater-pieken te zien in de winter en gedurende het voorjaar van 2007 en 2008. Deze vallen samen met periodes met hoge windsnelheden, waarin de gelaagtheid van het systeem tijdelijk wordt opgeheven.

Vanwege de beperkte doorstroming richting het Zoommeer is daar geen sprake van een met het getij fluctuerend zoutgehalte, en duurt de inspeelfase vanuit het initiële zoutgehalte langer. In tegenstelling tot het Volkerak is het Zoommeer nauwelijks zout-gestratificeerd: de zoutgehalten nabij de bodem en aan de oppervlakte zijn zeer vergelijkbaar.

4.3.4 De simulatieresultaten voor temperatuur

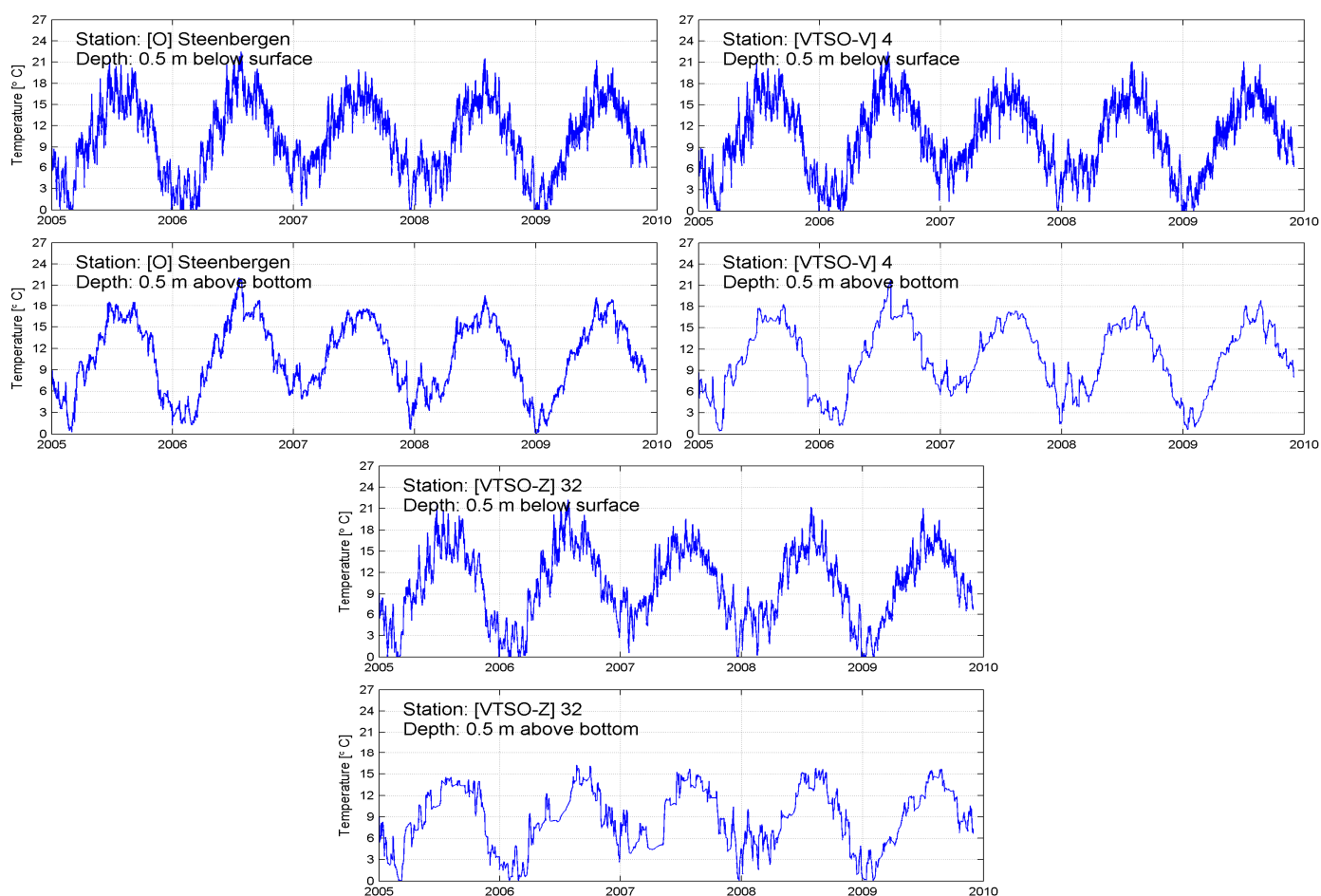
De volume-gemiddelde watertemperatuur laat een duidelijke seizoensvariatie zien (Figuur 4.8). De invloed van het getij is beperkt, zoals ook te zien is in de temperatuurverdeling voor de verschillende stations (Figuur 4.9). Voor alle stations is de temperatuur vlak onder het wateroppervlak erg vergelijkbaar. De verschillen nabij de bodem worden met name veroorzaakt door verschillen in waterbeweging en diepte. De watertemperatuur nabij de bodem op locatie Steenbergens vertoont de grootste fluctuaties doordat sterke gelaagde waterbeweging optreedt onder invloed van het getij op de Oosterschelde en de aanvoer van zoet water uit het Hollands Diep. Het monitoringspunt in het Zoommeer ligt in de diepe put (16.4 m) van dit gemiddeld veel ondiepere meer. In deze put handhaaft zich relatief koud water, zodat er relatief kleine temperatuurschommelingen optreden.



Figuur 4.8 Domein- en dieptegemiddelde temperatuur.

Tabel 4.6 Gemiddelde temperatuur en standaard deviatie voor de meetlocaties aan het wateroppervlakte en nabij de bodem.

