

Ontwikkeling zesde-generatie 3D Noordzeekanaal Amsterdam-Rijnkanaal model

Aanvullende analyses 2022: Z-sigma en Selectieve Onttrekking IJmuiden



Ontwikkeling zesde-generatie 3D Noordzeekanaal Amsterdam-Rijnkanaal model
Aanvullende analyses 2022: Z-sigma en Selectieve Onttrekking IJmuiden

Auteur(s)

Wilbert Verbruggen

Jos van der Baan

Ontwikkeling zesde-generatie 3D Noordzeekanaal Amsterdam-Rijnkanaal model

Aanvullende analyses 2022: Z-sigma en Selectieve Onttrekking IJmuiden

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Martin Scholten, Yann Friocourt.
Referenties	
Trefwoorden	Noordzeekanaal, Amsterdam-Rijnkanaal, D-HYDRO Suite, zesde generatie, Modelschematisaties, KPP, D-FLOW Flexible Mesh, Selectieve Onttrekking, SO-IJ, Z-Sigma

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	19-12-2022
Projectnummer	11208053-009
Document ID	11208053-009-ZWS-0005
Pagina's	47
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Wilbert Verbruggen	
	Jos van der Baan	

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de in 2022 uitgevoerde werkzaamheden aan de zesde-generatie modelschematisatie van het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal (NZK/ARK). In dit project is gekeken naar de mogelijkheden om de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden (SO-IJ) te schematiseren, zodat toekomstige vragen rondom de SO-IJ ook met D-HYDRO onderzocht kunnen worden. Daarnaast is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met betrekking tot twee verschillende Z-sigma configuraties, omdat deze lagenschematisatie mogelijk onderdeel gaat worden van de standaard instellingen voor 3D zesde-generatiemodellen.

In 2025 komt de SO-IJ bij de monding van het Binnenspuikanaal gereed. Het doel van de Selectieve Onttrekking is om door middel van een diepgelegen 'spleet' effectief zout vanuit de Velserskom af te voeren via het spui-maalcomplex. Binnen het huidige project is gekeken hoe deze constructie opgenomen kan worden in het D-HYDRO model voor het NZK/ARK en hoe de gemodelleerde effectiviteit voor zoutafvoer zich verhoudt ten opzichte van eerdere (CFD en Delft3D4) berekeningen beschreven in Bijlsma en Weiler (2019) en daarin opgenomen referenties. Op basis van dit project kan geconcludeerd worden dat de SO-IJ succesvol opgenomen kan worden in het zesde-generatiemodel met behulp van de 'general structure' benadering. De zouttransporten in een uitgeknipte versie van het zesde-generatiemodel zijn zeer vergelijkbaar met de nauwkeurig geachte CFD resultaten uit Bijlsma et al. (2020) en iets lager dan de Delft3D4 simulaties. Het wordt aanbevolen om na realisatie van de SO-IJ, metingen te doen om de werkelijke effectiviteit te bepalen. Op basis hiervan kan de 'general structure' benadering in D-HYDRO verder afgeregeld worden.

Voor de verticale lagenschematisatie kan in D-HYDRO gekozen worden uit 3 opties: 1) sigma lagen, waarbij zowel de lokale diepte als de lokale, momentane waterstand wordt gevolgd met een vast aantal lagen, 2) Z-lagen, waarbij de laagovergangen op vaste dieptes liggen en het aantal lagen dus afhangt van de lokale waterdiepte, 3) een combinatie van beide, waarbij Z-lagen onderin de waterkolom worden gebruikt en sigma lagen in het bovenste gedeelte van de waterkolom. Op deze manier kan mogelijk de kracht van beide schematisaties benut worden (behoud van stratificatie met behulp van de Z-lagen en het volgen van de waterstand met behulp van de sigma lagen aan het wateroppervlak). Voor de Z-sigma gevoeligheidsanalyse zijn twee Z-sigma simulaties uitgevoerd; één met 3 sigma lagen aan het oppervlak en één met 5 sigma lagen. Over het algemeen zijn de gemodelleerde debieten, waterstanden, zoutgehaltes en temperaturen in de Z-sigma simulaties gelijk aan de oorspronkelijke simulatie waarin alleen Z-lagen zijn gebruikt. Op een aantal (ondiepe) locaties zijn kleine verschillen te zien met betrekking tot de gemodelleerde zoutgehaltes. Bij Zijkanaal C leidt dit tot een groter verschil met de metingen en bij Diemen tot een iets kleiner verschil. In algemene zin kan gesteld worden dat de prestatie van het model nauwelijks is beïnvloedt door de geteste Z-sigma configuraties (3 en 5 sigma lagen). Lokaal zijn er wel kleine verschillen te zien. De oorzaak hiervan moet nog verder onderzocht worden. Aanbevolen wordt om te testen of het gebruiken van meer sigma-lagen (bijvoorbeeld 7 of 10) tot verbetering leidt in Zijkanaal C en het Amsterdam-Rijnkanaal.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Achtergrond	6
1.2	Doel	6
1.3	Gebruikte programmatuur en hardware	7
1.4	Organisatie en bijdragen	7
1.5	Leeswijzer	7
2	Opzet en verificatie van Selectieve Onttrekking	8
2.1	Beknopte beschrijving eerdere studies	8
2.2	Opzet model voor de verificatie van de SO-IJ	12
2.3	Resultaten verificatie	16
2.3.1	Overzicht	16
2.3.2	100 m ³ /s	18
2.3.3	700 m ³ /s	20
2.4	Conclusies verificatie	23
3	Gevoeligheidsanalyse Z-sigma	25
3.1	Introductie	25
3.2	Modelopzet	25
3.3	Gevoeligheidsanalyse	27
3.3.1	Vergelijking met waterstandsmetingen	27
3.3.2	Vergelijking met debietmeting bij Weesp	28
3.3.3	Vergelijking met stationsmetingen voor zout	29
3.3.4	Vergelijking met stationsmetingen voor temperatuur	33
3.3.5	Vergelijking cumulatief zouttransport	35
3.4	Conclusies gevoeligheidsanalyse	38
4	Conclusies en aanbevelingen	39
	Referenties	40
A	Resultaten 300 m³/s en 500 m³/s	41
A.1	300 m ³ /s	41
A.2	500 m ³ /s	44

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Op initiatief van Rijkswaterstaat is Deltares in samenwerking met Arcadis in 2018 begonnen aan een 3D D-Flow FM pilotstudie voor het Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal (Verbruggen et al., 2019). Het doel van deze studie was het (verder) ontwikkelen van een 3D model van het Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal, opgezet door Arcadis (van Banning et al., 2016), met behulp van de D-Hydro software. In 2020 is dit 3D model als basis gebruikt voor het maken van het zesde-generatie model van het Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal. De modelopzet, kalibratie en validatie zijn beschreven in Verbruggen en van der Baan (2020).

In de huidige studie is het model uit 2020 als basis gebruikt om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren m.b.t. de verticale schematisatie. Voor de verticale lagenschematisatie kan in D-HYDRO gekozen worden uit 3 opties: 1) sigma lagen, waarbij zowel de lokale diepte als de lokale, momentane waterstand wordt gevolgd met een vast aantal lagen, 2) Z-lagen, waarbij de laagovergangen op vaste dieptes liggen en het aantal lagen dus afhangt van de lokale waterdiepte, 3) een combinatie van beide, waarbij Z-lagen onderin de waterkolom worden gebruikt en sigma lagen in het bovenste gedeelte van de waterkolom. Op deze manier kan mogelijk de kracht van beide schematisaties benut worden (behoud van stratificatie met behulp van de Z-lagen en het volgen van de waterstand met behulp van de sigma lagen aan het wateroppervlak). Voor andere deelgebieden wordt overwogen om overwogen om standaard gebruik te gaan maken van Z-sigma lagen. Vanuit RWS kwam daarom het verzoek om te analyseren wat de gevolgen zouden zijn voor het NZK/ARK model indien er standaard gebruik gemaakt zou moeten worden van Z-sigma lagen. In deze analyse is een vergelijking gemaakt tussen de oorspronkelijke Z-lagen schematisatie en twee verschillende Z-sigma schematisaties. Daarnaast is in deze studie ook gekeken naar de mogelijkheden om de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden (SO-IJ) te schematiseren, zodat toekomstige vragen rondom de SO-IJ ook met D-HYDRO onderzocht kunnen worden. De prestatie van de SO-IJ in het D-HYDRO model is vergeleken met eerdere studies waarin dit is geanalyseerd middels CFD en Delft3D4 berekeningen. De resultaten van deze studie zijn beschreven in de voorliggende rapportage.

1.2 Doel

In het werkplan zijn de volgende doelen/taken omschreven:

- Taak 1: Implementeren Zeesluis IJmuiden: Het doel is om op basis van de in 2020 opgezette zesde-generatiemodel van het NZK/ARK een nieuwe schematisatie op te zetten waarbij de Zeesluis IJmuiden is opgenomen.
- Taak 2: Implementeren Selectieve Onttrekking: Het doel is om te onderzoeken hoe de Selectieve Onttrekking opgenomen kan worden in het zesde-generatiemodel van het NZK/ARK. Hierbij zal een verificatie tegen eerdere berekeningen (CFD en Delft3D4) gedaan worden.
- Taak 3: Testen Z-sigma schematisatie: Het doel is om te onderzoeken wat het effect is van het gebruiken van een Z-sigma schematisatie in plaats van een Z-lagen schematisatie, zoals toegepast in Verbruggen en van der Baan (2020).
- Taak 4: Het aanpassen van de mappenstructuur van het zesde-generatiemodel van het NZK/ARK in het versiebeheersysteem Subversion, zodat de opzet consistent is met andere deelgebieden.

Gedurende dit project bleek er niet genoeg data beschikbaar (voornamelijk ontbrekende bodemgegevens) om Taak 1 uit te voeren. In overleg met RWS (Martin Scholten) is besloten om Taak 1 daarom te laten vervallen. Het huidige rapport beschrijft de resultaten van Taak 2 en Taak 3. Taak 4 is niet beschreven in deze rapportage, aangezien het hier alleen gaat om een aanpassing op Subversion.

1.3 Gebruikte programmatuur en hardware

Binnen het project is continu gewerkt met recente versies van de software. Op die manier zijn zowel autonome ontwikkelingen als specifieke features voor dit project meegenomen. De softwareversies waarvan in dit rapport gebruik wordt gemaakt, zijn:

Onder Windows:

- RGFRID 6.03.00.67532.

Rekenharten op Linux:

- Voor Taak 2: DIMR 2.21.14.76718 (14 september 2022);
- Voor Taak 3: DIMR 2.17.12_patch01.73720 (correspondeert met D-HYDRO Suite 2022.01_patch01).

1.4 Organisatie en bijdragen

De modellering en rapportage is uitgevoerd door Deltares in samenwerking met Arcadis. Vanuit Deltares is het werk vooral uitgevoerd door Wilbert Verbruggen en vanuit Arcadis door Jos van der Baan. Tijdens de modellering is ook regelmatig contact geweest met Herman Kernkamp over software gerelateerde zaken. Door Arnout Bijlsma is de review van de rapportage uitgevoerd.

1.5 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 worden de resultaten met betrekking tot Taak 2 (Implementatie van de Selectieve Onttrekking in D-HYDRO) beschreven. Hierbij wordt eerst een beknopte samenvatting gegeven van de CFD en Delft3D4 simulaties die in eerdere studies zijn uitgevoerd en in deze studie zijn gebruikt ter verificatie. Vervolgens wordt beschreven hoe de Selectieve Onttrekking is opgenomen in het D-HYDRO model en hoe de gemodelleerde zoutlast verhoudt tot de eerdere CFD en Delft3D4 berekeningen.

In Hoofdstuk 3 wordt een gevoeligheidsanalyse met betrekking tot de Z-sigma lagenschematisatie beschreven (Taak 3). Eerst worden de aangepaste instellingen beschreven, waarna de gevoeligheid wordt geanalyseerd met betrekking tot de gemodelleerde waterstanden, debieten, zoutgehaltenes en temperaturen.

Beide hierboven beschreven hoofdstukken worden afgesloten met een paragraaf waarin de gedetailleerde conclusies voor beide taken worden beschreven. De hoofdconclusies en aanbevelingen worden samengevat in Hoofdstuk 4.

2 Opzet en verificatie van Selectieve Onttrekking

In 2025 komt de Selectieve Onttrekking IJmuiden (SO-IJ) bij de monding van het Binnenspuikanaal gereed. Het doel van SO-IJ is om effectief zout vanuit de Velserkom af te voeren via het spui-maalcomplex. Binnen het huidige project is gekeken hoe deze constructie opgenomen kan worden in het D-HYDRO model voor het NZK/ARK en hoe de gemodelleerde effectiviteit voor zoutafvoer zich verhoudt ten opzichte van eerdere (CFD en Delft3D4) berekeningen beschreven in Bijlsma en Weiler (2019) en daarin opgenomen referenties.

In paragraaf 2.1 worden deze simulaties beknopt beschreven. In paragraaf 2.2 wordt beschreven hoe de SO-IJ kan worden geschematiseerd in D-HYDRO en welke modellen zijn opgezet ter verificatie. Vervolgens worden de resultaten gepresenteerd in paragraaf 2.3 en wordt er afgesloten met conclusies in paragraaf 2.4.

2.1 Beknopte beschrijving eerdere studies

In het ontwerpproces van de SO-IJ zijn verschillende ontwerpvarianten gemodelleerd met behulp van CFD en Delft3D4. In dit project zijn de simulaties voor Variant 3 gebruikt, omdat dit goed aansluit bij het uiteindelijke ontwerp en omdat deze ontwerpvariant het meest gedetailleerd is beschouwd. De gebruikte modellen en simulaties zijn hieronder beknopt beschreven. Voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar Bijlsma en Weiler (2019) en Bijlsma et al (2020).

Bij SO-IJ Variant 3 is er ter plaatse van de selectieve onttrekking (nummer 1 in Figuur 2-1) een spleet tussen -16 m NAP en -23 m NAP. Het zoutscherm heeft een totale breedte van 80 m en dus een totaal doorstromend oppervlak van 560 m². Het ontwerp van de bodem en de vleugelwanden is geoptimaliseerd zodat loslating van de stroming zoveel mogelijk voorkomen wordt. Op basis van deze ontwerpvariant zijn nog enkele verdere optimalisaties verkend, maar het uiteindelijke ontwerp is in grote lijn nog hetzelfde als Variant 3.

De 3D CFD simulaties zijn uitgevoerd met het 'multi-physics Computational Fluid Dynamics' programma Star-CCM+. Het domein van het model (Figuur 2-1) is gebaseerd op de afmetingen van de schaalmodelproef die zijn uitgevoerd in het laboratorium van Deltares (de Fockert et al., 2022). Bij de spleet onder het zoutscherm zijn de roosterafmetingen 1 m horizontaal en 0,5 m verticaal. Langs dichte wanden is het rooster fijner. Met het CFD model zijn 3 verschillende afvoerdebieten gesimuleerd: 100 m³/s, 300 m³/s en 700 m³/s¹. Deze afvoerdebieten zijn opgelegd op de benedenstroomse rand in het Binnenspuikanaal. Op de bovenstroomse rand (Noordzeekanaal) wordt het verticale zoutprofiel en het kanaalpeil voorgeschreven. Hiervoor is een relatief extreem zoutprofiel gebruikt, gemeten op 4 augustus 2015 in het Noorderbinnentoeleidingskanaal, zie Figuur 2-3. Het zoutprofiel is gecombineerd met het kanaalpeil (-0.4 m NAP) tot een hydrostatisch drukprofiel. Bij de uitstroomrand wordt het zoutprofiel volledig bepaald door het CFD model (i.e. niet voorgeschreven). Het hierboven beschreven zoutprofiel is ook gebruikt voor de initiële condities van het model.

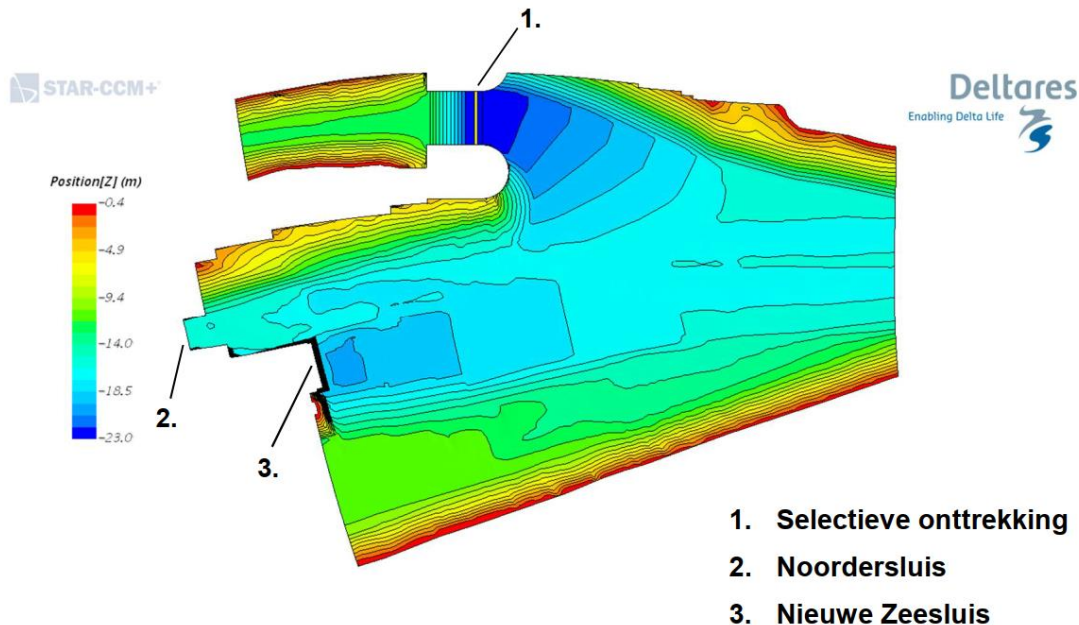
¹ Voor een ander ontwerp van de Selectieve Onttrekking (het Referentieontwerp waarbij pijlers aanwezig waren onder het zoutscherm) is het CFD model gevalideerd tegen een schaalmodelproef (de Fockert et al., 2022). Voor deze validatie was het CFD model op dezelfde schaal uitgevoerd als toegepast voor de schaalmodelproef. Op basis van deze validatie is geconcludeerd dat het CFD model in staat is om de complexe stroomvelden rond het zoutscherm weer te geven binnen acceptabele grenzen.

De sluisen worden in deze simulatie niet bedient, er vindt dus geen zoutflux plaats vanuit de sluisen. De gemodelleerde zoutflux is gemiddeld over de periode van 2,5 uur tot 4 uur na start van de simulaties. De eerste 2,5 uur zijn genegeerd om het model de gelegenheid te geven om in te spelen.

