

Ontwikkeling zesde-generatie 3D Noordzeekanaal Amsterdam-Rijnkanaal model

Actualisatie modelschematisatie 2023



Ontwikkeling zesde-generatie 3D Noordzeekanaal Amsterdam-Rijnkanaal model
Actualisatie modelschematisatie 2023

Auteur(s)
Roland Vlijm

Ontwikkeling zesde-generatie 3D Noordzeekanaal Amsterdam-Rijnkanaal model
Actualisatie modelschematisatie 2023

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving.
Contactpersoon	Inge van Tongeren, Martin Scholten en Arjen Kikkert.
Referenties	11209233-000-ZWS-0004 Werkplan MAD 09 2024 - NZK-ARK.
Trefwoorden	Noordzeekanaal, Amsterdam-Rijnkanaal, D-HYDRO, zesde-generatie, modelschematisatie, D-FLOW Flexible Mesh, zoutindringing.

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	15-04-2025
Projectnummer	11210333-010
Document ID	11210333-010-ZWS-0001
Pagina's	88
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)		
	Roland Vlijm	

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de actualisatie van de zesde-generatie modelschematisatie voor het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal (NZK/ARK) in de D-HYDRO suite. Deze modelschematisatie betreft een driedimensionaal hydrodynamisch model in de D-FLOW FM module van D-HYDRO voor 2023. Dit model is geschikt om de waterbeweging, het zoutgehalte en de temperatuur van het NZK/ARK te berekenen. Deze actualisatie is in samenwerking met Rijkswaterstaat uitgevoerd.

Voor de actualisatie van het NZK/ARK model is uitgegaan van de modelschematisaties van Verbruggen en van der Baan (2020). In die studie zijn modelschematisaties opgezet, gekalibreerd en gevalideerd met randvoorwaarden voor 2015 en 2018. Bij de opzet van deze modelschematisaties is rekening gehouden met de toepassingen en de eindgebruikers van het model en het Programma van Eisen (PvE) opgesteld in samenwerking met RWS.

In deze huidige actualisatie is een nieuwe modelschematisatie opgezet voor het NZK/ARK met randvoorwaarden voor 2023. Nieuw in deze modelschematisatie zijn onder andere de Zeesluis IJmuiden en de verbreding van het Lekkanaal. Geometrische data van de modelschematisatie is geactualiseerd met de laatste versie van Baseline. Randvoorwaarden van het model zijn opnieuw opgezet voor 2023 op basis van beschikbare ruwe data voor de grootste (laterale) debieten van het model, de zoutlast via de schutsluizen bij IJmuiden, meteorologie en industriële lozingen. Modelinstellingen en keuzes voor randvoorwaarden zijn zoveel mogelijk consistent gehouden met eerdere modelschematisaties voor het NZK/ARK.

De resultaten van het NZK/ARK model zijn gevalideerd tegen metingen van waterstanden, debiet, temperatuur en zoutgehalte. Tevens is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de belangrijkste keuzes in de modelopzet en nieuwe modelinstellingen. Resultaten van de validatie en gevoeligheidsanalyse zijn geëvalueerd voor de belangrijkste doeleinden van het model. Een aparte modelschematisatie is opgezet voor de toekomstige situatie, i.e. inclusief de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Inhoud	5
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doel	8
1.3	Toepassingen van het model	8
1.4	Gebruikte programmatuur en hardware	8
1.5	Leeswijzer	8
1.6	Terminologie	9
2	Beschikbare data	10
2.1	Geometrie in Baseline	10
2.2	Meetgegevens ten behoeve van validatie	10
2.3	Afvoeren lateralen	11
2.4	Randvoorwaarden Schutsluizen IJmuiden	11
2.5	Meteorologie	12
3	Aanpassingen aan de model opzet	13
3.1	Roosteraanpassingen	13
3.2	Projectie vanuit Baseline	15
3.3	Debiet randvoorwaarden	16
3.3.1	Lateralen	16
3.3.2	Spui- maaldebieten	19
3.3.3	Schutsluizen IJmuiden	20
3.3.4	Correcties op de waterbalans	21
3.3.4.1	Waterbalans correctie bovenstrooms Weesp	22
3.3.4.2	Waterbalans correctie totale debiet	23
3.3.5	Update van de industriële lozingen	25
3.4	Meteorologie	26
3.5	Overige aanpassingen	27
3.6	Selectieve Onttrekking	27
4	Validatie	30
4.1	Methodiek	30
4.2	Resultaten validatie	30
4.2.1	Waterstanden	30
4.2.2	Debietmetingen bij Weesp en Maarsen	32
4.2.3	Vergelijking stationsmetingen in NZK en ARK	34

4.2.3.1	Vergelijking zoutgehalte	34
4.2.3.2	Vergelijking temperatuur	38
4.2.4	Vergelijking 100-punten metingen	41
4.2.4.1	Vergelijking zoutgehalte	41
4.2.4.2	Vergelijking temperatuur	44
4.3	Conclusies validatie	47
5	Gevoeligheidsstudie	49
5.1	Overzicht van gevoeligheidstesten	49
5.2	Waterbalans	50
5.2.1	Optie 1: Waterbalans correctie bij Schellingwoude	51
5.2.2	Optie 2: Waterbalans correctie instroomranden.	53
5.3	Verticale menging in het model	54
5.4	Zoutlast en waterbalans	56
5.5	Selectieve Onttrekking	58
6	Discussie	60
7	Conclusies en aanbevelingen	62
7.1	Algemeen	62
7.2	Conclusies	62
7.2.1	Validatie	62
7.2.2	Toepassing van het model	63
7.3	Aanbevelingen	64
7.3.1	Aanleg en beheer	64
7.3.2	Vergunningverlening	65
7.3.3	Operationeel inzetten van het model	65
7.3.4	Kennisontwikkeling	66
8	Referenties	67
A	Debiet metingen	68
B	Validatie 100-punten metingen	72
B.1	Zoutgehalte	72
B.1.1	Mei 2023	72
B.1.2	September 2023	76
B.2	Temperatuur	80
B.2.1	Mei 2023	80
B.2.2	September 2023	84

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Nederland staat voor een aantal (onderling met elkaar samenhangende) maatschappelijke opgaven, waaronder klimaatverandering, de energietransitie, het verlies van biodiversiteit, verstedelijking en de woningbouwopgave. In het kader van de ondersteuning van de primaire processen voor het hoofdwatersysteem en het hoofdvaarwegensysteem werkt RWS aan een samenhangend hydraulisch modelinstrumentarium. Het instrumentarium vormt met de combinatie van modellen, applicaties en data (MAD) een belangrijke basis in het vormgeven en implementeren van beleid. Het instrumentarium heeft daarnaast een belangrijke rol voor de informatieverstrekking over water en ondergrond voor crisismanagers en waterbeheerders.

Er wordt binnen het project MAD 09 2024 - Hydraulica schematisaties – zoet/zout continu gewerkt aan een samenhangend hydraulisch modelinstrumentarium, waarbij het aantal modelversies zoveel mogelijk wordt beperkt en de modellen zoveel mogelijk worden opgebouwd en ontwikkeld volgens dezelfde technieken en methodes (consistentie) en tevens onderling koppelbaar moeten zijn. Deze projecten zijn faciliterend aan overige projecten, zoals bijvoorbeeld het Beslissings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI), het Nationaal Watermodel (NWM) en de operationele voorspelsystemen (RWsOS-en).

MAD 09 2024 - Hydraulica schematisaties – zoet/zout valt onder de thematafel Modellen Applicaties en Data (MAD) en worden uitgevoerd in het kader van de SITO¹-Programmasubsidie IenW 2024. Er wordt bijgedragen aan een tweetal hoofdactiviteiten uit deze thematafel, zijnde:

1. Actueel en geschikt houden van een adequaat instrumentarium (A1)
2. Onderzoek naar een toekomstig adequaat instrumentarium (A2)

Het lange termijn doel is om de komende jaren te werken aan de continuïteit en de borging van de hydraulische modellen van het RWS beheergebied in de zesde-generatie, waarbij gebruik wordt gemaakt van de generieke functionele specificaties voor zesde-generatie modellen en de software van de D-HYDRO Suite.

Voor het Noordzeekanaal Amsterdam-Rijnkanaal (NZK/ARK) zijn in 2020 officiële zesde-generatie 3D modelschematisaties in D-HYDRO opgezet voor de jaren 2015 en 2018 (Verbruggen en van der Baan, 2020). Deze modelschematisaties zijn gebaseerd op eerdere modelontwikkelingen van Arcadis (van Banning et al., 2016). Met onder andere de in gebruik name van de Zeesluis IJmuiden in 2022 zijn deze modelschematisaties verouderd. In 2024 is ook de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden in gebruik genomen.

Op verzoek van Rijkswaterstaat is besloten om het zesde-generatie modelinstrumentarium voor het NZK/ARK te actualiseren met een modelschematisatie voor 2023. Tevens is besloten om een aparte NZK/ARK 2023 modelschematisatie te maken met daarin de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden. Dit is de situatie vanaf eind 2024. De opzet van de Selectieve Onttrekking en de benodigde aanpassingen van het rekenrooster en bodemschematisatie zijn gebaseerd op Verbruggen en van der Baan (2022).

¹ SITO=Subsidieregeling instituten voor toegepast onderzoek

Deze opdracht is uitgevoerd in een samenwerking tussen Deltares en Rijkswaterstaat. Rijkswaterstaat heeft een deel van de werkzaamheden uitgevoerd. Een deel van deze opdracht is gefinancierd uit het SITO programma Waterverdeling en Verzilting (WBB02).

1.2 Doel

Het doel is:

- Actualisatie van het zesde-generatie D-HYDRO modelinstrumentarium voor het NZK/ARK met een 3D modelschematisatie voor 2023.
- Valideren van de 2023 modelschematisatie met beschikbare metingen.
- Het opzetten van een modelschematisatie voor 2023, inclusief de Selectieve Onttrekking IJmuiden. Dit is representatief voor de situatie vanaf eind 2024.

1.3 Toepassingen van het model

Het D-HYDRO model van het NZK/ARK wordt gebruikt voor uiteenlopende toepassingen gerelateerd aan de functies van het watersysteem. Elke toepassing stelt andere eisen aan het model. Deze eisen, wensen en verwachtingen zijn samengevat in Spruyt et al. (2017).

Toepassing van hydraulische modellen van het NZK/ARK vindt voornamelijk plaats in de volgende processen:

- 1 Aanleg en onderhoud
- 2 Omgevings- en assetmanagement
- 3 Verkeer- en watermanagement
- 4 Kennis en netwerkkwaliteit

Dit model is geschikt om de waterbeweging, het zoutgehalte en de temperatuur van het NZK/ARK te berekenen. Voorbeelden van studies waarbij het model ingezet kan worden zijn studies omtrent zoutindringing via de schutsluizen, de effectiviteit van de Selectieve Onttrekking, grootschalige (cumulatieve) effecten van industriële lozingen en het toetsen van andere mitigerende maatregelen tegen zoutindringing. De nieuwe modelschematisatie is opgezet met randvoorwaarden voor 2023. Het model bevat daarom geen specifieke extreme hydrodynamische condities.

1.4 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:

- ArcGIS 10.6.1 met Baseline 6.3.3
- D-HYDRO Suite 2024.03 (DIMR 2.26.25.79023)
- RGFRID 7.03.00.77422

1.5 Leeswijzer

De actualisatie van het modelinstrumentarium voor het NZK/ARK is een vervolg van de studies van Verbruggen en van der Baan (2020) en Verbruggen en van der Baan (2022). In deze rapportages staan onder andere een gebiedsbeschrijving, toepassingen van het model, de model opzet, de kalibratie/validatie voor eerdere jaren en discussies over de modellering uitgebreid beschreven.

In dit rapport worden de model aanpassingen beschreven voor de actualisatie van het NZK/ARK model naar 2023. In Hoofdstuk 2 staat een overzicht van de beschikbare data voor onder andere de geometrie, de randvoorwaarden van het model en de beschikbare metingen voor de validatie. In Hoofdstuk 3 worden de aanpassingen aan het model en de keuzes voor

de randvoorwaarden gepresenteerd. Hoofdstuk 4 beschrijft de validatie van de 2023 modelschematisatie met metingen. In Hoofdstuk 5 is een gevoeligheidsstudie samengevat voor de aanpassingen aan het model. Hoofdstuk 6 beschrijft beknopt de discussie en evalueert keuzes voor modelinstellingen en randvoorwaarden. In Hoofdstuk 7 staan respectievelijk de conclusies en aanbevelingen.

1.6 Terminologie

In dit rapport worden de volgende definities gebruikt:

Nederlandse term	Beschrijving	Voorbeeld
<i>gebiedschematisatie</i>	Een beschrijving van een specifiek gebied of water-/grondwatersysteem, voor een specifieke periode	baseline-rijn-j15_5-v1 (software: Baseline, watersysteem: Rijn, periode: 2015)
<i>modelschematisatie</i>	= modelsoftware + gebiedschematisatie Een rekenkundig model van een specifiek gebied of water-/grondwatersysteem gebouwd met specifieke modelsoftware, voor een specifiek systeem en een specifieke periode	waqua-rijn-j15_5-v1 (software: WAQUA, watersysteem: Rijn, periode: 2015)
<i>modelsoftware</i>	Een software pakket waarmee modelschematisaties kunnen worden doorgerekend aan de hand van een numerieke implementatie van fysische processen	D-Flow FM, WAQUA
<i>modelsoftwaresuite</i>	Een samenhangend geheel van modelsoftware systemen	D-HYDRO, SIMONA

Wanneer alleen het woord ‘model’ wordt gebruikt, wordt hiermee specifiek een ‘modelschematisatie’ bedoeld.

2 Beschikbare data

2.1 Geometrie in Baseline

RWS beheert de geografische informatie van onder andere het NZK/ARK gebied in GIS-databases van de applicatie Baseline (Baseline versie 6.3.3). Hierin zitten onder andere een digitaal terrein bestand, de bodemdata, ontwerptekeningen en overige geometrische invoer ten behoeve van modelschematisaties. Voor 2023 is geen Baseline schematisatie voor het NZK/ARK gebied beschikbaar. Als alternatief is de schematisatie voor 2024 gebruikt (baseline-nzk_ark-j24_6-v1). Hierin zit onder andere de nieuwe Zeesluis IJmuiden. Waar mogelijk is de schematisatie voor 2024 gecontroleerd met andere (openbare) bronnen en/of satellietbeelden. Hieruit bleek onder andere dat de verbreding van het Lekkanaal nog niet is opgenomen in baseline-nzk_ark-j24_6-v1 en er kunstwerken ontbraken. Hiervoor zijn handmatige aanpassingen aan de modelschematisatie gedaan om consistent met de realiteit te blijven.

2.2 Meetgegevens ten behoeve van validatie

Voor de actualisatie van de NZK/ARK modelschematisatie is gekozen om het model met randvoorwaarden voor het jaar 2023 op te zetten. Dit is het eerste jaar waarin de nieuwe Zeesluis IJmuiden operationeel is. In dit jaar zijn zowel in mei als september 100-punten metingen uitgevoerd. Daarnaast zijn ook voor dat jaar stationsmetingen voor zoutgehalte, temperatuur, debieten en waterstanden beschikbaar. Een volledig overzicht van de gebruikte meetgegevens voor de validatie staat in Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Overzicht van de gebruikte metingen in 2023

Categorie	Locatie / periode
Stationsmetingen zout en temperatuur	Velserkom, -1,4 m NAP, -6,4 m NAP en -10,4 m NAP
	Zijkanaal C -1,4 en -4,4 m NAP
	Ter hoogte van Spaarndammerpolder op -1,4 m NAP en -6,4 m NAP
	Ter hoogte van de NDSM pier op -1,4 m NAP en -6,4 m NAP
	Ter hoogte van Diemen op -1,4 m NAP en -6,5 m NAP
100-punten metingen voor zout en temperatuur	Mei 2023
	Sept 2023
Debietmetingen	Maarsen
	Weesp
Waterstanden	IJmuiden Buiten en IJmuiden Binnen, Buitenhuizen, Surinamekade, Weesp, Maarssen, Nieuwegein

2.3 Afvoeren lateralen

Voor 2023 was het Boezemmodel van Waternet niet beschikbaar. In plaats daarvan is er voor een pragmatische aanpak gekozen en zijn alleen de debietrandvoorwaarden van de grootste lateralen in het NZK/ARK gebied geactualiseerd. Deze informatie is aangeleverd door Rijkswaterstaat. Het gaat hierbij om de volgende debieten:

- Spui- maaldebet registraties IJmuiden
- Debietgegevens van de volgende laterale lozingen:
 - Irenesluizen
 - Gemaal Halfweg
 - Zaangemaal
 - Debiet vanuit de Amstel
 - Gemaal Spaarndam
 - Inlaatsluis Schellingwoude

Voor een aantal relatief grote laterale debieten in het ARK ontbrak data voor 2023. Aanvullend is er daarom gebruik gemaakt van debiet metingen in de Vecht en het Boezemmodel van Waternet voor andere jaren. Met de data van de Vecht en het Boezemmodel is er een massabalans opgesteld van de debieten van de Vecht naar het ARK. Resultaten van het Boezemmodel van 2014 tot en met 2022 zijn gebruikt om het debiet vanuit de Vecht naar het ARK naar ratio te verdelen over de verschillende loospunten. Voor deze analyse (zie Paragraaf 3.3.1) zijn de volgende debiet gegevens gebruikt (aangeleverd door Waternet);

Data van de Vecht (data 2013 tot en met 2023):

- Rodebrug
- Steenenbeer
- Muiden
- Maalstaten

Uit het boezemmodel (data 2014 tot en met 2022):

- Naardertrekvaart
- Smal Weesp
- Nigtevecht
- Nieuwersluis
- Breukelen
- Vechtsluis

2.4 Randvoorwaarden Schutsluizen IJmuiden

Voor de actualisatie van de NZK/ARK modelschematisatie zijn de schutgegevens van de schutsluizen in IJmuiden aangeleverd door RWS. Deze gegevens zijn gebruikt om de zoutindringing door de schutsluizen te berekenen. De volgende gegevens zijn gebruikt voor de berekening van de zoutindringing via de schutsluizen:

- De gebruikte sluiscolk en schutrichting.
- De begin en eind tijd van de schutronde en de in- en uitvaartijd.
- In geval van een of meer scheepsbewegingen bij de schutcyclus, de scheepsinformatie:
 - Actuele diepgang
 - Breedte
 - Lengte

2.5 Meteorologie

Voor de meteorologische forcering van het model is data van het KNMI weerstation bij Schiphol gebruikt. Dit betreft de volgende parameters:

- Wind snelheid en wind richting op 10m hoogte
- Luchttemperatuur
- Relatieve luchtvochtigheid
- Bewolkingsgraad

3 Aanpassingen aan de model opzet

Voor de actualisatie naar 2023 van de NZK/ARK modelschematisatie is uitgegaan van de modelschematisatie van 2018, zie Verbruggen en van der Baan (2020). Instellingen van het model en keuzes in de opzet van de randvoorwaarden zijn zoveel mogelijk consistent gehouden in verband met de goede validatie met metingen van eerdere modelschematisaties. Wel zijn voor de 2023 modelschematisatie, onder andere, aanpassingen gedaan aan het rooster, zijn de kunstwerken en bodemschematisatie geactualiseerd volgens de laatste versie van Baseline, debieten van industriële lozingen herzien en nieuwe hydrodynamische en meteorologische randvoorwaarden voor 2023 gebruikt. Tevens zijn er kleine aanpassingen aan de modelinstellingen gedaan om consistent te blijven met andere zesde-generatie modellen. Dit hoofdstuk beschrijft de aanpassingen aan het model en de nieuwe randvoorwaarden. Andere details van het model zijn te vinden in Verbruggen en van der Baan (2020).

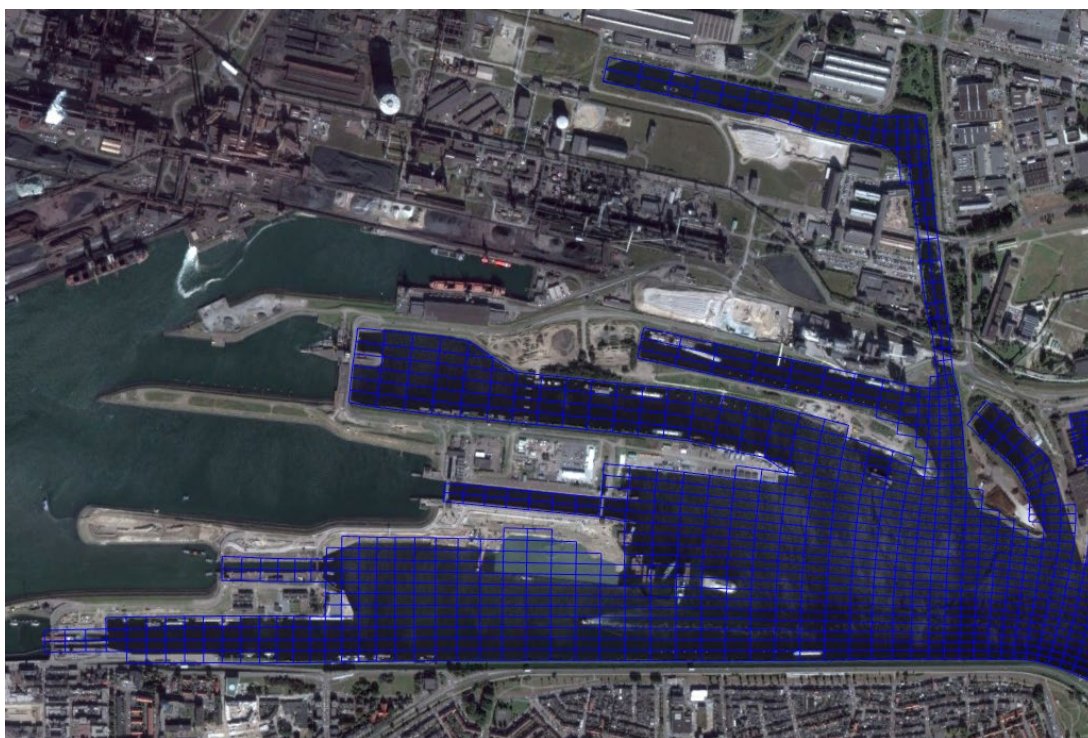
3.1 Roosteraanpassingen

Uitgangspunt voor de actualisatie van het rooster van de NZK/ARK modelschematisatie is het rooster voor 2018. Het domein van dit rooster beslaat het Noordzeekanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal vanaf de Irenesluizen tot en met de sluizen bij IJmuiden. Dit domein is hetzelfde gebleven. Een mogelijke uitbreiding met de buitenhaven van IJmuiden is vooralsnog niet meegenomen in deze actualisatie. Lokaal is het rooster wel aangepast om ontwikkelingen tussen 2018 en 2023 mee te nemen. Dit betreft de aanpassingen rond de sluizen bij IJmuiden en verbreding van het Lekkanaal. Deze aanpassingen zijn gedaan op basis van gegevens uit Baseline in combinatie met satellietbeelden voor 2023 (Google Earth).

De grootste verandering in het rooster is het gebied rond de sluizen bij IJmuiden. Het rooster is rond dit sluisencomplex opnieuw opgezet om de nieuwe Zeesluis IJmuiden in de modelschematisatie op te nemen. Daarnaast is het rooster opnieuw uitgelijnd rond de Noordersluis, Middensluis, Zuidersluis en Kleine sluis op basis van satellietbeelden van 2023. De horizontale resolutie is hetzelfde gebleven met cel afmetingen rond de 60 x 30 m. Het resulterende rooster is gevisualiseerd in Figuur 3-1. Ter referentie laat Figuur 3-2 het originele rooster voor de modelschematisatie van 2018 zien. Voor de modelschematisatie met de Selectieve Onttrekking is een apart rooster opgezet (zie Paragraaf 3.6).

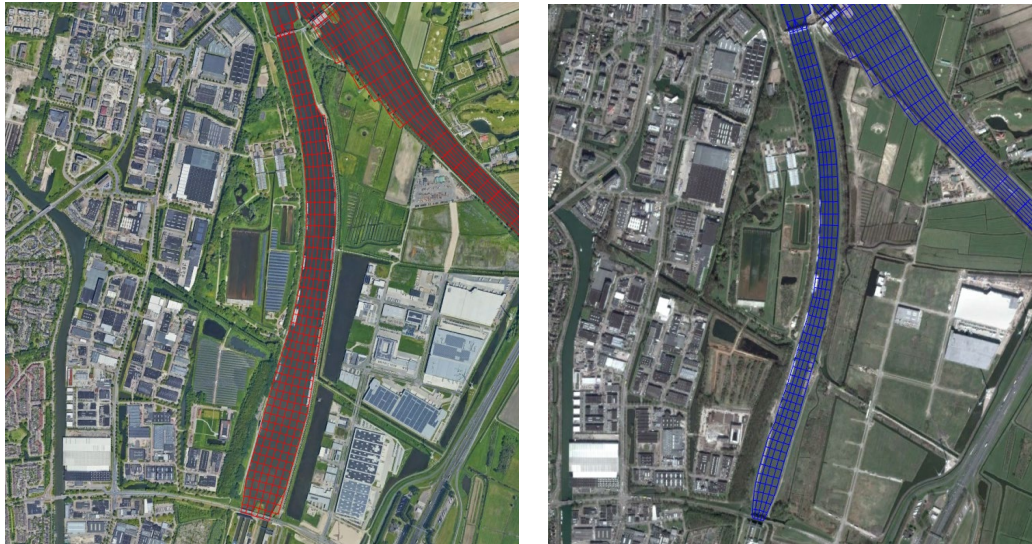


Figuur 3-1 Overzicht van het D-FLOW FM netwerk van de 2023 modelschematisatie rond de sluizen van IJmuiden. (Satellietbeeld: Google Earth)



Figuur 3-2 Overzicht van het D-FLOW FM netwerk van de 2018 modelschematisatie rond de sluizen van IJmuiden. (Satellietbeeld: Google Earth)

Tevens zijn er aanpassingen aan het rooster gemaakt rond het Lekkanaal. De recentelijke verbreding van het Lekkanaal zit niet in Baseline-nzk_ark-j24_6-v1. Aanpassingen aan het rooster zijn daarom gedaan op basis van satellietbeelden. Het aangepaste rooster rond het Lekkanaal is gevisualiseerd in Figuur 3-3.



Figuur 3-3 Links: Overzicht van het D-FLOW FM netwerk (rood) van de 2023 modelschematisatie rond het Lekkanaal. Rechts: Overzicht van het D-FLOW FM netwerk (blauw) van de 2018 modelschematisatie rond het Lekkanaal (Satellietbeelden: Google Earth)

Met deze aanpassingen komt het totaal aantal rekencellen op 23876 en het aantal flowlinks op 53077.

Het NZK/ARK model maakt gebruik van een verticale z-lagen verdeling met een uniforme laagdikte van 1m. Voor de verticale laagverdeling van het model zijn gevoeligheidsanalyses gedaan met een verhoogde verticale resolutie. Simulaties met het model zijn uitgevoerd met een uniforme laagdikte van respectievelijk 0,5 m en 0,25 m. Deze test simulaties gaven geen verbeterde en/of significant andere resultaten ten opzichte van simulaties met de originele uniforme laagdikte van 1 m. De verticale resolutie is daarom niet aangepast.

3.2 Projectie vanuit Baseline

De geometrische informatie in het model is geüpdate met de nieuwe Baseline versie baseline-nzk_ark-j24_6-v1. Dit betreft de volgende bestanden:

- Rooster: nzk_ark-j24_6-v1a_corr_step04_bat_cor2_net.nc
- Fixed weirs: nzk_ark-j24_6-v1a_corr_fwx.pliz
- Thin dams: nzk_ark-j24_6-v1a_corr_thd.pli
- Dry points: nzk_ark-j24_6-v1a_corr_dry.pol
- Bridge pillars: nzk_ark-j24_6-v1a_corr_bridges.pliz
- Trachytopes: nzk_ark-j24_6-v1a_trachytopes.arl

Na de projectie vanuit Baseline zijn er nog aanpassingen gemaakt aan de bodemhoogte in het model. Hierbij zijn als eerste dezelfde aanpassingen gedaan aan de bodemhoogte als beschreven in Verbruggen en van der Baan (2020). In Baseline 2024 zit niet de verbreding van het Lekkanaal. Hiervoor zijn handmatig aanpassingen gemaakt door dezelfde diepte aan te nemen als in het bestaande gedeelte van het kanaal. Verder bleek na initiële model simulaties dat de zoutindringing bij Zijkanaal C te laag was. Deze observatie is consistent met de validatie van eerdere modelschematisaties beschreven in Verbruggen en van der Baan (2020). Door de beperkte horizontale resolutie van het rooster en instellingen voor afhandeling van bodemdiepte specificatie (BedlevType=3) werd de bodemdiepte in het model onderschat. De diepte in het kanaal is hier handmatig aangepast met een constante (maximale) diepte over de breedte van het kanaal.

Verder zijn satellietbeelden gebruikt om de geografische informatie uit Baseline te controleren. Hieruit bleek dat in de omgeving van de NDSM pier een aantal obstakels ontbraken in het model. Er is aangenomen dat dit volledig gesloten constructies zijn. Deze zijn handmatig toegevoegd als thin dams, zie Figuur 3-4.



Figuur 3-4 Thin dams (rood) in de omgeving van de NDSM pier. De blauwe cirkels geven aan welke thin dams handmatig zijn toegevoegd. (Satellietbeeld: Google Earth)

Brug pilaren die zowel in de dry points file als in de bridges file gedefinieerd zijn, zijn zoveel mogelijk verwijderd uit de dry points file.

Aanbevelingen zijn gedaan om bovenstaande aanpassingen in Baseline op te nemen.

3.3 Debiet randvoorwaarden

Het NZK/ARK model heeft op alle randen debietrandvoorwaarden. Om deze te generen is voor de modelschematisatie van 2015 en 2018 onder andere gebruik gemaakt van het Boezemmodel van Waternet. Dit model was niet beschikbaar voor 2023. Daarom is er voor een pragmatische aanpak gekozen om alleen de grootste en belangrijkste debieten in het model te updaten voor 2023 met beschikbare ruwe data aangeleverd door RWS. Keuzes en bewerkingen voor deze randvoorwaarden zijn in de volgende paragrafen samengevat.

3.3.1 Lateralen

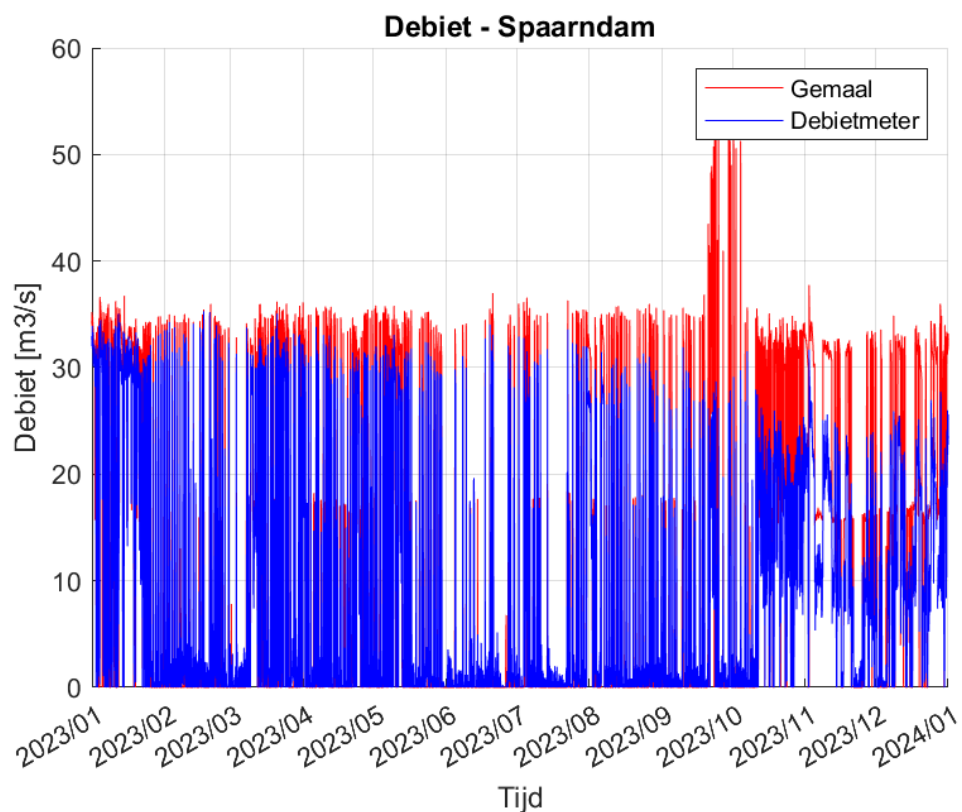
In Verbruggen en van der Baan (2020) is een overzicht gemaakt van de grootste gemiddelde laterale debieten. In de modelschematisatie voor 2023 is ervoor gekozen om alle lateralen groter dan 2 m³/s te actualiseren. Van deze lateralen was voor de volgende locaties data beschikbaar:

- Irenesluizen
- Gemaal Halfweg
- Zaangemaal
- Debiet vanuit de Amstel
- Gemaal Spaarndam
- Schellingwoude

Tijdseries van deze debieten zijn gevisualiseerd in Appendix A.

Voor de Irenesluizen zijn de debiet metingen van Wijk bij Duurstede gebruikt. In deze dataset ontbraken gegevens voor enkele weken en maanden voor de periode van juni en ruwweg september tot en met december. Voor deze periodes is gebruik gemaakt van debiet data van Maarssen, gecorrigeerd met het gemiddelde verschil in debiet tussen Maarssen en Wijk bij Duurstede. In periodes waar er geen data beschikbaar was bij zowel Wijk bij Duurstede en Maarssen, is debiet data van Weesp gebruikt om de randvoorwaarden te vullen. Ook hier is gecorrigeerd met het verschil in gemiddelde debiet tussen de locaties.

Voor de locatie Spaarndam zijn zowel data van het gemaal als een debietmeter in het kanaal beschikbaar. De gemeten debieten met de debietmeter zijn substantieel lager dan de debieten gemeten in het pompgemaal, zie Figuur 3-5. Er zijn verschillende simulaties gedaan om de invloed van dit debiet op de validatie bij Zijlkanaal C te bepalen. Hierin is ook gekeken naar de bathymetrie in dit gedeelte van het model (zie Paragraaf 3.1). De debiet data van het gemaal werd uiteindelijk het meest betrouwbaar geacht. Er is hier wel een correctie van een factor 0,8 toegepast.

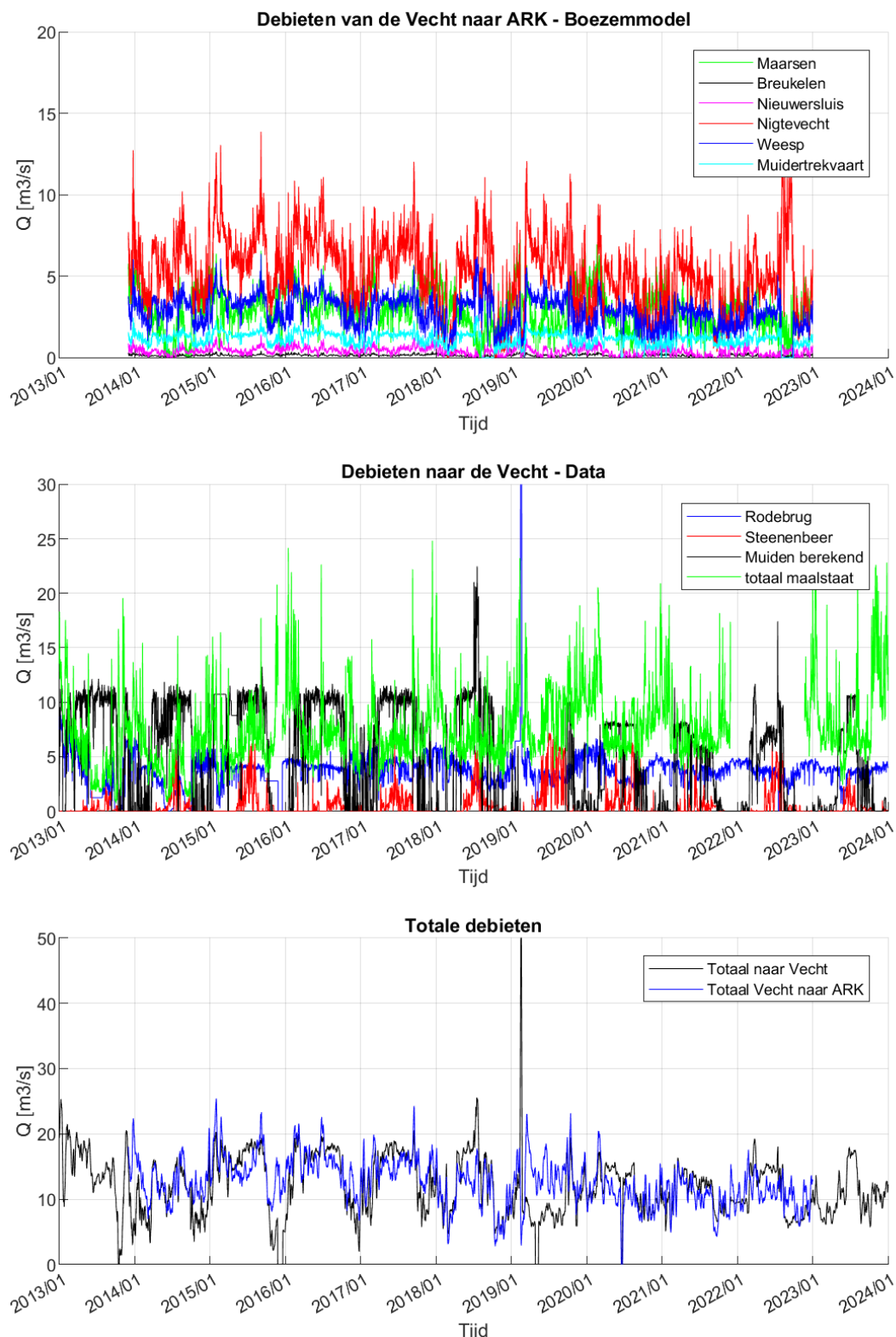


Figuur 3-5 Beschikbare debiet data voor Spaarndam.

Voor de laterale instroomdebieten vanuit de Vecht naar het ARK was geen data beschikbaar. Om toch een eerste inschatting van deze debieten te maken is er een waterbalans opgesteld van de Vecht, zie Figuur 3-6:

- De bovenste grafiek in Figuur 3-6 laat data uit het Boezemmodel van 2014 tot en met 2022 zien voor de debieten vanuit de Vecht naar het ARK. Deze data is gebruikt om de (gemiddelde) verdeling van het debiet vanuit de Vecht naar het ARK te berekenen, zie ook Tabel 3-1.
- De middelste grafiek laat de debieten zien die de Vecht instromen. Hiervoor is meetdata van Waternet van 2013 tot en met 2023 gebruikt van Rodebrug, Steenenbeer, Muiden en maalgegevens van gemalen rond de Vecht. Deze zijn vergeleken met data uit het Boezemmodel voor debieten vanuit de Vecht in het ARK. Uiteindelijk zijn de maalgegevens als een kalibratie parameter gebruikt. De beste fit werd gevonden door de debieten van de maalgegevens te halveren.

- De resulterende waterbalans van de Vecht, inclusief correcties op de maalgegevens, is gepresenteerd in de onderste grafiek van Figuur 3-6.



Figuur 3-6 Boven: Debieten vanuit de Vecht naar het ARK op basis van het Boezemmodel van Waternet. Midden: Debieten van de Vecht. Onder: Totale (dag gemiddelde) debieten de Vecht in en uit naar het ARK (hierin zijn op basis van kalibratie de maaldebieten gehalveerd).