Temperatuur [°C]	Oppervlakte		Bodem	
	Gemiddelde	Standaard deviatie	Gemiddelde	Standaard deviatie
Philipsdamopening	10.9	5.4	11.2	5.4
[O] Steenberg	10.2	5.2	10.8	5.1
[VTSO-V] 4 (Volkerak)	10.3	5.1	10.7	4.9
Volkeraksluis	11.1	5.1	10.8	4.9
[VTSO-Z] 32 (Zoommeer)	10.1	5.1	8.6	4.2
Kreekraksluis	10.1	5.1	9.5	4.7



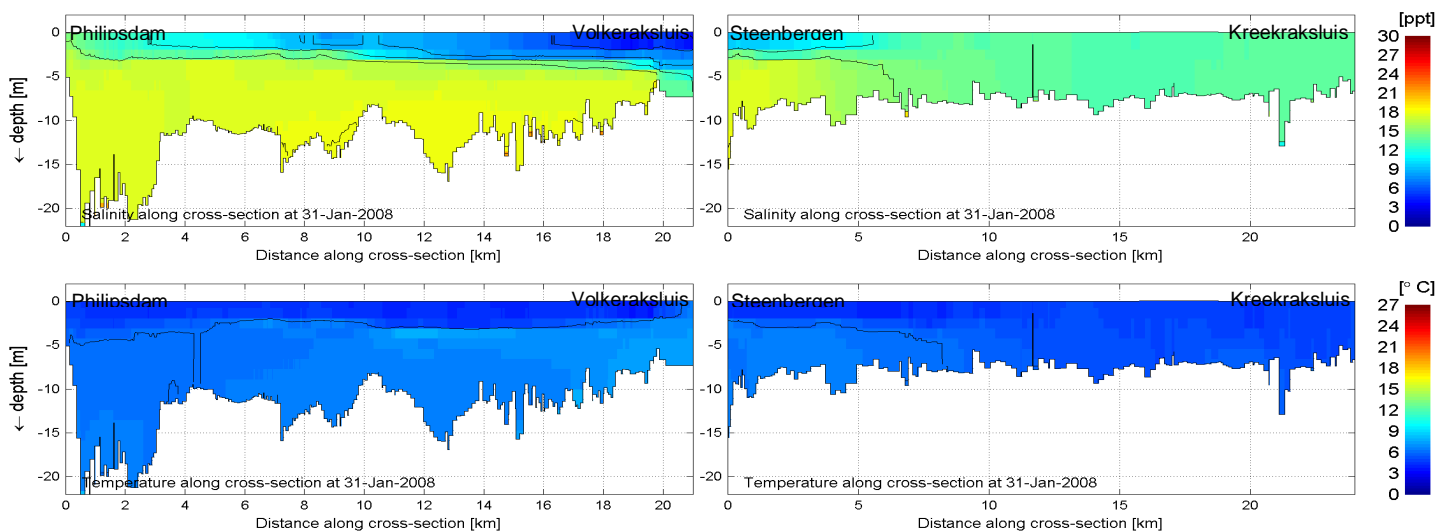
Figuur 4.9 Temperatuur [graden Celsius] aan het oppervlak en nabij de bodem, voor verschillende observatiepunten in het Volkerak en Zoommeer.

De over het algemeen geringe verschillen in temperatuur nabij het oppervlak en nabij de bodem voor de verschillende stations (Tabel 4.6) komen voort uit verschillen in waterbeweging en verticale menging (diepte). Dezelfde watertemperatuur is opgelegd aan alle instromend water, en de temperatuur van de atmosfeer is in het gehele modeldomein gelijk.

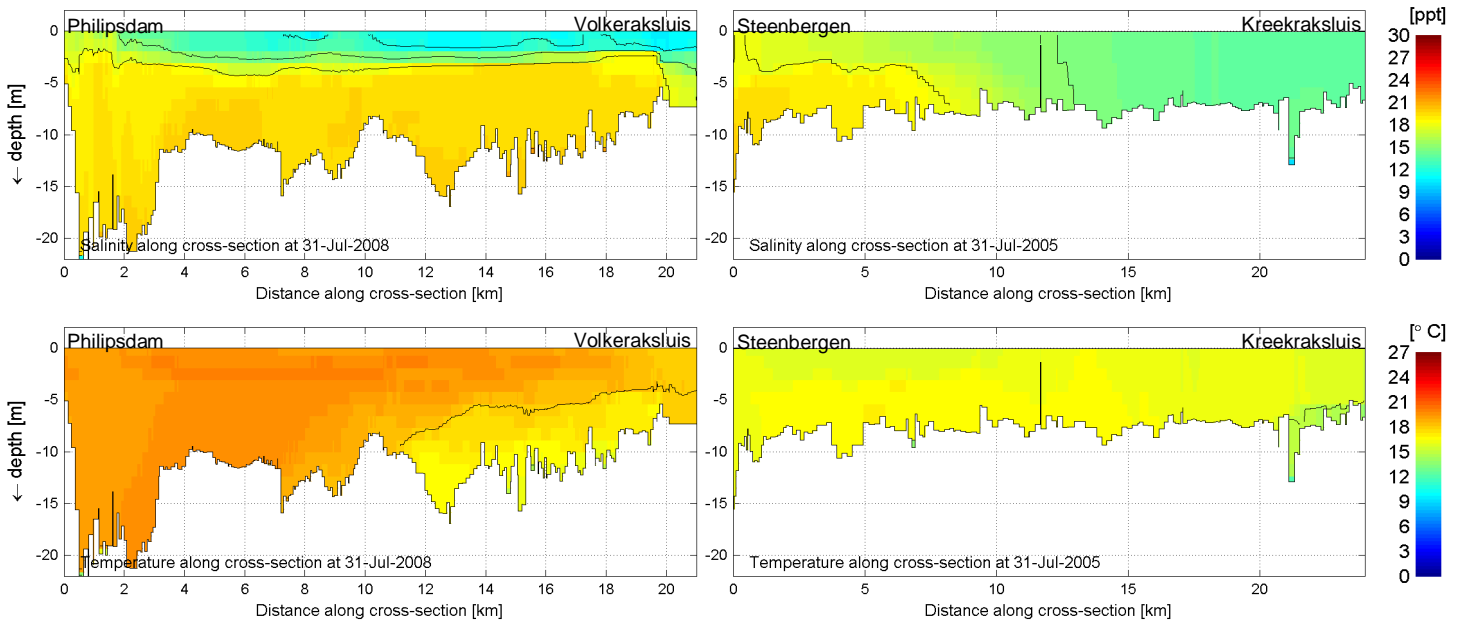
4.3.5 De gesimuleerde stratificatie

In het Volkerak is gedurende zowel de winter- als de zomerperiode sprake van een sterke zoutstratificatie (Figuren 4.10-11). De opening in de Philipsdam laat zout Oosterschelde water binnen, hetgeen een zoute onderlaag vormt door een groot deel van het Volkerak. Deze stratificatie is vrijwel continue in het Volkerak aanwezig, en wordt alleen gedurende korte periodes in de winter en in het voorjaar afgezwakt. Hierdoor is vrijwel continue een verschil in zoutgehalte van meer dan 5 ppt tussen boven- en onderlaag aanwezig (zie Tabel 4.2). De zoutindringing in het Zoommeer leidt tot een zoutstratificatie in het begin van het Schelde-Rijnkanaal (nabij Steenbergen), maar deze ontbreekt in het relatief ondiepe Zoommeer.