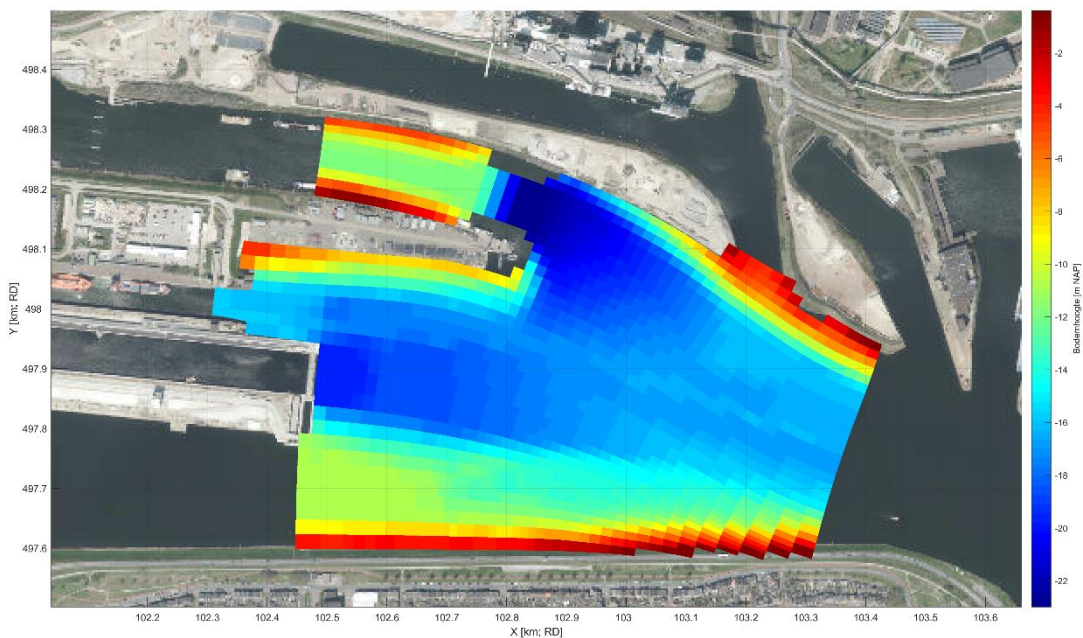
Voor dezelfde condities en modelomvang zijn simulaties uitgevoerd met een fijn Delft3D4 model met een resolutie van 16 m in de horizontaal en 20 sigma-lagen in de verticaal ontleend aan het Delft3D4 model toegepast in Verbruggen (2019), zie Figuur 2-2 voor de bodemschematisatie. Ter hoogte van de SO-IJ zijn dichte schotten toegepast tussen de rekencellen in de bovenste 14 van de 20 lagen over een breedte van 80 m (5 roostercellen). Daardoor is de spleet niet exact 7 m hoog, maar 6,78 m bij een waterstand van -0,4 m NAP en een lokale bodemdiepte van -23 m NAP. De locaties van de randvoorwaarden en de type randvoorwaarden zijn zoveel mogelijk consistent gehouden met het CFD model: uniform opgelegd afvoerdebiet bij de open rand in het Binnenspuikanaal en een zoutprofiel in combinatie met een waterstand van -0.4 m NAP bij de oostelijke open rand (Noordzeekanaal). Consistent met de CFD berekeningen werden de resultaten gemiddeld over de periode vanaf 2,5 uur tot 4 uur na start van de simulaties.

Deze simulaties werden gebruikt om de gemodelleerde zoutafvoer in Delft3D4 te vergelijken met de resultaten van CFD berekeningen. Uit de vergelijking bleek dat het Delft3D4 model qua zoutafvoer vergelijkbare resultaten oplevert als de 3D CFD simulaties onder deze condities. Bij een lage afvoer voert het Delft3D4 vrijwel evenveel zout af als het CFD model. Bij hoge afvoeren voert het Delft3D4 model iets meer zout af (8% bij 700 m³/s) dan het CFD model.

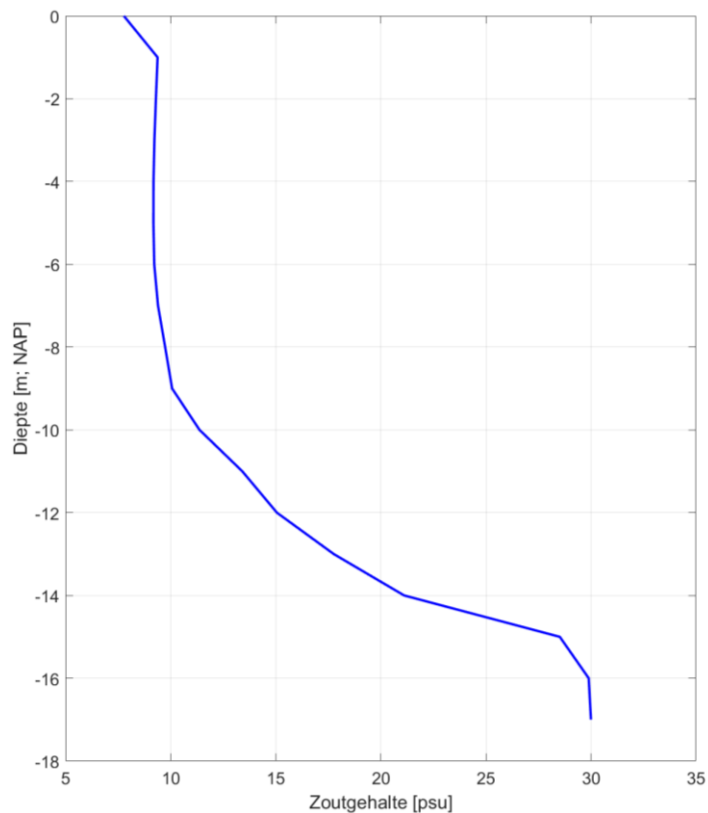
Een overzicht van de gemodelleerde zouttransporten is gegeven in Tabel 2-1. Aangezien de debieten in het CFD model niet exact gelijk waren aan 100 m³/s, 300 m³/s, etc. is in Bijlsma en Weiler (2019) op basis van de gemodelleerde zouttransporten en bijbehorende debieten een trendlijn bepaald. In de tabel worden zowel de gemodelleerde zouttransporten (2^e kolom) als de zouttransporten op basis van de trendlijn gegeven (3^e kolom). In de rest van het rapport zullen alleen de zouttransporten op basis van de trendlijn gebruikt worden, omdat deze overeenkomen met de afgeronde debieten die ook in Delft3D4 en D-HYDRO gebruikt zijn.



Figuur 2-1: Bodemschematisatie van het numerieke domein van het CFD model voor Variant 3. De kleurschaal geeft de bodemligging in m NAP weer. Bron: Bijlsma et al (2020)



Figuur 2-2: Bodemschematisatie van het numerieke domein van het Delft3D4 model voor Variant 3. De kleurschaal geeft de bodemligging in m NAP weer.



Figuur 2-3: Aangenomen zoutprofiel voor de instroomrand (vanuit het Noordzeekanaal) en als startconditie.

Tabel 2-1: Overzicht van het gemodelleerd zouttransport in CFD en Delft3D4.

Afvoerdebiet [m ³ /s]	Zouttransport [kg/s]		
	3D CFD simulaties (Bijlsma et al, 2020)		Delft3D4 simulaties (Bijlsma en Weiler, 2019)
	Gemodelleerd	Op basis van trendlijn (Bijlsma en Weiler, 2019)	
100	2664,8 (bij 101.5 m ³ /s)	2602	2605
300	7023,8 (bij 303.3 m ³ /s)	6974	7310
500	Niet gemodelleerd	10238	11223
700	12464,3 (bij 708.5 m ³ /s)	12395	13485

2.2 Opzet model voor de verificatie van de SO-IJ

Het hoofddoel van deze taak is om te onderzoeken of het mogelijk is om in D-HYDRO het effect van de SO-IJ op het zouttransport op een nauwkeurige manier te representeren in het zesde-generatie model van het Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal. Bij de vergelijking met de CFD en Delft3D4 resultaten is daarom het D-HYDRO model zoveel mogelijk consistent gehouden met het zesde-generatie D-HYDRO model van het Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal. Op basis van het zesde-generatiemodel is daarom een uitsnede gemaakt, waarbij het modeldomein ongeveer hetzelfde gebied beslaat als de CFD en Delft3D4 modellen, zoals beschreven in paragraaf 2.1 (dit D-HYDRO model wordt hierna het 'uitgeknipte zesde-generatiemodel' genoemd). Aanvullend hierop zijn ook D-HYDRO simulaties uitgevoerd waarbij de Delft3D4 simulaties zoveel mogelijk werden nagebootst (16 m resolutie, sigma-lagen, etc.). Deze schematisatie wordt hierna het 'Fijne D-HYDRO model' genoemd. Het doel van deze laatste simulaties was om een zo direct mogelijke vergelijking te maken tussen Delft3D4 en D-HYDRO.

Aangezien er nog geen officiële modelschematisatie beschikbaar is waarin de Zeesluis IJmuiden en de selectieve onttrekking zijn opgenomen is het bestaande rekenrooster enigszins aangepast, zodat het de toekomstige geometrie rondom de SO-IJ zo goed mogelijk volgt zonder de roosterresolutie veel te verhogen. Vervolgens is er een uitsnede gemaakt, zodat het rekenrooster hetzelfde gebied omvat als het CFD en Delft3D4 model, zoals beschreven in paragraaf 2.1. Het resulteerde rekenrooster is weergegeven in Figuur 2-5 (boven). Ter plaatse van de SO-IJ is de horizontale resolutie ongeveer 60 m in lengte richting en ongeveer 28 m in de breedte, zodat er 3 cellen over de breedte van het zoutscherm opgenomen konden worden. De bodemschematisatie is gebaseerd op een interpolatie van de bodem van het CFD model. Langs het westelijke uiteinde van het Binnenspuikanaal is een debietrand gedefinieerd, waar het afvoerdebiet wordt onttrokken (weergegeven in Figuur 2-5). Aan de oostkant van het model is een waterstandrand opgenomen (waterstand is constant -0,4 m NAP). Het zoutprofiel van het instromende water en de startconditie is gelijk aan het zoutprofiel dat is gebruikt in het CFD model, zie Figuur 2-3. Het zoutscherm is geschematiseerd met behulp van de 'general structure' formulering (zie Figuur 2-4 voor de instelling hiervan). Consistent met de CFD en Delft3D4 berekeningen (zie Paragraaf 2.1) worden de sluisen in deze berekeningen niet bedient (i.e. er zijn geen zoutfluxen vanuit de sluisen).

Ten opzichte van de instellingen van het bestaande zesde-generatie model van het Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal zijn zo min mogelijk aanpassingen gedaan, zodat op basis van deze validatie een inschatting gemaakt kan worden of de effecten van het zoutscherm in het huidige zesde-generatiemodel opgenomen zouden kunnen worden. De benodigde aanpassingen in het .mdu bestand waren:

- *StructureFile = SO_generalstructure.ini* (zie Figuur 2-4)
- *StructureLayersactive = 1*: De stroming door de general structure wordt dan alleen over de openstaande lagen verdeelt in plaats van over de volledige waterkolom.
- *Barocponbnd = 1*: Met deze instelling worden de baroclinische drukken op de open rand meegenomen. Standaard staat dit keyword op 0. Deze instelling was nodig, omdat dit effect in Delft3D4 standaard aanstaat en het ook een relevant proces is voor dergelijke kleinschalige modellen. Op deze manier kon een eerlijke vergelijking gemaakt worden met de eerdere Delft3D4 simulaties. Overigens is deze instelling niet relevant voor het zesde-generatiemodel van het NZK/ARK, aangezien er geen open randen aanwezig zijn.
- *Temperature = 0*: Met behulp van deze instelling wordt de berekening van temperatuur uitgeschakeld. In de CFD en Delft3D4 simulaties werd temperatuur namelijk niet meegenomen. De vaste watertemperatuur in de simulaties wordt nu bepaald door het *initialTemperature* keyword dat op 15 °C staat (consistent met het Delft3D4 model).

```

[structure]
type = generalstructure # Type of structure
id = SO # Name of the structure
polylinefile = SO.pli # *.pli; Polyline geometry definition for 2D structure
Upstream2Width = 80 # Width left side of structure (m)
Upstream1Width = 80 # Width structure left side (m)
CrestWidth = 80 # Width structure centre (m)
Downstream1Width = 80 # Width structure right side (m)
Downstream2Width = 80 # Width right side of structure (m)
Upstream2Level = -23 # Bed level left side of structure (m AD)
Upstream1Level = -23 # Bed level left side structure (m AD)
CrestLevel = -23 # Bed level at centre of structure (m AD)
Downstream1Level = -23 # Bed level right side structure (m AD)
Downstream2Level = -23 # Bed level right side of structure (m AD)
GateLowerEdgeLevel = -16 # Gate lower edge level (m AD)
pos_freegateflowcoeff = 1 # Positive free gate flow (-)
pos_drowngateflowcoeff = 1 # Positive drowned gate flow (-)
pos_freeweirflowcoeff = 1 # Positive free weir flow (-)
pos_drownweirflowcoeff = 1 # Positive drowned weir flow (-)
pos_contrcoeffreegate = 1 # Positive flow contraction coefficient (-)
neg_freegateflowcoeff = 1 # Negative free gate flow (-)
neg_drowngateflowcoeff = 1 # Negative drowned gate flow (-)
neg_freeweirflowcoeff = 1 # Negative free weir flow (-)
neg_drownweirflowcoeff = 1 # Negative drowned weir flow (-)
neg_contrcoeffreegate = 1 # Negative flow contraction coefficient (-)
extraresistance = 0 # Extra resistance (-)
GateHeight = 17 # Vertical gate door height (m)
GateOpeningWidth = 0 # Horizontal opening width between the doors (m)
GateOpeningHorizontalDirection = symmetric # Horizontal direction of the opening doors

```

Figuur 2-4: Gebruikte general structure instellingen voor de SO-IJ.²

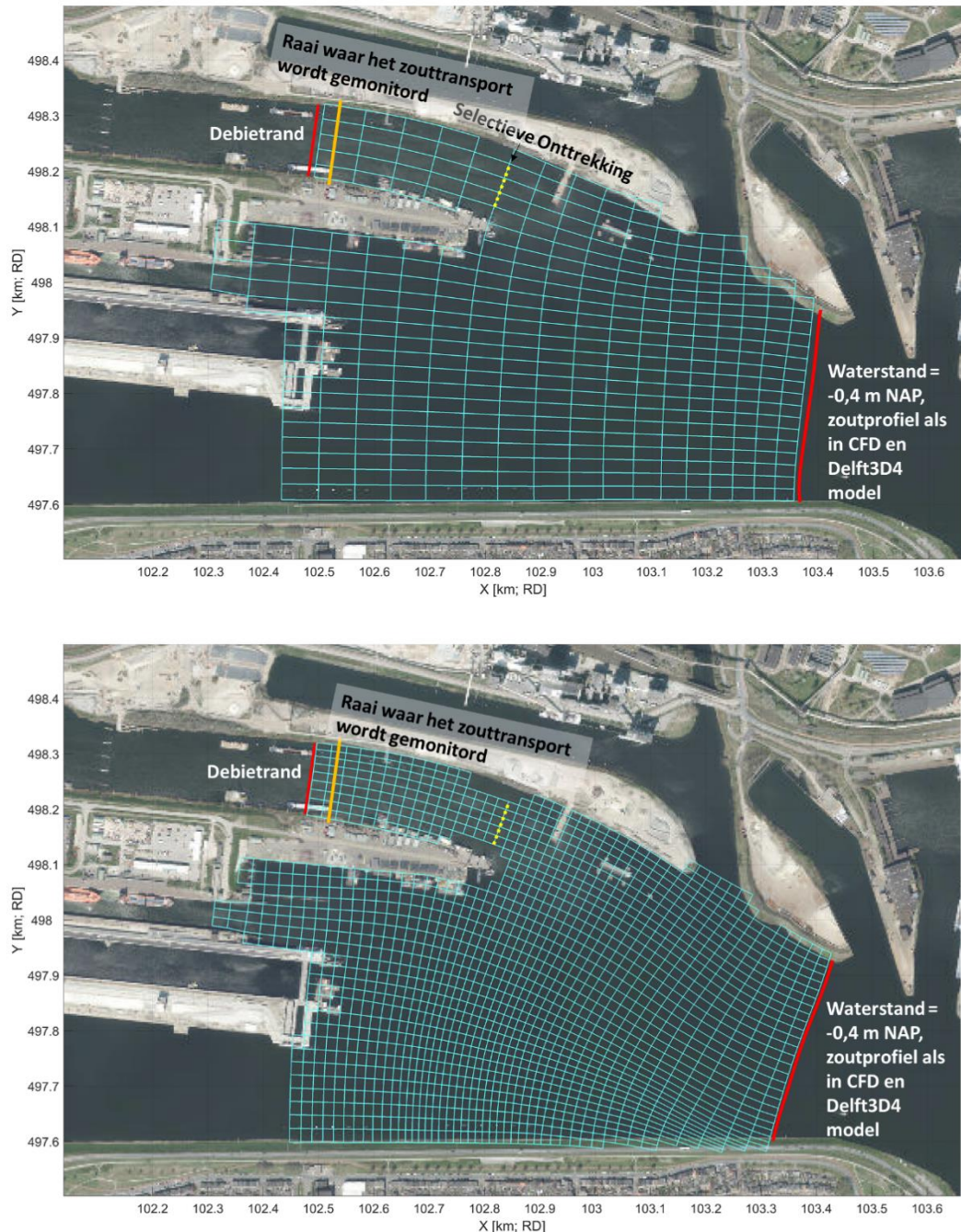
Zoals hierboven beschreven is daarnaast ook een D-HYDRO model opgezet waarbij de geometrie en instellingen zoveel mogelijk zijn gebaseerd op het Delft3D4 model, zoals beschreven in paragraaf 2.1.

Ten opzichte van het hierboven beschreven D-HYDRO model zijn hiervoor de volgende aanpassingen gedaan:

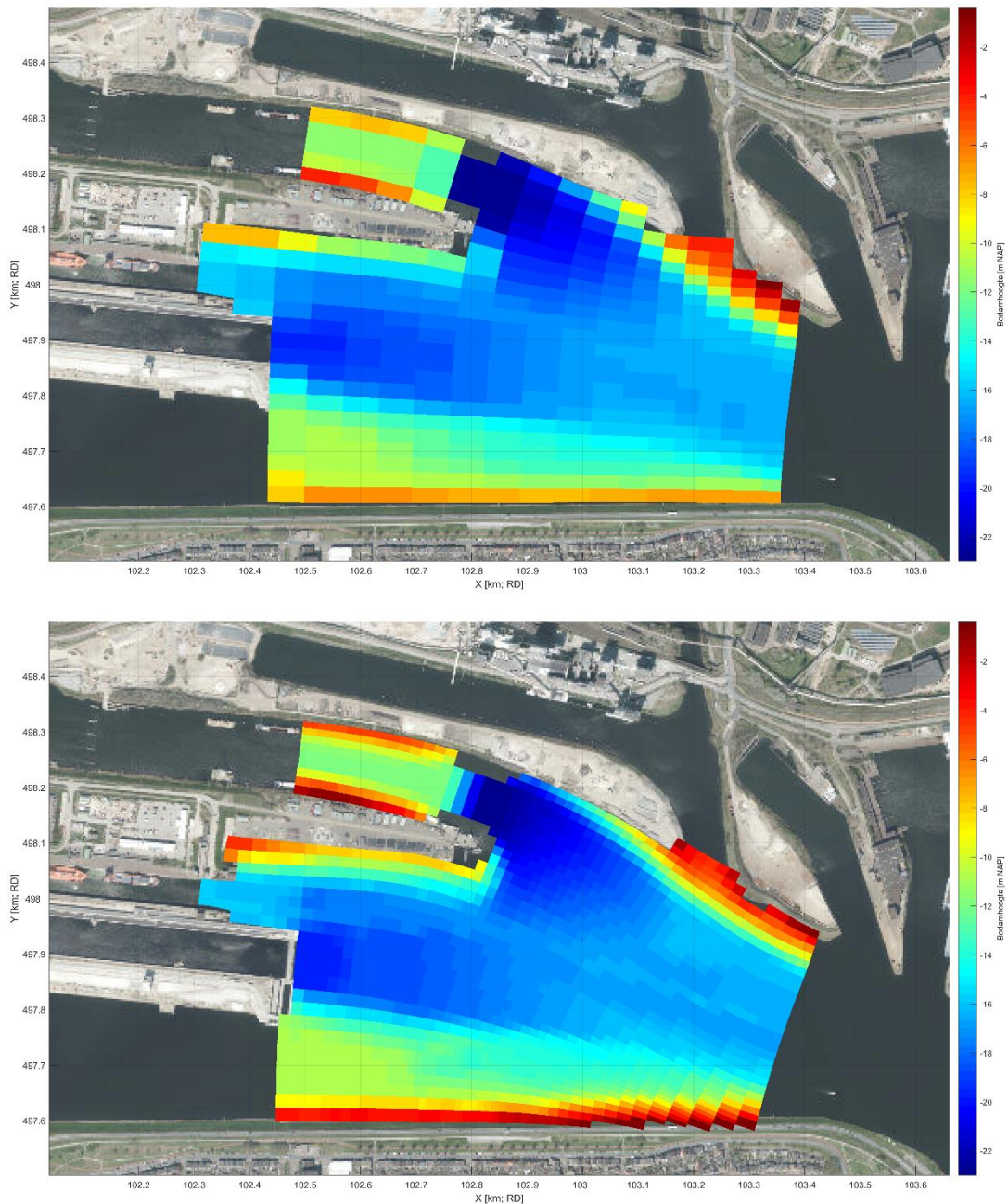
- Het rekenrooster is volledig gebaseerd op het Delft3D4 model, zie Figuur 2-5 (onder).
- 20 uniforme sigma-lagen in plaats van 25 uniforme Z-lagen.
- Daarnaast zijn de volgende aanpassingen gedaan in het .mdu bestand:
 - $AngLat = 0$ (in plaats van 52)
 - $Vicouv = 1$ (in plaats van 0,1)
 - $Dicouv = 0,01$ (in plaats van 0,1)
 - $Vicoww = 1 \cdot 10^{-5}$ (in plaats van $5 \cdot 10^{-5}$)
 - $Dicoww = 1 \cdot 10^{-5}$ (in plaats van $5 \cdot 10^{-5}$)
 - $Smagorinsky = 0$ (in plaats van 0,2)
 - $Ag = 9,81$ (in plaats van 9,813)
 - $Rhoair = 1$ (in plaats van 1,205)

² In de specificaties voor zesde-generatiemodellen is opgenomen dat de bodem op moet lopen richting de crest. De *UpstreamLevel* en *DownstreamLevel* moeten eigenlijk 5 cm lager zijn dan de *CrestLevel* en de *Upstream2Level* en *Downstream2Level* 10 cm lager. Het effect hiervan is getest voor een afvoerdebiet van 700 m³/s en gaf een identiek zouttransport onder het zoutscherm. De conclusies van dit rapport gelden daarom ook indien deze specificaties in toekomstige modelleerprojecten toegepast worden.