Tabel 3-1 geeft een overzicht van de verdeling van de instroomdebieten vanuit de Vecht naar het ARK.

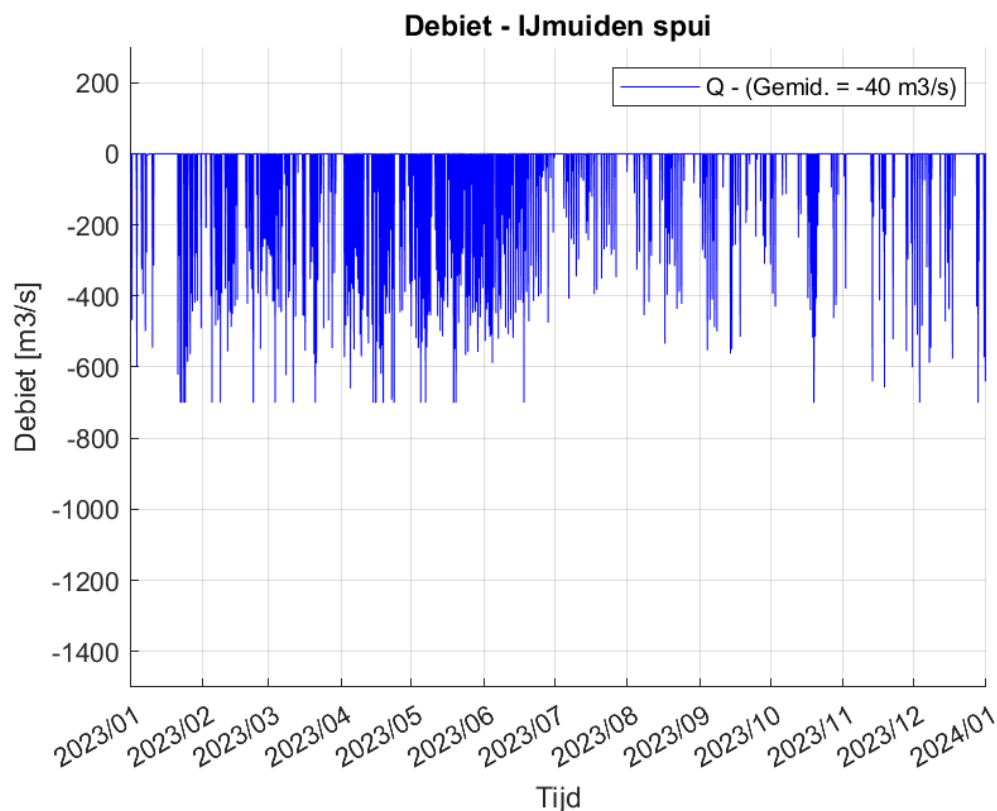
Tabel 3-1 Verdeling van het debiet vanuit de Vecht naar het ARK.

Locatie	Factor
Maarsen / Vechtsluis	0,25
Breukelen	0,01
Nieuwersluis	0,03
Nigtevecht	0,40
Smal Weesp	0,22
Muidertrekvaart	0,09

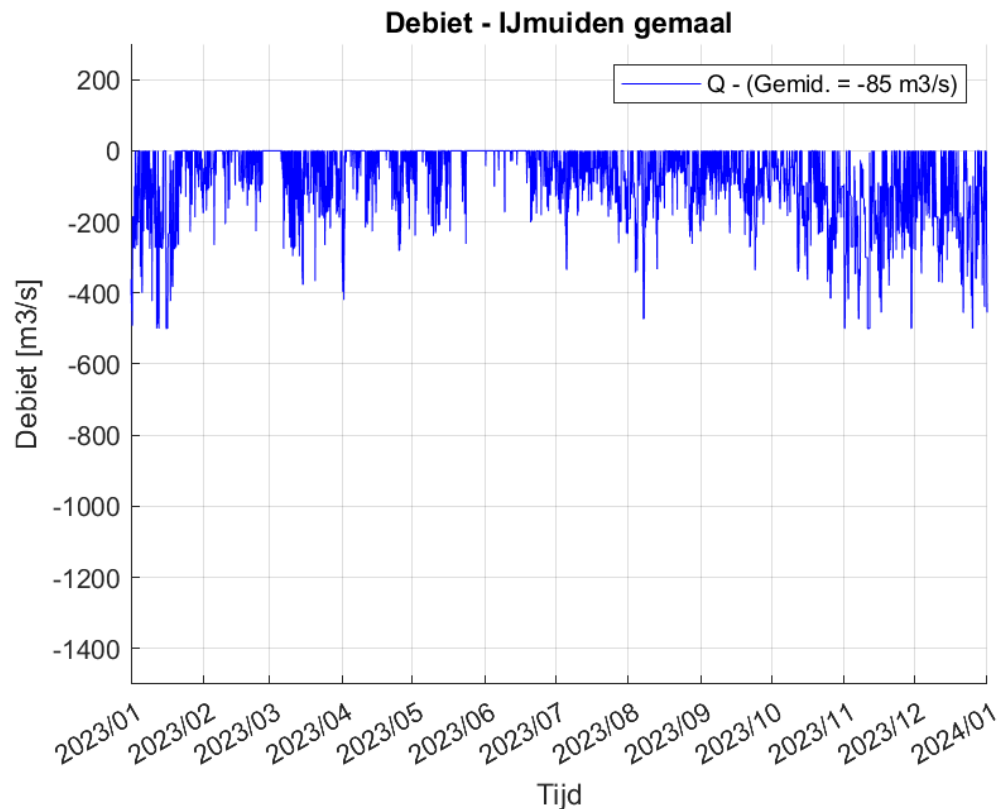
3.3.2

Spui- maaldebieten

Het spui- maalcomplex bij IJmuiden voert het totale debiet door het NZK/ARK en lokale instroom via de sluizen van IJmuiden af naar de Noordzee. Data van de debieten van het spui-maalcomplex zijn aangeleverd door RWS. De debietdata is gecorrigeerd en opnieuw verdeeld in de tijd op basis van het verval over het spui- maalcomplex, beschikbare pompen en totale duur van spuien en malen, zie Verbruggen en van der Baan (2020). De resulterende tijdseries van de spui- en maaldebieten zijn gepresenteerd in Figuur 3-7 en Figuur 3-8. Omdat het hier om uitstroom uit het NZK/ARK gaat zijn deze waarden als negatieve debieten gepresenteerd. De debieten voor het spui- maalcomplex zijn later nog aangepast voor correcties op de waterbalans, zie Paragraaf 3.3.4.



Figuur 3-7 Spui debieten bij IJmuiden

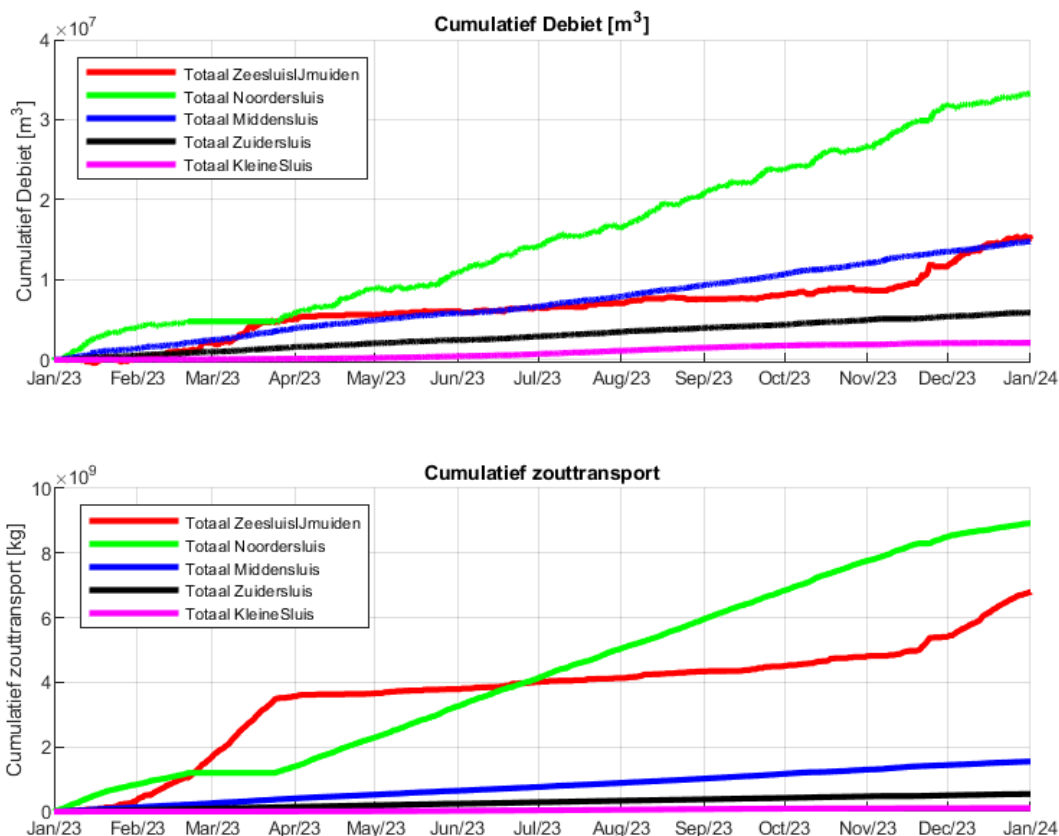


Figuur 3-8 Maal debieten bij IJmuiden

3.3.3 Schutsluizen IJmuiden

Initieel was het de bedoeling om voor de NZK/ARK 2023 modelschematisatie de online koppeling van D-HYDRO met de Zeesluis Formulerings (ZSF) te gebruiken om de zoutindringing via de schutsluizen van IJmuiden te berekenen. De online koppeling van de ZSF met D-HYDRO was echter nog niet beschikbaar. In plaats daarvan is de zoutindringing berekend met dezelfde methode als eerdere modelschematisaties voor het NZK/ARK, zie Verbruggen en van der Baan (2020). Een uitgebreide beschrijving van deze methode is te vinden in dit rapport.

Rapporten met de schutoperaties voor de verschillende sluizen bij IJmuiden zijn aangeleverd door RWS. Informatie uit deze rapporten over de starttijd en eindtijd van de schutcyclus, afmetingen van het schip, schutrichting etc. zijn gebruikt om een inschatting te maken van het nivelleer- en uitwisselingsdebiet en de zoutindringing. Het berekende cumulatieve debiet en zouttransport door de sluizen is gevisualiseerd in Figuur 3-9. Figuur 3-9 laat onder andere zien dat Zeesluis IJmuiden vooral in februari/maart en december van 2023 intensief gebruikt is en voor een relatief grote zoutindringing lijkt te zorgen ten opzichte van andere sluizen. In de periode Februari en Maart 2023 was de Noordersluis niet operationeel. Van april tot en met november is er relatief weinig gebruik gemaakt van de Zeesluis IJmuiden. De Middensluis, Zuidersluis en Kleine Sluis hebben volgens de berekeningen een beperkte zoutindringing in het NZK.



Figuur 3-9 Berekende cumulatief debiet en zouttransport door de schutsluizen bij IJmuiden.

Een aanpassing ten opzichte van eerdere modelschematisaties voor het NZK/ARK is dat de locaties voor de in- en uitstroom punten in de 2023 modelschematisatie horizontaal gescheiden zijn. De instroompunten naar het NZK zijn hierbij 1 rekencel opgeschoven. Op deze manier wordt voorkomen dat een deel van het zout direct verticaal mengt en bovenin de waterkolom weer wordt onttrokken. Deze keuze is gemaakt op basis van bevindingen bij de ontwikkeling en validatie van het IJsselmeermodel.

3.3.4 Correcties op de waterbalans

De NZK/ARK modelschematisatie maakt gebruik van debiet randvoorwaarden op alle randen van het model. Als de in- en uitstroom debieten gedurende het jaar niet in balans zijn, kunnen er ongewenste waterstandverschillen ontstaan. Voor de huidige modelschematisatie zijn er verschillende in- en uitstroom debieten te benoemen:

- Instroom via de grootste lateralen (met debiet gegevens voor 2023)
- Instroom via de kleine lateralen (met debiet gegevens voor 2018)
- Uitstroom via spui- maalcomplex bij IJmuiden
- Instroom via de schutsluizen van IJmuiden

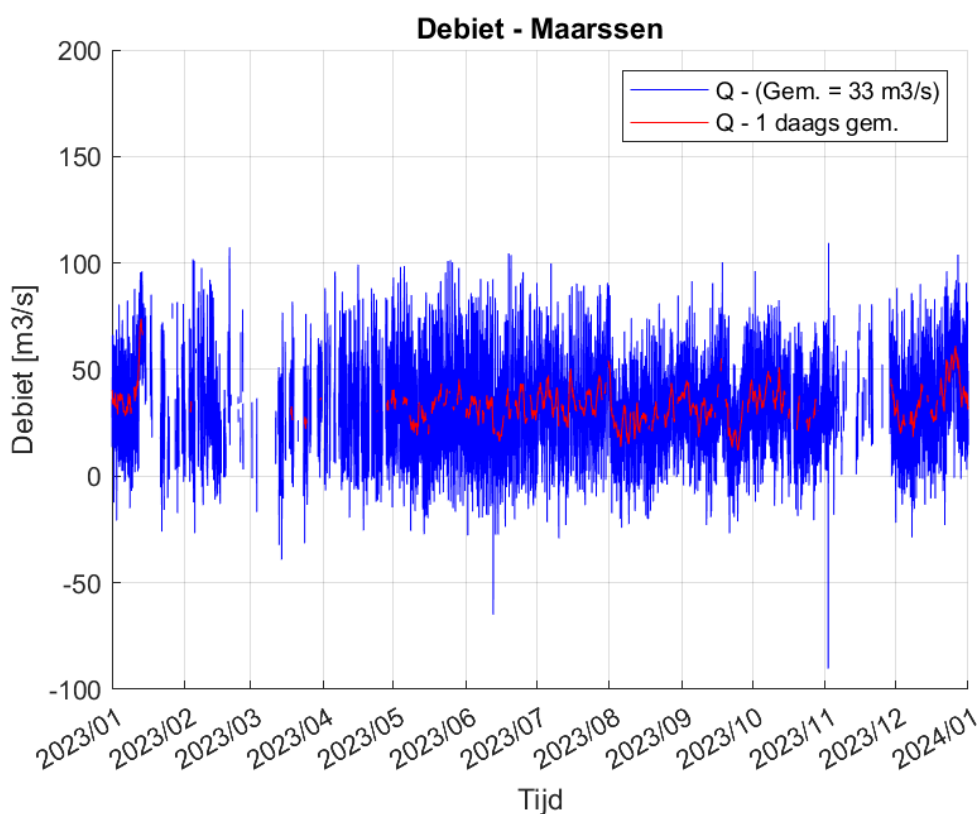
Door de beperkte beschikbaarheid van data is de instroom via kleine lateralen niet geactualiseerd in de 2023 modelschematisatie en zijn voor deze instromen de debieten van 2018 gebruikt. 2023 is een natter jaar vergeleken met 2018 en 2015. Ter vergelijking: De ongecorrigeerde gemiddelde uitstroom via de het spui- maalcomplex bij IJmuiden was voor 2015 en 2018 respectievelijk 83,4 m³/s en 76,2 m³/s. Voor 2023 is de ongecorrigeerde uitstroom via het spui- maalcomplex ongeveer 125 m³/s. Naast de beperkte data voor instroom worden ook de neerslag en verdamping niet meegenomen in het model. Andere onzekerheden in de waterbalans zijn de kwaliteit van de data met ontbrekende periodes voor randvoorwaarden, lekverliezen rond sluizen etc.

Consistent met eerdere modelschematisaties is er een tweeledige waterbalans correctie gedaan. De eerste correctie op de waterbalans is gemaakt voor het bovenstroomste gedeelte vanaf Weesp. De tweede correctie is gedaan op de debieten van het spui- maalcomplex bij IJmuiden.

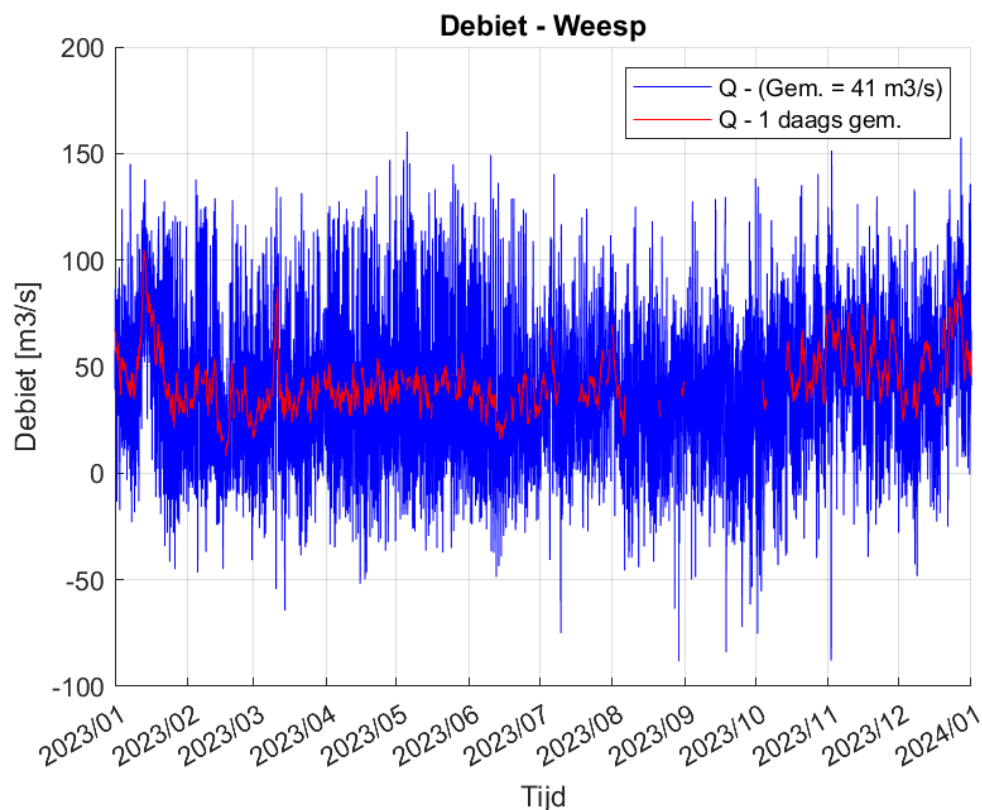
3.3.4.1 Waterbalans correctie bovenstrooms Weesp

Voor de eerste correctie op de waterbalans is gebruik gemaakt van de debietmetingen bij Weesp. Ter referentie zijn de debieten van Maarssen en Weesp gepresenteerd in Figuur 3-10 en Figuur 3-11. Figuur 3-10 laat zien dat er voor Maarssen veel data van de debieten ontbreekt. De data van Maarssen is daarom alleen gebruikt om randvoorwaarden voor de Irenesluizen aan te vullen, maar niet gebruikt om de waterbalans te corrigeren. Ook bij de debiet data Weesp ontbreken er periodes aan data, met name tussen augustus en november.

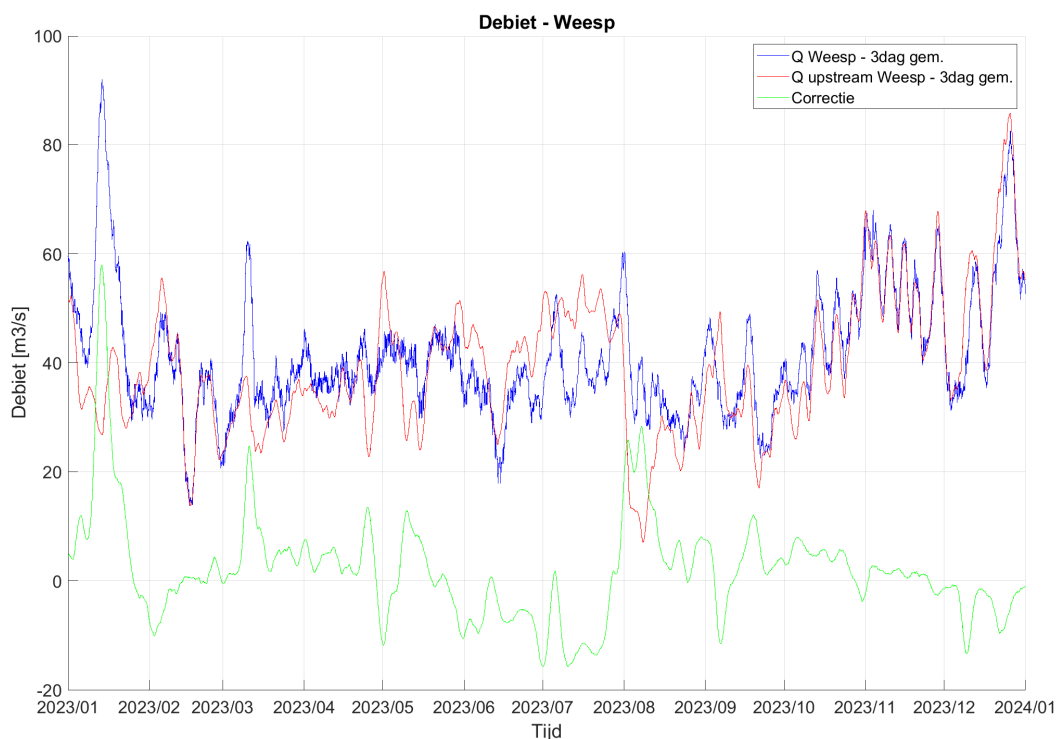
Ondanks de kwaliteit van de debietgegevens bij Weesp is er een correctie gemaakt op de debieten in het ARK. Omdat het debiet door de Irenesluizen relatief de grootste bijdrage heeft aan het totale debiet door het ARK, is er gekozen om de waterbalans te corrigeren bij de Irenesluizen. Hier is een aparte puntlozing voor gedefinieerd met dezelfde lozingslocatie als de Irenesluizen. De totale waterbalans correctie bovenstrooms van Weesp is gepresenteerd in Figuur 3-12. De blauwe lijn in deze figuur is het 3 daagse gemiddelde debiet gemeten bij Weesp. De rode lijn in deze figuur is het totale debiet van alle lateralen instroom debieten bovenstroom van Weesp. Het verschil tussen deze twee debieten is de waterbalans correctie bij de Irenesluizen (groene lijn).



Figuur 3-10 Ruwe data (blauw) van het debiet bij Maarssen. De rode lijn is het 1 daags-gemiddelde debiet.



Figuur 3-11 Ruwe data (blauw) van het debiet bij Weesp. De rode lijn is het 1 daags-gemiddelde debiet.

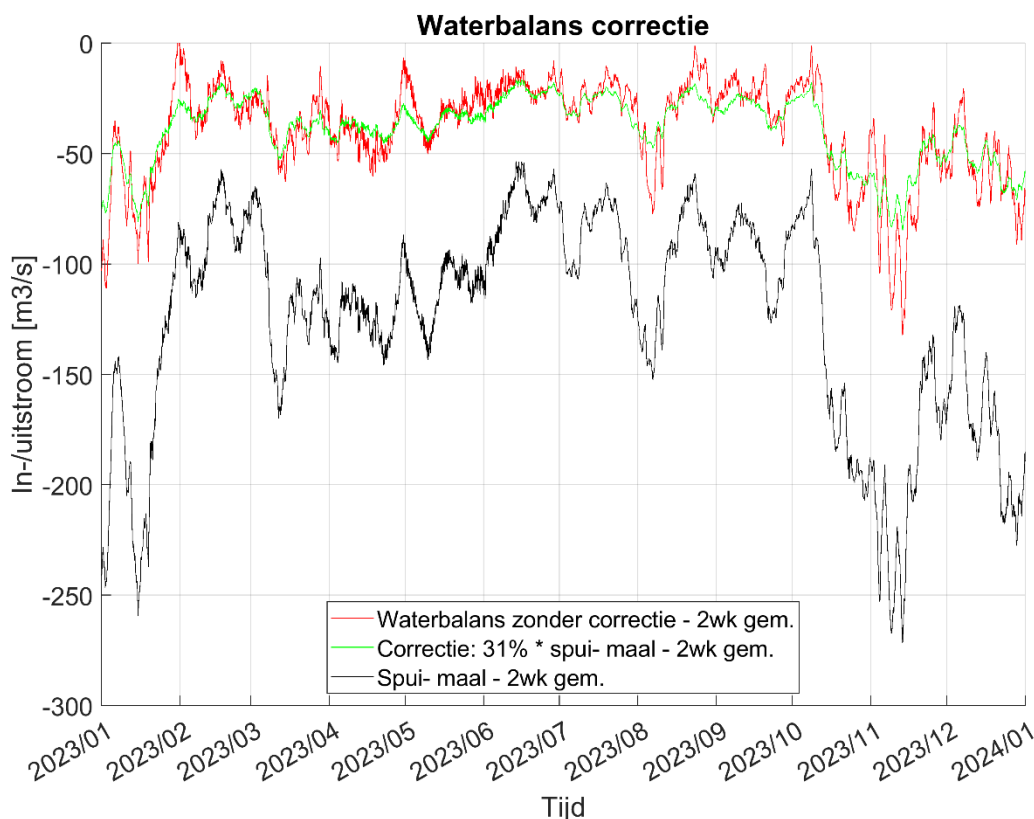


Figuur 3-12 Waterbalans correctie in het ARK bovenstrooms van Weesp

3.3.4.2 Waterbalans correctie totale debiet

De tweede stap in de waterbalans correctie is een correctie op het totale debiet. Tussen Weesp en IJmuiden zitten geen debietmetingen. Op basis van de data stroomt hier nog

gemiddeld 80 m³/s het NZK in. Consistent met eerdere modelschematisaties voor het NZK/ARK is er gekozen om een waterbalans correctie te maken op de debieten van het spui- maalcomplex bij IJmuiden. Figuur 3-13 visualiseert de totale waterbalans zonder correcties (rode lijn). De groene lijn is 31% van het totale spui- maaldebit. Deze figuur laat zien dat de waterbalans correctie dezelfde trend heeft als het totale debiet door het NZK/ARK.



Figuur 3-13 Totale waterbalans correctie op de spui- maaldebieten bij IJmuiden.

Als eerste stap in de totale waterbalanscorrectie zijn de spui- maaldebieten met 31% gereduceerd. Dit is een relatief groot deel van het totale debiet. In eerdere modelschematisaties voor 2015 en 2018 was de waterbalanscorrectie bij IJmuiden respectievelijk 9% en 18%. Mogelijk is dit percentage voor 2023 toegenomen omdat voor 2023 de kleine lateralen niet zijn geactualiseerd (geen data beschikbaar) en dit een natter jaar was dan 2018. Daarnaast was de debiet data voor de grote lateralen van beperkte kwaliteit. Verschillende opties voor de waterbalans correctie zijn onderzocht in de gevoeligheidsstudie, zie Hoofdstuk 5. Resultaten gepresenteerd in de validatie van Hoofdstuk 4 zijn met deze correctie van 31% op de debieten van het spui- maalcomplex bij IJmuiden.

Als tweede stap in de correctie van de totale waterbalans is er ook elke 2 dagen een correctie op de spui- maaldebieten gedaan consistent met eerdere modelschematisaties. Hierbij is gecorrigeerd op de te verwachte volumeverandering in het NZK op basis van de gemeten waterstanden. De waterstandsverandering in een periode van 2 dagen moet (gemiddeld) overeenkomen met het verschil in in- en uitstroom in het NZK/ARK maal het oppervlak van het NZK/ARK. Het verschil tussen de berekende volumeverandering en de in- en uitstroom op de randen van het model is gebruikt om het model te corrigeren. Hiervoor zijn de spui- maal debieten van IJmuiden elke 2 dagen vermenigvuldigd met een correctiefactor.

3.3.5 Update van de industriële lozingen

Voor de 2023 modelschematisatie is er een update gemaakt van de industriële lozingen. Voor zover mogelijk is er onderscheid gemaakt tussen de realistische waarden voor de industriële lozingen in 2023 en vergunde waarden voor industriële lozingen. In Tabel 3-2 en Tabel 3-3 zijn het thermische vermogen, debiet en temperatuur toename (delta T) samengevat. Deze zijn constant over het jaar verondersteld, omdat er geen informatie was over variatie binnen het jaar. Voor een aantal industriële lozingen ontbrak informatie en zijn aannames gedaan.

Tabel 3-2 Realistische waarden voor industriële lozingen in het NZK/ARK

Bedrijf/lozing	Vergunde vermogen per dag	Debiet	Delta T	Opmerkingen:
	MWth	m ³ /s	graden C	
Vattenfall Velsen-24	0	0	0	V24 is alleen operationeel in geval van nood.
Vattenfall Velsen-25	450	15	7,17	Maximaal vergund vermogen is afhankelijk van de achtergrond temperatuur in het NZK/ARK. Aanname: temperatuur lager dan 23 graden, dit gaat om de maximale thermische lozing in de vergunning.
Crown van Gelder	12,5	1	3	
Cargill Multiseed	1,33	0,05	6,2	
Afval Energie Bedrijf	346	11,8	7	
Crompton BV	1,3	0,07	4,5	
Vattenfall Hemweg	300	9,56	7,5	Groot deel van vergunning vervalt in 2025 en is nu al niet realistisch meer.
Amsterdam Fertilizers	1,4	0,04	8,6	
Bunge BV (Cargill)	22,3	1,11	4,8	
Albemarle (AKZO)	30	2,17	3,3	
Tata Steel Staalhaven	30	1	7,17	
Exter	1,23	0,042	7	
Sonneborn	4,36	0,32	3,25	
Nuon Merwedekanaal	280	12,5	5,35	
Nuon Lage Weide	200	8,75	5,46	
Nuon Groene weide	1,6	0,0833	4,59	

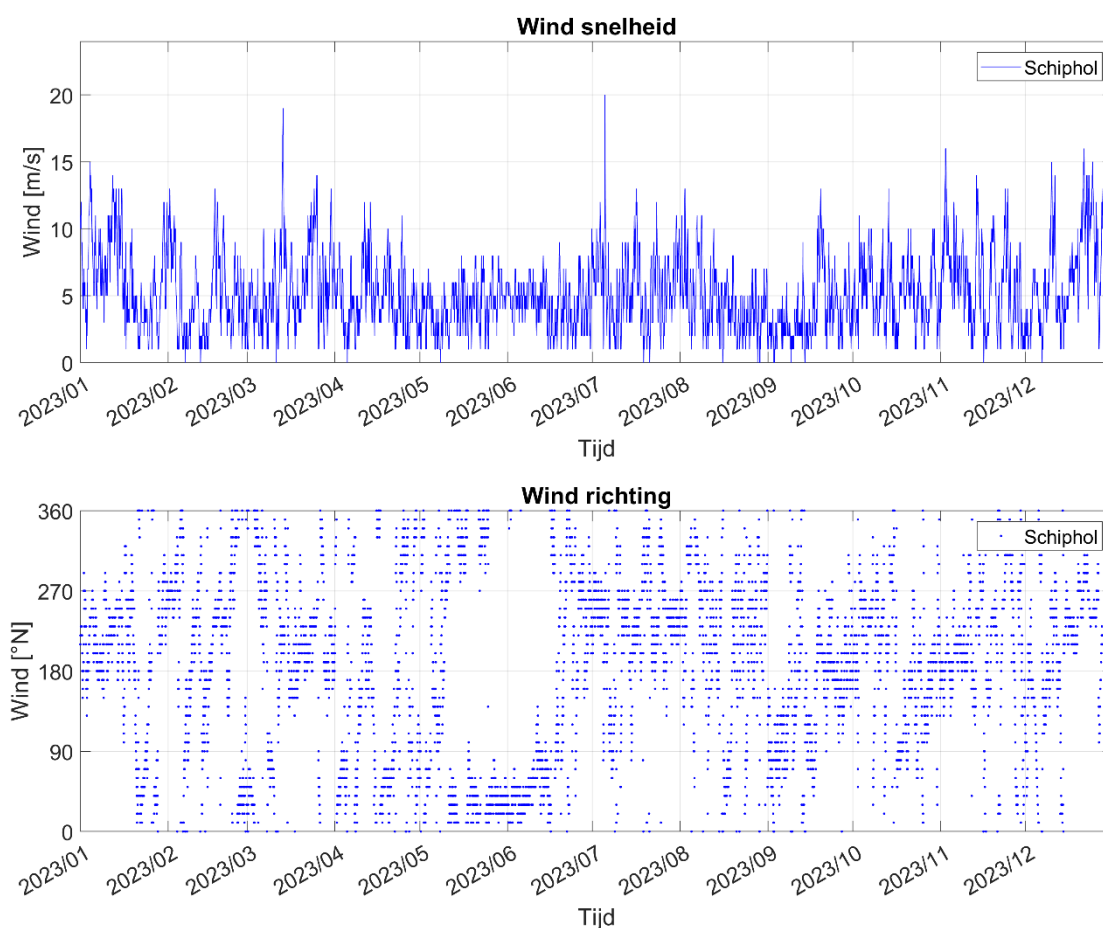
Tabel 3-3 Vergunde waarden voor industriële lozingen in het NZK/ARK

Bedrijf/lozing	Vergunde vermogen per dag	Debiet	delta T	Opmerkingen:
	MWth	m ³ /s	graden C	
Vattenfall Velsen-24	550	18,77005	7	Aanname: temperatuur lager dan 23 graden, dit is het maximum in de vergunning.
Vattenfall Velsen-25	450	15	7,17	Aanname: temperatuur lager dan 23 graden, dit is het maximum in de vergunning.
Crown van Gelder	12,5	1	3	
Cargill Multiseed	1,33	0,05	6,2	
Afval Energie Bedrijf	346	11,8	7	
Crompton BV	1,3	0,07	4,5	
Vattenfall Hemweg	300	9,56	7,5	Was eerst 850MWth meer, dit is vervallen per 1 jan 2025.
Amsterdam Fertilizers	1,4	0,04	8,6	
Bunge BV (Cargill)	22,3	1,11	4,8	
Albemarle (AKZO)	30	2,17	3,3	
Tata Steel Staalhaven	30	1	7,17	
Exter	1,23	0,042	7	
Sonneborn	4,36	0,32	3,25	
Nuon Merwedekanaal	280	12,5	5,35	
Nuon Lage Weide	200	8,75	5,46	
Vattenfall Diemen	549	18,73	7	
Nuon Groene weide	1,6	0,083	4,59	

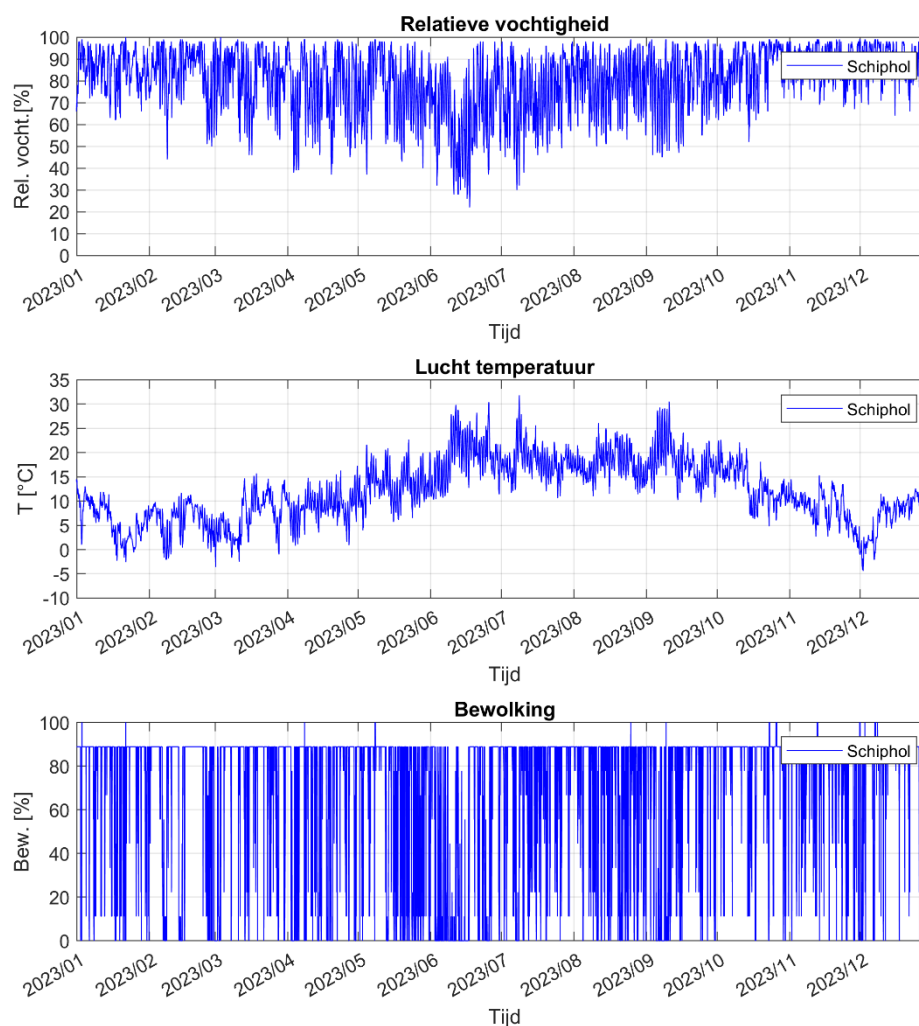
Voor de modelschematisatie van 2023 is uitgegaan van de realistische waarden voor de industriële lozingen, zie Tabel 3-2. Voor vergunningsdoeleinden moet de informatie uit Tabel 3-3 gebruikt worden. De industriële lozingen zijn als puntbronnen gedefinieerd in het model. Er is verder geen near-field analyse uitgevoerd om de initiële menging van de lozingen te berekenen door een gebrek aan benodigde data. De initiële menging van een lozing kan echter wel van invloed zijn op de temperatuur in het NZK/ARK, met name dichtbij grote lozingen. Afhankelijk van onder andere de constructie van het loospunt en looslocatie kan een lozing wel of niet effectief mengen met omgevingswater. Bij effectieve menging zal de temperatuur rond de lozing beperkter stijgen vergeleken met minder effectieve menging. Dit proces is nu niet correct meegenomen in het model. Op grotere afstanden van de lozing is het effect van near-field menging waarschijnlijk beperkt omdat een lozing uiteindelijk horizontaal en verticaal gaat mengen. Voor vergunningsstudies kan het echter wel van belang zijn dat nabije lozingen in meer detail in het model worden opgenomen.

3.4 Meteorologie

De meteorologische data van Schiphol is gebruikt als randvoorwaarde voor het model. Er zijn geen ruimtelijke correcties toegepast. Figuur 3-14 presenteert de wind data van Schiphol voor 2023. Figuur 3-15 laat de meteorologische data (relatieve luchtvochtigheid, luchttemperatuur en bewolking) van Schiphol voor 2023 zien.



Figuur 3-14 Wind data van Schiphol voor 2023.



Figuur 3-15 Meteorologische data van Schiphol voor 2023.

3.5 Overige aanpassingen

Het verticale advection type is veranderd naar 4 (vertAdvTypSal=4). Dit is consistent met de andere zesde-generatie D-HYDRO modellen. Een test met deze parameter liet geen significante verschillen in model resultaten zien.

De initiële waterstand is aangepast op basis van metingen. Initiële condities voor zoutgehalte en temperatuur zijn niet veranderd omdat deze goed aansloten bij de condities begin januari 2023.

Een nieuw bestand is beschikbaar voor de trachytopen definities: roughcombination-all-2021-v5.ttd. Dit bestand is consistent gemaakt met alle andere 6^{de} generatie D-HYDRO modellen.