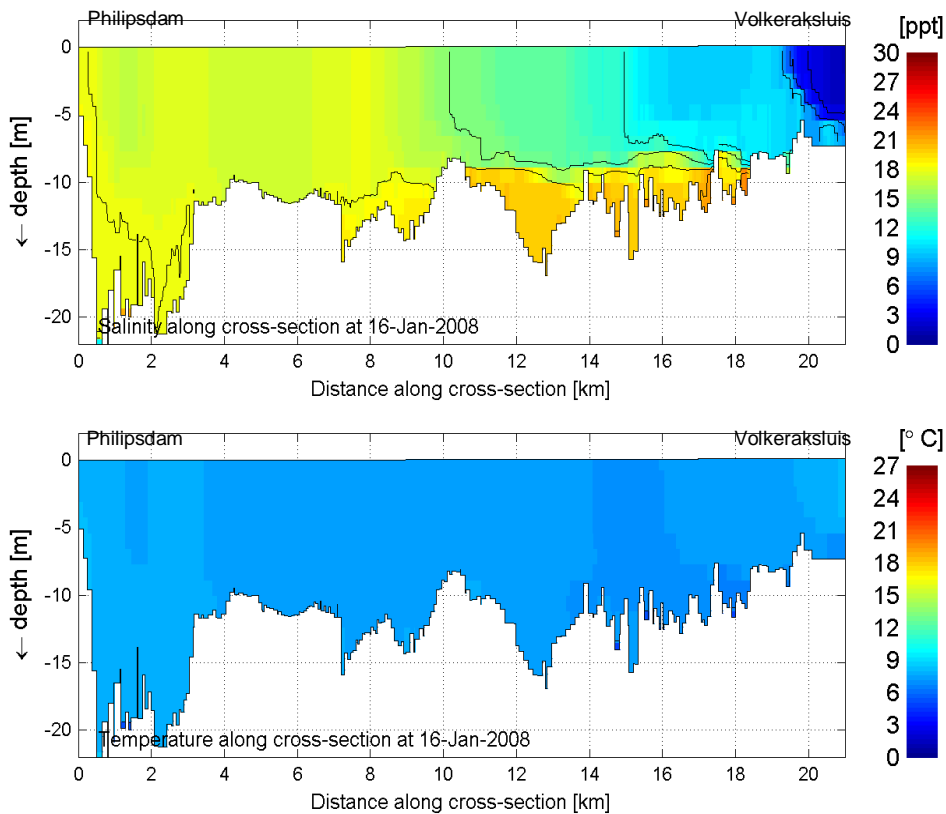
De thermische stratificatie is over het algemeen gering. In de winter is periodiek sprake van een iets koudere bovenlaag in het Volkerak, terwijl zich daar in de zomer juist een warmere bovenlaag voordoet. Afgezien van in de diepe put is in het Zoommeer nauwelijks sprake van thermische gelaagdheid.



Figuur 4.10 Dwarsdoorsnede langs transect (Volkerak: links, Zoommeer: rechts) van zout- en temperatuurverdeling op 31 januari 2008.



Figuur 4.11 Dwarsdoorsnede langs transect (Volkerak: links, Zoommeer: rechts) van zout en temperatuurverdeling op 31 juli 2008.



Figuur 4.12 Dwarsdoorsnede van de temperatuur en zoutverdeling door het Volkerak gedurende een periode waarin het systeem verticaal is gemengd (16 januari 2008).

Voornamelijk in de winter en in het voorjaar kan gedurende periodes met harde wind de zoutstratificatie in het Volkerak kortstondig worden doorbroken. Dit leidt tot lagere zoutgehalten nabij de bodem, met name in het gebied nabij de Volkeraksluis (Figuur 4.12) Perioden waarin het systeem in het Volkerak een gemengd karakter vertonen duren meestal enkele dagen (zie ook Figuur 4.7, Station Volkerak ([VSTO-V] 4).

4.3.6 Discussie van de simulatieresultaten

De hoogte van de voorspelde zoutgehalten

In vergelijking met de resultaten van het 1D model blijkt dat de gemiddelde zoutconcentratie in het VZM aanzienlijk hoger wordt voorspeld door het 3D model dan door het 1D model. Het gemiddelde verschil bedraagt ruim 5 ppt. De gehalten die voor de toplaag van het Volkerak en voor het Zoommeer worden voorspeld zijn ongeveer 4 ppt hoger in het 3D model. Waar het 1D model per segment een zoutgehalte berekent, wordt in het 3D model met veel hogere resolutie gerekend in zowel horizontale als verticale richting. De in het 1D model gemengde segmenten bestaan in het 3D model uit 20 lagen. Met name de verschillen tussen het transport in de onderlaag en de bovenlaag en de beperkte uitwisseling tussen deze lagen zorgen ervoor dat het 3D model andere resultaten oplevert dan het 1D model. De zoutstratificatie, waarbij het instromende water uit de Philipsdamopening onder het zoete water stroomt dat via de Volkeraksluizen naar binnen komt, leidt tot een verhoogde zoutconcentratie in de geulen van het Volkerak. Deze zoutstratificatie is relatief constant over het jaar. Daarnaast is in het 3D model vanwege de beperktere verticale menging sprake van een hogere zoutconcentratie in de onderlaag van het noordelijke uiteinde van het Schelde-Rijnkanaal (nabij Steenberg). Als gevolg van de gelaagdheid kan het zoute water uit de Oosterschelde in het 3D model verder doordringen in zowel het Volkerak als het Zoommeer dan in het 1D model.

De discrepantie tussen de 1D en 3D modellen als gevolg van gelaagdheid impliceert dat beide modellen de zoutgehalten in het VZM mogelijk enigszins ondervoorspellen. Het 3D model gebruikt immers de door het 1D model berekende zoutgehalten in de noordelijke tak van de Oosterschelde als randvoorwaarde. Deze zijn mogelijk enigszins onderschat vanwege het ontbreken van gelaagdheid in de Oosterschelde in het 1D model.