De D-HYDRO simulaties zijn uitgevoerd met een recente D-HYDRO versie (DIMR 2.21.14.76718, 14 september 2022). De simulaties met de 2022.01 patch01 versie (officiële release die dit jaar binnen KPP modelschematisaties gebruikt wordt) resulteerden in een veel lagere efficiëntie van het zout scherm (ongeveer 20% lager bij 100 m³/s). De oorzaak voor de verschillen tussen beide D-HYDRO versies ligt waarschijnlijk bij de afhandeling van de randvoorwaarde bij de open rand in het NZK, omdat de simulaties pas na ongeveer 15 minuten beginnen af te wijken (bij een afvoerdebiet van 100 m³/s). In het 3D zesde-generatiemodel van het NZK/ARK wordt geen gebruik gemaakt van open randen, dus is bovenstaande constatering niet relevant voor dat model. Daarom is in Hoofdstuk 3 wel gebruik gemaakt van de 2022.01 patch01 versie.



Figuur 2-5: Gebruikte D-HYDRO rekenroosters voor verificatie tegen beschikbare CFD en Delft3D4 simulaties (Bijlsma en Weiler, 20120). Boven: rooster voor het uitgeknipte zesde-generatiemodel, onder: rooster van het Fijne D-HYDRO model (identiek aan Delft3D4 rooster).



Figuur 2-6: Bodemschematisaties van de gebruikte D-HYDRO modellen voor verificatie tegen beschikbare CFD en Delft3D4 simulaties (Bijlsma en Weiler, 2019). Boven: bodemschematisatie voor het uitgeknipte zesde-generatiemodel. Onder: bodemschematisatie van het Fijne D-HYDRO model

2.3 Resultaten verificatie

Paragraaf 2.3.1 geeft overzicht van de gemodelleerde zouttransporten met het uitgeknipte zesde-generatiemodel en het Fijne D-HYDRO model in vergelijking met de CFD en Delft3D4 resultaten. Het gemodelleerde zouttransport en de stroompatronen worden verder gevisualiseerd en geanalyseerd in Paragraaf 2.3.2 voor een afvoerdebiet van 100 m³/s en in Paragraaf 2.3.3 voor een afvoerdebiet van 700 m³/s. De resultaten voor een afvoerdebiet van 300 m³/s en 500 m³/s zijn opgenomen in Bijlage A.

2.3.1 Overzicht

Figuur 2-7 en Tabel 2-2 geven een overzicht van de gemodelleerde zouttransporten voor de verschillende afvoerdebieten op basis van de CFD, Delft3D4 en D-HYDRO simulaties met het uitgeknipte zesde-generatiemodel en het Fijne D-HYDRO model. De zouttransporten in de D-HYDRO simulaties zijn gebaseerd op een gemiddelde tussen 2,5 en 4 uur na start van de simulaties door een raai dichtbij de rand waar het debiet wordt onttrokken, zie Figuur 2-5. Bij de CFD en (daarop gebaseerde) Delft3D4 simulaties werden de resultaat ook gemiddeld over de periode van 2,5 uur tot 4 uur na start van de simulaties, zie paragraaf 2.1.

Zoals beschreven in paragraaf 2.1, werd in Bijlsma en Weiler (2019) op basis van een vergelijking tussen de Delft3D4 en CFD simulaties al geconcludeerd dat het Delft3D4 model iets meer zout afvoert (0,1% bij 100 m³/s, 4,6% bij 300 m³/s en 8,1% bij 700 m³/s). Voor een directe vergelijking tussen D-HYDRO en Delft3D4 kan het beste gekeken worden naar de Fijne (16-m resolutie) D-HYDRO simulaties. De zouttransporten in deze D-HYDRO simulaties zijn iets lager (maximaal 7%) dan in het Delft3D4 model, daarmee komen de voorspelde zouttransporten iets dichterbij de, nauwkeurig geachte, CFD resultaten te liggen. In vergelijking met het CFD model zijn de verschillen in zouttransport +2,5%, +1,6% en +8% voor een afvoerdebiet van respectievelijk 100 m³/s, 300 m³/s en 700 m³/s. Opgemerkt wordt dat het zouttransport licht varieert over de tijd ten gevolge van schommelingen in de Velserskom, waardoor de uitkomst van de vergelijking ook enigszins afhankelijk is van de beschouwde periode. Hoewel de instellingen van het Fijne D-HYDRO model zo consistent mogelijk zijn gehouden met het Delft3D4 model, zijn er nog steeds enkele verschillen tussen beide modellen. De verschillen tussen beide modellen kunnen onder andere gerelateerd zijn aan verschillen in:

- afhandeling van de randvoorwaarden (vooral nu de open rand zo dichtbij het 'probleem' ligt)
- afhandeling van de SO-IJ: 3D gates in Delft3D4 versus een 'general structure' benadering in D-HYDRO.
- interpretatie van de bodemgegevens. De combinatie van de DPSopt and DPUopt keywords in Delft3D4 kan niet exact nagebootst worden in D-HYDRO.

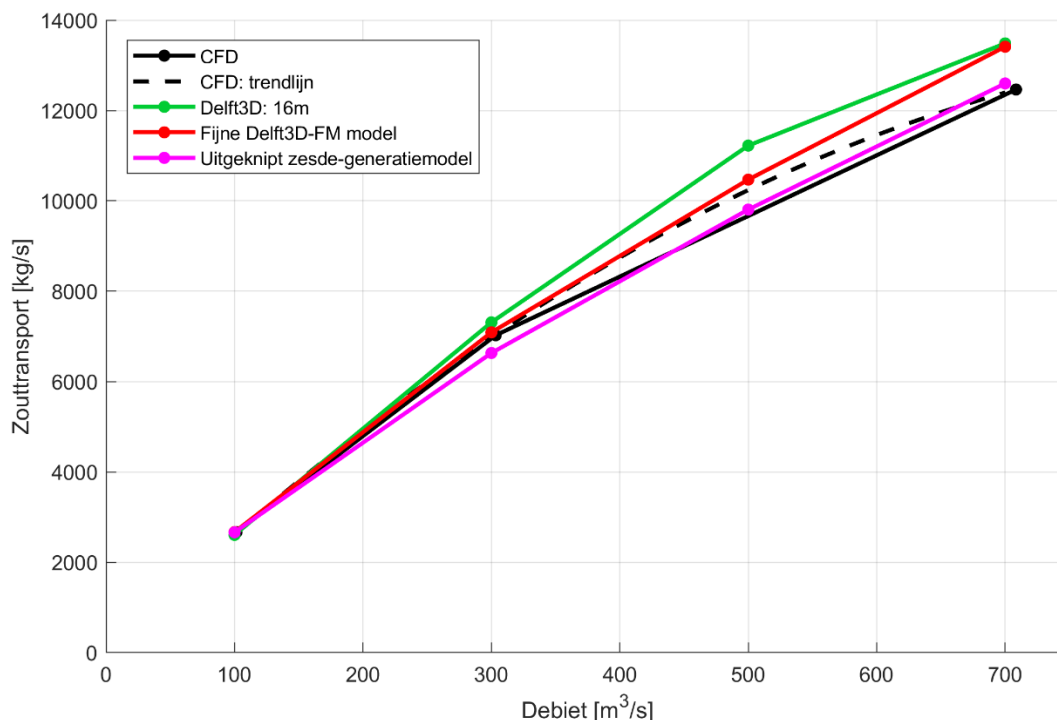
Binnen de huidige studie is de invloed van de hierboven beschreven mogelijke oorzaken niet verder geanalyseerd. Ondanks deze (onvermijdelijke) verschillen in modelaanpak zijn de gemodelleerde zouttransporten behoorlijk in lijn met elkaar (verschil kleiner dan 10%). Deze vergelijking geeft daarom vertrouwen dat de Selectieve Onttrekking in D-HYDRO succesvol geschematiseerd kan worden (eventueel na verdere afregeling op basis van metingen na realisatie van SO-IJ, zie paragraaf 2.4).

De zouttransporten in de simulaties met het uitgeknipte zesde-generatiemodel zijn iets lager dan in het Fijne D-HYDRO model. In vergelijking met het CFD model zijn de verschillen in zouttransport +2,3%, -4,9% en +1,6% voor een afvoerdebiet van respectievelijk 100 m³/s, 300 m³/s en 700 m³/s. Het verschil met de Fijne D-HYDRO simulaties zal vooral een gevolg zijn van de lagere horizontale resolutie.

Zoals opgemerkt zijn de verschillen tussen de rode en roze lijn voornamelijk gerelateerd aan verschillen qua horizontale resolutie en de verticale lagschematisatie.

Gevoeligheidssimulaties hebben aangetoond dat het zouttransport over het algemeen toeneemt bij een hogere resolutie en bij het gebruik van Z-lagen. Hoewel het uitgeknipte zesde-generatiemodel gebruik maakt van Z-lagen is het zouttransport lager vergeleken met het Fijne D-HYDRO model vanwege de lagere horizontale resolutie.

Met het zesde-generatiemodel zijn ook gevoeligheidstesten uitgevoerd waarbij een Z-sigma lagschematisatie is gebruikt met 5 sigma lagen bij het oppervlak (zie hoofdstuk 3 voor meer informatie). De zouttransporten in deze simulaties waren bijna exact hetzelfde als in de simulaties met alleen Z-lagen (bijvoorbeeld bij 700 m³/s: 12599 kg/s bij Z-lagen en 12606 kg/s bij Z-sigma lagen, zie ook Tabel 2-2).



Figuur 2-7: Zouttransport ter hoogte van de westelijke debietrand berekend met CFD (zowel gemodelleerde waarden als de trendlijn), Delft3D4 en de twee beschouwde D-HYDRO schematisaties.

Tabel 2-2: Overzicht van het gemodelleerd zouttransport in D-HYDRO, CFD en Delft3D4.

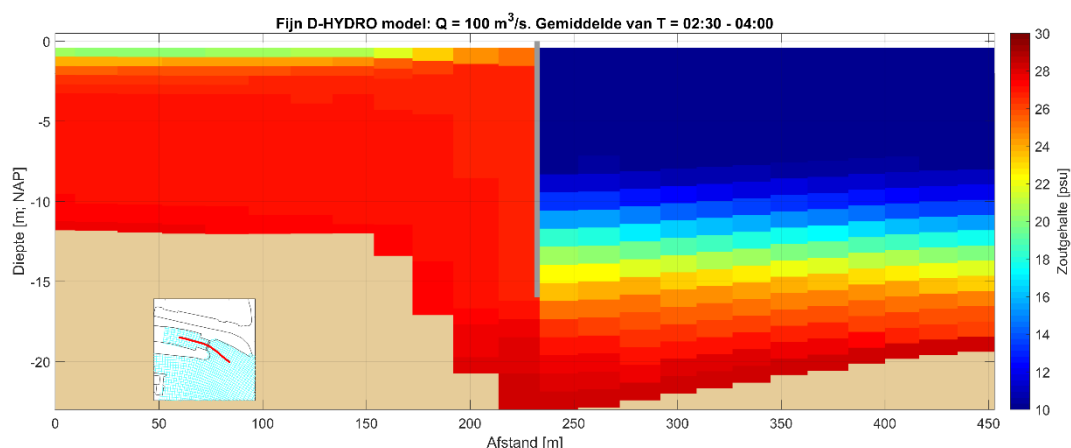
Afvoerdebiet [m ³ /s]	Zouttransport [kg/s]				
	D-HYDRO			3D CFD	Delft3D4
	Fijne D-HYDRO model	Uitgeknipt zesde generatiemodel (Z-lagen)	Uitgeknipt zesde generatiemodel (Z-sigma lagen)	Op basis van de trendlijn (Bijlsma et al, 2020)	Bijlsma en Weiler (2019)
100	2667	2662	2662	2602	2605
300	7088	6631	6631	6974	7310
500	10470	9807	9807	10238	11223
700	13412	12599	12606	12395	13485

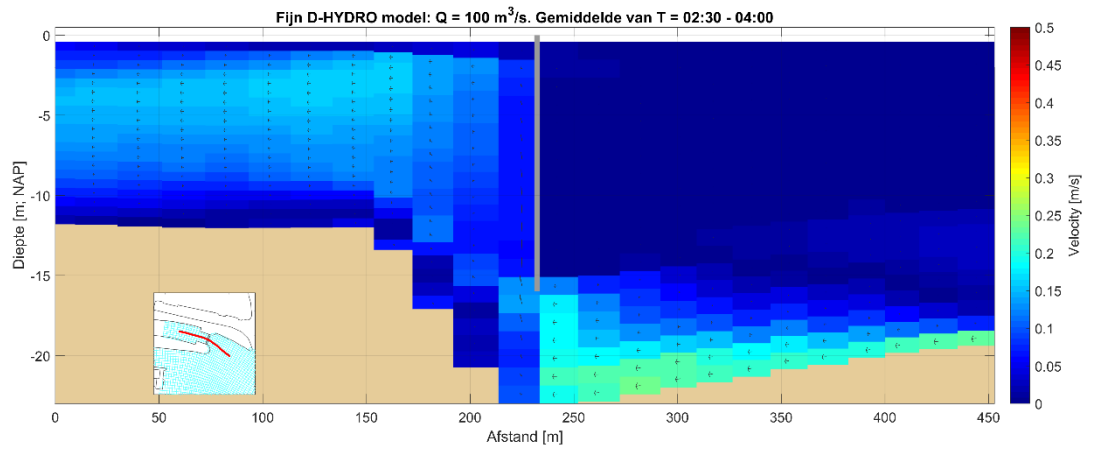
2.3.2 100 m³/s

Figuur 2-8 toont een doorsnede van het zoutgehalte en de stroomsnelheden ter plaatse van de selectieve onttrekking voor het Fijne D-HYDRO model, gemiddeld over de periode vanaf 2,5 tot 4 uur na de start van de simulatie voor een afvoerdebiet van 100 m³/s (zie Figuur 2-9 voor het vergelijkbare Delft3D4 model). Het zoutprofiel en het stroompatroon zien er in beide simulaties vergelijkbaar uit. Vanwege de lage afvoerdebieten wordt voornamelijk de zoute onderlaag afgezogen. In het Binnenspuikanaal heeft het water een zoutgehalte van ongeveer 26 – 27 psu. Alleen in de bovenste laag is nog water aanwezig met een lager zoutgehalte. Dit water is nog een restant van de beginconditie. In het uitgeknipte zesde-generatiemodel (Figuur 2-10) is een vergelijkbaar gedrag te zien.

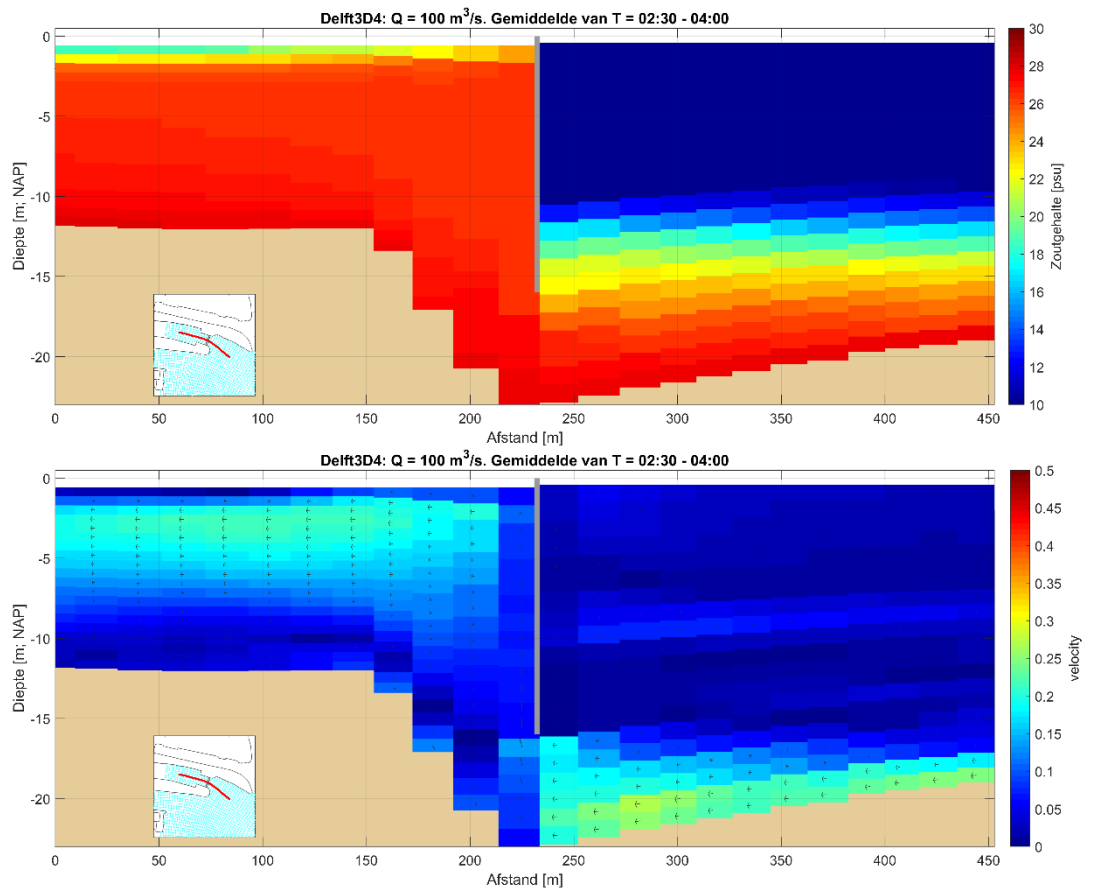
Opgemerkt wordt dat de getoonde stroomsnelheid is gebaseerd op een middeling tussen de stroomsnelheden op de randen van de cellen, waar de snelheid in de simulatie werkelijk berekend wordt. In gebieden met grote horizontale gradiënten in stroomsnelheden geeft dit een vertekend beeld. Direct benedenstrooms van het zoutscherm lijkt op basis van deze figuren de stroomsnelheid een stuk lager te zijn dan direct bovenstrooms. Dit komt echter door het feit dat het water in de cel benedenstrooms van het zoutscherm grotendeels omhoog schiet (deels ten gevolge van de hydrostatische drukaanname). Nabij de bodem is de stroomsnelheid op de celovergang direct onder het scherm dus hoger dan 1 celovergang benedenstrooms hiervan, wat (na middeling) leidt tot een relatief lage stroomsnelheid in deze benedenstroomse cellen. Ondanks dat het grootste gedeelte van het water direct na het zoutscherm omhoog schiet zijn de berekende verticale snelheden lager dan de gemiddelde horizontale snelheden direct onder het zoutscherm. Dit komt omdat het doorstromend oppervlak onder het zoutscherm (560 m²) kleiner is dan het doorstromend oppervlak voor de verticale stroming direct achter het scherm (80 m (breedte zoutscherm) x 16 m (Fijn D-HYDRO model) of 65 m horizontale gridresolutie).