3.6 Selectieve Onttrekking

Onderdeel van de huidige actualisatie is om ook een eerste modelschematisatie op te leveren voor de situatie inclusief de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden (situatie vanaf eind 2024). In Verbruggen en van der Baan (2022) zijn uitgebreide tests gedaan voor de implementatie van de Selectieve Onttrekking in schematische NZK/ARK D-HYDRO modellen. Voor implementatie van de Selectieve Onttrekking in deze actualisatie van het

NZK/ARK modelinstrumentarium was geen nieuwe informatie beschikbaar. De Selectieve Onttrekking en bijbehorende bodemaanpassingen zijn ook nog niet opgenomen in Baseline.

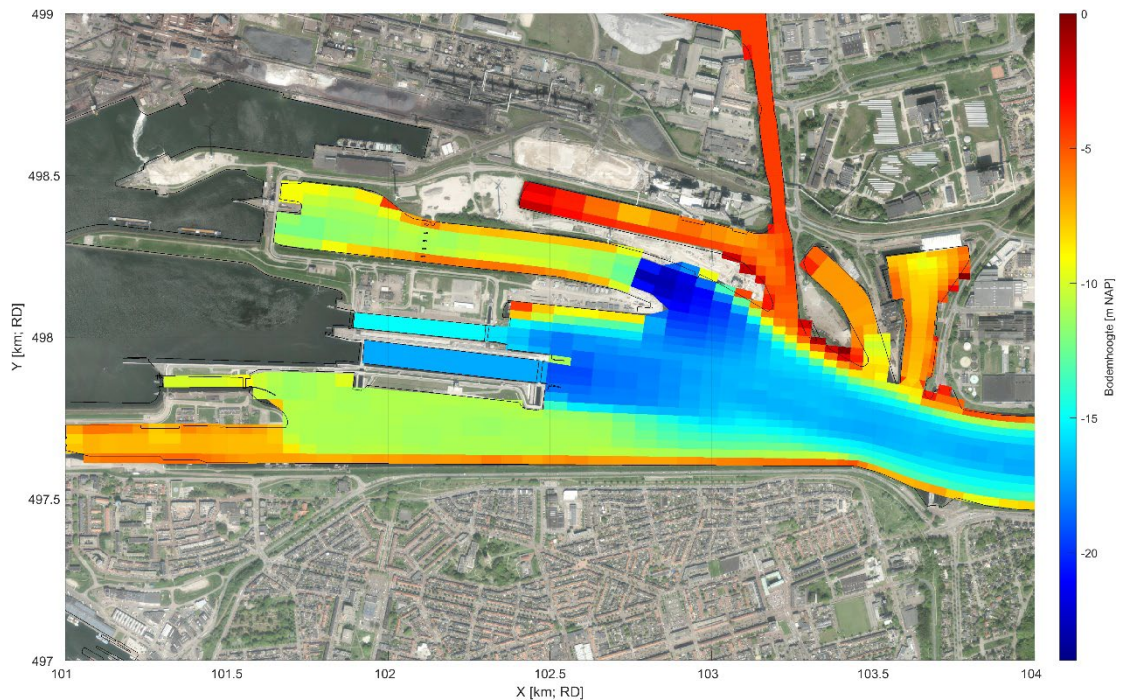
Om de Selectieve Onttrekking op te nemen in het geactualiseerde model voor 2023 zijn daarom de volgende handmatige wijzigingen gemaakt in de modelschematisatie:

- Het rekenrooster is lokaal rond de Selectieve Onttrekking aangepast om het rooster beter uit te lijnen met de dimensies van de Selectieve Onttrekking.
- De bathymetrie is lokaal rond de Selectieve Onttrekking aangepast naar een maximale diepte van -23 m NAP, zie Figuur 3-16. Deze bathymetrie aanpassingen komen overeen met SO-IJ Variant 3, zoals ook beschouwd in Verbruggen en van der Baan (2022). In hoeverre deze bathymetrie overeenkomt met de huidige situatie kan niet in deze studie worden beoordeeld, vanwege het ontbreken van recente bodemmetingen.
- De general structure file ('SO_generalstructures.ini') is toegevoegd aan de MDU file. Instellingen in deze file zijn hetzelfde gebleven als in Verbruggen en van der Baan (2022). Met behulp van deze general structure is de SO-IJ geschematiseerd als een opening tussen -16 m NAP en -23 m NAP met een totale breedte van 80 m (doorstromend oppervlak van 560 m²). De valdeur aan het wateroppervlak is niet meegenomen in de general structure file.
- De zoutlast via de schutsluizen bij IJmuiden is afhankelijk van het dichtheidsverschil tussen het water in de schutkolk en de Velserkom. Door de Selectieve Onttrekking gaat dit dichtheidsverschil veranderen. De nieuwe zoutlast via de schutsluizen is bepaald door een iteratieve aanpak met het D-HYDRO model om het resulterende zoutgehalte in de Velserkom inclusief operatie van de Selectieve onttrekking te bepalen. Hiervoor is eerst een simulatie met D-HYDRO uitgevoerd inclusief Selectieve Onttrekking, maar zonder aanpassing van de randvoorwaarden. Dit geeft een eerste indruk van de te verwachte zoutgehalte in de Velserkom wanneer de Selectieve Onttrekking operationeel is. Op basis van deze eerste simulatie is ingeschat dat het zoutgehalte in de Velserkom ongeveer 5 PSU lager wordt wanneer de Selectieve Onttrekking operationeel is. Voor het berekenen van de nieuwe randvoorwaarden voor de zoutlast bij de sluizen van IJmuiden is een pragmatische aanpak gekozen. Voor de oude situatie (zonder Selectieve Onttrekking) en nieuwe situatie (met Selectieve Onttrekking) is de initiële snelheid van de dichtheidstroming in de schutkolk bepaald met:

$$c_i = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} H}$$

Met g de gravitatiekracht, $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ het relatieve dichtheidsverschil en H de waterdiepte. Op basis van de verhouding tussen de initiële snelheid van de dichtheidsstroming in de oude situatie en nieuwe situatie zijn de Q-T relaties voor de verschillende sluizen aangepast, i.e. het debiet naar het NZK is vermenigvuldigd met deze factor en de tijd van dit debiet gedeeld door deze factor. Deze factor lag voor de verschillende sluizen typisch rond de 1.15. Het uitwisselingsdebiet is in de schematisatie met de Selectieve Onttrekking dus ongeveer 15% hoger en de kolk zal in 15% kortere tijd uitwisselen. Hiermee is op een pragmatische manier het effect van nieuwe dichtheidsverschillen tussen de schutkolk en de Velserkom verdisconteerd in de randvoorwaarden. In werkelijkheid zullen waarschijnlijk ook de zoutgehalten in de kolk iets omlaag gaan, maar dat voert te ver voor de huidige schematische aanpak. Dergelijke secundaire effecten kunnen wel in de toekomst mee worden genomen in de online koppeling tussen de ZSF en D-HYDRO.

De randvoorwaarden voor onder andere de andere laterale debieten, meteorologie en industriële lozingen zijn niet veranderd. Hiermee is een fictief scenario opgezet voor 2023 inclusief de operatie van de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden. Resultaten voor deze modelschematisatie zijn onderdeel van de gevoeligheidsanalyse, zie Hoofdstuk 5.



Figuur 3-16 Overzicht van de aangepaste modelbodem in het D-FLOW FM model rond de Selectieve Onttrekking.

4 Validatie

4.1 Methodiek

Voor de actualisatie van het NZK/ARK D-HYDRO model zijn modelschematisaties voor 2015 en 2018 het uitgangspunt geweest. Deze modelschematisaties zijn uitgebreid gekalibreerd en gevalideerd voor modelinstellingen en keuzes in de randvoorwaarden. In de actualisatie voor 2023 zijn modelinstellingen en keuzes voor het schematiseren van de randvoorwaarden zoveel mogelijk consistent gehouden met deze eerdere modelschematisaties. Kleine wijzigingen in de standaardinstellingen (zie Hoofdstuk 3) zijn doorgevoerd om consistent te blijven met andere zesde-generatie D-HYDRO modellen. De invloed van deze wijzigingen zijn getoetst in de gevoeligheidsanalyse. Kort samengevat hebben deze wijzigingen geen significante invloed op de resultaten van het model. Hiermee is het de verwachting dat de modelschematisatie voor 2023 hetzelfde zal presteren als eerdere modelschematisaties. Er is dan ook geen klassieke kalibratie en validatie uitgevoerd, maar direct gevalideerd met de metingen.

De randvoorwaarden voor de modelschematisatie voor 2023 zijn echter wel anders. Er is gekozen voor een pragmatische aanpak waarbij alleen de grootste in- en uitstromen zijn geactualiseerd. De kwaliteit en beschikbaarheid van de laterale debietgegevens bleek beperkt. Voor locaties zoals de Irenesluizen, Maarsen en Weesp ontbreken periodes in de debiet data en voor laterale instroom in het ARK zoals bij locaties als Nigtevecht, Maarsen en Weesp is helemaal geen data beschikbaar. Door de beperkte beschikbaarheid en onzekerheid in de data is de correctie op de waterbalans voor 2023 31% van het totale spui- maaldebiet bij IJmuiden. Keuzes voor waar en hoe deze waterbalans correctie toe te passen bleken een impact te hebben op de model resultaten. Er is gekozen om voor de basissimulatie dezelfde aannames toe te passen als voor eerdere modelschematisaties. Dit houdt in dat de waterbalans voor het ARK bovenstrooms van Weesp is gecorrigeerd bij de Irenesluizen (locatie met grootste debiet en meeste onzekerheid in de data) en de resterende waterbalans sluitend is gemaakt middels een correctie op de spui-maaldebieten bij IJmuiden. Met de beschikbare data is dit de meest conservatieve aanname als het gaat om zoutindringing in het NZK/ARK. In Hoofdstuk 5 zijn onder andere deze aannames getoetst en zijn alternatieve keuzes voor correcties op de waterbalans getest.

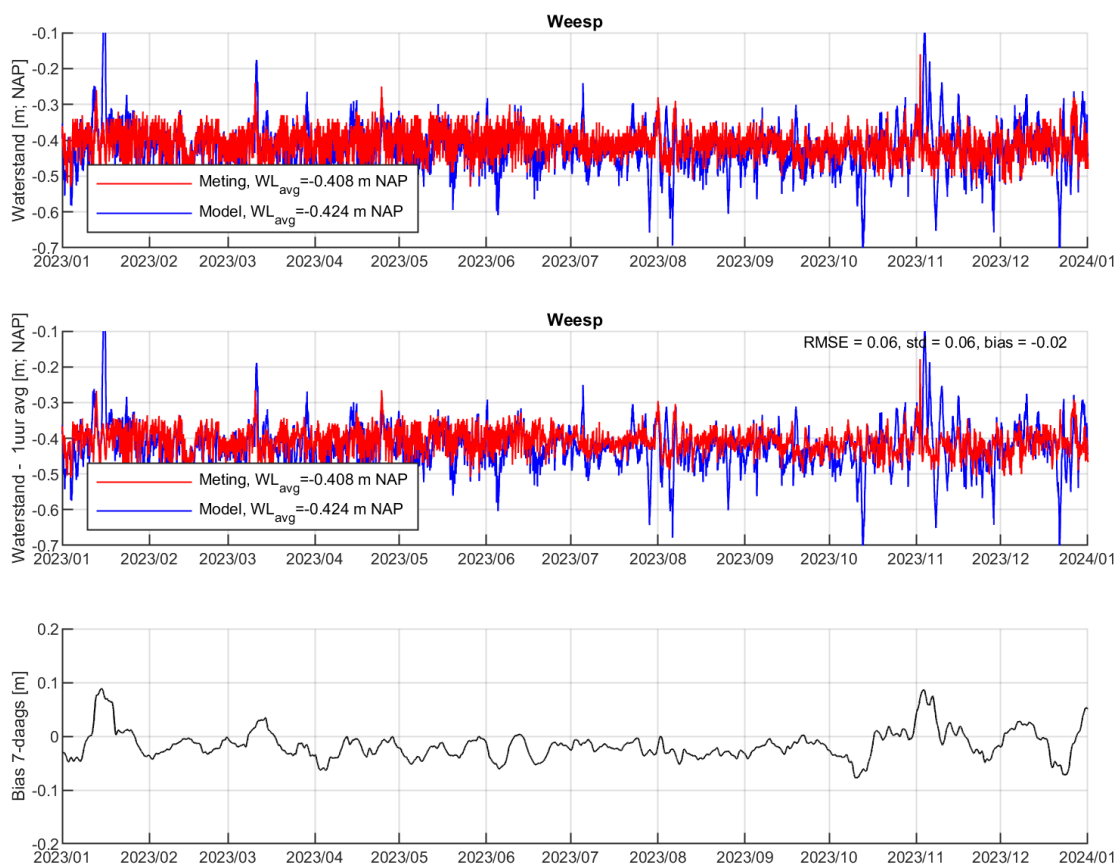
Voor de validatie van de 2023 modelschematisatie zijn metingen beschikbaar voor waterstanden, debieten, saliniteit en temperatuur. Dit hoofdstuk vat de validatie van de basissimulatie tegen deze metingen samen.

4.2 Resultaten validatie

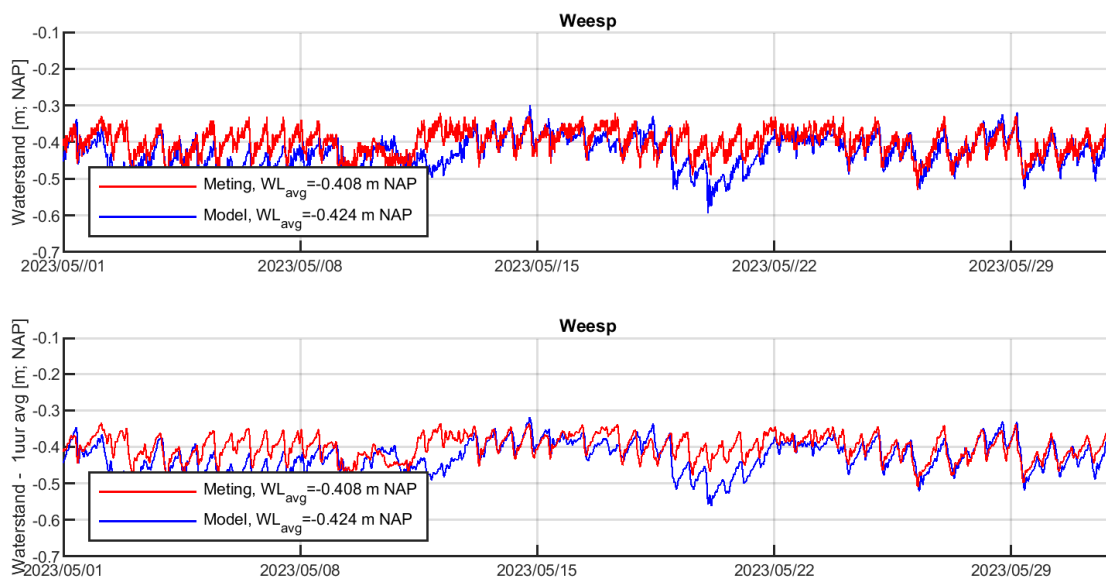
4.2.1 Waterstanden

Figuur 4-1 en Figuur 4-2 tonen de vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde waterstand bij Weesp voor respectievelijk heel 2023 en mei 2023. Weesp ligt in het ARK en waterstandsvariates zijn onder andere afhankelijk van de debieten op de randen van het model. Gegeven de onzekerheid en het soms ontbreken van betrouwbare debietgegevens voor de belangrijkste lateralen, volgt het model de metingen aardig met een bias van 2 cm en een root mean square error (RMSE) van 6 cm. De bias van 2 cm is vergelijkbaar met eerdere modelschematisaties van het NZK/ARK model. In sommige periodes weet het model de metingen zowel qua gemiddelde als de variatie goed te reproduceren, zie Figuur 4-2. Hier is duidelijk te zien dat het model de gemeten dagelijkse variatie goed weet te reproduceren. Het model laat incidenteel grotere waterstandsvariates zien vergeleken met de metingen. Reden

hiervoor is de grote onzekerheid in de waterbalans en het ontbreken van informatie voor sommige lateralen in het ARK. De afwijkingen tussen de metingen en het model zijn groter en frequenter vanaf augustus. Na augustus ontbraken voor langere perioden debietgegevens voor meerdere locaties (i.e. Irenesluizen, Maarssen, Weesp).



Figuur 4-1 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde waterstand bij Weesp voor heel 2023.



Figuur 4-2 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde waterstand bij Weesp voor mei 2023.

Tabel 4-1 laat de gemeten en gemodelleerde waterstanden en verhang (ten opzichte van IJmuiden) zien.

Over het algemeen weet het model de gemeten waterstanden en verhang behoorlijk goed te reproduceren. Het model onderschat het gemiddelde totale verhang met 1 cm (~20%). Met name in het gedeelte op het NZK tussen IJmuiden en Buitenhuizen zit er een verschil tussen het gemeten en gemodelleerde verhang (0,026 m t.o.v. 0,007m). Deze verschillen werden ook geobserveerd bij de 2015 en 2018 modelschematisaties. Het meetpunt IJmuiden Binnen ligt direct naar het spui-maalcomplex. De waterstand op die locatie kan worden beïnvloed door zeer lokale effecten bij de spuikokers en inlaat naar het maalcomplex. Daarnaast kunnen de verschillen tussen model en meting mogelijk gerelateerd zijn aan de waterbalanscorrectie. Kleine onnauwkeurigheden in het referentie niveau van individuele meetstations zijn ook niet uitgesloten.

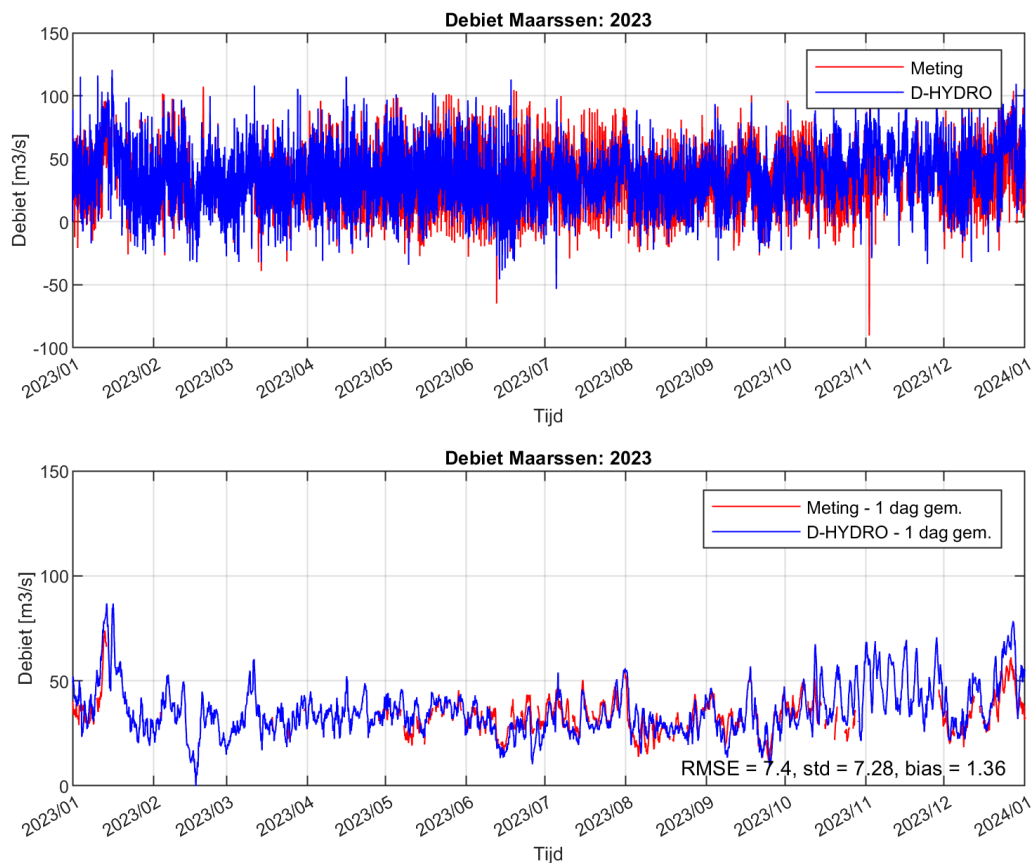
Tabel 4-1 Gemeten en gemodelleerde jaargemiddelde waterstanden en verhang t.o.v. IJmuiden.

Locatie	Meting m NAP	Model m NAP	Verhang meting m	Verhang model m
IJmuiden binnen	-0,44	-0,454	0,000	0,000
Buitenhuizen	-0,414	-0,447	0,026	0,007
Surinamekade	-0,41	-0,435	0,030	0,019
Weesp	-0,408	-0,424	0,032	0,030
Maarssen	-0,396	-0,417	0,044	0,037
Nieuwegein	-0,387	-0,411	0,053	0,043

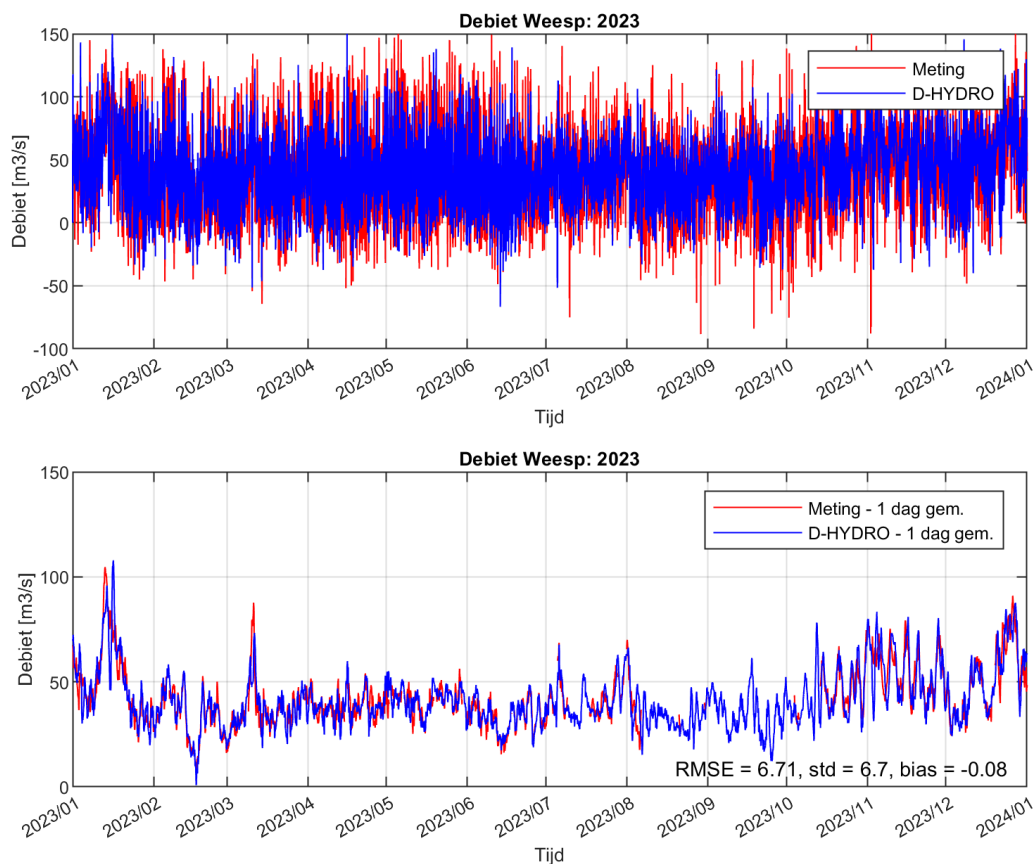
Voor verdere verbetering van de gemodelleerde waterstanden zal er een betere waterbalans opgesteld moeten worden. De extra informatie die hiervoor nodig is, is vooralsnog niet beschikbaar.

4.2.2 Debietmetingen bij Weesp en Maarssen

Figuur 4-3 en Figuur 4-4 toont de vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde debieten bij Maarssen en Weesp. De bovenste subplot in deze figuren geeft de vergelijking in debieten zonder tijdsfilter. De onderste subplot in de figuur geeft een vergelijking van de daggemiddelde debieten. Voor de waterbalans zijn alleen correcties gemaakt op basis van de waterbalans bovenstrooms van Weesp. Deze zijn bij de Irenesluizen gecorrigeerd. Ondanks dat er geen specifieke correctie op de debieten bij Maarssen is uitgevoerd, ziet de vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde debieten bij deze locatie er goed uit, met een bias van 1,36 m³/s en een RMSE van 7,4 m³/s. De vergelijking van gemeten en gemodelleerde debieten bij Weesp laat zien dat de waterbalans correctie goed is toegepast.



Figuur 4-3 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde debieten bij Maarssen.



Figuur 4-4 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde debieten bij Weesp.

4.2.3 Vergelijking stationsmetingen in NZK en ARK

4.2.3.1 Vergelijking zoutgehalte

Figuur 4-5 tot en met Figuur 4-9 toont de vergelijking van gemeten en gemodelleerde zoutgehaltes voor respectievelijk Velsen (Velserskom), Spaarndam, Zijkanaal C, NDSM pier en Diemen. Ten opzichte van eerdere modelschematisaties vervangt het meetstation Velserskom het meetstation Binnenspuikanaal. Metingen gaan bij de verschillende meetstations in het NZK tot maximaal -8 m NAP. Dit is niet de maximale diepte in het NZK van ongeveer 15 m tot 21 m. Uit de 100-punten metingen blijkt dat op diepere gedeeltes in het NZK nog aanzienlijk hogere zoutgehaltes kunnen voorkomen (>25 PSU). Validatie op basis van de stationsmetingen is daarom een validatie van de gemodelleerde zoutgehaltes in de bovenste helft van de waterkolom. Zijkanaal C en Diemen zijn een uitzondering omdat deze stations niet in het NZK liggen en het rond deze meetstations ondieper is. Op deze locaties ligt de onderste sensor vlakbij de bodem.

Bij station Velserskom weet het model de gemeten zoutgehaltes goed te volgen over het jaar. Ook de variaties in zoutgehalte worden op elke meetdiepte relatief goed door het model gereproduceerd. Rond maart/april en december zijn er op alle lagen een overschatting van de zoutindringing te zien. Deze periodes vallen samen met intensiever gebruik van de nieuwe Zeesluis IJmuiden. In de zomermaanden is er een onderschatting van het zoutgehalte bij het oppervlakte van 1-2 PSU. Op -8 m NAP berekent het model typisch een iets hoger zoutgehalte dan gemeten, met een bias over het jaar van 1,53 PSU. Op basis van deze validatie en de 100-punten metingen (Paragraaf 4.2.4.1) lijkt de overschatting van het berekende zoutgehalte in maart/april en december deels een gevolg van een te hoge zoutlast via de Zeesluis IJmuiden. De afwijking op -8 m NAP lijkt ook deels te verklaren doordat het model een iets ander verticaal zoutprofiel berekent dan te zien in de metingen.

Een overschatting van de zoutindringing is deels te verklaren omdat de waterbalans is gecorrigeerd bij het spui- maalcomplex IJmuiden. Vergeleken met andere mogelijkheden om de waterbalans sluitend te maken stroomt met deze optie het laagste debiet door het NZK. Een hoger debiet (bijvoorbeeld door andere keuzes qua waterbalanscorrectie) zou leiden tot meer tegendruk tegen het zout en daardoor lagere zoutgehaltes. Opvallend is dat de overschatting in maart en december samenvalt met periodes waarin er relatief veel schuttingen in de nieuwe Zeesluis IJmuiden zijn. In de huidige offline methode om randvoorwaarden af te leiden voor het schutsluizen wordt een constant zoutgehalte in de Velserskom aangenomen. Als het zoutgehalte in de Velserskom toeneemt, neemt de zoutlast door de sluizen naar het NZK af. Dit proces zit niet in de randvoorwaarden, waardoor de netto zoutlast in de huidige randvoorwaarden mogelijk is overschat. Een mogelijk afwijking in het berekende verticale zoutprofiel zou een gevolg kunnen zijn van het ontbreken van verticale menging door scheepvaart.

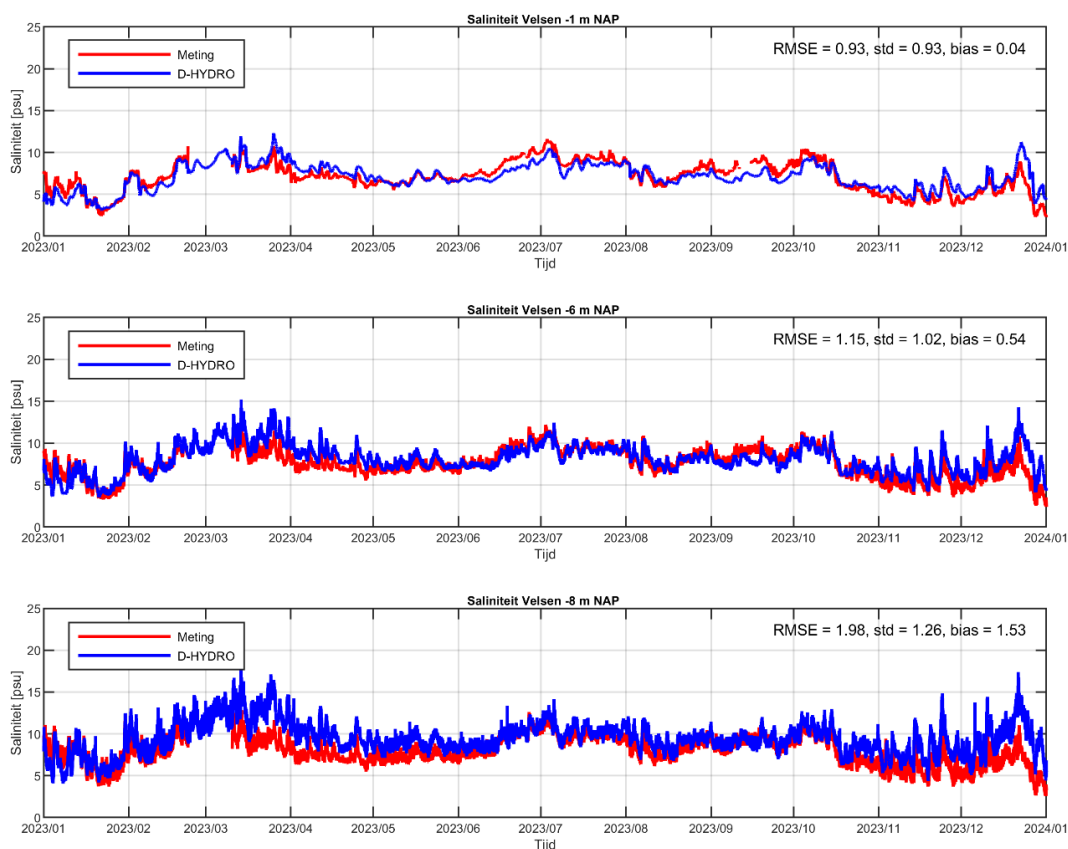
Validatie bij meetstation Spaarndam geeft hetzelfde beeld als bij meetstation Velserskom. Het model weet de trend en variatie over het jaar goed te reproduceren op beide dieptes. Ook bij dit meetstation is er een overschatting op -6,4 m NAP van het zoutgehalte van maart tot mei en november tot en met december van ongeveer 1-2 PSU.

Meetstation Zijkanaal C ligt in een zijkanaal van het NZK. Zoutindringing in dit kanaal wordt bepaald door het zoutgehalte in het NZK, het debiet van gemaal Spaarndam en de geometrie. Voor langere periodes weet het model de metingen goed te reproduceren. In de zomermaanden is er een kleine onderschatting van het zoutgehalte van 1-2 PSU. Redenen voor deze onderschatting kunnen de onzekerheid in de debieten van het gemaal Spaarndam zijn en, zoals bij eerdere modelschematisaties van het NZK/ARK al genoemd, het lozen van

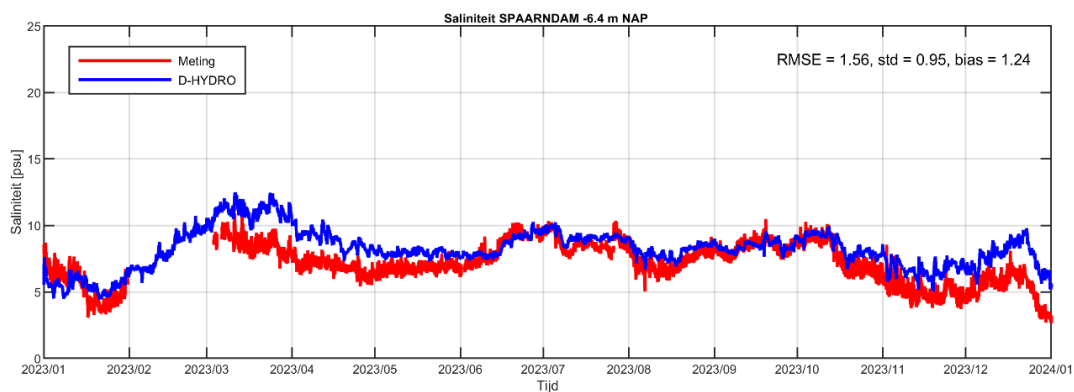
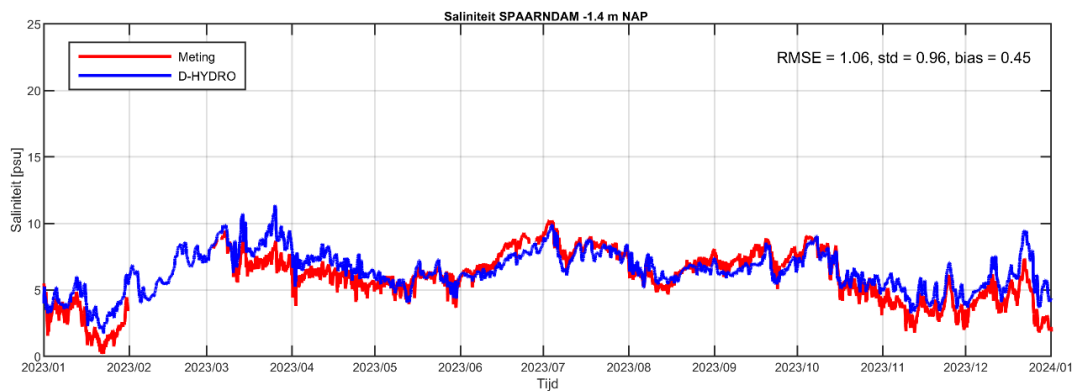
mogelijk brak water bij gemaal Spaarndam terwijl in de randvoorwaarden een zoutgehalte van 0,3 PSU is aangenomen.

Het meetstation bij de NDSM pier ligt, net als meetstations Velserkom en Spaarndam, in het NZK. De validatie van het model met meetdata van de NDSM pier laat dezelfde observaties zien als deze andere meetstations. De trend in zoutgehalte over het jaar en de variaties worden over het algemeen goed gereproduceerd in het model. De overschatte zoutgehalten in het diepste meetpunt zijn ook in maart/april en november/december bij de NDSM pier te zien. In deze periodes ligt het gemodelleerde zoutgehalte typisch 1-3 PSU te hoog. In januari/februari en juni tot en met oktober volgt het model de gemeten zoutconcentratie goed.

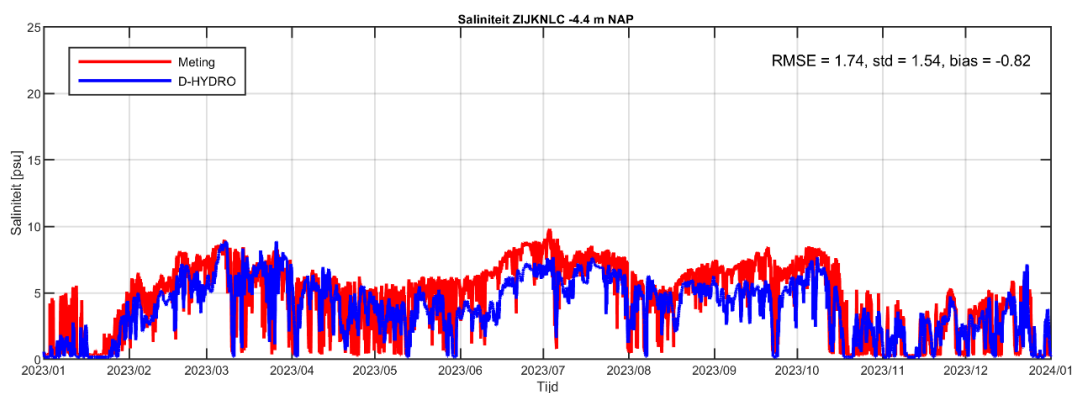
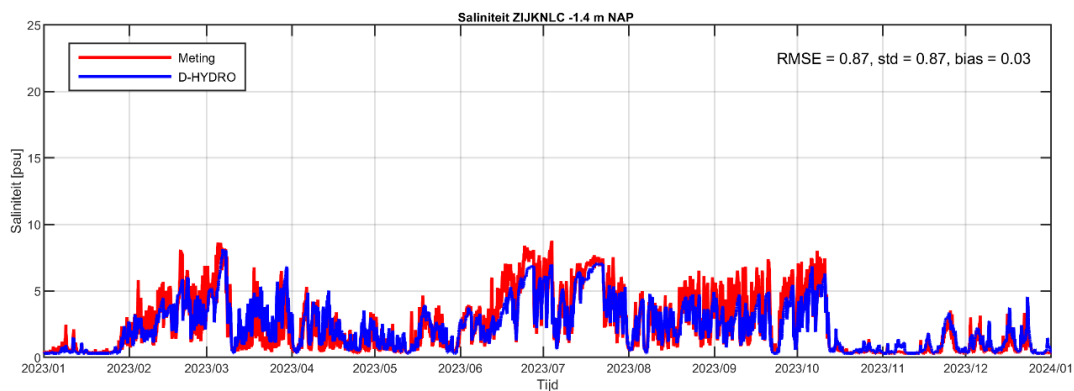
Op het ARK bij meetstation Diemen overschat het model de zoutindringing. Deze overschatting van zoutindringing is consistent met eerdere modelschematisaties voor het NZK/ARK. Het model berekent op -6,5 m NAP diepte maximale zoutgehalten van ongeveer 6-7 PSU, terwijl in werkelijkheid alleen incidenteel verhoogde zoutconcentraties voorkomen van rond de 1-4 PSU. Bij het oppervlakte berekent het model zoutgehalten van 1-3 PSU, terwijl in werkelijkheid er bijna geen verhoogde zoutgehalten zijn in dit gedeelte van het ARK. Het ontbreken van menging door scheepsvaart, de kwaliteit en beschikbaarheid van de debiet data en waterbalans correcties zijn mogelijke redenen voor deze overschatting van zoutindringing.