Vergelijking met een eerdere scenariosimulatie

In een voorafgaande studie waarbij sprake is van een zout Volkerak-Zoommeer (Deltares 2013b), werd het getijdesignaal en de zout-indringing via het Grevelingen opgelegd. Daarnaast werd ook een gemiddeld spuidebiet bij Bath van 101 m³/s toegepast. De berekende zoutgehalten komen in die studie significant hoger uit dan de in dit rapport gepresenteerde resultaten. Bij de voorafgaande studie ligt het volume-gemiddelde zoutgehalte voor het gehele VZM rond de 23 ppt, met minimale waarden rond 18 ppt. De minimale volume-gemiddelde waarde in het Volkerak bedraagt ongeveer 16 ppt. De zoutgehalten in de huidige studie zijn aanzienlijk lager, met een VZM volume-gemiddelde waarde van ongeveer 16 ppt.

De mate van zout-indringing in het Volkerak is voor beide modelstudies verschillend vanwege de andere inlaat-weg (via de Grevelingen versus via de Oosterschelde). Daarnaast is het volume-gemiddelde zoutgehalte in het Zoommeer in de huidige studie significant lager (14

ppt tegenover 18 ppt) vanwege de ontbrekende spui via de Bathse Spuisluis richting de Westerschelde. Daardoor is de doorstroming in het Zoommeer slechts zeer beperkt (via de Kreekraksluis), en wordt slechts in beperkte mate zout water vanuit het Volkerak richting het Zoommeer getransporteerd.

De aanwezigheid van een spui richting de Westerschelde blijkt van groot belang voor het creëren van een Volkerak-Zoommeer met een overal voldoende hoog zoutgehalte. Een uitstroom via Bath leidt ertoe dat meer water vanuit het Volkerak (uit de omgeving van Steenbergen) richting het Zoommeer stroomt. Dit water heeft in de huidige simulatie al een relatief hoog zoutgehalte, maar een grotere doorstroom zal er toe leiden dat het zoutgehalte tussen de Philipsdam en Steenbergen verder toeneemt.

5 Berekeningsresultaten voor scenario's met spui

De scenariosimulaties met spui bij Bath zijn uitgevoerd met de 1D modellen.

5.1 Het 1D Zuidwestelijke Delta waterbewegingsmodel

5.1.1 Beschrijving van het model

De modelinstellingen met betrekking tot de aanvoer via de Philipsdam voor het scenario zonder spui werden ongewijzigd gehandhaafd voor de simulaties met spui bij Bath. De aanvoer van zoet water is eveneens ongewijzigd. De modelinstellingen werden aangepast met betrekking tot de Bathse spuisluis. Deze sluis werd opengezet bij een positief verval en de breedte van de sluisopening werd ingesteld op de gewenste afvoer. Langs deze weg werd het spuidebiet stapsgewijs opgevoerd van 10, 30 en 65 m³/s tot een gemiddelde afvoer naar de Westerschelde van 90 m³/s. De verhoging tot dit debiet bleek nodig omdat bij lagere debieten ook in het 3D model bij lange na in het Volkerak-Zoommeer niet werd voldaan aan het saliniteitscriterium van 20 ppt. Bij het bereiken van de 90 m³/s werd afgezien van verdere verhoging van het spuidebiet, omdat dit met het oog op de mogelijke gevolgen voor de Westerschelde niet wenselijk is. We presenteren hieronder hoofzakelijk de resultaten met een gemiddeld spuidebiet bij Bath van 90 m³/s dat vrijwel overeenkomt met het spuidebiet in de voorkeursvariant P300 (Deltres, 2008).

5.1.2 De simulatieresultaten voor waterbalans en waterstanden

De modelresultaten van de waterstanden zijn in Tabel 5.1 weergegeven. De gemiddelde waterstand in het Volkerak benaderd de gewenste evenwichtstand van -0.1 m. NAP. In het Zoommeer zijn de waterstanden in dit scenario lager. Dit wordt veroorzaakt door het sterke spuidebiet bij de Bathse spuisluis.

De resulterende waterbalans is weergegeven in Tabel 5.2. Ten opzichte van de berekening zonder spui bij Bath, neemt het instromende debiet bij de Phillipsdam toe van 303 m³/s naar 341 m³/s. De instroming wordt dus groter en de uitwisseling wordt efficiënter bij gelijke afmetingen van het doorlaatmiddel.

Tabel 5.1 Waterstanden in het Volkerak en Zoommeer (zie tabel 4.2 voor waterstanden in het scenario zonder spui).

Waterstand (m. NAP)	Volkerak	Zoommeer
Gemiddelde waarde	-0.11	-0.14
Mediaan	-0.10	-0.16
Standaard dev	0.10	0.11
max (95 percentiel)	0.01	0.05
min (5 percentiel)	-0.26	-0.29

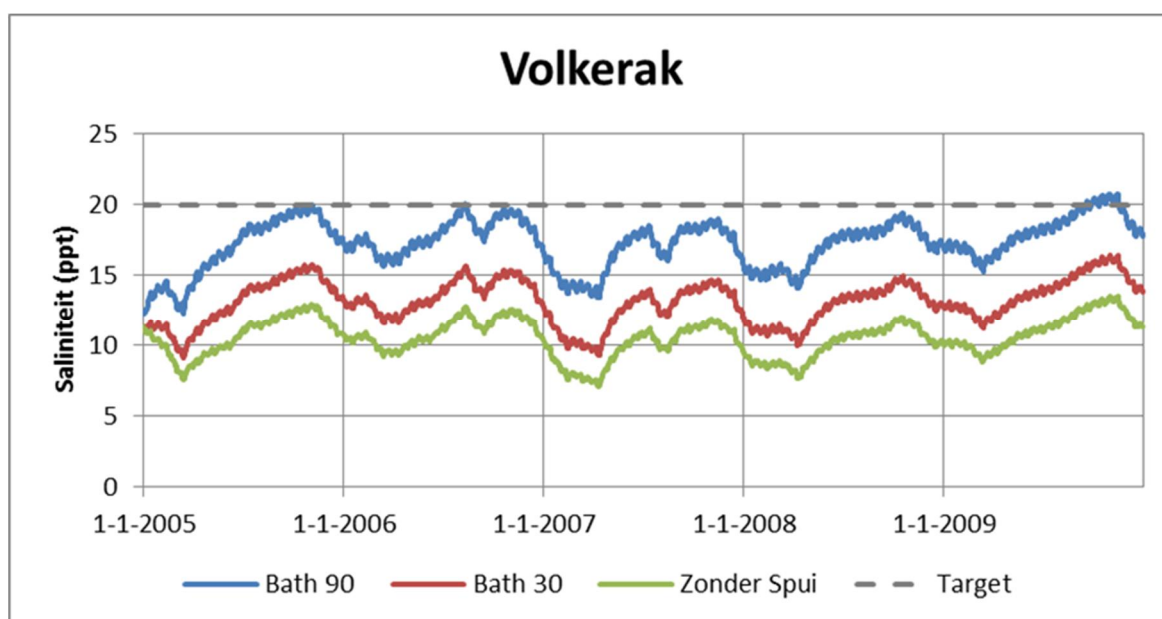
Tabel 5.2 Modelinstellingen en waterbalans (zie tabel 4.1 voor deze gegevens in het scenario *zonder spui*).