De figuren tonen ook aan dat de weerstand van het zoutscherm verschilt in beide modellen. In het Delft3D4 model ontstaat een waterstandsverschil over het zoutscherm van ongeveer 16 cm, terwijl de waterstand aan beide zijden vrijwel gelijk is in beide D-HYDRO simulaties. Opgemerkt wordt dat er in dit project verder niet is gefocust op de weerstand. Aanbevolen wordt om na realisatie van de SO-IJ de werkelijke weerstand van het zoutscherm te bepalen en vervolgens het zesde-generatiemodel hierop aan te passen, indien het meenemen van de weerstand relevant is voor toekomstige modelstudies. In de huidige studie zijn de afvoerdebieten opgelegd en heeft het verschil in weerstand dus geen invloed op de afvoerdebieten onder het zoutscherm.

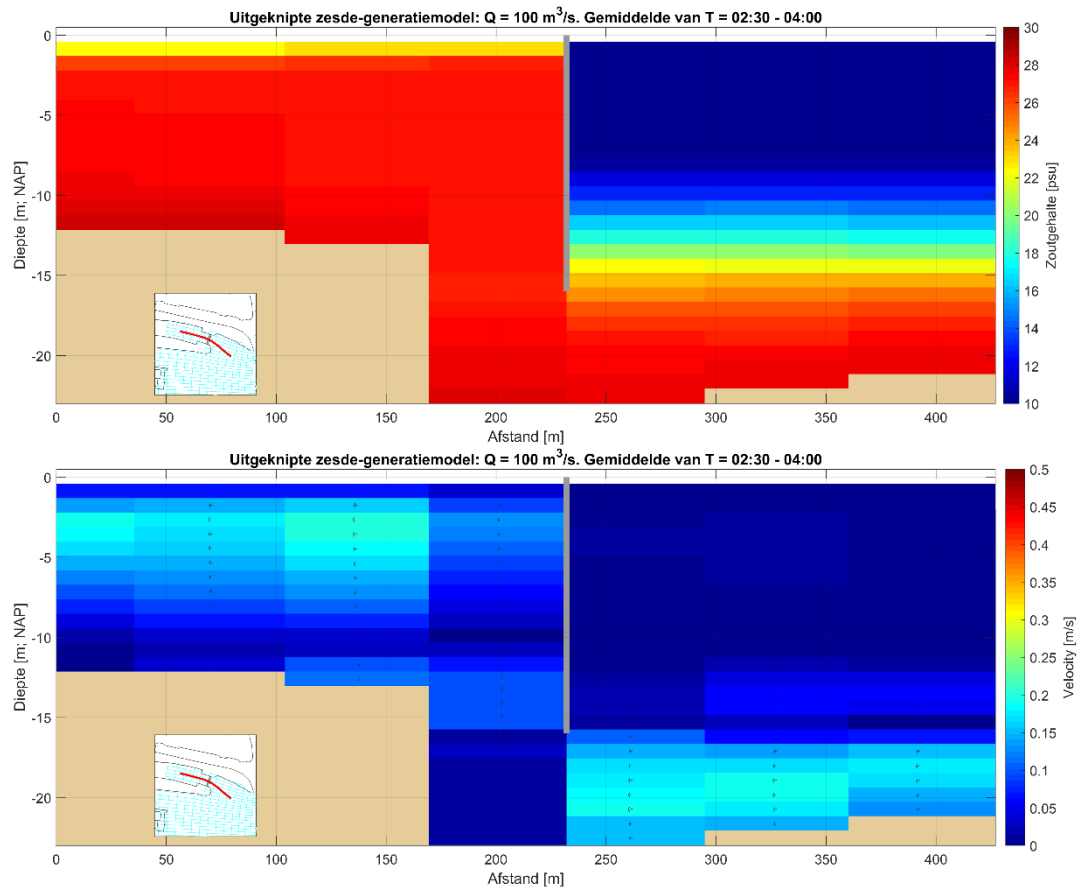




Figuur 2-8: Zoutgehalte (boven) en stroomsnelheden (onder) op een doorsnede door de selectieve onttrekking, Fijne D-HYDRO model, $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$, gemiddelde van 2,5 - 4 uur na begin van de simulatie.



Figuur 2-9: Zoutgehalte (boven) en stroomsnelheden (onder) op een doorsnede door de selectieve onttrekking, Delft3D4 model, $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$, gemiddelde van 2,5 - 4 uur na begin van de simulatie.



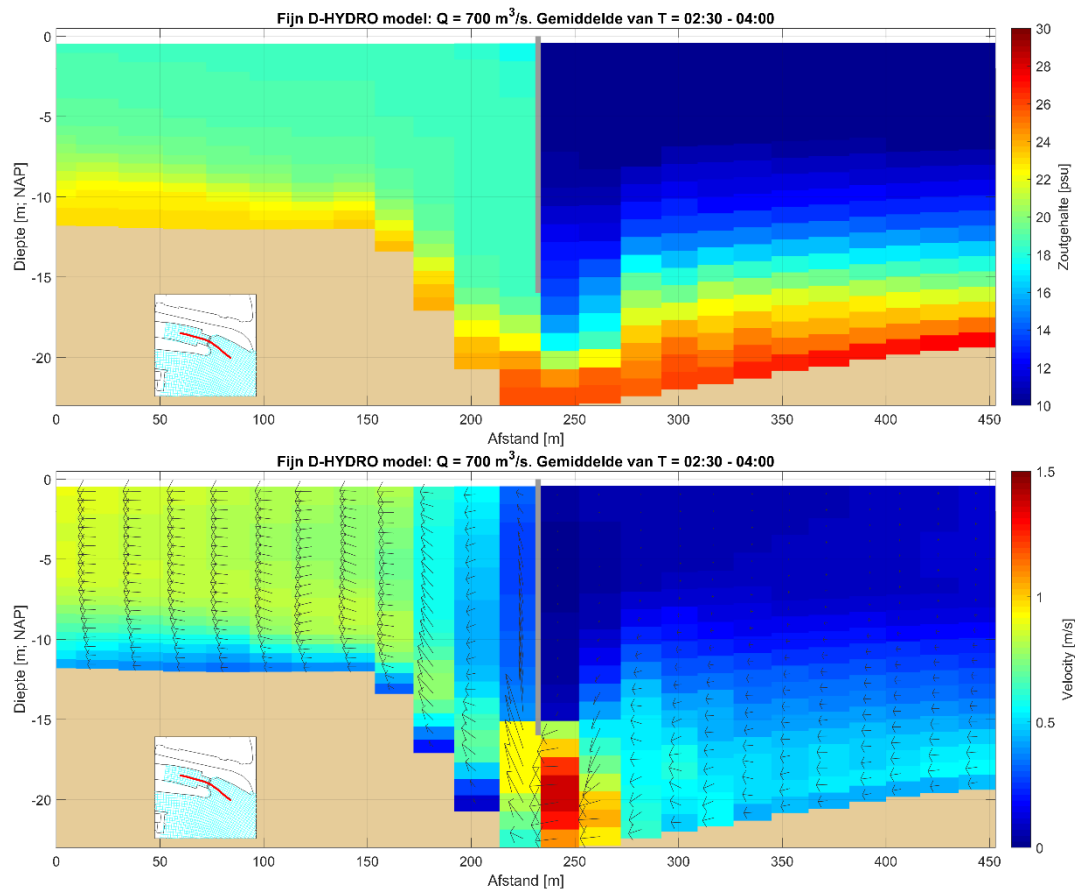
Figuur 2-10: Zoutgehalte (boven) en stroomsnelheden (onder) op een doorsnede door de selectieve onttrekking, uitgeknipte zesde-generatiemodel, $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$, gemiddelde van 2,5 - 4 uur na begin van de simulatie.

2.3.3 700 m^3/s

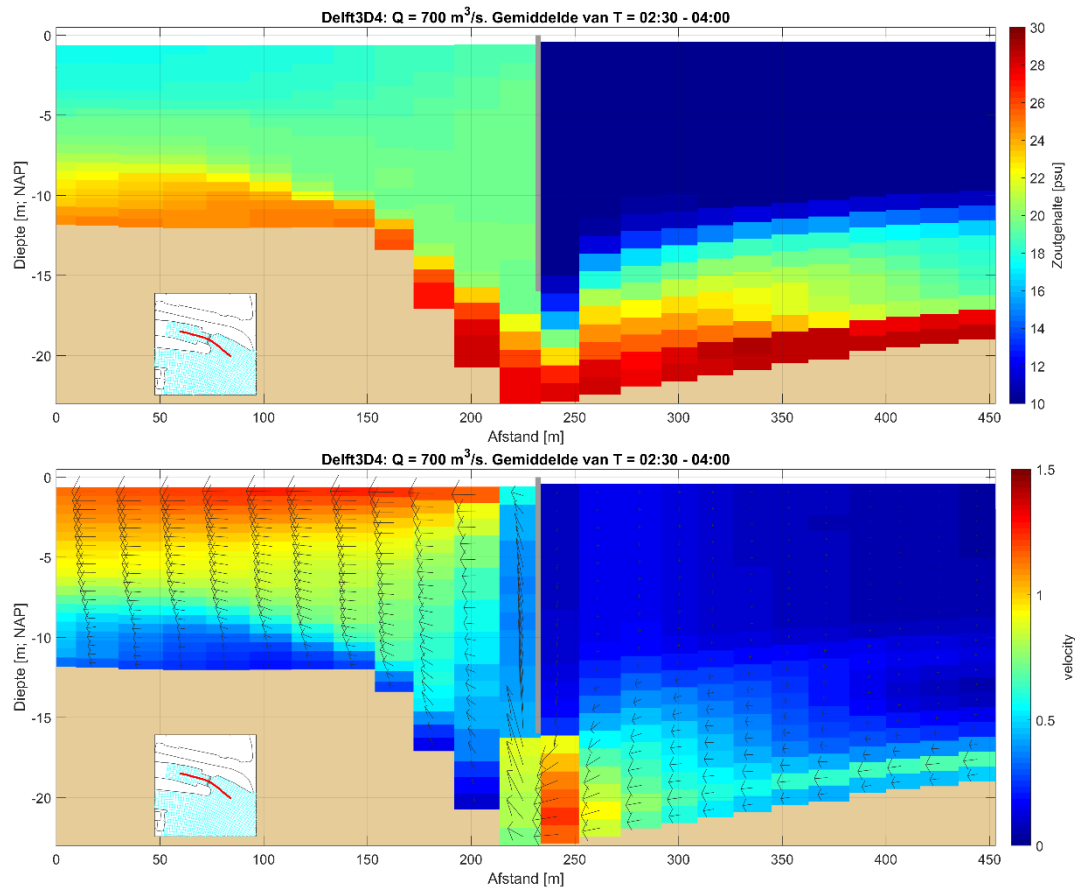
Figuur 2-11 toont een doorsnede van het zoutgehalte en de stroomsnelheden ter plaatse van de selectieve onttrekking voor het Fijne D-HYDRO model, gemiddeld over de periode vanaf 2,5 tot 4 uur na de start van de simulatie voor een afvoerdebiet van $700 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie Figuur 2-12 voor het vergelijkbare Delft3D4 model). Bij het Fijne D-HYDRO model lijkt de aanzuiging bovenstrooms van het zoutscherm over een iets grotere hoogte door te werken als in het Delft3D4 model, waar de stroming meer geconcentreerd bij de bodem blijft. Hierdoor is de efficiëntie van het zoutscherm in de Delft3D4 simulatie iets hoger, zoals beschreven in Paragraaf 2.3.1. De reden voor deze verschillen is in dit project niet verder uitgezocht.

Een ander verschil tussen de resultaten van het Fijne D-HYDRO model en het Delft3D4 model is het aantal openstaande lagen ter hoogte van het zoutscherm. In het Delft3D4 model is gebruik gemaakt van '3D-gates', waarbij alleen de onderste 6 lagen openstaan (hoogte van de spleet is dan ongeveer 6,48 m). In het D-HYDRO model is gebruik gemaakt van de 'general structure' benadering, waarbij de opening tussen -23 m en -16 m NAP ligt. De onderkant van het zoutscherm eindigt in het D-HYDRO model net boven de 6^e laag vanaf de bodem, waardoor de figuur laat zien dat 7 lagen actief (de 7^e laag vanaf de bodem is alleen actief over de hoogte die niet geblokkeerd wordt door het zoutscherm) zijn. Er is nog een gevoeligheidssimulatie gedaan met het Fijne D-HYDRO model waarbij de onderkant van het zoutscherm iets verlaagd is, zodat alleen de onderste 6 lagen actief zijn. Dit gaf geen significant ander resultaat qua zouttransport.

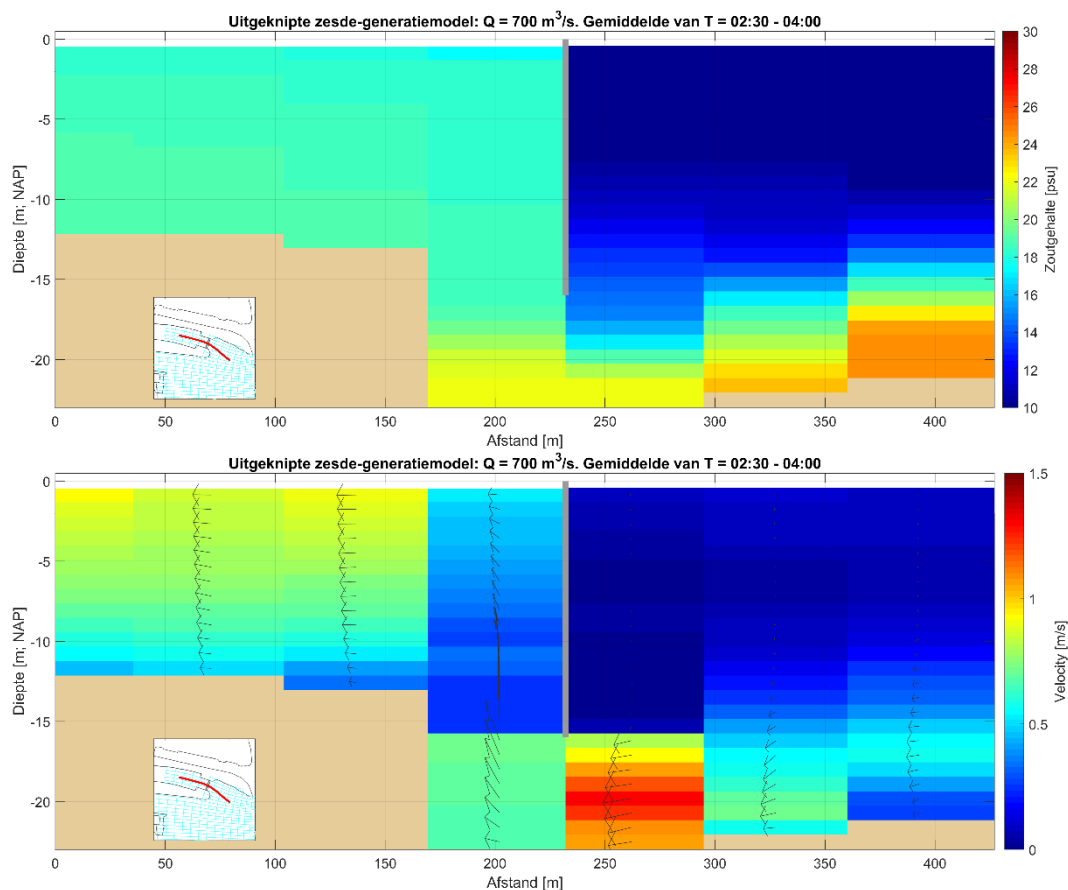
Figuur 2-13 geeft de resultaten weer van het uitgeknipte zesde-generatiemodel. Hoewel het model grover is en minder details weergeeft van het zoutprofiel en stroompatroon is het gedrag vergelijkbaar met het Fijne D-HYDRO model.



Figuur 2-11: Zoutgehalte (boven) en stroomsnelheden (onder) op een doorsnede door de selectieve onttrekking, Fijne D-HYDRO model, $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$, gemiddelde van 2,5 - 4 uur na begin van de simulatie.



Figuur 2-12: Zoutgehalte (boven) en stroomsnelheden (onder) op een doorsnede door de selectieve onttrekking, Delft3D4 model, $Q = 700 \text{ m}^3/\text{s}$, gemiddelde van 2,5 - 4 uur na begin van de simulatie.



Figuur 2-13: Zoutgehalte (boven) en stroomsnelheden (onder) op een doorsnede door de selectieve onttrekking, uitgeknipte zesde-generatiemodel, $Q = 700 \text{ m}^3/\text{s}$, gemiddelde van 2,5 - 4 uur na begin van de simulatie.

2.4 Conclusies verificatie

Het doel van het huidige project is om na te gaan hoe deze constructie opgenomen kan worden in het D-HYDRO model voor het NZK/ARK en hoe de gemodelleerde effectiviteit valideert ten opzichte van eerdere (CFD en Delft3D4) berekeningen beschreven in Bijlsma en Weiler (2019) en daarin opgenomen referenties.

Op basis van dit project kan geconcludeerd worden dat de selectieve onttrekking succesvol opgenomen kan worden in het zesde-generatiemodel met behulp van de 'general structure' benadering. De zouttransporten in het uitgeknipte zesde-generatiemodel zijn vergelijkbaar met de, nauwkeurig geachte, CFD resultaten uit Bijlsma et al (2020) en iets lager dan de Delft3D4 simulaties). De oorzaken van de verschillen tussen gesimuleerde zouttransporten in de Delft3D4 en D-HYDRO simulaties zijn waarschijnlijk gerelateerd aan verschillen in afhandeling van de randvoorwaarden, afhandeling van de SO-IJ (3D-gates versus general structure) en interpretatie van de bodemgegevens in de simulaties. Binnen de huidige studie is de invloed van de hierboven beschreven mogelijke oorzaken niet verder geanalyseerd.

Het zouttransport onder het zoutscherm wordt niet significant beïnvloed bij het toepassen van een Z-sigma lagenschematisatie in plaats van het toepassen van alleen Z-lagen.

In de D-HYDRO simulaties trad geen verhang op over het zoutscherm. Het werkelijke verhang kan in de toekomst waarschijnlijk afgeregeld worden door de weerstand ('resistance') van de general structure te verhogen (niet getest binnen deze studie). Bij de Delft3D4 simulaties trad wel een (naar verwachting te groot) verhang op.

Met de gebruikte methode in Delft3D4 (3D-gates) is het niet mogelijk om de weerstand te verminderen. Het D-HYDRO model biedt daarom waarschijnlijk meer perspectief als het gaat om het weergeven het verval over het zoutscherm.

Het wordt aanbevolen om na realisatie van SO-IJ, metingen te doen om de werkelijke effectiviteit en weerstand te bepalen. Op basis hiervan kan de general structure benadering in D-HYDRO verder afgeregeld worden. Hieronder een eerste inventarisatie van de benodigde meetgegevens:

- Debiet onder het zoutscherm (met behulp van 1 of meerdere verticaal gerichte ADCPs)
- Bijbehorende (gemiddelde) zoutgehalte
- Waterstand aan beide zijden van het zoutscherm.

Het afregelen van de gemodelleerde zouttransporten en weerstand zou kunnen door het aanpassen van bijvoorbeeld de weerstand ('resistance') van de general structure, de hoogte of breedte van de spleet, lokale bodemruwheden, etc. Daarnaast wordt aanbevolen om rooster van het zesde-generatiemodel aan te passen voor de SO-IJ (resolutie rondom selectieve onttrekking, oriëntatie bovenstroom van selectieve onttrekking, etc.).