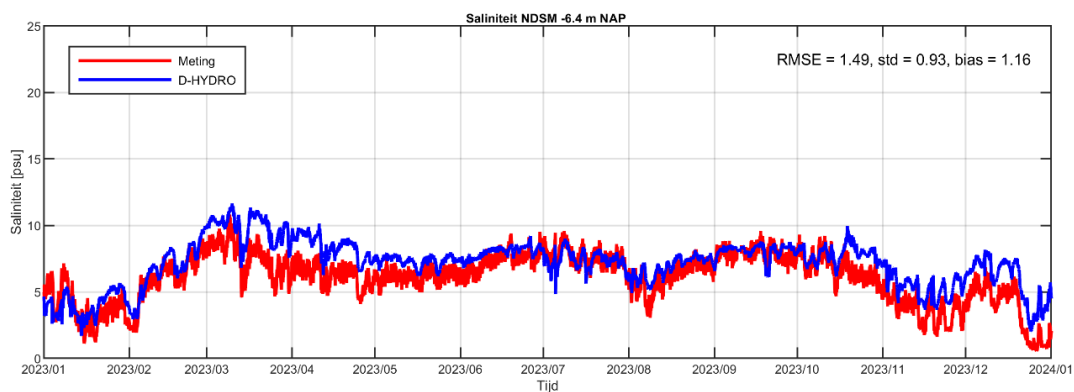
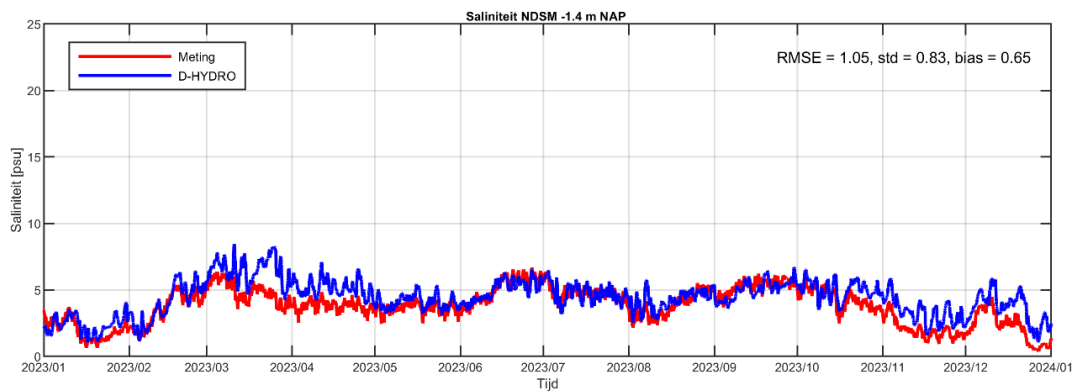
Figuur 4-5 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehalten bij Velsen (Velserkom).



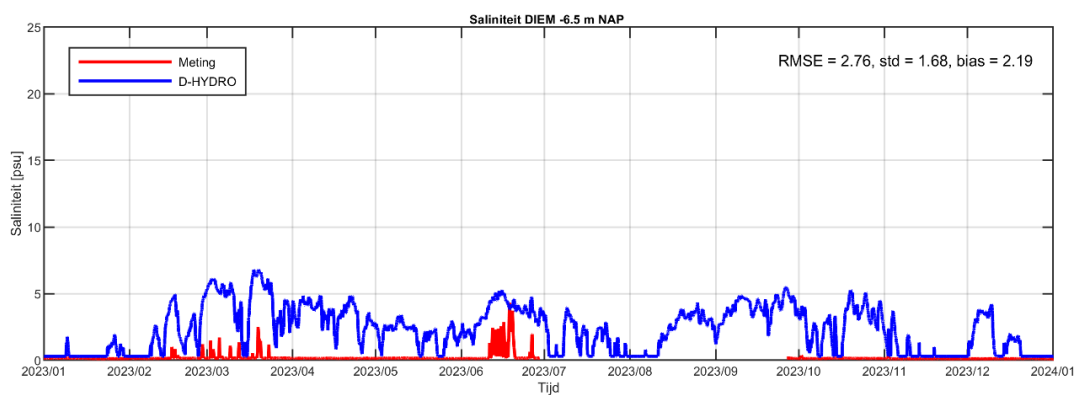
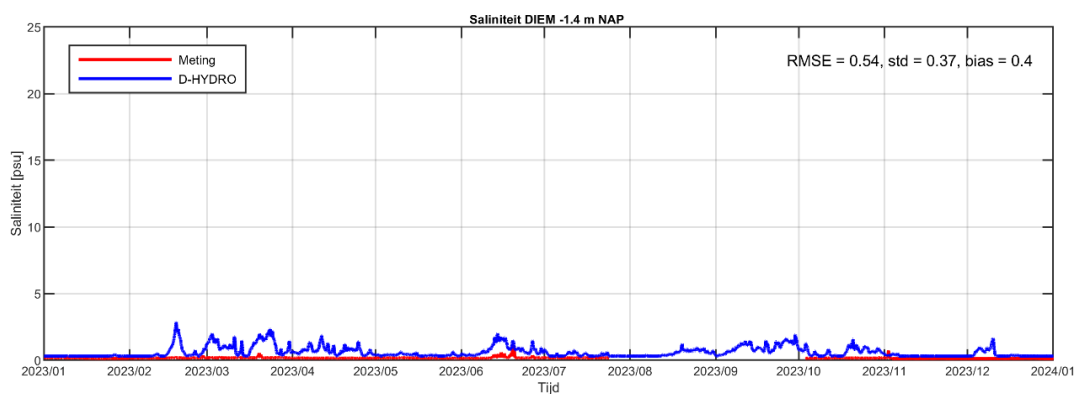
Figuur 4-6 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehaltes bij Spaarndam.



Figuur 4-7 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehaltes bij Zijkanaal C.



Figuur 4-8 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehaltes bij de NDSM pier.



Figuur 4-9 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehaltes bij Diemen.

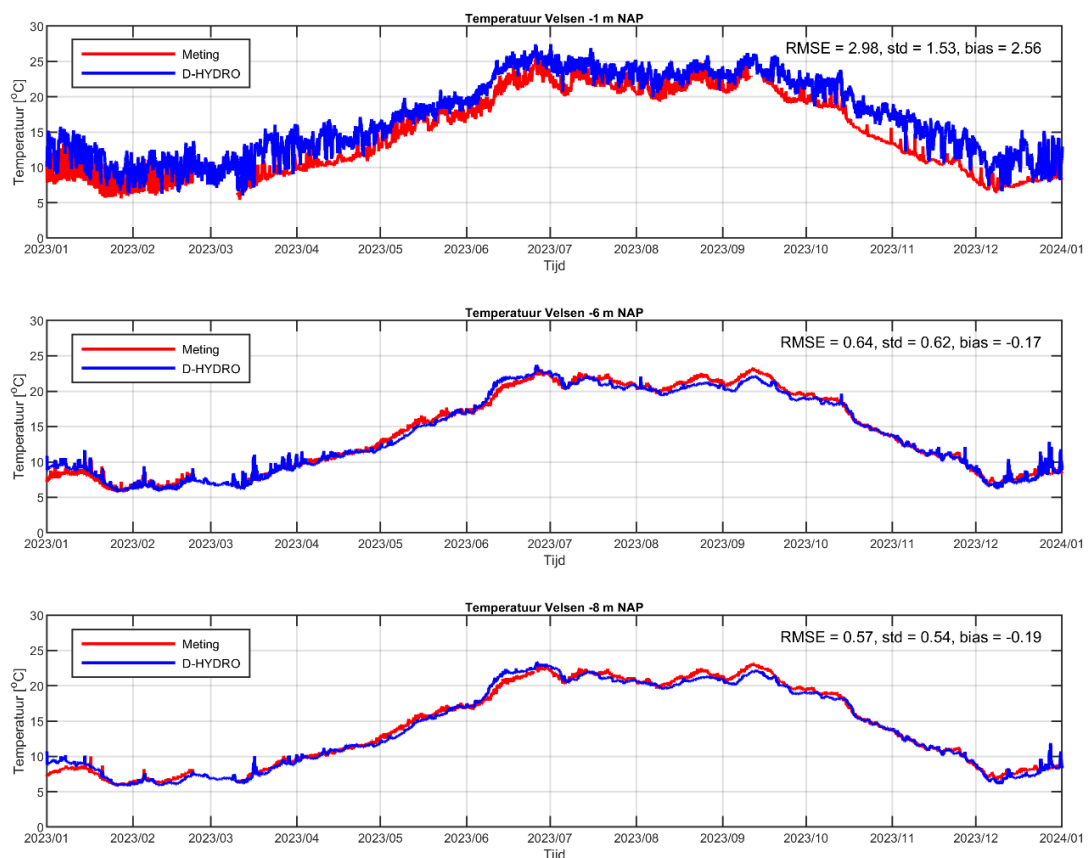
4.2.3.2 Vergelijking temperatuur

Figuur 4-10 tot en met Figuur 4-14 tonen de vergelijking van gemeten en gemodelleerde temperatuur voor respectievelijk Velsen (Velserskom), Spaarndam, Zijkanaal C, NDSM pier en Diemen.

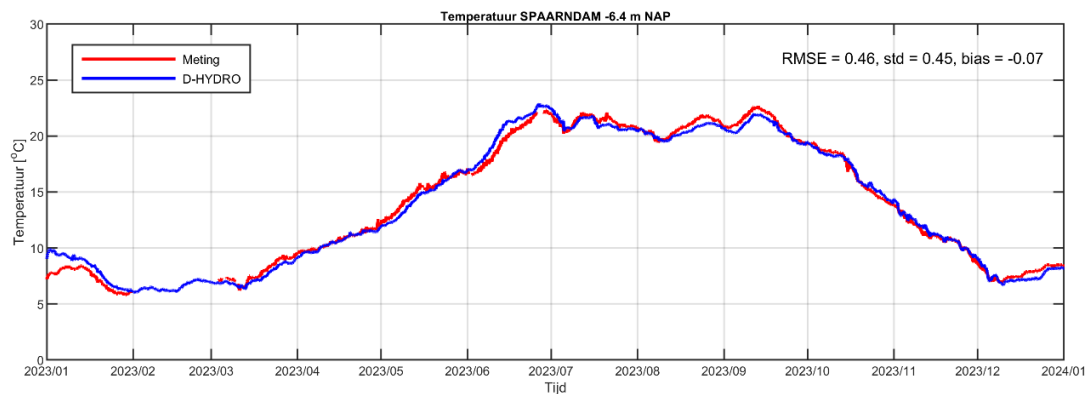
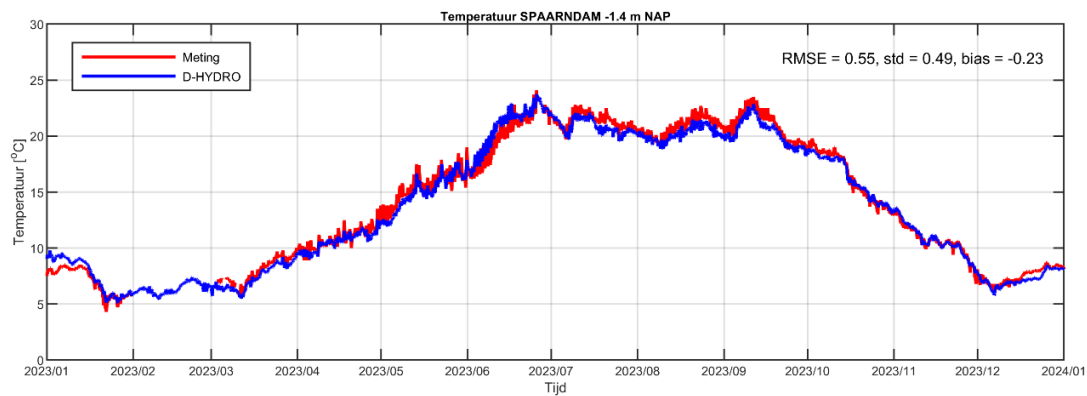
De validatie bij het meetstation Velserskom laat goed de invloed van lokale thermische lozingen in het NZK zien. In totaal zijn er meer dan 60 m³/s aan industriële lozingen in het NZK/ARK die de temperatuur bij meetstations beïnvloeden. Bij de Velserskom berekent het model bij het oppervlak een verhoging van temperatuur van ongeveer 4-5 °C. Deze verhoging is ook in januari tot en met maart te zien in de metingen. De rest van het jaar is de gemeten temperatuursverhoging aan het oppervlak minder groot. Voor 2023 waren alleen jaargemiddelde gegevens beschikbaar voor de industriële lozingen. Eventuele variaties in industriële lozingen over het jaar zijn daarom niet meegenomen.

Het model weet de temperatuur bij de andere meetstations zeer goed te reproduceren met een lichte bias tussen de -0,3 °C en 0,3 °C voor de verschillende meetstations en dieptes. Ondanks de onzekerheid in de data van de industriële lozingen, mogelijke ruimtelijk variaties in meteorologie ten opzichte van Schiphol, het gebruik van de temperatuur metingen bij Diemen voor alle randvoorwaarden en de onzekerheid in de hydrodynamische condities, is dit een erg goede validatie.

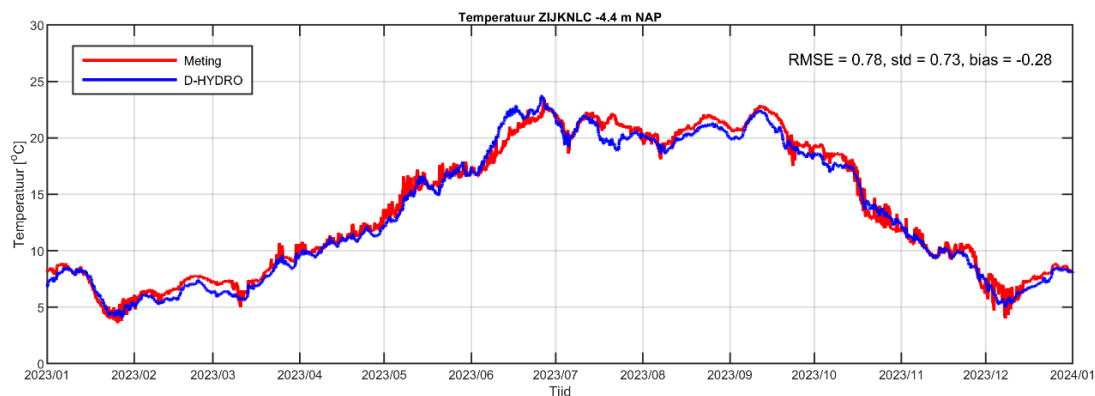
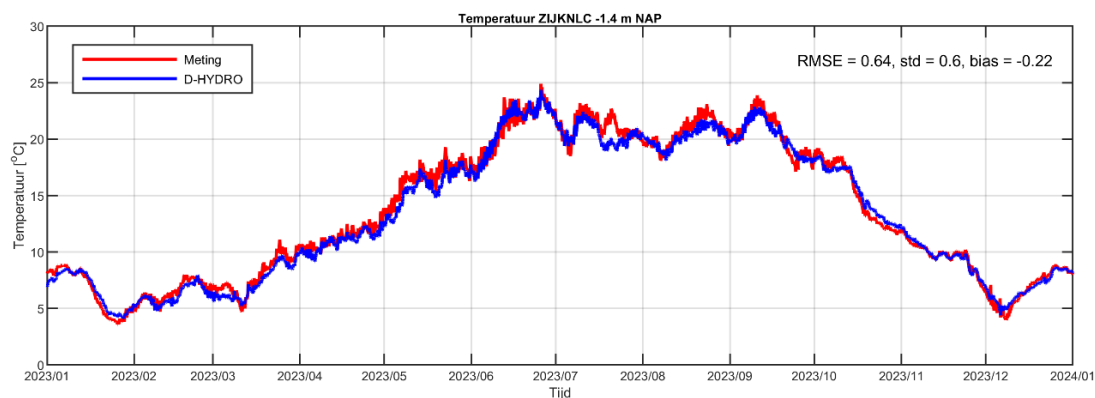
Om het model verder te verbeteren zouden de lozingen rond de Velserskom beter in het model geschematiseerd moeten worden middels near-field analyses van deze lozingen. Met een geschikt near-field model zou dan de initiële menging in meer detail worden berekend. De berekende initiële menging van een lozing zou vervolgens via gekoppelde loos- en innamepunten kunnen worden gereproduceerd in D-HYDRO. Er is echter niet genoeg informatie van de industriële lozingen beschikbaar voor een near-field analyse.



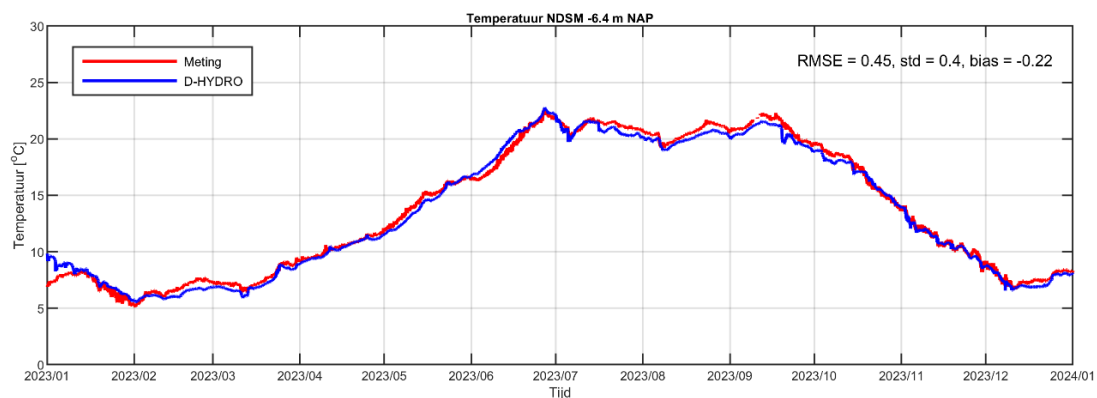
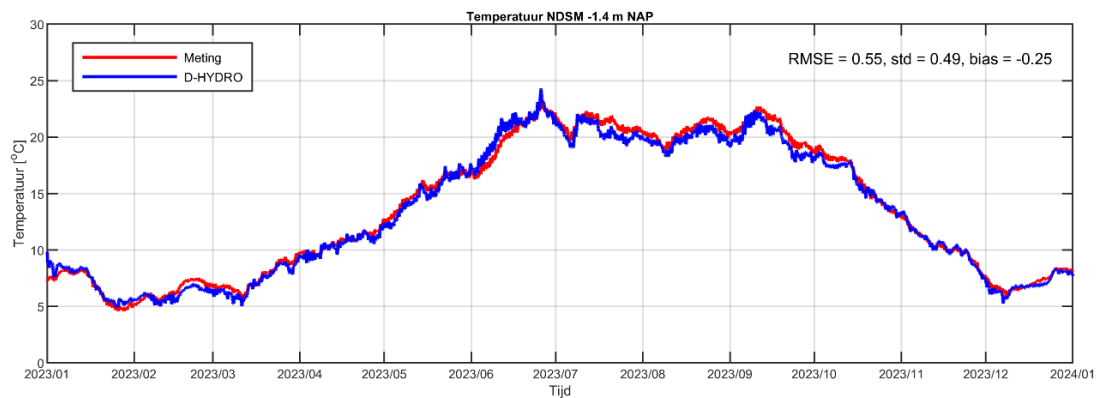
Figuur 4-10 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde temperatuur bij de Velserskom.



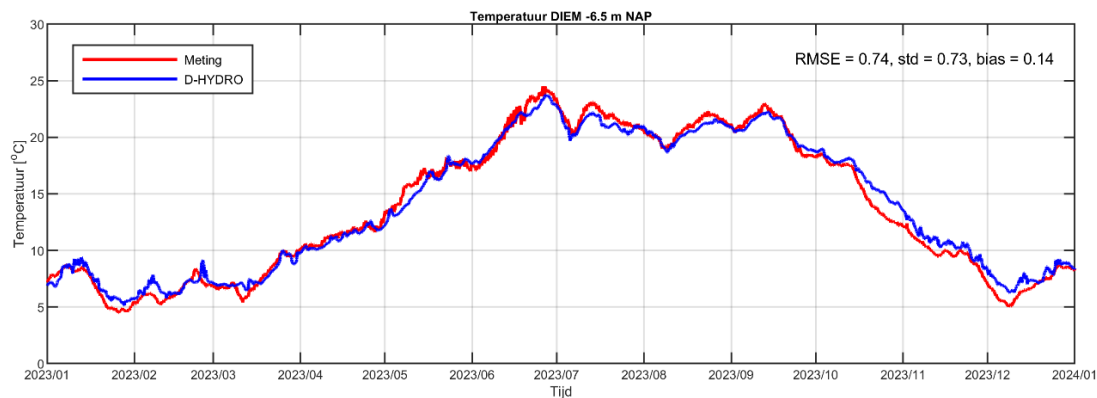
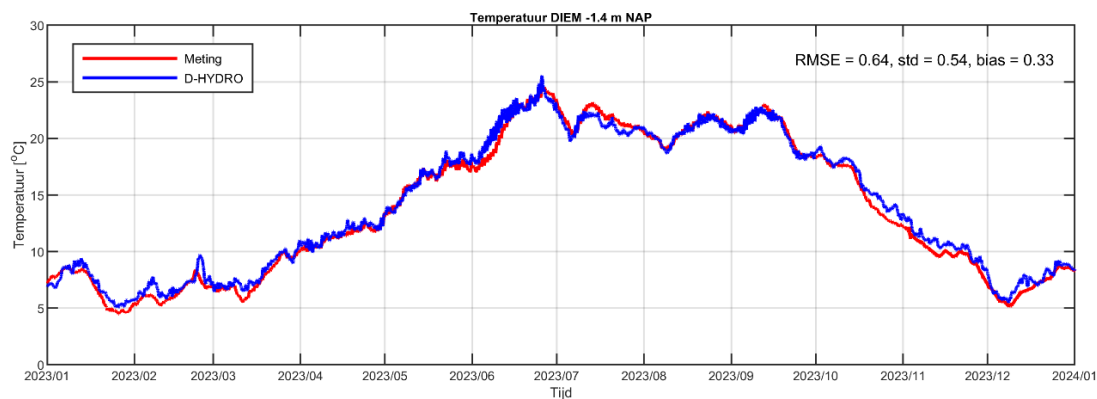
Figuur 4-11 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde temperatuur bij de Spaarndam.



Figuur 4-12 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde temperatuur bij Zijkanaal C.



Figuur 4-13 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde temperatuur bij de NDSM pier.



Figuur 4-14 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde temperatuur bij Diemen.

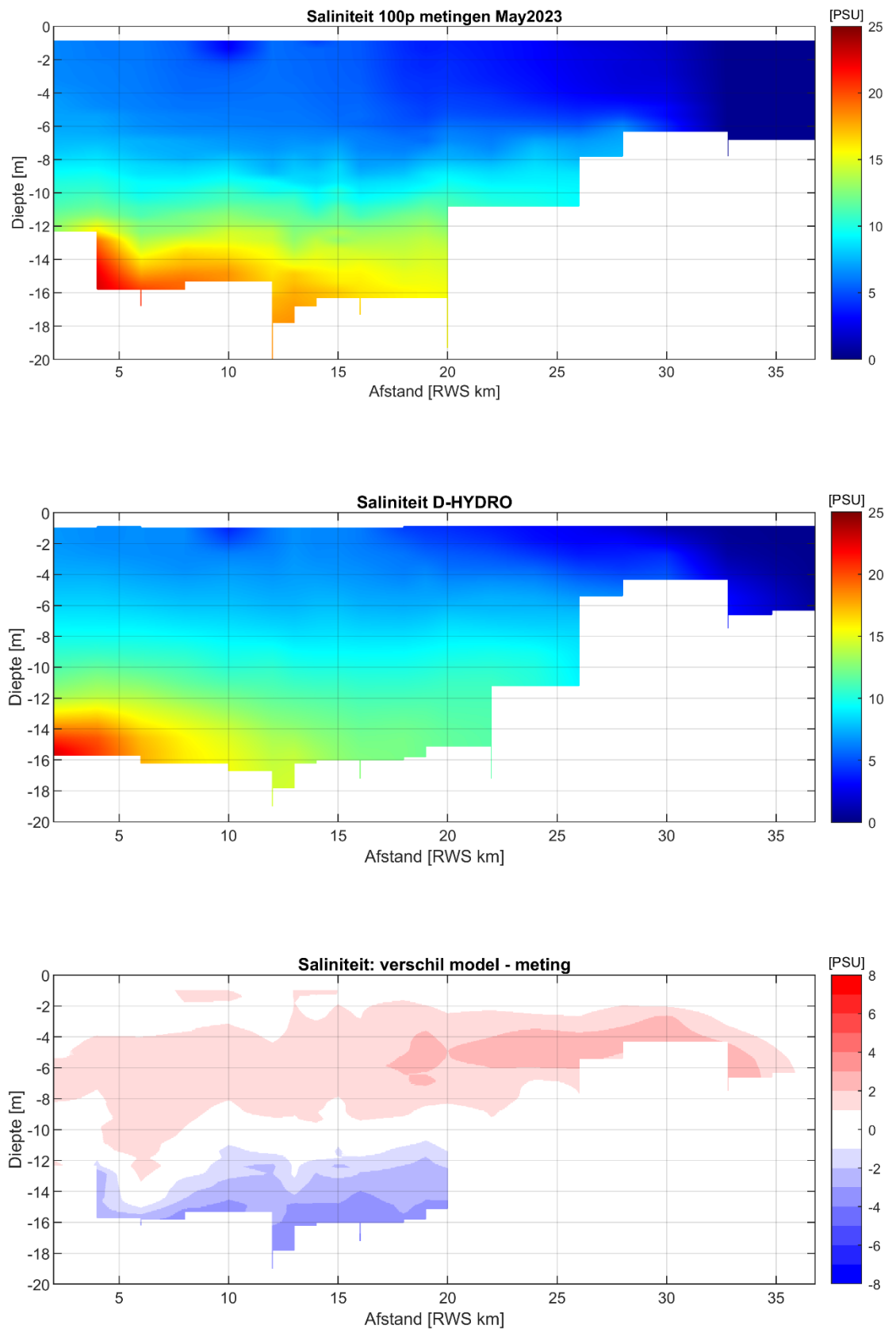
4.2.4 Vergelijking 100-punten metingen

4.2.4.1 Vergelijking zoutgehalte

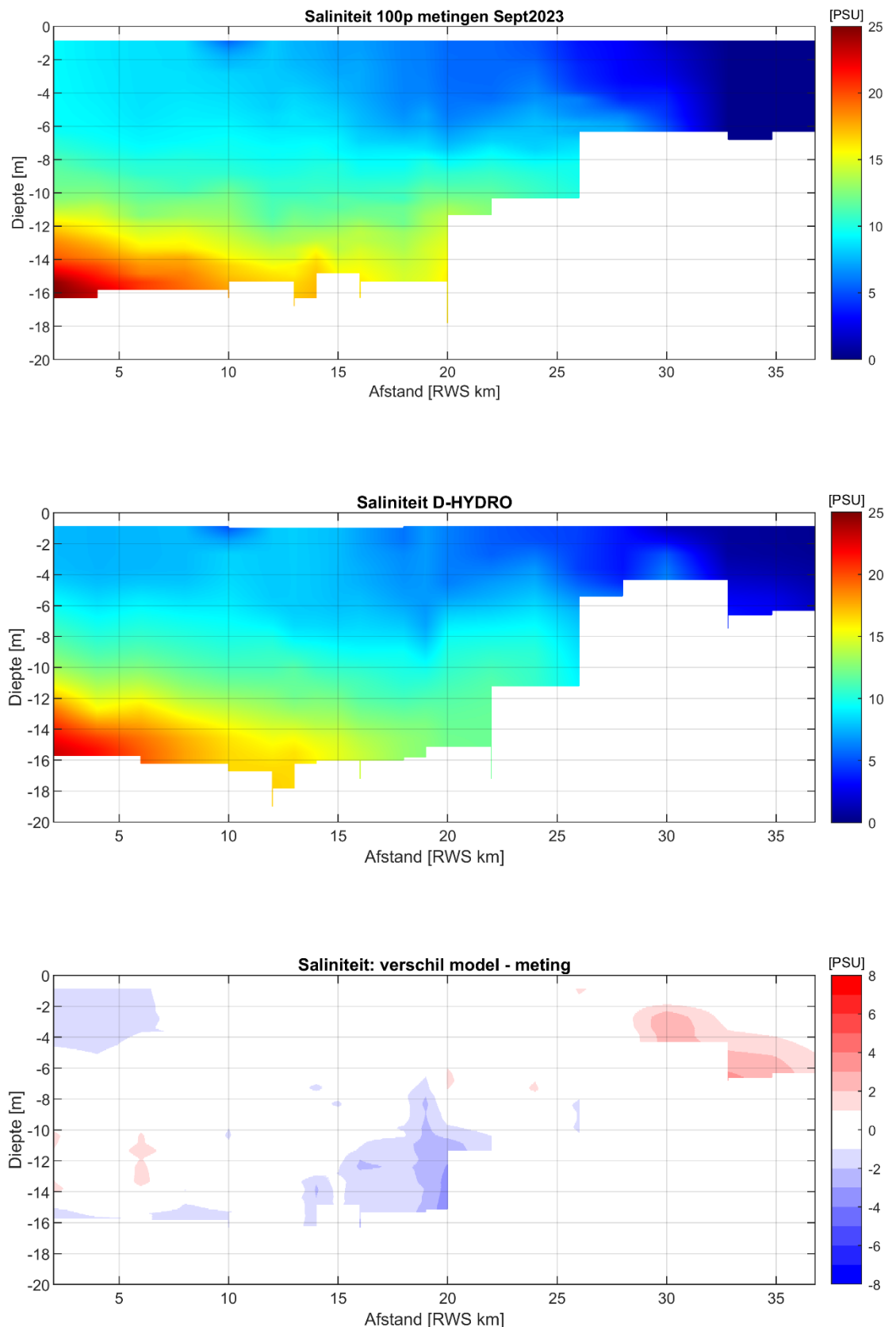
Figuur 4-15 en Figuur 4-16 tonen respectievelijk de vergelijking van gemeten en gemodelleerde 100-punten profielen in mei en september 2023 in het NZK en ARK voor het zoutgehalte. Metingen in het NZK en ARK zijn gerangschikt op afstand tot IJmuiden. De horizontale as in de figuur is de afstand vanaf IJmuiden en de verticale as is de diepte.

Figuur 4-15 en Figuur 4-16 laten een verschillend resultaat zien. Voor mei 2023 berekent het model, over de hele diepte bekeken, een minder gestratificeerd systeem dan gemeten. In de metingen is de bovenste 4 - 6 m verticaal gemengd. Dit zien we niet in de modelresultaten waardoor zoutgehaltes met 1-3 PSU worden overschat in de laag tussen -2 m NAP en -8 m NAP. Bij de bodem zijn de gemodelleerde zoutgehaltes juist 1-3 PSU lager. Figuur 4-16 laat voor september een beter resultaat zien, waarbij het model de zoutgehaltes over het hele dwarsprofiel nauwkeurig berekent. Zowel horizontale als verticale verschillen in zoutgehalte worden goed gereproduceerd door het model. In september laten zowel de metingen als het model zien dat de bovenste 4 -6 m verticaal gemengd is. Ook in september lijkt er een kleine onderschatting van zoutindringing bij de bodem.

Het missen van verticale menging in de bovenste 6 - 8 m van de waterkolom is consistent met eerdere modelschematisaties. Dit komt mogelijk door het ontbreken van scheepsmenging in het model. Een volledige vergelijking tussen de 100-punten metingen en het model is te vinden in Appendix B.



Figuur 4-15 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK.

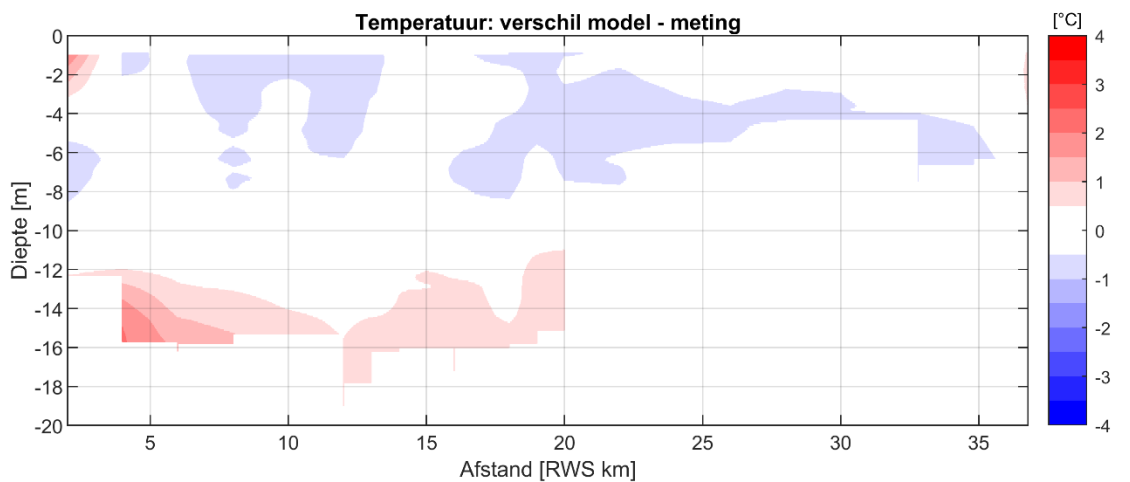
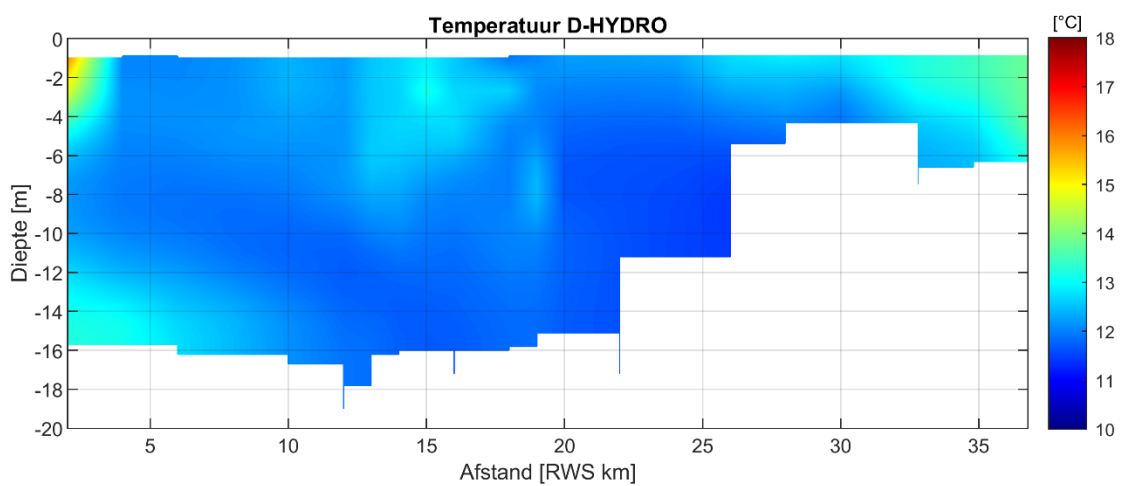
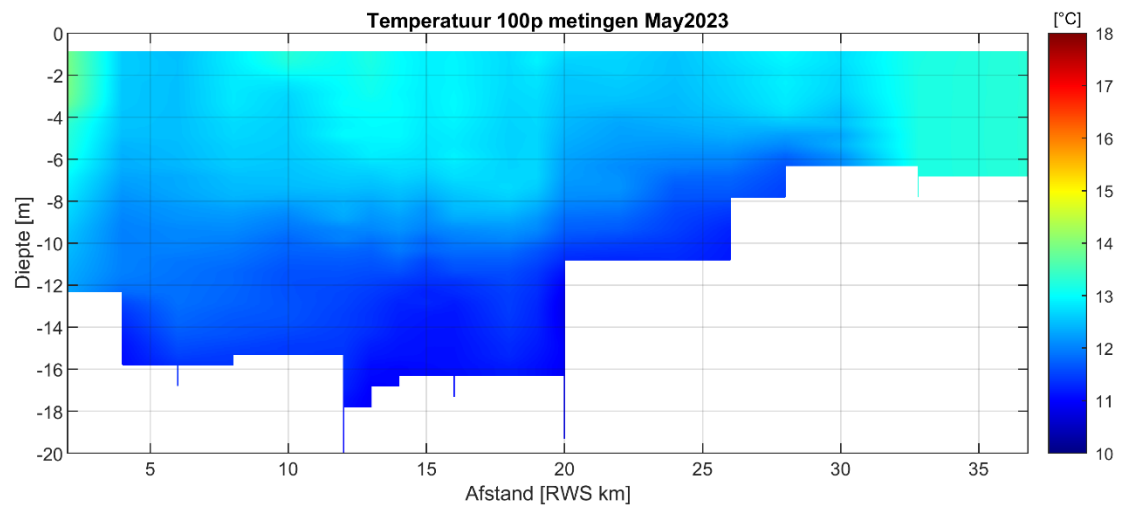


Figuur 4-16 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK.

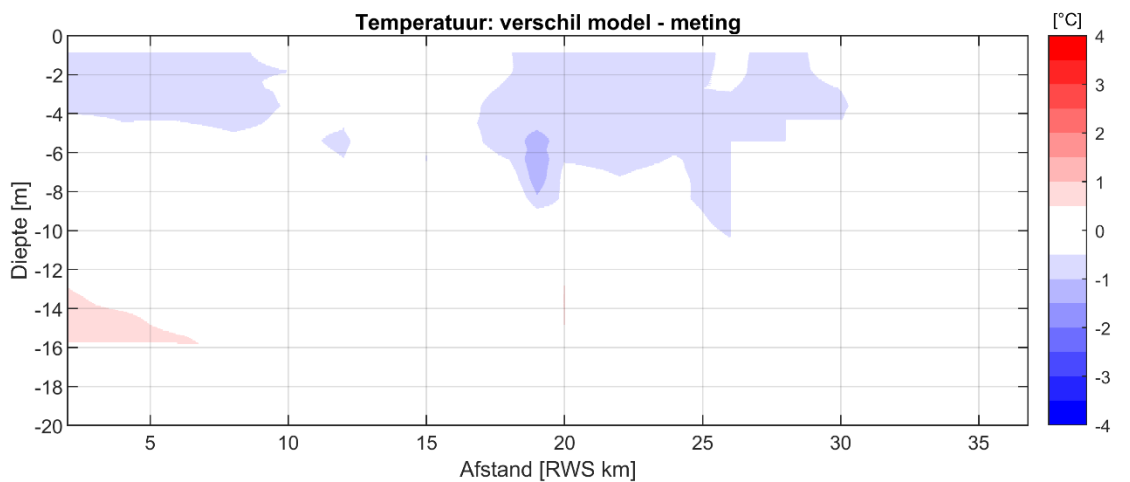
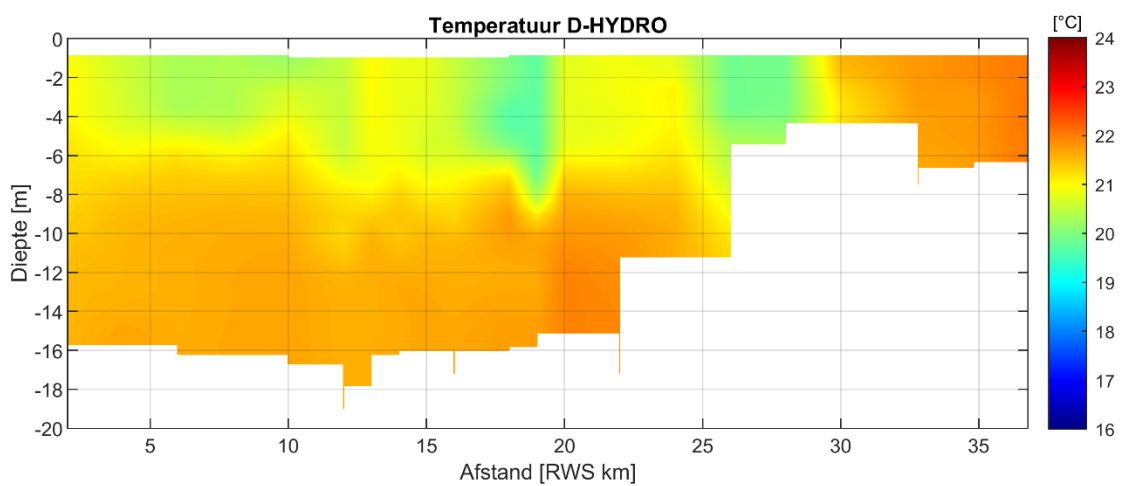
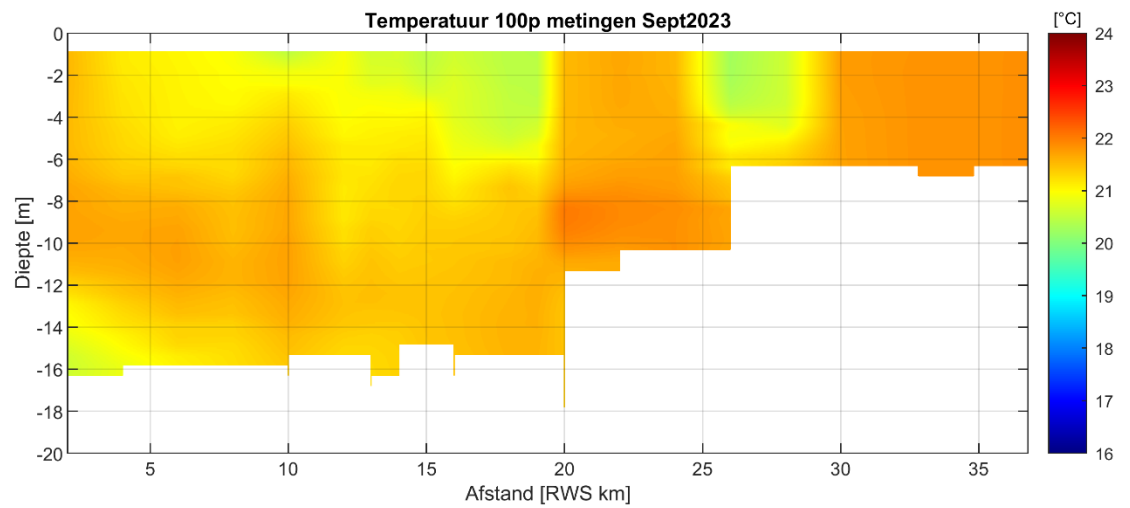
4.2.4.2 Vergelijking temperatuur

Figuur 4-17 en Figuur 4-18 laten de validatie van de 2023 modelschematisatie van het NZK/ARK met de 100-punten metingen voor temperatuur zien. Deze figuren laten een vergelijkbaar beeld zien als de validatie met de meetstations in mei en september. Het D-HYDRO model weet de horizontale en verticale variatie in het model goed te reproduceren. Wel wordt in de bovenste 10m van de waterkolom de temperatuur 0,5 - 1 °C onderschat door het model. Bij de validatie van de meetstations lag de bias typisch tussen de -0,3 °C en 0,3 °C. Op basis van de validatie met de meetstations lijkt deze afwijking bij de 100-punten meting dan ook een incidenteel verschil.