Model instellingen	Phillipsdam	Bathse Spuisluis
Qin (m ³ /s)	341	0
Qout (m ³ /s)	298	90
Breedte doorlaatwerk (m)	70	22
Trigger laag peil Volkerak (m NAP)	-0.25	nvt
Trigger hoog peil Volkerak (m NAP)	0	nvt
Trigger verval		pos. verval

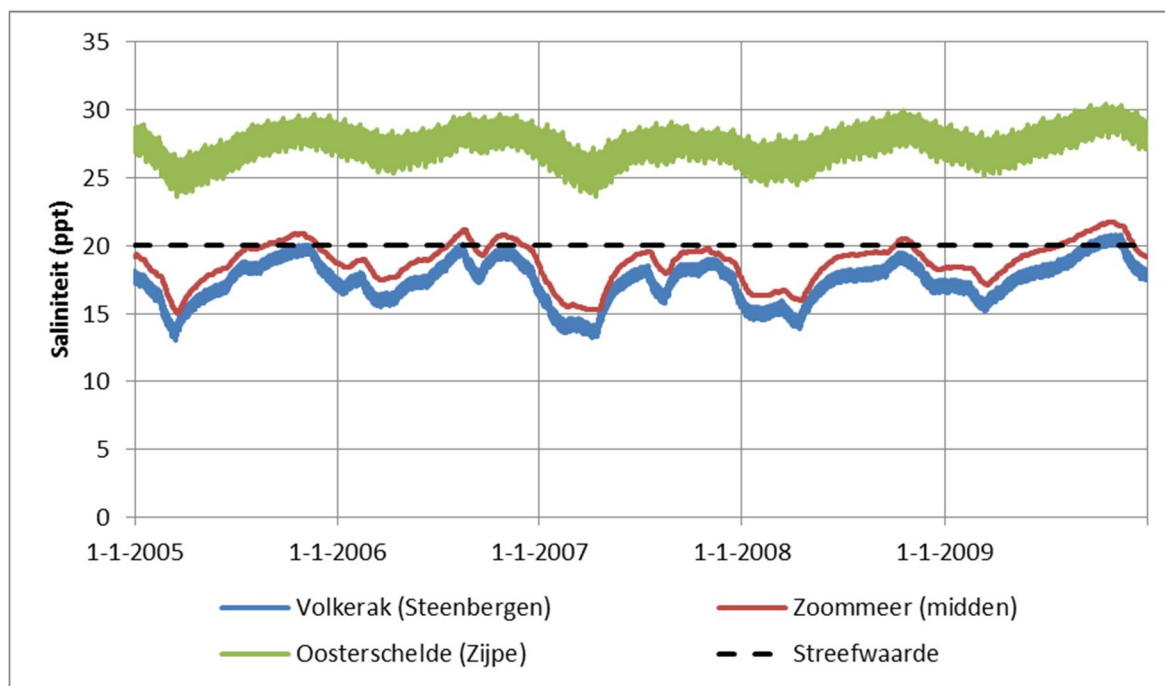
5.2 Het 1D Zuidwestelijke Delta waterkwaliteitsmodel

5.2.1 De simulatieresultaten voor zoutgehalten

Door gebruik te maken van de spui bij Bath worden de zoutgehalten op zowel het Volkerak als het Zoommeer aanzienlijk hoger. Figuur 5.1 toont de gesimuleerde zoutgehalten in het Volkerak bij toenemend spuidebiet. Het verloop van de zoutgehalten voor een spuidebiet van 90 m³/s is voor verschillende locaties weergegeven in Figuur 5.2. De gemiddelde zoutgehalten bij Steenberg en in het Zoommeer benaderen de streefwaarde van 20 ppt, maar blijven daar nog beduidend onder zoals blijkt uit Tabel 5.3. Tevens is te zien dat de zoutgehalten op het Zoommeer ruim 1 ppt hoger liggen dan in het Volkerak. Dit is te verklaren door het feit dat een deel van zoete water via de Phillipsdam naar de Oosterschelde zal stromen. Dit veroorzaakt een hoger zoutgehalte in het Zoommeer.



Figuur 5.1 Berekende saliniteit (ppt) in het Volkerak (Steenbergen) voor 3 spuiscenario's.



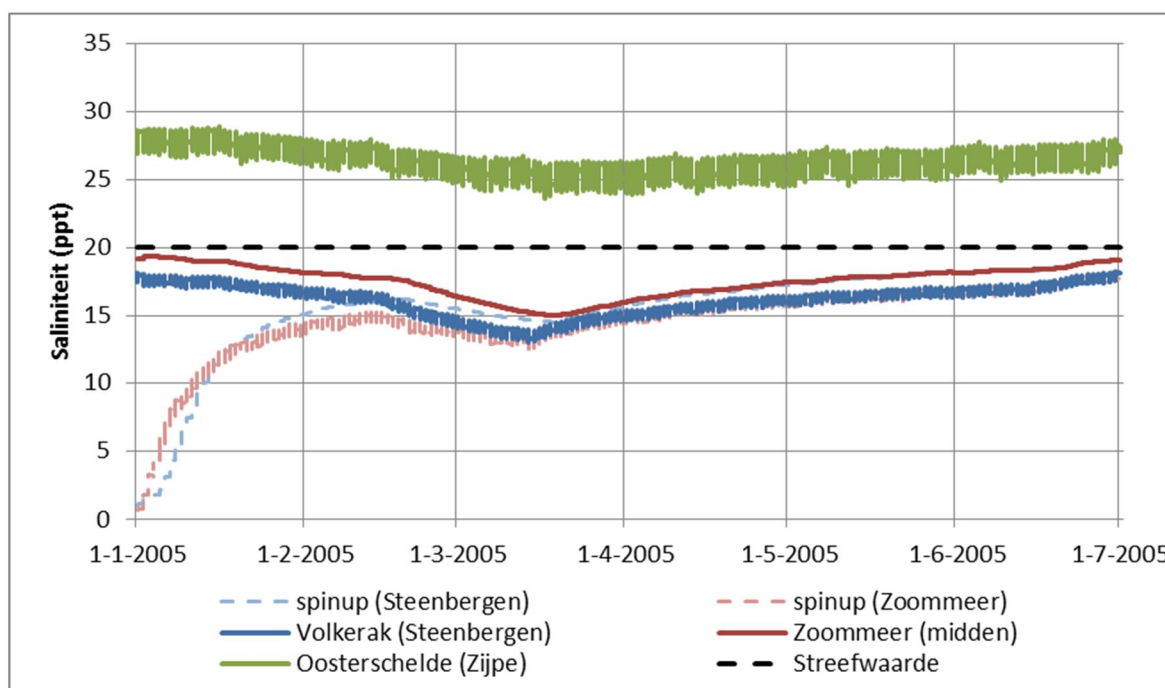
Figuur 5.2 Brekende saliniteit (ppt) voor 3 observatiepunten (Volkerak, Zoommeer en Oosterschelde). De initiële zoutgehalten zijn bepaald door middel van een spin-up simulatie.

Tabel 5.3 Overzicht van berekende saliniteit op 3 locaties in het model voor de scenario's met en zonder spui.

Saliniteit (ppt) locatie	Met spui (90 m ³ /s)		Zonder spui	
	Gemiddelde	Standaard deviatie	Gemiddelde	Standaard deviatie
Volkerak (Steenbergen)	17.4	1.6	10.6	1.4
Zoommeer (Midden)	18.8	1.5	10.1	1.1
Oosterschelde (Zijpe)	27.4	1.1	19.8	1.5

Op de Oosterschelde nemen de zoutgehalten ook toe. Slechts een gedeelte van het naar het VZM aangevoerde zoete water verlaat het Volkerak via de Oosterschelde. Een aanzienlijk deel wordt nu via het Zoommeer en de Bathse Spuisluis afgevoerd. De resulterende zoutgehalten zijn aanmerkelijk hoger dan in het scenario zonder spui.

De verversingssnelheid in het Volkerak-Zoommeer kan bepaald worden door de modelrun met spui te vergelijken met de modelrun die als spin-up is gebruikt. Figuur 5.3 geeft de zoutgehalten weer voor de eerste 6 maanden in 2005. De gestreepte lijnen die de resultaten van de spin-up simulatie weergeven beginnen bij een saliniteit van 0.5 – 1 ppt. Na ongeveer 3 maanden vertonen beide modelruns bij benadering vergelijkbare zoutgehalten. De verversingstijd van het water in het VZM is in dit scenario dus ongeveer 3 maanden.



Figuur 5.3 Saliniteit in ppt voor 3 observatiepunten (Volkerak, Zoommeer en Oosterschelde) voor de simulatie met $90 \text{ m}^3/\text{s}$ spui en de bijbehorende spin-up simulatie. Het verschil toont de verversingstijd in het VZM.

5.2.2 Discussie van de simulatieresultaten

De hoogte van de voorspelde zoutgehalten

Voor de situatie met een spuidebiet van $90 \text{ m}^3/\text{s}$ kan een geringere onder-voorspelling van de zoutgehalten in het VZM worden verwacht dan voor de situatie zonder spui. De zoutgehalten zijn nu immers veel hoger en liggen dus aanzienlijk dichterbij de maximaal te realiseren zoutgehalten. De mogelijke ondervoorspelling wordt geraamd op ongeveer 3 ppt. Indien daarmee rekening wordt gehouden liggen te verwachten gehalten in het Zoommeer in het algemeen tussen 18 en 24 ppt, gemiddeld dus net boven het streefgehalte. In het Volkerak liggen de te verwachten gemiddelde gehalten ongeveer 1.5 ppt lager, gemiddeld net onder het streefgehalte. Echter als gevolg van stratificatie zullen zoutgehalten in de bovenlaag er nog ongeveer 2 ppt lager kunnen zijn.

Vergelijking met eerdere scenariosimulaties

Tabel 5.4 verschaft een overzicht van de modelkenmerken en gesimuleerde zoutgehalten voor eerder uitgevoerde scenariosimulaties en de simulatie van de huidige studie.

Vergeleken met de berekeningen voor het voorkeursscenario P300 van Deltares (2008) vertonen de simulatieresultaten voor het huidige scenario met spui grote overeenkomsten. Beide scenario's hebben een vergelijkbaar spuidebiet van $90 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Bath. De bij de Philipsdam ingelaten hoeveelheden water verschilt wel sterk. In het huidige scenario is de netto aanvoer via de Philipsdam ongeveer $43 \text{ m}^3/\text{s}$. In het voorkeursscenario P300 wordt netto $64 \text{ m}^3/\text{s}$ aangevoerd. Het verschil is te verklaren door de zoetwateraanvoer via de Volkerak-

sluizen. In de huidige simulatie wordt een debiet van 25 m³/s aangenomen, terwijl in 2008 met 5 m³/s is gerekend.

Een belangrijk verschil tussen de simulaties voor het P300 scenario en het huidige scenario is dat er gebruik gemaakt is van verschillende modellen. Het Delft3D model uit 2008 bevat alleen het Volkerak-Zoommeer en heeft een opgedrukt zoutgehalte aan de rand bij de Phillipsdam gebaseerd op metingen. In het 1D model gebruikt voor het huidige scenario omvat de Oosterschelde in het modeldomein. Het zoutgehalte in de noordelijke tak van de Oosterschelde wordt dus dynamisch bepaald en staat onder invloed van de uitwisseling met het Volkerak. De gesimuleerde zoutgehalten in de Oosterschelde zullen daardoor lager zijn dan in de 3D simulatie.