3 Gevoeligheidsanalyse Z-sigma

3.1 Introductie

Voor de schematisatie van de verticale lagen van een 3D D-Hydro model zijn meerdere opties mogelijk (zie ook (Deltares, 2022)):

- Sigma (σ) lagen; deze volgen zowel de lokale diepte als de lokale, momentane waterstand en delen de verticale afstand hiertussen op volgens een vaste verdeling. Bij een veranderlijke waterstand bewegen deze lagen daarom mee in de tijd. Een dergelijke schematisatie is vaak numeriek efficiënt, maar kan ongewenst veel lagen geven in ondiepere delen. Ook is deze optie minder geschikt voor gestratificeerde systemen.
- Z-lagen; hierbij wordt bij de modelinitialisatie het diepste punt gezocht en daar wordt de verticaal opgedeeld in het aantal opgegeven verticale lagen. De daar berekende laaghoogtes liggen vast voor het gehele modeldomein, wat inhoudt dat ondiepere delen doorgaans opgedeeld zijn met minder verticale lagen. Ook beweegt enkel de bovenste Z-laag mee met een veranderlijke waterstand. Deze optie is beter voor de modellering van een gestratificeerd systeem, maar kan leiden tot vrij dunne lagen aan het oppervlak.
- Z-sigma lagen; in theorie heeft deze optie de voordelen van beide schematisaties. Een optimale schematisatie van gestratificeerde systemen met Z-lagen in de verticaal, in combinatie met een aantal sigma-lagen aan het oppervlak welke een veranderlijke waterstand kunnen volgen. Momenteel wordt overwogen om deze schematisatie van de verticaal aan te houden als voorkeursinstelling voor zesde-generatie 3D D-Hydro modellen.

Tot nu toe is voor de 3D schematisatie van het NZK/ARK-systeem gebruik gemaakt van enkel Z-lagen. In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de gevoeligheid van het gebruik van een Z-sigma lagen schematisatie. De gevoeligheid wordt geanalyseerd door te kijken naar de gemodelleerde waterstanden, debieten, zout en temperatuur.

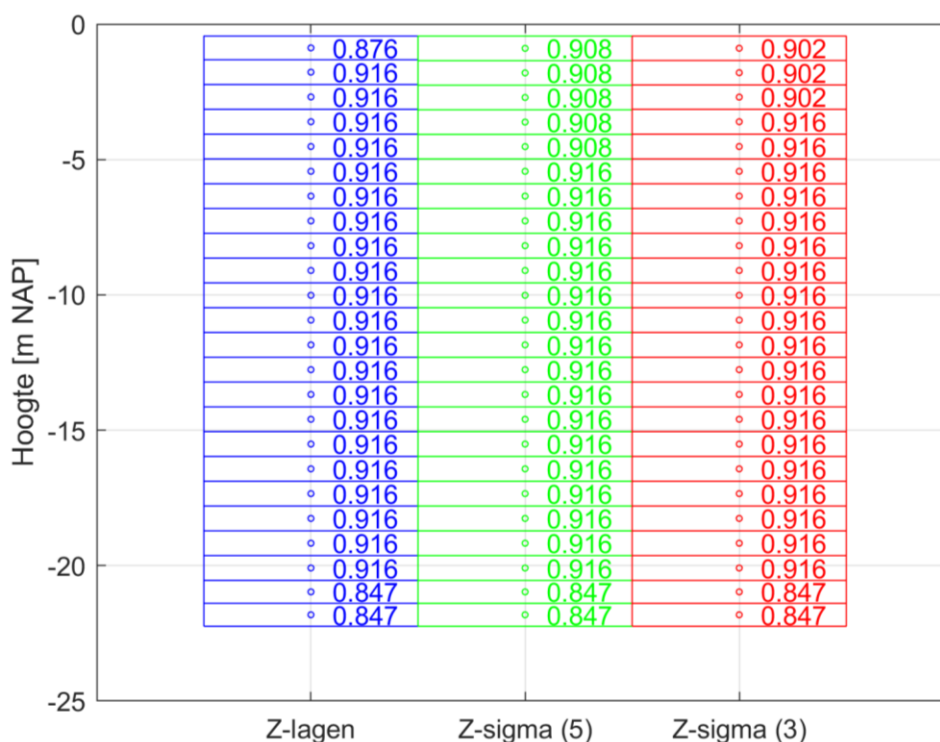
3.2 Modelopzet

De gevoeligheid van een Z-sigma schematisatie is met behulp van twee Z-sigma lagen configuraties onderzocht. Er is gekozen voor een schematisatie met een minimale hoeveel van 3 sigma- lagen aan het oppervlak (overgang tussen z en sigma op -3,11 m NAP), omdat in dat geval het grootste gedeelte van de waterkolom door de nauwkeurig geachte Z-lagen wordt gerepresenteerd en alleen de variatie van het wateroppervlak met sigma lagen. Daarnaast is een schematisatie doorgerekend met 5 sigma-lagen aan het oppervlak (overgang tussen z en sigma op -4,91 m NAP), waarbij de meeste zijgeulen en het grootste gedeelte van het ARK in sigma-lagen wordt gemodelleerd. Ook zijn deze zodanig geschematiseerd dat de hoogteverdeling van de lagen initieel vergelijkbaar is (bij een kanaalpeil van -0,4 m NAP) aan het oorspronkelijke Z-lagen model. Bij een veranderlijke waterstand gaan de sigma-lagen uiteraard meebewegen en zijn de laagdiktes niet meer gelijk. Maar omdat de waterstand in het model doorgaans varieert tussen -0,55 en -0,3 m NAP blijft de variatie in laagdikte klein (<10%). Een overzicht is opgenomen in Tabel 3-1.

Tabel 3-1 Overzicht van de gebruikte modelschematisaties.

Modelnaam	Max. hoeveelheid lagen	Laagdikte [m]	Aantal sigma lagen aan oppervlak	Max. aantal Z-lagen	Overgang Z – Sigma
2018_extraObs	25	0.92	0	25	-
2018_Zsigma_02_extraObs	25	0.92	5	20	-4,91 m NAP
2018_Zsigma_03_extraObs	25	0.92	3	22	-3,11 m NAP

De verticale laagverdeling van de drie schematisaties is weergegeven in Figuur 3-1 voor een observatiestation in de Velserkom bij een waterstand van -0,4274 m. In het Z-lagen model wordt alleen de dikte van de bovenste laag aangepast aan de waterstand (mits de waterstand zich in de bovenste laag bevindt), terwijl in de Z-sigma modellen, alle sigma-lagen meebewegen met de waterstand. Bij de bodem is de dikte van de onderste 2 lagen aangepast, vanwege de instelling *Keepzlayeringatbed* = 2. Met behulp van deze instelling wordt voorkomen dat er een zeer dunne laag bij de bodem ontstaat. Tussen de bodem en de overgang van Z op sigma lagen zijn de Z-sigma laagschematisaties dus gelijk aan de laagschematisatie in het Z-lagen model.



Figuur 3-1 Laagverdeling voor de verschillende schematisaties over de verticaal.

Deze configuratie is bereikt met de in Tabel 3-2 getoonde keywords en bijbehorende instellingen in de mdu file. De specifieke instellingen voor de *FloorLevToplay* en de *Dztop* zijn zodanig gekozen dat de initiële laagverdeling in alle drie de modellen vergelijkbaar is.

Tabel 3-2 overzicht van de gebruikte keywords en bijbehorende instellingen voor de verschillende schematisaties van de verticale lagen.

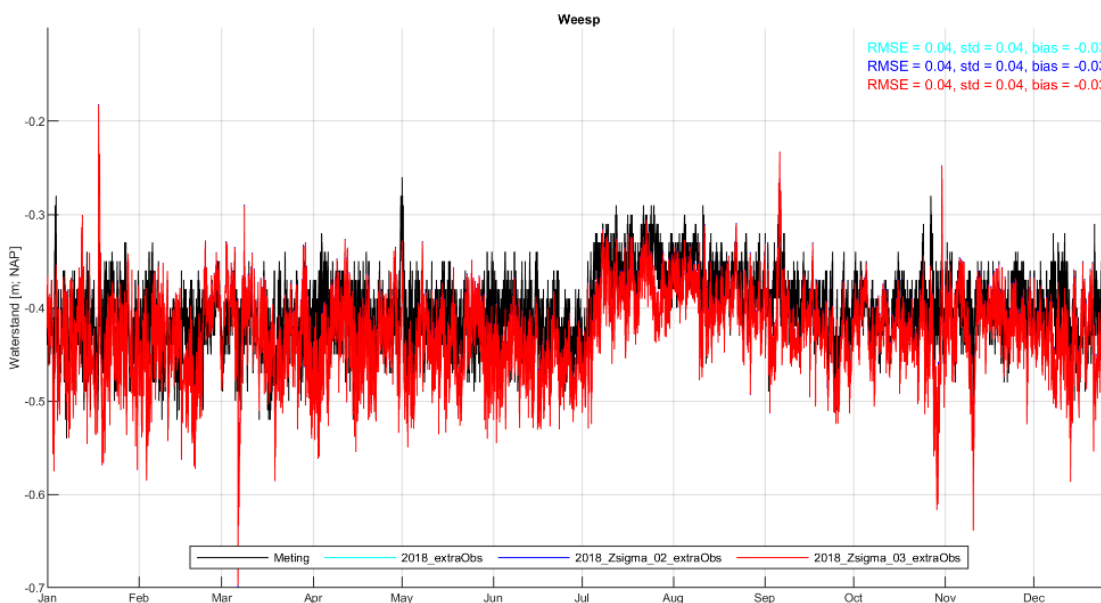
Keyword	2018_extraObs	2018_Zsigma02_extraObs	2018_Zsigma03_extraObs
Layertype	2	2	2
Kmx	25	25	25
Numtopsig	0	5	3
FloorLevToplay	-	-1.3156	-1.3156
DzTop	-	0.9158	0.9158

3.3 Gevoeligheidsanalyse

De gevoeligheid voor de gehanteerde modelschematisatie over de verticaal (volledig Z-lagen versus Z-sigma) is onderzocht door de validatiemethode uit Verbruggen en van der Baan (2020) te herhalen. De validatie is opnieuw uitgevoerd door de modelresultaten te vergelijken met de in 2018 gemeten waarden voor de waterstand, het debiet bij Weesp, het zout en de temperatuur. Er is gekozen voor 2018 omdat het vanwege de lage afvoer een interessant jaar is met betrekking tot zoutindringing, met name op het ARK. Ook waren er in 2018 meer meetlocaties beschikbaar, zoals Zijkanaal C (2 dieptes) en een extra meetpunt bij Diemen, aan de bodem.

3.3.1 Vergelijking met waterstandsmetingen

Figuur 3-2 toont de gemeten en gemodelleerde waterstand bij Weesp in 2018. Net als bij het volledige Z-lagen model, wordt de waterstand redelijk goed gevolgd (gegeven het feit dat de waterbalans net niet volledig gesloten is). Tussen de Z-lagen en beide Z-sigma lagen configuraties zijn geen visuele verschillen waarneembaar en ook de afgeleide statistieken zijn vergelijkbaar. Voor alle simulaties is RMSE (maat voor het absolute verschil tussen de meting en model), standaard deviatie (std, maat voor variatie van het verschil tussen model en meting) en de bias (indicatie van gemiddelde onderschatting/overschatting) identiek.



Figuur 3-2 Vergelijking gemeten en gemodelleerde waterstand bij Weesp in 2018.

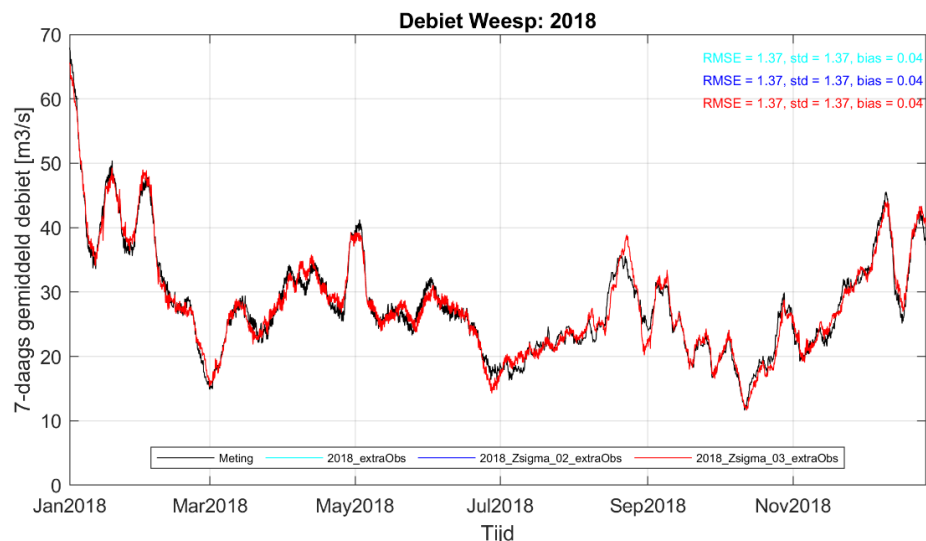
Tabel 3-3 toont een overzicht van de gemeten en gemodelleerde waterstand van bovenstrooms (Nieuwegein) tot benedenstroom (IJmuiden Binnen). Niet alleen zijn de gemodelleerde waterstanden op alle punten identiek, het verhang is daardoor ook identiek tussen de twee Z-sigma lagen configuraties en identiek aan het Z-lagen model. Het verhang tussen Buitenhuizen en IJmuiden Buiten wordt in alle simulaties onderschat (2,1 cm in de meting en 0,3 cm in het model). Opgemerkt wordt dat het meetpunt bij IJmuiden Binnen direct naast het spui- en maalcomplex ligt. De waterstand kan dus beïnvloed worden door zeer lokale effecten bij de spuiokers en inlaat naar het maalcomplex (dichtheden, snelheidshoogte). Een uitgebreide analyse van de verschillen tussen de gemeten en gemodelleerde waterstanden is gegeven in Verbruggen en van der Baan (2020).

Tabel 3-3 Overzicht gemiddelde waterstand en verhang in 2018 voor de meetpunten Nieuwegein, Surinamekade, Buitenhuizen en IJmuiden Binnen. Gemeten en gemodelleerd (beide Z-sigma lagen configuraties).

Meetpunt	Gemiddelde waterstand (1 jan 2018 – 1 jan 2019) [m NAP]			Gemiddelde waterstand (1 jan 2018 – 1 jan 2019) [m NAP] t.o.v. bovenstrooms meetpunt			Verschil gemiddeld verhang t.o.v. bovenstrooms meetpunt [%]	
	Meting	Z-lagen	Z-sigma	Meting	Z-lagen	Z-sigma	Z-lagen	Z-sigma
Nieuwegein	-0,386	-0,419	-0,419	-	-	-		
Surinamekade	-0,401	-0,437	-0,437	-0,015	-0,018	-0,018	+20%	+20%
Buitenhuizen	-0,411	-0,446	-0,446	-0,010	-0,009	-0,009	-10%	-10%
IJmuiden Binnen	-0,431	-0,449	-0,449	-0,021	-0,003	-0,003	-85%	-85%

3.3.2 Vergelijking met debietmeting bij Weesp

Figuur 3-3 toont de vergelijking van de gemeten en gemodelleerde debietreeks bij Weesp. Net zoals bij de waterstanden, is het gesimuleerde debiet identiek voor de Z-lagen simulatie en beide Z-sigma lagen configuratie (hier maar één getoond). De grootschalige waterbeweging is dus niet gevoelig voor de drie beschouwde verticale configuraties. De statistische analyse laat zien dat de gemodelleerde debieten gemiddeld genomen goed overeenkomen met gemeten debieten (bias van 0.04 m³/s en RMSE van slechts 1.37 m³/s). De zeer goede weergave van de debieten bij Weesp en Maarssen is te verklaren door het feit dat de waterbalans is gecorrigeerd op basis van de gemeten debieten, zie Verbruggen en van der Baan (2020).



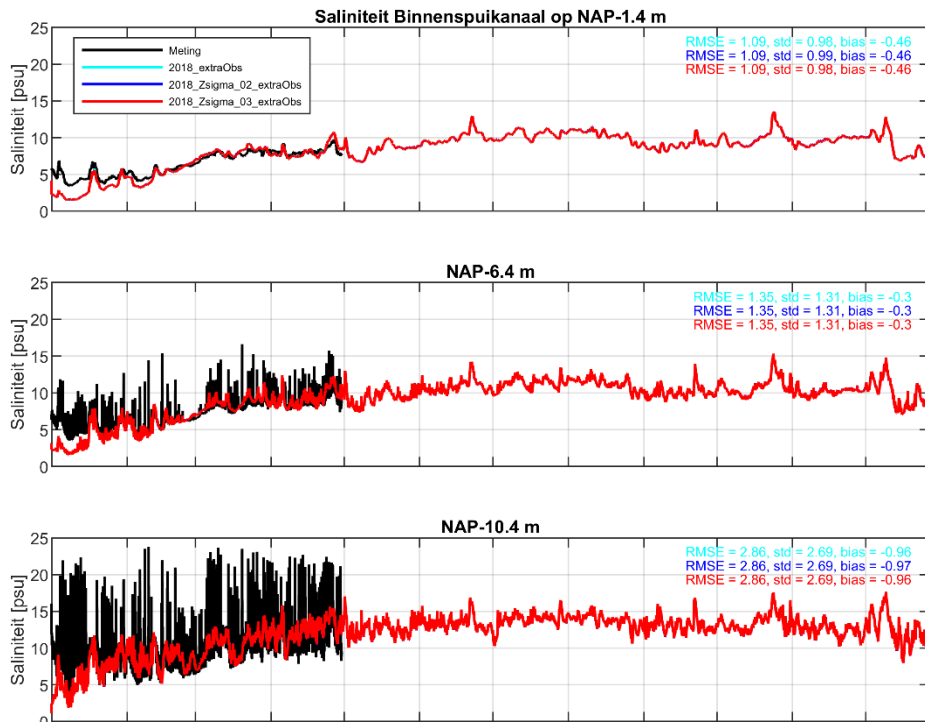
Figuur 3-3 Vergelijking 7-daags gemiddelde gemeten en gemodelleerd met beide Z-sigma configuraties, bij Maarsse in 2018.

3.3.3 Vergelijking met stationsmetingen voor zout

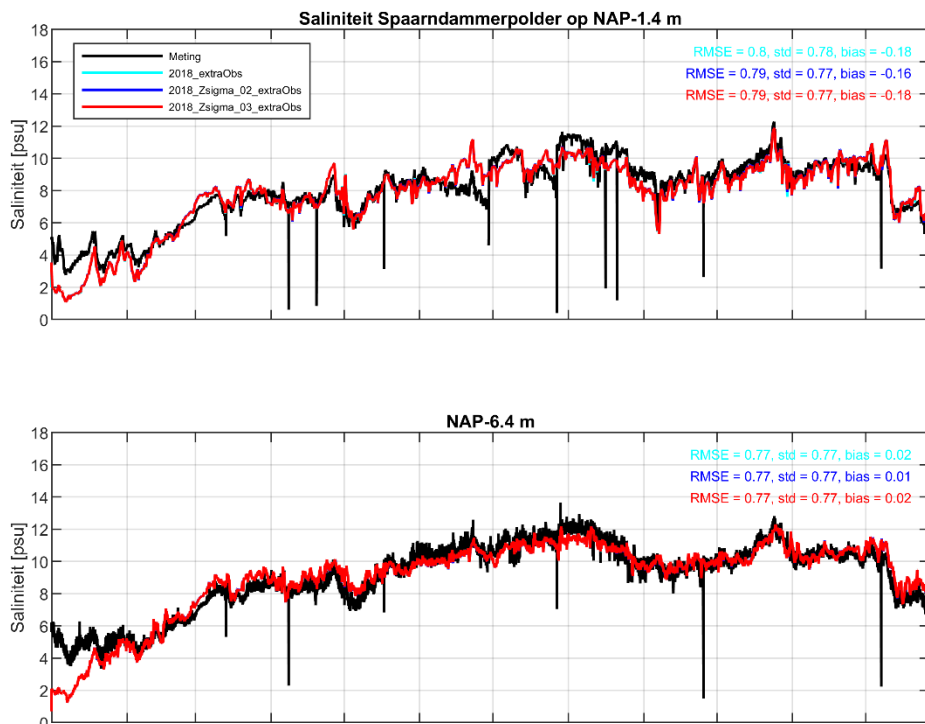
Figuur 3-4 toont de vergelijking tussen de meetseries (zwart) en de gesimuleerde saliniteitswaarde door de Z-lagen simulatie (cyaan) en voor beide Z-sigma configuraties (blauw en rood), bij meetstation Binnenspuikanaal op drie hoogten over de verticaal. Opgemerkt wordt dat de meetserie maar tot eind april 2018 loopt, toen het meetstation verplaatst werd naar de Velserkom. Het verschil in januari 2018 wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de initiële conditie van het model niet volledig aansluit op de gemeten concentraties³. De invloed van de initiële conditie is beperkt tot een periode van enkele weken tot ca. 3 maanden. Gedurende deze periode beweegt het systeem zich richting het nieuwe evenwicht. Los van het inspeleffect tijdens de eerste twee weken van januari volgen de gesimuleerde waarden de meetserie goed (RMSE aan het oppervlak is ongeveer 1 psu). Beide Z-sigma lagen configuraties presteren identiek; er is hier geen gevoeligheid voor het verschil in sigma-lagen aan het oppervlak. Zoals verwacht, worden de gemeten pieken op de grotere dieptes, net zoals bij de volledig Z-lagen configuratie, niet gereproduceerd omdat ze vermoedelijk veroorzaakt worden door enige lek van zoutwater bij de spuisluizen of het gemaal, dat niet is opgenomen in de randvoorwaarden van het model (RMSE in alle simulaties rond de 1.4 in het midden van de waterkolom en 2.9 psu bij de bodem). In alle simulaties wordt het zoutgehalte gemiddeld genomen iets onderschat (bias van -0.3 tot ongeveer -1 psu, afhankelijk van de diepte), dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de initiële onderschatting ten gevolge van de startconditie.