In mei laten de modelresultaten op het ARK (km 30-35) een stratificatie in de temperatuur zien die niet in de metingen zit. Dit is zeer waarschijnlijk te verklaren door de overschatting van zoutindringing in dit gedeelte van het model. Ook laten beide figuren zien dat bij IJmuiden (km 0-5) bij de bodem een verhoogde temperatuur van 1 - 3 °C gesimuleerd wordt. Dit is waarschijnlijk te verklaren door het gebruik van de temperatuur gegevens van Diemen voor alle temperatuur randvoorwaarden van het model, inclusief de zoutlast via de schutsluizen. Een gevoeligheidssimulatie met andere temperatuurrandvoorwaarden voor de schutsluizen liet zien dat deze keuze voor de temperatuur randvoorwaarden geen significante invloed heeft op de zoutverdeling in het NZK/ARK, zie Hoofdstuk 5. Beide figuren laten ook duidelijk de invloed van de industriële lozingen zien. Voor een betere validatie is het waarschijnlijk nodig om de industriële lozingen beter te schematiseren en daarnaast kunnen specifieke temperatuurgegevens voor de grote debietrandvoorwaarden een verschil maken.



Figuur 4-17 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK.



Figuur 4-18 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK.

4.3 Conclusies validatie

Voor de actualisatie van het NZK/ARK D-HYDRO model is de meest recente modelschematisatie (van 2018) geactualiseerd en van vernieuwde randvoorwaarden voor 2023 voorzien. In de actualisatie voor 2023 zijn modelinstellingen en keuzes voor het schematiseren van de randvoorwaarden zoveel mogelijk consistent gehouden met de eerdere modelschematisaties. Kleine wijzigingen in de standaardinstellingen zijn doorgevoerd om consistent te blijven met andere zesde-generatie D-HYDRO modellen of door nieuwe inzichten. Resultaten van het geactualiseerde NZK/ARK 3D D-HYDRO model zijn gevalideerd tegen metingen van waterstanden, debieten, zoutgehalte en temperatuur. De belangrijkste conclusies van deze validatie zijn hier samengevat:

Waterstanden

Het model weet de gemiddelde waterstand en de waterstandsvariatie over de dag goed te reproduceren. De gesimuleerde absolute waterstand wijkt soms wel af van de metingen. Deze onnauwkeurigheid van het model is toe te schrijven aan de relatief grote onzekerheid in de debiet randvoorwaarden. Met een totale waterbalanscorrectie van 31% op het spui- maalcomplex bij IJmuiden, het ontbreken van debieten vanuit de Vecht naar het ARK (onder andere Nigtevecht, Weesp, Maarsen etc.) en ontbrekende periodes in de debietgegevens voor de Irenesluizen, Weesp en Maarsen is er relatief veel onzekerheid in de randvoorwaarden. De timing van gemeten extreme waterstandsvariates worden daarom niet altijd goed gereproduceerd door het model. Het model laat echter wel dezelfde variatie in waterstanden over het jaar zien. Het berekende en gemeten gemiddelde verhang komt ook redelijk overeen tussen de verschillende stations. Het verschil van 1 cm (~20%) is voornamelijk toe te schrijven aan het westelijke gedeelte van het NZK tussen IJmuiden en Buitenhuizen en is vergelijkbaar met eerdere studies. Keuzes in de waterbalans correctie dragen bij aan dit verschil. Er kan daarom geconcludeerd worden dat de nieuwe modelschematisatie, ondanks alle onzekerheden, de gemeten waterstanden aardig goed weet te reproduceren.

Debieten

De debieten bij Weesp worden goed gereproduceerd door het model. De debieten in dit deel van het ARK zijn gecorrigeerd op deze data om een sluitende waterbalans te krijgen. De goede validatie voor Weesp laat zien dat deze waterbalanscorrectie goed is toegepast. Ondanks dat er geen specifieke correctie op de debieten bij Maarssen is uitgevoerd (vanwege de kwaliteit en het ontbreken van de debietgegevens), ziet de vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde debieten bij Maarssen er goed uit.

Zout

Voor de validatie van de zoutgehaltes in het NZK en ARK waren 100-punten metingen en stationsmetingen beschikbaar. De zoutindringing in het NZK en ARK is afhankelijk van de zoutindringing via de schutsluizen van IJmuiden en het debiet door het ARK en NZK. Ondanks de onnauwkeurigheid, in met name de waterbalans, weet het model de zoutgehaltes in het NZK relatief goed te reproduceren:

- In de periodes maart/april en november/december overschat het model de zoutgehaltes in het NZK met 1-3 PSU, met name rond -6 tot -8 m NAP. Deze periodes vallen samen met intensiever gebruik van de nieuwe Zeesluis IJmuiden. Een mogelijke verklaring voor deze overschatting is een te hoge berekende zoutlast via de Zeesluis IJmuiden. Op basis van de 100-punten metingen lijkt de afwijking op -8 m NAP echter ook deels te komen doordat het model een iets andere verticaal profiel met minder verticale menging berekent in het bovenste gedeelte van de waterkolom. Het missen van verticale menging in de bovenste gedeelte van de waterkolom is consistent met eerdere modelschematisaties. Dit komt mogelijk door het ontbreken van scheepsmenging in het model.

- In het ARK bij Diemen wordt de zoutindringing overschat door het model. Deze overschatting van zoutindringing in dit gedeelte van het model is consistent met eerdere modelschematisaties. Het model berekent voor grote delen van het jaar verhoogde zoutgehaltes bij de bodem tot maximaal 7 PSU, terwijl in de metingen incidenteel verhoogde concentraties van maximaal 4 PSU voorkomen. Vermoedelijke oorzaken van deze overschatting zijn het ontbreken van verticale mengprocessen door de scheepvaart in het ARK en de beperkte beschikbaarheid en onnauwkeurigheid van debietgegevens en daaropvolgende waterbalans correcties, zie ook Hoofdstuk 5.
- Het model weet relatief goed de zoutgehaltes bij Zijkanaal C te reproduceren, ondanks de onzekerheid in onder andere de debieten van gemaal Spaarndam. Het lokaal aanpassen van de bathymetrie vanwege de beperkte resolutie van het model heeft een positieve invloed gehad op de validatie.
- De validatie tegen de 100-punten metingen laat een goede vergelijking tussen model en metingen zien voor de metingen in september. Alleen lokaal zijn er in het model kleine verschillen ten opzichte van de metingen te zien.
- Op basis van de 100-punten metingen in mei en september zijn er ook momenten dat er bij de bodem van het NZK een te laag zoutgehalte wordt berekend ten opzichte van de metingen.

Temperatuur

Industriële warmtelozingen hebben in het NZK/ARK systeem een significante invloed op de watertemperatuur. De geactualiseerde informatie van de industriële lozingen laat voor 2023 zien dat meer dan 60 m³/s gebruikt wordt door deze industrieën. Op basis van beschikbare data (100-punten metingen en stationsmetingen) is opnieuw een validatie van de berekende temperatuur gedaan. Op basis van deze vergelijking zijn de volgende conclusies te trekken:

- Over het algemeen weet het model de temperatuur in het NZK/ARK erg goed te berekenen met een bias tussen -0,3 tot 0,3 °C voor de verschillende meetstations. Mogelijke oorzaken van lokale afwijkingen tussen het model en de metingen zijn de jaargemiddelde informatie van de industriële lozingen, het ontbreken van een near-field analyse van de industriële lozingen en/of ruimtelijke variaties in meteorologische condities.
- De invloed van industriële lozingen in het ARK en NZK is duidelijk te zien bij de Velserskom. Aan het oppervlak is hier in de eerste maanden van 2023 in de metingen en het model duidelijk een verhoging van de temperatuur te zien met 4 tot 5 °C. Na februari is deze temperatuursverhoging aan het oppervlak minder uitgesproken. Omdat het model uitgaat van typische jaargemiddelde lozingsgegevens is deze variatie over het jaar in de industriële lozingen niet meegenomen in de modellering.
- Validatie van de gemodelleerde temperatuur t.o.v. de 100-punten metingen laat zien dat de horizontale en verticale gradiënten in de temperatuur goed worden meegenomen. Wel wordt in de bovenste 10m van de waterkolom de temperatuur 0,5 -1 °C onderschat door het model. Op basis van de validatie met de meetstations lijkt dit een incidenteel verschil.
- Voor alle instroomranden van het model is de temperatuur bij Diemen gebruikt als randvoorwaarde. Door deze aanname kunnen er lokaal en incidenteel verschillen tussen gemeten en gemodelleerde temperaturen ontstaan.

5 Gevoeligheidsstudie

Voor de actualisatie van de D-HYDRO modelschematisatie van het NZK/ARK voor 2023 zijn modelinstellingen en keuzes voor de randvoorwaarden zoveel mogelijk consistent gehouden met eerdere (gevalideerde) modelschematisaties. Voor deze eerdere modelschematisaties zijn uitgebreide gevoeligheidsanalyses gedaan als onderdeel van het kalibratieproces. Mede door de kwaliteit en beschikbaarheid van, met name, de debiet data moesten er specifiek voor 2023 keuzes gemaakt worden die van invloed zijn op de validatie. Tevens zijn er kleine aanpassingen gedaan aan modelparameters in de MDU file om consistent te blijven met andere zesde-generatie modellen. Voor een aantal van deze keuzes zijn gevoeligheidssimulaties gedaan om de invloed op de validatie van het model te toetsen. Binnen deze studie is er tevens een modelschematisatie opgezet voor de toekomstige situatie, i.e. inclusief de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden. Resultaten voor deze modelschematisatie zijn in deze gevoeligheidsstudie opgenomen.

Een van de belangrijkste doelen van het model is het nauwkeurig simuleren van de zoutindringing op het NZK/ARK. De invloed van keuzes in randvoorwaarden en modelinstellingen zijn daarom getoetst op de invloed op de berekende zoutindringing van het model. Consistent met voorgaande modelschematisaties laat de 2023 modelschematisatie teveel zoutindringing op het ARK zien. Het doel van deze gevoeligheidsstudie is ook om te laten zien dat de onzekerheid in de randvoorwaarden bijdraagt aan de kwaliteit van deze validatie.

Opgemerkt moet worden dat niet alle simulaties in dit hoofdstuk met dezelfde modelinstellingen en randvoorwaarden gedaan zijn. Het opzetten van de 2023 modelschematisatie is een iteratief proces geweest waarbij gevoeligheidstesten zijn uitgevoerd terwijl er in een later stadium nog correcties zijn gedaan op randvoorwaarden. Bij de gepresenteerde modelresultaten gaat het daarom vooral om de relatieve invloed die keuzes in modelinstellingen en randvoorwaarden hebben.

5.1 Overzicht van gevoeligheidstesten

Een overzicht van alle gevoeligheidstesten voor de ontwikkeling van de 2023 modelschematisatie zijn samengevat in Tabel 5-1.

Tabel 5-1 Overzicht van simulaties in de gevoeligheidsstudie

Categorie	Parameter	Instelling opgeleverd model	Overige geteste instellingen
Resolutie	Verticale resolutie	25 lagen van 1 m	50 lagen van 0,5 m 100 lagen van 0,25 m
Kunstwerken	Thin dams bij NDSM pier	Thin dam file van 2023	Thin dam file van 2018
	Selectieve Onttrekking IJmuiden	Beide opties	-
Numerieke instellingen	Verticale advectie	vertAdvTypSal = 4	vertAdvTypSal = 6
	Verticale diffusiviteit	Dicoww = 5.d-5	Dicoww = 5.d-4 Dicoww = 1.d-5
Randvoorwaarden	Tijdsfiltering debieten Irenesluizen	Dag gemiddeld	Geen tijdsfiltering
	Debiet Spaarndam	Factor 0,8 * gemaaldebieten	Debietmetingen in het kanaal.
	Temperatuur zoutindringing schutsluizen IJmuiden	Temperatuur Diemen	Temperatuur IJmuiden buiten
	Waterbalanscorrectie	Correctie op spui-maalcomplex IJmuiden en Irenesluizen	Meerdere testen met correcties op Schellingwoude, correcties op alle instroomranden en verspreid over het modeldomein.
	Factor deur open tijden Schutsluizen t.o.v. schutduur	0,6	0,66 (basisaannname * 1,1)
	Zoutgehalte in sluizen factor	1	1,1 (10% hoger inkomend zoutgehalte)
Bodemdiepte	Bodemdiepte Zijkanaal C	Uniforme diepte over breedte kanaal	Bodem o.b.v. Baseline projectie

Kort samengevat bleken de verticale resolutie, de extra thin dams bij de NDSM pier, verticale advectie en de temperatuur bij de schutsluizen van IJmuiden geen of zeer beperkte invloed te hebben op de zoutindringing in het NZK/ARK en de hydrodynamica in het algemeen. Dit komt overeen met de conclusie van Verbruggen en van der Baan (2020) dat zoutindringing voornamelijk afhangt van de zoutindringing bij de schutsluizen en de grootste afvoeren in het gebied. De debieten van het gemaal Spaarndam en de bodemdiepte van Zijkanaal C hebben lokaal effect op de validatie van het meetstation Zijkanaal C. Andere parameters bleken wel van invloed op de zoutindringing en worden in de volgende paragrafen verder toegelicht.

5.2 Waterbalans

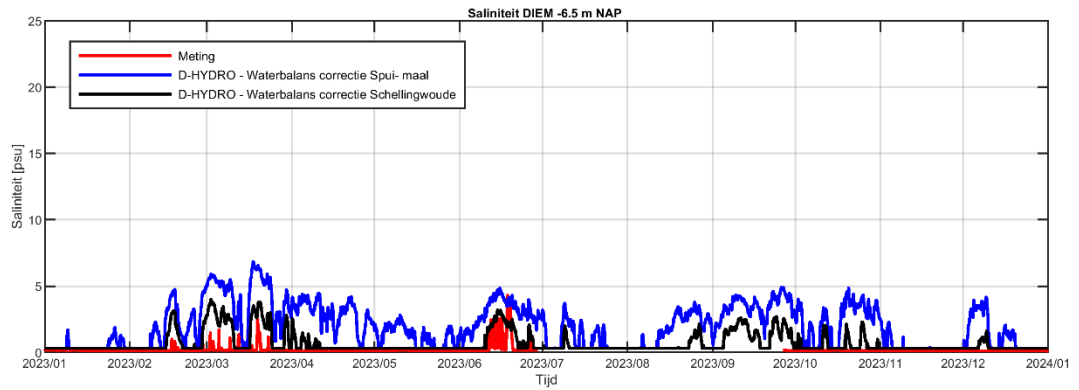
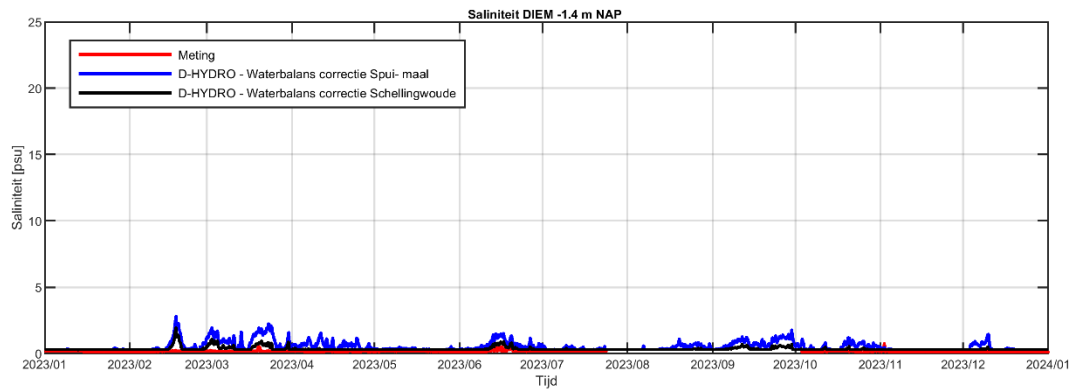
Voor het opzetten van de modelschematisatie van 2023 is gebruik gemaakt van beschikbare data van de grootste (laterale) debieten. Door beperkte beschikbaarheid van de data en periodes met geen of incorrecte gegevens moest de waterbalans gecorrigeerd worden om te voorkomen dat het model leeg zou lopen. Consistent met vorige modelschematisaties is de waterbalans bovenstrooms van Weesp gecorrigeerd bij de Irenesluizen en is de resterende waterbalans gecorrigeerd bij het spui- maal complex. De correctie van de totale waterbalans was ongeveer 31% van het totale spui- maaldebiet. Er zijn verschillende redenen die de

oorzaak kunnen zijn van het verschil tussen in- en uitstroom in het NZK/ARK, zoals ontbrekende informatie over laterale instromen, meetfouten, neerslag, kwel etc. Door de waterbalans te corrigeren op de debieten van het spui- maalcomplex van IJmuiden gaat er een minimaal debiet door het NZK. Dit is conservatief voor de gemodelleerde zoutindringing. Een correctie van 31% is echter ook groter dan eerdere modelschematisaties (voor 2015 en 2018 respectievelijk 9% en 18%) en heeft invloed op de validatie van het model. Om de invloed van de keuze in de waterbalans te toetsen zijn daarom 2 alternatieve opties bekeken. Bij Optie 1 is de hele waterbalans gecorrigeerd bij de eerste laterale instroom benedenstrooms van Weesp, i.e. Schellingwoude. Bij Optie 2 zijn alle laterale instroomranden met een factor vermenigvuldigd om de waterbalans (deels) sluitend te krijgen.

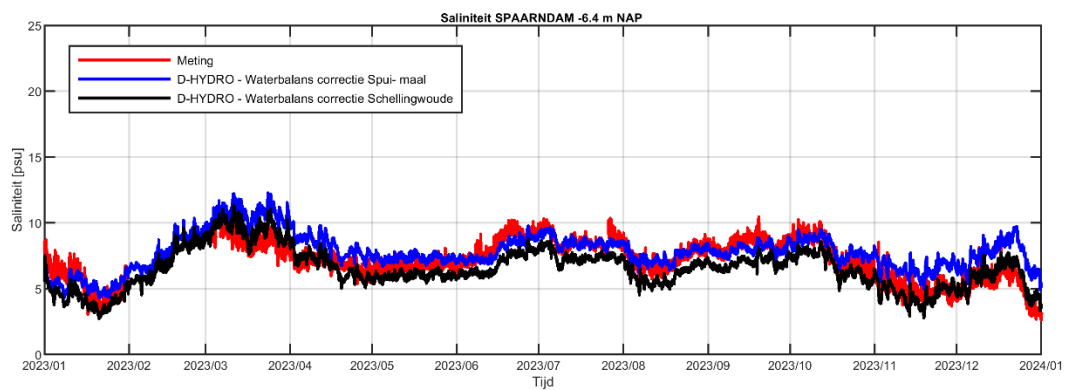
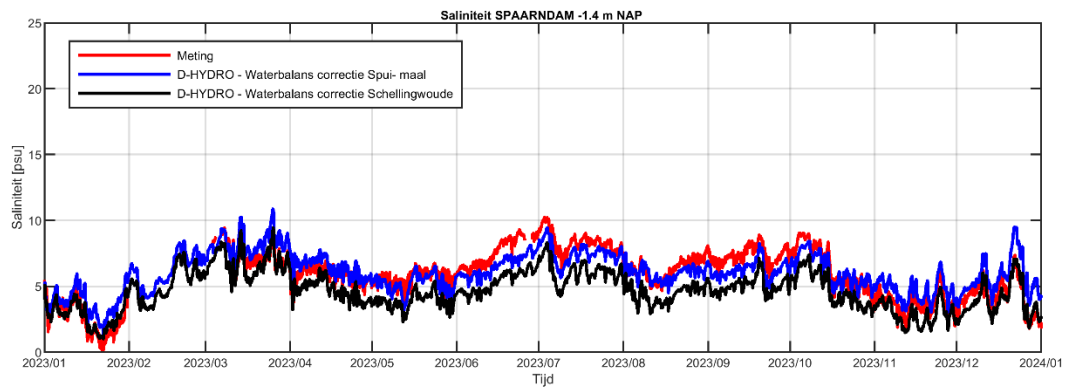
5.2.1 Optie 1: Waterbalans correctie bij Schellingwoude

Bij een waterbalans correctie bij Schellingwoude gaat er door de onzekerheid in de debiet data een maximaal debiet door het NZK. In vergelijking met het corrigeren bij het spui- maalcomplex van IJmuiden is dit het andere uiterste. Een volledige correctie van de waterbalans bij Schellingwoude is in werkelijkheid onrealistisch, maar dit geeft wel een volledig beeld van de onzekerheid van het model.

Figuur 5-1 en Figuur 5-2 laten respectievelijk de vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde zoutgehaltes zien bij Diemen en Spaarndam voor de verschillende opties voor het corrigeren voor de waterbalans. Bij Diemen geeft het corrigeren van de waterbalans bij Schellingwoude een sterke verbetering van de validatie door de reductie van zoutindringing in het ARK. Bij Spaarndam is het berekende zoutgehalte, met name bij het wateroppervlak, te laag. Hoewel een toename van 31% van het totale debiet door het NZK bij Schellingwoude in werkelijkheid onrealistisch is en de gevoeligheidstesten niet met de laatste versie van het model zijn gemaakt, bevestigen deze resultaten dat betere debietgegevens bij kunnen dragen aan een betere validatie van het model. Een deel van het verschil tussen de gemodelleerde en gemeten zoutgehaltes in het NZK/ARK is dus toe te schrijven aan de onzekerheid in de randvoorwaarden en niet aan de modelinstellingen.



Figuur 5-1 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehaltes bij Diemen voor simulaties met verschillende opties voor de waterbalans correctie.

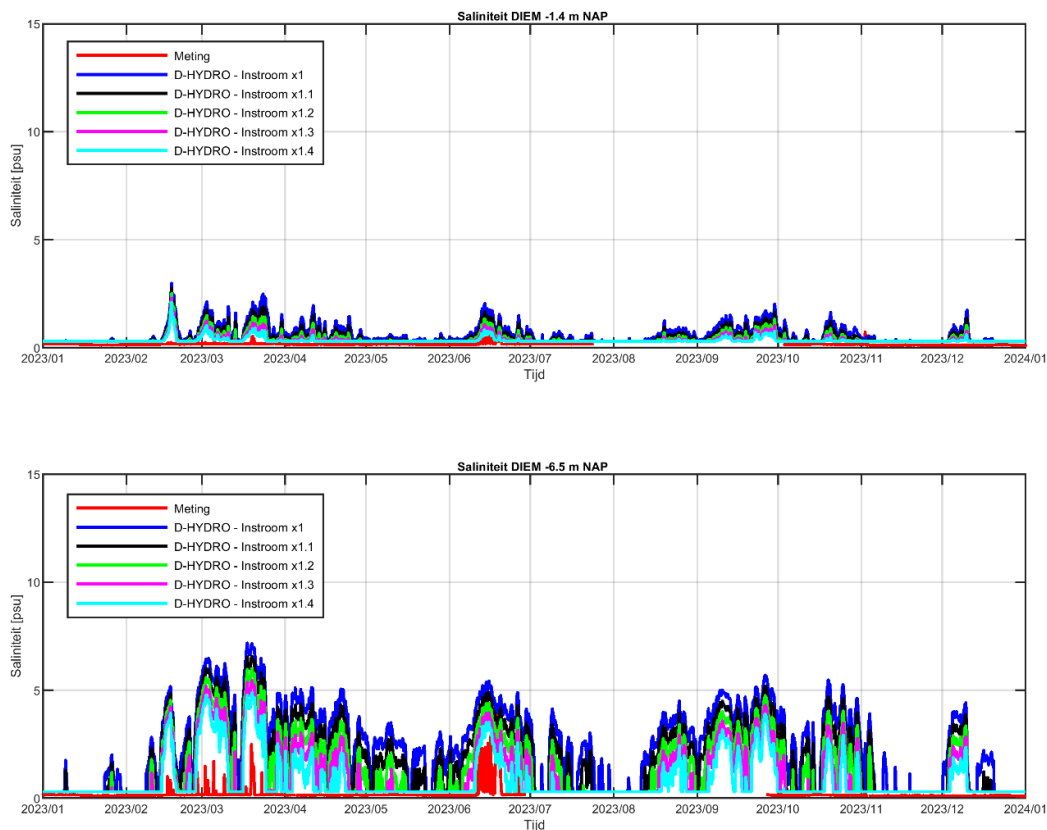


Figuur 5-2 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehaltes bij Spaarndam voor simulaties met verschillende opties voor de waterbalans correctie.

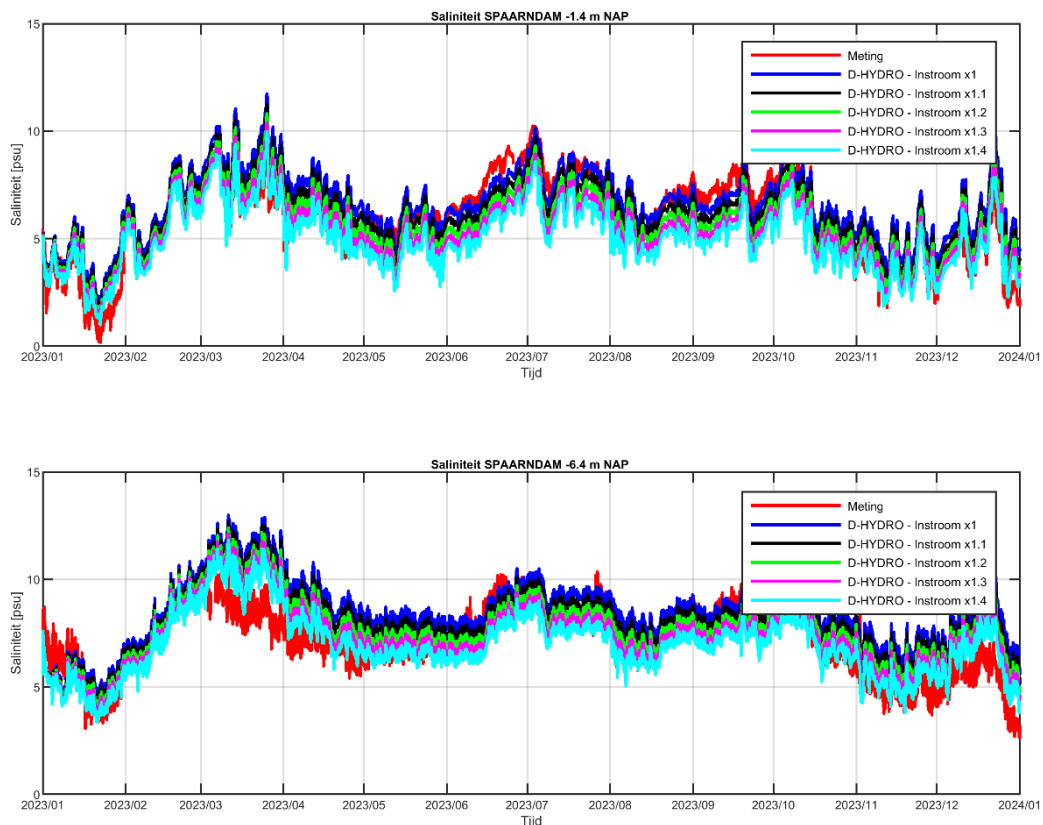
5.2.2

Optie 2: Waterbalans correctie instroomranden.

Als tweede optie voor het corrigeren van de waterbalans is er gekozen voor het corrigeren van alle laterale instroomranden met een factor tussen de 1,1 en 1,4. Ter referentie, door de instroomranden met een factor 1,4 te vermenigvuldigen kan de benodigde reductie op de spui- maaldebieten teruggebracht worden tot 7%. In deze analyse zijn alle instroomranden gecorrigeerd, inclusief de instroomranden bovenstreams van Weesp. Hierdoor is het debiet in het model bij Weesp hoger dan gemeten. Figuur 5-3 presenteert de gemodelleerde zoutgehalten bij Diemen voor deze gevoeligheidsanalyse.



Figuur 5-3 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehalten bij Diemen voor simulaties met verschillende correctie factoren op de instroomranden.



Figuur 5-4 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehalten bij Spaarndam voor simulaties met verschillende correctie factoren op de instroomranden.

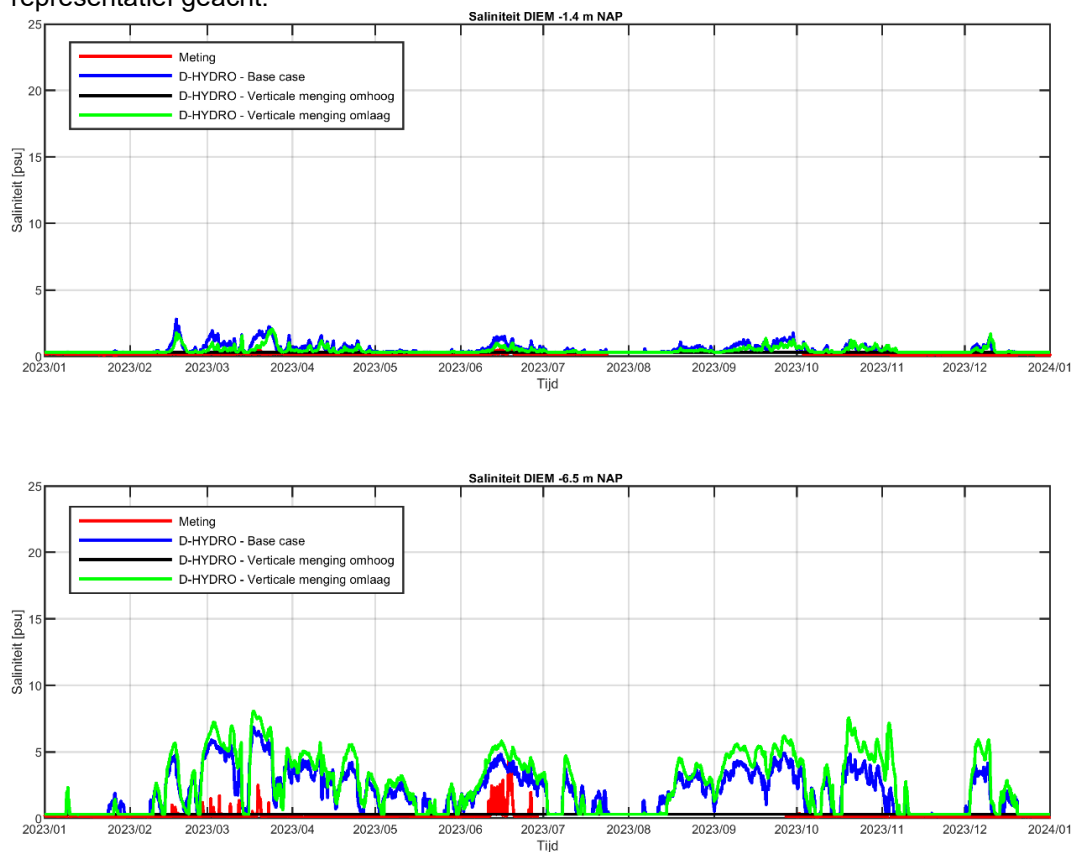
Figuur 5-3 laat zien dat de validatie bij Diemen verbetert indien de instromende debieten worden vergroot. Het corrigeren van de instroomranden met een factor 1,4 geeft echter nog steeds een overschatting van de zoutindringing bij Diemen. Vergelijkbaar met de analyse in Paragraaf 5.2.1 zijn de gemodelleerde zoutgehalten voor andere stations over het algemeen te zoet, zie Figuur 5-4.

Deze analyse bevestigt nogmaals hoe belangrijk de waterbalans is voor de zoutindringing in het NZK en ARK. Mocht in de toekomst het Boezemmodel van Waternet beschikbaar komen voor 2023, dan is het aanbevolen om de debiet randvoorwaarden van dit model te evalueren en mogelijk verder te verbeteren. Voor de opgeleverde modelschematisatie is gekozen om de waterbalans te corrigeren bij het spui- maalcomplex IJmuiden. Dit is consistent met vorige modelschematisaties. Tevens is dit een conservatieve aanname voor de zoutindringing in het model.

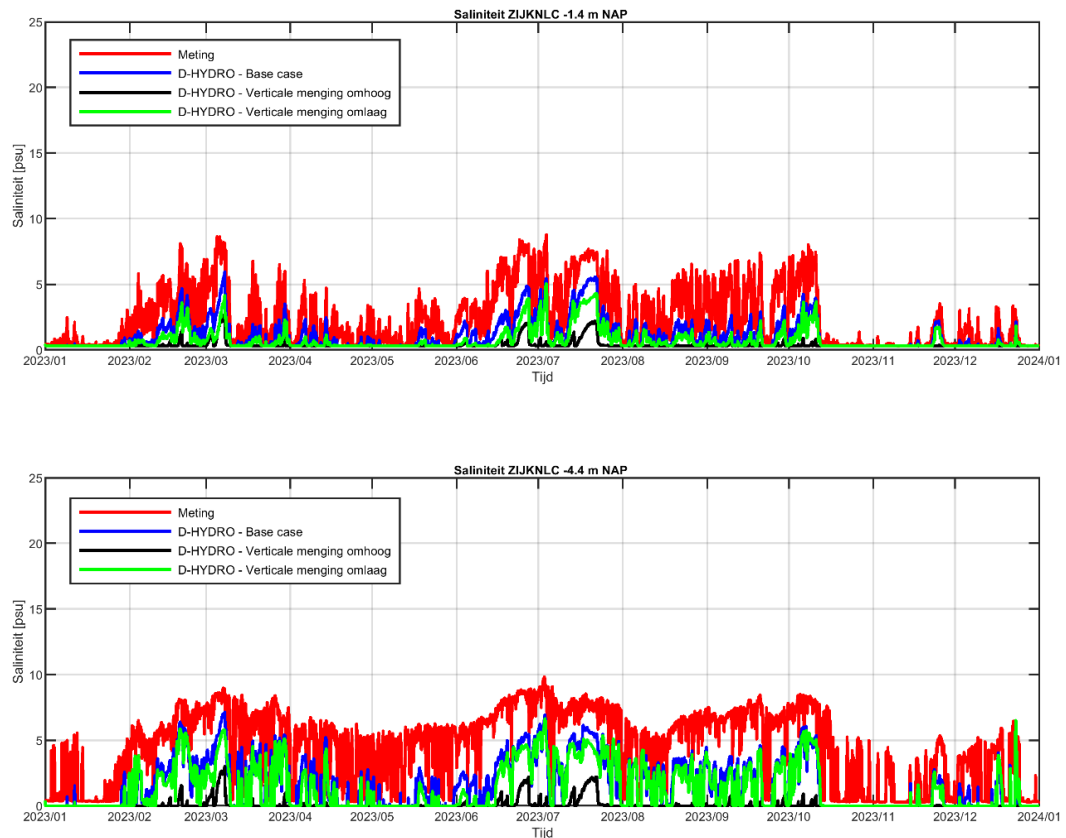
5.3 Verticale menging in het model

De actualisatie van de NZK/ARK modelschematisatie laat, consistent met voorgaande modelschematisaties voor 2015 en 2018, een overschatting van de zoutindringing in het ARK zien. De vorige paragraaf liet zien dat het gebrek aan kwalitatief goede debietgegevens (en daarmee het effect op de waterbalans) een van de mogelijke redenen is voor deze overschatting van de zoutindringing. Een andere mogelijke reden is de verticale menging in het model door scheepvaart. De hypothese is dat scheepvaart met name in het ondiepe Binnen-IJ en ARK invloed heeft op de zoutindringing. Er is momenteel geen optie in D-HYDRO om het effect van scheepvaart op de verticale menging mee te nemen of de verticale menging ruimtelijk te variëren in het model. Ook is er geen literatuur beschikbaar om te kwantificeren hoe groot het effect van scheepvaart op zoutindringing en stratificatie is. Om toch een eerste indruk te krijgen wat een toename of afname in verticale menging doet

voor de validatie van het NZK/ARK modelschematisatie zijn er gevoeligheid testen met de verticale diffusiviteit gedaan. Deze sommen zijn met een oudere versie van de 2023 modelschematisatie gedaan. De relatieve resultaten tussen simulaties worden wel representatief geacht.



Figuur 5-5 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehaltes bij Diemen voor simulaties met verschillende verticale menging.



Figuur 5-6 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehaltenes bij Zijkanal C voor simulaties met verschillende verticale menging.

Figuur 5-5 laat zien dat een toename van verticale menging in het model leidt tot minder zoutindringing op het ARK en daarmee een betere validatie met de metingen. Mogelijke effecten van scheepvaart op de menging kunnen dus een positief effect hebben op het beperken van de zoutindringing in het ARK. Figuur 5-6 laat de vergelijking tussen gemodelleerde en gemeten zoutgehaltenes zien voor meetstation Zijkanal C. Hier neemt de validatie juist af bij toenemende verticale menging. Opgemerkt moet worden dat Zijkanal C minder scheepvaart heeft dan het ARK. Lokaal rond het ARK kan het effect van scheepsmening dus de validatie verder verbeteren. Het verhogen van de verticale menging voor het hele domein geeft echter geen uniforme verbetering van de berekende zoutverdeling over het hele domein. Het verhogen van de verticale menging lokaal rond het ARK of variërend met de waterdiepte is nog niet mogelijk in D-HYDRO.

5.4 Zoutlast en waterbalans

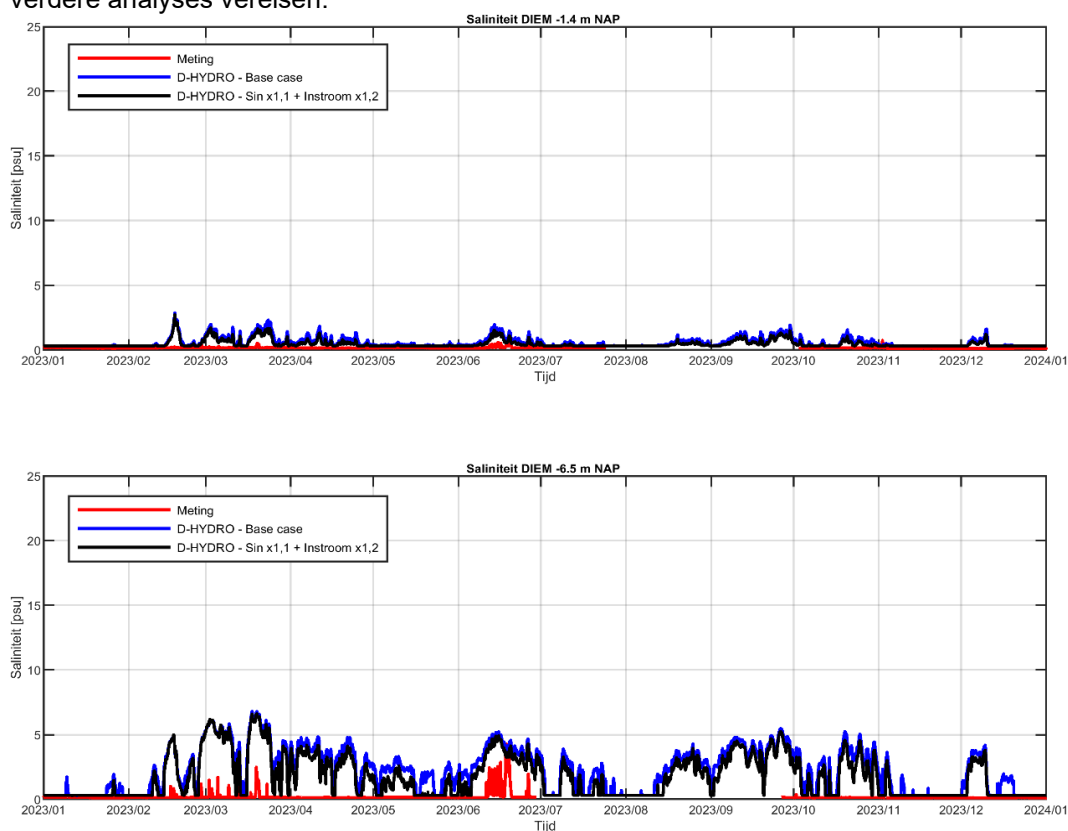
De zoutindringing is afhankelijk van het debiet door het ARK en NZK enerzijds en de zoutindringing via de schutsluizen bij IJmuiden anderzijds. De gevoeligheidsanalyse met betrekking tot de waterbalans liet logischerwijs zien dat met meer debiet door het ARK en NZK de zoutindringing op het ARK afnam. De gevoeligheidsanalyse liet ook zien dat de gemodelleerde zoutgehaltenes in het NZK, met name bij het oppervlak, al snel te laag worden ingeschat door het model bij hogere debieten door het NZK. Voor het analyseren van het effect van de zoutlast vanuit de schutsluizen op de zoutindringing, zijn er meerdere gevoeligheidssommen gedaan met hogere zoutgehaltenes in de sluiskolken. Dit heeft een hogere zoutindringing in het NZK en ARK tot gevolg.

Daarnaast zijn er simulaties gedaan met combinaties van een hogere zoutlast via de schutsluizen en een hoger debiet op de instroomranden. Doel van deze simulaties is om te testen of een combinatie van deze onzekerheden de zoutindringing ARK kan reduceren

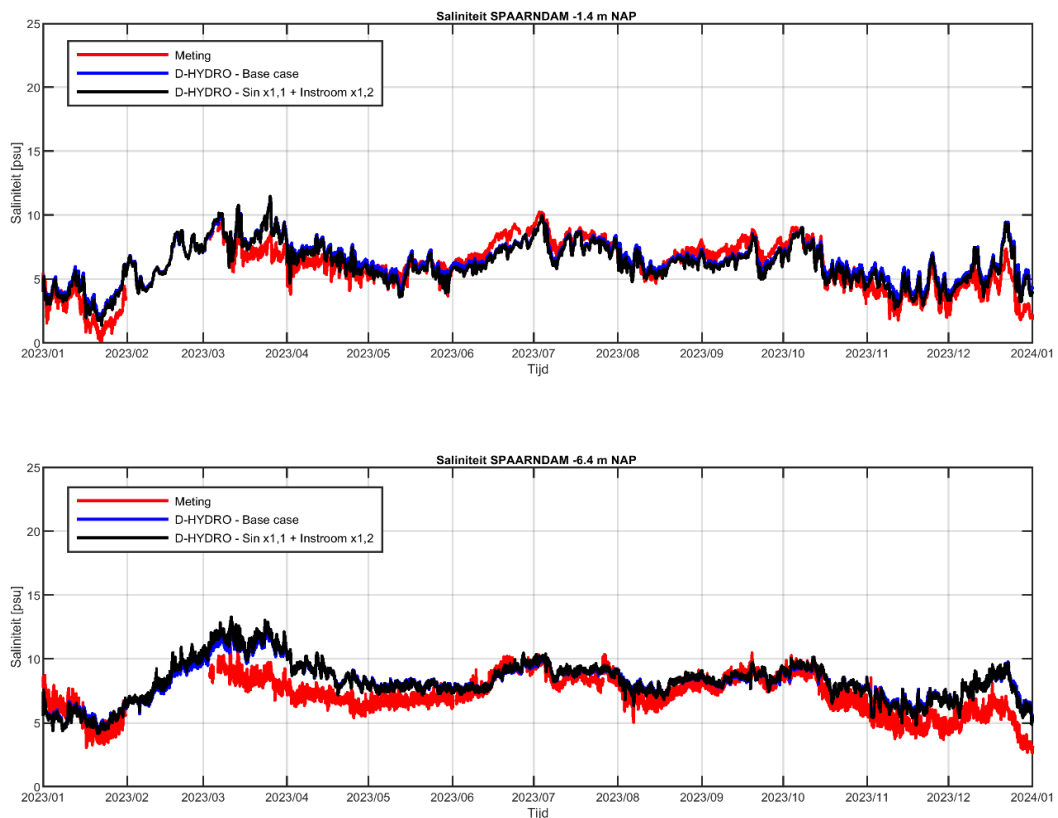
zonder dat de zoutgehaltes in het NZK teveel afnemen. Hiermee neemt ook de benodigde waterbalanscorrectie bij spui-maal complex IJmuiden af.

Figuur 5-7 en Figuur 5-8 laten de gemeten en gemodelleerde zoutgehaltes zien bij Diemen en Spaarndam voor een testsimulatie met verhoogde zoutindringing via de schutsluizen (factor 1,1) en verhoogde laterale instroomranden (factor 1,2). Interessant aan deze resultaten is dat in sommige periodes het zoutgehalte bij Diemen afneemt wat de validatie verbetert. Dit komt door de verhoogde debieten die de zoutindringing in het ARK beperken. Tegelijkertijd geeft deze testsimulatie geen substantieel andere zoutgehaltes bij Spaarndam. Dit laat zien dat door verschillen in de balans tussen enerzijds de zoutindringing via de schutsluizen en anderzijds de waterbalans het model verder verbeterd zou kunnen worden.

Er zijn verder geen uitgebreide testsimulaties gedaan met andere randvoorwaarden voor de schutsluizen bij IJmuiden. Het is de verwachting dat in de nabije toekomst de online koppeling met de ZSF beschikbaar komt in D-HYDRO. Met deze nieuwe koppeling kan de zoutlast via de schutsluizen van IJmuiden in meer detail worden gemodelleerd en zal ook verdere analyses vereisen.



Figuur 5-7 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehaltes bij Diemen voor simulaties met verschillende Si en instroomranden.

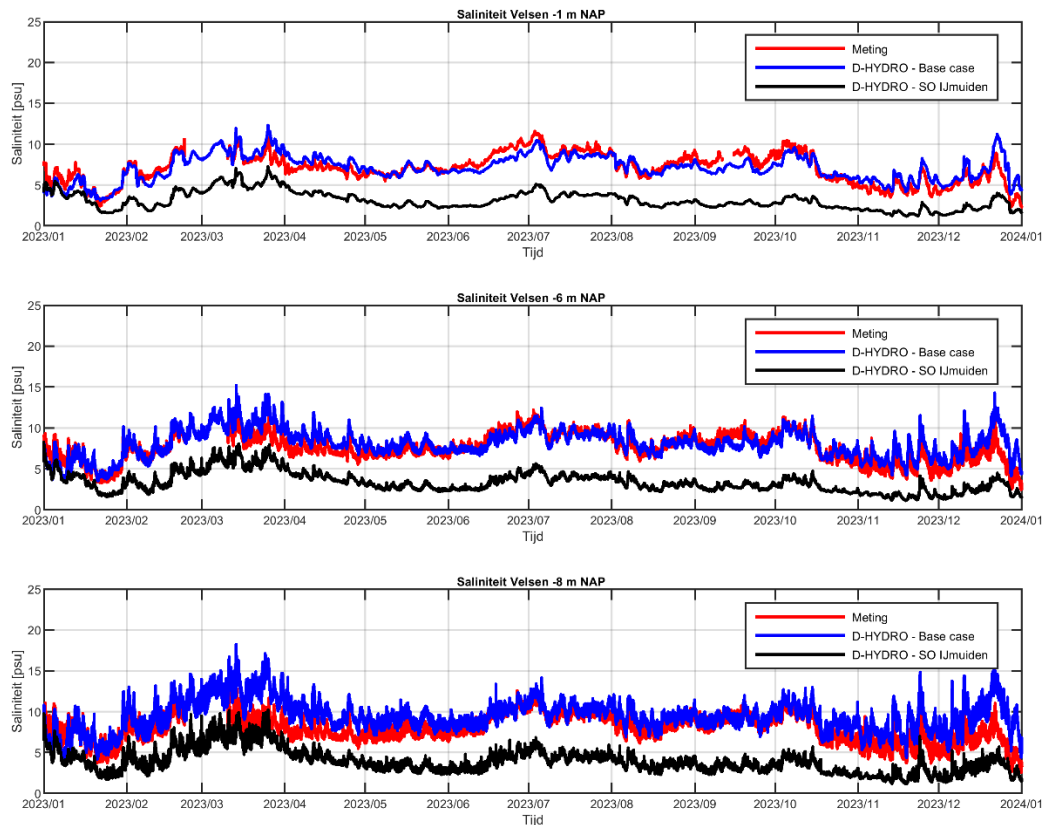


Figuur 5-8 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehaltenes bij Spaarndam voor simulaties met verschillende S_i en instroomranden.

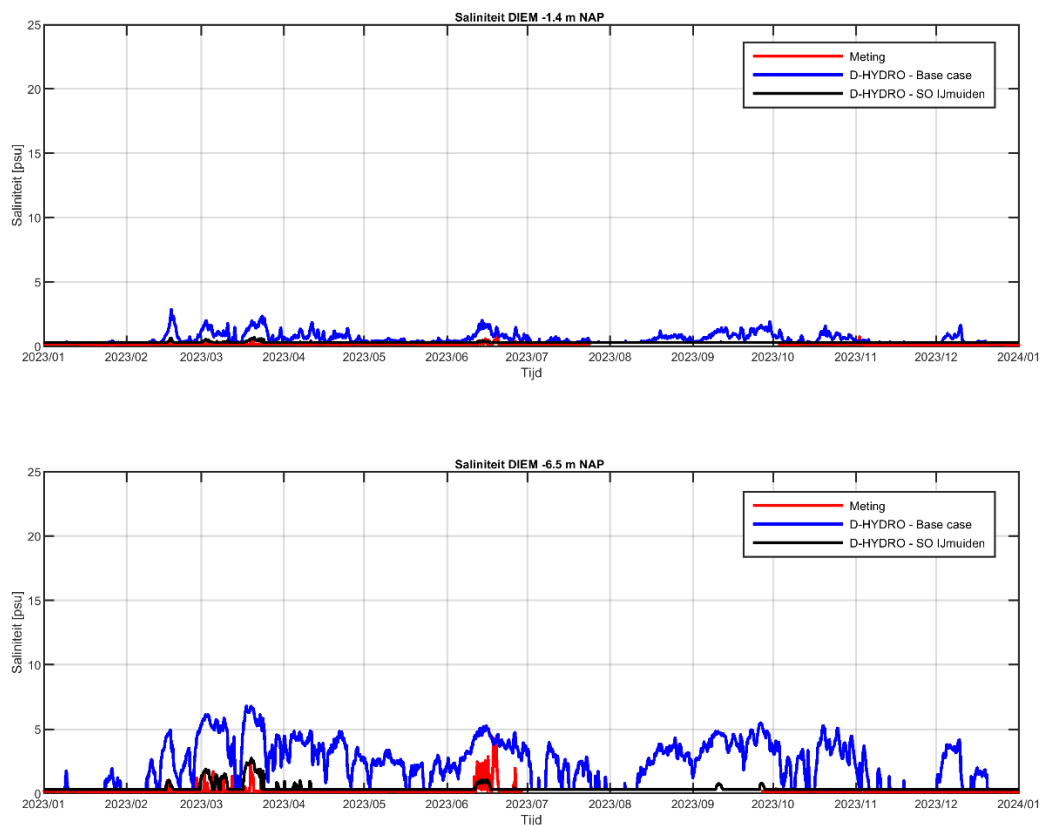
5.5 Selectieve Onttrekking

Om een eerste indruk te krijgen wat het effect van de Selectieve Onttrekking zou zijn geweest in 2023 is er een extra simulatie uitgevoerd met de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden in de modelschematisatie, zie Paragraaf 3.6. Dit is een fictief scenario maar geeft een eerste indruk van de effectiviteit van de Selectieve Onttrekking voor hydrodynamische condities als in 2023. In eerdere studies is de implementatie en het effect van de Selectieve Onttrekking al uitgebreid getoetst voor een deel van het model, zie onder andere Verbruggen en van der Baan, 2022.

Figuur 5-9 en Figuur 5-10 laten de gemodelleerde zoutgehaltenes bij meetstations Velserskom en Diemen zien voor simulaties met en zonder Selectieve Onttrekking. De resultaten voor de Velserskom zijn ook representatief voor meetstations Spaarndam en de NDSM pier. Figuur 5-9 laat zien dat de Selectieve Onttrekking effectief lijkt voor het beperken van de zoutindringing vanuit de schutsluizen naar het NZK. Het model berekent bij de Velserskom een reductie in zoutgehaltenes van gemiddeld 5-6 PSU over heel 2023 in de situatie met Selectieve Onttrekking. Deze berekende reductie in zoutgehaltenes is op elke diepte van het meetstation zichtbaar. In januari laat het model nog iets hogere zoutgehaltenes zien. Dat heeft echter met het inspeelgedrag van het model te maken, aangezien initiële condities niet zijn aangepast voor de situatie met Selectieve Onttrekking. Figuur 5-10 laat de berekende zoutgehaltenes bij meetstation Diemen zien. De resultaten laten zien dat de zoutindringing richting Diemen sterk wordt gereduceerd door de Selectieve Onttrekking. Zoals ook beschreven in Paragraaf 4.2.4 overschat het model de zoutindringing richting het ARK en is het ook de vraag hoe goed het model het relatieve effect van de Selectieve Onttrekking op de zoutindringing richting het ARK kan weergegeven. Het is daarom belangrijk om deze bevindingen verder te valideren met metingen in 2024/2025.



Figuur 5-9 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehaltes bij Velserskom voor simulaties met en zonder selectieve onttrekking IJmuiden .



Figuur 5-10 Vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehaltes bij Diemen voor simulaties met en zonder selectieve onttrekking IJmuiden .

Voor de actualisatie van de NZK/ARK modelschematisatie zijn keuzes gemaakt voor modelinstellingen en randvoorwaarden. Deze zijn in Hoofdstuk 3 tot en met 5 besproken. Voor een aantal van deze keuzes is een gevoeligheidsanalyse gedaan om de invloed van deze onzekerheden op de modelresultaten te kwantificeren. De belangrijkste onzekerheden en aandachtspunten voor modelinvoer en modelinstellingen worden hier beknopt samengevat:

- **Waterbalans:** Voor de actualisatie van de 2023 modelschematisatie was het Boezemmodel van Waternet niet beschikbaar. In plaats daarvan is gebruik gemaakt van een pragmatische aanpak door alleen de grootste laterale debieten van het NZK/ARK systeem te vernieuwen met ruwe data voor 2023. Mede door beperkte beschikbaarheid van deze data en periodes met geen of incorrecte data moest een grote waterbalanscorrectie worden gedaan om te voorkomen dat het model leeg zou lopen. Consistent met vorige modelschematisaties is de waterbalans bovenstrooms van Weesp gecorrigeerd bij de Irenesluizen en is de overige waterbalans gecorrigeerd op het spui- maal complex. De correctie van de totale waterbalans was ongeveer 31% van het totale spui- maaldebit. Dit betekent dat er een onzekerheid van 31% is met betrekking tot de debieten tussen Weesp en het spui-maalcomplex. In Hoofdstuk 5 is de impact van deze onzekerheid op modelresultaten gekwantificeerd.
- **Zoutlast:** De schutsluizen van IJmuiden zorgen voor zoutindringing in het NZK. Er zijn verschillende methodes beschikbaar om randvoorwaarden voor deze schutsluizen te genereren. In deze actualisatie is gebruik gemaakt van de offline koppeling met gedetailleerde D-HYDRO modellen van de schutsluizen om de zoutuitwisseling door het schutten te berekenen (zie Verbruggen en van der Baan, 2020). In deze methode is onder andere de invloed van variabiliteit van zoutgehaltes in de Velserkom niet meegenomen voor de zoutlast via de schutsluizen. In deze actualisatie zijn gevoeligheden in beperkte mate getest omdat deze methode uitgebreid getest en goed gevalideerd is in eerdere studies. In de toekomst komt tevens een alternatieve methode beschikbaar om de zoutlast via de schutsluizen te berekenen: de online koppeling van D-HYDRO met de ZSF.
- **Scheepsvaart menging:** Een mogelijke reden voor de overschatting van zoutindringing op het ARK in het model is het ontbreken van scheepsmening in D-HYDRO. Er is momenteel geen mogelijkheid om parameters voor verticale menging ruimtelijk te variëren in D-HYDRO. Eerste resultaten uit de gevoeligheidsstudie van Hoofdstuk 5 laten zien dat hogere verticale menging de zoutindringing in het ARK kan beperken. Verder onderzoek is nodig om dit te kunnen kwantificeren en te modelleren.
- **Bodemruwheid.** In de huidige actualisatie zijn geen gevoeligheidstesten gedaan met de bodemruwheid. Het gemodelleerde verhang laat zien dat de ruwheid van het model al behoorlijk goed wordt meegenomen. De grootste onzekerheid zit tussen IJmuiden en Buitenhuizen. Hier zit echter ook de grootste onzekerheid in de waterbalans.
- **Metingen.** Voor de huidige actualisatie is gebruik gemaakt van data voor onder andere de laterale instroom. Inspectie van deze data liet onnauwkeurige of foutieve waarden zien. Alle data is zorgvuldig gecontroleerd en gecorrigeerd. Het is echter niet uitgesloten dat er nog onnauwkeurigheden in de randvoorwaarden zitten.

- Modelresolutie. Zijkanalen van het NZK en ARK zijn schematisch opgenomen in het rekenrooster met enkele rekencellen. Door de beperkte resolutie van het rooster en numerieke modelinstellingen kan bodemdiepte mogelijk afwijken van de realiteit. Bij toepassing van dit model met focus op een van deze zijkanalen is het daarom raadzaam om de resolutie te verhogen en de modelbodem opnieuw te genereren.
- Industriële lozingen. De industriële lozingen zijn geactualiseerd met nieuwe informatie. Deze informatie is zorgvuldig samengesteld, maar bevat alleen realistische (gemiddelde) waarden over het jaar. Tijdsvariatie in de industriële lozingen zijn niet meegenomen in het model, omdat deze informatie ontbrak. Tevens zijn geen gedetailleerde near-field analyses gedaan voor de verschillende lozingen.
- Nieuwe Zeesluis IJmuiden. In 2023 is de nieuwe Zeesluis bij IJmuiden beperkt gebruikt. Voornamelijk in februari/maart en november/december is er veel gebruik gemaakt van deze sluis. In andere perioden ging veel scheepvaart via de Noordersluis. De 100-punten metingen vielen buiten de periodes waarin de Zeesluis IJmuiden intensief werd gebruikt. De berekende zoutlast via deze sluis kon daarom beperkt gevalideerd worden. De vergelijking tegen de stationsmetingen geeft wel de indruk dat de zoutlast vanuit de Zeesluis IJmuiden in de huidige randvoorwaarden is overschat.
- Temperatuur randvoorwaarden. Voor alle instroomranden van het model is de temperatuur bij Diemen gebruikt als randvoorwaarde. Door deze aanname kunnen er lokaal en incidenteel verschillen tussen gemeten en gemodelleerde temperaturen ontstaan.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Algemeen

In deze studie is een actualisatie gemaakt van het zesde-generatie D-HYDRO model van het NZK en ARK voor het jaar 2023. Geometrische input voor het model is geactualiseerd met onder andere de nieuwe Zeesluis IJmuiden en de verbreding van het Lekkanaal. Randvoorwaarden van het model zijn opnieuw opgezet voor 2023 op basis van ruwe data voor onder andere de grootste (laterale) debieten van het model, de zoutlast via de schutsluizen bij IJmuiden, meteorologie en industriële lozingen. Modelinstellingen en keuzes voor randvoorwaarden (e.g. waterbalans correctie) zijn zoveel mogelijk consistent gehouden met eerdere modelschematisaties voor het NZK/ARK. Resultaten van het model zijn gevalideerd tegen in-situ metingen van waterstanden, debiet, temperatuur en zoutgehalte voor 2023. Een aparte modelschematisatie is opgezet voor de toekomstige situatie, i.e. inclusief de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden.

7.2 Conclusies

7.2.1 Validatie

Op basis van de validatie van modelresultaten tegen de metingen zijn de volgende conclusies getrokken over de geactualiseerde modelschematisatie van het NZK/ARK model in D-HYDRO:

- Het model weet de gemiddelde waterstand en de waterstandsvariatie over de dag goed te reproduceren. De gesimuleerde absolute waterstand wijkt soms wel af van de metingen. Deze onnauwkeurigheid van de gesimuleerde waterstanden is toe te schrijven aan de relatieve grote onzekerheid in de debiet randvoorwaarden. Met een totale waterbalans correctie van 31% op het spui- maalcomplex bij IJmuiden, het ontbreken van debieten vanuit de Vecht naar het ARK (onder andere Nigtevecht, Weesp, Maarsen etc.) en ontbrekende periodes in de debiet data voor de Irenesluizen, Weesp en Maarsen is er relatief veel onzekerheid in de randvoorwaarden. De timing van gemeten extreme waterstandsvariates worden daarom niet altijd goed gereproduceerd door het model. Het berekende en gemeten gemiddelde verhang in het NZK/ARK komt aardig overeen tussen de verschillende stations (verschil +/- 1cm (~20%)). Het verschil van 1 cm (~20%) is voornamelijk toe te schrijven aan het westelijke gedeelte van het NZK tussen IJmuiden en Buitenhuizen en is vergelijkbaar met eerdere studies. Er kan daarom geconcludeerd worden dat de nieuwe modelschematisatie, ondanks alle onzekerheden, de gemeten waterstanden aardig goed weet te reproduceren.
- De goede validatie voor Weesp laat zien dat deze waterbalanscorrectie goed is toegepast. Ondanks dat er geen specifieke correctie op de debieten bij Maarssen is uitgevoerd (vanwege de kwaliteit en het ontbreken van de debietgegevens), ziet de vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde debieten bij Maarssen er goed uit.
- In verschillende periodes weet het model de zoutgehalten in het NZK/ARK goed te reproduceren. In de periodes maart/april en november/december overschat het model de zoutgehalten in het NZK met 1-3 PSU, met name rond -6 tot -8 m NAP. Deze periodes vallen samen met intensiever gebruik van de nieuwe Zeesluis IJmuiden. Een mogelijke verklaring voor deze overschatting is een te hoge berekende zoutlast via de Zeesluis IJmuiden. Op basis van de 100-punten metingen lijkt de afwijking op -8 m NAP echter ook deels te komen doordat het model een iets andere verticaal profiel met minder verticale menging berekent in het bovenste gedeelte van de waterkolom. Het missen van verticale menging in de bovenste

gedeelte van de waterkolom is consistent met eerdere modelschematisaties. Dit komt mogelijk door het ontbreken van scheepsmenging in het model. Consistent met vorige modelschematisaties is er een overschatting van de zoutindringing in het ARK. Mogelijke verklaringen voor deze afwijkingen zijn de onzekerheid in de waterbalans, een te hoge zoutlast via de schutsluizen bij IJmuiden en/of het ontbreken van verticale menging door scheepvaart in het model. Validatie met de 100-punten metingen laat een goede vergelijking tussen model en metingen zien voor de metingen in September. Wel laten modelresultaten voor mei en september soms ook een te lage zoutconcentratie bij de bodem van het NZK zien t.o.v. de metingen.

- Over het algemeen weet het model de te temperatuur in het NZK/ARK erg goed te berekenen met een bias tussen -0,3 tot 0,3 °C voor de verschillende meetstations. Mogelijke oorzaken van lokale en incidentele afwijkingen tussen het model en de metingen zijn de beperkte jaargemiddelde informatie van de industriële lozingen, het alleen schematisch modelleren van de industriële lozingen zonder near-field analyse en/of ruimtelijke variaties in meteorologische condities.

7.2.2 Toepassing van het model

Voor toepassing van het model is de modelschematisatie van het NZK en ARK op verschillende aspecten geëvalueerd in Verbruggen en van der Baan (2020). De huidige actualisatie is qua modelopzet en keuzes in randvoorwaarden hetzelfde gebleven. De toepassing van het model is daarom niet veranderd. Mits correct gebruikt binnen de toepassing van D-HYDRO modellen en met inachtneming van de onzekerheden van het model is het model geschikt voor het berekenen van uiteenlopende hydrodynamische aspecten (zoutgehaltes, temperatuur, debieten, waterstanden etc.). Alleen de belangrijkste relevante conclusies over de toepassing van specifiek dit model worden hier kort samengevat:

- *Reproduceren van relatieve effecten op zoutindringing.* Het model weet de variatie in zoutgehalte in het NZK voor langere periodes goed te modelleren. In 2 periodes (maart/april en november/december) is er een overschatting van de zoutgehaltes in het NZK van typisch 1-3 PSU. De rest van het jaar weet het model de gemiddelde zoutgehaltes en variatie goed te volgen. In het ARK overschat het model de zoutindringing. De gevoeligheidsanalyse laat zien dat de onnauwkeurigheid in de randvoorwaarden een van de belangrijkste redenen is van de overschatting van zoutgehaltes. Hierdoor kan geconcludeerd worden dat het model alsnog geschikt is voor verschillende toepassingen om (relatieve) effecten op zoutgehaltes in het NZK/ARK te berekenen. Zoals in Verbruggen en van der Baan (2020) aangegeven is het hierbij van belang dat aanpassingen van het model geen significante invloed hebben op de zoutuitwisseling via de schutsluizen. Deze randvoorwaarden zijn offline gegenereerd en bij enige invloed op dit proces vanuit het NZK zullen deze opnieuw afgeleid moeten worden.
- *Reproduceren van (effecten op) absolute zoutgehalte.* Op basis van de validatie wordt het absolute zoutgehalte over het algemeen goed gereproduceerd door het model. In het ARK wordt de zoutindringing overschat. Zowel de zoutlast via de schutsluizen als de waterbalans zou verder verbeterd moeten worden om de gemodelleerde absolute zoutgehaltes te verbeteren. In de toekomst komt de online koppeling met de ZSF beschikbaar. Dit geeft de mogelijkheid om de processen in de sluis (inclusief de invloed van voorgaande schuttingen) beter mee te nemen. Daarnaast kan met een dergelijke methode ook het effect van een aanpassing van het zoutgehalte in de Velserskom mee worden genomen in het berekenen van de kolkuitwisseling. Aangeraden wordt om de zoutlast via de schutsluizen verder te evalueren als deze ontwikkeling beschikbaar is.

- *Reproducen van (effecten op) temperatuur.* Het model weet de temperatuur metingen in het NZK/ARK erg goed te reproducen. De nieuwe informatie voor de industriële lozingen lijkt daarmee correct. Lokaal rond industriële lozingen kan het model afwijken van de werkelijkheid omdat de industriële lozingen alleen schematisch in het model zijn opgenomen en er geen near-field analyses voor de lozingen zijn uitgevoerd. In Paragraaf 3.3.5 is een overzicht gegeven van de realistische lozingen voor 2023 en de vergunde lozingen. In het model zitten nu de realistische lozingen. Voor vergunningsstudies zullen de lozingen in het model geactualiseerd moeten worden naar de vergunde lozingen, zoals vermeld in Paragraaf 3.3.5.
- *Operationeel inzetten van het model.* Het NZK/ARK model is een hydrodynamisch model wat volledig gedreven is door randvoorwaarden. Dit vraagt hoge kwaliteit data voor onder andere de waterbalans, schutsluizen etc. Momenteel moeten hier veel aannames en controles voor gedaan worden om correct te krijgen. Qua rekentijden (<1,5 dag voor 1 jaar simulatie op 24 cores) is het model wel geschikt om in operationeel verband veel verschillende scenario's door te rekenen.

7.3 Aanbevelingen

Voor voorgaande modelschematisaties is al een uitgebreide lijst van aanbevelingen gemaakt, zie Verbruggen en van der Baan (2020). Een aantal van deze aanbevelingen zijn opgepakt in de huidige actualisatie zoals het updaten van de industriële lozingen en het implementeren van de nieuwe Zeesluis IJmuiden en de Selectieve Onttrekking. Openstaande aanbevelingen worden hier beknopt samengevat en nieuwe aanbevelingen zijn toegevoegd:

7.3.1 Aanleg en beheer

- A. Binnenkort komt de online koppeling van D-HYDRO met de ZSF beschikbaar voor het berekenen van de zoutlast door de schutsluizen bij IJmuiden. Deze online koppeling heeft een aantal voordelen t.o.v. de huidige offline koppeling. Een voorbeeld hiervan is dat het effect van de variatie in de zoutconcentratie in de Velserskom op de zoutlast door de schutsluizen meegenomen kan worden tijdens een simulatie. Daarnaast kunnen ook de invloed van voorgaande schuttingen (die het zoutgehalte in de kolk bepalen) mee worden genomen. Zo zal het zoutgehalte in de kolk hoger zijn als de buitendeur langer heeft opgestaan. Bij het genereren van de huidige randvoorwaarden is ervan uit gegaan dat de situatie in de kolk voorafgaand aan het openen van de binnendeur altijd hetzelfde is (dus niet afhankelijk van deur-open-tijden van de buitendeur, voorgaande schuttingen, of zoutgehaltevariëaties in de buitenhaven). Aanbevolen wordt om zodra de online koppeling van D-HYDRO met de ZSF beschikbaar komt, deze toe te passen voor het NZK/ARK en te evalueren of deze toepassing voor een betere validatie van de zoutindringing kan zorgen.
- B. Voor het nauwkeurig afleiden van randvoorwaarden voor de schutsluizen en het berekenen van de zoutlast wordt het aanbevolen dat RWS de werkelijke deur-open-tijden gaat registreren en/of beschikbaar maakt vanuit bijvoorbeeld het SCADA systeem.
- C. Verder onderzoek is nodig naar het effect van scheepsvaart op de verticale meningen rond het Binnen-IJ en op het ARK. Daarnaast zou onderzoek gedaan moeten worden hoe de invloed van scheepsvaart het beste gerepresenteerd kan worden in het model.
- D. In huidige actualisatie (en voorgaande modelschematisaties) zit erg veel onzekerheid in de waterbalans. Voor het verbeteren van de waterbalans zijn meerdere aanbevelingen: 1) Mocht het Boezemmodel van Waternet in de toekomst beschikbaar komen voor 2023 dan is het aan te raden om debieten uit het Boezemmodel te vergelijken met de randvoorwaarden van dit model. Significante laterale instromingen kunnen dan toegevoegd worden aan de modelschematisatie en

mogelijk kan de waterbalanscorrectie bij het spui- maalcomplex verkleind worden. 2) Extra debiet metingen tussen Weesp en IJmuiden kunnen voor toekomstige modelschematisaties meer inzicht geven in welk gedeelte van het model de waterbalans gecorrigeerd moet worden. 3) Een extra debietmeter in het Binnenspuikanaal kan de onzekerheid rond de debieten van het spui- maalcomplex wegnemen.

- E. Het meetnet met betrekking tot zout, temperatuur, waterstanden en debieten kan verder worden uitgebreid op strategische punten:
 - a. Een meetstation bij de bodem op diepere gedeeltes van het NZK geeft meer inzicht in de tijdvariatie van de zoutindringing in het NZK en een beter inzicht in de verticale verdeling van het zoutgehalte over de hele diepte.
 - b. Een meetstation achter de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden kan voor toekomstige modelschematisaties meer inzicht geven in de effectiviteit van dit kunstwerk onder verschillende hydrodynamische condities.
 - c. Meetstations in de verschillende schutkolken kunnen een goed beeld geven van de (variërende) zoutgehalten en verticale variatie in concentraties.
 - d. Meetstations bij de grote laterale instromen zoals de Irenesluizen geeft voor toekomstige modelschematisaties nauwkeurige randvoorwaarden voor onder andere de temperatuur.
 - e. Een meetstation (zout en temperatuur, bij voorkeur profielen) in de buitenhaven kan gebruikt worden voor het genereren van randvoorwaarden voor de toekomstige online koppeling tussen D-HYDRO en de ZSF.
- F. Voor de grootste industriële lozingen wordt aanbevolen om een near-field analyse te maken. Met name rond de Velserskom is de verwachting dat dit de validatie van het model met de temperatuur metingen verder gaat verbeteren. Hiervoor is meer informatie nodig over de in- en uitlaatconstructie, lokale diepte etc. Met deze aanpassing wordt het model ook geschikt voor vergunningverlening en handhaving (inclusief Emissie Immissie Toets).
- G. In de toekomstige modelschematisatie is het mogelijk nodig de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden te actualiseren met Baseline en verder te valideren met metingen.

7.3.2 Vergunningverlening

- A. Het huidige model is opgezet met randvoorwaarden voor 2023. Dit zijn zoveel mogelijk realistische randvoorwaarden voor laterale instromen, de zoutlast via de schutsluizen, meteorologie en industriële lozingen. Voor vergunningverlening moet in de meeste gevallen gekeken worden naar de kritieke condities en de criteria in de regelgeving. Aanbevolen wordt om ook een modelschematisatie op te zetten met schematische randvoorwaarden voor bijvoorbeeld lage instroomdebieten, vergunde lozingen, toekomstig gebruik van de schutsluizen bij IJmuiden en/of extremere meteorologische condities.
- B. Voor vergunningsverlening voor nieuwe lozingen wordt aanbevolen om alle nabij gelegen industriële lozingen te evalueren met een near-field analyse. Dit geeft een nauwkeuriger beeld van de te verwachten temperaturen rond de loospunten en mogelijke cumulatieve effecten van meerdere lozingen.

7.3.3 Operationeel inzetten van het model

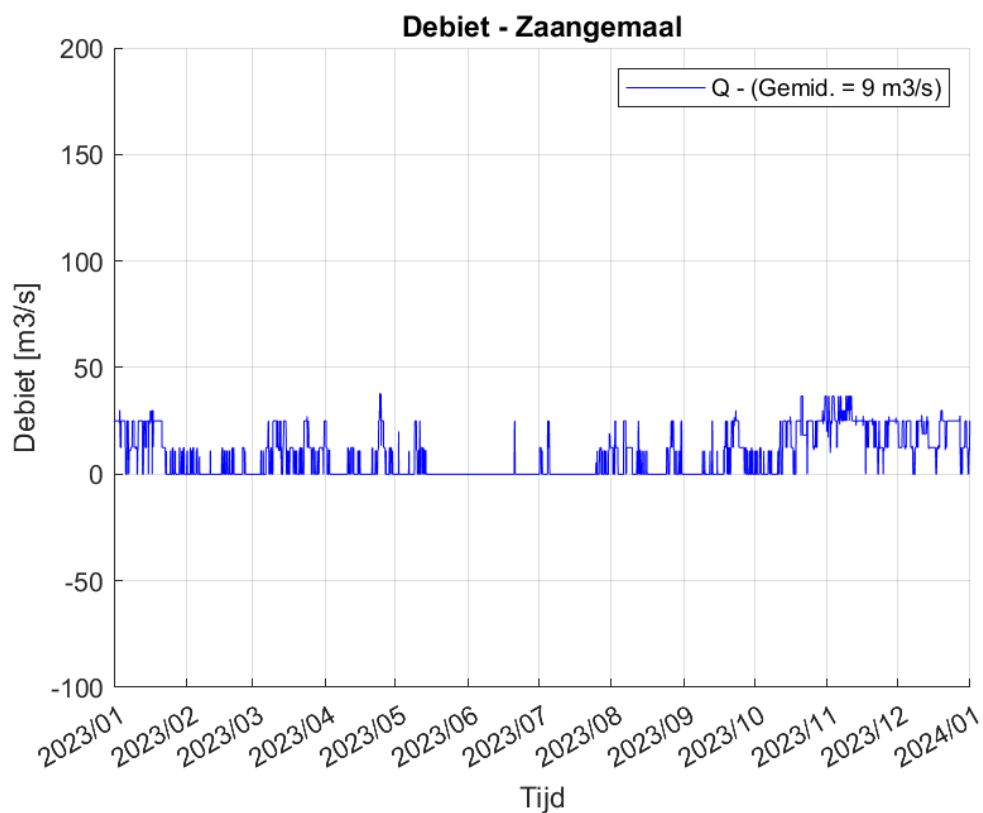
- A. Voor het operationeel inzetten van het model moet er eerst inzicht komen in de toekomstige doeleinden en wensen van RWS voor het operationele model.
- B. Voor operationeel inzetten van het model moeten alle randvoorwaarden automatisch gegenereerd en gecontroleerd worden op basis van real-time beschikbare data. Data structuren moeten dan ook geformaliseerd worden. Generieke data structuren kan ook helpen toekomstige modelschematisaties sneller op te zetten.

- A. Voor kennisontwikkeling met deze modelschematisatie is het van belang dat uiteenlopende processen fysisch correct gemodelleerd kunnen worden. Voor sommige aspecten is dynamisch koppelen van D-HYDRO met andere software en/of modules de meest pragmatische aanpak. Voorbeelden zijn de zoutlast (ZSF), waterkwaliteit (WAQ) en industriële lozingen (C-SUMO). Het is aanbevolen om deze koppelingen verder te ontwikkelen en z.s.m. te toetsen in de praktijk via relevante projecten.

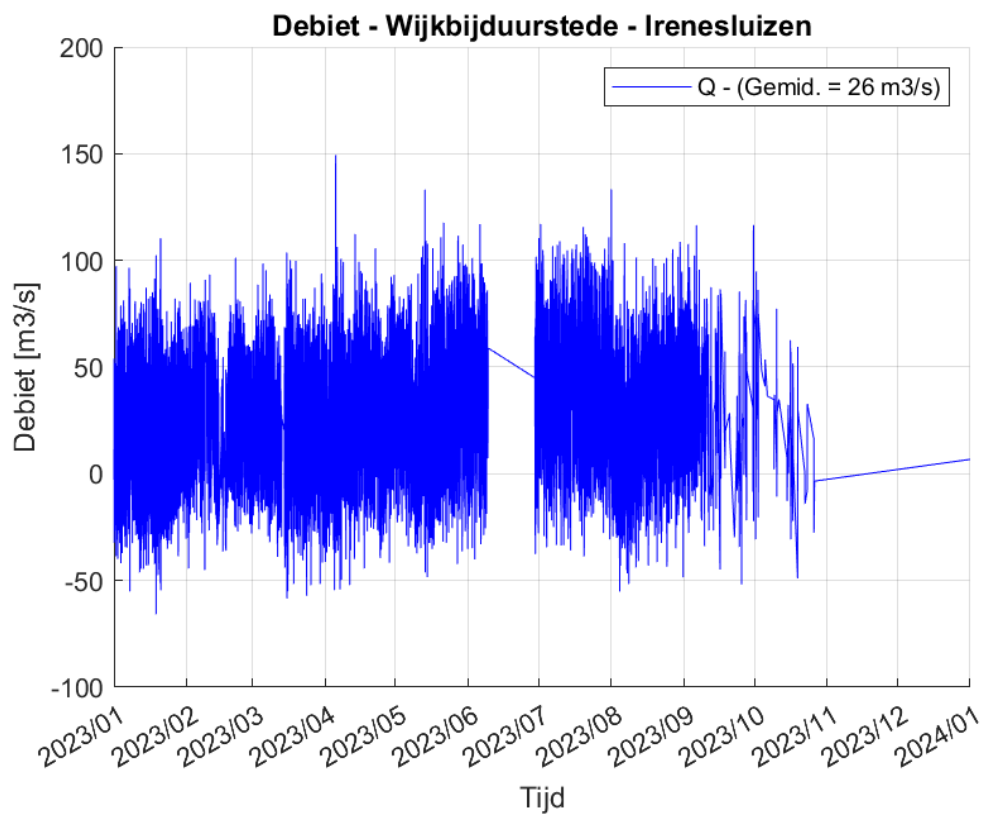
8 Referenties

- Spruyt, A, Minns, T., Zijl, F., Genseberger, M., Yossef, M., van der Kaaij, T., de Goede, E. (2017): Ontwikkeling zesde-generatie modellen met D-HYDRO. Generieke technische en functionele specificaties. Deltares rapport 11200569-000-ZWS-0028.
- 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., 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.
- Verbruggen, W., van der Baan, J. (2022). Ontwikkeling zesde-generatie 3D Noordzeekanaal Amsterdam-Rijnkanaal model: Aanvullende analyses 2022: Z-sigma en Selectieve Onttrekking IJmuiden. Deltares Rapport 11208053-009-ZWS-0005, December 2022.

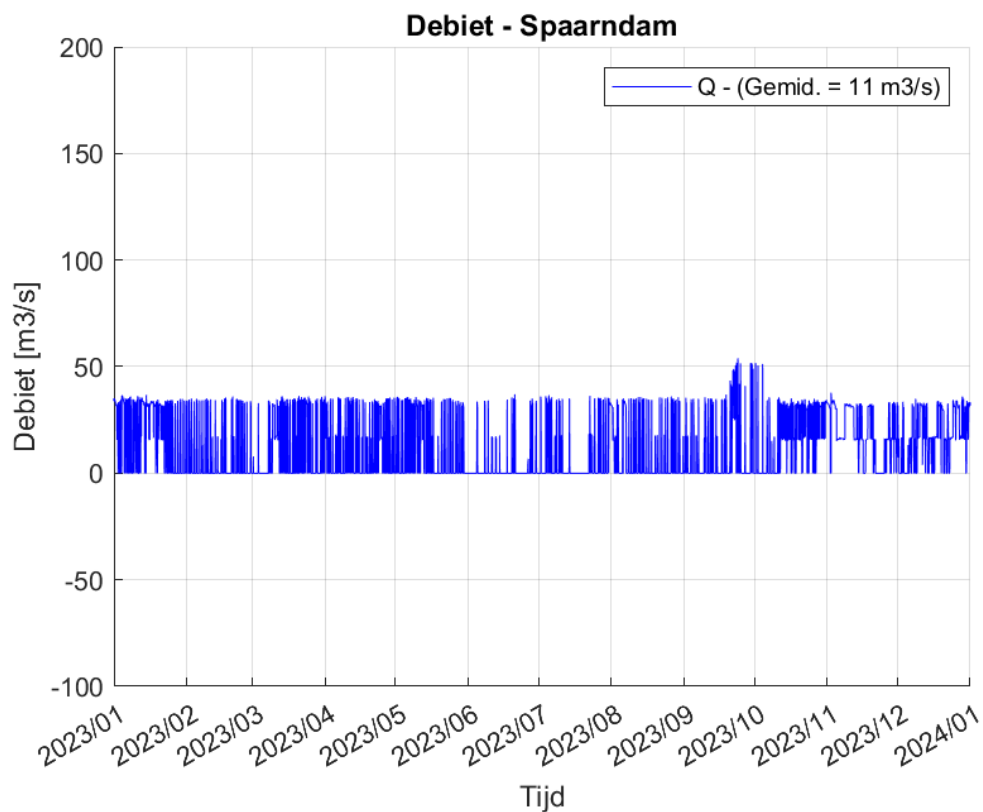
A Debiet metingen



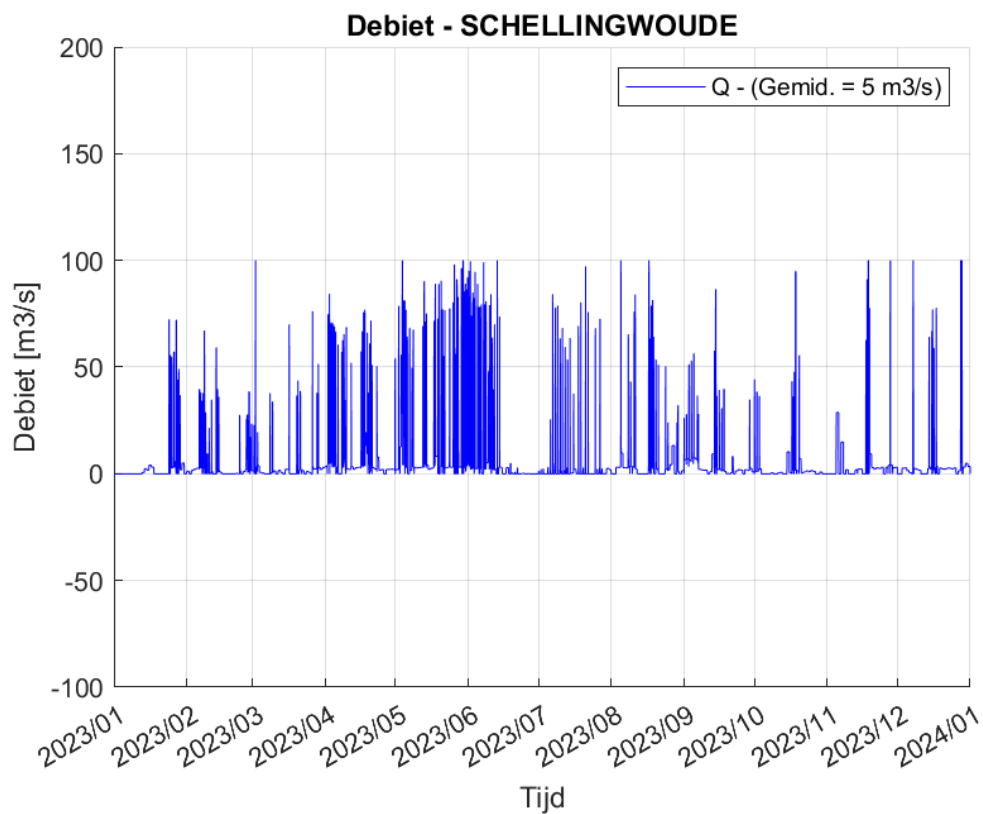
Figuur A-1 Debiet data Zaangemaal



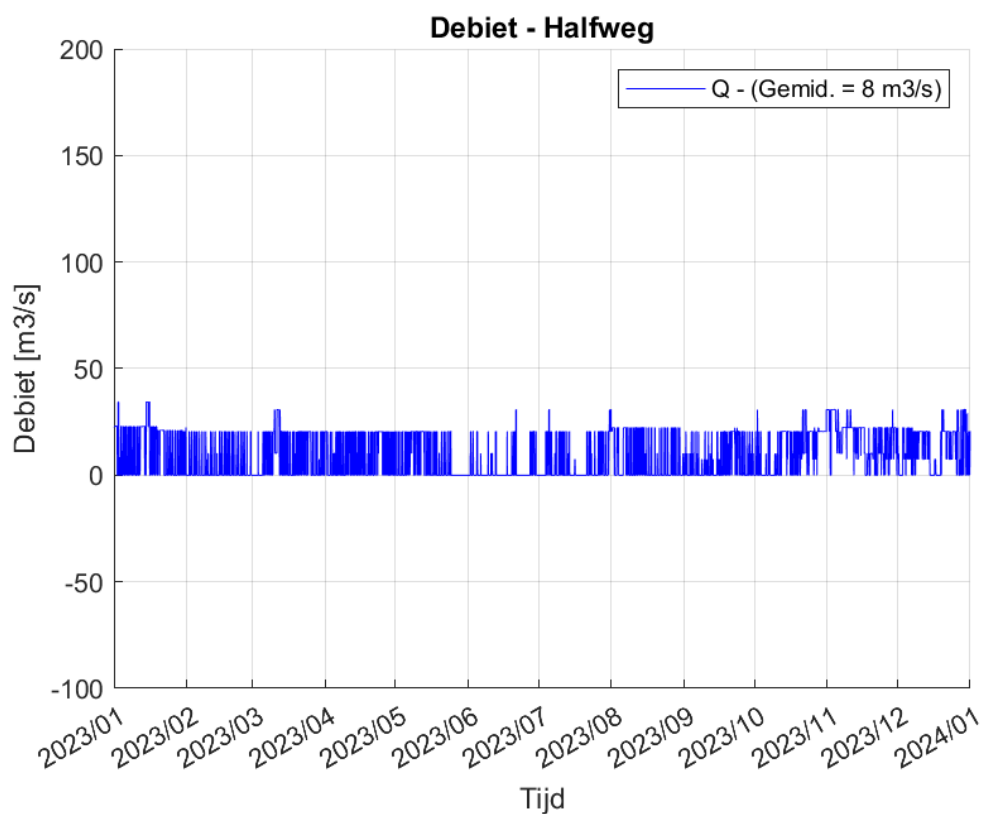
Figuur A-2 Debiet data Wijkbijduurstede / Irenesluizen



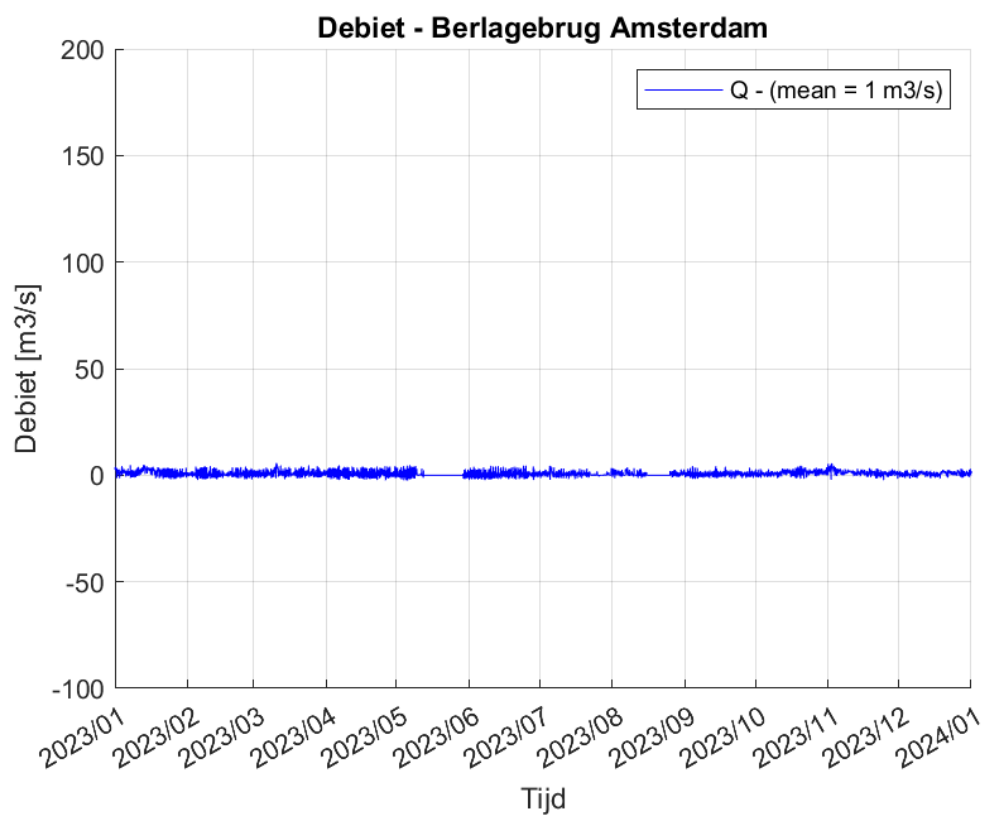
Figuur A-3 Debiet data Spaarndam



Figuur A-4 Debiet data Schellingwoude



Figuur A-5 Debiet data Halfweg

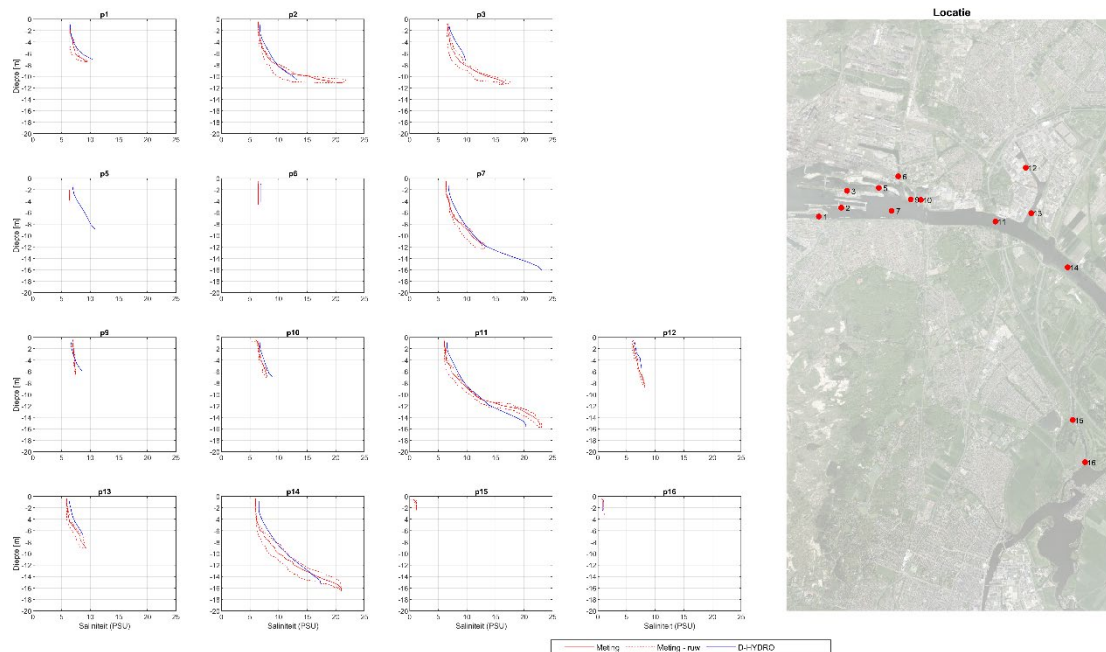


Figuur A-6 Debiet data Berlagebrug Amsterdam

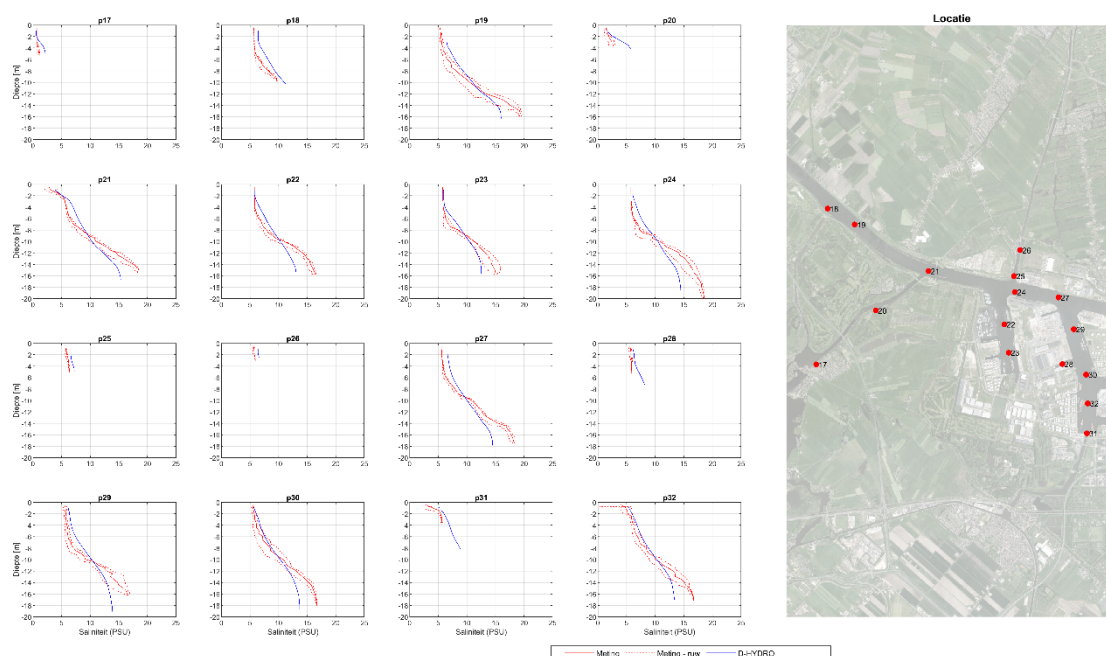
B Validatie 100-punten metingen

B.1 Zoutgehalte

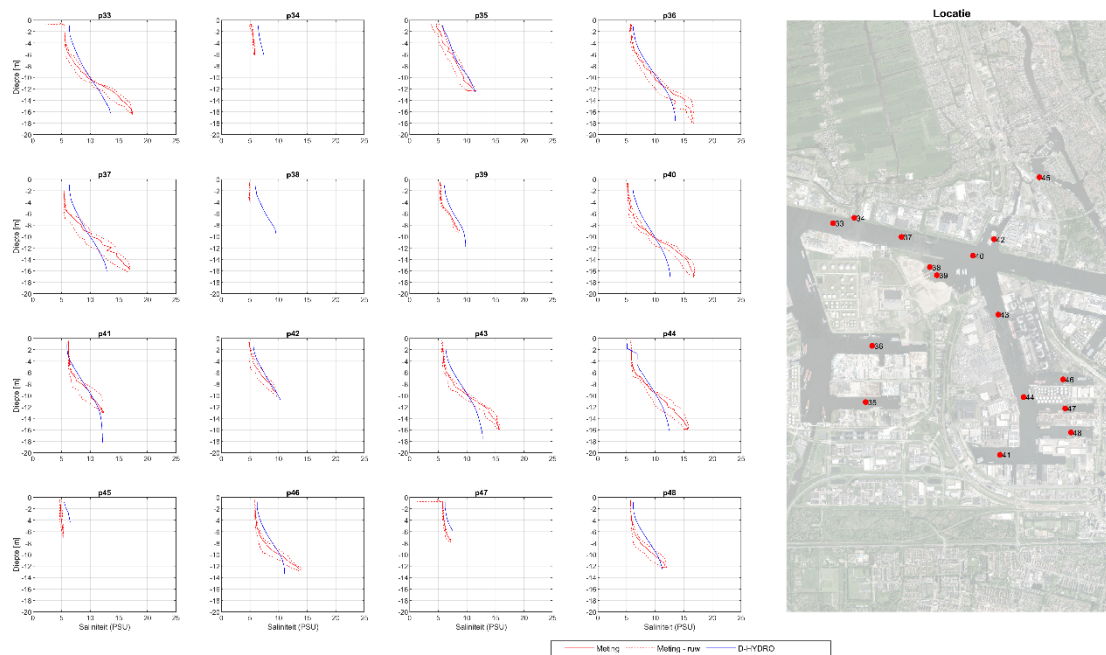
B.1.1 Mei 2023



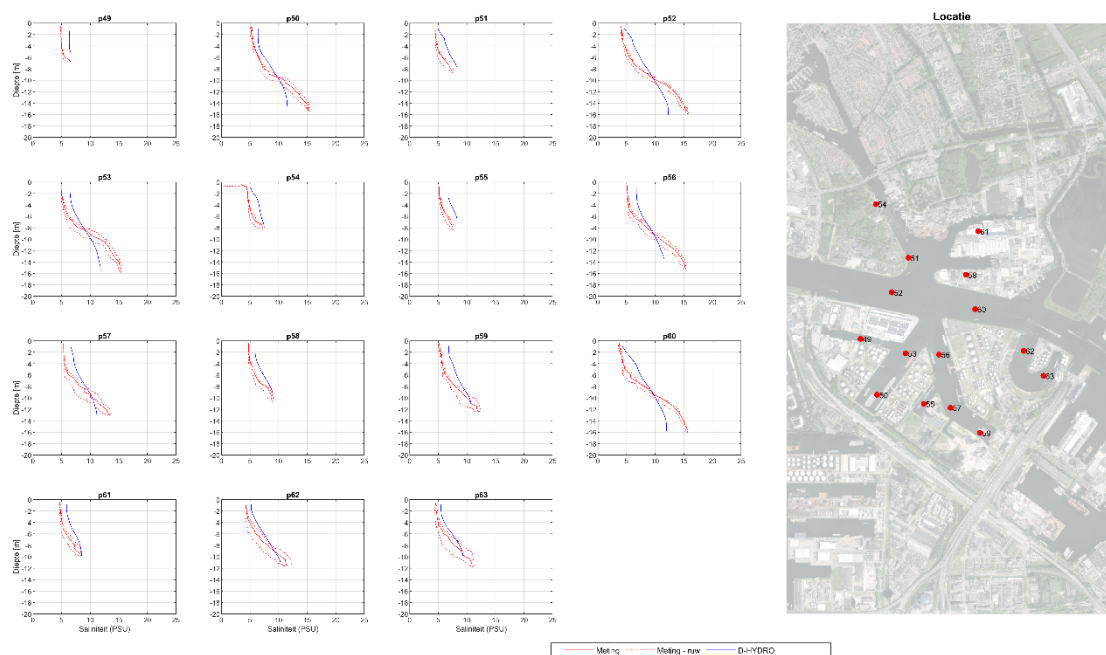
Figuur B-1 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK, deel 1.



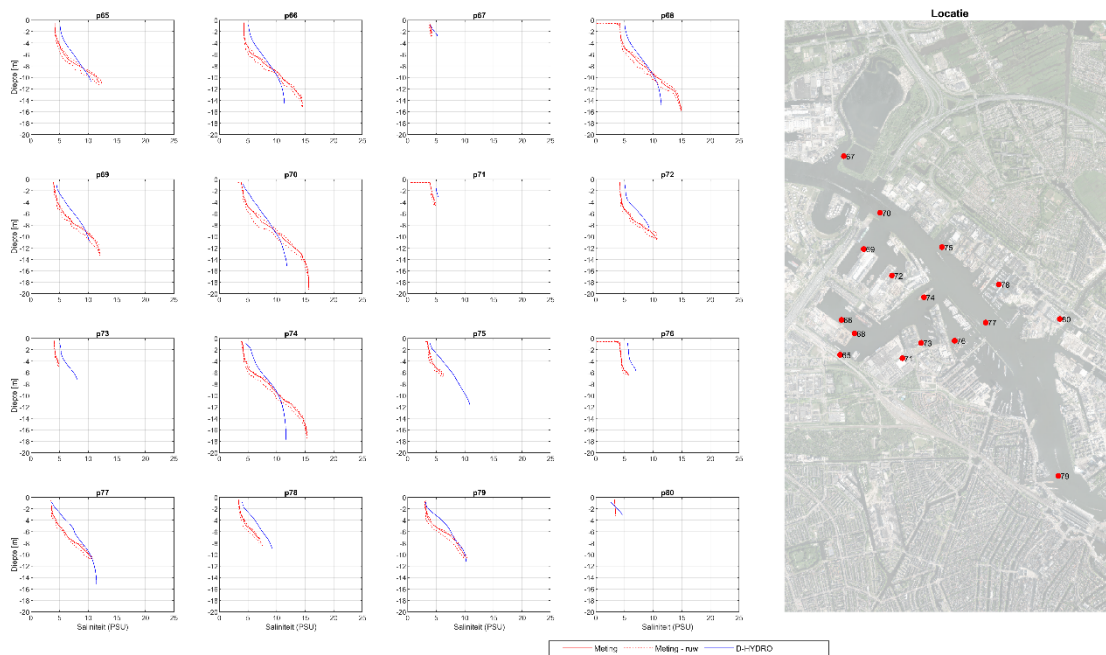
Figuur B-2 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK, deel 2.



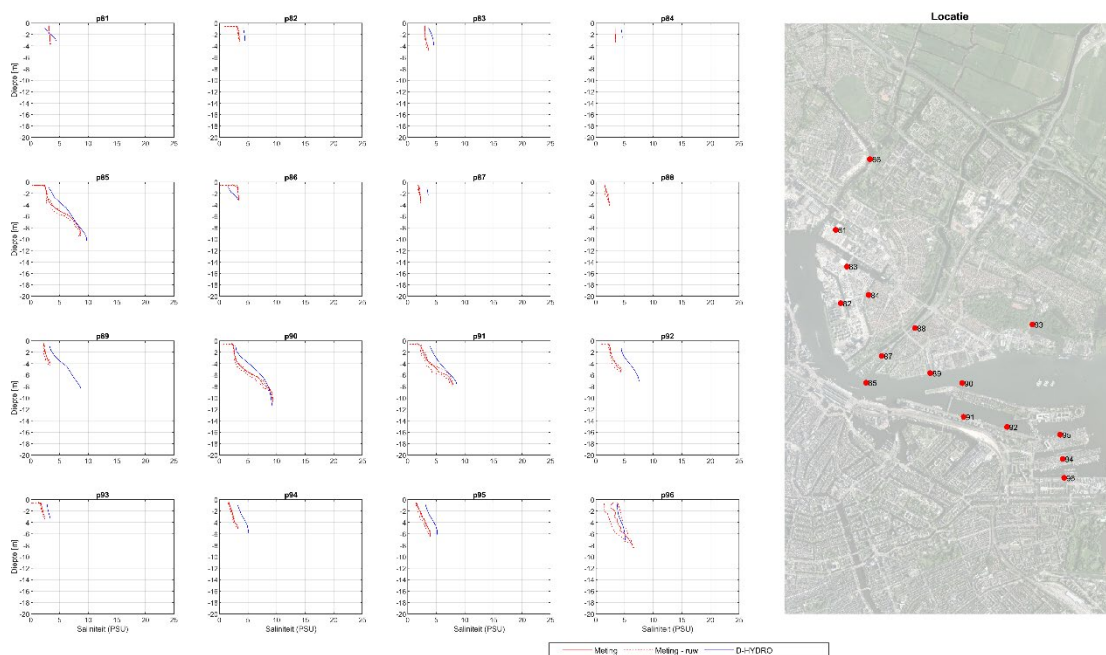
Figuur B-3 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK, deel 3.



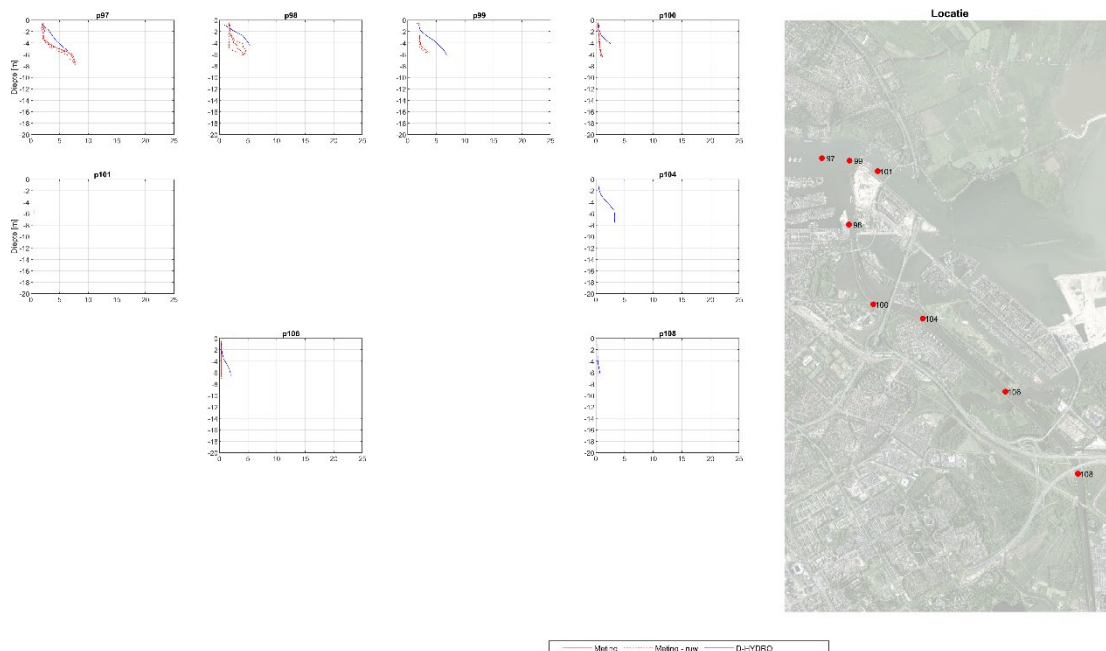
Figuur B-4 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK, deel 4.



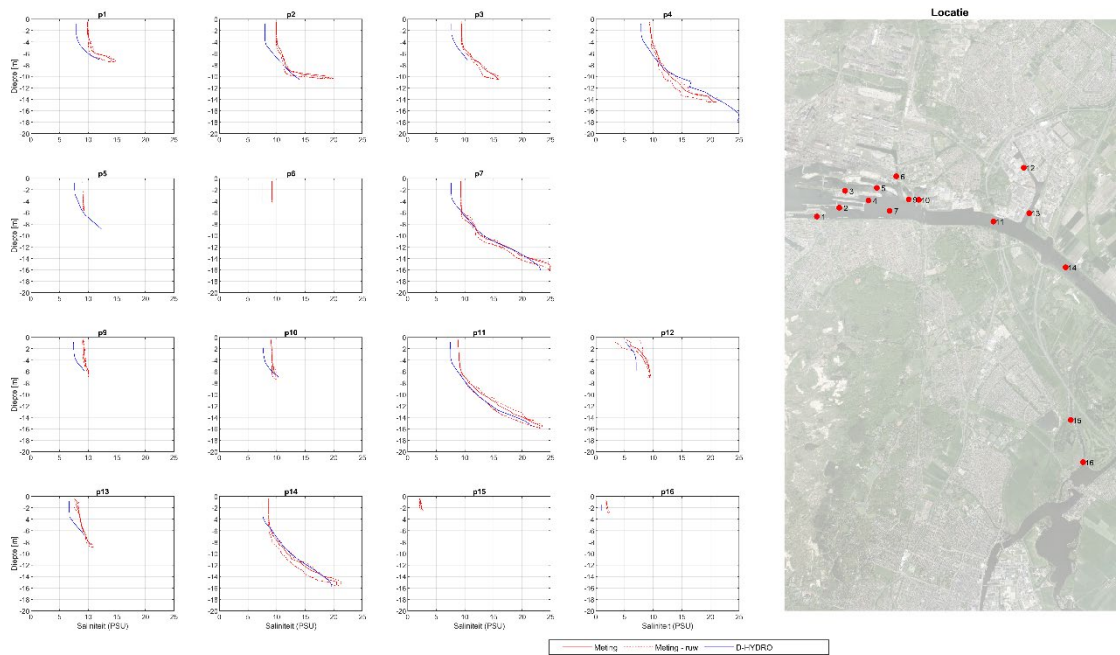
Figuur B-5 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK, deel 5.



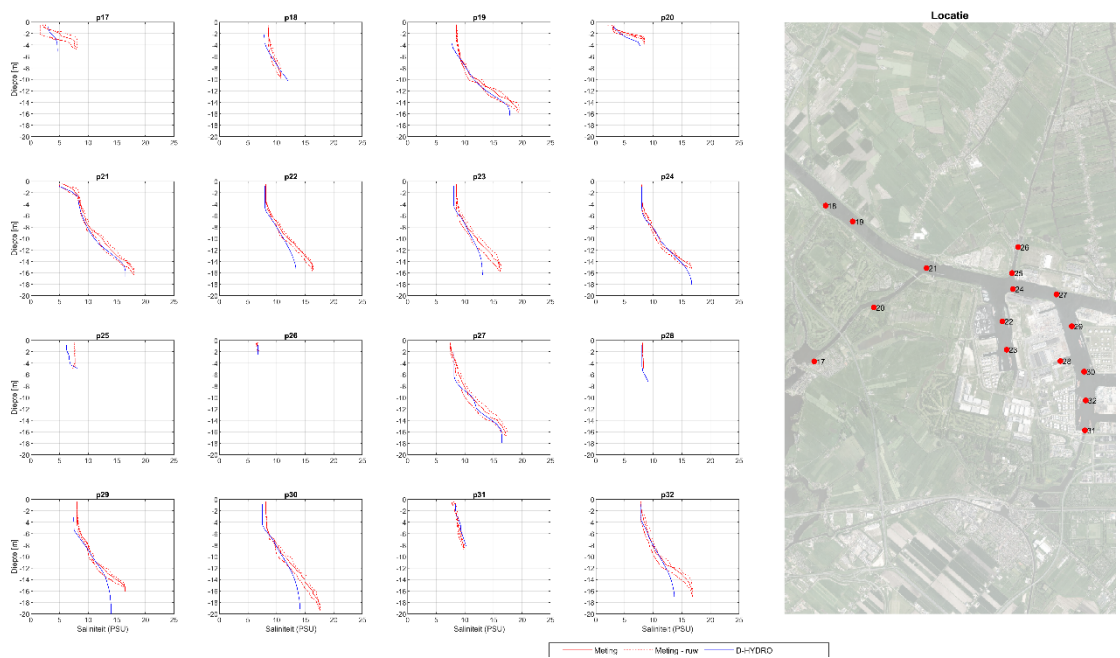
Figuur B-6 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK, deel 6.



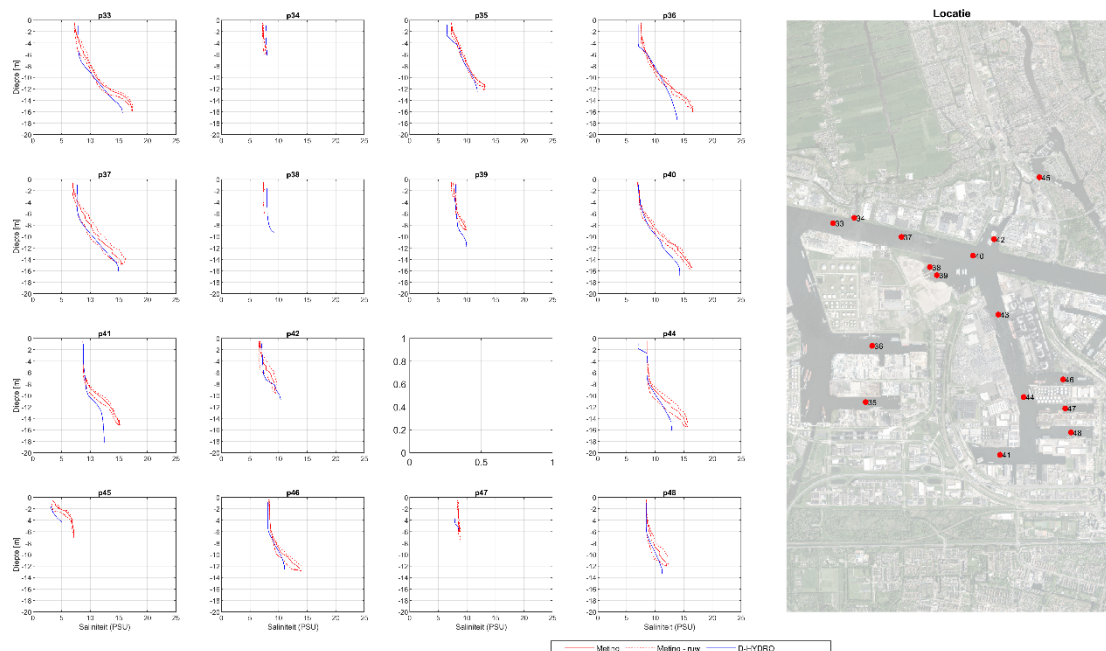
Figuur B-7 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK, deel 7.



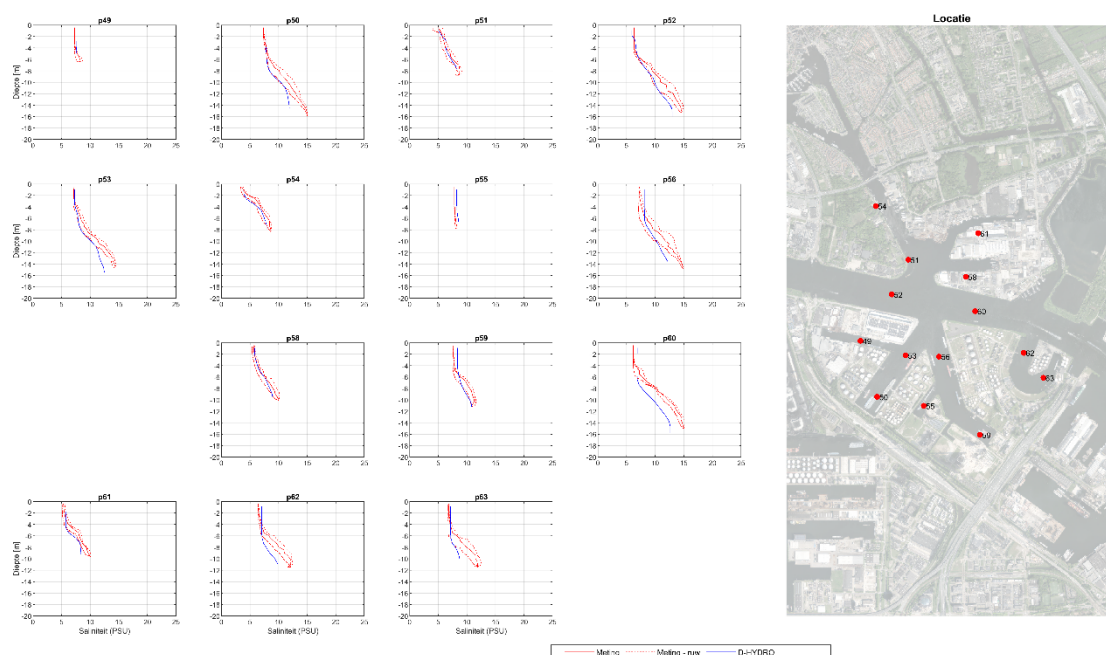
Figuur B-8 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK, deel 1.



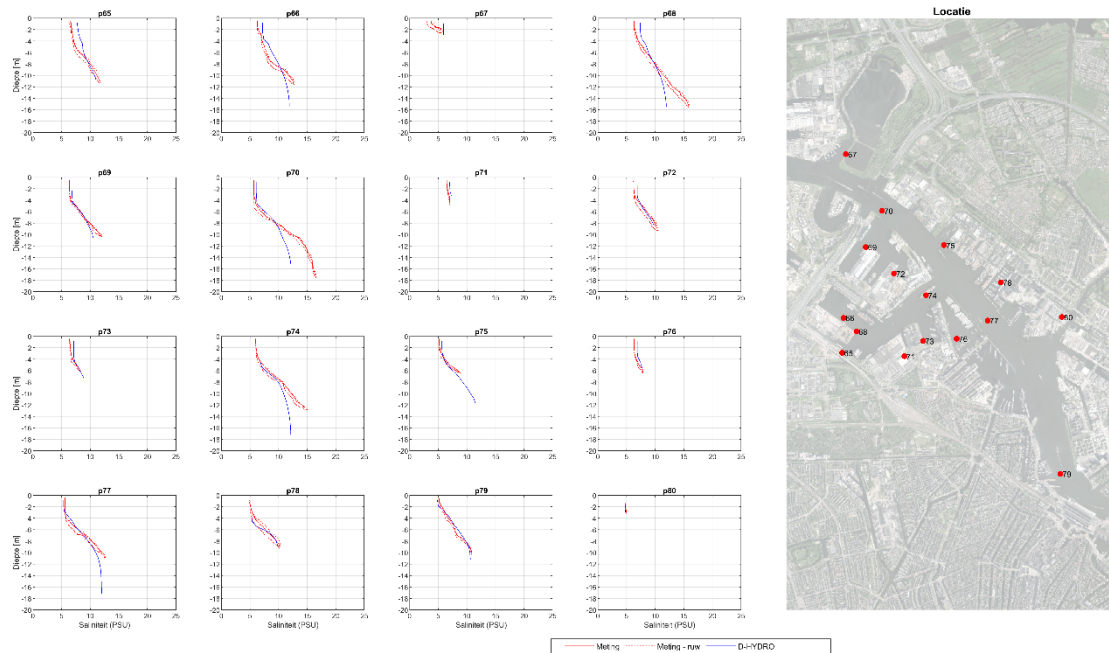
Figuur B-9 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK, deel 2.



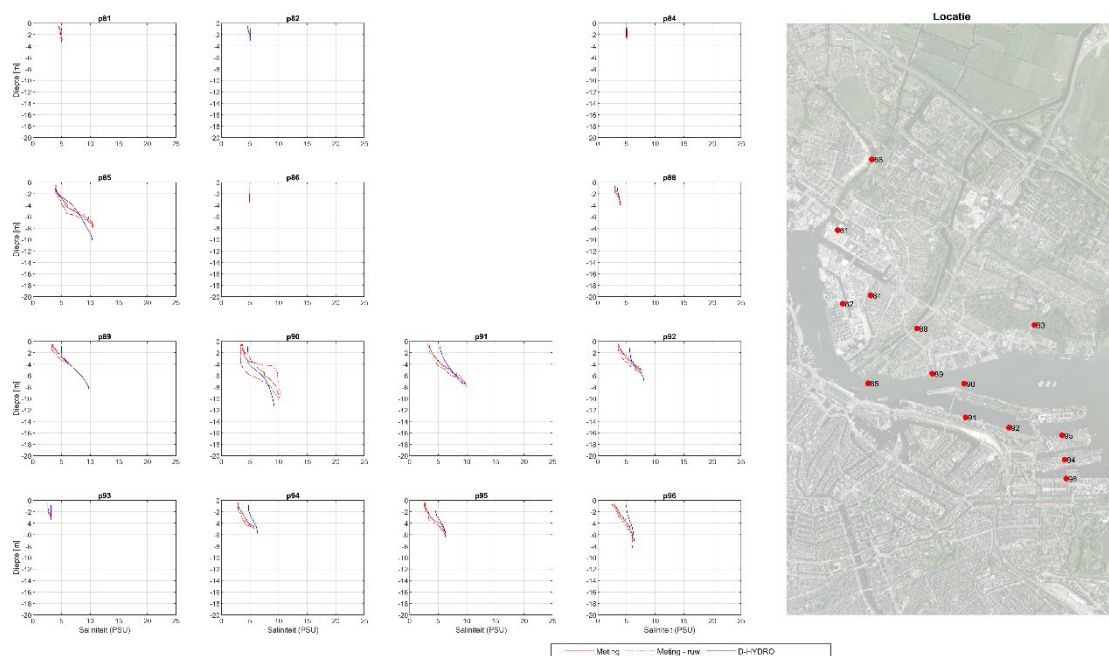
Figuur B-10 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK, deel 3.



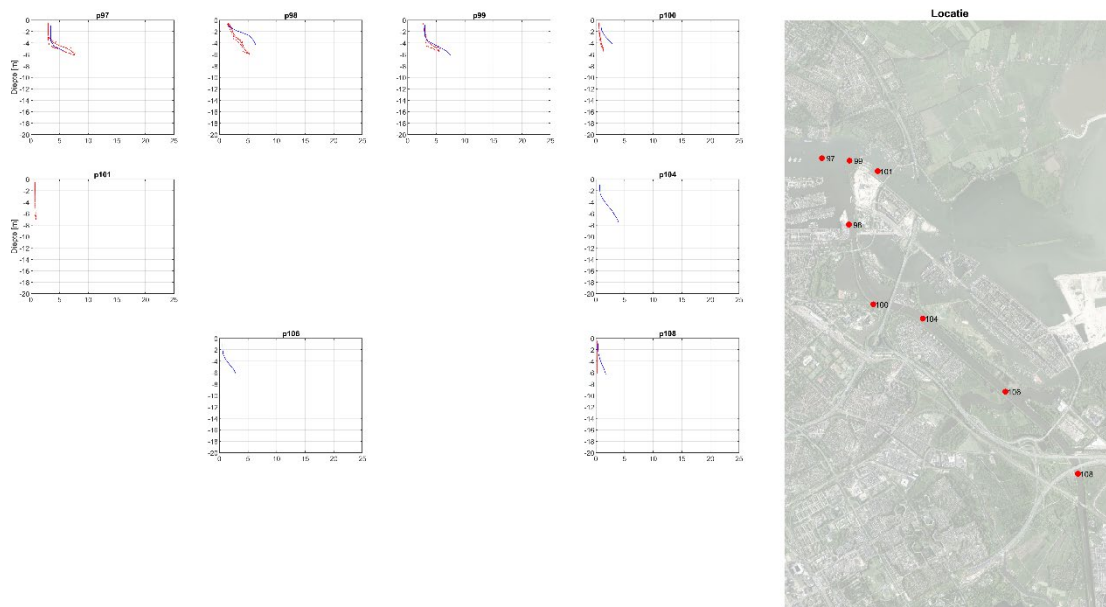
Figuur B-11 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK, deel 4.



Figuur B-12 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK, deel 5.



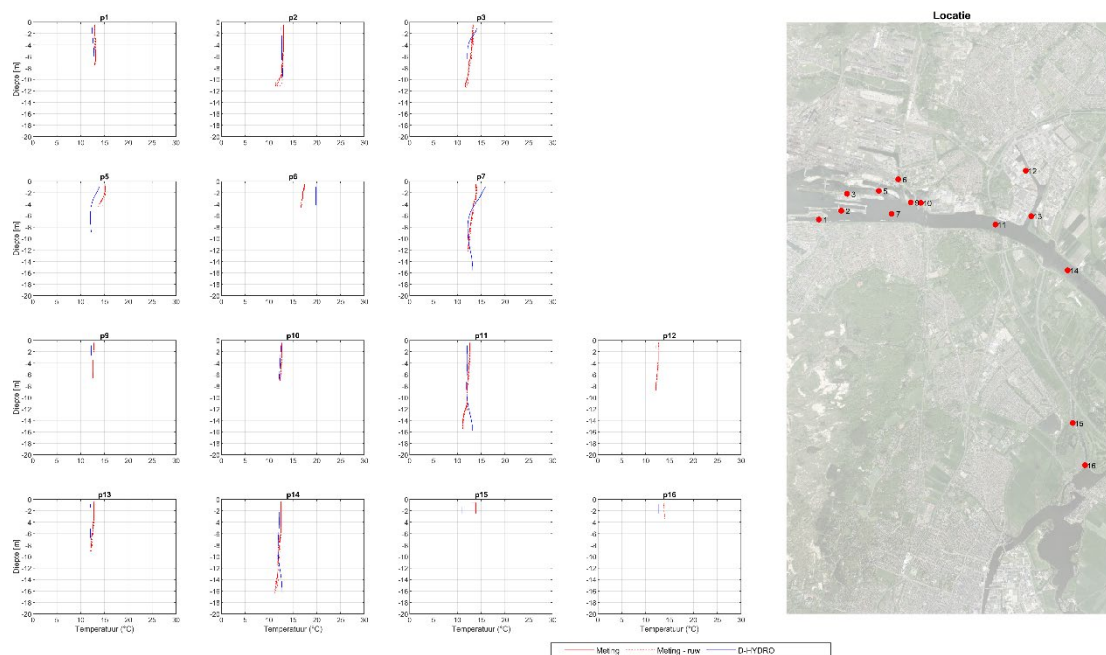
Figuur B-13 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK, deel 6.



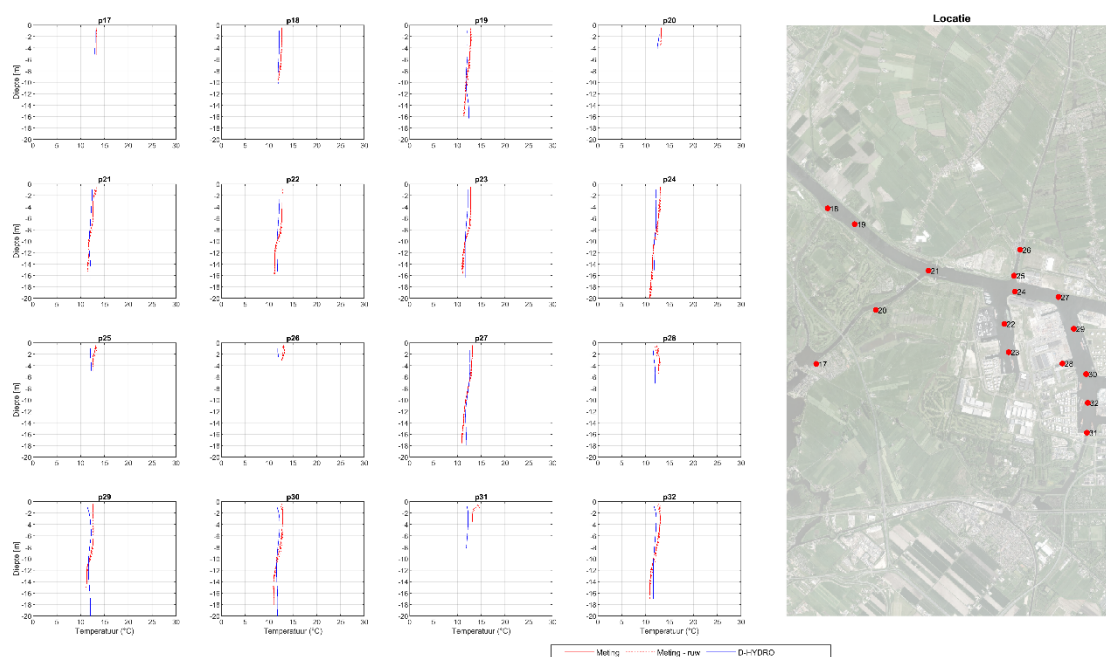
Figuur B-14 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor het zoutgehalte in het NZK/ARK, deel 7.

B.2 Temperatuur

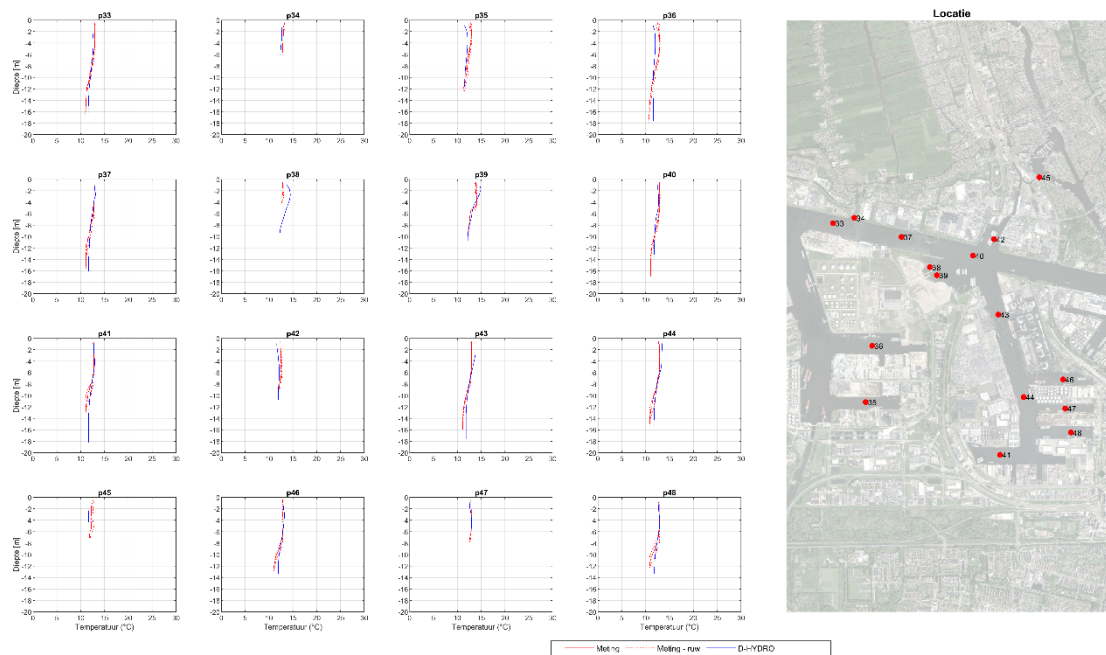
B.2.1 Mei 2023



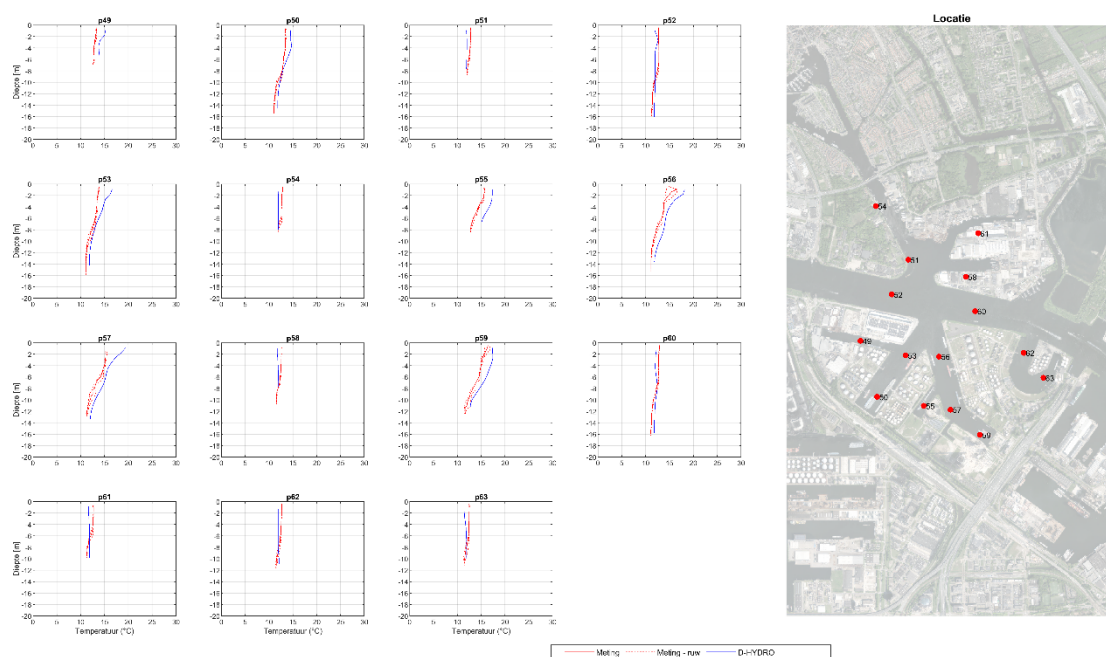
Figuur B-15 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK, deel 1.



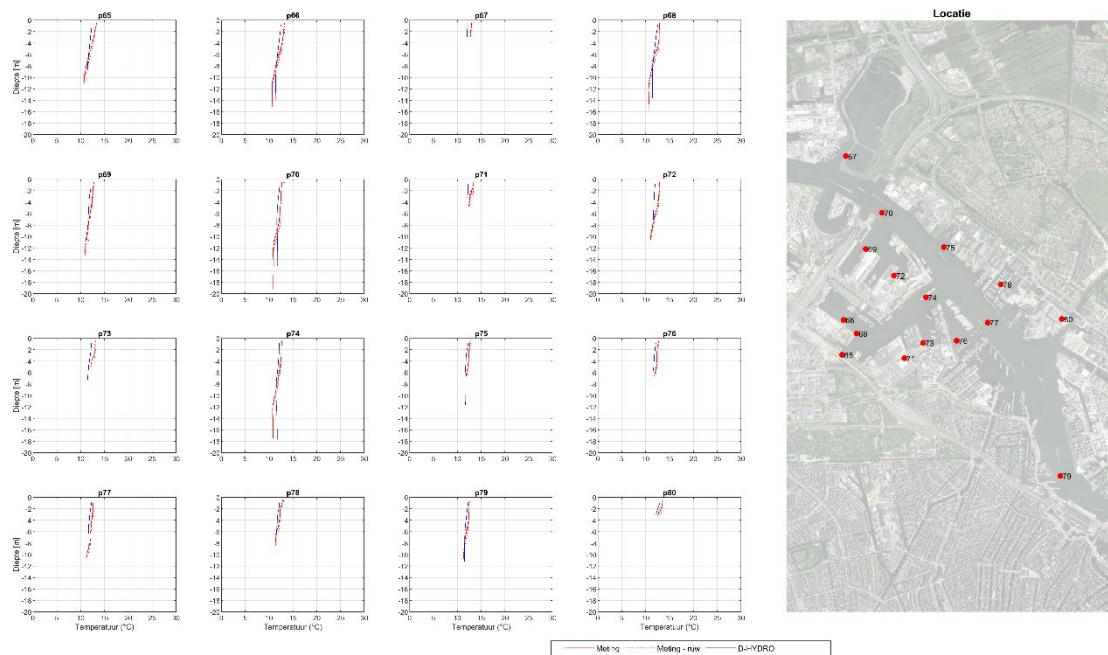
Figuur B-16 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK, deel 2.



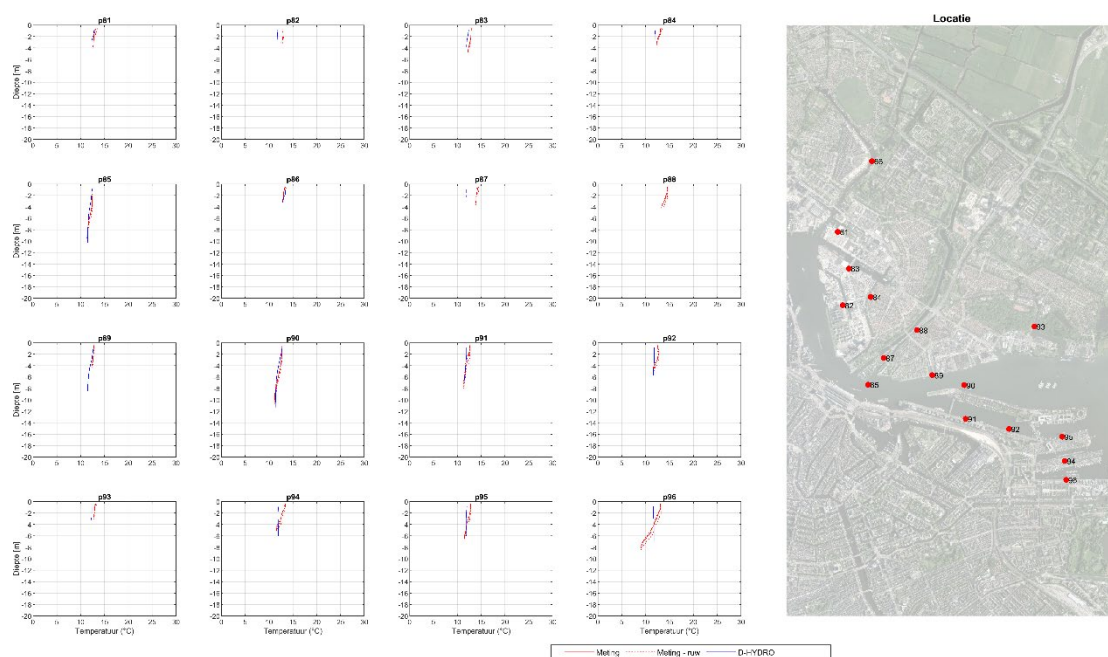
Figuur B-17 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK, deel 3.



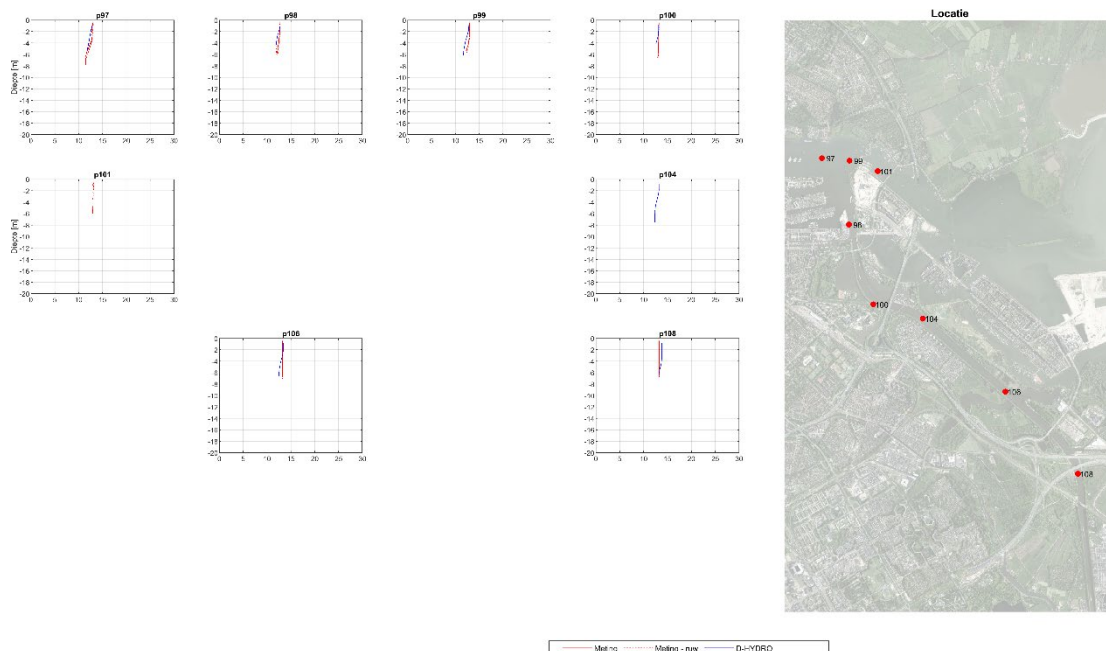
Figuur B-18 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK, deel 4.



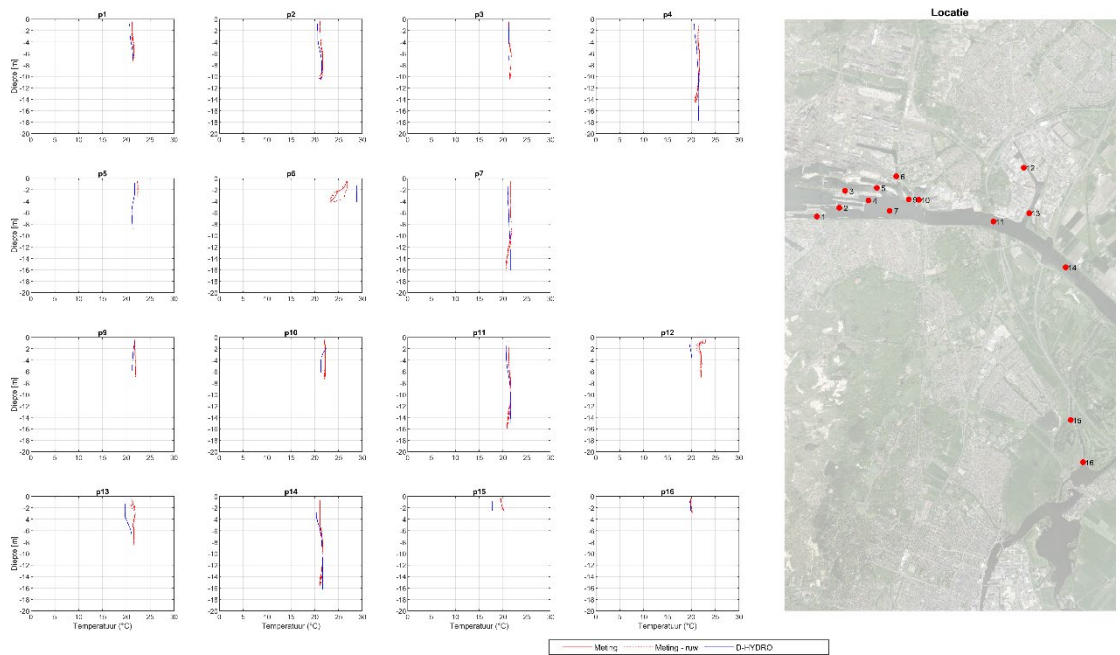
Figuur B-19 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK, deel 5.



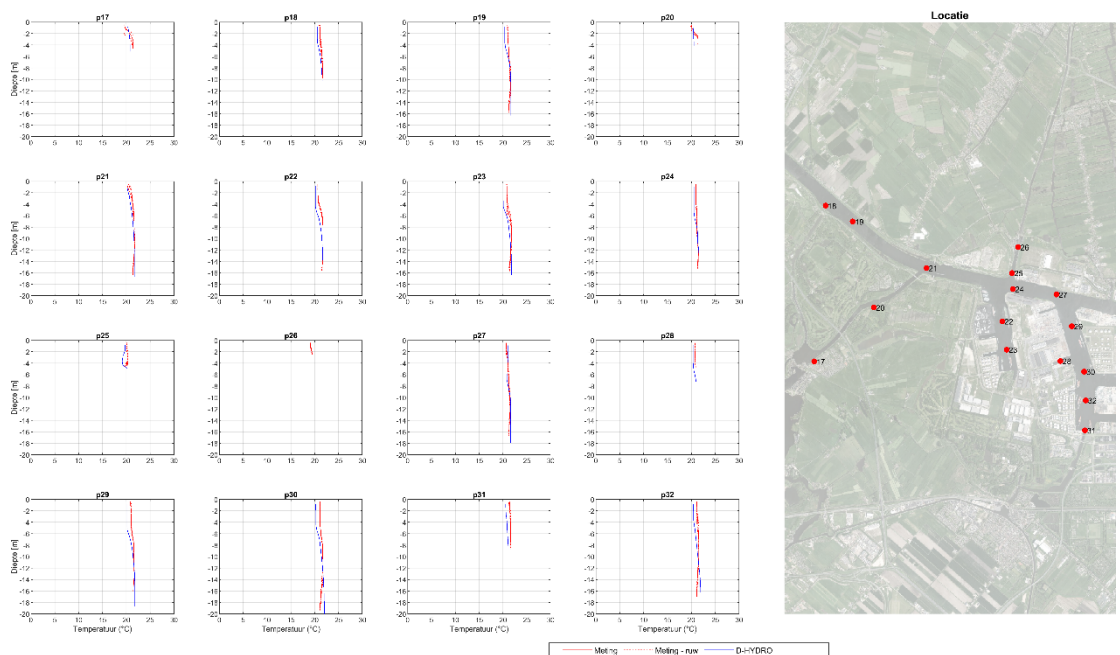
Figuur B-20 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK, deel 6.



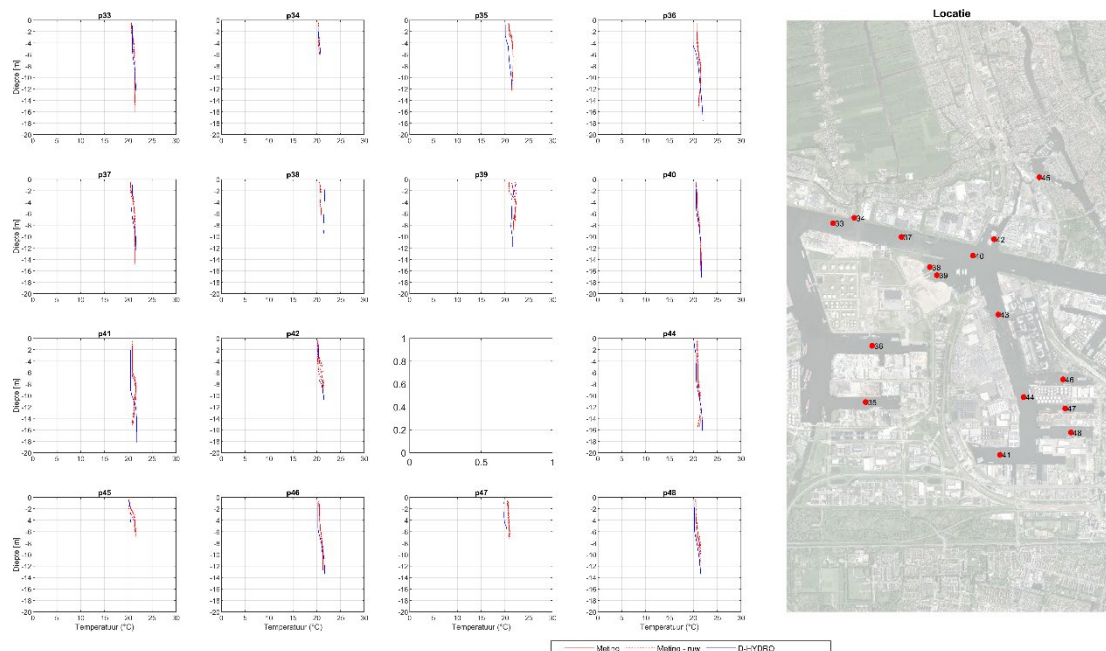
Figuur B-21 Vergelijking 100-punten meting 1-3 Mei 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK, deel 7.



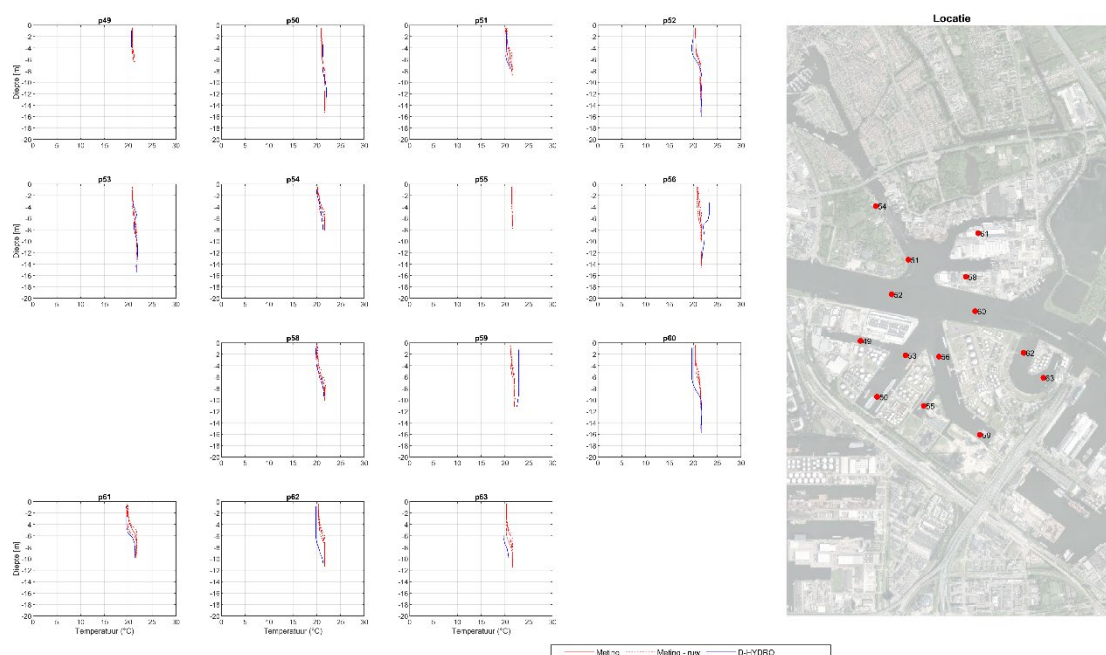
Figuur B-22 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK, deel 1.



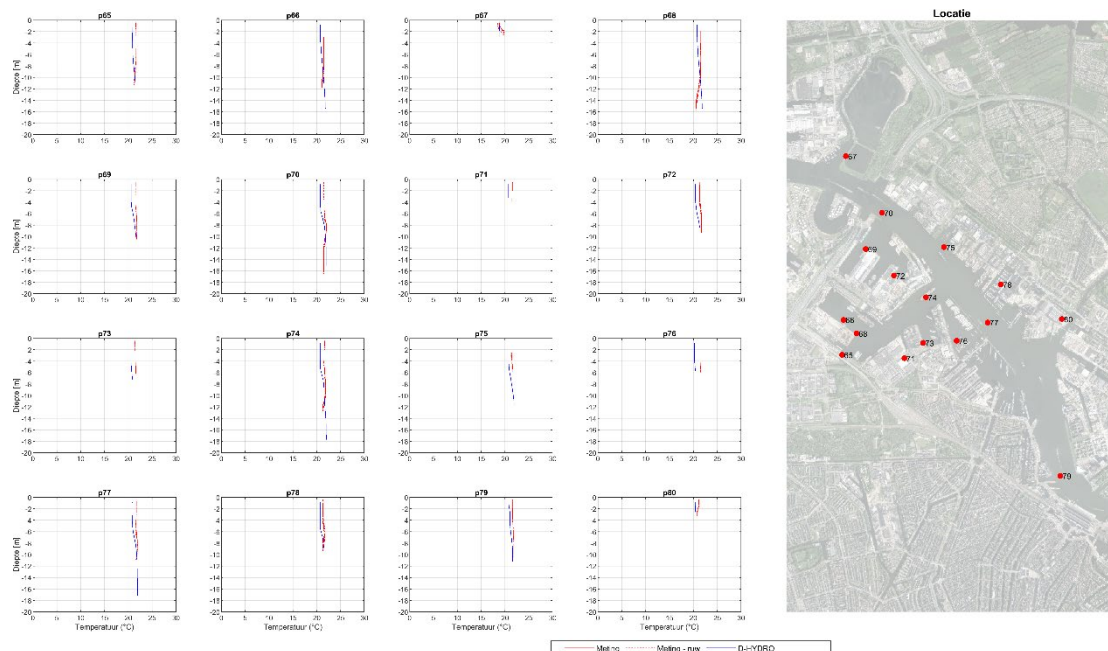
Figuur B-23 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK, deel 2.



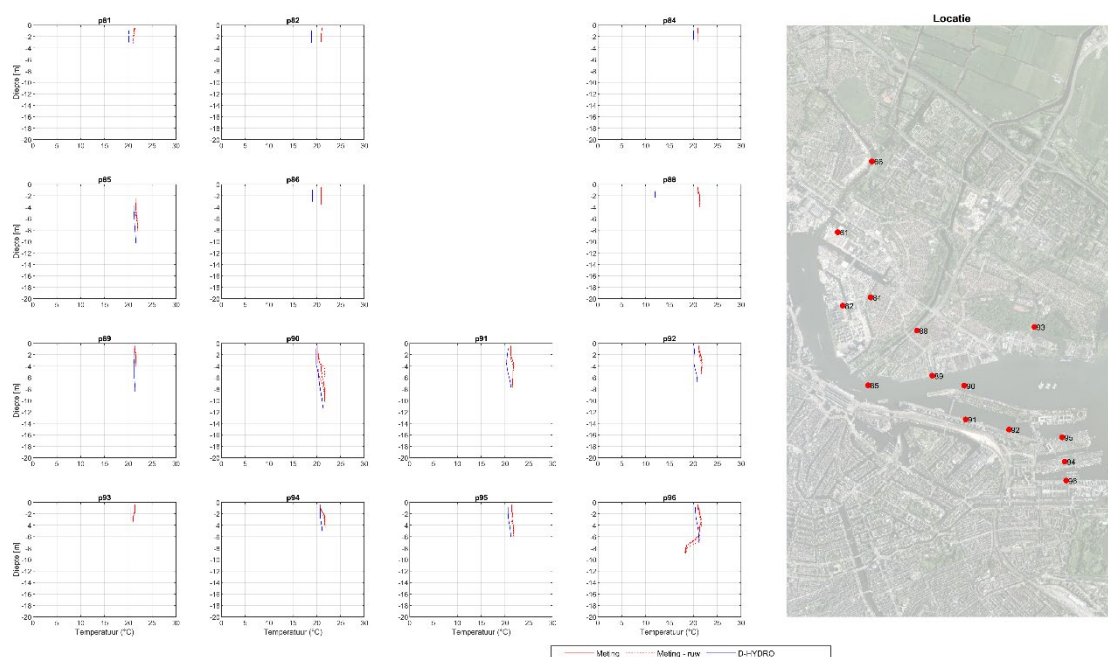
Figuur B-24 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK, deel 3.



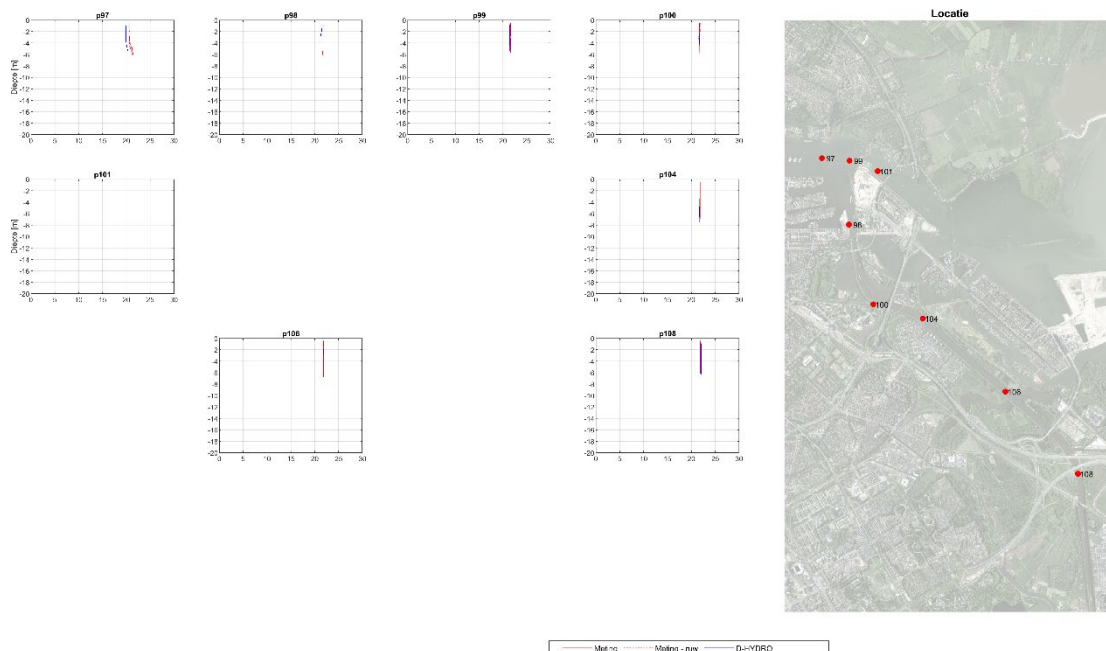
Figuur B-25 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK, deel 4.



Figuur B-26 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK, deel 5.



Figuur B-27 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK, deel 6.



Figuur B-28 Vergelijking 100-punten meting 18-20 September 2023 en modelresultaten voor de temperatuur in het NZK/ARK, deel 7.

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