De scenario's S2 en S3 hebben geen spui bij Bath maar twee verbindingen met de Oosterschelde (Deltares, 2014c). Het grootste deel van de zoutwateraanvoer vindt plaats via de Phillipsdam. De huidige simulatie met 90 m³/s spui bij Bath laat iets hogere zoutgehalten zien.

Tabel 5.4 Overzicht van de scenariosimulaties met betrekking tot een zout VZM.

Scenario / Modelkenmerken	Voorkeursvariant P300 (Deltares, 2008)	Scenario's S2 en S3 (Deltares, 2014c)	Scenario met spui Huidige studie
Toegepast model	3D (Delft 3D)	1D (Sobek)	1D (Sobek)
Rand Phillipsdam	Gebaseerd op metingen (Zijpe)	Gesimuleerd binnen het 1D model	Gesimuleerd binnen het 1D model
Spui Bath	90 m ³ /s	-	90 m ³ /s
Openingen naar de Oosterschelde	Phillipsdam	Phillipsdam en Oesterdam	Phillipsdam
Uitwisseling met de Oosterschelde	268 m ³ /s in 204 m ³ /s uit netto 64 m ³ /s	netto 55-65 m ³ /s	341 m ³ /s in 298 m ³ /s uit netto 43 m ³ /s
Aanvoer via de Volkerak-sluizen	5 m ³ /s	25 m ³ /s	25 m ³ /s
Gemiddelde saliniteit Volkerak	23 ppt	16 – 18 ppt	17.4 ppt
Gemiddelde saliniteit Zoommeer	27 ppt	16 – 18 ppt	18.8 ppt

6 Samenvatting, conclusies en discussie

Met behulp van 1D Sobek waterbewegings- en waterkwaliteitsmodellen voor de Zuid-westelijke Delta en een 3D Delft3D-FLOW hydrodynamisch model voor het Volkerak-Zoommeer (VZM) werd onderzocht of een voldoende goede waterkwaliteit zich zal kunnen ontwikkelen in een zout VZM bij de afwezigheid van spui via het Zoommeer. Zout water wordt in de beschouwde scenario's naar het VZM aangevoerd uit de Oosterschelde via de Philipsdam.

De simulaties zonder spui wezen uit dat de zoutgehalten in dat geval ver onder het streefgehalte van 20 ppt zullen liggen. Deze conclusie geldt voor de resultaten van zowel het 1D Sobek waterkwaliteitsmodel als het 3D Delft3D-FLOW model.

Vervolgens werden modelsimulaties met de 1D modellen uitgevoerd met een stapsgewijs toenemend spuidebiet door de Bathse spuisluis. Het debiet moest worden opgevoerd tot 90 m³/s voordat de gesimuleerde zoutgehalten in het Volkerak en het Zoommeer het streefgehalte benaderden. Echter, dit hoge debiet geeft problemen bij lage afvoer van de Schelde, zoals blijkt uit eerder 3D modelonderzoek (Deltares, 2014a). Er kunnen dan onwenselijk hoge zoutgehalten in de Zeeschelde optreden. Ook bij een spuidebiet van 90 m³/s liggen de met het 1D-model gesimuleerde zoutgehalten in grote delen van het VZM nog beduidend onder het streefgehalte. Gegeven het primaire belang van voldoende hoge zoutgehalten werd afgezien van de uitvoering van 3D vervolgsimulaties van waterbeweging en waterkwaliteit.

Bij deze conclusies dienen de volgende kanttekeningen te worden gezet. Het 3D model voorspelt hogere zoutgehalten dan het 1D model. In het 1D model is elk segment volledig gemengd. Het 3D model heeft een veel hogere ruimtelijke resolutie en simuleert zoutstratificatie en thermische stratificatie. Daarbij treden in dit model grote verschillen tussen het transport in de onderlaag en de bovenlaag op en vindt er beperkte uitwisseling tussen deze lagen plaats. Als gevolg van de gelaagdheid kan het zoute water uit de Oosterschelde in het 3D model verder doordringen in zowel het Volkerak als het Zoommeer dan in het 1D model. De discrepantie tussen de 1D en 3D modellen impliceert dat beide modellen de zoutgehalten in het VZM mogelijk enigszins ondervoorspellen. Het 3D model gebruikt immers de door het 1D model berekende zoutgehalten in de noordelijke tak van de Oosterschelde als randvoorwaarde. Deze zijn eveneens enigszins onderschat.

Voor de gesimuleerde situatie zonder spui berekent het 1D model gemiddelde zoutgehalten voor het gehele VZM die ruim 5 ppt onder door het 3D model berekende gemiddelde zoutgehalten liggen. De zoutgehalten van de bovenlaag van het Volkerak en de zoutgehalten van het zwak gestratificeerde Zoommeer liggen in het 3D model ongeveer 4 ppt hoger.

Voor de gesimuleerde situatie met een spuidebiet van 90 m³/s kan een geringere ondervoorspelling van de zoutgehalten in het VZM worden verwacht, namelijk ongeveer 3 ppt. Indien met deze ondervoorspelling rekening wordt gehouden liggen te verwachten gehalten in het Zoommeer in het algemeen tussen 18 en 24 ppt, gemiddeld dus net boven het streefgehalte. In het Volkerak liggen de te verwachten gemiddelde gehalten ongeveer 1.5 ppt lager, gemiddeld net onder het streefgehalte. Echter als gevolg van stratificatie zullen zoutgehalten in de bovenlaag er nog ongeveer 2 ppt lager kunnen zijn.

Op grond van het bovenstaande is de belangrijkste conclusie van deze studie dat het waarschijnlijk niet mogelijk is om met een doorlaatmiddel in de Philipsdam dat een getij van ca. 30 cm oplevert een zoutgehalte van minimaal 20 ppt te realiseren in het Volkerak-Zoommeer zonder een spuidebiet uit het Zoommeer van ca. 90 m³/s.

Bij toekomstige studies verdient het de voorkeur niet alleen het VZM maar ook de Oosterschelde driedimensionaal te simuleren, zodat de randvoorwaarden op de verbindingen tussen VZM en Oosterschelde nauwkeuriger kunnen worden berekend.

7 Literatuur referenties

Deltares, 2015a.

D-Water Quality. Water Quality and Aquatic Ecology, User Manual and Technical Reference Manual.

Deltares, 2015b.

Delft3D-FLOW. Hydrodynamics, User Manual.