Hetzelfde kan geobserveerd worden bij de locatie Spaarndammerpolder (Figuur 3-5). De gesimuleerde waarden volgen de gemeten waarden goed, behalve in de periode juni – juli, wat ook geldt voor het volledig Z-lagen model. Opnieuw presteren beide Z-sigma lagen configuraties identiek (een RMSE van rond de 0.8 psu op beide meethoogtes).

³ Tijdens afronding van het project kwam het aan het licht dat deze afwijking in initiële conditie veroorzaakt wordt door een bug in D-HYDRO (geïntroduceerd in een versie na april 2020). In het .ext bestand wordt het initiële zoutgehalte opgegeven door zowel de *initialsalinity* als de *initialsalinitytop* te specificeren. De *initialsalinity* zou dan geïnterpreteerd moeten worden als het zoutgehalte bij de bodem en de *initialsalinitytop* als het zoutgehalte bij het wateroppervlak. In de D-HYDRO versie 2020.04 (gebruikt in Verbruggen en van der Baan, 2020) werkte dit zoals bedoeld. In de 2022.01_patch01 versie die voor deze studie is gebruikt wordt het zoutgehalte bij de bodem echter op 0 psu gezet bij initialisatie van het model. Aangezien deze fout zowel in de Z-lagen als Z-sigma lagen simulaties wordt gemaakt heeft dit geen invloed op de onderlinge vergelijking.



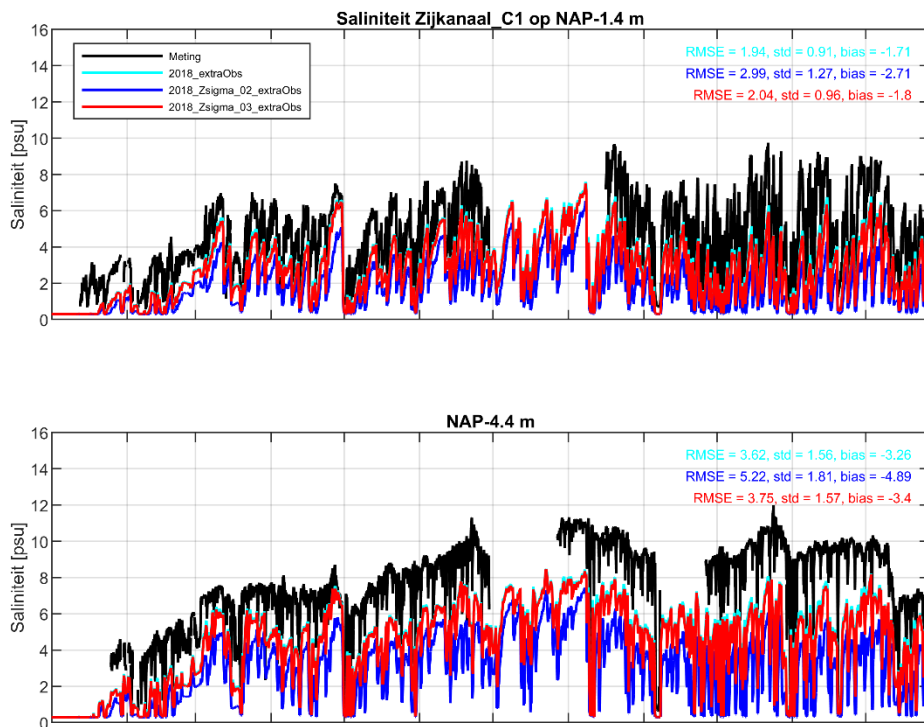
Figuur 3-4 Gemeten en gesimuleerde saliniteit bij het meetstation Binnenspuikanaal.



Figuur 3-5 Gemeten en gesimuleerde saliniteit bij het meetstation Spaarndamerpolder.

Dit is anders bij meetlocatie Zijkanaal C (Figuur 3-6). Hier is sprake van een grotere afwijking van de metingen en een verschil tussen de Z-sigma configuraties onderling. De configuratie met minder sigma lagen presteert beter, dat wil zeggen dat het gesimuleerde resultaat minder ver van de metingen ligt (RMSE van 2.04 psu vs 2.99 psu bij het oppervlak en 3.75 vs 5.22 psu op -4.4 m NAP). Echter, het volledige Z-lagen model, presteert het beste (RMSE van 2.04 aan het oppervlak en 3.6 nabij de bodem). Het afwijkende resultaat kan liggen aan het feit dat Zijkanaal C slechts circa 4,5 m diep is.

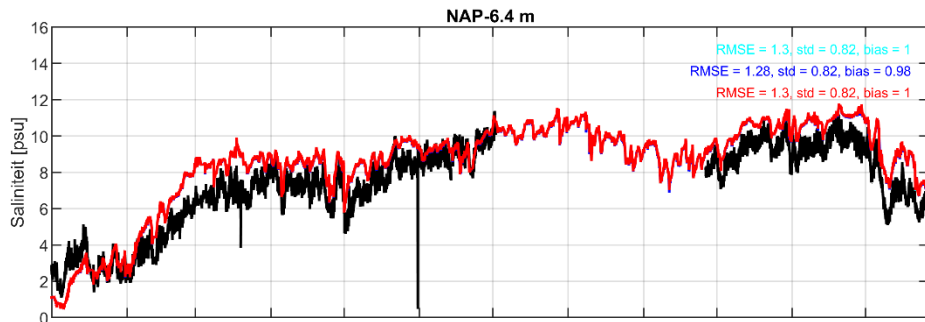
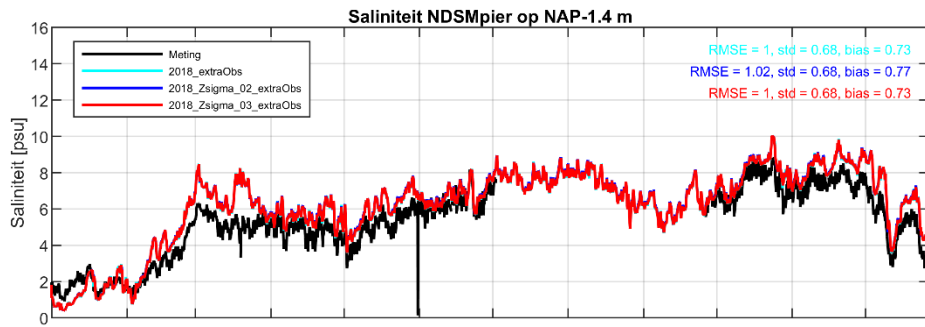
Bij de Z-sigma configuraties is daarmee een significant deel of zelfs de hele waterkolom opgebouwd uit sigma lagen. Dit lijkt een negatieve impact te hebben op de nauwkeurigheid qua reproductie van de saliniteit. Aanbevolen wordt om de redenen voor deze verschillen verder uit te zoeken. Opgemerkt wordt dat het zoutgehalte over de diepte wordt geïnterpoleerd naar -1,4 m en -4,4 m NAP en dat het hier dus niet gaat om verschillen ten gevolge van andere uitvoerhoogtes.



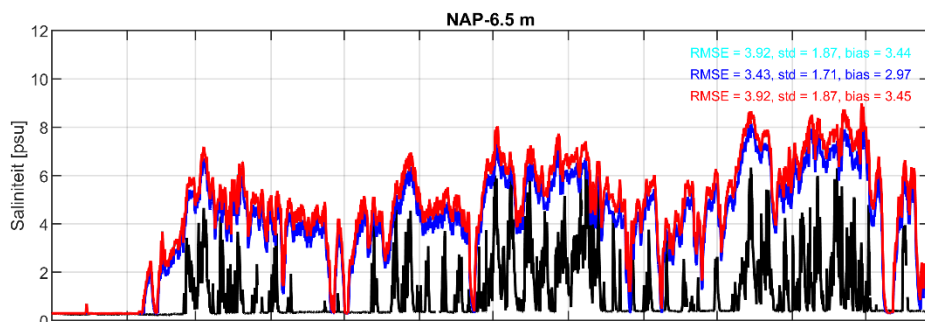
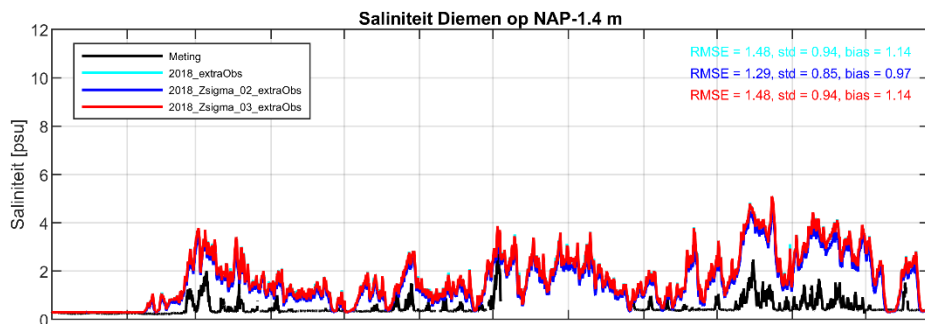
Figuur 3-6 Gemeten en gesimuleerde saliniteit bij het meetstation Zijkanaal C.

Bij NDSM-pier (Figuur 3-7) kan weer hetzelfde worden geobserveerd als bij het Binnenspuikanaal en Spaarndammerpolder. De Z-sigma lagen simulaties presteren identiek aan elkaar en identiek aan het volledige Z-lagen model (RMSE rond de 1 psu aan het wateroppervlak en 1.3 psu nabij de bodem).

Tot slot bij Diemen (Figuur 3-8). De simulatie met 5 sigma-lagen geeft een iets lagere zoutindringing bij Diemen, waardoor het gemiddeld genomen iets dichterbij de metingen ligt. De kortstondige zoutpieken in de meetseries, vooral bij de bodem, worden echter nog steeds niet goed gevolgd (RMSE van 3.4 psu). Dit was ook het geval bij de volledig Z-lagen configuratie (RMSE van 3.9 psu). Een Z-sigma configuratie lijkt hier niet de oplossing van het onderliggende probleem. Aanbevolen wordt om te onderzoeken of het gebruiken van meer lagen in het ARK (bijvoorbeeld 7 of 10 sigma lagen) leidt tot een betere prestatie bij Diemen.



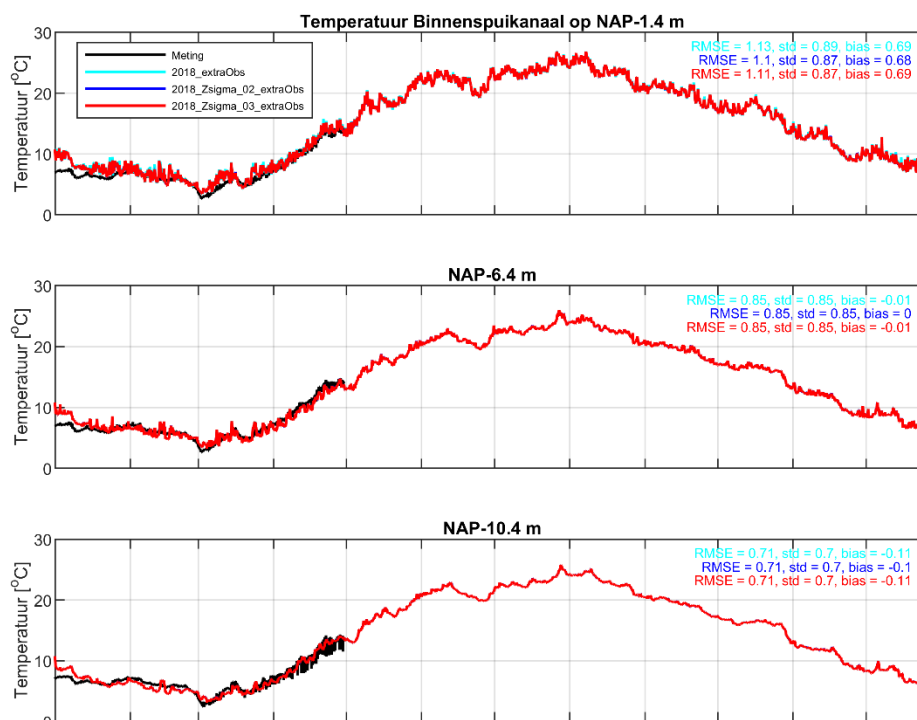
Figuur 3-7 Gemeten en gesimuleerde saliniteit bij het meetstation NDSM-pier.



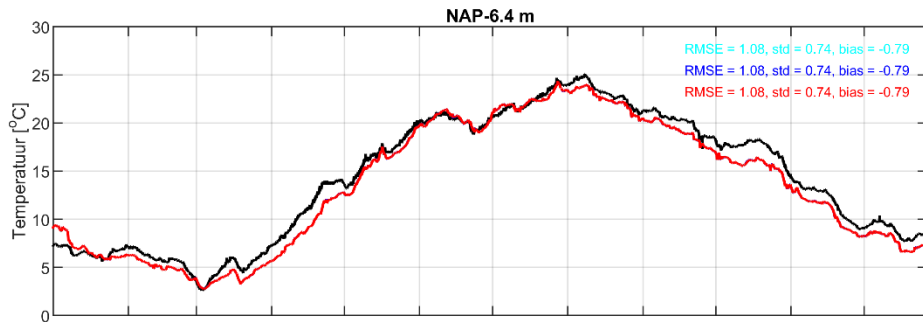
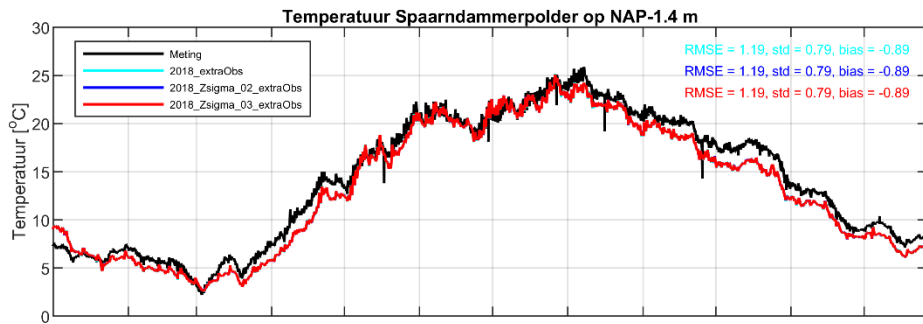
Figuur 3-8 Gemeten en gesimuleerde saliniteit bij het meetstation Diemen.

3.3.4 Vergelijking met stationsmetingen voor temperatuur

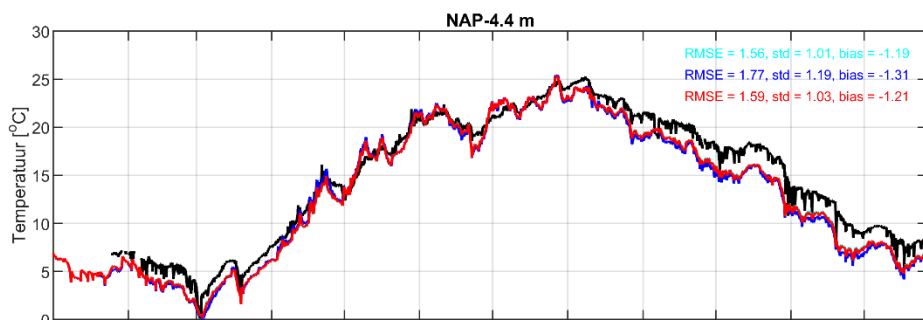
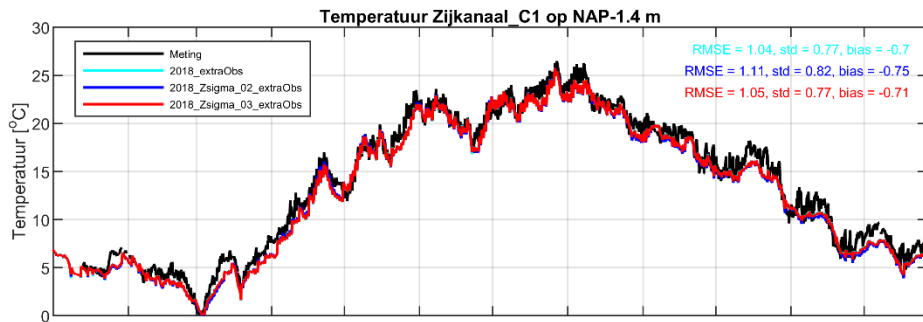
De vergelijking tussen de meting, de Z-lagen configuratie en beide Z-sigma lagen configuraties is getoond in Figuur 3-9 tot en met Figuur 3-13 voor de stations Binnenspuikanaal, Spaarndammerpolder, Zijkanaal C, NDSM-pier en Diemen, respectievelijk. De observaties zijn vrijwel identiek op alle locaties. De metingen worden goed gevolgd, zoals ook het geval was bij de volledige Z-lagen configuratie. Ook zijn er tussen beiden Z-sigma lagen configuraties geen significante verschillen waarneembaar. De RMSE is op de meeste meetlocaties rond de 1 °C. De verschillen in RMSE tussen de verschillende simulaties is vaak rond de 0.01 °C met een uitschieter tot ongeveer 0.2 °C bij Zijkanaal C (waar ook de grootste verschillen werden geobserveerd m.b.t. zoutgehalten, zie Paragraaf 3.3.3).



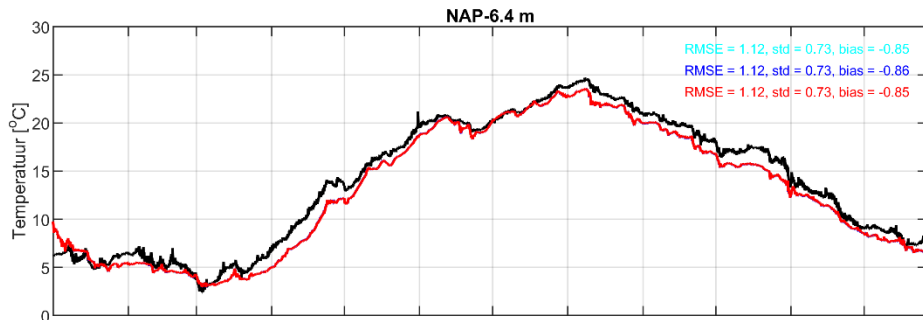
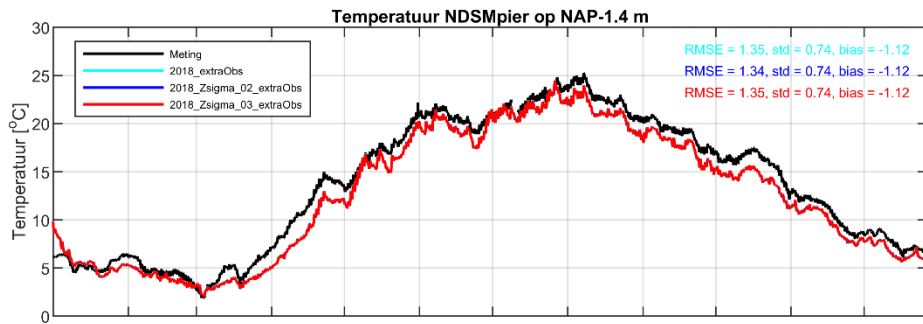
Figuur 3-9 Gemeten en gesimuleerde temperatuur bij het meetstation Binnenspuikanaal.



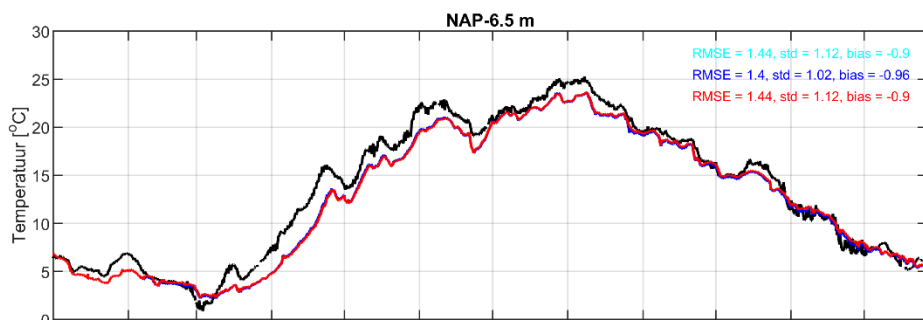
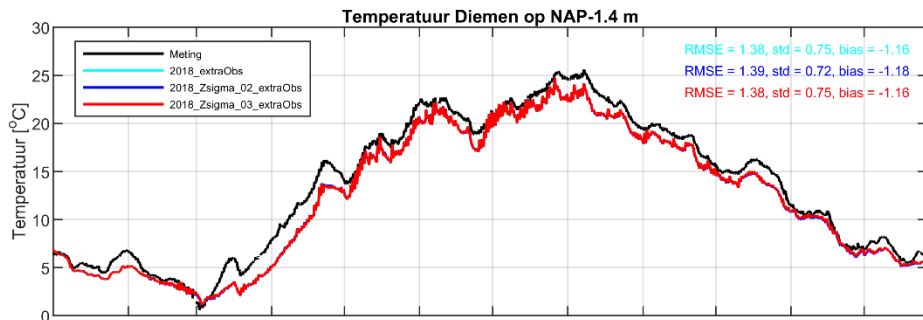
Figuur 3-10 Gemeten en gesimuleerde temperatuur bij het meetstation Spaarndammerpolder.



Figuur 3-11 Gemeten en gesimuleerde temperatuur bij het meetstation Zijkanaal C.



Figuur 3-12 Gemeten en gesimuleerde temperatuur bij het meetstation NDSM-pier.



Figuur 3-13 Gemeten en gesimuleerde temperatuur bij het meetstation Diemen.

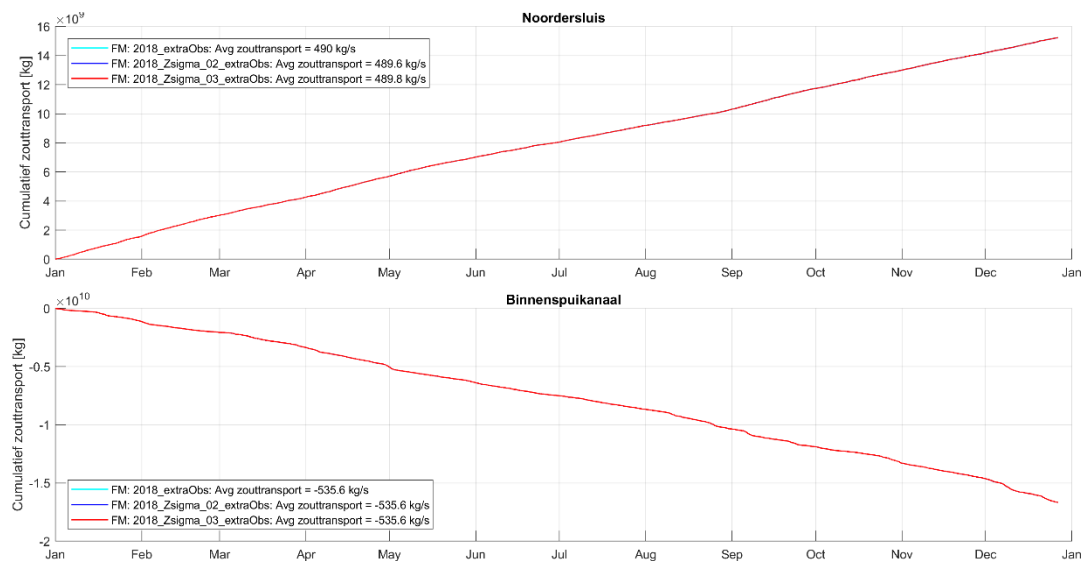
3.3.5 Vergelijking cumulatief zouttransport

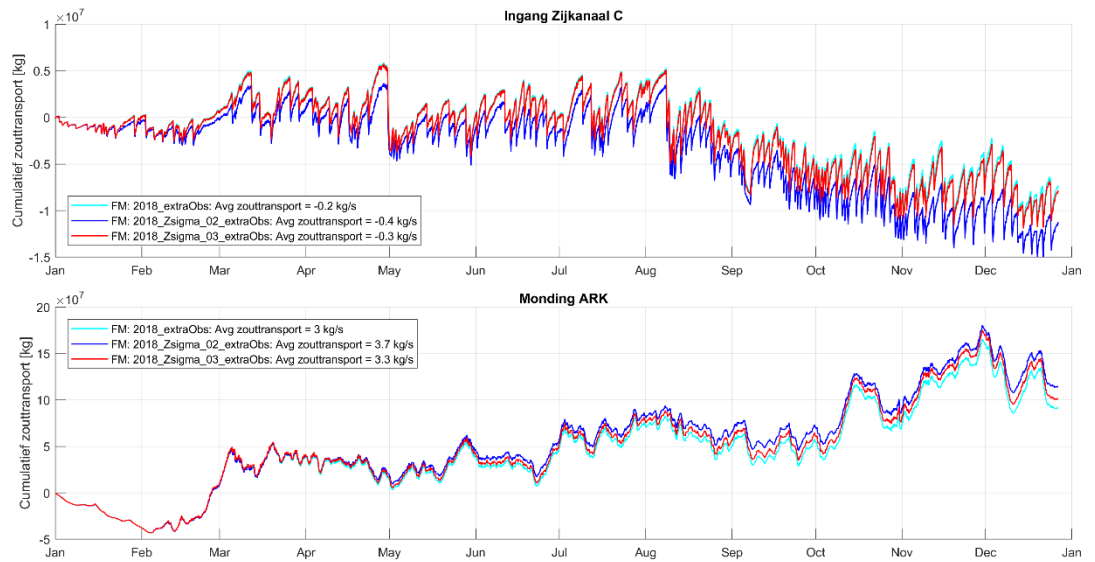
Op een aantal locaties is het cumulatieve zouttransport vergeleken tussen de originele Z-lagen simulatie en de twee Z-sigma simulaties, zie Figuur 3-14.

De grootste instroom van zout vindt plaats bij de Noordersluis en de grootste uitstroom van zout bij het spui-maalcomplex. Op beide locaties zijn de gemodelleerde zouttransporten in alle simulaties vergelijkbaar (verschillen kleiner dan 0,1%).

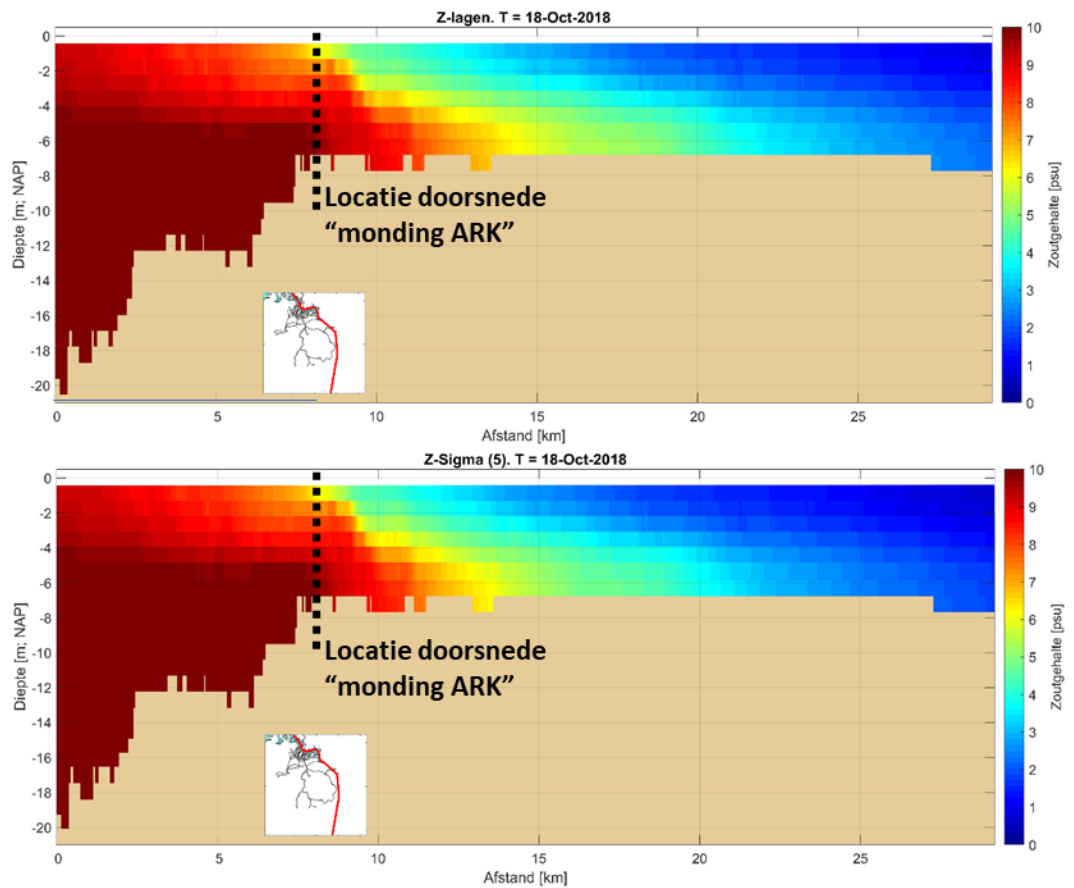
Bij Zijkanaal C zijn de absolute verschillen in zouttransport klein (verschillen van 0,1 tot 0,2 kg/s gemiddeld), maar in relatieve zin zijn wel significante verschillen te zien. Het feit dat er gemiddeld genomen zout vanuit Zijkanaal C naar het Noordzeekanaal stroomt komt door het feit dat er via het boezemgemaal Spaarndam regelmatig water (met een aangenomen zoutgehalte van 0,3 psu) in Zijkanaal C geloosd wordt. Het negatieve zouttransport is het grootst in de Z-Sigma simulatie met 5 sigma-lagen. Aangezien de instroom van zout via het boezemgemaal Spaarndam in alle simulaties gelijk is, moet er in de Z-sigma simulaties minder zout in het Zijkanaal C zitten. Dit komt overeen met de observaties op basis van Figuur 3-6.

Bij de monding van het ARK is het zouttransport gemiddeld positief (import van zout vanuit het Noordzeekanaal). In de Z-sigma simulatie met 5 sigma-lagen is het zouttransport groter dan in de Z-lagen simulatie (gemiddeld 3,7 kg/s tegenover 3 kg/s). Op basis hiervan zou men verwachten dat er meer zout in het ARK zit in de Z-sigma simulatie. Dit komt echter niet overeen met Figuur 3-8, waaruit blijkt dat het zoutgehalte bij Diemen lager is bij de Z-sigma simulatie. Ook langdoorsnedes van het zoutgehalte laten zien dat het zoutgehalte in het ARK lager is in de Z-sigma simulatie (zie Figuur 3-15). Mogelijk is het verschil gerelateerd aan het feit dat D-HYDRO een 'upwind' benadering gebruikt voor het berekenen van de transporten door de 'cross-sections'. Het is bekend dat dit leidt tot afwijkingen in geval van sterke dichtheidsgradiënten nabij de 'cross-section'. Of dat hier ook daadwerkelijk speelt is binnen de huidige studie niet verder uitgezocht. Aanbevolen wordt om in toekomstige simulaties een extra cross-sectie te definiëren ter hoogte van Gemaal Zeeburg, waar het dwarsprofiel naar verwachting uniformer is in stroomrichting en er bovenstrooms daarvan minder interactie is met de grachten van Amsterdam, zodat het gemodelleerde cumulatieve zouttransport directer gerelateerd kan worden aan het ARK.





Figuur 3-14: Vergelijking van het cumulatieve zouttransport op een aantal locaties in het model. Van boven naar beneden: Noordersluis, Binnenspuikanaal, Ingang Zijkanaal C en bij de monding van het ARK. Zouttransporten vanaf zee richting land zijn positief.



Figuur 3-15: Langsdoorsnede van het gemodelleerde zoutgehalte vanaf het Binnen-IJ tot Nieuwersluis op 18 oktober 2018 (gerekend vanaf ongeveer km 20 op het NZK). Boven: Z-lagen simulaties, onder: Z-Sigma simulatie met 5 sigma-lagen.

3.4 Conclusies gevoeligheidsanalyse

Het discretiseren van de verticaal met behulp van een Z-sigma configuratie levert geen concrete winst op ten opzichte van een volledige Z-lagen configuratie ten aanzien van nauwkeurigheid van de modelresultaten.

- De gemodelleerde waterstand is identiek bij beide Z-sigma lagen configuraties. Daarmee is ook het gemodelleerde verhang identiek. Dit verhang is gelijk aan het verhang gemodelleerd met het Z-lagen model. De prestaties zijn daarmee identiek.
- Ook het gemodelleerde debiet is niet gevoelig voor de gekozen verticale schematisatie.
- De prestaties qua zout zijn doorgaans identiek aan een volledig Z-lagen model. Echter, in het relatief ondiepe Zijkanaal C geeft een Z-sigma lagen model minder nauwkeurige resultaten. Bij Diemen zijn de zoutgehalten in de Z-sigma simulaties iets lager, waardoor het gemiddeld genomen iets dichter bij de metingen ligt. De kortstondige zoutpieken in de meetseries, vooral bij de bodem, worden echter nog steeds niet gevolgd. Een Z-sigma configuratie met de gekozen instellingen (3 of 5 sigma lagen) lijkt hiervoor niet de oplossing.
- Qua temperatuur presenteren alle configuraties, Z-lagen en beide Z-sigma schematisaties, identiek en nauwkeurig.

Aanbevolen wordt om te onderzoeken of de prestatie bij onder andere Diemen en Zijkanaal C verbeterd bij een hogere lokale verticale resolutie. Dat zou bereikt kunnen worden door bijvoorbeeld 7 of 10 sigma-lagen te gebruiken. Voor de Z-sigma overgang zou dan gekozen kunnen worden voor een lager niveau, zodat de laagdikte behoorlijk uniform blijft over de diepte. Het nadeel is dan wel dat bij de monding van het ARK de diepteovergang van ARK naar NZK binnen de sigma lagen valt, waardoor mogelijk numerieke menging op kan treden. Bij een Z-sigma overgang op bijvoorbeeld -6 m NAP voorkom je dat, maar dan is de laagdikte van de sigma lagen kleiner dan onderin de waterkolom. Eventueel zou je de laagdikte in het Z-lagen gedeelte al kunnen variëren, zodat het goed aansluit op het sigma-lagen gedeelte.

4 Conclusies en aanbevelingen

Met betrekking tot Taak 2 (implementatie selectieve onttrekking) kan het volgende worden geconcludeerd:

- De selectieve onttrekking kan succesvol opgenomen worden in het zesde-generatiemodel met behulp van de 'general structure' benadering.
- De zouttransporten in het uitgeknipte zesde-generatiemodel (met zowel een Z-sigma als Z-lagen schematisatie) zijn vergelijkbaar met de, nauwkeurig geachte, CFD resultaten uit Bijlsma et al (2020) en iets lager dan de Delft3D4 simulaties.
- De oorzaken van de verschillen tussen gesimuleerde zouttransporten in de Delft3D4 en D-HYDRO simulaties zijn waarschijnlijk gerelateerd aan verschillen in afhandeling van de randvoorwaarden, afhandeling van de SO-IJ (3D-gates versus general structure) en interpretatie van de bodemgegevens in de simulaties. Binnen de huidige studie is de invloed van de hierboven beschreven mogelijke oorzaken niet verder geanalyseerd.

Met betrekking tot Taak 3 (testen Z-sigma schematisatie) kan het volgende worden geconcludeerd:

- Over het algemeen zijn de gemodelleerde debieten, waterstanden, zoutgehalten en temperaturen in de Z-sigma simulaties gelijk aan de oorspronkelijke simulatie waarin alleen Z-lagen zijn gebruikt. Op een aantal (ondiepe) locaties zijn kleine verschillen te zien met betrekking tot de gemodelleerde zoutgehalten. Bij Zijkanaal C leidt dit tot een groter verschil met de metingen en bij Diemen juist tot een iets kleiner verschil. In algemene zin kan gesteld worden dat de prestatie van het model nauwelijks is beïnvloed door de geteste Z-sigma configuraties (3 en 5 sigma lagen). Lokaal zijn er wel kleine verschillen te zien. De oorzaak hiervan moet nog verder onderzocht worden.

Op basis van deze studie zijn de volgende aanbevelingen geformuleerd:

- Het wordt aanbevolen om na realisatie van SO-IJ, metingen te doen om de werkelijke effectiviteit en weerstand van het zoutscherm te bepalen. Op basis hiervan kan de general structure benadering in D-HYDRO verder afgeregeld worden. Hieronder een beknopt overzicht van de benodigde meetgegevens:
 - Debiet onder het zoutscherm (met behulp van 1 of meerdere verticaal gerichte ADCPs)
 - Bijbehorende (gemiddelde) zoutgehalte
 - Waterstand aan beide zijden van het zoutscherm.
- Aanbevolen wordt om te testen of het gebruiken van meer sigma-lagen (bijvoorbeeld 7 a 10) tot verbetering leidt in Zijkanaal C en het Amsterdam-Rijnkanaal.

Referenties

Bijlsma, A.C., Weiler, O.M. (2019). Selectieve Onttrekking IJmuiden – Samenvatting hydraulisch onderzoek. Deltares, rapport 11203285-010-HYE-0001, december 2019.

Bijlsma, A.C., A. de Loor en T. Boschetti (2020). Selectieve Onttrekking IJmuiden –

Fase 1: Hydraulisch Ontwerp. Deltares rapport 11200215-000-HYE-0050, versie 2, juni 2020.

De Fockert, A., O'Mahoney, T. S. D., Nogueira, H. I. S., Oldenziel, G., Bijlsma, A. C., & Janssen, H. (2022). Assessing the Effectiveness of the IJmuiden Salt Screen Design for Nonuniform Selective Withdrawal by Physical and Numerical Modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148(2), [05021011]. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001958](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001958)

Van Banning, G., van der Baan, J., Geleynse, N. (2016). Debiet verzilting ARK: Benodigd debiet om verzilting vanuit NZK tegen te gaan, een 3D modelstudie. Arcadis Rapport C03041.002133, november 2016.