Deltares, 2014a.

Effect zoute spui Bath op saliniteit, slibdynamica en ecologie Zeeschelde. Rapport 1208863 (C. Kuijper, T. van Kessel, P. Meire).

Deltares, 2014b.

Zuidwestelijk Delta-model voor Stofstroomanalyses, Beschrijving en validatie. Rapport 1208495 (Jos van Gils).

Deltares, 2014c.

Zuidwestelijk Delta-model voor Stofstroomanalyses, Scenarioberekeningen. Rapport 1208495 (Jos van Gils).

Deltares, 2013a.

Effectiviteit en effect van winterdoorspoeling van het Volkerak-Zoommeer, Modelstudie en beknopte data-analyse. Rapport 1208550 (A.J. Nolte, B. Stengs, C.A. Schipper).

Deltares, 2013b.

Verwachte waterkwaliteit in een verbonden en zout Grevelingen - Volkerak-Zoommeer met getij, Resultaten van 1D en 3D modellering. Rapport 1207783 (Ies de Vries, Chris Sprengers, Arno Nolte, Bas Stengs, Otto Weiler, Tom Jongeling).

Deltares, 2012.

Verkennd onderzoek haalbaarheid innovatief zout/zoet-scheidingsstelsel Krammersluizen. Rapport 1205977 (D. Dillingh, R.E. Uittenbogaard, G.H. Keetels).

Deltares, 2008.

Waterkwaliteit en ecotopen in een zout Volkerak-Zoommeer. Planstudie Volkerak-Zoommeer. Rapport Q4448.

A De gebruikte modellen

In tabellen A.1-3 worden de kenmerken van de gebruikte modellen beschreven.

Tabel A.1: Het 1D Zuidwestelijke Delta waterbewegingsmodel

Aspect	Kenmerken
Software	Sobek (2.12.001) met FLOW (sobeksim version 4.00.04)
Schematisatie	Rekengrid en numerieke solver conform Deltares (2014b)
Status	Gekalibreerd en gevalideerd voor het zoete VZM zoals beschreven in Deltares (2014b); Niet gekalibreerd voor het zoute VZM
Simulatieperiode	2005-2009
Systeemdefinitie	Invoerparameters voor processen conform Deltares (2014b)
Randvoorwaarden	Randvoorwaarden conform Deltares (2014b)
Meteoforcering	Meteorologische forcering conform Deltares (2014b)
Waterbeweging	Hydrologische forcering conform Deltares (2014b)
Initiële condities	Waterstanden door middel van spin-up simulatie
Bijzonderheden	<p>Neerslag en verdamping VZM niet beschouwd conform Deltares (2014b)</p> <p>Phillipsdam:</p> <p>Uitwisseling Oosterschelde en VZM via Krammersluizen via doorlaatmiddel Phillipsdam (id PHIL_OPEN) afgeregeld op waterstanden ter hoogte van Steenberg. Max waterstand = 0 m.NAP, min waterstand = -0.25 m. NAP.</p> <p>Breedte doorlaatmiddel: 70 m.</p> <p>Bathse Spuisluis:</p> <p>In scenario met spui, bij positief verval over Zoommeer → Westerschelde: Bath open.</p> <p>Breedte van de spui: 22 m.</p>

Tabel A.2: Het 1D Zuidwestelijke Delta waterkwaliteitsmodel

Aspect	Kenmerken
Software	Sobek (2.12.001) met WAQ (Delft3D-WAQ version 4.5208 12-08-2010)
Schematisatie	Rekengrid en numerieke solver conform Deltares (2014b)
Status	Gekalibreerd en gevalideerd voor het zoete VZM zoals beschreven in Deltares (2014b); Niet gekalibreerd voor het zoute VZM
Simulatieperiode	2005-2009
Systeemdefinitie	Stoffen, processen, bijbehorende invoerparameters en dispersiecoëfficiënten conform Deltares (2014b)
Randvoorwaarden	Randvoorwaarden conform Deltares (2014b)
Meteoforcering	Meteorologische forcering conform Deltares (2014b)
Belastingen	Belasting over randen en laterale belastingen conform Deltares (2014b)
Waterbeweging	Gesimuleerde waterbeweging conform het 1D Zuidwestelijke Delta waterbewegingsmodel (tabel A.1)
Initiële condities	Concentraties door middel van spin-up simulatie
Bijzonderheden	Neerslag, verdamping en atmosferische depositie VZM niet beschouwd conform Deltares (2014b) Graasdruk VZM gebaseerd op die van het Grevelingen (Deltares, 2013b), geoptimaliseerd naar voedselbeschikbaarheid

Tabel A.3: Het 3D Volkerak-Zoommeer hydrodynamische model

Aspect	Kenmerken
Software	Delft3D - FLOW (6.01.07.3574)
Schematisatie	Rekengrid z-lagen en numerieke solver conform Deltares (2012)
Status	Geen RWS model; Gekalibreerd voor het zoete VZM; Niet gekalibreerd voor het zoute VZM
Simulatieperiode	2005-2009
Systeemdefinitie	Zout en temperatuur meegemodelleerd Invoerparameters voor processen conform Deltares (2012)
Randvoorwaarden	Gesimuleerde randvoorwaarden conform het 1D Zuidwestelijke Delta waterbewegingsmodel (tabel A.1; waterbeweging) en waterkwaliteitsmodel (tabel A.2; zoutgehalten). De weekgemiddelde gemeten temperatuur bij Vlissingen wordt gebuikt als temperatuur-randvoorwaarden. Dit komt overeen met 1D Zuidwestelijke Delta waterkwaliteitsmodel.
Meteoforcering	Meteorologische forcering (windrichting, -snelheid, relatieve luchtvochtigheid, en bewolkingsgraad) op basis van urengegevens van gemiddeldes van meetstations Vlissingen en Rotterdam van het KNMI voor 2005 tot en met 2009. Voor de temperatuurberekening is gebruik gemaakt van bewolkingsgraad in plaats van instraling.
Waterbeweging	Gesimuleerde waterbeweging op de randen conform het 1D Zuidwestelijke Delta waterbewegingsmodel (tabel A.1)
Initiële condities	Initiële zoutgehalte (10 ppt) en temperatuur (10 °C).
Bijzonderheden	Neerslag en verdamping VZM niet beschouwd conform het 1D Zuidwestelijke Delta waterbewegingsmodel (tabel A.1)