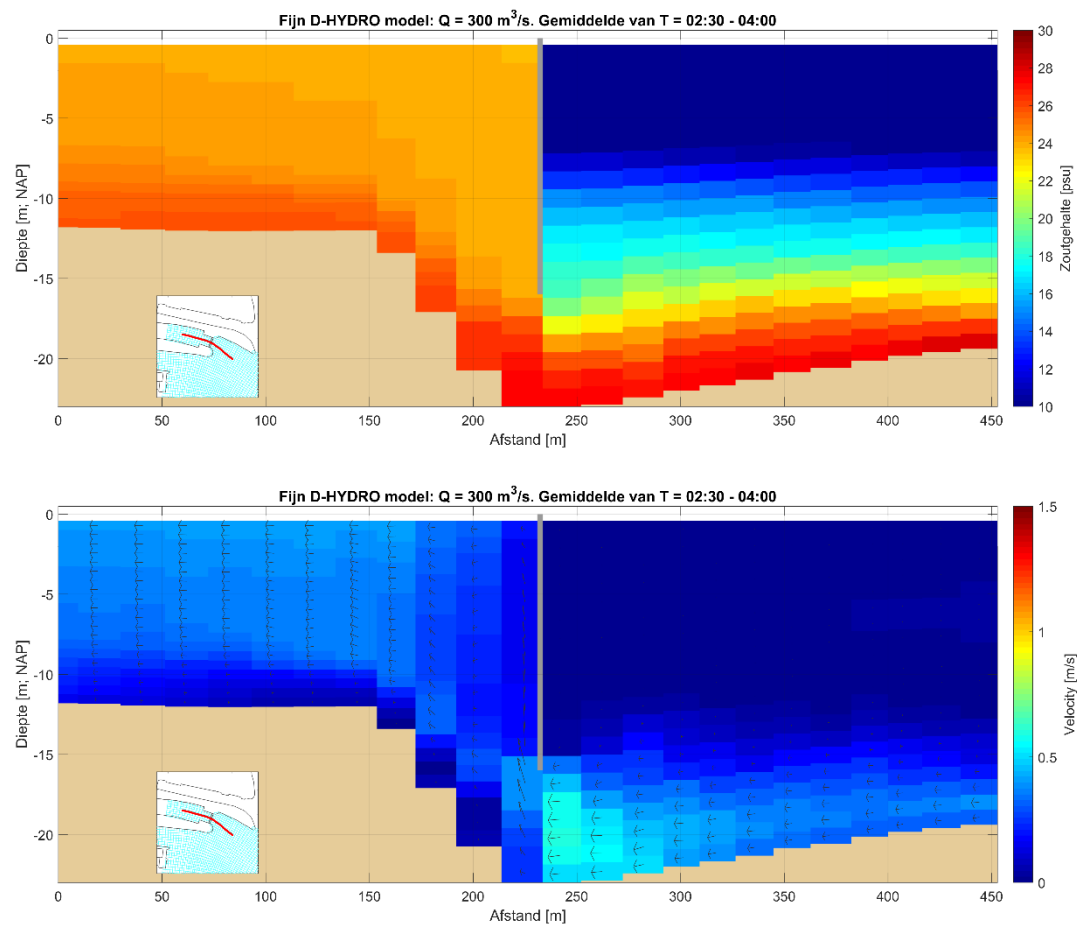
Verbruggen, W. (2019). Effectiviteit van de selectieve onttrekking bij IJmuiden in het droge jaar 2018. Deltares rapport 11200215-004-HYE-0012, november 2019.

Verbruggen, W., van der Baan, J., Buschman, F. (2019). D-HYDRO pilotproject voor het NZK-ARK. Beschrijving van modelopzet en eerste resultaten – 60% versie. Voorlopig. Deltares Rapport 11203712-002-ZKS-0005. December 2019.

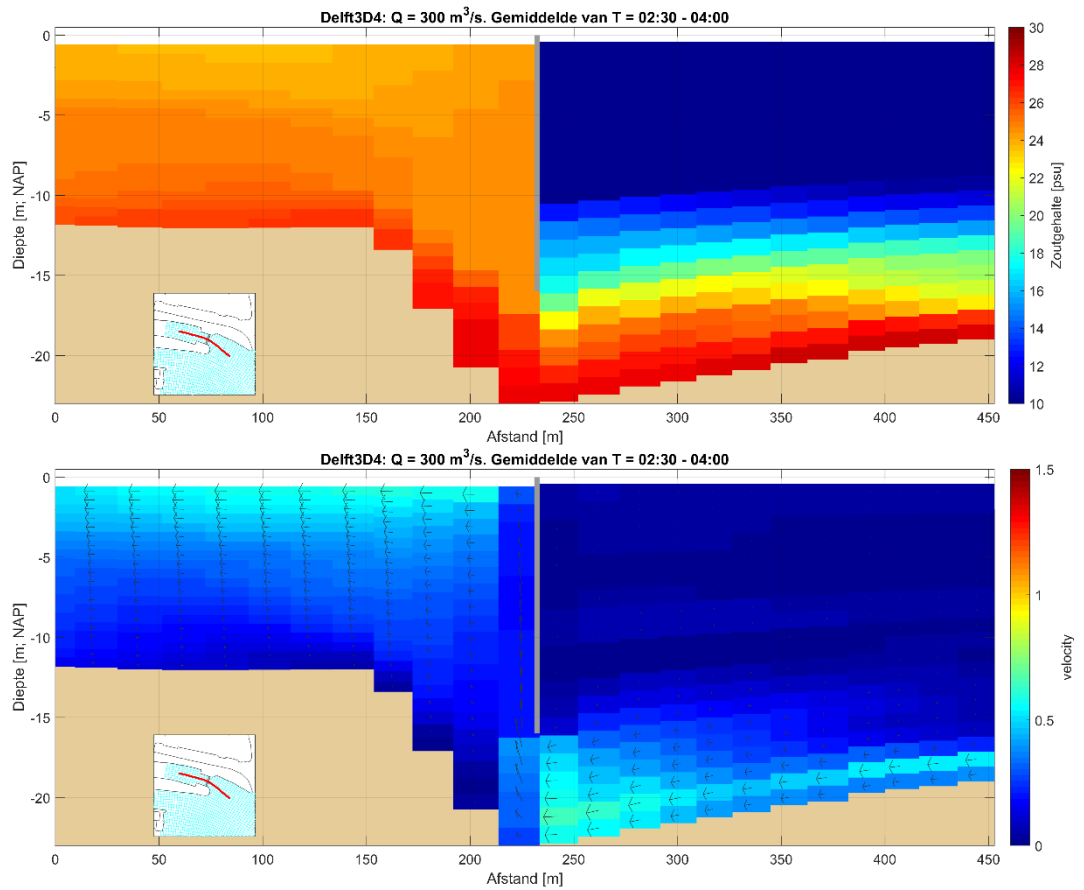
Verbruggen, W., van der Baan, J. (2020). Ontwikkeling zesde-generatie 3D Noordzeekanaal Amsterdam-Rijnkanaal model: Modelbouw, kalibratie en validatie. Deltares Rapport 11205258-011-ZWS-0004, december 2020.

A Resultaten 300 m³/s en 500 m³/s

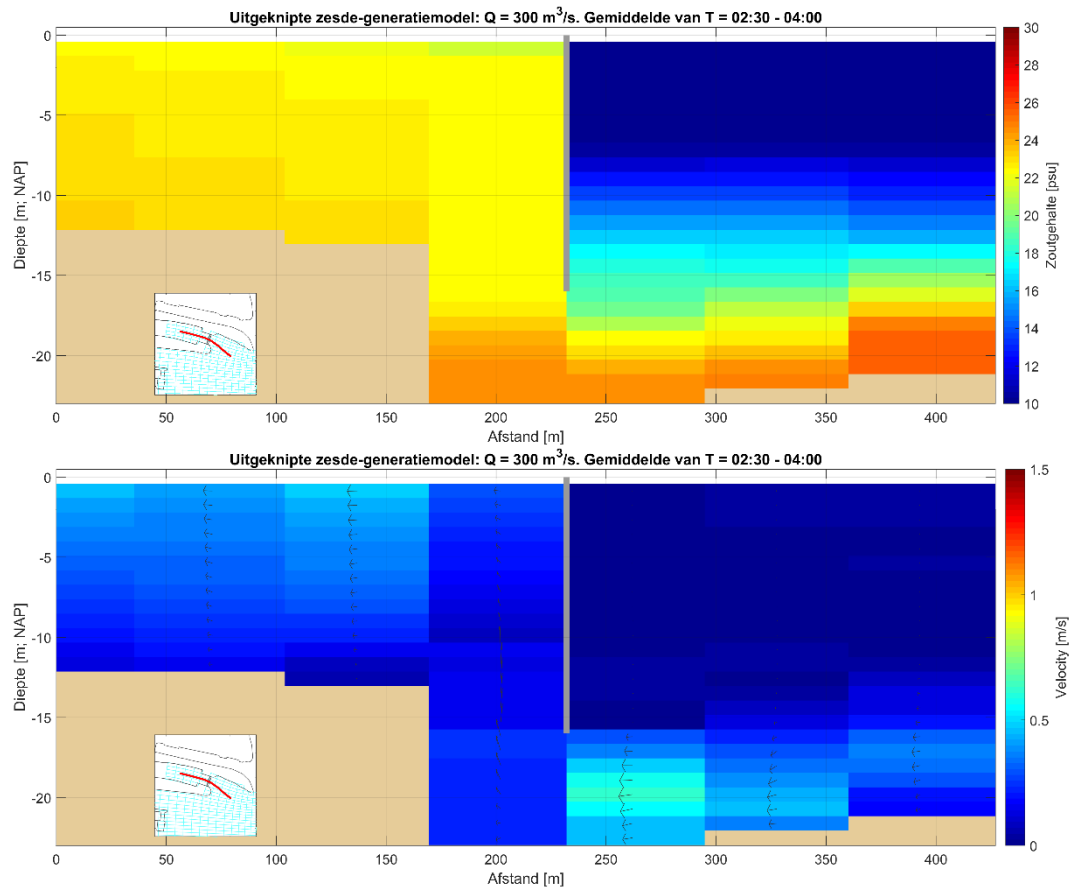
A.1 300 m³/s



Figuur A-1: Zoutgehalte (boven) en stroomsnelheden (onder) op een doorsnede door de selectieve onttrekking, Fijne D-HYDRO model, Q = 300 m³/s, gemiddelde van 2,5 - 4 uur na begin van de simulatie.

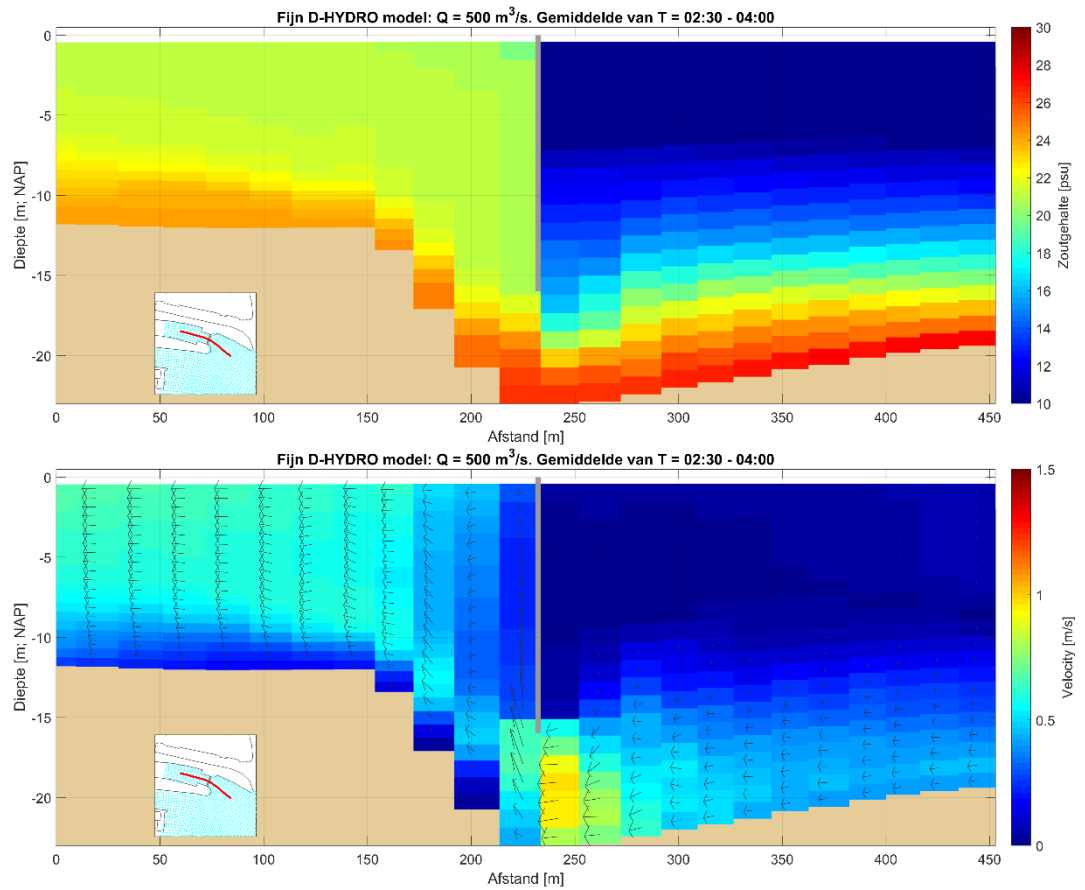


Figuur A-2: Zoutgehalte (boven) en stroomsnelheden (onder) op een doorsnede door de selectieve onttrekking, Delft3D4 model, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$, gemiddelde van 2,5 - 4 uur na begin van de simulatie.

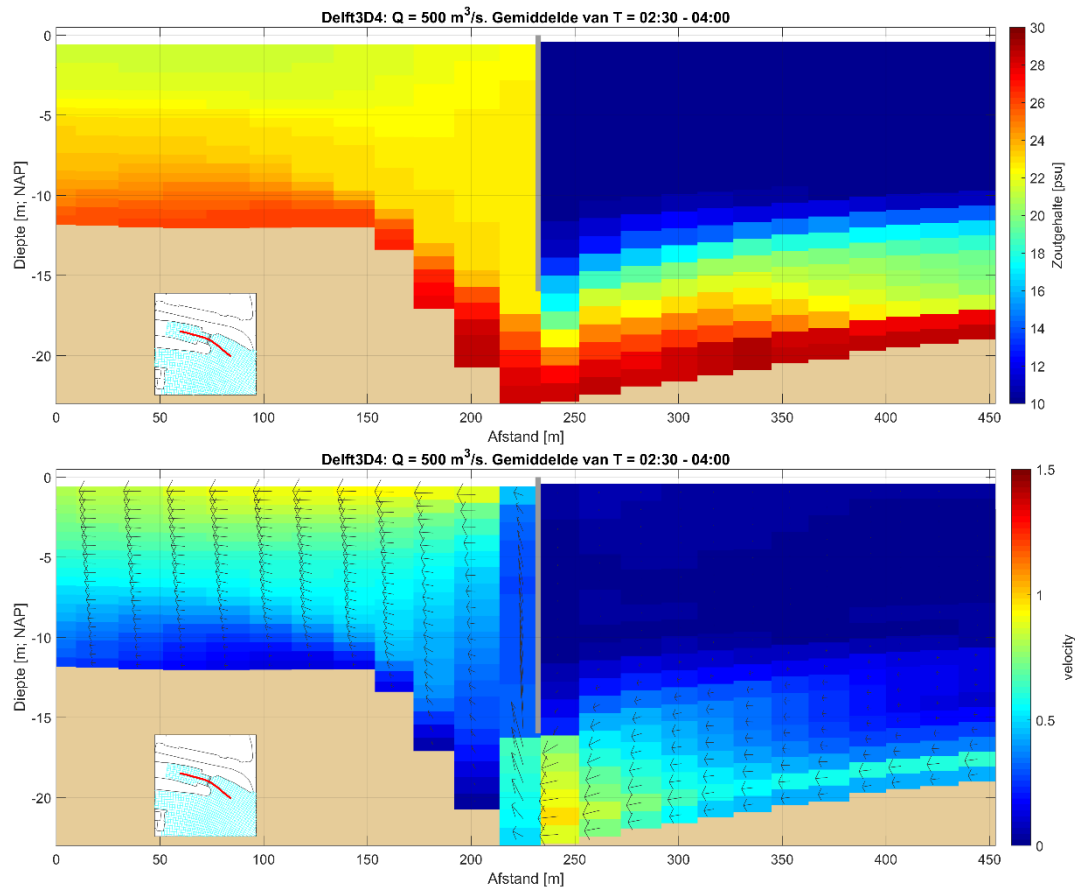


Figuur A-3: Zoutgehalte (boven) en stroomsnelheden (onder) op een doorsnede door de selectieve onttrekking, uitgeknipte zesde-generatiemodel, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$, gemiddelde van 2,5 - 4 uur na begin van de simulatie.

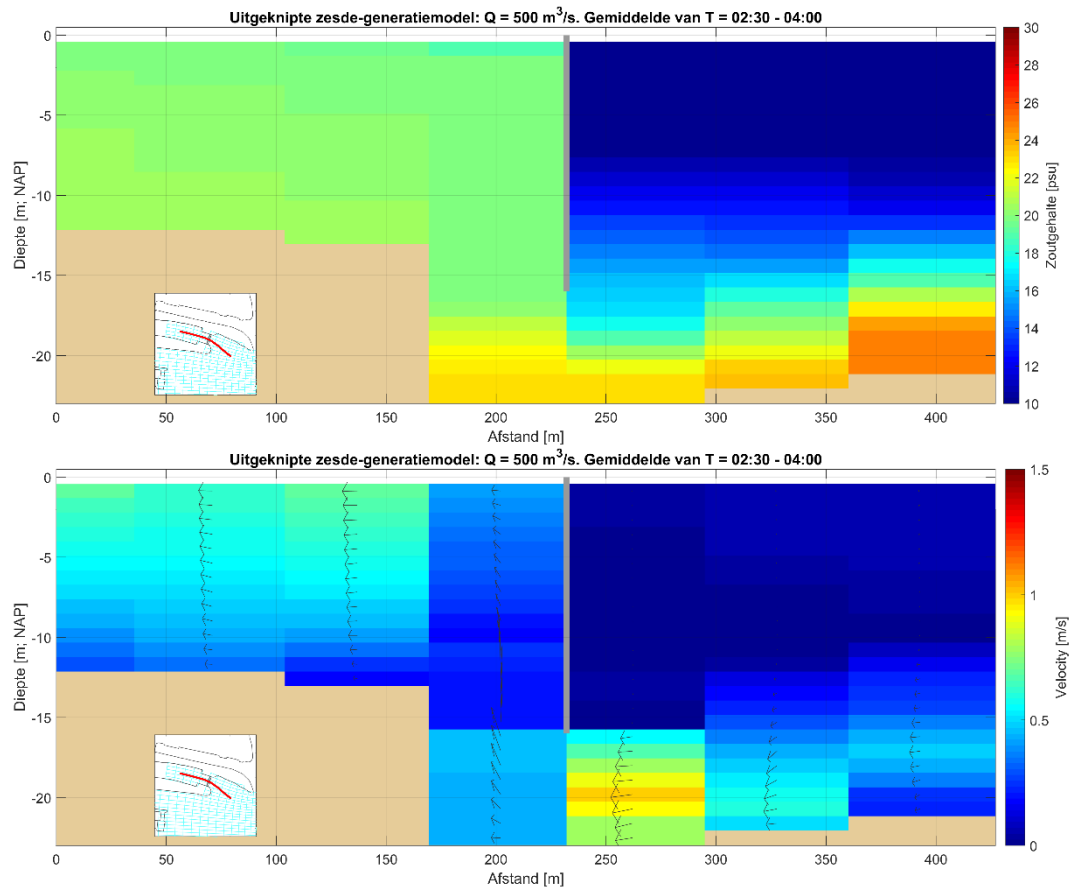
A.2 500 m³/s



Figuur A-4: Zoutgehalte (boven) en stroomsnelheden (onder) op een doorsnede door de selectieve onttrekking, Fijne D-HYDRO model, Q = 500 m³/s, gemiddelde van 2,5 - 4 uur na begin van de simulatie.



Figuur A-5: Zoutgehalte (boven) en stroomsnelheden (onder) op een doorsnede door de selectieve onttrekking, Delft3D4 model, $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, gemiddelde van 2,5 - 4 uur na begin van de simulatie.



Figuur A-6: Zoutgehalte (boven) en stroomsnelheden (onder) op een doorsnede door de selectieve onttrekking, uitgeknipte zesde-generatiemodel, $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, gemiddelde van 2,5 - 4 uur na begin van de simulatie.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl