

Ontwikkeling zesde-generatie 3D IJsselmeer model

Modelbouw, validatie



Ontwikkeling zesde-generatie 3D IJsselmeer model

Modelbouw, validatie

Auteur(s)

Wilbert Verbruggen

Maria Georgiou

Noor ten Harsen van der Beek

Arnout Bijlsma

Ontwikkeling zesde-generatie 3D IJsselmeer model

Modelbouw, validatie

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Martin Scholten, Nathalie van Veen, Yann Friocourt en Inge van Tongeren
Referenties	Werkplan 11209233-008-ZWS-0001_v0.3 d.d. 30 oktober 2023
Trefwoorden	IJsselmeer, D-HYDRO, D-FLOW FM, zoutindringing, schutsluizen, zoutlek, 3D, validatie

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	19-12-2024
Projectnummer	11210333-007
Document ID	11210333-007-ZWS-0002
Pagina's	139
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Wilbert Verbruggen Maria Georgiou Noor Ten Harmsen van der Beek Arnout Bijlsma	

Gebruik van deze tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1.0	Wilbert Verbruggen Maria Georgiou Noor Ten Harmsen van der Beek Arnout Bijlsma	Firmijn Zijl	Johan Boon

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de ontwikkeling van de nieuwe zesde-generatie modelschematisatie voor Rijkswaterstaat (RWS) voor de waterbeweging in het watersysteem IJsselmeer op basis van het simulatiesoftwarepakket D-HYDRO Suite. De kern van de D-HYDRO Suite is de D-Flow Flexible Mesh module (D-Flow FM) waarmee eendimensionale (1D), tweedimensionale (2D) en driedimensionale (3D) hydrodynamische simulaties gemaakt kunnen worden op ongestructureerde roosters.

De zesde generatie D-HYDRO 3D modelschematisatie van het IJsselmeer is gebaseerd op het model dat is opgezet voor het droogteseizoen van 2018 (Genseberger et al., 2020 en Genseberger, 2023). Het doel van de huidige studie was de verdere ontwikkeling van het model voor het jaar 2022 en een validatie tegen een uitgebreide set aan metingen. Hiervoor is maximaal gebruikgemaakt van de geometrische data van Baseline, en de best beschikbare informatie over de aan- en afvoeren in het gebied. De waterbalans is sluitend gemaakt door de IJssel afvoer met gemiddeld 15% te verhogen. De zoutlast vanuit de schutsluizen bij Den Oever en Kornwerderzand zijn in het model meegenomen door middel van een offline koppeling met de Zeesluisformulering. Ook de zoutlast ten gevolge van zoutlek via de spuisluisen is meegenomen. Voor al deze zoutlastrandvoorwaarden geldt dat het effect van spuidebieten op het zoutgehalte op zee zo goed als mogelijk is meegenomen. Hiermee is op dit moment de best beschikbare modelbeschrijving voor dit gebied verkregen.

Op basis van de uitgebreide validatie kan gesteld worden dat het model de waterstanden in het model goed weergeeft. Het effect van wind op opzet/afwaai wordt over het algemeen onderschat. Deze onderschatting wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de relatieve lage ruimtelijke en tijd resolutie van de meteorandvoorwaarden (ERA5). Het is aanbevolen om in een vervolgfase gebruik te gaan maken van HARMONIE data.

De watertemperatuur bij de waterspiegel wordt in het hele model goed weergegeven. Alleen op enkele diepere locaties wijkt de gemodelleerde temperatuur af van de metingen. Dit komt echter niet door onnauwkeurigheden in de afhandeling van temperatuur, maar door onnauwkeurigheden in de zoutstratificatie.

Met betrekking tot chloride kan gezegd worden dat het model de processen die de zoutverspreiding beïnvloeden goed weergeeft (zoutlekken, transport door wind, verticale menging, etc.). Gemeten pieken in chloride worden qua timing vaak goed weergegeven in het model. De kwantitatieve weergave van de chlorideconcentratie hangt sterk af van de zoutlekrandvoorwaarden bij de schutsluizen en spuisluisen. De grootste onzekerheden m.b.t. deze randvoorwaarden zijn: zoutgehalte op zee (sterk afhankelijk van spuiregime), exacte deur-open tijden, lekoppervlak bij spuicomplexen. Ondanks deze onzekerheden wordt de zoutdynamiek (verzilting en verzoeting) in de erosiekuilen, binnenhavens en vaargeulen in kwalitatieve zin goed weergegeven. Op sommige locaties (bijvoorbeeld erosiekuil en Binnenhaven Den Oever) geeft het model ook in kwantitatieve zin een zeer goede weergave. Bij Andijk worden de gemeten pieken goed weergegeven in het model. Het model berekent echter ook aanvullende pieken in chloride die in werkelijkheid niet voorkwamen. Deze overschatting komt waarschijnlijk voornamelijk door een overschatting van de zoutlast vanuit Gemaal Lely en Gemaal Grootslag. In een vervolgfase is het dus van belang dat de kwaliteit van deze randvoorwaarden wordt verbeterd. Op basis van een vergelijking van het gemodelleerde en gemeten (op basis van een aantal stationsmetingen) volume gemiddelde chloridegehalte lijkt de systeemdynamica van het model op seizoensschaal correct.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Doel	8
1.3	Toepassing van het model	8
1.4	Gebruikte programmatuur en hardware	10
1.5	Organisatie en bijdragen	10
1.6	Leeswijzer	11
1.7	Terminologie	12
2	Systeembeschrijving	13
3	Beschikbare data	17
3.1	Geometrie in Baseline	17
3.2	Randvoorwaarden en meetgegevens ten behoeve van de validatie	17
4	Modelopzet	20
4.1	Inleiding	20
4.2	Roosterontwerp	20
4.2.1	Horizontale rooster	20
4.2.2	Bodemschematisatie	22
4.2.3	Vismigratierivier	24
4.2.4	Verticale resolutie	25
4.3	Debiet- en zoutrandvoorwaarden en waterbalans	26
4.3.1	Randvoorwaarden schutsluizen	26
4.3.1.1	Zoutrandvoorwaarden ZSF-ZTM	26
4.3.1.2	Waterstanden	28
4.3.1.3	Schutgegevens	29
4.3.1.4	Schematisatie in D-HYDRO model	30
4.3.1.5	Berekende zoutlast	32
4.3.2	Randvoorwaarden lek bij spuisluizen	34
4.3.3	Overige debietrandvoorwaarden	35
4.3.4	Sluitend maken van waterbalans	39
4.4	Overige randvoorwaarden	40
4.4.1	Meteorologische condities	40
4.4.2	Initiële condities	40
5	Validatie	42
5.1	Validatiemethodiek	42
5.2	Validatie waterstand	43
5.2.1	Check op waterbalans	43

5.2.2	Validatie stationsmetingen	44
5.2.3	Validatie windopzet/afwaai	44
5.3	Validatie chloridegehalte	48
5.3.1	Overzicht validatie in alle vaste meetstations.	48
5.3.2	Erosiekuil Kornwerderzand	50
5.3.3	Erosiekuil Den Oever	57
5.3.4	Binnenhaven en vaargeul Kornwerderzand	63
5.3.5	Binnenhaven en vaargeul Den Oever	68
5.3.6	Vaargeul Makkum	75
5.3.7	Geul van de Middelgronden	77
5.3.8	Andijk	81
5.3.9	Overig	89
5.4	Validatie temperatuur	94
6	Discussie	98
6.1	Analyse zoutlek vanuit spuisluisen	98
6.2	Volume gemiddelde chloridegehalte	102
6.3	Randvoorwaarden voor deelmodellen	102
6.4	Aandachtspunten voor modelinvoer en modelinstellingen	104
6.4.1	Schutdata Kornwerderzand en Den Oever	104
6.4.2	Zoutlek vanuit spuisluisen	104
6.4.3	Waterbalans	104
6.4.4	Meteorologische forcering	105
7	Conclusies en aanbevelingen	106
7.1	Conclusies	106
7.1.1	Algemeen	106
7.1.2	Validatie	106
7.2	Evaluatie prestatie model met betrekking tot beoogde toepassingen	111
7.2.1	Het verklaren en voorspellen van chloride concentraties op diverse locaties	111
7.2.2	De effecten van diverse maatregelen in het huidige operationele beheer in te schatten	112
7.2.3	Beoordelen van de effecten van (eventuele) toekomstige systeemingrepen	113
7.3	Aanbevelingen	114
	Referenties	118
A	Overzicht meetdata	119
A.1	Debietmetingen	119
A.2	Chloridemetingen	123
A.3	Temperatuurmetingen	126
A.4	Waterstandsmetingen	129
B	Afleiden zoutgehalte buitenhavens Den Oever en Kornwerderzand	131
B.1	Afleiding van relatie	132
B.2	Validatie van relatie	135

B.3	Afleidn zoutgehalte buitenhaven Den Oever en Kornwerderzand	136
C	Overzicht van verbeterpunten	138

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In Genseberger et al. (2020) is een eerste 3D D-HYDRO model opgeleverd voor het simuleren van zoutverspreiding in het IJsselmeer. Dit als opvolging van het eerdere 3D Delft3D-FLOW model uit Genseberger en Bijlsma (2016) dat gemaakt is in het kader¹ van het beter monitoren, begrijpen en voorspellen van zout in het IJsselmeer, zie Genseberger en Bijlsma (2018). Het 3D D-HYDRO model is gevalideerd voor de droogtesituatie in 2018 toen het IJsselmeer aanzienlijk zouter werd. In 2021 en 2022 is door Deltares een gedetailleerde modeltoepassing verricht rondom de verdieping van de vaargeul naar Kornwerderzand Bijlsma et al. (2022). Hierbij is het oorspronkelijke 3D D-HYDRO model uit Genseberger et al. (2020) verder verbeterd en is het rekenrooster lokaal verfijnd. In Genseberger (2023) zijn een aantal verbeteringen aangebracht (z-sigma laagverdeling, opschonen modelinvoer en verbeteren debietrandvoorwaarden), wat resulteerde in versie dflowfm3d-ijsselmeer-j19_6-v2a die als pre-release versie beschikbaar kwam.

In de huidige studie is de meest recente versie van het IJsselmeer model opgepakt met als doel om een uitgebreide validatie uit te voeren voor het jaar 2022. Het jaar 2022 is gekozen, omdat het om een droog jaar ging met relatief hoge zoutindringing en omdat het beheer conform het meest recente beleid is, waardoor het representatief is voor de huidige situatie. Bovendien is voor dit jaar een uitgebreide set aan metingen beschikbaar. Binnen deze studie zijn de gedetailleerde randvoorwaarden voor afvoeren en zoutlasten opgezet voor het jaar 2022 en zijn de resultaten van de simulatie gevalideerd met deze uitgebreide set metingen.

1.2 Doel

Het doel is de verdere ontwikkeling van een 3D-model van het IJsselmeer in de D-HYDRO Suite. Dit model wordt opgezet voor het jaar 2022 en gevalideerd op historische metingen.

Het model dat is opgezet voor het droogteseizoen van 2018 wordt gebruikt als basis (Genseberger et al., 2020 en Genseberger, 2023).

1.3 Toepassing van het model

Rijkswaterstaat WVl voorziet dat het D-HYDRO IJsselmeer zoutmodel of een gedeelte van dit model in de toekomst gebruikt zullen worden voor diverse vraagstukken, zoals:

- Het verklaren en voorspellen van chloride concentraties op diverse locaties.
 - Verklaren en voorspellen van verandering van chloride concentraties op diverse locaties (bijv. Andijk of inname punten van de Waterschappen). Rijkswaterstaat wordt als beheerder geacht inzicht te hebben in de ontwikkeling van de chloride concentraties op diverse locaties, en de oorzaak van deze veranderingen, zodat tijdig kan worden gewaarschuwd.
 - Beter in kunnen schatten wanneer de concentraties boven de grenswaarden uit komen (en inname gestaakt moet worden) en hoe lang dit gaat duren. In deze rapportage is 'wanneer' op twee manieren geïnterpreteerd: 1) Het beter inschatten onder welke condities, concentraties boven grenswaarden uitkomen, 2) denkend vanuit een operationele voorspelling.

¹ Dit onderwerp is in 2018 geagendeerd in het BPIJ – Deltaprogramma IJsselmeergebied.

- Beter in kunnen schatten wat individuele bronnen (spuisluizen, schutsluizen en andere punt- en diffuse bronnen) bijdragen aan de verhoging van de chloride concentratie op diverse locaties zodat maatregelen specifiek genomen kunnen worden.
 - Vb. Indien de hogere pieken bij Andijk bijv. met name worden veroorzaakt door de zoutlast bij Den Oever, zijn schutbeperkingen den Oever wellicht effectievere maatregel dan schutbeperkingen Kornwerderzand.
 - Beter in kunnen schatten wanneer verversing plaatsvindt.
 - Beter in kunnen schatten wat externe factoren zoals wind betekenen voor zoutverspreiding, zodat hier in het handelingsperspectief rekening mee gehouden kan worden.
- De effecten van diverse maatregelen in het huidige operationele beheer in te schatten.
 - Optimaliseren van het spuiregime voor zoutverwijdering in een droge periode.
 - Frequentie van spuien.
 - Optimaal debiet bij het spuien.
 - Spuiverdeling tussen de spuicomplexen (den Oever en Kornwerderzand).
 - Optimaal spuiregime rekening houdend met wind. Handelingsperspectief voor, tijdens en na menging.
 - Minimaliseren van zoutindringing bij schut- en spuisluizen.
 - Deur opentijden.
 - Bellenschermen.
 - Doorspoeldebiet in kolk.
 - Het al dan niet toepassen van visvriendelijk spuisluisbeheer in de zomerperiode.
 - Pompen op de zouthevel.
- Beoordelen van de effecten van (eventuele) toekomstige systeemingenrepen, maatregelen of veranderingen in het systeem.
 - Veranderingen in bodemgeometrie (bv vaargeul, aanleg vismigratierivier, eventueel bijdrage aan nieuw zandwinbeleid, windparken).
 - Veranderingen in gebied die effect hebben op menging door wind (bv aanleg windparken).
 - Effecten van verandering in kunstwerken, o.a.:
 - Pompen bij den Oever.
 - Nieuwe zouthevels.
 - Vismigratierivier.
 - Nieuwe schutsluis.
 - Effecten van een eventuele dynamische zoet-zout overgang bij Den Oever.
 - Verandering van lozingen waterschappen.
 - Effecten van klimaatverandering (meteorologie + zeespiegelstijging).
 - Effect van verminderde waterbeschikbaarheid IJsselmeer.
 - Klimaatbuffer PWN.

Naast deze toepassingen m.b.t. chloride voorziet Rijkswaterstaat ook dat het IJsselmeer D-HYDRO model toegepast zal worden voor diverse onderzoeken m.b.t. waterkwaliteit. Omdat deze validatie ten eerste is opgezet is vanuit verziltingsvraagstukken, gaan we hier nu verder niet op in.

Afhankelijk van het vraagstuk waarvoor het model wordt gebruikt zijn een aantal parameters relevant en interessant. Deze parameters zullen zoveel als mogelijk aan de orde komen in de modelvalidatie:

- Waterstanden.
 - Gemiddeld (meerpeil) in relatie met waterbalans.
 - Opzet en afwaai (i.v.m. waterverplaatsing en stroming in het meer).

- Wind en afvoer gedreven stroming.
- Debieten op sleutellocaties (Waterbalans).
- De chloride concentratie bij het drinkwaterinnamepunt Andijk.
 - Jaargemiddelde concentratie moet juist worden voorspeld (i.v.m. de eis dat jaargemiddeld de concentratie onder de 150 mg/l moet zijn).
 - Totaal aantal dagen per jaar dat bij het meetpunt Andijk een concentratie van 120 mg/l en de 150 mg/l wordt overschreden, en de tijdsduur van individuele overschrijdingen (i.v.m. de beperkte voorraad in het spaarbekken).
- De chloride concentratie bij de innamepunten van de waterschappen. De chloride concentratie op de vaste en tijdelijke meetpunten.
 - Chloride concentratie in de diepe delen.
 - Chloride concentratie in de bovenlaag.
- Ontstaan en afbreken van zout- en/of temperatuurgelaagdheid in diepere delen van het systeem (vaargeulen, zandwinputten, erosie- en ontgrondingskuilen, etc.).
- De stromingspatronen (door wind, spuien, IJsselafvoer, etc.) zodat er vertrouwen is dat zoutverspreiding juist wordt voorspeld.
 - Bijv. verplaatsing en opmenging van de zouttong door de erosiekuilen, vaargeulen en de middelgronden.
- Grootschalige verspreiding van stoffen.
- De zoutbalans van het gehele IJsselmeer.
 - De hoeveelheid chloride in het gehele IJsselmeer, en de fluctuaties in tijd, moeten juist door het model wordt weergegeven.
- De zoutbalans voor een specifiek gedeelte van het IJsselmeer.
 - Bijv. voor visvriendelijk spuisluisbeheer Den Oever is het van belang om te weten hoeveel van het ingelaten zout in het IJsselmeer terecht komt, en hoeveel er weer wordt weggespuid in de spui die volgt op het inlaten. Hierbij ben je dus specifiek geïnteresseerd in de zoutbalans rond de grote erosiekuil Den Oever.
- Goede weergave van individuele significante zoutbronnen zodat diverse bronnen met elkaar vergeleken kunnen worden en duidelijk wordt welke bronnen hoeveel bijdragen aan verziltingsevents en hoe maatregelen een rol (kunnen) spelen om de zoutlast van deze bronnen te verminderen.

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 softwareversie waarvan in dit rapport gebruik is gemaakt:

Rekenharten op Linux:

DIMR 2.26.25.79023 (correspondeert met D-HYDRO Suite 2024.03).

Hardware:

De validatiesimulatie is op het Deltares rekencluster gedraaid op 1 vcpu node met 48 cores. De gebruikte rekennode heeft de volgende eigenschappen:

- Processor: 2x Intel Xeon Gold 6342 (24 cores per processor, 48 cores per server, geen hyperthreading)
- Max Turbo Frequency 3.50 GHz
- Processor Base Frequency 2.80 GHz

1.5 Organisatie en bijdragen

Tabel 1-1 geeft een overzicht van het projectteam.

Tabel 1-1 Overzicht projectteam

Naam	Organisatie	Activiteit/Rol
Wilbert Verbruggen	Deltares	Deelprojectleider IJsselmeer 3D
Aukje Spruyt	Deltares	Projectleider Modellen en Applicaties
Maria Georgiou	Deltares	Modelleur (D-HYDRO)
Noor Ten Harmsen van der Beek	Deltares	Modelleur (Zeesluisformulering)
Arnout Bijlsma	Deltares	Adviseur verzilting, 3D hydrodynamica
Menno Genseberger	Deltares	Adviseur gebiedskennis, rekenplatform
Wouter Kranenburg	Deltares	Expert op het gebied van ontzilting diepe geulen/putten
Firmijn Zijl	Deltares	Review & QA
Martin Scholten	RWS-WVL	Coördinator Modellen en Applicaties
Yann Friocourt	RWS-WVL	Coördinerend adviseur Watermodellen
Nathalie van Veen	RWS-WVL	Adviseur Waterverdeling Verzilting

1.6 Leeswijzer

Het rapport is opgezet volgens de gebruikelijke (generieke) structuur voor de zesde-generatie modellen.

Allereerst volgt een uitgebreide beschrijving van het systeem, de diverse geometrische elementen die hierin voorkomen en andere belangrijke aspecten voor modelopzet en -toepassingen (Hoofdstuk 2). Hierna volgt een beschrijving met een selectie van beschikbare data voor de opzet van het model en de validatie (Hoofdstuk 3).

Vanaf Hoofdstuk 4 wordt begonnen met een beschrijving van de opbouw van het model. Allereerst wordt hier het ontwerp van het rooster beschreven en daarna de verdere opzet en configuratie van het model.

Na de modelopzet volgt een beschrijving van de validatieresultaten in Hoofdstuk 5.

In Hoofdstuk 6 wordt in een discussie stilgestaan bij een aantal keuzes die zijn gemaakt. Verder wordt in de discussie ook geanalyseerd in hoeverre het huidige model geschikt is om gebruikt te worden voor de voorziene toepassingen.

In Hoofdstuk 7 wordt alles samengevat met de belangrijkste conclusies en aanbevelingen.

1.7 Terminologie

In dit rapport worden de volgende definities gebruikt:

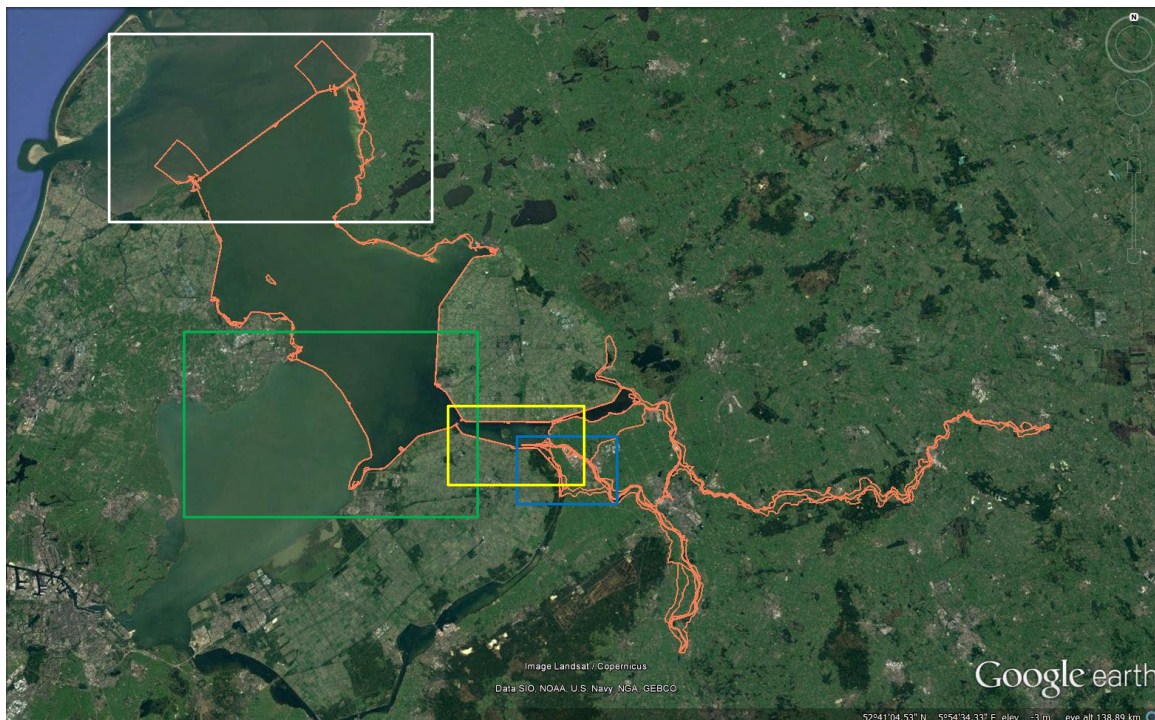
Nederlandse term	Beschrijving	Voorbeeld
<i>gebiedschematisatie</i>	Een beschrijving van een specifiek gebied of water-/grondwatersysteem, voor een specifieke periode	baseline-rijn-j15_5-v1 (software: Baseline, watersysteem: Rijn, periode: 2015)
<i>modelschematisatie</i>	= modelsoftware + gebiedschematisatie 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 Systeembeschrijving

De systeembeschrijving van het IJsselmeermodel is gebaseerd op de gebiedsbeschrijving in Genseberger et al. (2020).

Het IJsselmeer deelmodel is onderdeel van de zesde-generatie D-HYDRO modelschematisatie voor het gebied rondom de IJssel-Vechtdelta (IJVD). Figuur 2-1 laat dit gebied in Google Earth zien. Hierbij zijn de oranje lijnen de winterdijk en de oeverlijn uit de laatste versie in Baseline voor dit gebied. Opgemerkt wordt dat het in oranje getoonde gebied groter is dan het modeldomein van het IJsselmeermodel, zie Figuur 4-2.



Figuur 2-1 Gebied omvatten door IJsselmeer, IJssel-Vechtdelta & Overijsselse Vecht in Google Earth. De oranje lijnen zijn de winterdijk en de oeverlijn uit de laatste versie in Baseline voor dit gebied. Omkaderd in wit, groen, geel en blauw de uitsneden zoals weergegeven in Figuur 2-2 t/m Figuur 2-5

Het IJsselmeer grenst aan:

1. de Waddenzee bij de Afsluitdijk met verbindingen via 3 schutsluizen (Stevensluis bij Den Oever en de Grote en Kleine Sluis bij Kornwerderzand) en spuisluizen bij Den Oever (Stevensluizen) en Kornwerderzand (Lorentzsluizen), zie Figuur 2-2. De Stevensluizen bestaan uit drie spuigroepen, de Lorentzsluizen uit twee. Elke spuigroep bestaat uit vijf kokers van 12 m breedte, gescheiden door 4 m brede tussenpijlers.
2. het Markermeer bij de Houtribdijk met verbindingen via de Krabbersgatluizen bij Enkhuizen en de Houtribsluizen bij Lelystad (zie Figuur 2-3).
3. het Ketelmeer bij de Ketelbrug.

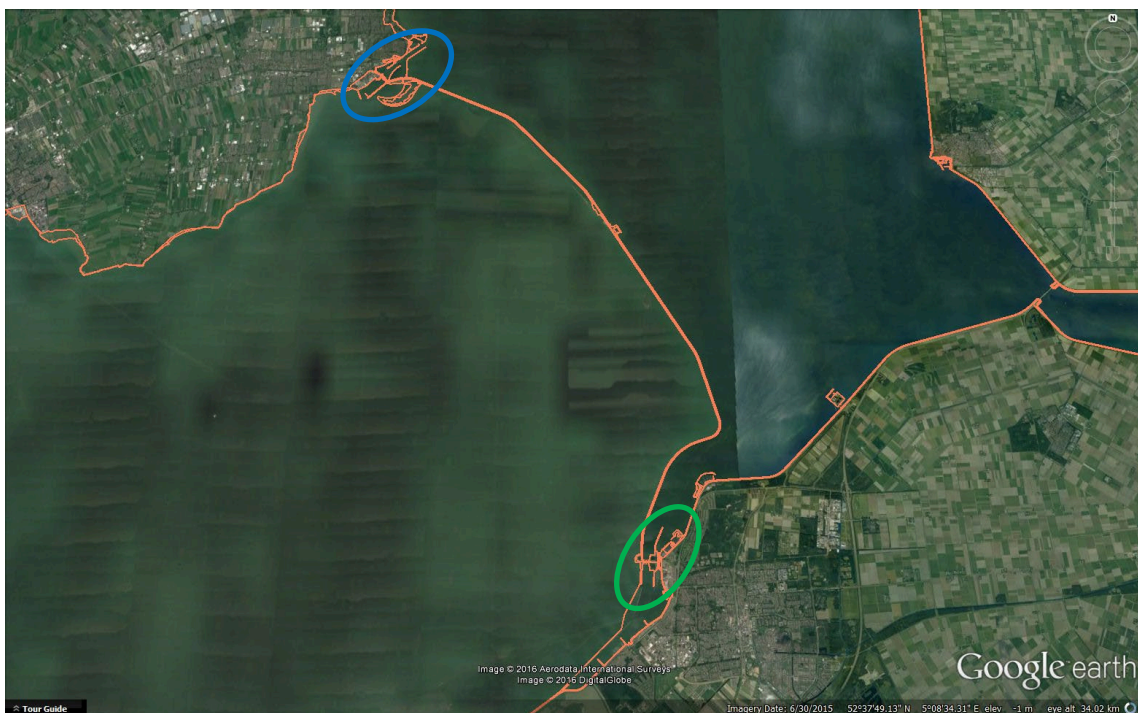
De zesde-generatie modelschematisaties van IJVD en Rijntakken delen een overlapgebied dat Ketelmeer, Vossemeer, Drontermeer tussen Roggebotsluis en Reevesluis, bypass bij Kampen en een stuk IJssel bevat (Figuur 2-4 en Figuur 2-5).

Voor het huidige deelmodel van het IJsselmeer is het gebied beschouwd tussen de Afsluitdijk, de Roggebotsluis², de verbinding van de IJssel met het Ketelmeer, de verbinding van het Kadoelermeer met het Zwarte Meer en de verbinding van het Zwarte Water met het Zwarte Meer. Dit heeft een praktische reden: voor zoutverspreiding zijn er een aantal individueel onderscheidbare lozingen en onttrekkingen in het Ketelmeer en het Zwarte Meer nodig.

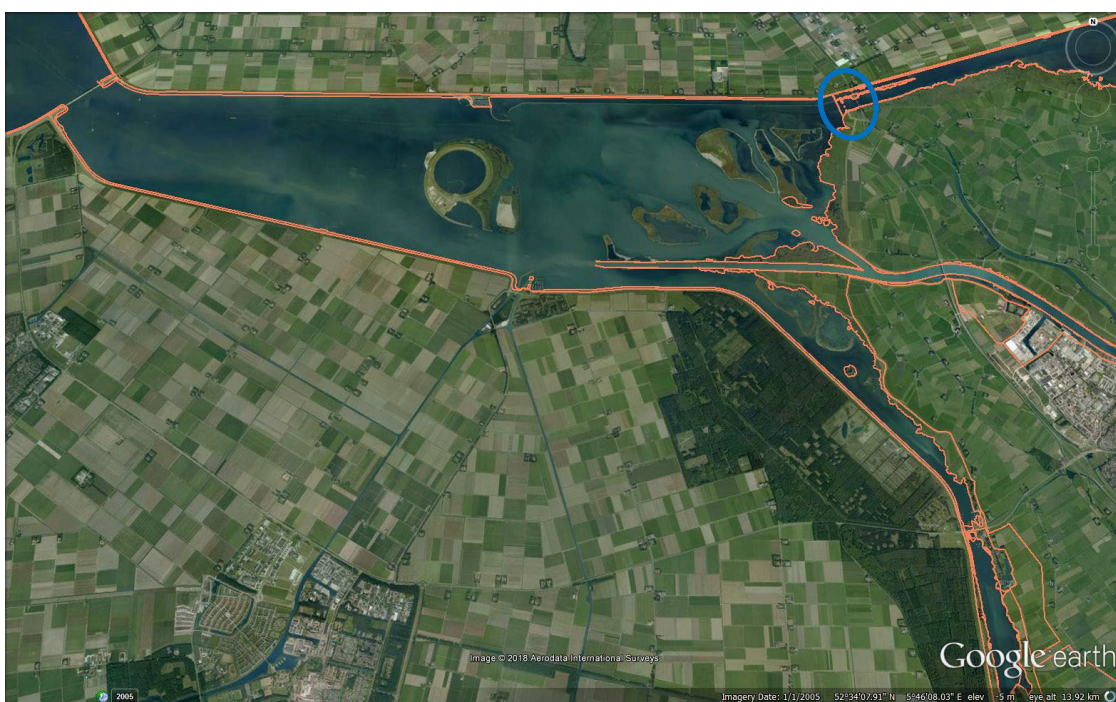


Figuur 2-2 Overgangsgebied tussen IJsselmeer (onder) en Waddenzee (boven) in Google Earth. Deze uitsnede is wit omkaderd in Figuur 2-1. De scheiding wordt gevormd door de Afsluitdijk die wordt begrensd door de Stevinsluizen bij Den Oever (blauwe ellips) en de Lorentzsluizen bij Kornwerderzand (groene ellips). De oranje lijnen zijn de winterdijk en de oeverlijn uit de laatste versie in Baseline voor dit gebied. De bakjes aan zeezijde van Den Oever en Kornwerderzand kunnen worden genegeerd.

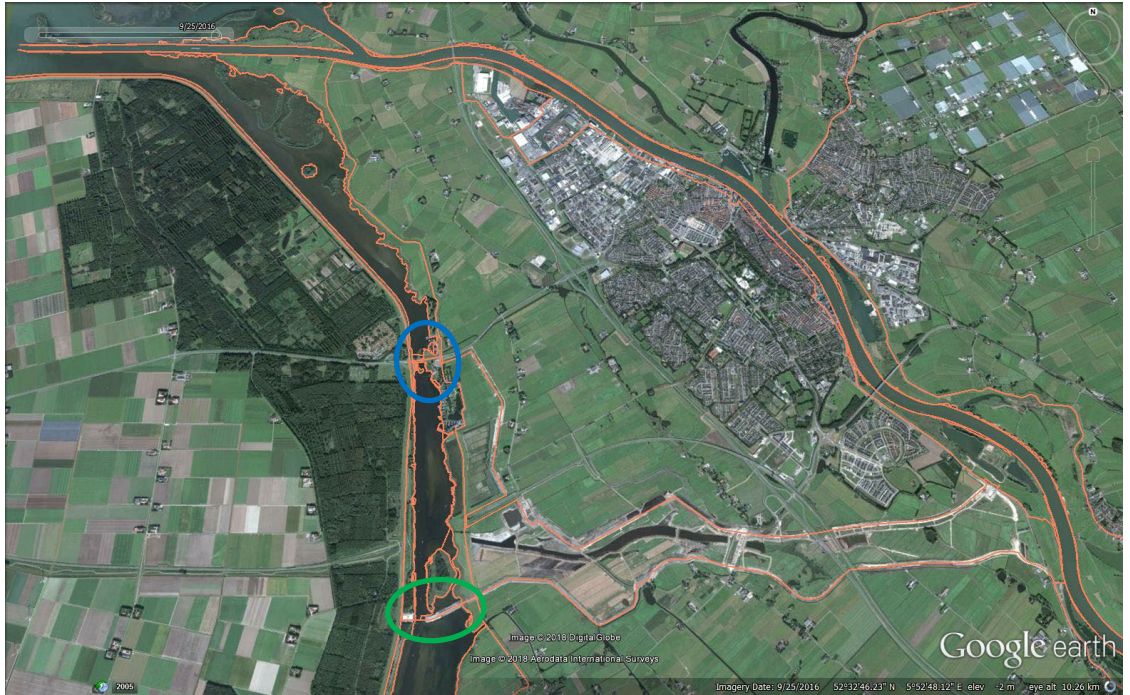
² De Roggebotsluis is gesloopt in april 2023 en vervangen door de Reevesluis (4 oktober 2021 is het Reevesluiscomplex officieel geopend). Het 2022 model (huidige studie) loopt tot de Roggebotsluis.



Figuur 2-3 Overgangsgebied tussen Markermeer (links) en IJsselmeer (rechts) in Google Earth. Deze uitsnede is groen omkaderd in Figuur 2-1. De scheiding wordt gevormd door de Houtribdijk die wordt begrensd door de Krabbersgatsluizen bij Enkhuizen (blauwe ellips) en de Houtribsluizen bij Lelystad (groene ellips). De oranje lijnen zijn de winterdijk en de oeverlijn uit de laatste versie in Baseline voor dit gebied.



Figuur 2-4 Overgangsgebied tussen IJsselmeer (links) en Ketelmeer (midden), Vossemeer - Drontermeer (rechtsonder) en Ramsdiep - Zwarte Meer (rechtsboven) in Google Earth. Deze uitsnede is geel omkaderd in Figuur 2-1. De scheiding tussen Ketelmeer en Ramsdiep (vaargeul, noordkant) en Ramsgeul (zuidkant) wordt gevormd door de Ramspolkering (blauwe ellips). De oranje lijnen zijn de winterdijk en de oeverlijn uit de laatste versie in Baseline voor dit gebied.



Figuur 2-5 Gebied rondom de nieuwe bypass bij Kampen met Drontermeer (linksonder), Vossemeer (linksboven) en de IJssel (rechts) in Google Earth. Deze uitsnede is blauw omkaderd in Figuur 2-1. De oude scheiding tussen Drontermeer en Vossemeer is de Roggebotsluis (blauwe ellips). De nieuwe scheiding wordt gevormd door de Reevesluis en de Reevedam (groene ellips). De oranje lijnen zijn de winterdijk en de oeverlijn uit de laatste versie in Baseline voor dit gebied.

3 Beschikbare data

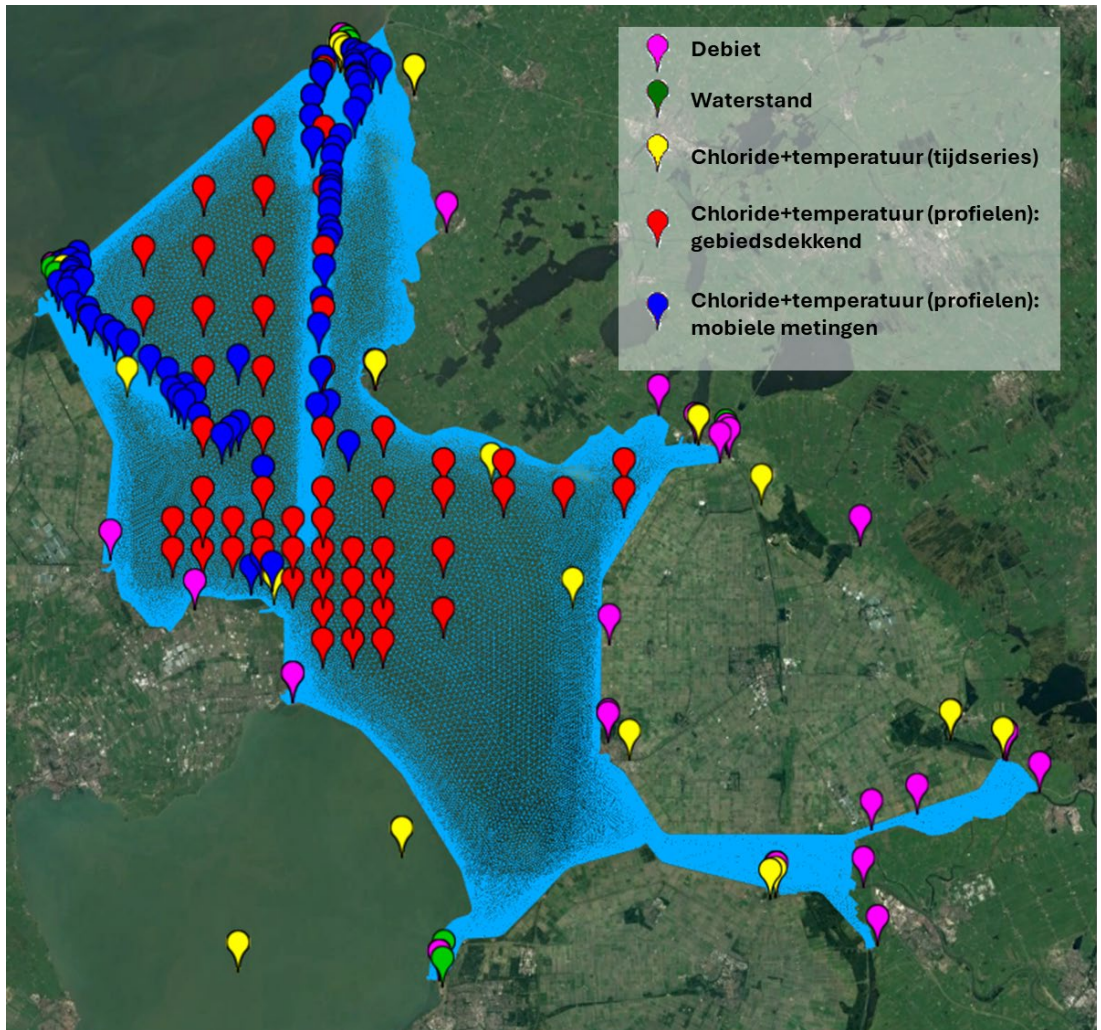
3.1 Geometrie in Baseline

Rijkswaterstaat beheert de geografische informatie ten behoeve van modellen in de GIS-databases van de applicatie Baseline. In deze database wordt data uit lodingen, het digitaal terrein bestand, ontwerptekeningen en vele andere databronnen gecombineerd. De database is daarna geschikt voor de conversie naar een modelschematisatie. Baseline biedt de mogelijkheid om met behulp van lokale maatregelen aanpassingen in de database te maken en zo op een reproduceerbare manier een nieuwe gebiedsbeschrijving te maken om een vergelijking mee uit te voeren. Voor de zesde-generatie hydrodynamische modellen zijn nieuwe Baseline-databases opgezet.

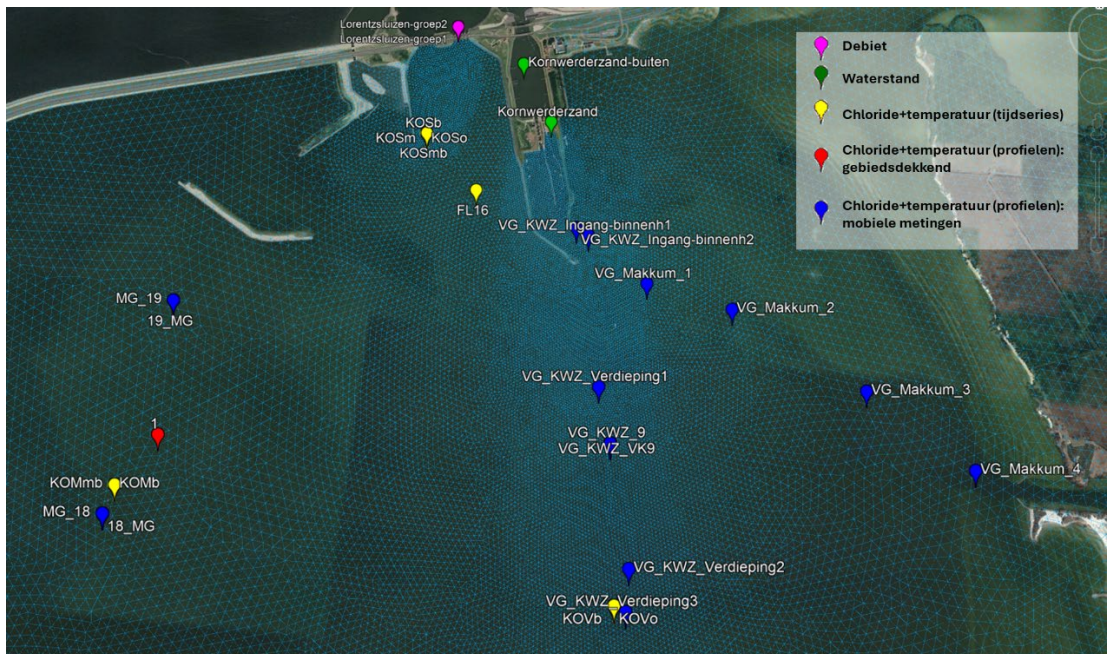
Het model dat is toegepast in deze studie is gebaseerd op het model opgezet door Genseberger et al. (2020). In die studie is het model opgezet en gevalideerd voor de droogtesituatie in 2018. In deze studie is een kleine aanpassing gemaakt aan het rekenrooster en vervolgens is vanuit Baseline alleen de bodemschematisatie aangepast, zodat deze zo goed mogelijk aansluit bij het jaar 2022. Hiervoor is de Baseline-schematisatie Baseline-ym-j23_6 gebruikt.

3.2 Randvoorwaarden en meetgegevens ten behoeve van de validatie

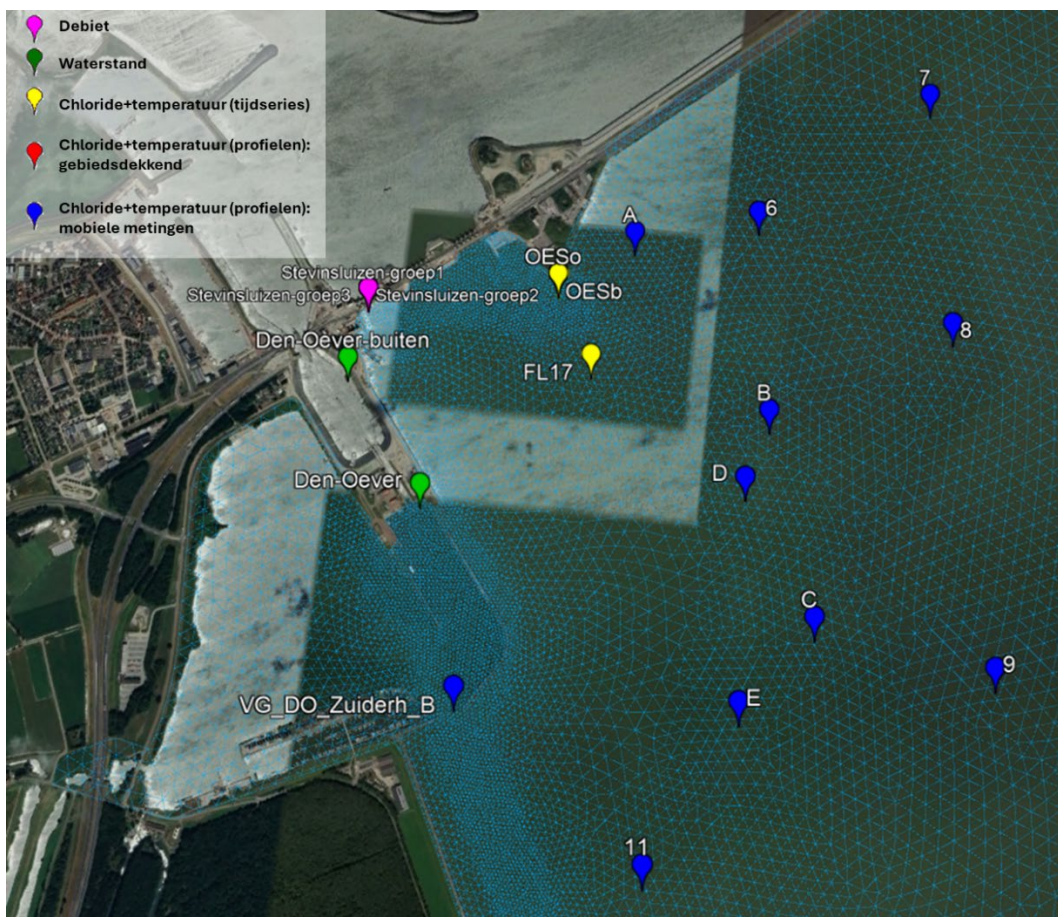
Voor deze studie is een uitgebreide set aan meetgegevens verzameld en geanalyseerd. Deze gegevens zijn deels gebruikt voor het opzetten van de randvoorwaarden van het model (debiet-, chloride- en temperatuurmetingen) en anderzijds voor de validatie van het model (waterstand-, chloride-, temperatuurmetingen). Figuur 3-1 t/m Figuur 3-4 geven een ruimtelijk beeld van de meetgegevens. Een gedetailleerd overzicht van de aangeleverde meetgegevens en enkele bewerkingen daarop wordt gegeven in Bijlage A.



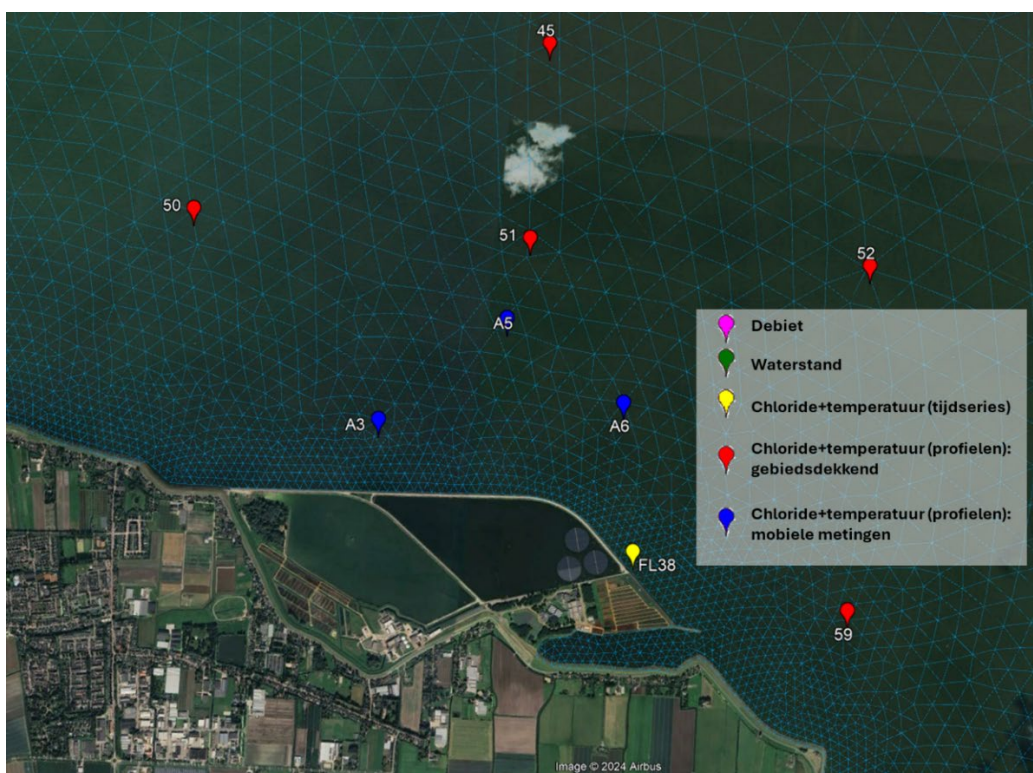
Figuur 3-1 Overzicht meetgegevens.



Figuur 3-2 Overzicht meetgegevens nabij Kornwerderzand, inclusief namen.



Figuur 3-3 Overzicht meetgegevens nabij Den Oever, inclusief namen.



Figuur 3-4 Overzicht meetgegevens nabij Andijk, inclusief namen.

4 Modelopzet

4.1 Inleiding

Het model dat is toegepast in deze studie is gebaseerd op het model opgezet door Genseberger et al. (2020), wat verder is aangepast in Genseberger (2023). Binnen de huidige studie zijn de volgende aanpassingen gedaan om het model zo goed mogelijk aan te laten sluiten bij het jaar 2022:

- Simulatieperiode: 1 januari 2022 t/m 14 februari 2023.
- Zeer geringe aanpassing rekenrooster bij Den Oever. Verder is de verfijning rondom de vaargeul van Kornwerderzand overgenomen van Bijlsma et al. (2022).
- Aanpassen verticale schematisatie. Er is uiteindelijk een z - σ schematisatie gebruikt met een gemiddelde verticale resolutie van 0,125 m.
- Updaten bodemschematisatie o.b.v. 2023 Baslineschematisatie.
- Opstellen van debietrandvoorwaarden en een gesloten waterbalans.
- Verbeteren zouttrandvoorwaarden vanuit schutsluizen bij Kornwerderzand en toevoegen van zouttrandvoorwaarden bij schutsluizen Den Oever.
- Opstellen van zoutlekrandvoorwaarden vanuit spuisluisen bij Kornwerderzand en Den Oever.
- Toevoegen van een temperatuurmodel inclusief de bijbehorende randvoorwaarden (luchttemperatuur, dauwpunttemperatuur en stralingsfluxen).
- Aanpassen methode voor verticale advectie van zout en temperatuur: Vertadvtypsal en vertadvtypem van 6 naar 4.

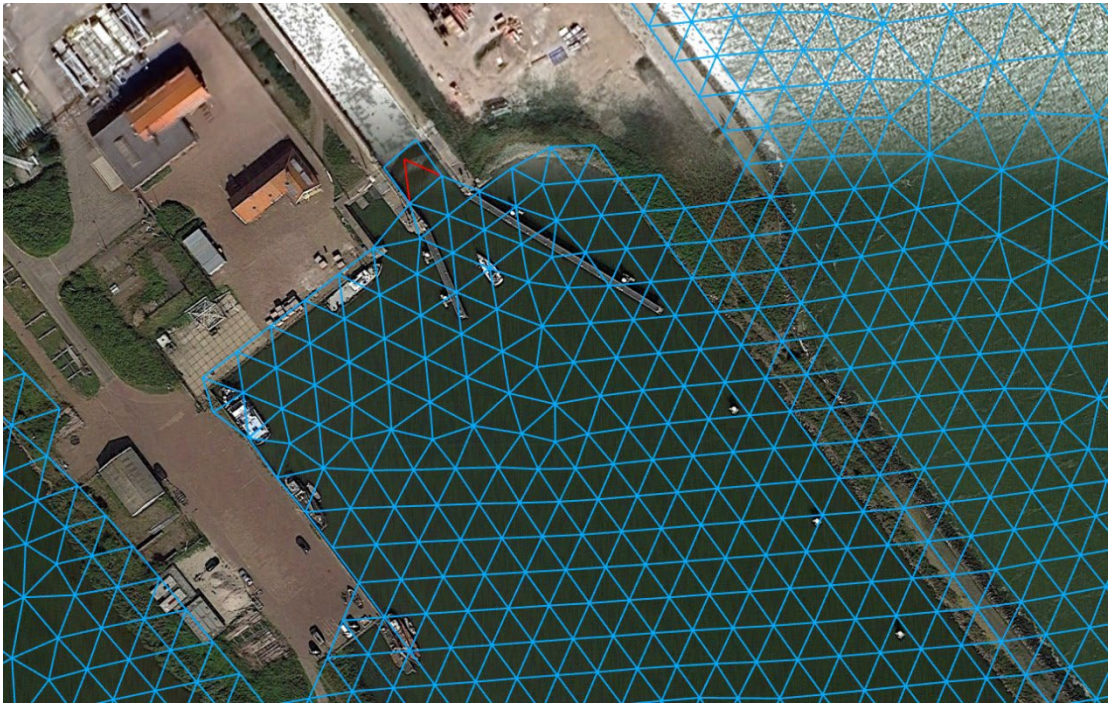
In dit hoofdstuk wordt voornamelijk ingegaan op de bovenstaande aanpassingen. Daarnaast worden ook enkele niet aangepaste onderdelen van het model besproken, omdat deze relevant worden geacht voor de lezer. Voor een gedetailleerde beschrijving van de overige modelinstellingen wordt verwezen naar Genseberger et al. (2020) en Genseberger (2023).

4.2 Roosterontwerp

4.2.1 Horizontale rooster

Het rekenrooster is in de huidige studie alleen aangepast ter plaatse van de schutsluis van Den Oever, zie Figuur 4-1. De cel waarin het, vanuit de sluis kolk komende, zouttransport wordt geloosd is groter gemaakt om tijdstapbeperkingen te voorkomen.

Het gehele rekenrooster is weergegeven in Figuur 4-2. Voor meer gedetailleerde beschrijving en weergave van het rekenrooster wordt verwezen naar de voorgaande studies.



Figuur 4-1 Aanpassing rekenrooster bij Stevinsluis, bij Den Oever. Het oorspronkelijke rooster is in rood weergegeven, Het nieuwe rooster is in het blauw weergegeven.

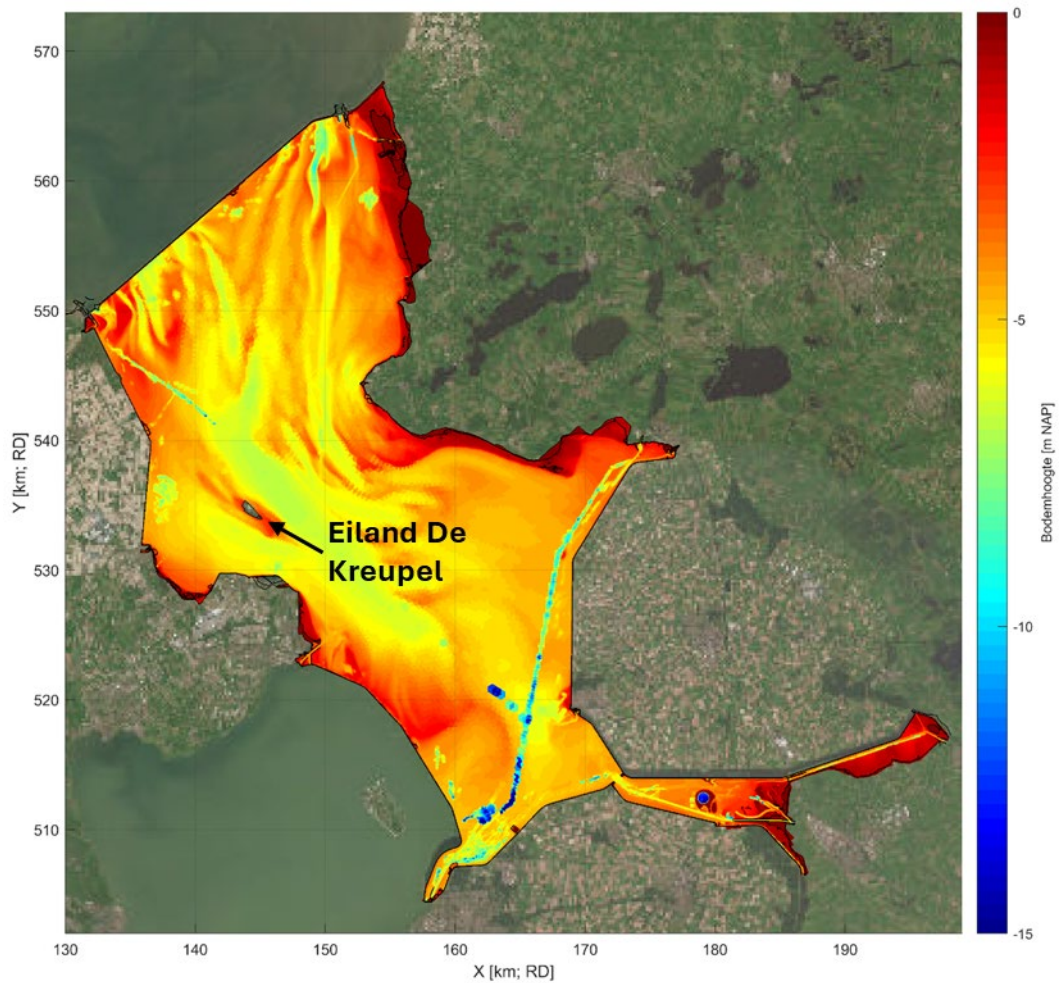


Figuur 4-2 Het rekenrooster van het 3D IJsselmeermodel.

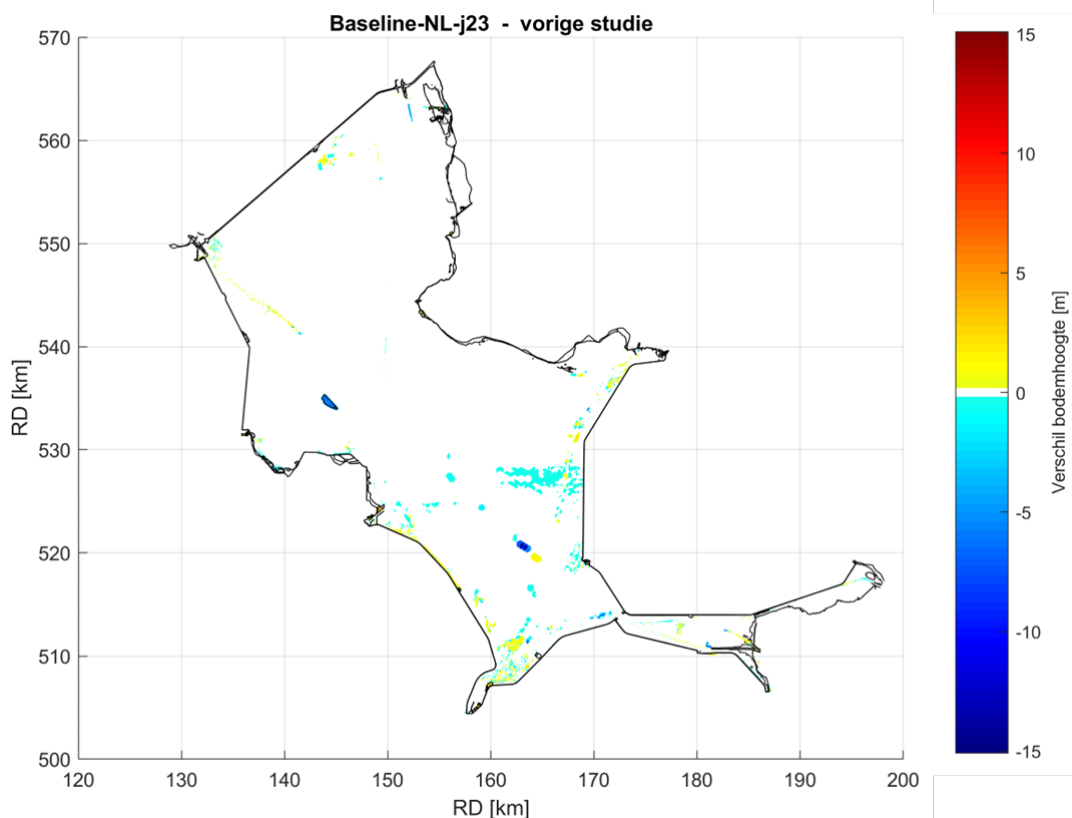
4.2.2 Bodemschematisatie

De bodemschematisatie is gebaseerd op Baseline-ym-j23_6, zie Figuur 4-3. De verschillen in bodemligging ten opzichte van het voorgaande IJsselmeer model is weergegeven in Figuur 4-4. De grootste verschillen worden waargenomen bij Kornwerderzand, waar de verdiepte vaargeul van 1,7 km lengte nu wordt meegenomen (zie Figuur 4-5) en in het zuidelijke gedeelte van het IJsselmeer.

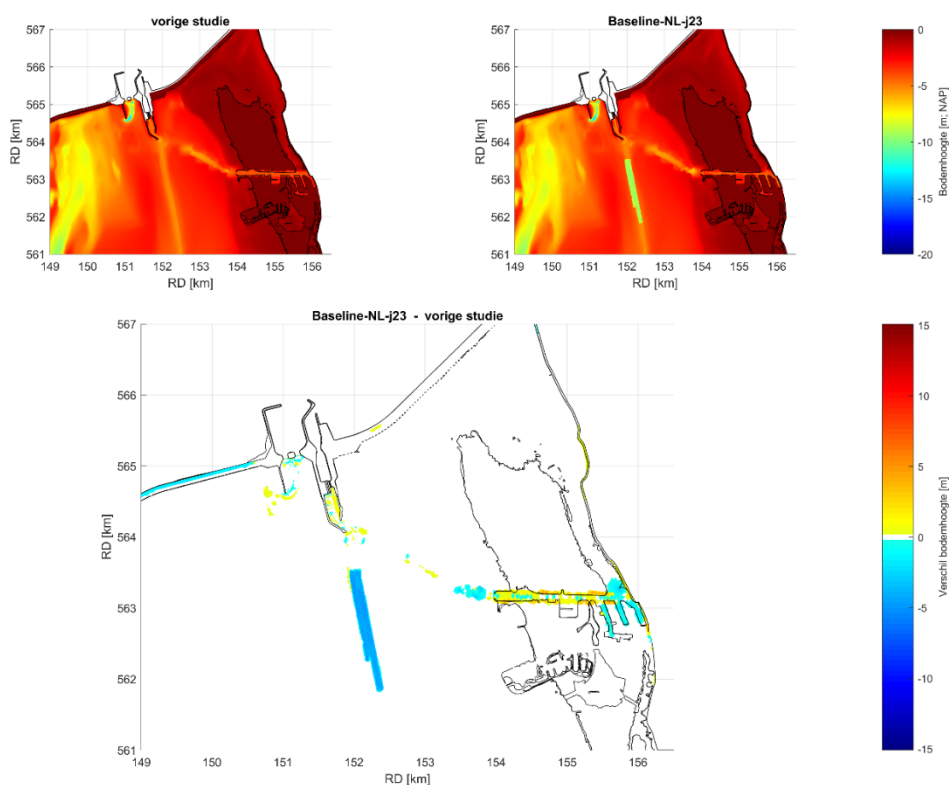
Opgemerkt wordt dat de bodem bij het eiland De Kreupel in de nieuwe projectie een stuk lager is dan in de vorige bodemschematisatie (hoogste punt rond de -1,1 m NAP), wat niet helemaal lijkt te kloppen met satellietbeelden, aangezien in werkelijkheid een significant deel van het eiland boven water ligt. In de modellering heeft deze bodemaanpassing echter geen invloed, aangezien eiland De Kreupel als een 'dry area' is gedefinieerd.



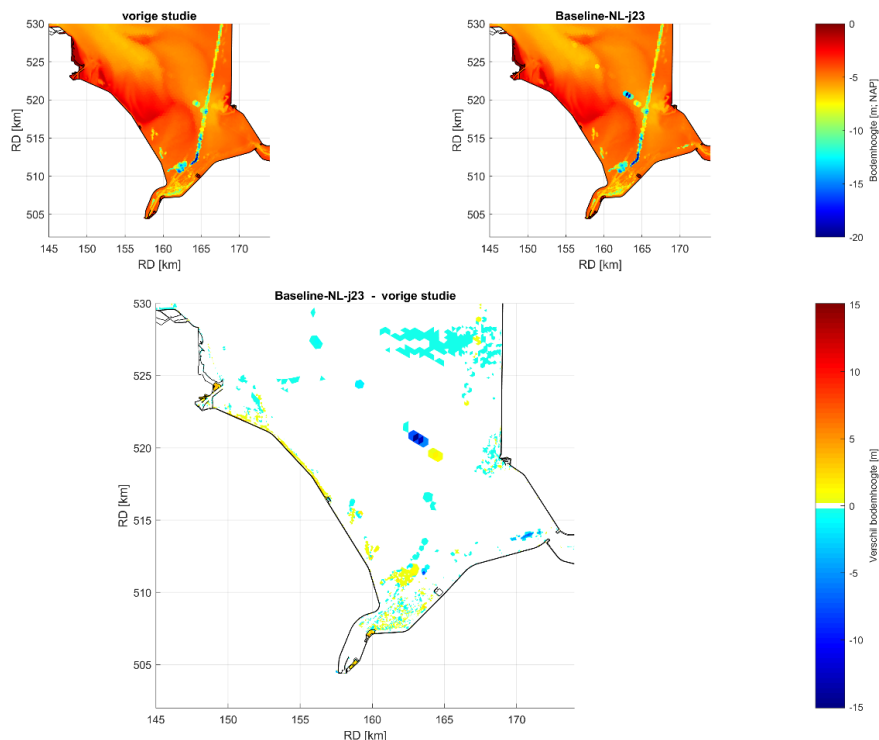
Figuur 4-3 Bodemschematisatie van het 3D IJsselmeermiddel.



Figuur 4-4 Verskil bodemschematisatie t.o.v. het originele 3D IJsselmeermodel. Rood/geel betekent dat de nieuwe bodem hoger ligt dan de oude bodem, blauw betekent een verdieping t.o.v. de oude bodem.



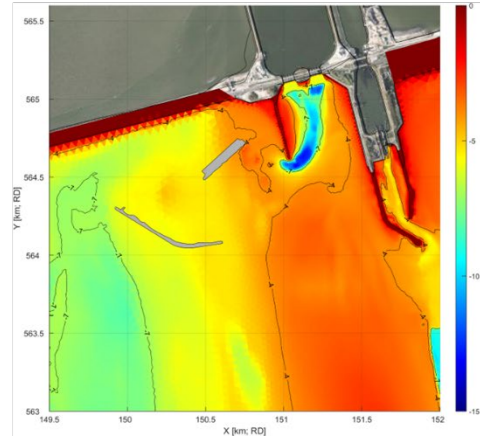
Figuur 4-5 Verskil bodemschematisatie t.o.v. het originele 3D IJsselmeermodel. Ingezoomd op Kornwerderzand en Makkum. Rood/geel betekent dat de nieuwe bodem hoger ligt dan de oude bodem, blauw betekent een verdieping t.o.v. de oude bodem.



Figuur 4-6 Verschil bodemschematisatie t.o.v. het originele 3D IJsselmeermodel. Ingezoomd op het zuidelijke deel van het IJsselmeer. Rood/geel betekent dat de nieuwe bodem hoger ligt dan de oude bodem, blauw betekent een verdieping t.o.v. de oude bodem.

4.2.3 Vismigratierivier

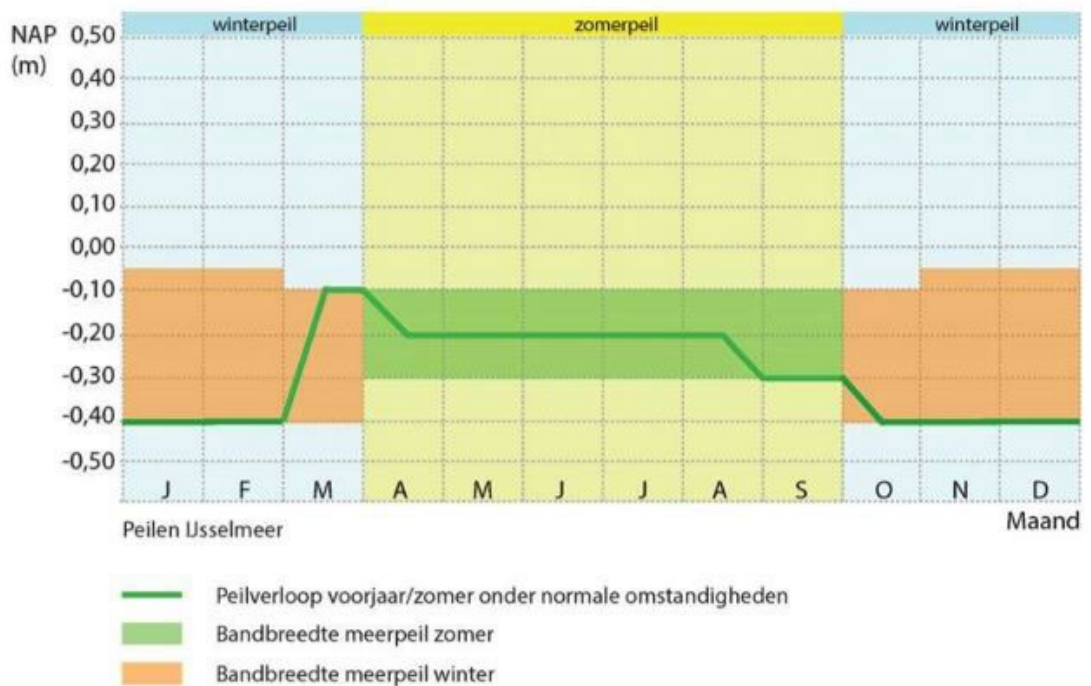
In de modelschematisatie zijn de twee golfbrekers van de Vismigratierivier opgenomen als 'dry areas', zie Figuur 4-7. Deze golfbrekers zijn toegevoegd op basis van het Google Earth satellietbeeld van april 2022. In het model zijn geen verdere bodemaanpassingen gemaakt rondom de Vismigratierivier. Figuur 4-7 laat ook zien dat de geometrie van de Vismigratierivier over de tijd veranderde. Eventuele effecten van geometrische veranderingen door werkzaamheden bij de Vismigratierivier zijn in de huidige modelstudie niet meegenomen. Op basis van een foto uit december 2022 lijkt de noordelijke golfbreker verbonden te zijn met de Afsluitdijk (mogelijk vergelijkbaar met het satellietbeeld op juli 2024).



Figuur 4-7 Boven: Vismigratierivier en ecologisch compensatie project o.b.v. Google Earth satellietbeelden in maart 2022 (links) en juli 204 (rechts). Onder: Schematisatie van de twee golfbrekers in het model. De grijze vlakken zijn 'dry areas' in het model.

4.2.4 Verticale resolutie

In het voorgaande 3D IJsselmeer model werd een z - σ schematisatie gebruikt met een gemiddelde verticale resolutie van ongeveer 0,5 m. Gedurende de huidige studie bleek dat de zoutdynamiek in de binnenhavens bij de schutsluizen van Den Oever en Kornwerderzand alleen goed kan worden weergegeven met een veel hogere verticale resolutie, omdat de zoute onderlaag op die locaties soms maar 0,5 tot 1 m dik is. Na een gevoeligheidsstudie is ervoor gekozen om een z - σ schematisatie toe te passen met 27 sigma-lagen tussen een diepte van -3,675 m NAP en de waterspiegel en z -lagen met een vaste dikte van 0,125 m onder -3,675 m NAP. Op het diepste punt (-23 m NAP) leidt dit tot 182 verticale lagen.



Figuur 4-8 Beoogde zomer- en winter(meer)peil in IJsselmeer volgens Peilbesluit IJsselmeer (dit is Figuur 4.1 uit RWS (2018)).

Bij een meerpeil van -0,4 m NAP tot -0,1 m NAP (zie Figuur 4-8) is de laagdikte van de sigmalagen rond de 12 tot 13 cm. Bij grote windopzet, bijv. 1 m NAP, kan dit eventueel 17 cm worden.

4.3 Debiet- en zouttrandvoorwaarden en waterbalans

4.3.1 Randvoorwaarden schutsluizen

Voor het berekenen van de zoutvracht vanuit de Stevinsluizen bij Den Oever en de Lorentzsluizen bij Kornwerderzand is gebruik gemaakt van de Zeesluisformulering (ZSF) in combinatie met een adhoc versie van het ZoutTransportModel (ZTM). Deze paragraaf gaat beknopt in op de aanpak en aanpassingen t.o.v. de eerdere studie (Ten Harmsen van der Beek, 2022).

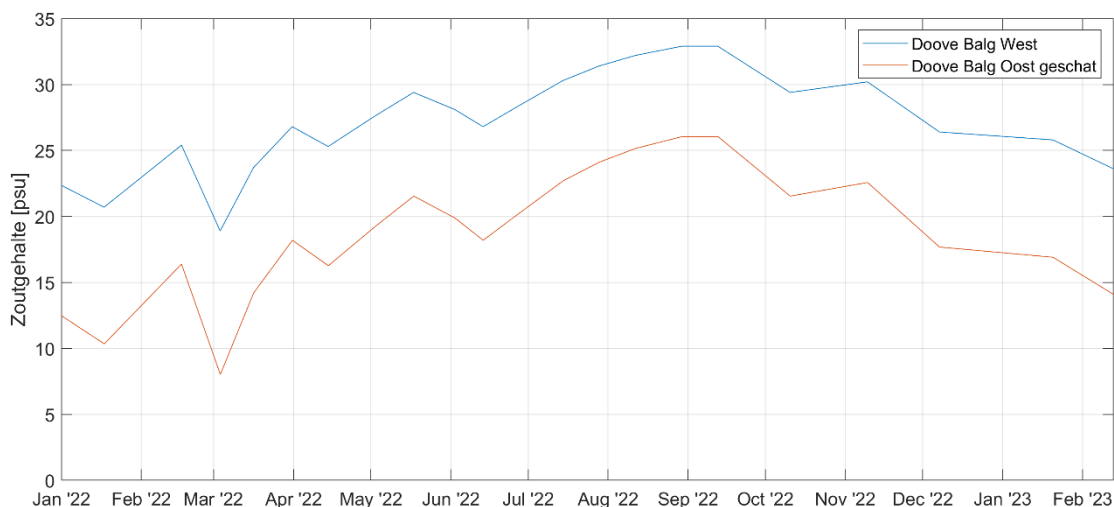
4.3.1.1 Zouttrandvoorwaarden ZSF-ZTM

Met behulp van de ZSF zijn de transporten over de sluishoofden berekend op basis van de geregistreerde schutoperatie. De ZSF heeft de zoutgehalten net buiten de sluiscolken nodig, maar deze zijn niet beschikbaar uit metingen. Als oplossing is ervoor gekozen om, vergelijkbaar met Ten Harmsen van der Beek (2022), met behulp van het ZTM 'bakjes' te definiëren aan weerskanten van de sluisen. Middels die bakjes wordt er een relatie gelegd met het zoutgehalte in de Waddenzee en het IJsselmeer. Voor het ZSF-ZTM zijn dus zoutgehalte tijdseries nodig aan Waddenzee-zijde en in het IJsselmeer.

Voor het zoutgehalte in het IJsselmeer worden metingen gebruikt (Den Oever: FL17 t/m juli 2022 en OESb daarna, Kornwerderzand: FL16 t/m juli 2022 en KOSb daarna). Voor de Waddenzee zijn geen lokale metingen beschikbaar. Daarom is ervoor gekozen om de lokale zoutgehalten te schatten op basis trendrelaties tussen zoutmetingen verder op de Waddenzee (Doove Balg West) en historische lokale metingen en/of spuidebieten.

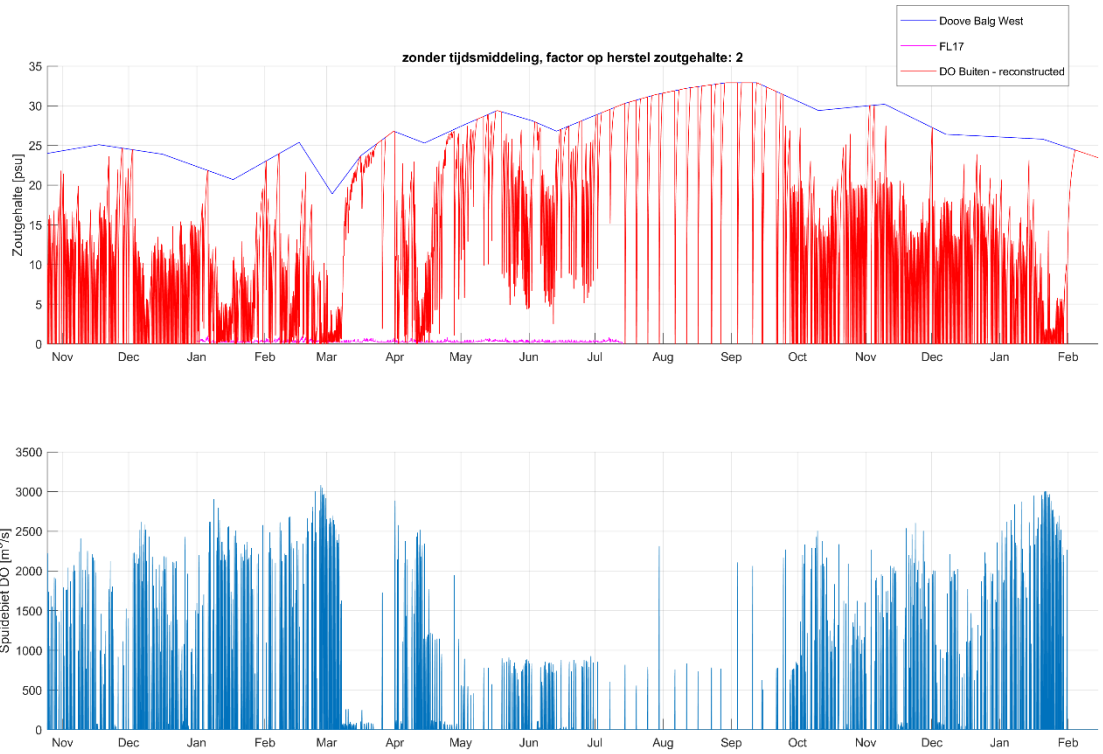
Voor Kornwerderzand zou het zoutgehalte op meetlocatie Doove Balg Oost redelijk geschikt zijn. In werkelijkheid zal het zoutgehalte bij de buitendeur waarschijnlijk kort na een spui iets

lager zijn dan bij Doove Balg Oost. Verwacht wordt echter dat dit effect beperkt is vanwege de golfbreker tussen de buitenhaven en de spuikom. Voor 2022 is echter geen meetreeks beschikbaar voor Doove Balg Oost. Daarom wordt gebruikgemaakt van een meetreeks voor Doove Balg West en een trendrelatie tussen Doove Balg Oost en West op basis van metingen in de periode 2000-2009, zoals ook gebruikt in Bijlsma et al. (2022), zie Figuur 4-9.



Figuur 4-9 Gemeten zoutgehalte bij Doove Balg West (blauwe lijn) en het geschatte zoutgehalte bij Doove Balg Oost (rode lijn).

Vanwege de geometrie van de buitenhaven van Den Oever zijn de zoutgehaltes in de buitenhaven bij Den Oever sterk afhankelijk van de spuidebieten. Binnen deze studie is daarom op basis van beschikbare simulaties met het 3D Waddenzeemodel voor de jaren 2016-2017 een relatie gelegd tussen het gemodelleerde zoutgehalte in de buitenhaven enerzijds en de spuidebieten en het gemodelleerde zoutgehalte bij Doove Balg West anderzijds. De aanpak en resultaten van deze analyse zijn in detail beschreven in Bijlage B. De zoutgehalte tijdserie die uiteindelijk in de ZSF-ZTM berekening is gebruikt is weergegeven in Figuur 4-10 (rode lijn).

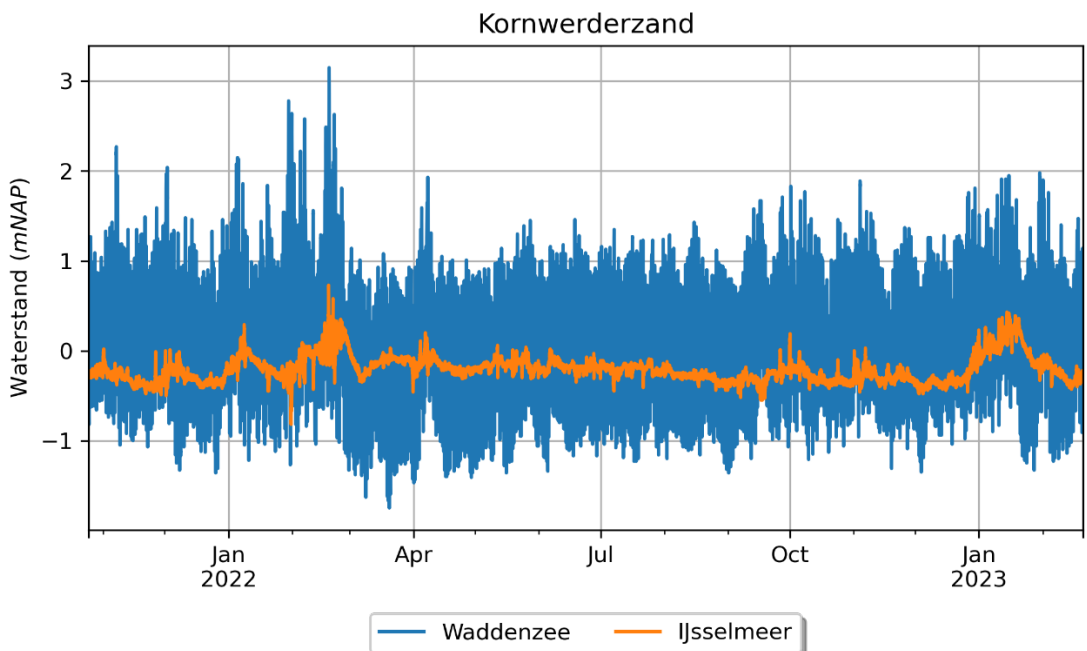


Figuur 4-10 Boven: Geschatte zoutgehalte in de buitenhaven van Den Oever (rood) op basis van de gelegde relatie met de metingen bij Doove Balg West (blauw) en de spuidebieten bij Den Oever (onder).

Nieuw ten opzichte van Ten Harmsen van der Beek (2022) is dat in de huidige studie de uitwisseling door het getij tussen voorhavens en Waddenzee is meegenomen in het ZTM.

4.3.1.2 Waterstanden

De gemeten waterstand in de binnen- en buitenhavens van Kornwerderzand (zie Figuur 4-11) en Den Oever zijn gebruikt als invoer voor de berekening met de ZSF-ZTM.



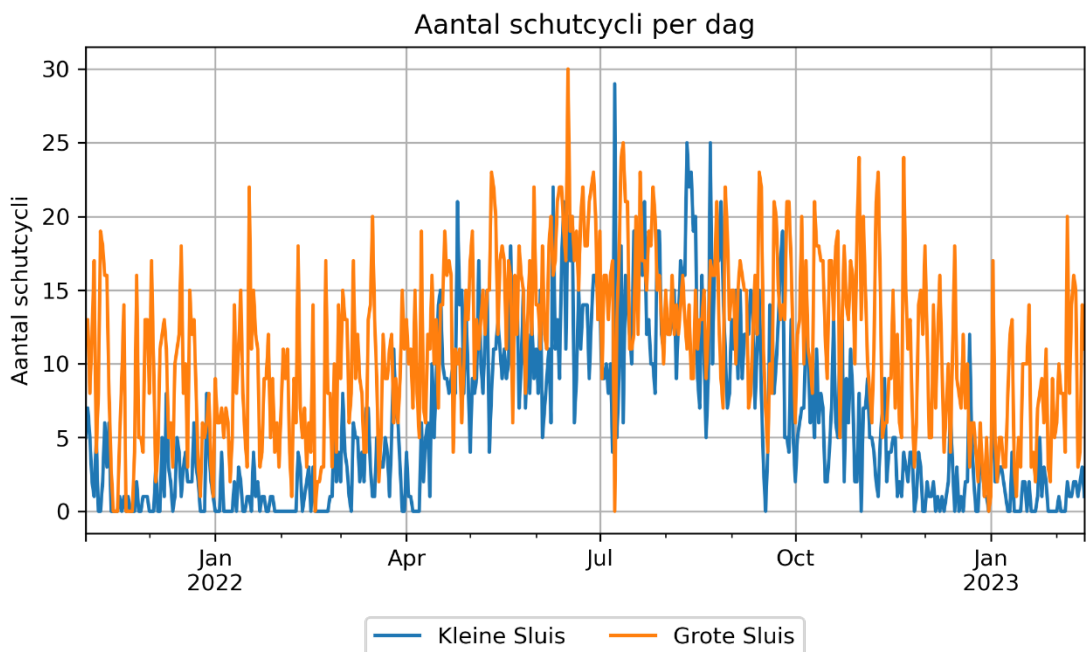
Figuur 4-11: Waterstandsrandvoorwaarde bij Kornwerderzand.

4.3.1.3 Schutgegevens

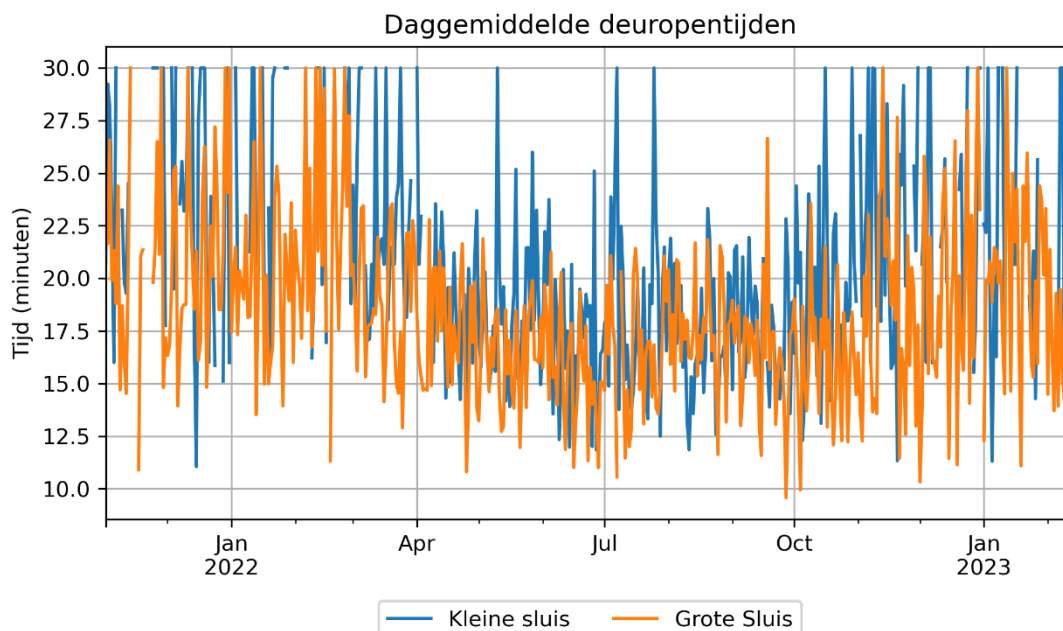
De door RWS geleverde registraties van schuttingen en sluispassages zijn omgezet in schutcycli voor de ZSF berekening. Hiervoor worden dezelfde methodes en aannames gebruikt als in Ten Harmsen van der Beek (2022). De data bevat echter wel enkele fouten, zoals 1) meerdere schuttingen (in verschillende richtingen) met dezelfde starttijd en 2) opeenvolgende schuttingen in één richting zonder een leegomschuttingen tussendoor. In het eerste geval is ervoor gekozen om de starttijden aan te passen, zodat deze schuttingen in de randvoorwaarden achtereenvolgens aan de beurt komen. In het tweede geval is ervoor gekozen om leegomschuttingen toe te voegen tussen opgenomen registraties. Een grote tekortkoming aan de data is dat de exacte deur-opentijden niet zijn geregistreerd. In plaats daarvan zijn er start- en eindtijden genoteerd voor iedere schutting. Op basis daarvan zijn de deur-opentijden afgeschat.

Figuur 4-12 toont het aantal schutcycli per dag voor de Kleine en Grote Sluis bij Kornwerderzand. In de winter zijn er relatief weinig schuttingen, terwijl het aantal schutcycli in de zomer varieert tussen de 10 en 30 per dag voor beide kolken. Indien de sluis intensiever wordt gebruikt nemen de deur-opentijden af, zoals te zien is in Figuur 4-13. De deur-opentijd varieert in de zomer tussen de 10-20 minuten en is regelmatig groter dan 20 minuten in winter.

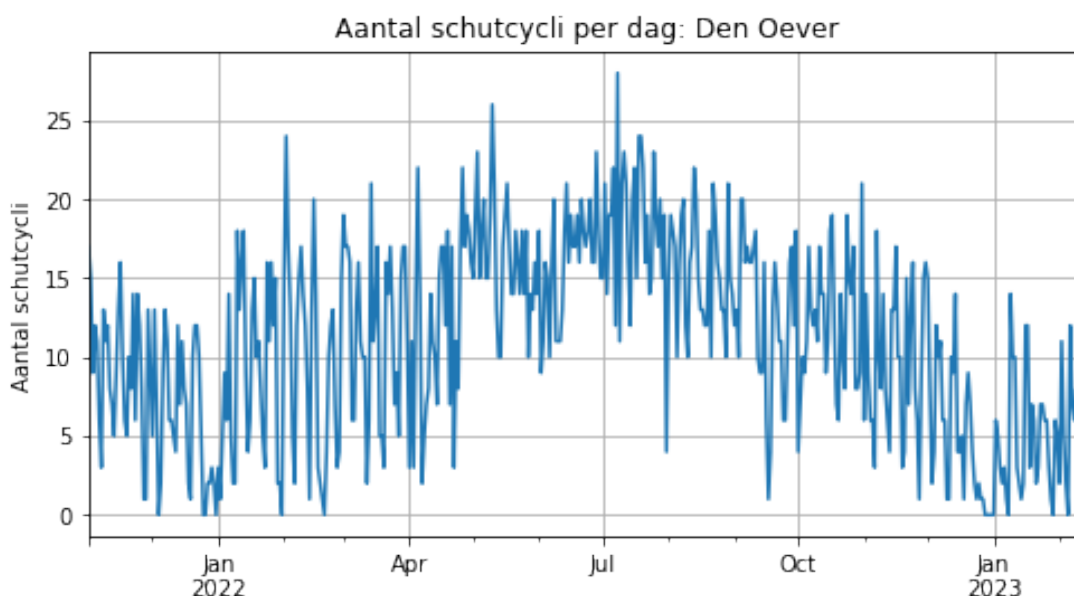
Figuur 4-14 toont het aantal schutcycli per dag bij Den Oever. De seizoensvariatie is vergelijkbaar met de Kleine en Grote Sluis bij Kornwerderzand.



Figuur 4-12 Aantal schutcycli per dag bij Kornwerderzand.



Figuur 4-13 Daggemiddelde deur-opeentijden Grote en Kleine Sluis bij Kornwerderzand.



Figuur 4-14 Aantal schutcycli per dag bij Den Oever.

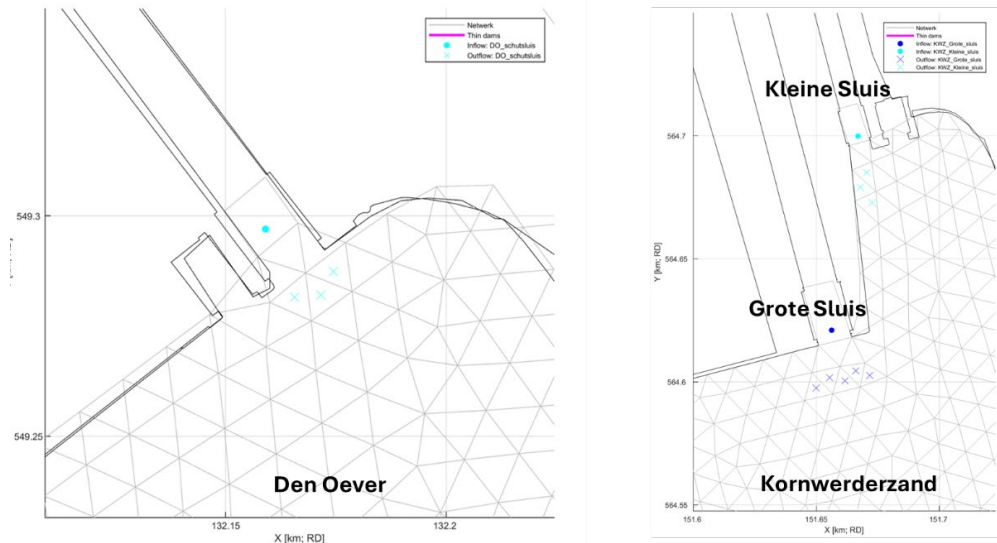
4.3.1.4 Schematisatie in D-HYDRO model

Met behulp van de door Deltares ontwikkelde MATLAB toolbox zsf2fm (ZSF naar Delft3D-FM) is de uitvoer van de ZSF-ZTM berekening omgezet in randvoorwaarden voor het D-HYDRO model. Tijdens testsimulaties bleek dat een deel van het in het D-HYDRO model geloosde zout verticaal opmengt in de rekencel van de lozing. Indien de onttrekking in dezelfde cel wordt opgelegd als de lozing, is de netto zoutlast richting het IJsselmeer lager dan berekend in de ZSF. Daarom is ervoor gekozen om de onttrekking horizontaal te scheiden van de lozing. Figuur 4-16 toont voor zowel Den Oever als Kornwerderzand de lozings- en onttrekkingslocaties. De lozing is opgelegd in de rekencel nabij de binnendeur van de sluiscolk. De onttrekking is verder benedenstrooms in meerdere rekencellen gedefinieerd. Er is gekozen voor meerdere rekencellen om te voorkomen dat er gedurende een rekentijdstap meer water wordt onttrokken dan dat er beschikbaar is (wat zou leiden tot

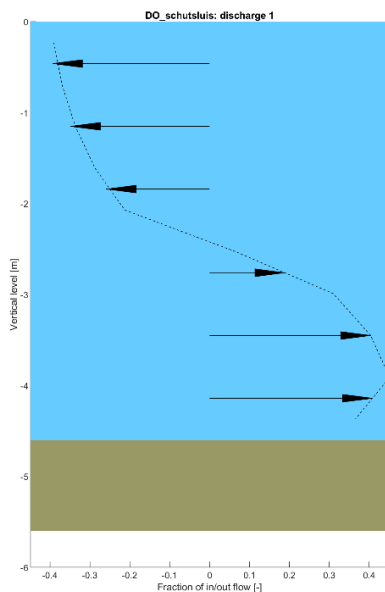
zogenaamde *extraction flux warnings*). De inkomende en uitgaande debieten zijn in D-HYDRO over de verticaal verdeeld op basis van een typisch dichtheitsprofiel, zie Figuur 4-16.

De ZSF uitvoer geeft de totale massaflux per fase. Een fase is bijvoorbeeld de nivelleerfase, fase dat de deur open staat, etc. Tijdens de fase dat de sluisdeur open staat varieert het debiet in werkelijkheid over de tijd. In de zsf2fm toolbox is het gemiddelde debiet tijdens deze fase omgezet in een realistische variatie over de tijd op basis van dezelfde formuleringen als in de ZSF, waarbij de snelheid van de zouttong in de sluiscolk en de reflectie tegen de dichte deur is meegenomen. Op deze manier bevatten de randvoorwaarden voor het D-HYDRO model voldoende detail om dergelijke detailprocessen weer te kunnen geven.

De watertemperatuur van het water dat in het D-HYDRO model wordt geloosd (komend vanuit de sluiscolk) is gebaseerd op temperatuurmetingen (Den Oever: FL17 t/m juli 2022 en OESb daarna, Kornwerderzand: FL16 t/m juli 2022 en KOSb daarna).



Figuur 4-15 Rekencellen waarin de lozingen en onttrekkingen zijn opgelegd bij Den Oever (links) Kornwerderzand (rechts).

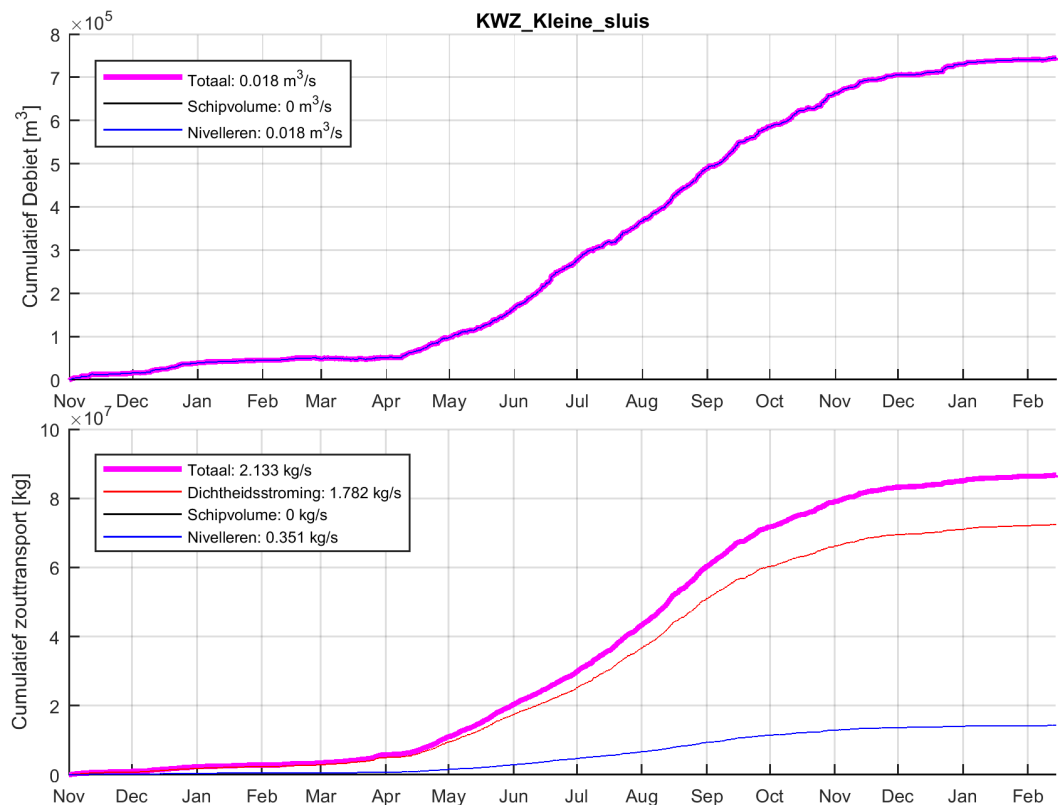


Figuur 4-16 Verticale locaties waar de onttrekkingen en lozingen in het D-HYDRO zijn opgelegd. De stippellijn toont het aangenomen debietprofiel.

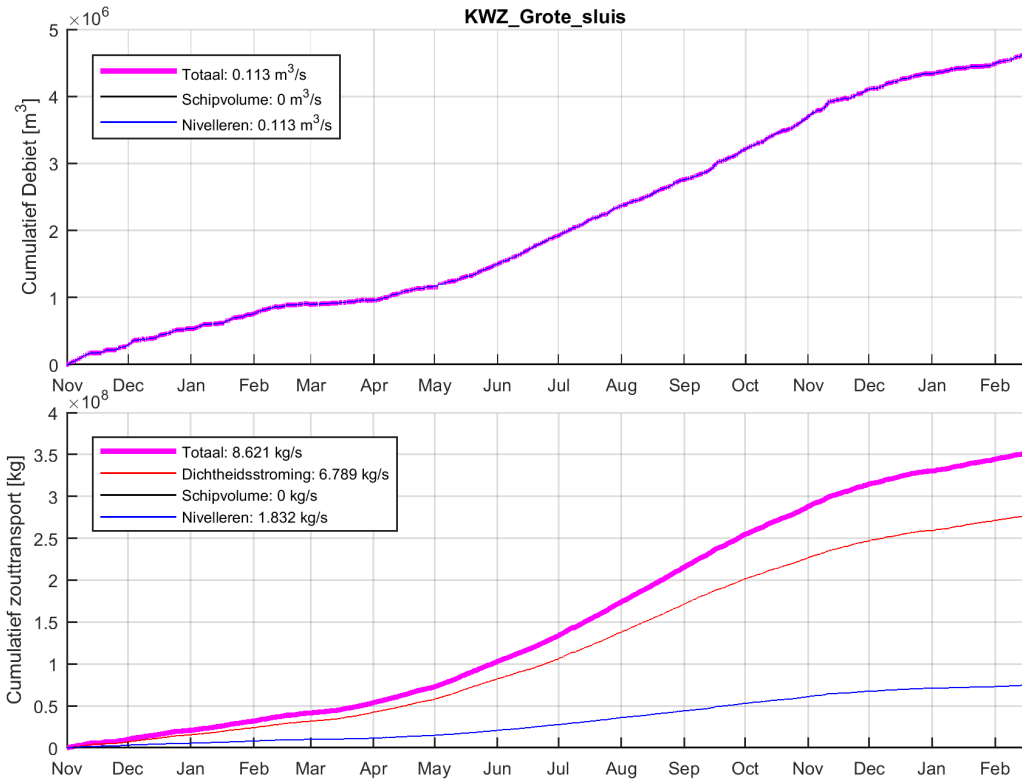
4.3.1.5 Berekende zoutlast

Figuur 4-17 t/m Figuur 4-19 tonen het schutverlies en de cumulatieve zoutlasten voor de Kleine en Grote Sluis bij Kornwerderzand en de sluis bij Den Oever. Gemiddeld over de periode november 2021 t/m halverwege februari 2023 is de zoutlast 2,1 kg/s vanuit de Kleine Sluis, 8,6 kg/s vanuit de Grote Sluis en 5,5 kg/s vanuit de sluis bij Den Oever. Opgemerkt wordt dat deze zoutlasten zijn berekend op basis van de randvoorwaarden. In deze figuren is het uitgaande zoutgehalte (IJsselmeer → sluis) gebaseerd op het ZSF-ZTM model. Het uitgaande zoutgehalte in het D-HYDRO model wijkt daarvan af, waardoor het netto zouttransport in het model iets anders is. De afwijking in het uitgaande zoutgehalte komt doordat het zoutprofiel in de binnenhaven niet uniform is over diepte (zoals aangenomen in het ZTM) in het D-HYDRO model. Daarnaast kunnen de gemodelleerde zoutgehalten net buiten de binnenhaven afwijken van de metingen die zijn gebruikt als randvoorwaarde voor het ZSF-ZTM model.

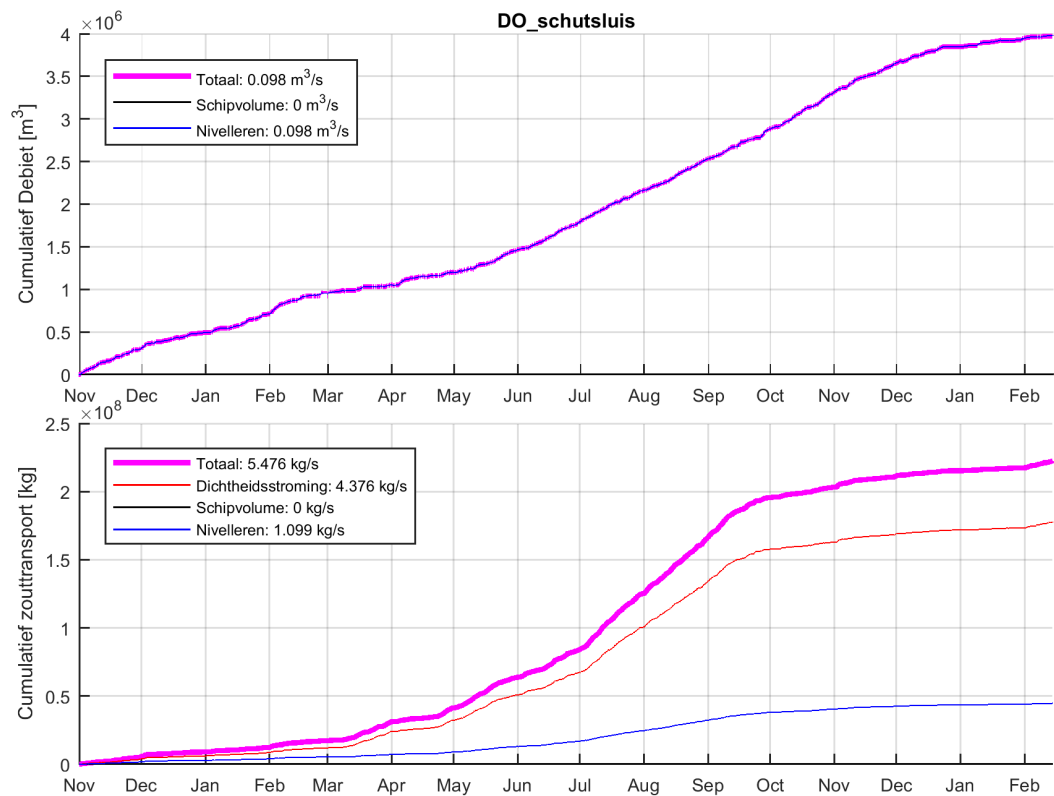
De waterverplaatsing door de schepen is niet meegenomen. De invloed van de waterverplaatsing op de totale zoutlast is beperkt.



Figuur 4-17 Berekende debieten en zoutlast voor de Kleine Sluis bij Kornwerderzand. Boven: cumulatieve debiet t.g.v. scheepsvolume en nivelleren. Onder: cumulatieve zouttransport t.g.v. kolkuitwisseling (dichtheidsstroming), scheepsvolume en nivelleren.



Figuur 4-18 Berekende debieten en zoutlast voor de Grote Sluis bij Kornwerderzand. Boven: cumulatieve debiet t.g.v. scheepsvolume en nivelleren. Onder: cumulatieve zouttransport t.g.v. kolkuitwisseling (dichtheidsstroming), scheepsvolume en nivelleren.



Figuur 4-19 Berekende debieten en zoutlast voor de sluis bij Den Oever. Boven: cumulatieve debiet t.g.v. scheepsvolume en nivelleren. Onder: cumulatieve zouttransport t.g.v. kolkuitwisseling (dichtheidsstroming), scheepsvolume en nivelleren.

4.3.2 Randvoorwaarden lek bij spuisluisen

Doordat de spuikokers niet geheel sluiten treden er bij een verval tussen het IJsselmeer en de Waddenzee lekken op. Indien de waterstand op zee hoger is dan op het IJsselmeer lekt er dus zeewater richting het IJsselmeer. Omgekeerd, lekt er ook water van IJsselmeer naar Waddenzee wanneer de waterstand op zee lager is dan op het IJsselmeer terwijl er niet wordt gespuid. In deze studie zijn de lekdebieten (in- en uitgaand) en bijbehorende zoutlekken (alleen ingaand nodig) meegenomen in de randvoorwaarden.

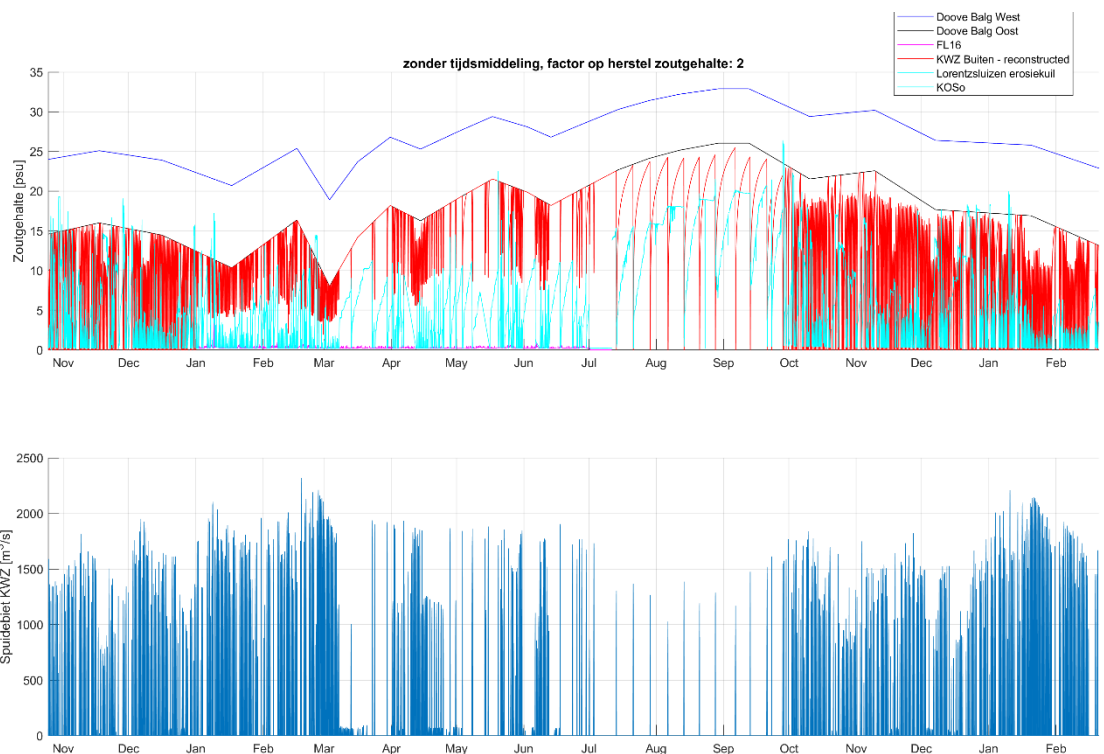
Friocourt (2020) schatte op basis van beelden dat de gaten in de onderste hoeken van de deuren circa 15-20 cm breed en even hoog zijn. Bij Den Oever gaat het om 15 spuikokers en bij Kornwerderzand om 10 spuikokers.

De lekdebieten zijn berekend aan de hand van: $Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot dH \cdot 0,5}$. In deze formule is dH het verval tussen de Waddenzee en het IJsselmeer. Voor de C_D is een waarde van 1 gebruikt. Het verval wordt met een factor 0,5 vermenigvuldigd, omdat er bij het opstellen van de randvoorwaarden vanuit is gegaan dat beide deuren in iedere spuikoker zijn gesloten. Later in de studie bleek dat dit mogelijk alleen in de zomer van 2022 is gedaan, hoewel exacte gegevens hierover ontbreken. Als steeds maar één deur is gesloten zou de (zout)lek een factor 1,4 hoger zijn. Deze nieuwe informatie kon echter niet meer verwerkt worden. Bovendien is de informatie het meest relevant in de zomer als er meerdere dagen achterelkaar niet kan worden gespuid. De onderschatting van de zoutlek in de winter en het voorjaar is minder relevant voor de zoutindringing in het IJsselmeer, aangezien er in deze periode veel wordt gespuid en het zout over het algemeen nauwelijks verder komt dan de erosiekuil.

Omdat zowel de exacte lekoppervlakken als het zoutgehalte op zee niet beschikbaar zijn, zijn er testsimulaties gedraaid waarin beide parameters zijn gevarieerd (binnen realistische grenzen). Deze testsimulaties zijn niet met het volledige 3D IJsselmeermodel uitgevoerd, maar met uitsneden bij Den Oever en Kornwerderzand. Deze aanpak was mogelijk, omdat de zoutgehalten in de erosiekuil snel reageren op de zoutlekken. Vanwege de bodemgeometrie vormen de kuilen en de spuikokers een afgebakend gebied, waardoor de hydrodynamica van de rest van het IJsselmeer geen grote directe invloed heeft.

Op basis van deze testsimulaties en enkele simulaties met het grootschalige 3D IJsselmeermodel is ervoor gekozen om bij Den Oever lekopeningen aan te nemen met dimensies van 20x20 cm en bij Kornwerderzand 30x30 cm in iedere hoek van de sluisdeuren. Het aangenomen totale lekoppervlak bij Den Oever (15 spuikokers) is dus 1,2 m² en bij Kornwerderzand (10 spuikokers) 1,8 m². Met deze lekopeningen kwamen de gemodelleerde zoutgehalten in de erosiekuilen het best overeen met de metingen. Voor het zoutgehalte op zee is dezelfde methode gebruikt als beschreven in paragraaf 4.3.1.1. Bij Den Oever zijn dezelfde zoutgehalte tijdseries gebruikt als voor de forcering van de ZSF berekeningen, zie Figuur 4-10. Vanwege de geometrie van de buitenspuihaven bij Kornwerderzand is ervoor gekozen om niet dezelfde zoutgehalten te gebruiken als voor de forcering van de ZSF berekening. De zoutgehalten in de buitenhaven van de schutsluizen bij Kornwerderzand worden in veel mindere mate beïnvloedt door het zoete water dat via het spuicomplex op zee wordt geloosd dan bij Den Oever. Voor de zoutlek van de spuisluisen is daarom vergelijkbaar met het zoutgehalte voor Den Oever een relatie gelegd met de spuidebieten en het zoutgehalte verder op de Waddenzee, zie Bijlage B voor meer informatie. De afgeleide zoutgehalten zijn weergegeven in Figuur 4-20 (rode lijn). De berekende zoutgehalte is gelimiteerd op het geschatte zoutgehalte bij Doove Balg Oost (zie ook paragraaf 4.3.1.1). Met lichtblauw zijn in het bovenste paneel ook de maximale zoutgehalten in de erosiekuil weergegeven. De berekende zoutgehalten op zee zijn vrijwel altijd hoger dan de maximale zoutgehalten in de erosiekuil, wat ook vereist is, aangezien het zout in de erosiekuil vanuit de Waddenzee komt.

De lekdebieten (zowel onttrekkingen als lozingen) zijn opgelegd op een hoogte van -4,7 m NAP (onderkant van de sluisdeuren).



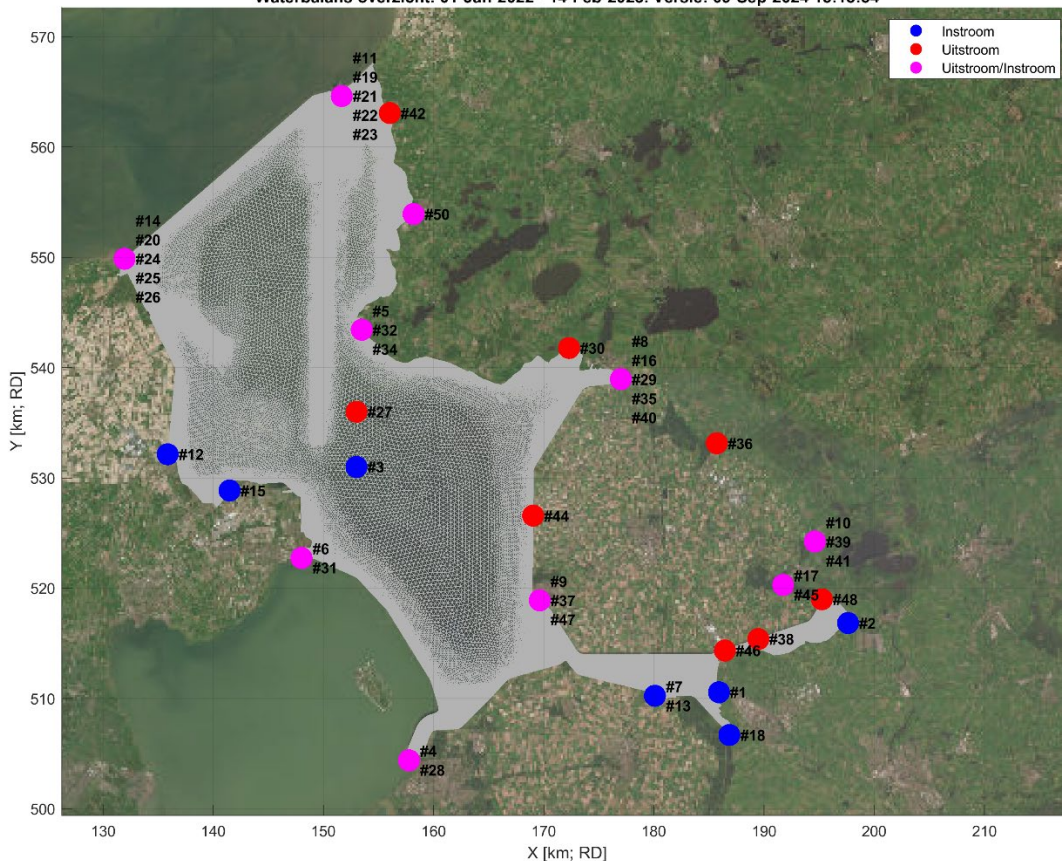
Figuur 4-20 Boven: Geschatte zoutgehalte in de buitenhaven van Kornwerderzand (rood) op basis van de gelegde relatie met de metingen bij Doove Balg West (blauw) en de spuidebieten bij Kornwerderzand (onder). De lichtblauwe lijn in het bovenste paneel toont het maximale gemeten zoutgehalte in de erosiekuil.

4.3.3 Overige debietrandvoorwaarden

Figuur 4-21 geeft een ruimtelijk overzicht van de lozingen en onttrekkingen die zijn opgenomen in de randvoorwaarden. De debieten zijn grotendeels gebaseerd op de aangeleverde data zoals beschreven in Bijlage A.1. Voor drie locaties waren voor 2022 geen debietgegevens beschikbaar. Voor deze locaties zijn daarom de maandelijkse debietgegevens gebruikt van 2018 vanuit BALANS (Eijsberg-Bak, 2020). BALANS is een pakket waarmee meerjarige waterbalansen zijn opgezet voor onder andere het IJsselmeer. Het gaat om de volgende locaties:

- Gemaal Vissering.
- In-uitlaat Stroink.
- Inlaat PWN (Andijk).

De locaties waar water het D-HYDRO model instroomt zijn gemarkeerd met een blauwe cirkel, locaties waar water wordt onttrokken met een rode cirkel en locaties waar zowel wordt geloosd als onttrokken met een roze cirkel. Onttrekkingen en lozingen die dicht bij elkaar liggen zijn samengevoegd in één cirkel. Neerslag (#3) en verdamping (#27) zijn weergegeven in het midden van het IJsselmeer maar toegepast op het oppervlak van het IJsselmeer (tot aan de Ketelbrug) waar onder normale omstandigheden altijd water staat. De nummers in de figuur corresponderen met de nummers in Tabel 4-2, waar voor iedere post de naam en het gemiddelde debiet over de periode 1 jan 2022 – 14 feb 2023 is gegeven.



Figuur 4-21 Ruimtelijk overzicht van alle debietrandvoorwaarden die zijn meegenomen in de modellering.

Tabel 4-1 Overzicht van de lozingen en de gemiddelde debieten over de periode jan 2022 – mid februari 2023. De laatste twee kolommen geven aan waar het chloridegehalte en watertemperatuur van de lozing op is gebaseerd. De nummering correspondeert met Figuur 4-21.

Lozingen				
ID	Naam	Gemiddeld debiet [m³/s] jan 2022 – mid feb 2023	(Bron voor) Chloridegehalte	(Bron voor) Temperatuur
#1	IJssel	314,5 (excl correctie, zie paragraaf 0)	Lobith	
#2	Genemuiden	46,9	KADOELERMEER (Zuiderzeeland)	
#3	Neerslag	29,5	n/a	n/a
#4	Houtribsluizen (Markermeer → IJsselmeer)	17,3	FL42b (Markermeer)	<ul style="list-style-type: none"> • FL42b (Markermeer): 1 jan 2022 – 12 nov 2022, • FL02: overig
#5	Hooglandgemaal	13,6	FL02	
#6	Krabbersgatsluizen (Markermeer → IJsselmeer)	6,1	FL42b (Markermeer)	<ul style="list-style-type: none"> • FL42b (Markermeer): 1 jan 2022 – 12 nov 2022, • FL02: overig
#7	Gemaal Colijn Laag	5,9	LAGE VAART (Zuiderzeeland)	
#8	Gemaal Buma	5,3	LEMSTERVAART (Zuiderzeeland)	
#9	Gemaal Vissering	4,9	URKERVAART (Zuiderzeeland)	
#10	Stroink	4,3	FL02	
#11	Lekkage spuimaalcomplex KWZ	2,5	Buitenhaven KWZ geschat, zie paragraaf 4.3.2	FL16
#12	Gemaal Lely	2,0	3000 mg/L (typische waarde)	FL02
#13	Gemaal Colijn-Hoog	1,9	HOGE VAART (Zuiderzeeland)	
#14	Lekkage spuimaalcomplex DO	1,5	Buitenhaven DO geschat, zie paragraaf 4.3.2	FL17
#15	Gemaal Grootslag	1,4	1000 mg/L (typische waarde)	FL02
#16	Woudagemaal	1,3	FL02	
#17	Gemaal Smeenge	0,8	ZWOLSEVAART (Zuiderzeeland)	
#18	Gemaal Roggebot	0,2	FL02	
#19	Nivelleerdebiet Grote Sluis KWZ	0,1	Vanuit ZSF, zie paragraaf 4.3.1	FL16
#20	Nivelleerdebiet sluis DO	0,1	Vanuit ZSF, zie paragraaf 4.3.1	FL17
#21	Nivelleerdebiet Kleine Sluis KWZ	0,0	Vanuit ZSF, zie paragraaf 4.3.1	FL16
	Totaal instroom	460,2		

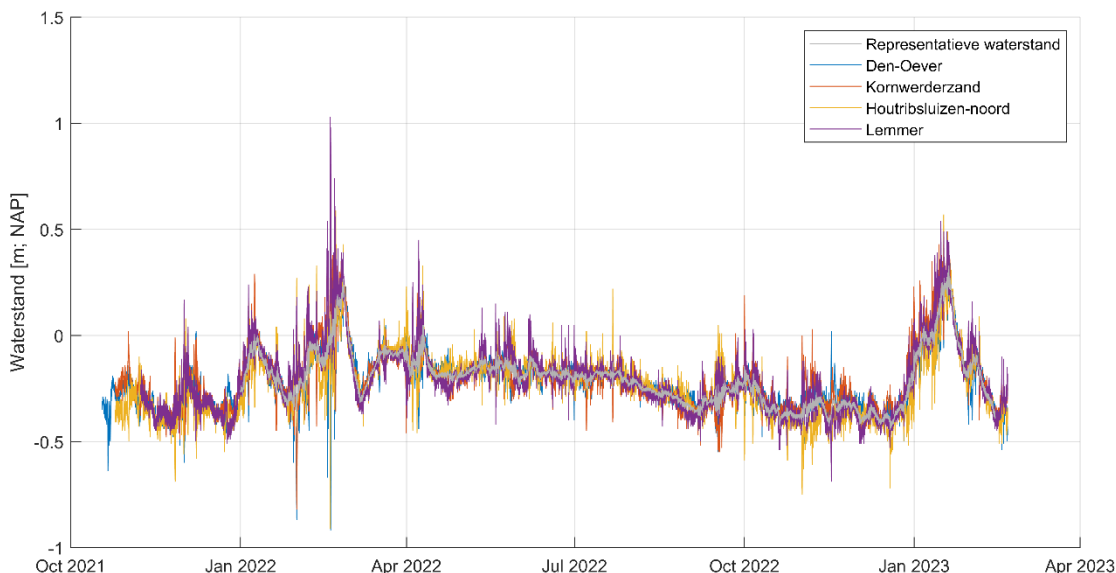
Tabel 4-2 Overzicht van de onttrekkingen en de gemiddelde debieten over de periode jan 2022 – mid februari 2023. De nummering correspondeert met Figuur 4-21.

Onttrekkingen		
ID	Naam	Gemiddeld debiet [m ³ /s] jan 2022 – mid feb 2023
#22	Lorentzsluizen Groep 1 (KWZ)	-109,1
#23	Lorentzsluizen Groep 2 (KWZ)	-108,7
#24	Stevinsluizen Groep 2 (DO)	-80,2
#25	Stevinsluizen Groep 1 (DO)	-66,1
#26	Stevinsluizen Groep 3 (DO)	-65,7
#27	Verdamping	-28,8
#28	Houtribsluizen (IJsselmeer → Markermeer)	-15,4
#29	Inlaat Teroelsterkolk	-8,1
#30	Inlaat Tacozijl	-6,3
#31	Krabbersgatsluizen (IJsselmeer → Markermeer)	-5,8
#32	Inlaat Hoogland	-5,7
#33	Inlaat PWN	-2,7
#34	Inlaat Johan Frisosluis	-1,7
#35	Inlaat Lemmer	-0,4
#36	inlaat-Kuinre	-0,3
#37	Hevel Waterval	-0,3
#38	Inlaat Ramspol	-0,3
#39	Inlaat Vollenhover	-0,2
#40	Inlaat Lemsterhop	-0,2
#41	Inlaat Blokzijl	-0,2
#42	Inlaat Makkum	-0,2
#43	Hevel Schapenpad	-0,2
#44	Hevel Geitenpad	-0,1
#45	Inlaat Waterloopbos	-0,1
#46	Hevel Neushoornweg	-0,1
#47	Hevel Urk	-0,1
#48	Hevel Kadoelen	-0,1
#49	Hevel Ettelandseweg	-0,0
#50	Inlaat Workum	-0,0
	Totaal onttrekking	-507,0

4.3.4 Sluitend maken van waterbalans

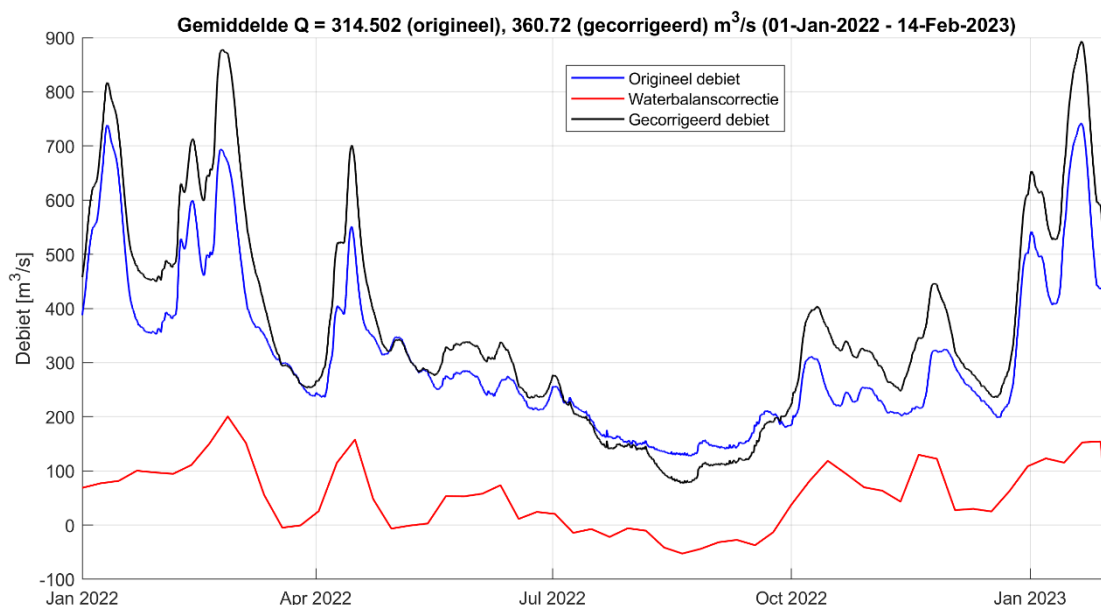
Zoals te zien in Tabel 4-1 en Tabel 4-2, wordt in de periode 1 januari 2022 – 14 februari 2023 op basis van de data ongeveer 47 m³/s meer onttrokken dan geloofd³. Dat is ongeveer 10% van de som van alle lozingen/onttrekkingen. Voor een realistische D-HYDRO berekening is het noodzakelijk om de waterbalans sluitend te maken. Het is aannemelijk dat de grootste fout in de waterbalans gerelateerd is aan de grootste posten. In het IJsselmeersysteem zijn dat de instroom van water vanuit de IJssel en de spuivolumes bij Den Oever en Kornwerderzand. De gemeten debieten bij de IJssel worden het meest onzeker verondersteld. Daarom is in deze studie gekozen om de waterbalans sluitend te maken door de debieten van de IJssel te corrigeren. Opgemerkt wordt dat voor de IJssel debieten gebruik is gemaakt van de gemeten afvoer bij Olst (vanuit IWP). Vervolgens is het gemeten debiet opgelegd bij de instroomrand in het model, nabij het Ketelmeer. Tussen Olst en de monding in het Ketelmeer zijn er nog diverse lozingen en onttrekking die nu niet expliciet zijn meegenomen.

Voor het berekenen van de benodigde tijd variërende correctie is allereerst de variatie in het meerpeil berekend. Dit is gedaan door een gewogen gemiddelde te nemen van de gemeten waterstand bij Den Oever, Kornwerderzand, Houtribsluizen Noord en Lemmer met een gewicht van respectievelijk 22%, 30%, 35% en 13% (zoals ook gebruikt in Genseberger (2023)), zie Figuur 4-22. Op basis van deze representatieve waterstand wordt op een 7-daags interval het netto volumeverschil berekend. Vervolgens wordt het debiet bij de IJssel dusdanig gecorrigeerd dat het totale volumeverschil o.b.v. de opgestelde randvoorwaarden in paragraaf 4.3.3 daaraan gelijk is, zie Figuur 4-23. De berekende waterbalanscorrectie vertoont een vergelijkbare trend als de oorspronkelijke debietsgegevens: de pieken in beide tijdseries vallen samen. Dit is echter geen bewijs dat de fout in de waterbalans geheel aan de IJsseldebieten ligt. Omdat het hier om een gecontroleerd systeem gaat en er sprake is van peilbeheer is de uitstroom (bij Den Oever en Kornwerderzand) grotendeels in lijn met de instroom bij de IJssel. De fout in de waterbalans zou op basis van deze observatie dus net zo goed kunnen komen door onzekerheden in de spuiregistraties bij Den Oever en Kornwerderzand. In de huidige studie is uiteindelijk geen testsimulatie meer uitgevoerd waarbij de spuidebieten zijn gecorrigeerd, vanwege het feit dat het model reken-technisch zeer zwaar is.



Figuur 4-22 Berekende representatieve waterstand in het IJsselmeer (grijs).

³ Op 14 februari 2023 is de waterstand ongeveer 13 cm lager dan op 1 januari 2022. Over de gehele periode gemiddeld wordt er in werkelijkheid dus ongeveer 4,4 m³/s meer onttrokken.



Figuur 4-23 Originele debiet vanuit de IJssel (blauw), benodigde waterbalanscorrectie (rood) en het gecorrigeerde debiet vanuit de IJssel (zwart) zoals toegepast in de D-HYDRO berekening.

4.4 Overige randvoorwaarden

4.4.1 Meteorologische condities

Voor de meteorologische forcering is in tegenstelling tot de voorgaande studies gebruik gemaakt van ruimte variërende meteorologische ERA5 data. De belangrijkste reden hiervoor is dat met een dergelijke databron de verticale flux van warmte en impuls beter kan worden meegenomen in de modellering. ERA5 bevat uurlijkse schattingen van de meteorologische condities op een grid met een resolutie van 0,25° (~30 km), wat relatief grof is in vergelijking met de ruimtelijke schaal van het IJsselmeer. Tijdens de studie is ook gewerkt aan het verzamelen van meteorologische forcering op basis van HARMONIE data. Een groot voordeel van HARMONIE is de hogere ruimtelijke resolutie van 2,5 km. Helaas ontbrak er data voor de periode van januari en februari 2023⁴, waardoor is besloten om verder te gaan met ERA5. De volgende ERA5 parameters zijn gebruikt:

- Luchtdruk: *mean_sea_level_pressure*
- Windsnelheden op 10 m hoogte: *10m_u_component_of_neutral_wind* en *10m_v_component_of_neutral_wind*
- Charnock coëfficiënt: *charnock*
- Dauwpunttemperatuur: *2m_dewpoint_temperature*
- Luchttemperatuur: *2m_temperature*
- Bewolingsgraad: *total_cloud_cover*
- Zoninstraling: *surface_net_solar_radiation*
- Langedolf instraling: *surface_thermal_radiation_downwards*

4.4.2 Initiële condities

De validatiesimulatie is gestart op 1 januari 2022 en liep door tot 13 februari 2023. Het voordeel van het starten in de winter is dat er sprake is van een relatief zoete beginconditie die het best aansluit bij een uniform initieel zoutgehalte. De volgende uniforme begincondities zijn gebruikt:

⁴ Ten tijde van het schrijven van de rapportage is er een dataset van HARMONIE43 (HA43) beschikbaar voor de periode oktober 2020 - september 2023.

- Waterstand: -0,26 m NAP (gewogen gemiddelde van 4 meetstations, zoals gebruikt bij het sluiten van de waterbalans, zie paragraaf 0).
- Zoutgehalte: 0,1915 psu (chloride: 106 mg/L).
- Temperatuur: 19,9 °C. Dit is uiteraard niet correct en had eigenlijk 4 a 4,5 °C moeten zijn. Gelukkig was het effect van de fout in de initiële temperatuur relatief snel (binnen enkele weken) uitgewerkt.

5 Validatie

5.1 Validatiemethodiek

Voor de validatie van het model is gekeken naar verschillende onderdelen:

- Waterstanden: Als eerste is gekeken of het representatieve meerpeil (gewogen gemiddelde van 4 meetstations) goed wordt weergegeven in het model (paragraaf 5.2.1), vervolgens wordt gekeken naar de validatie voor individuele meetstations (paragraaf 5.2.2). Als laatste is voor een selectie aan periodes met hogere windsnelheden gekeken hoe de gemodelleerde windopzet/afwaai zich verhoudt tot de metingen (paragraaf 5.2.3).
- Chloride: Voor het begrijpen van de zoutdynamiek in het model in relatie met de metingen wordt er op verschillende gebieden ingezoomd:
 - Erosiekuil Kornwerderzand.
 - Erosiekuil Den Oever.
 - Voorhaven en vaargeul Kornwerderzand.
 - Voorhaven en vaargeul Den Oever.
 - Vaargeul Makkum.
 - Middelgronden.
 - Andijk.
 - Overig.
- Temperatuur: de validatie voor temperatuur is aan de waterspiegel zeer eenduidig in het gehele meer. De validatie focust op één meetstation, maar ook de statistieken voor de andere meetstations worden gegeven.

De beoordeling van de prestatie van het model wordt zowel vanuit een kwalitatief oogpunt bekeken (e.g. komen trends overeen, zitten de noodzakelijk processen in het model, etc.) als vanuit een kwantitatief oogpunt (bias, RMSE, standaard deviatie, etc.). Voor de leesbaarheid van het rapport is ervoor gekozen om alleen een selectie aan figuren in het hoofdrapport op te nemen. De volledige set figuren wordt met deze rapportage meegeleverd. Deze set bevat de volgende figuren:

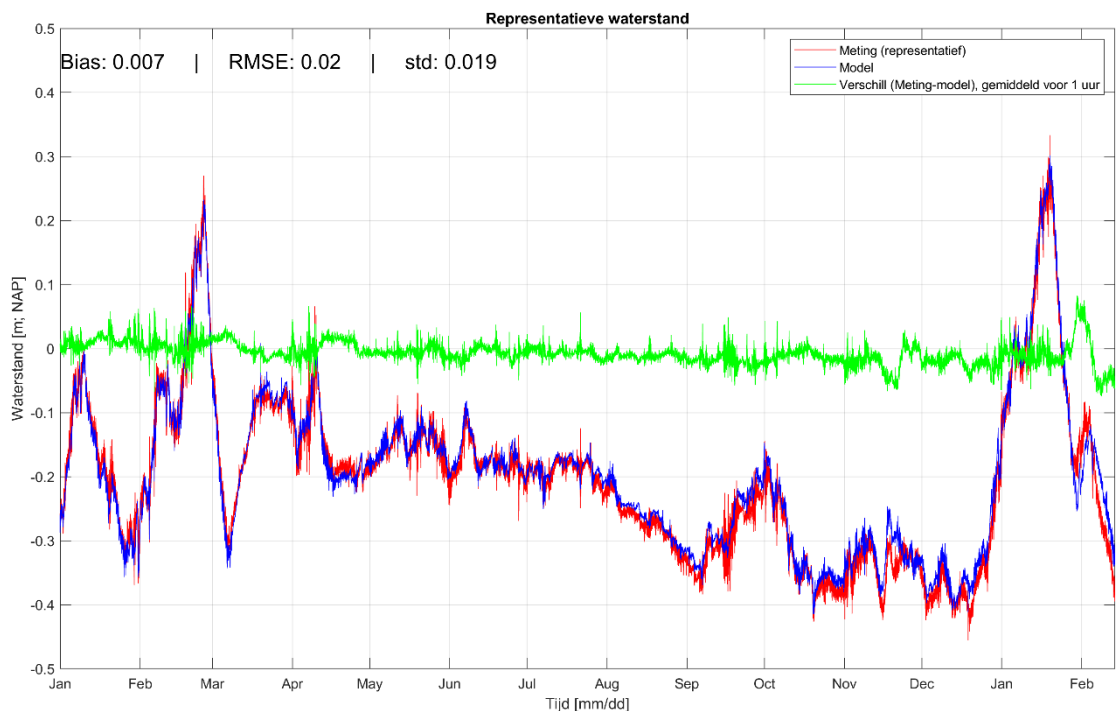
- Tijdseries van waterstanden, chloride en temperatuur (metingen + model) voor alle continue meetstations.
- ZT plots (metingen + model) voor chloride en temperatuur voor alle profielmetingen (mobiele metingen en gebiedsdekkende metingen) en voor alle continue meetstations (zonder de metingen).
- 2-dagelijkse verticale doorsnedes van de chloride en temperatuur langs verschillende trajecten (model + metingen (indien beschikbaar in die periode)). De doorsnedes zijn beschikbaar voor de volgende trajecten:
 - Erosiekuil Kornwerderzand.
 - Erosiekuil Den Oever.
 - Grote Sluis Kornwerderzand → verdiepte vaargeul.
 - Grote Sluis Kornwerderzand → vaargeul Makkum.
 - Sluiskolk Den Oever → vaargeul.
 - Sluiskolk Den Oever → erosiekuil Den Oever.
- 2-dagelijkse mapplots van het berekende oppervlakte en bodem chloridegehalte in het IJsselmeer. NB. Voor de watertemperatuur geven dergelijke plots weinig informatie wegens de geringe ruimtelijke variatie (zowel verticaal als horizontaal) ten opzichte van de dominante seizoensvariatie.
- 2-dagelijkse plots van vector en magnitude van het diepte geïntegreerde zouttransport in g/s/m. Alhoewel de tijdstap te groot is om veranderingen in

transportpatronen goed te kunnen volgen, geeft de set als geheel een goed beeld van de variabiliteit en van kenmerkende patronen.

5.2 Validatie waterstand

5.2.1 Check op waterbalans

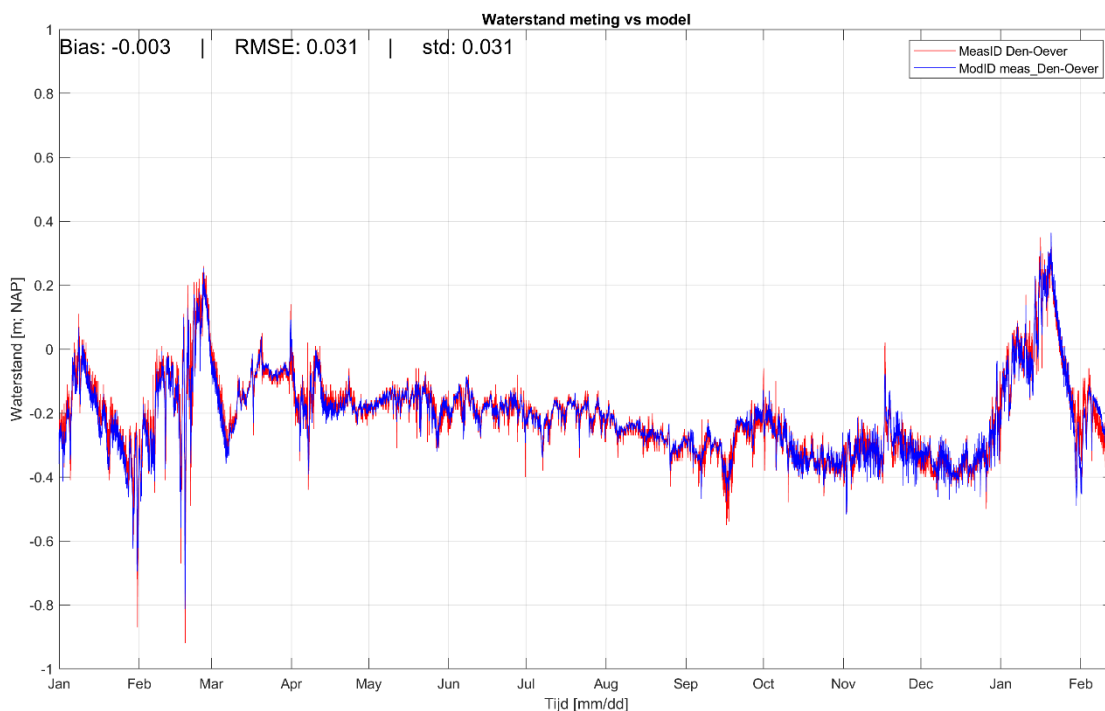
Voorafgaand aan het starten van de D-HYDRO simulatie is het debiet bij de IJssel gecorrigeerd om tot een gesloten waterbalans te komen, zie paragraaf 0. De correctie is uitgevoerd op basis van het 7-daags gemiddelde referentiepeil in het IJsselmeer. Voor het berekenen van het referentiepeil is een gewogen gemiddelde genomen van de gemeten waterstand bij Den Oever, Kornwerderzand, Houtribsluizen Noord en Lemmer met een gewicht van respectievelijk 22%, 30%, 35% en 13%, in overeenstemming met Genseberger et al. (2023). Figuur 5-1 toont een vergelijking tussen het gemeten en gemodelleerde referentiepeil. De figuur toont dat de waterbalanscorrectie goed is uitgevoerd en dat de trends in het model overeenkomen met de metingen. Afwijkingen tussen het gemeten en gemodelleerde referentieniveau kunnen komen doordat de correctie is opgelegd met een 7-daagse resolutie. Eventuele fouten in de waterbalans met een tijdschaal kleiner dan 7 dagen blijven daardoor zichtbaar in deze vergelijking. Daarnaast kunnen verschillen komen door een andere respons op wind in het model. Als laatste lijkt er een kleine trend in het verschil te zitten van enkele cm/jaar (groene lijn). Dit kleine verschil heeft geen significant effect op de validatie en is binnen deze studie niet verder geanalyseerd. Een mogelijk oorzaak zou kunnen zijn dat incidenteel minder water uit het model wordt onttrokken dan opgegeven in de randvoorwaarden vanwege 'extraction flux warnings'. In dergelijke gevallen is het uitstromende volume tijdens een rekentijdstap groter dan het totale volume van de lagen waaruit onttrokken wordt. Dit kan optreden bij hoge debieten in combinatie met grote tijdstappen.



Figuur 5-1 Vergelijking van het gemeten en gemodelleerde referentiepeil in het IJsselmeer. Voor het berekenen van het referentiepeil is een gewogen gemiddelde genomen van de gemeten waterstand bij Den Oever, Kornwerderzand, Houtribsluizen Noord en Lemmer met een gewicht van respectievelijk 22%, 30%, 35% en 13%.

5.2.2 Validatie stationsmetingen

Voor de waterstandvalidatie zijn vier meetstations beschouwd: Den Oever, Kornwerderzand, Lemmer en Houtribsluizen-Noord. Figuur 5-2 toont de vergelijking van de gemeten en gemodelleerde waterstand bij Den Oever (overige figuren zijn beschikbaar in meegeleverde set figuren). De lange termijn variatie wordt goed weergegeven. Op de details bij windopzet of -afwaai wordt in de volgende paragraaf nader ingegaan.



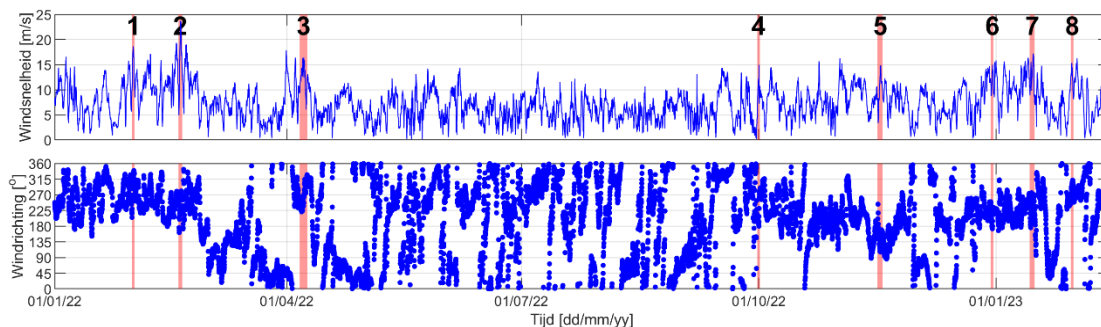
Figuur 5-2 Vergelijking van het gemeten en gemodelleerde waterstand bij Den Oever.

Tabel 5-1 Overzicht globale validatie waterstanden.

Meetstation	Bias [m]	RMSE [m]	Standaarddeviatie [m]
Den-Oever	-0,003	0,031	0,031
Kornwerderzand	0,007	0,035	0,034
Houtribsluizen-Noord	0,011	0,038	0,036
Lemmer	0,01	0,039	0,038

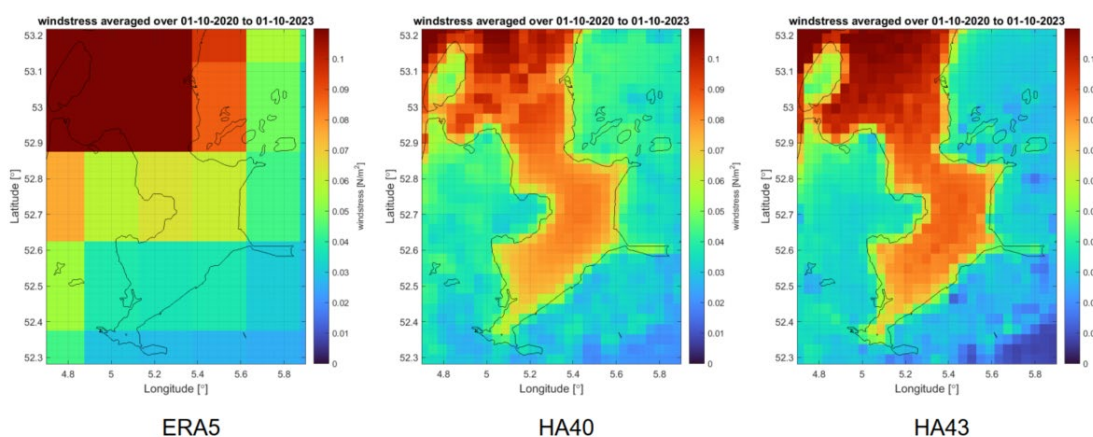
5.2.3 Validatie windopzet/afwaai

De prestatie van het model met betrekking tot het weergeven van windopzet/afwaai is geanalyseerd voor 8 periodes, zie Figuur 5-3. Gedurende deze periodes varieerde de maximale windsnelheid tussen de 15 m/s (windkracht 7) en 23 m/s (windkracht 9).



Figuur 5-3 Geselecteerde periodes voor analyse stormopzet. De windsnelheid en windrichting zijn gebaseerd op ERA5 data nabij Den Oever.

Figuur 5-5 toont een vergelijking tussen model en metingen op 18 februari 2022 (periode 2), beter bekend als storm Eunice. Op deze dag kwam wind vanuit ZW/W met een pieksnelheid van ongeveer 14 m/s. Tijdens de piek van de storm resulteerde de wind in een opzet van ongeveer 0,6 m (t.o.v. de 5-daags lopende gemiddelde waterstand) bij Kornwerderzand en 0,8 m bij Lemmer een afwaai van ongeveer -0,7 m bij Den Oever en -0,8 m bij de Houtribsluizen. Het model is in staat om de trends goed weer te geven. Echter worden de extremen in het model onderschat. Voornamelijk bij de Houtribsluizen en Lemmer wordt het extreme waterstandsverschil onderschat (onderschatting van 47 cm en 36 cm respectievelijk). Bij Den Oever en Kornwerderzand is deze fout kleiner (12 en 19 cm respectievelijk). De onderschatting van de opzet/afwaai is waarschijnlijk grotendeels veroorzaakt door de relatief lage ruimtelijke en tijdsresolutie van de windforcering. De ERA5 wind data geeft uurgemiddelde waarden, waardoor de pieken in windsnelheid onderschat kunnen worden. Daarnaast is de horizontale resolutie van de ERA5 data (ongeveer 30 km) niet voldoende om de water-land overgangen in het IJsselmeer goed weer te geven. Het gevolg is dat de windsnelheden onderschat worden in een groot gedeelte van het IJsselmeer, zie Figuur 5-4. Bij de Afsluitdijk komt de schuifspanning in ERA5 nog redelijk overeen met de meer gedetailleerde HARMONIE windvelden. Verder naar het zuiden is de onderschatting van de schuifspanning aanzienlijk. Dit kan mogelijk bijdragen aan de grotere onderschatting van de opzet/afwaaiing bij Lemmer en de Houtribsluizen vergeleken met de meetstations langs de Afsluitdijk.

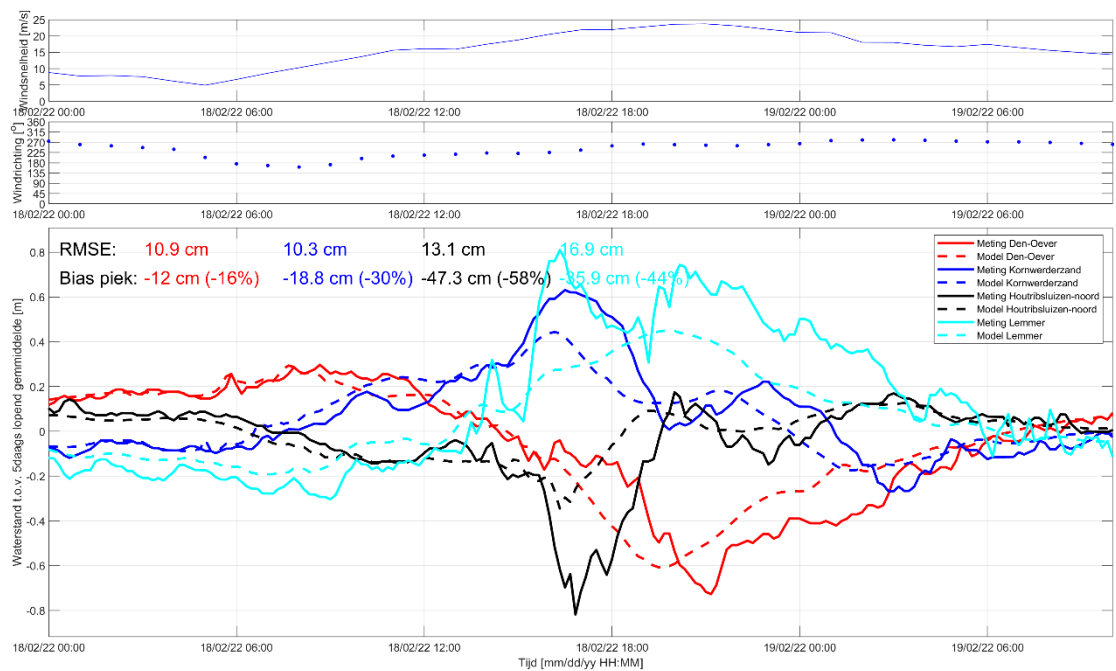


Figuur 5-4 Vergelijking schuifspanning door wind voor de periode oktober 2020 tot oktober 2023. Links: ERA5 (gebruikt in deze studie), midden en rechts: HARMONIE data. Bron: Zijl et al. (2024)

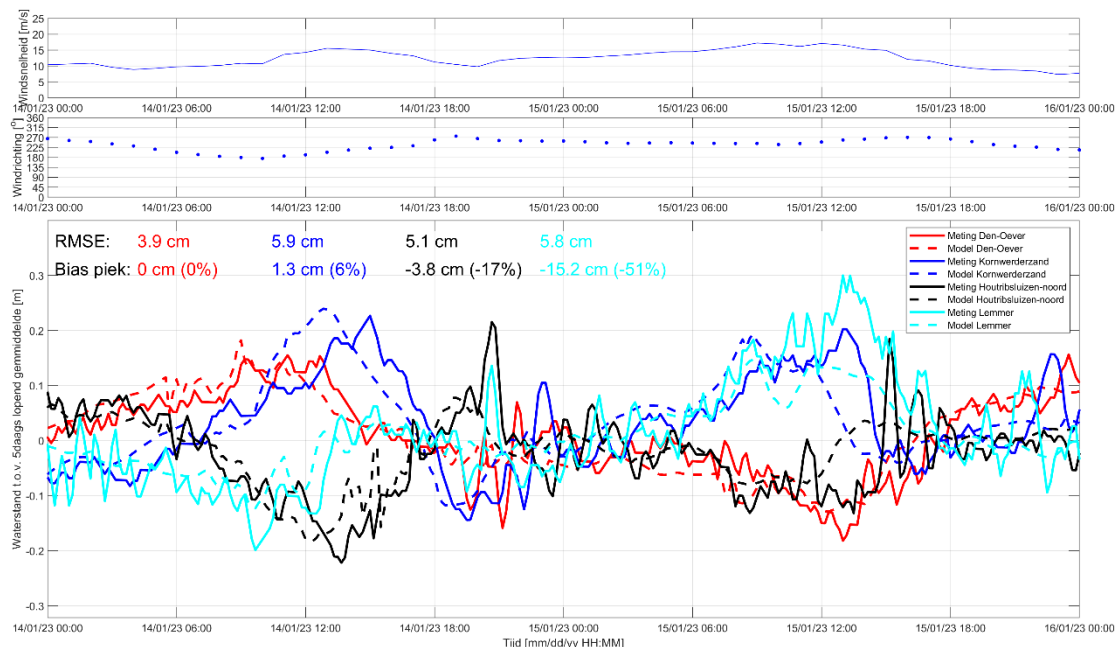
Figuur 5-6 toont het effect van wind op de waterstanden op 14 en 15 januari 2023. In deze periode bereikt de windsnelheid tweemaal een waarde van ongeveer 10 m/s. De waterstandsvariaties worden gedurende beide stormpieken goed weergegeven door het

model. De RMSE varieert per meetstation tussen de 4 en 6 cm. Alleen bij Lemmer wordt de windopzet significant onderschat (15 cm). Opgemerkt wordt dat het signaal bij Lemmer regelmatig een hoogfrequentie variatie bevat die niet in het model is weergegeven. Dat zou mogelijk te maken kunnen hebben met seiches die ontstaan door fluctuaties in druk/wind samen met de lokale geometrie. Dergelijke korte fluctuaties zijn in de huidige windrandvoorwaarden niet opgenomen (uurlijks). Daarnaast wordt opgemerkt dat het observatiepunt ter plaatse van het meetstation bij Lemmer in een inactieve cel ligt. Daarom is het dichtstbijzijnde actieve observatiepunt gekozen, welke niet in de haven, maar in het open water ligt. Ook dat laatste zou een deel van het verschil kunnen verklaren.

Tabel 5-2 geeft een overzicht van de statistieken voor alle 8 geselecteerde periodes. Voor de meeste periodes geldt dat de modelresultaten kwalitatief goed overeenkomen met de metingen (qua trend, timing en ruimte verschillen). De extremen worden echter structureel onderschat. De beste prestatie wordt geboekt bij Den Oever en Kornwerderzand. Op die locaties is de onderschatting van de maximale opzet/afwaai vaak in de orde van 0 tot 10 cm (0% tot 25%), met een uitschieter tot 20 cm. Bij Lemmer is de fout het grootst: onderschatting opzet/afwaai regelmatig tussen de 15 en 35 cm (40% tot 60%).



Figuur 5-5 Vergelijking gemeten en gemodelleerde waterstanden tijdens storm Eunice (periode 2 in Figuur 5-3). Bovenste paneel: windsnelheid o.b.v. ERA5 data, wat ook is gebruikt ter forcering, middelste paneel: windrichting, onderste paneel: gemeten en gemodelleerde waterstanden t.o.v. het 5-daags lopende gemiddelde voor Den Oever, Kornwerderzand, Houtribsluizen-Noord en Lemmer.



Figuur 5-6 Vergelijking gemeten en gemodelleerde waterstanden op 14 en 15 januari 2023 (periode 7 in Figuur 5-3). Bovenste paneel: windsnelheid o.b.v. ERA5 data, wat ook is gebruikt ter forcering, middelste paneel: windrichting, onderste paneel: gemeten en gemodelleerde waterstanden t.o.v. het 5-daags lopende gemiddelde voor Den Oever, Kornwerderzand, Houtribsluizen-Noord en Lemmer.

Tabel 5-2 Overzicht validatie windgedreven waterstandsvariaties.

Periode	Wind karakteristiek (bij Den Oever)	Den Oever		Kornwerderzand		Houtribsluizen-Noord		Lemmer	
		RMSE [cm]	Afwijking piek [cm]	RMSE [cm]	Afwijking piek [cm]	RMSE [cm]	Afwijking piek [cm]	RMSE [cm]	Afwijking piek [cm]
1: 31 jan – 1 feb 2022	19 m/s NW	10,8	-20,3 (-41%)	9,7	-20,5 (-40%)	11,7	-27,5 (-58%)	7,2	-21,5 (-63%)
2: 18-19 feb 2022	23 m/s ZW	10,9	-12 (-16%)	10,3	-18,8 (-30%)	13,1	-47,3 (-58%)	16,9	-35,9 (-44%)
3: 6-8 apr 2022	16 m/s W/ZW	4,5	-6,1 (-23%)	5,1	-5,5 (-21%)	5,6	-10,1 (-32%)	7,2	-26,5 (-60%)
4: 30 sep – 1 okt 2022	15 m/s ZW	4,4	-7,7 (-49%)	8,2	-6,4 (-17%)	6,6	-16,3 (-46%)	3,8	-6 (-47%)
5: 16 – 17 nov 2022	15 m/s ZO→ZW	3,9	-11,4 (-39%)	2,6	-2,6 (-16%)	3	-6,7 (-39%)	3,6	-10,7 (-41%)
6: 30 dec 2022	15 m/s Z	4,3	0,8 (+5%)	4,5	6,5 (+40%)	3,3	0,1 (+1%)	4,1	-1,3 (-10%)
7: 14-15 jan 2023	17 m/s ZW	3,9	0 (0%)	5,9	1,3 (6%)	5,1	-3,8 (-17%)	5,8	-15,2 (-51%)
8: 30 jan 2023	15 m/s NW	5,1	-0,2 (-1%)	4,3	-0,4 (-2%)	3,9	-9,2 (-47%)	3,5	-7,7 (-51%)

5.3 Validatie chloridegehalte

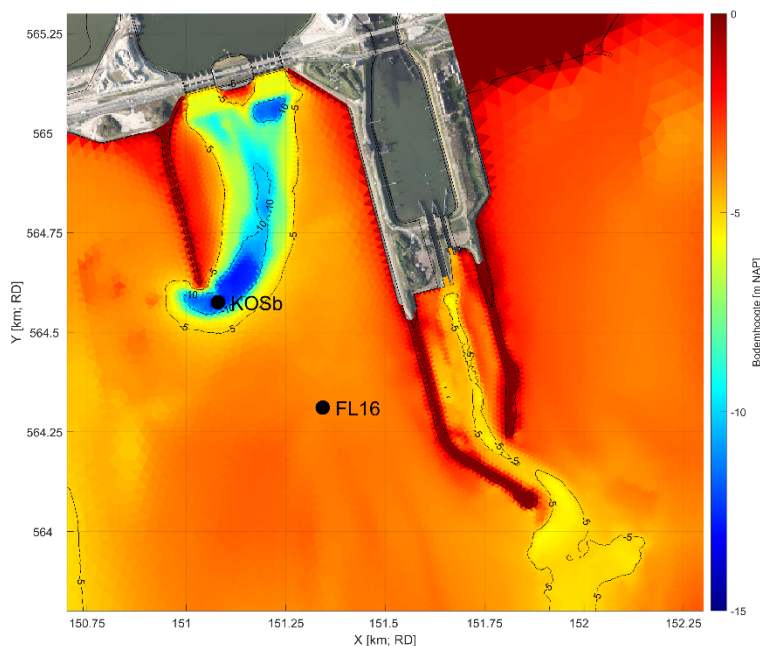
5.3.1 Overzicht validatie in alle vaste meetstations.

Van alle vaste meetstations (de stations met continue metingen) geeft Tabel 5-3 een overzicht van de globale validatiekentallen in de vorm van bias en Root-Mean-Square Error (RMSE). Voor beide kentallen geldt dat deze zijn berekend door eerst de gemodelleerde waarden op de gemeten tijdstippen te interpoleren. De bias geeft het gemiddelde verschil tussen de meting en het model. Een positieve bias betekent dat het model gemiddeld genomen hogere waarden berekent dan gemeten. De RMSE (wortel van de gemiddelde kwadratische fout) is een gebruikelijke parameter om de grootte van de afwijking weer te geven. Voor de traditionele stations die meten op -1,5 m NAP (FL17, FL48, FL16, FI38, FI09, FL02) levert dit een vrij consistent beeld op, met een bias van 3-15 mg/L en een RMSE van 26-58 mg/L (Dit is inclusief meeton nauwkeurigheden, zie bijv. de sprongen in de metingen na het reinigen van sensoren). Met name dicht bij de Afsluitdijk lopen de getallen voor dieper gelegen meetposities sterk uiteen. In de volgende subparagrafen worden de resultaten per deelgebied in meer detail besproken.

Tabel 5-3 Overzicht chloride validatie voor de vaste meetstations.

Globaal gebied	Meetstation	Verticale niveau	Gemiddelde chloridegehalte in meting [mg/L]	Chloride Bias [mg/L]	Chloride RMSE [mg/L]
Den Oever	OESb	-1.5 m t.o.v. waterspiegel	201	30	104
	OESmb	-4.5 m t.o.v. waterspiegel	2758	-505	1565
	OESmo	-5.6 m t.o.v. waterspiegel	3736	-92	1955
	OESo	-6.7 m t.o.v. waterspiegel	4465	-395	2329
	FL17	-1.5 m NAP	151	14	58
	OEVB	-2 m NAP	160	22	53
	OEVMb	-4 m NAP	201	10	195
	OEVMo	-5.5 m NAP	2175	-1315	2419
	OEVo	-7 m NAP	3072	-1790	2671
	FL48	-1.5 m NAP	119	7	27
Kornwerdzand	KOSb	-1.5 m NAP	199	70	145
	KOSmb	-4.5 m NAP	2350	257	1724
	KOSmo	-10.25 m NAP	4314	-649	2085
	KOSo	-12 m NAP	4662	177	2429
	FL16	-1.5 m NAP	135	1	36
	KOMB	-2 m t.o.v. waterspiegel	163	28	52
	KOMmb	-5 m t.o.v. waterspiegel	156	37	57
	KOMmo	-6 m t.o.v. waterspiegel	169	43	100
	KOMo	-7 m t.o.v. waterspiegel	1355	-856	1742
	KOVb	-2 m NAP	184	38	69
	KOVmb	-5 m NAP	3145	-576	1406
	KOVmo	-7 m NAP	6058	-2751	3249
KOVVo	-8.5 m NAP	7041	-2622	3452	
Overig	FL38	-1.5 m NAP	107	3	26
	FL09	-1.5 m NAP	105	15	34
	FL02	-1.5 m NAP	98	12	32

5.3.2 Erosiekuil Kornwerderzand



Figuur 5-7 Overzicht van de erosiekuil bij Kornwerderzand en de meetlocaties die in deze paragraaf besproken worden: KOSb, KOSmb, KOSmo, KOSo en FL16.

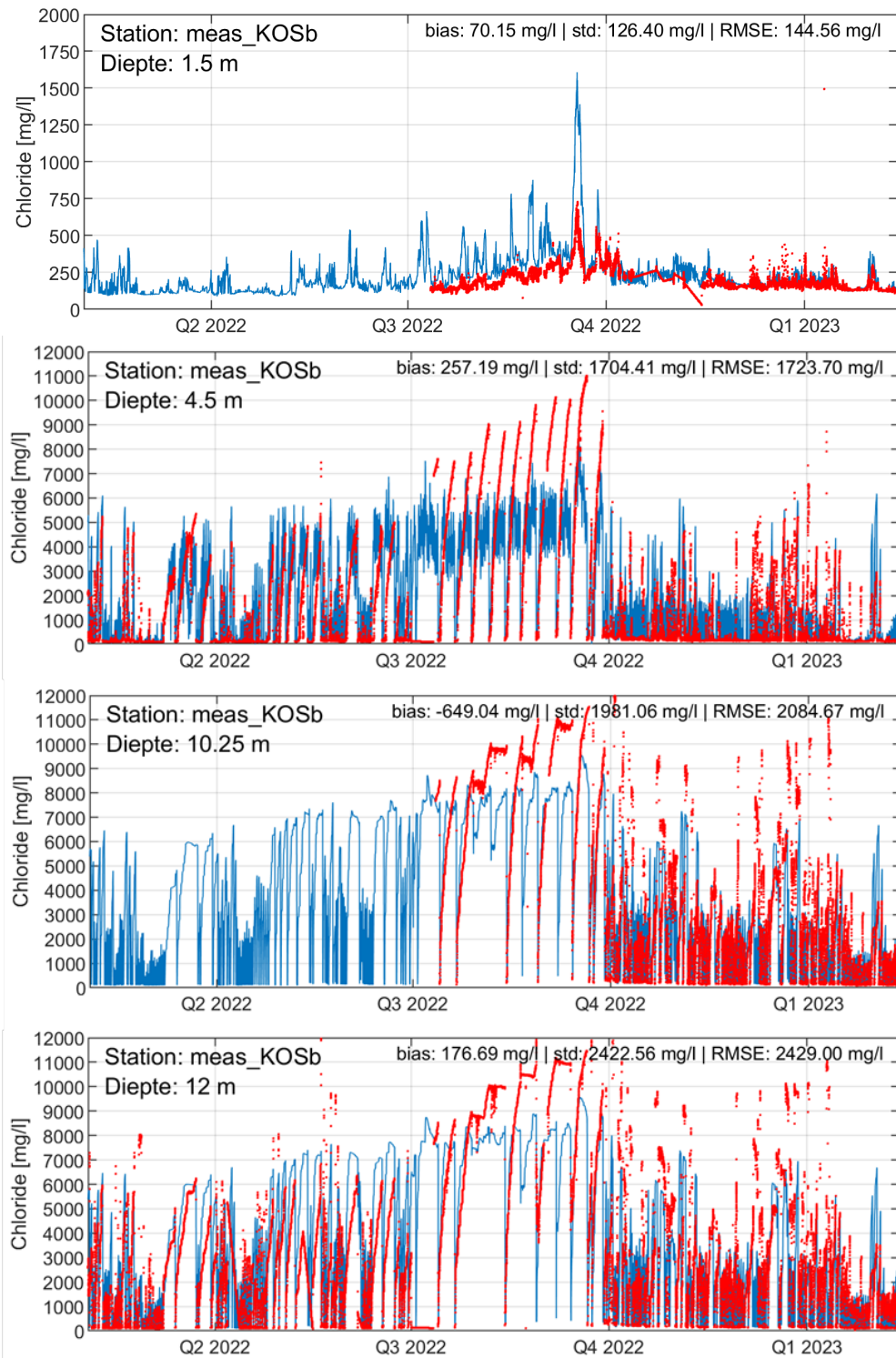
De zoutgehalten in de erosiekuil ter hoogte van de spuisluizen van Kornwerderzand worden beïnvloed door de lek die optreedt als de spuisluizen gesloten zijn en door de spuidebieten als ze geopend zijn. Figuur 5-8 geeft een vergelijking van het gemeten en gemodelleerde chloridegehalte in de erosiekuil op vier verschillende hoogtes: -1,5 m, -4,5 m, -10,25 m en -12 m NAP. Als we eerst alleen naar de metingen kijken vallen een aantal dingen op:

- Zoutgehalten zijn in de zomerperiode veel hoger dan daarbuiten. Dat komt voornamelijk vanwege de langere periodes waarin niet wordt gespuid. In die periodes kan de erosiekuil vollopen met zout zeewater vanwege de lek. Bovendien zijn de zoutgehalten aan zeezijde hoger in deze periode, omdat er minder zoet water wordt geloosd.
- Er kan een behoorlijke stratificatie optreden in de erosiekuil met chloridegehalten tot 12000 mg/L onderin de kuil en maximaal 750 mg/L aan het wateroppervlak.
- Een groot gedeelte van het zout wordt tijdens het spuien uit de diepere lagen onttrokken (indien de spuidebieten voldoende groot zijn). Na het spuien loopt de kuil weer langzaam vol.

De erosiekuil wordt door een drempel op een diepte van ongeveer -4,5 tot -5 m NAP gescheiden van de rest van het IJsselmeer. Op basis van het model lijkt het zoute water dat over de drempel stroomt grotendeels richting de geul bij de Middelgronden te stromen en soms voor een klein deel richting de vaargeul van Kornwerderzand. De exacte verhouding tussen beide gebieden kan niet kwantitatief worden bepaald, aangezien er geen gebruik is gemaakt van tracers in de modellering.

Het model is in kwalitatieve zin goed in staat om bovenstaande 3 observaties weer te geven. Op de diepere meetlocaties (-4,5, -10,25 en -12 m NAP) worden de chloridegehalten onderschat in de zomerperiode en licht overschat in de periode daarbuiten. Het gemodelleerde chloridegehalte is zeer gevoelig voor het zoutgehalte op zee en de grootte van het lekoppervlak. Beide parameters bevatten een grote onzekerheid. De zoutgehalten hangen sterk af van de voorgaande spui-intervallen. In deze studie is geprobeerd om dit in te

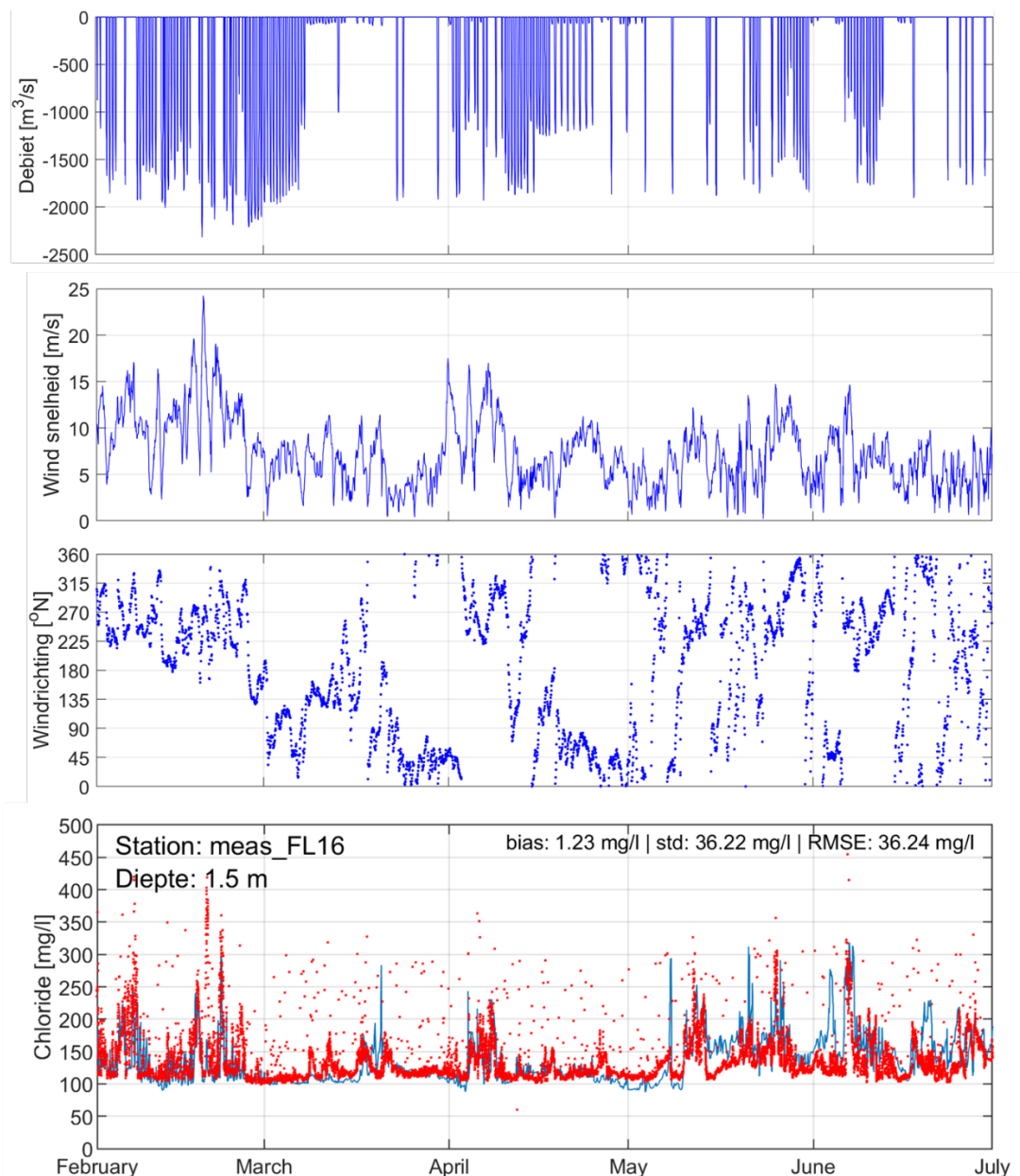
schatten met behulp van relaties op basis van een Waddenzeemodel, zie paragraaf 4.3.2. Naast de onzekerheid in de randvoorwaarden speelt mogelijk ook verticale menging een rol. Op basis van deze figuur ontstaat het idee dat er te veel verticale menging optreedt, mogelijk vanwege het relatief steile talud richting de erosiekuil. In de zomer wordt het zoutgehalte bijvoorbeeld overschat aan het wateroppervlak, terwijl op 4,5 m diepte (en dieper) het zoutgehalte wordt onderschat.



Figuur 5-8 Vergelijking gemeten (rood) en gemodelleerde (blauw) chloridegehalte bij de spuisluizen van Kornwerderzand (KOSb, KOSmb, KOSmo, KOSo). Voor het bovenste paneel zijn andere limieten gebruikt voor de verticale as!

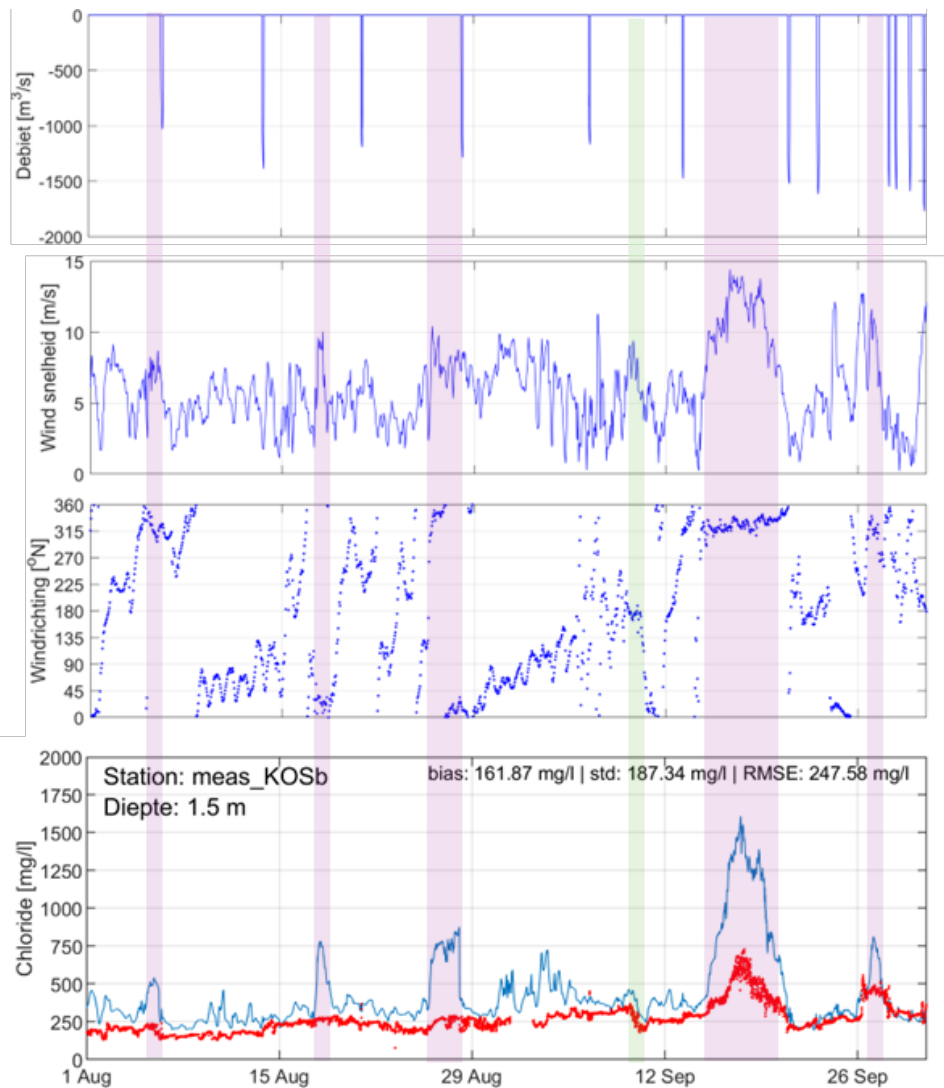
Figuur 5-9 toont de validatieresultaten voor chloride bij het meetstation FL16 (zie Figuur 5-7 voor de locatie). Het model geeft het chloridegehalte bij FL16 zeer goed weer. De periodes met hogere chloridegehalten vallen over het algemeen samen met periodes waarop minder wordt gespuid. In enkele gevallen (bijvoorbeeld mid-februari) vallen de pieken samen met verhoogde windsnelheden, waarbij zout deels verticaal wordt gemengd. Daarnaast kunnen de pieken deels veroorzaakt worden door toegenomen zoutlek vanwege de opzet aan zeezijde.

Opgemerkt wordt dat de metingen bij FL16 (en ook op enkele andere locaties) regelmatig zeer kortdurende uitschieters bevat (zie losse rode puntjes). Het is onbekend of dit komt door korte verhogingen van het chloridegehalte, of dat het om eventuele meetfouten gaat. In sommige gevallen zou de kortdurende verhoging gerelateerd kunnen zijn aan het te vroeg openen (of te laat sluiten) van de spuisluisdeuren.



Figuur 5-9 Boven: spuidebiet Kornwerderzand, 2^e paneel: windsnelheid, 3^e paneel: windrichting, onder: vergelijking gemeten (rood) en gemodelleerde (blauw) chloridegehalte bij FL16.

Figuur 5-10 (onder) zoomt in op het chloridegehalte in de maand augustus. Daarnaast toont de figuur ook de spuidebieten en de windkarakteristieken. De metingen laten een relatief stabiel chloridegehalte zien bij het wateroppervlak. Alleen in september neemt het zoutgehalte bij het wateroppervlak significant toe. Het model laat echter een grotere variatie zien, met ook meerdere pieken in augustus. De periodes waarbij het model verhoogde chloridegehalten laat zien zijn in het paars gemarkeerd. De pieken vallen samen met hogere windsnelheden vanuit NW tot NO. De windgedreven stroming (bovenlaag richting het zuiden) veroorzaakt verticale menging, en daarnaast mogelijk ook opwelling, waarbij zout vanuit diepere lagen het bovenste gedeelte van de waterkolom bereikt. Vervolgens wordt dit zout door de zuidelijke windgedreven stroming richting het meer getransporteerd. Bij een zuidelijke wind gebeurt het tegenovergestelde (zie bijvoorbeeld de met groen gemarkeerde periode). Bij een dergelijke windrichting wordt zoet water vanaf het meer richting de kuil/Afsluitdijk getransporteerd. Dat de toename van het zoutgehalte aan het wateroppervlak in werkelijkheid gebeurt wordt aangetoond door de gemeten pieken in september. Het model is hier echter gevoeliger voor. Dat kan deels verklaard worden door het feit dat de gemodelleerde stratificatie in de zomer zwakker is dan in de metingen (zie Figuur 5-8). Daardoor is er minder energie nodig om zout vanuit diepere lagen omhoog te woelen. Daarnaast kan het zijn dat de schuifspanning van de wind in het model wordt overschat door enerzijds een overschatting van de windsnelheid, of anderzijds, door het overschatting van de schuifspanning coëfficiënten. Hoewel paragraaf 5.2.3 concludeerde dat de windschuifspanning waarschijnlijk in het grootste gedeelte van het IJsselmeer wordt onderschat in de ERA5 data, geeft de vergelijking tussen HARMONIE en ERA5 (Figuur 5-4) de indruk dat rondom de Afsluitdijk het omgekeerde het geval kan zijn. Het is aannemelijk dat het model het chloridegehalte aan de waterspiegel beter zal weergeven als de stratificatie in de kuil beter wordt weergegeven.



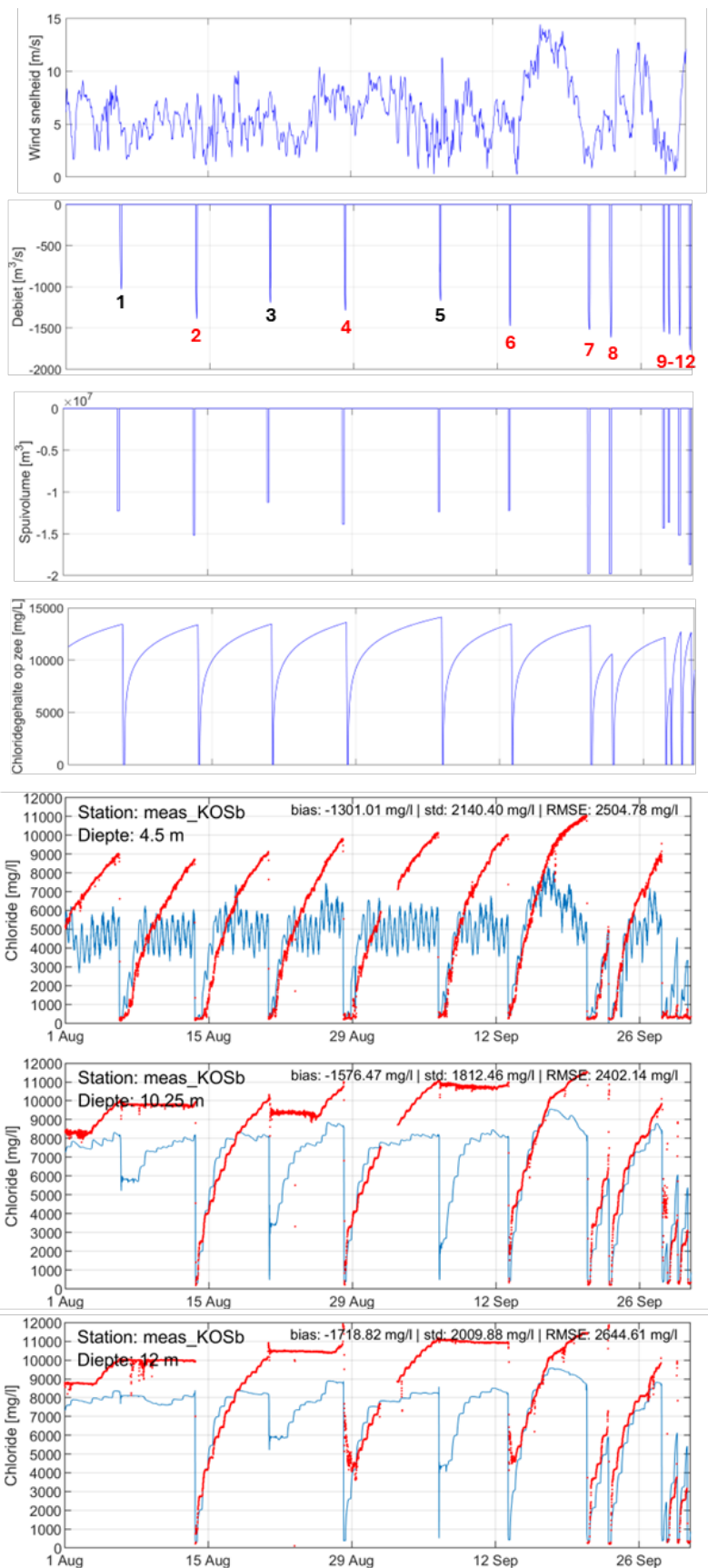
Figuur 5-10 Boven: Spuidebiet, 2^e paneel: windsnelheid in model, 3^e paneel: Windrichting in model, Onder: vergelijking gemeten (rood) en gemodelleerde (blauw) chloridegehalte aan het wateroppervlak (KOSb) bij de spuisluisen van Kornwerderzand.

Voor dezelfde periode (augustus en september 2022) wordt in Figuur 5-11 gekeken naar het chloridegehalte in het diepere gedeelte van de erosiekuil (vanaf -4,5 m NAP). Hierbij een opsomming van een aantal observaties:

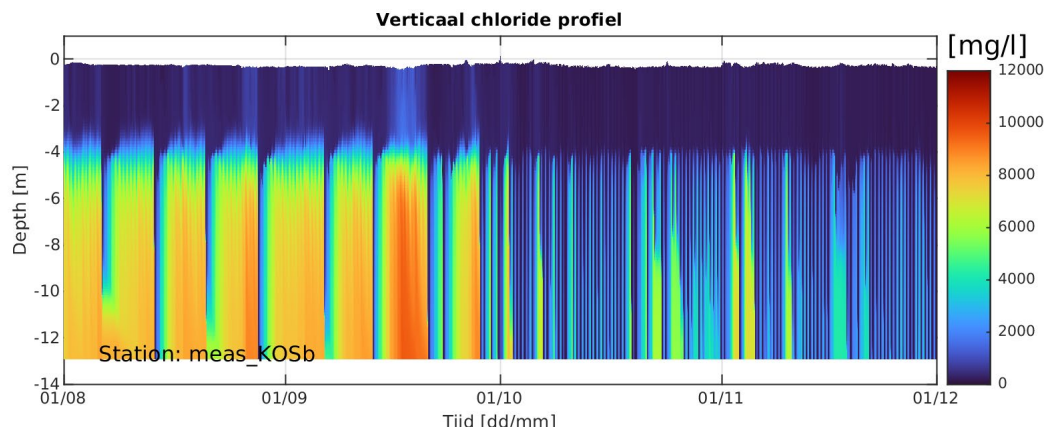
- Zoals hierboven opgemerkt wordt het chloridegehalte in het model onderschat.
- Zowel in de meting als in het model neemt het chloridegehalte direct na het eindigen van de spuiperiode snel toe. De snelheid waarmee het chloridegehalte toeneemt wordt goed weergegeven in het model.
- Zowel in de meting als het model bereikt het chloridegehalte na een aantal dagen een maximum. In het model wordt dit maximum eerder bereikt. Op -12 m NAP is het maximale chloridegehalte in het model typisch rond de 8000 tot 10000 mg/L, terwijl de metingen vaak stabiliseren rond 9000 tot 11500 mg/L. Deze onderschatting in het model is waarschijnlijk gerelateerd aan een mogelijke onderschatting van het zoutgehalte op zee en/of door een overschatting van de verticale menging tijdens het transport van zout water vanaf de lekopeningen (op ongeveer -4,7 m NAP) naar de bodem van de erosiekuil.
- Het 3^e paneel toont het aangenomen zoutgehalte op zee. Een dag na het eindigen van het spuien is het aangenomen zoutgehalte op zee rond de 10000 mg/L, waarna

het verder oploopt tot ongeveer 13000 - 14000 mg/L na een week. Het gemodelleerde zoutgehalte nabij de bodem van de erosiekuil is ongeveer 70% van het zoutgehalte van het inkomende water. Het is nog onbekend hoe het gemeten zoutgehalte onderin de kuil zich verhoudt tot het zoutgehalte aan de zeezijde van de spuisluizen, aangezien daar geen metingen van beschikbaar zijn.

- Op -4,5 m NAP laat het model een grotere korte termijn variatie zijn dan de metingen. Dat komt, omdat de pycnocline (overgang van zout naar zoet water) zich rond de -4,5 m NAP bevindt in het model (zie Figuur 5-12). In de metingen ligt de pycnocline hoger, waardoor er minder schommelingen te zien zijn.
- Het is interessant om te kijken naar de relatie tussen het zoutgehalte nabij de bodem (op -12 m NAP) en de spuidebieten. In de figuur zijn de spuidebieten genummerd. Tijdens de rood genummerde spuiperiodes is in de metingen een (gedeeltelijke) schoonspoeling te zien op -10,25/-12 m NAP. Tijdens de zwart genummerde spuiperiodes is nauwelijks tot geen schoonspoeling te zien op -10,25/-12 m NAP. Dit verschil in gedrag wordt volledig veroorzaakt door de verschillen in debieten. Dat kan het best worden aangetoond door spui 3 en 4 te vergelijken. De stratificatie net voor spui 3 en spui 4 is vergelijkbaar: 9000-10000 mg/L op -4,5 m NAP, 10000 – 11000 mg/L op -10,25 m NAP en -12 m NAP. Tijdens spui 3 is het maximale spuidebiet 1190 m³/s, tijdens spui 4 1290 m³/s. De situatie na spui 3 en spui 4 zijn echter volledig anders. Na spui 3 is het chloridegehalte op -12 m NAP onaangestast, terwijl na spui 4 het chloridegehalte met ongeveer 60% afneemt. Naast de maximale spuidebieten, is ook gekeken naar de totale spuibolumes. Deze lijken niet bepalend te zijn voor de mate van schoonspoeling. Vergelijk bijvoorbeeld spui 5 en 6. De totale spuibolumes zijn in beide gevallen rond de 12 miljoen m³ (iets groter zelfs in spui 5). Bij spui 5 vind er echter geen schoonspoeling plaats, terwijl er bij spui 6 een gedeeltelijke schoonspoeling plaats vindt. Dit verschil in respons kan wel verklaard worden als er wordt gekeken naar de maximale spuidebieten. Deze details geven aan hoe gevoelig de zoutdynamiek is voor kleine veranderingen in debiet en daarmee de complexiteit van het modelleren van deze processen. Op basis van van Veen (2021) gaat RWS uit van een benodigd spuidebiet van 1500 m³/s voor het schoonspoelen van de erosiekuil. De bevindingen hierboven komen daar goed mee overeen.
- De wind heeft maar beperkte invloed op het chloridegehalte in de diepere lagen van de erosiekuil in tegenstelling tot bij de waterspiegel.

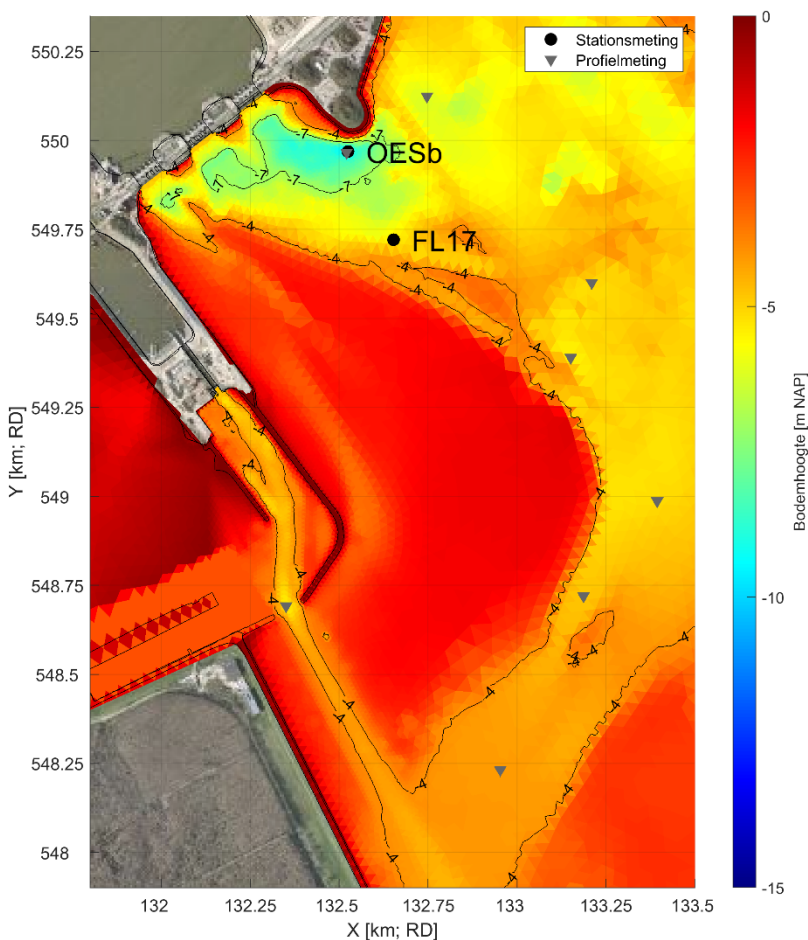


Figuur 5-11 Boven: Windsnelheid in model, 2^e paneel: Spuidebiet, 3^e paneel: Spuivolume, 4^e paneel: aangenomen zoutgehalte op zee voor, daaronder: vergelijking gemeten (rood) en gemodelleerde (blauw) chloridegehalte op -4,5, -10,23 en -12 m NAP bij de spuilsuizen van Kornwerderzand.



Figuur 5-12 Z-T diagram voor chloride bij meetstation KOS*. De metingen zijn in deze figuur niet weergegeven.

5.3.3 Erosiekuil Den Oever



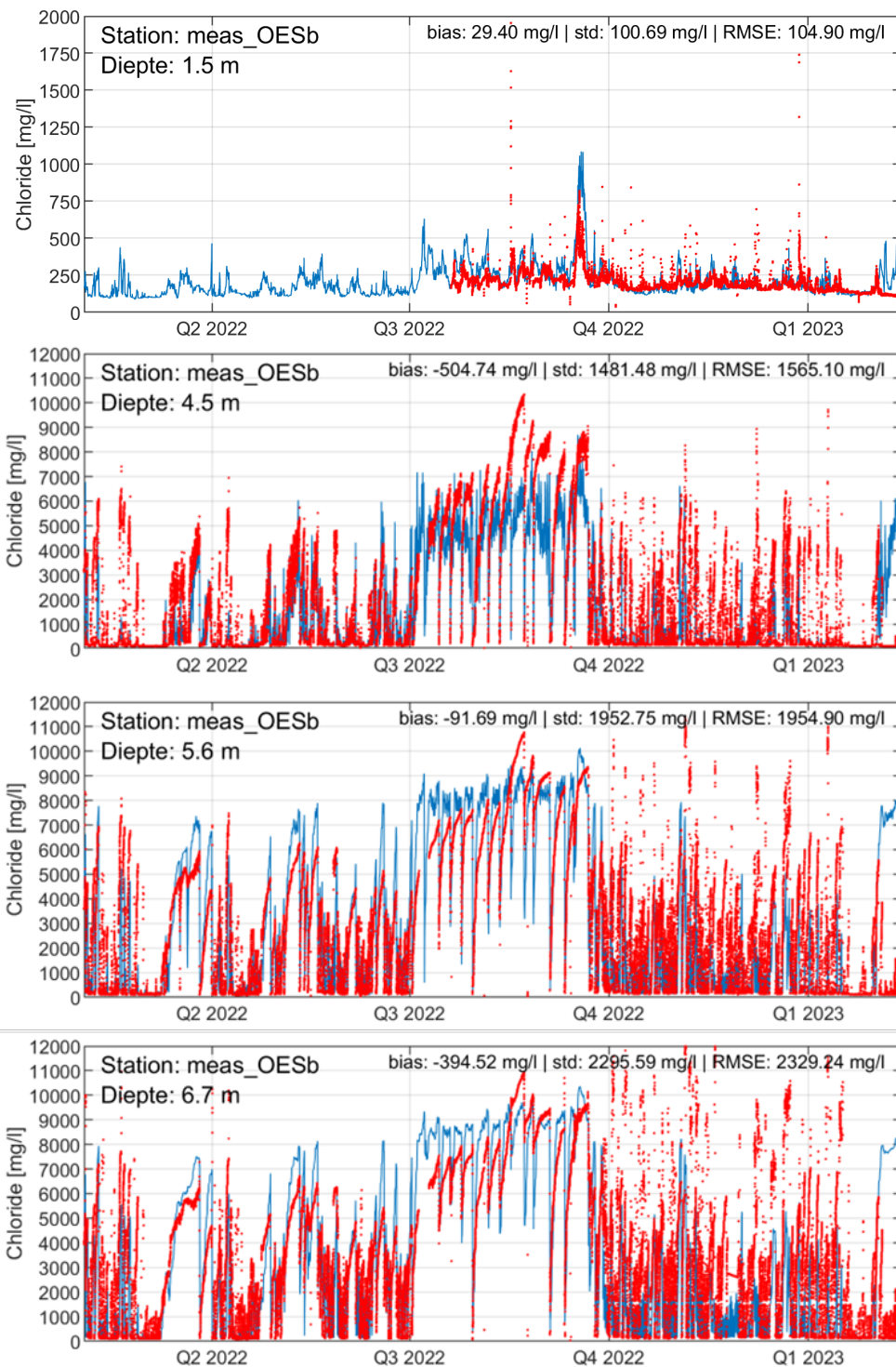
Figuur 5-13 Overzicht van de erosiekuil bij Kornwerderzand en de meetlocaties die in deze paragraaf besproken worden: OESb, OESmb, OESmo, OESo en FL17.

Vergelijkbaar met de erosiekuil bij Kornwerderzand, worden de zoutgehalten in de erosiekuil ter hoogte van de spuisluizen van Den Oever beïnvloedt door de lek die optreedt als de spuisluizen gesloten zijn en door de spuidebieten als ze geopend zijn. Figuur 5-14 geeft een vergelijking van het gemeten en gemodelleerde chloridegehalte in de erosiekuil op vier verschillende hoogtes: -1,5 m, -4,5 m, -5,6 m en -6,7 m ten opzichte van de waterspiegel. Op

basis van de metingen kunnen veelal dezelfde conclusies getrokken worden als voor de erosiekuil bij Kornwerderzand (paragraaf 5.3.2), zoals: hoger zoutgehalte in de zomer door langere periodes zonder spuien, grote verschillen in zoutgehalte tussen waterspiegel en dieper in de kuil, schoonspoelen van de kuil tijdens het spuien. De verschillen ten opzichte van de erosiekuil bij Kornwerderzand zijn:

- De erosiekuil bij Den Oever is minder diep (max -9,4 m NAP, tegenover -13 m NAP bij Kornwerderzand)
- De algemene indruk is dat het gebied van de erosiekuil bij Den Oever meer is afgeschermd, maar wel verbonden met de vaargeul, terwijl bij Kornwerderzand er een meer open verbinding is (wel met drempel) naar de geul van de Middelgronden, en geen duidelijke verbinding met de vaargeul.

Het model is zowel in kwalitatieve als kwantitatieve zin goed in staat om de gemeten chloridegehalten bij Den Oever te reproduceren. De prestatie van het model is in dit gebied beter dan bij de erosiekuil van Kornwerderzand. De goede weergave is opmerkelijk aangezien er veel aannames aan ten grondslag liggen. Zoals verder uitgewerkt in paragraaf 5.3.2, zijn zowel het lekoppervlak (bepaald de lekdebieten) als het zoutgehalte op zee onzeker. Op basis van kleinschaligere testmodellen is uiteindelijk voor een combinatie van lekoppervlak (opening van 20x20 cm op iedere hoek van iedere koker) en zoutgehalte op zee gekozen die het best leek te presteren. Uiteindelijk blijkt de weergave in het grootschalige 3D IJsselmeermodel vergelijkbaar met de eerdere testsimulaties. Indien een verbetering van de modelprestatie wordt nagestreefd is het belangrijk om deze randvoorwaarden met meer zekerheid vast te kunnen stellen door bijvoorbeeld metingen.

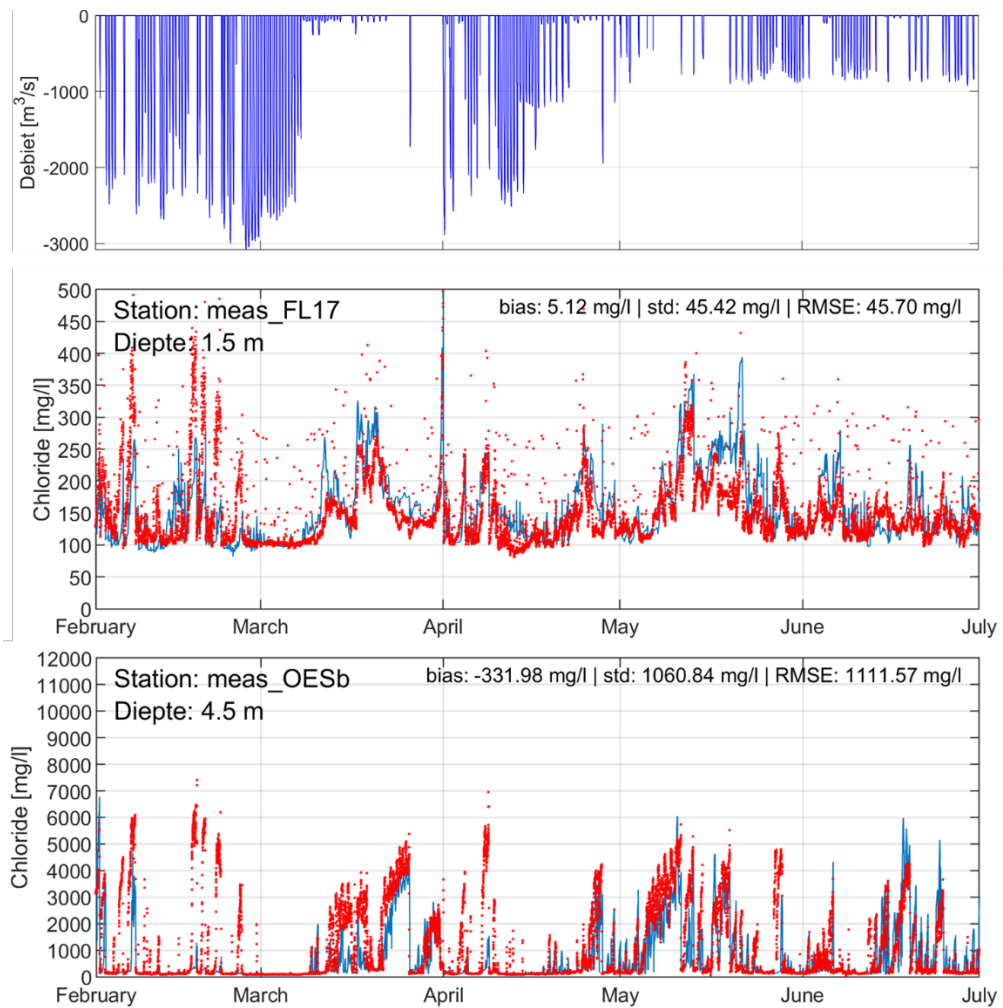


Figuur 5-14 Vergelijking gemeten en gemodelleerde chloridegehalten bij de spuiscuizen van Den Oever (OESb, OESmb, OESmo, OESo). Voor het bovenste paneel zijn andere limieten gebruikt voor de verticale as!

Figuur 5-15 toont de validatieresultaten voor chloride bij het meetstation FL17 (zie Figuur 5-49 voor de locatie). In het onderste paneel zijn ook de tijdsreeksen voor OESmb (-4,5⁵ m t.o.v. de waterspiegel) toegevoegd ter interpretatie. Het model geeft het chloridegehalte bij FL17 zeer goed weer. De periodes met hogere chloridegehalten vallen over het algemeen samen

⁵ Metingen op -1,5 m t.o.v. de waterspiegel zijn niet beschikbaar voor deze periode.

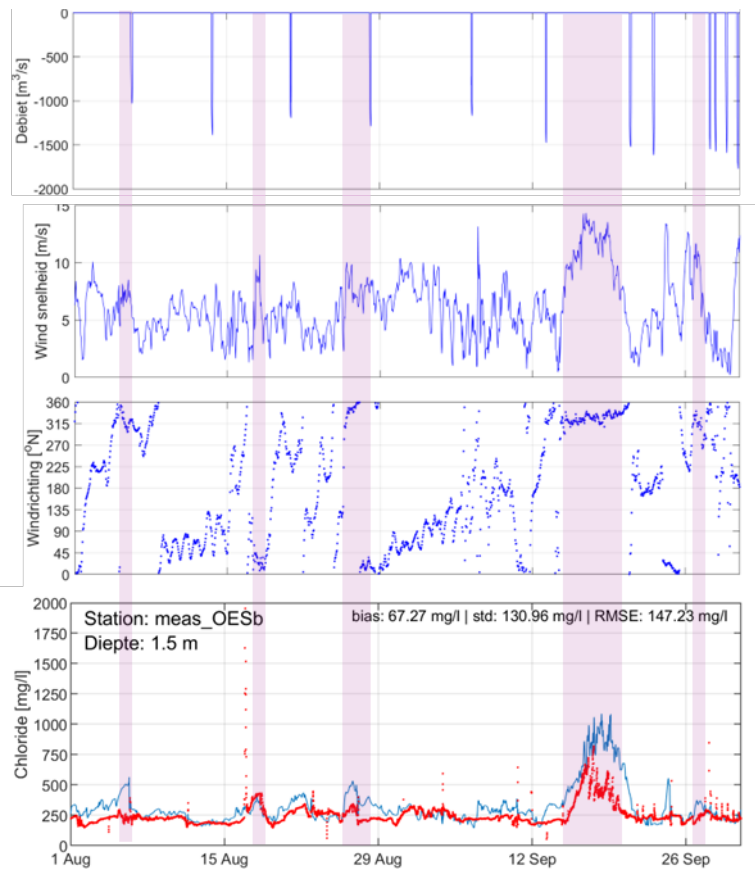
met periodes waarop minder wordt gespuid. In enkele gevallen (bijvoorbeeld mid-februari) vallen de pieken samen met verhoogde windsnelheden, waarbij zout deels verticaal wordt gemengd.



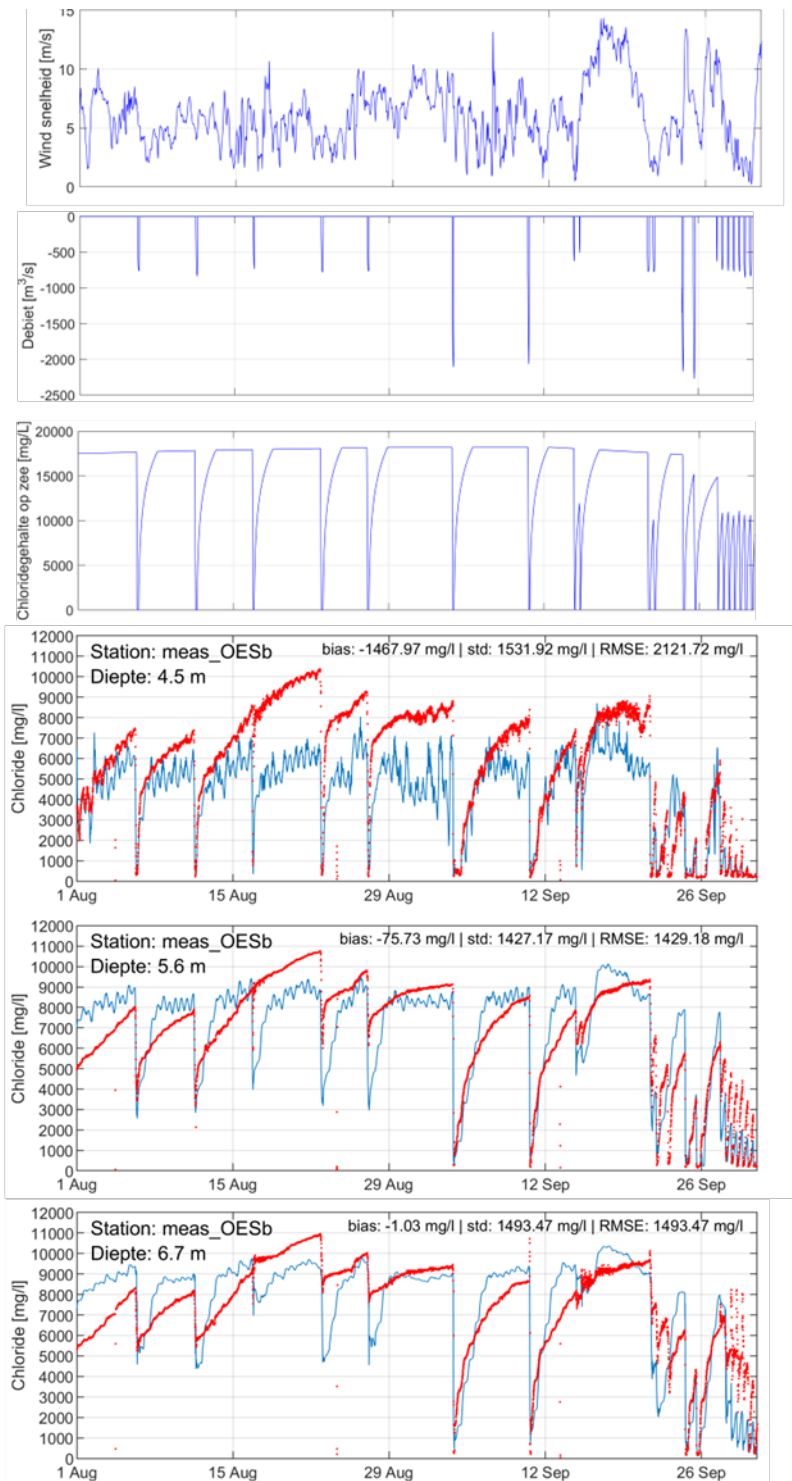
Figuur 5-15 Boven: spuidebeten bij Den Oever, midden: vergelijking gemeten (rood) en gemodelleerde (blauw) chloridegehalte bij FL17, onder: vergelijking gemeten (rood) en gemodelleerde (blauw) chloridegehalte bij OESbm (-4,5 m t.o.v. de waterspiegel).

In Figuur 5-16 zoomen we nog even verder in op de periode augustus-september. Het onderste paneel toont het gemeten en gemodelleerde chloridegehalte bij OESb (-1,5 m beneden de waterspiegel). De andere panelen tonen de spuidebeten en de windkarakteristieken. Zowel in het model als in de metingen is te zien dat de pieken in chloridegehalte samenvallen met periodes met hogere windsnelheden (aangegeven in het paars) vanuit NW – NO. Zoals ook beschreven in paragraaf 5.3.2 wordt er bij deze windkarakteristieken zout vanuit de diepere lagen verticaal gemengd. Dat de chloridegehalten aan het wateroppervlak beter worden weergegeven dan bij Kornwerderzand is waarschijnlijk gerelateerd aan het feit dat de stratificatie in de erosiekuil beter is weergegeven in het model. Het is dus waarschijnlijk dat de overschatting bij Kornwerderzand gerelateerd is aan het onderschatten van de stratificatie en waarschijnlijk in mindere mate aan een overschatting van de schuifspanning door wind, aangezien dezelfde windforcering is gebruikt bij Den Oever (hoewel de windschuifspanning bij Den Oever en Kornwerderzand kan verschillen door ruimte interpolatie). Opgemerkt wordt dat lokale effecten (e.g. opbouw

van de windgrenslaag) van de Afsluitdijk en/of strekdammen op de wind niet is meegenomen in het model.



Figuur 5-16 Boven: Spuidebiet, 2^e paneel: windsnelheid in model, 3^e paneel: Windrichting in model, Onder: vergelijking gemeten (rood) en gemodelleerde (blauw) chloridegehalte aan het wateroppervlak (OESb) bij de spuilsuizen van Den Oever.

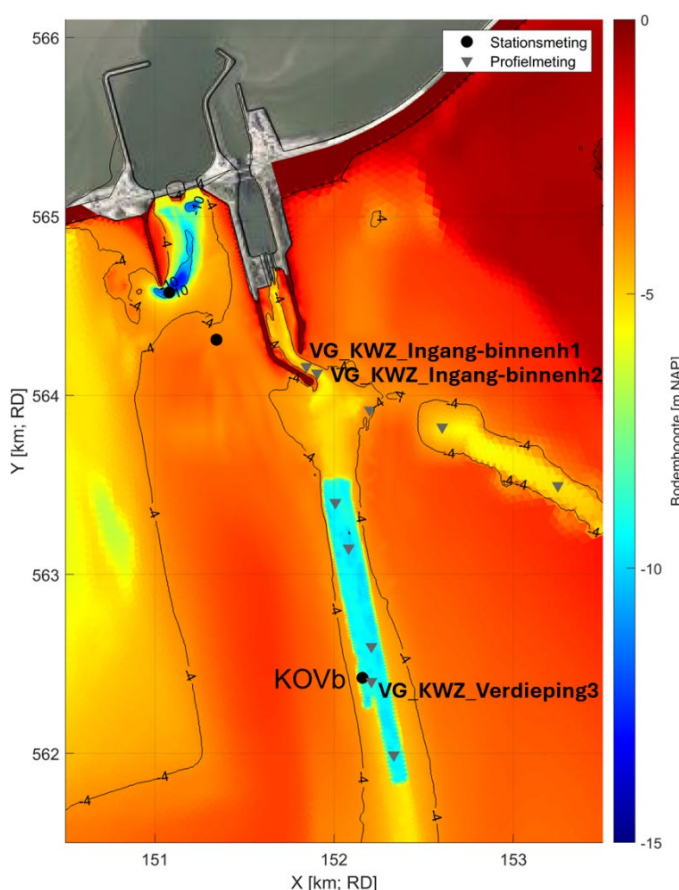


Figuur 5-17 Boven: Windsnelheid in model, 2^e paneel: Spuidebiet, 3^e paneel: aangenomen zoutgehalte op zee voor, daaronder: vergelijking gemeten (rood) en gemodelleerde (blauw) chloridegehalte op -4,5, -5,6 en 6,7 m t.o.v. de waterspiegel bij de spuisluizen van Den Oever.

Voor dezelfde periode (augustus en september 2022) wordt in Figuur 5-17 gekeken naar het chloridegehalte in het diepere gedeelte van de erosiekuil (vanaf -4,5 m t.o.v. de waterspiegel). Voor een groot gedeelte komen de observaties overeen met de observaties bij Kornwerderzand (paragraaf 5.3.2). Specifiek voor Den Oever vallen de volgende observaties op:

- Het model geeft het zowel de trend als de absolute waarden van het chloridegehalte op -5,6 en -6,7 m goed weer.
- Op -4,5 m onderschat het model het chloridegehalte en is er een grotere korte termijn variatie. Dat komt, omdat de pycnocline (overgang van zout naar zoet water) zich rond de -4,5 m bevindt in het model. In de metingen ligt de pycnocline hoger, waardoor er minder schommelingen te zien zijn. Dit kan een aanwijzing zijn dat de windschuifspanning toch te hoog is.
- De mate van schoonspoeling in de diepere lagen hangt af van het spuidebiet. In de data voor Kornwerderzand bleek dat dit een hele gevoelige relatie is. Bij Den Oever, waar de kuil minder diep is, wordt deze relatie zeer goed weergegeven in het model. Bij hoge debieten (eerste twee weken van september) wordt de kuil in zijn geheel schoongespoeld. Bij de lagere debieten vindt er een gedeeltelijke schoonspoeling plaats. Dit gedrag komt goed overeen met de analyses in van Veen (2021).
- Het chloridegehalte in het diepere gedeelte is vaak gelimiteerd tot ongeveer 8000 – 10000 mg/L. Het aangenomen maximale chloridegehalte op zee is in deze periode vaak rond de 17000-18000 mg/L. Over het algemeen is het zoutgehalte in de kuil dus ongeveer 50% van het chloridegehalte op zee. Bij Kornwerderzand is deze ratio hoger (ongeveer 70%). Dat komt waarschijnlijk voornamelijk vanwege het verschil in diepte tussen beide erosiekuilen. De kuil bij Kornwerderzand is dieper, waardoor er minder verticale menging optreedt tussen de diepere laag en het zoete bovenste gedeelte van de waterkolom. Overigens kan deze ratio niet worden gestaafd met de werkelijkheid aangezien er geen continue metingen zijn van het zoutgehalte op zee ter hoogte van de spuisluisen.

5.3.4 Binnenhaven en vaargeul Kornwerderzand



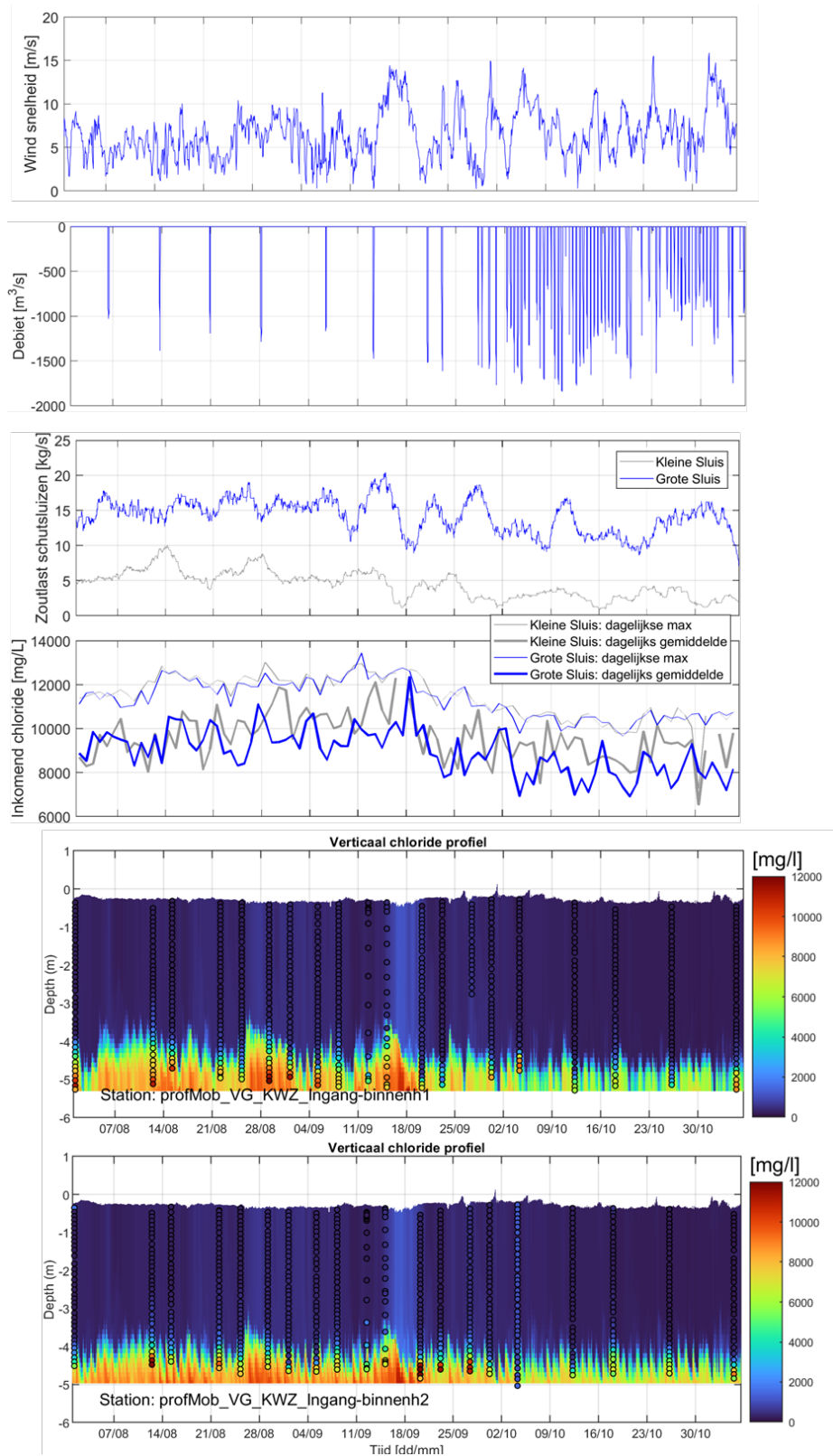
Figuur 5-18 Overzicht van de schutsluizen van Kornwerderzand en de vaargeul richting het zuiden. Ook de locatie van de meetstations die in deze paragraaf besproken worden zijn weergegeven.

De zoutgehaltes in de vaargeulen van Kornwerderzand en Makkum worden voornamelijk bepaald door de zoutlast vanuit de Grote en Kleine Sluis van Kornwerderzand. In de monding van de Binnenhaven zijn in de periode van 20 juli 2022 t/m 24 jan 2023 meerdere profielmetingen gedaan. Voornamelijk in de periode augustus - september 2022 werden deze metingen regelmatig uitgevoerd (gemiddeld eens per 4 dagen). In Figuur 5-19 worden gemeten profielen in de monding van de Binnenhaven vergeleken met het model. De locaties van beide profielmetingen (VG_KWZ_Ingang-binnenh1 en VG_KWZ_Ingang-binnenh2) zijn weergegeven in Figuur 5-18.

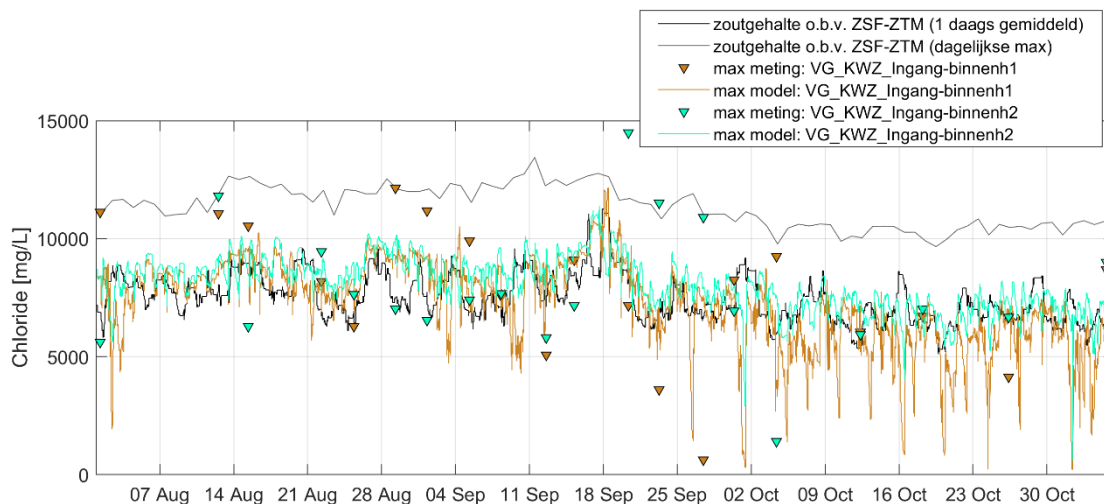
Op basis van de metingen kan gesteld worden dat er over het algemeen een dunne zoute laag aanwezig is boven de bodem met een dikte variërend tussen de 0,5 m en 1,5 m en een chloridegehalte van 5000 mg/L tot 12000 mg/L (één uitschieter tot 14000 mg/L). De dikte van de zoute laag wordt in het model over het algemeen goed voorspeld, op incidentele verschillen nagelaten. Het maximale chloridegehalte (vaak onderste 0,5 m) wordt in het model regelmatig met ongeveer 1000 tot 3000 mg/L onderschat. Een onderschatting van het chloridegehalte is waarschijnlijk gerelateerd aan de randvoorwaarde bij de sluisdeuren die met behulp van het ZSF-ZTM model zijn opgezet (zie paragraaf 4.3.1.1). Eén van de grootste onzekerheden hierin is het aangenomen zoutgehalte op zee. Een andere mogelijke oorzaak is de veronderstelling van volledige verticale menging in het ZSF-ZTM model, aangezien het een 1D model is. Een eventuele stratificatie in de sluiskolk wordt in deze berekening en daarom in de randvoorwaarden dus niet meegenomen.

In Figuur 5-20 wordt verder ingezoomd op het maximale chloridegehalte in de profielmetingen en in het model. De figuur toont ook het dagelijks gemiddelde en maximale chloridegehalte van het inkomende water bij de Grote Sluis (o.b.v. de ZSF-ZTM berekening). In deze figuur vallen een aantal dingen op:

- In het model zijn de maximale chloridegehaltes op beide locaties vergelijkbaar. Bij VG_KWZ_Ingang-binnenh2 is het chloridegehalte vaak net iets hoger en zijn er ook minder periodes te zien waarin er verzoeting plaatsvindt. Het iets hogere chloridegehalte komt waarschijnlijk doordat het bij VG_KWZ_Ingang-binnenh2 iets dieper is.
- In de metingen zijn de maximale chloridegehaltes echter zeer verschillend voor beide locaties. Ook de trends komen vaak niet overeen. Dat zou kunnen komen, 1) omdat niet in iedere meting het volledige profiel tot aan de bodem (waar het chloridegehalte het hoogst is) wordt ingemeten, 2) omdat het chloridegehalte sterk varieert over de tijd (niet aannemelijk op basis van de modelresultaten) en het feit dat beide profielen niet tegelijk gemeten worden, 3) onnauwkeurigheden in de metingen, etc. Hoe dan ook, het is moeilijk om het gedrag in de metingen te begrijpen en die metingen vervolgens te kunnen relateren aan het model.
- De maximale gemeten chloridegehaltes zijn in de meting soms gelijk of hoger dan het zoutgehalte dat het model instroomt vanuit de ZSF-ZTM offline koppeling. Als we aannemen dat de maximale chloridegehaltes in de metingen betrouwbaar zijn, kan de conclusie worden getrokken dat het zoutgehalte vanuit de ZSF-ZTM waarschijnlijk een onderschatting is van de werkelijkheid (in ieder geval op enkele momenten).
- Opvallend is dat het maximale chloridegehalte in het model op beide locaties goed overeenkomt met het 1-daagse gemiddelde gewogen (op basis van debiet) inkomende chloridegehalte bij de Grote Sluis.
- Het maximale zoutgehalte in de monding van de Binnenhaven is over het algemeen ongeveer 20% tot 30% lager als het dagelijkse maximale inkomende zoutgehalte vanuit de schutsluisrandvoorwaarde. Blijkbaar treedt er maar een zeer geringe verticale menging op in de Binnenhaven in het model en blijft het zoutgehalte redelijk behouden gedurende het transport van de sluisdeur naar de monding van de Binnenhaven.



Figuur 5-19 Analyse validatie chloridegehalte bij de ingang van de Binnenhaven van Kornwerderzand. Boven: wind snelheid, 2^e paneel: spuidebiet bij Kornwerderzand, 3^e paneel: 1-daags lopende gemiddelde van de zoutlast vanuit de Grote en Kleine Sluis, 4^e paneel: chloridegehalte van het water dat vanuit de sluisen het model in D-HYDRO stroomt. Onderste 2 panelen: Z-T diagram voor chloride bij de ingang van de voor de periode aug – okt 2022. De achtergrond geeft het modelresultaat weer en de bolletjes de metingen. Boven: station VG_KWZ_Ingang-binnenh1 en onder VG_KWZ_Ingang-binnenh2, zie Figuur 5-18 voor de locaties.



Figuur 5-20 Vergelijking maximale chloridegehalte in profielmetingen en model bij VG_KWZ_Ingang-binnenh1 (bruin) en onder VG_KWZ_Ingang-binnenh2 (groen). Daarnaast zijn ook de inkomende zoutgehaltes bij de Grote Sluis o.b.v. het ZSF-ZTM model geplot (zwart: 1 daags gemiddeld, grijs: dagelijkse max).

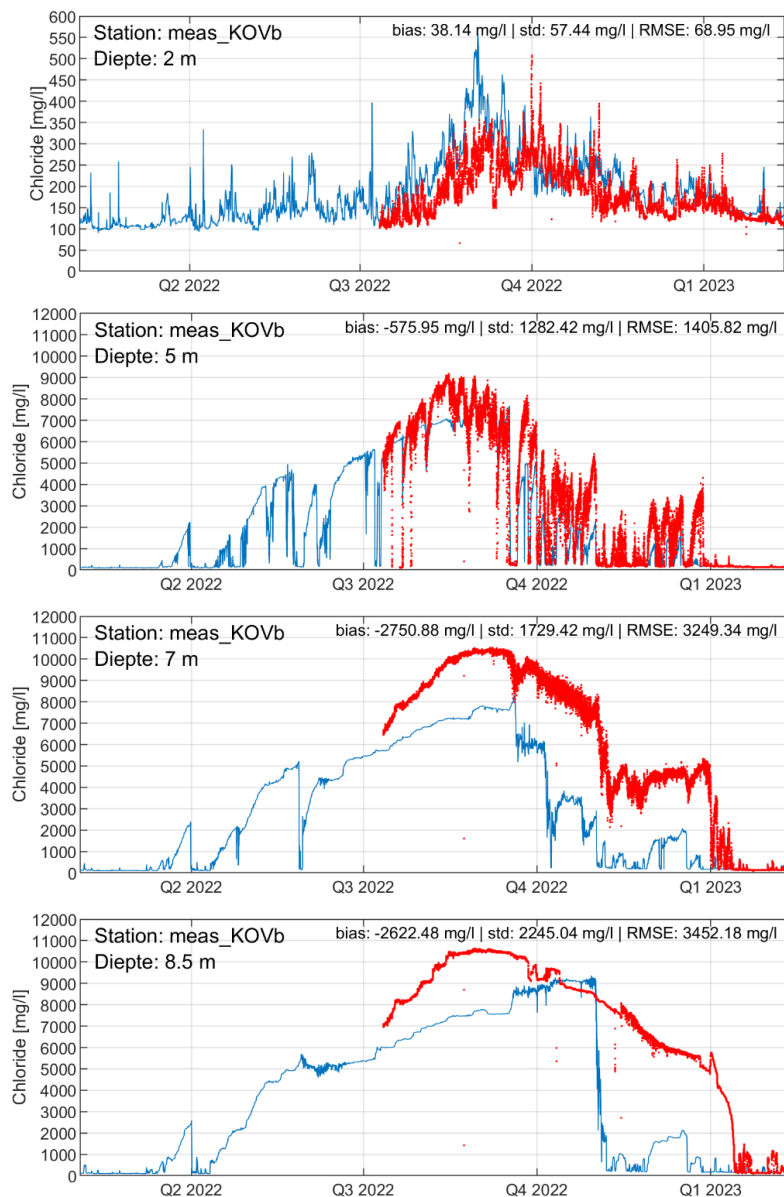
In Figuur 5-21 worden de gemeten en gemodelleerde chloridegehalten vergeleken bij het permanente meetstation in de verdiepte vaargeul (KOVb, KOVmb, KOVmo, KOVo). De metingen starten in juli 2022, dus het vollopen van de verdiepte vaargeul vanaf maart/april kan niet worden gestaafd aan de metingen. Op het moment dat de metingen beginnen is het model goed in lijn met de waarnemingen. Er is dan sprake van een sterke stratificatie met chloridegehalten van 5000 tot 7000 mg/L op -5 m tot -8,5 m NAP in de metingen en 5000 tot 6000 mg/L in het model. Bij de waterspiegel is het chloridegehalte dan nog in de orde van 100 tot 150 mg/L. Tot en met september is de trend in het model vergelijkbaar met de metingen. Het verzilten verloopt in het model echter wel iets minder snel. Het maximale chloridegehalte van ongeveer 10500 mg/L wordt in de metingen bereikt in de periode mid-augustus tot mid-september 2022. In dezelfde periode is het chloridegehalte in het model ongeveer 7500 mg/L. Vanaf mid september treedt er in de meting een verzoeting op die redelijk geleidelijk verloopt op -8,5 m NAP en (in eerste instantie ook) op -7 m NAP. Op -5 m NAP schommelt het iets meer tussen zoet en zout, aangezien de pycnocline rond dit niveau zit, waardoor het chloridegehalte gevoeliger is voor variaties in stroomsnelheid en verticale menging (door bijvoorbeeld wind). In het model blijft het chloridegehalte op -8,5 m NAP echter verder stijgen tot eind oktober 2022, waarna het abrupt verzoet tijdens een periode met hogere windsnelheden. Op -7 m NAP treedt wel vanaf mid september een verzoeting op, echter gaat deze verzoeting sneller als in de metingen. In Figuur 5-22 is duidelijk te zien dat deze verzoeting mid-september wordt veroorzaakt door verticale menging tijdens een periode met hoge windsnelheden. In de periode daarna wijkt het chlorideprofiel veel meer af ten opzichte van de metingen als daarvoor. Op basis van de resultaten bij de erosiekuil van Kornwerderzand en Den Oever is het aannemelijk dat het overschatten van het effect van de wind komt doordat de stratificatie aan het begin van de storm werd onderschat in het model, waardoor er te weinig weerstand was tegen verticale menging. Daarnaast kan een mogelijke (lichte) overschatting van de windschuifspanning (vergelijk de windschuifspanning in de ERA5 en HARMONIE data bij de Afsluitdijk in Figuur 5-4) ook een rol spelen. Op -5 m NAP en -2 m NAP komt het zoutgehalte in het model in deze periode wel goed overeen met de metingen.

De onderschatting van het chloridegehalte in de onderste lagen van de verdiepte vaargeul kan deels verklaard worden door het onderschatten van het chloridegehalte bij de monding van de Binnenhaven (zie het begin van deze paragraaf). Daarnaast lijkt er te veel verticale

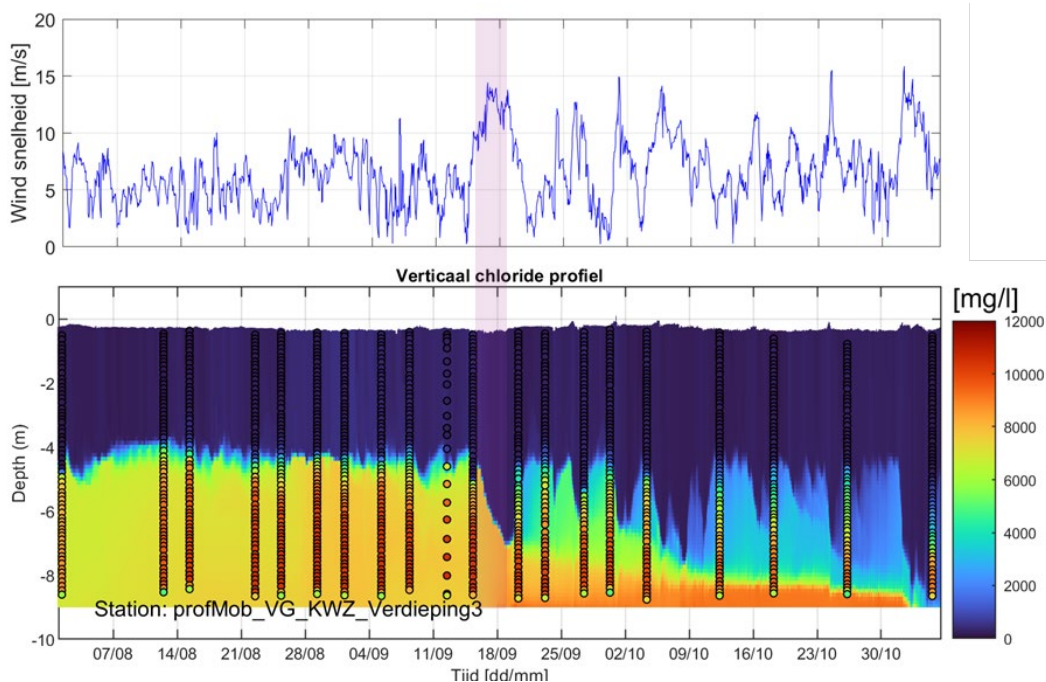
menging op te treden op het moment dat het zoute water de verdiepte vaargeul instroomt via de relatief steile bodemhelling.

Zoals ook geconcludeerd in paragraaf 5.3.2 en 5.3.3 is het proces van verzoeten zeer sterk afhankelijk van de stratificatie. Aangezien de stratificatie in het model wordt onderschat (zie vorige alinea), is er ook te weinig weerstand tegen het opmengen. Hierdoor reageert het gemodelleerde chloridegehalte op -7 m NAP sterker op menging door stroming ten gevolge van wind dan in de werkelijkheid.

Samenvattend kan gezegd worden dat het proces van verzilten kwalitatief goed wordt weergegeven in het model. Het proces van verzoeten verloopt goed in de bovenste helft van de waterkolom. In de onderste helft van de waterkolom is de verzoeting echter zeer gevoelig voor de absolute zoutgehaltes/stratificatie, waardoor de afwijking van de meting kwantitatief wat groter kan zijn.

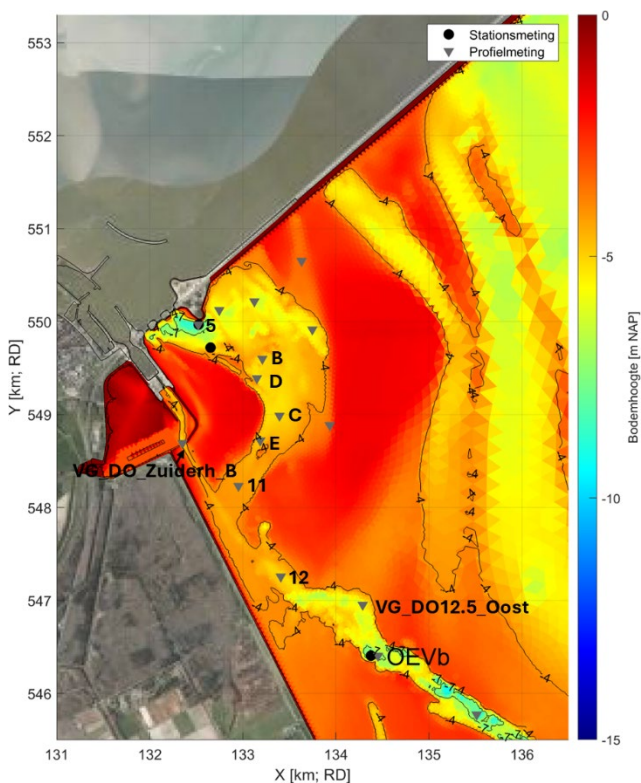


Figuur 5-21 Vergelijking gemeten en gemodelleerde chloridegehalte in de verdiepte vaargeul bij Kornwerderzand (KOVb, KOVmb, KOVmo, KOVo). Voor het bovenste paneel zijn andere limieten gebruikt voor de verticale as!



Figuur 5-22 Boven: wind tijdens de periode aug-okt 2022. Onder: Z-T diagram voor chloride in de verdiepte vaargeul op station VG_KWZ_Verdieping3, op tientallen meters van het permanente stations KOV*. De achtergrond geeft het modelresultaat weer en de bolletjes de metingen, zie Figuur 5-18 voor de locaties.

5.3.5 Binnenhaven en vaargeul Den Oever



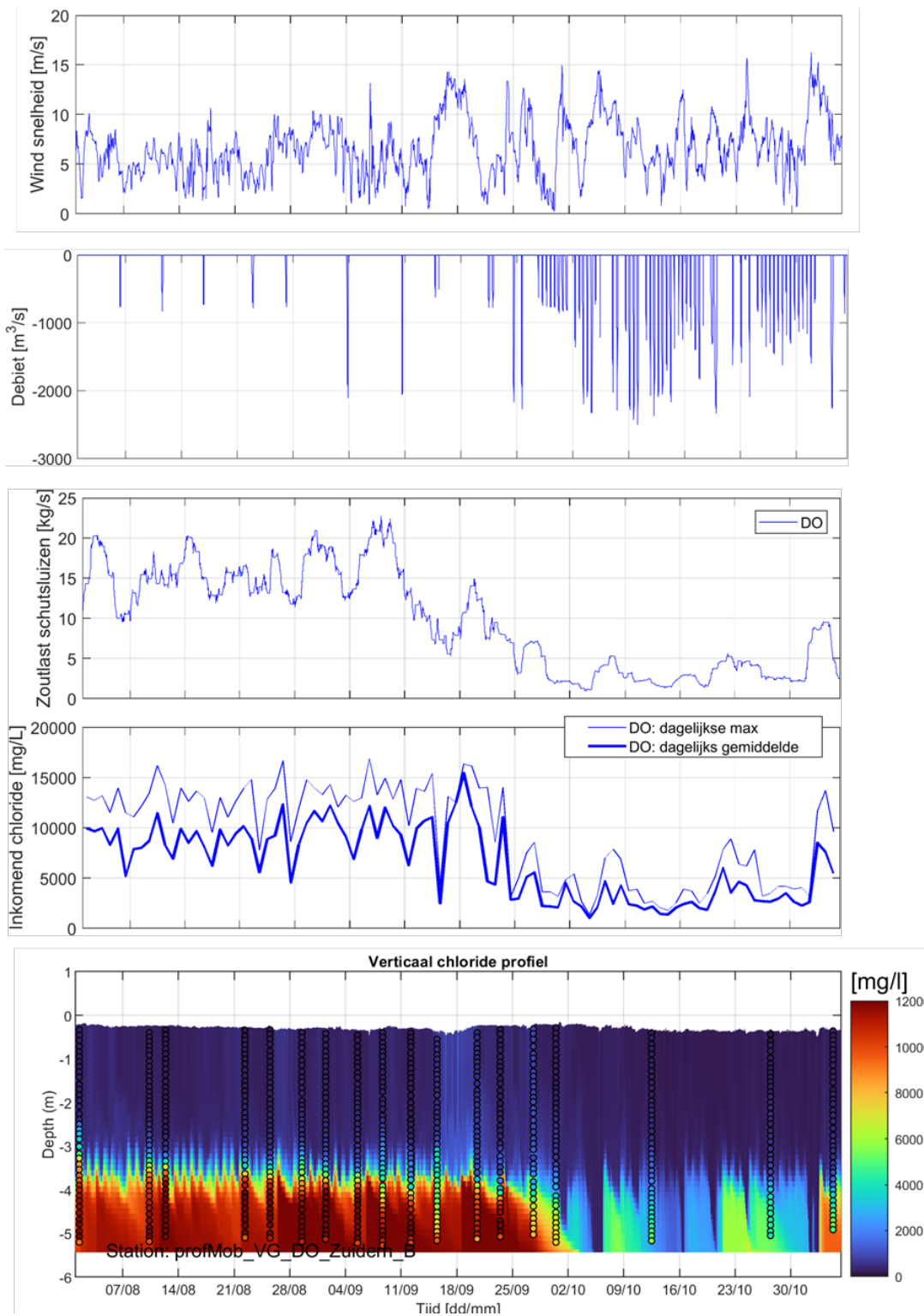
Figuur 5-23 Overzicht van de schutsluizen van Den Oever en de vaargeul richting het zuiden. Ook de locaties van de meetstations die in deze paragraaf besproken worden zijn weergegeven.

Het zoutgehalte in de vaargeul van Den Oever wordt voor een groot gedeelte bepaald door de zoutlast vanuit de schutsluis van Den Oever en eventueel gedeeltelijk ook via de spuisluis. In de monding van de Binnenhaven zijn in de periode van 20 juli 2022 t/m 24 jan 2023 meerdere profielmetingen gedaan. Voornamelijk in de periode augustus - september 2022 werden deze metingen regelmatig uitgevoerd (gemiddeld eens per 4 dagen). In Figuur 5-24 worden gemeten profielen in de monding van de Binnenhaven/Zuiderhaven vergeleken met het model. De locaties van de profielmeting (VG_DO_Zuiderh_B) is weergegeven in Figuur 5-23.

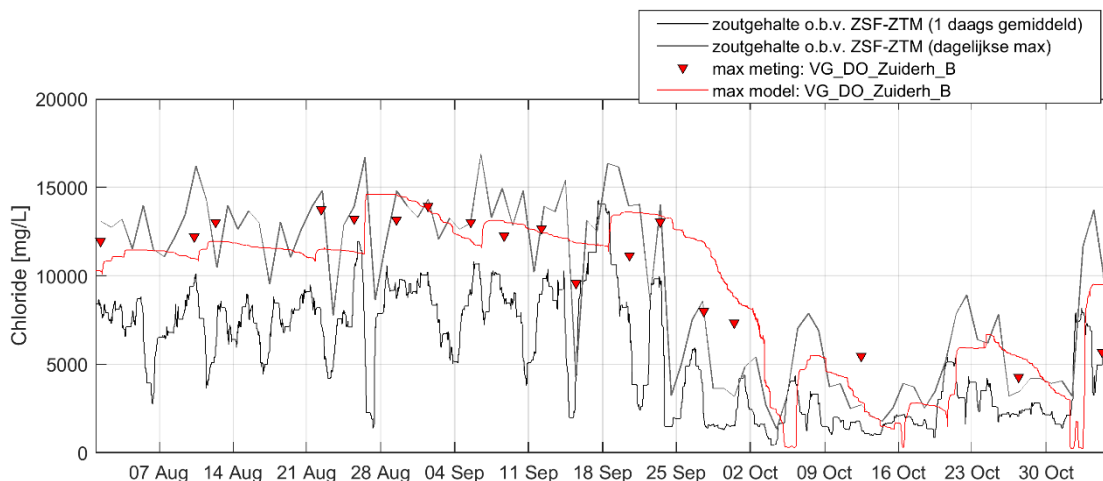
Op basis van de metingen kan gesteld worden dat er over het algemeen een dunne zoute laag aanwezig is boven de bodem met een dikte variërend tussen de 1,5 m en 2,0 m. Het chloridegehalte bij de bodem varieert zeer sterk en liep in augustus/september 2022 op tot ongeveer 15000 mg/L. Vervolgens vind er in de laatste twee weken van september een scherpe reductie plaats, waarna het chloridegehalte regelmatig tussen de 2000 en 6000 mg/L varieert. Zowel de dikte van de zoutlaag als de reductie van het zoutgehalte vanaf eind september, worden goed weergegeven in het model. Ook de gemodelleerde maximale chloridegehalten komen over het algemeen goed overeen met de metingen.

De afname van het maximale chloridegehalte in de twee helft van september 2022 is voornamelijk gerelateerd aan de reductie van het zoutgehalte dat vanuit de schutsluizen het systeem binnenkomt. Deze reductie komt deels vanwege een kleiner aantal schuttingen, maar meer nog doordat het zoutgehalte op zee in deze periode flink lager is door de toegenomen spui volumes. Bij Den Oever wordt de Buitenhaven vaak gedeeltelijk verzoet tijdens het spuien omdat de Buitenhaven op Spuihaven Noord is aangesloten, waardoor het zoutgehalte bij de buitendeuren van de sluis een stuk lager is dan verder op zee. Bij Kornwerderzand is het zoutgehalte vanuit de schutsluizen minder gevoelig voor de spui volumes omdat de Buitenhaven en de Spuihaven van elkaar gescheiden zijn. Dat verklaart waarom het chloridegehalte in Figuur 5-19 minder sterk reageert op de toename van de spui volumes. De vergelijking met metingen tonen aan dat deze interactie tussen spuien en zoutlast relevant is voor het goed voorspellen van de zoutindringing.

In Figuur 5-25 wordt verder ingezoomd op het maximale chloridegehalte in de profielmetingen en in het model (maximaal in de zin van de maximale waarde in de verticaal). De figuur toont ook het dagelijks gemiddelde en maximale chloridegehalte van het inkomende water bij de schutsluis (o.b.v. de ZSF-ZTM berekening). Deze figuur bevestigt dat de chloridegehalten nabij de bodem goed worden weergegeven in het model. Verder is het interessant om te zien dat de bodem chloridegehalten in de monding van de Binnenhaven behoorlijk overeenkomen met de dagelijkse maximale chloridegehalten in de randvoorwaarden bij de schutsluis. Er treedt in het model dus maar weinig verticale menging op.



Figuur 5-24 Analyse validatie chloridegehalte bij de ingang van de Binnenhaven van Den Oever. Boven: wind snelheid, 2^e paneel: spuidebiet bij KWZ, 3^e paneel: 1-daags lopende gemiddelde van de zoutlast vanuit de schutsluis, 4^e paneel: chloridegehalte van het water dat vanuit de schutsluis het model in D-HYDRO stroomt. Onder: Z-T diagram voor chloride bij de ingang van de Binnenhaven voor de periode aug – okt 2022, zie Figuur 5-18 voor de locatie.



Figuur 5-25 Vergelijking maximale chloridegehalte in profielmetingen en model bij VG_DO_Zuiderh_B (rood). Daarnaast zijn ook de inkomende zoutgehaltes bij de schutsluis o.b.v. het ZSF-ZTM model geplot (zwart: 1 daags gemiddeld, grijs: dagelijkse max).

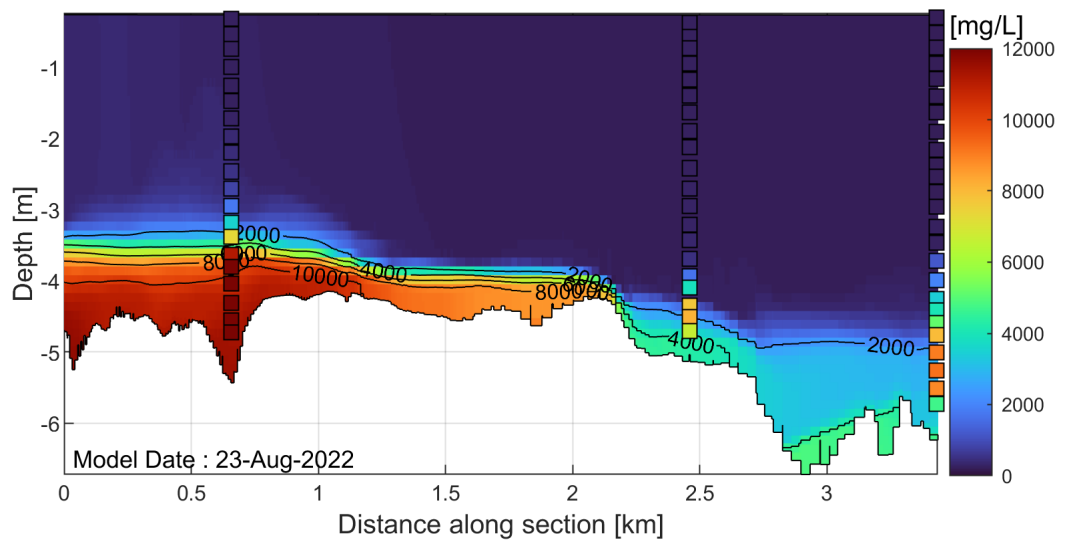
In Figuur 5-27 worden de gemeten en gemodelleerde chloridegehalten vergeleken bij het permanente meetstation in de vaargeul (OEVb, OEVmb, OEVmo, OEVo). De metingen starten in juli 2022, dus het vollopen van de vaargeul vanaf maart/april kan niet worden gestaafd aan de metingen. De metingen laten zien dat er sprake is van een sterke stratificatie in de zomer. Het chloridegehalte op -5,5 m NAP en -7 m NAP vertonen een vergelijkbaar gedrag en absolute waarden. Het chloridegehalte op -4 m NAP is een stuk lager. De maximale chloridegehalten worden eind augustus bereikt. Op -5,5 en -7 m NAP is het maximale chloridegehalte ongeveer 8500-9000 mg/L. Op -4 m NAP blijft het chloridegehalte in de zomer meestal onder de 1000 mg/L en op -2 m NAP meestal onder de 500 mg/L. Vanaf begin september neemt het chloridegehalte af, waarna al het zout bijna geheel opgemengd is begin oktober. Het chloridegehalte op -2 m NAP en -4 m NAP worden goed weergegeven door het model. Op de diepere lagen onderschat het model de chloridegehalten. De meeste significante schommelingen in de metingen zijn kwalitatief ook terug te zien in het model.

Voordat we kijken naar mogelijke oorzaken voor de onderschatting van het chloridegehalte is het goed om te analyseren waar het zout in de vaargeul vandaag komt. In Kornwerderzand is dat een eenvoudig te beantwoorden vraag, aangezien de erosiekuil niet in een directe verbinding staat met de vaargeul. Bij Den Oever is dat anders. Zoals te zien is in Figuur 5-23 staat de erosiekuil via een geul in verbinding met de vaargeul. Op basis van animaties van de ruimtelijke verdeling van het chloride bij de bodem kan worden geconcludeerd dat er een beperkte hoeveelheid zout vanuit de erosiekuil direct naar de vaargeul stroomt in het model. Zie bijvoorbeeld een typische momentopname in Figuur 5-28. Of dat een goede weergave is van de werkelijkheid kan op basis van de huidige metingen niet eenduidig geconcludeerd worden. Hoewel de metingen aanleiding geven om te denken dat het zout vanuit de erosiekuil in werkelijkheid verder reikt (kijk bijvoorbeeld bij profiel B, D en C), lijkt er toch relatief weinig uitwisseling te zijn tussen de erosiekuil en de vaargeul (kijk bijvoorbeeld bij profiel 11 en E). Figuur 5-29 toont een doorsnede van de gemodelleerde en gemeten chloridegehalten vanaf de schutsluis (links) tot en met de erosiekuil (rechts) voor 6 verschillende momentopnames. De afsplitsing vanaf de vaargeul van Den Oever richting de erosiekuil ligt op een afstand van ongeveer 1,3 km vanaf de schutsluizen. De figuren benadrukken dat het zout vanuit de erosiekuil in werkelijkheid verder reikt. Daarnaast is het nuttig om de gemeten profielen op 1,6 km (profiel '11') en 2,2 km (profiel 'E') te vergelijken. In de meeste gevallen ligt de pycnocline bij profiel 11 hoger dan bij profiel E, wat een zouttransport van 11 naar E, dus vanaf de vaargeul van Den Oever richting de erosiekuil, impliceert. Opgemerkt wordt dat op basis van deze momentopnames geen harde conclusies

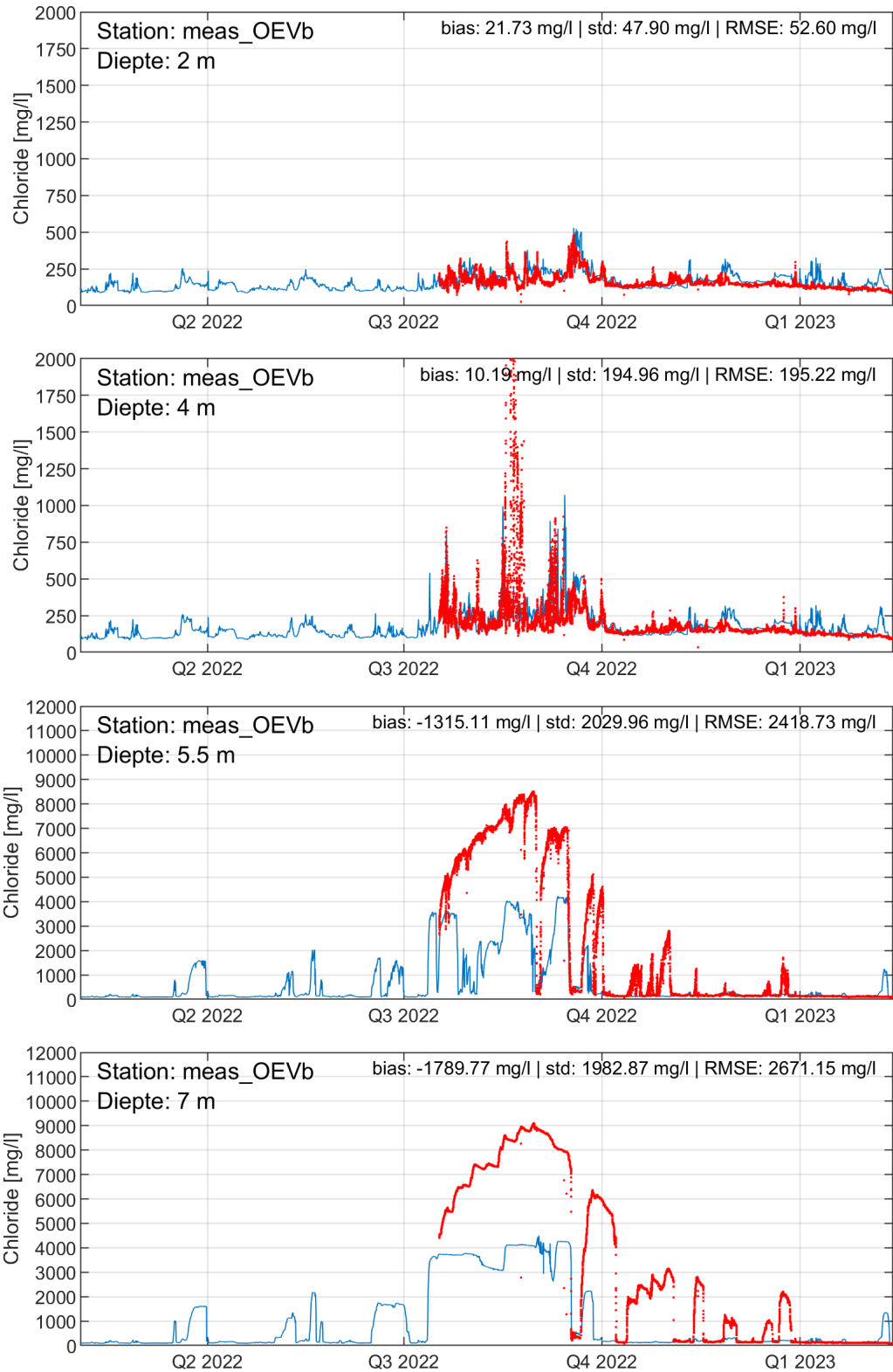
kunnen worden getrokken. Het is bijvoorbeeld niet uitgesloten dat een harde wind vanuit oostelijke/noordoostelijke richting een dergelijke scheefstand van de halocline tot gevolg kan hebben dat zout vanuit de erosiekuil wel richting de vaargeul stroomt.

Mogelijke oorzaken van de onderschatting van het chloridegehalte in de vaargeul:

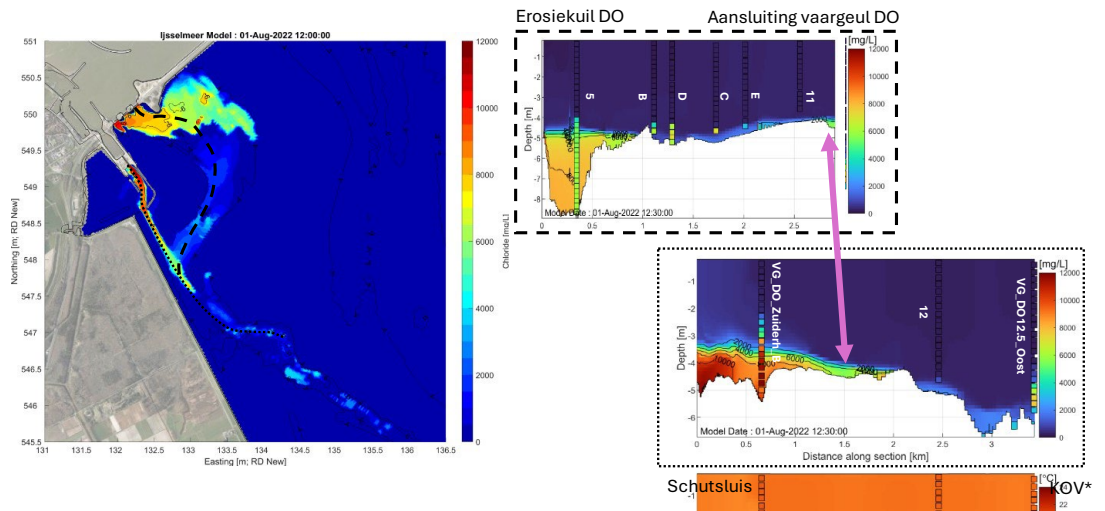
- Onderschatting zoutlast vanuit schutsluis. Zoutgehaltes lijken aardig te kloppen (o.b.v. vergelijking met profielmeting in monding voorhaven). Mogelijk wordt het instromende debiet in de randvoorwaarden onderschat (en daarmee de zoutflux).
- De zouttong vanuit Den Oever lijkt te blijven hangen achter een zeer kleine drempel op ongeveer 2,2 km vanaf de schutsluis (zie Figuur 5-26). Het kan zijn dat deze drempel accuraat is, maar dat het blokkerende effect van de drempel wordt overschat door een onderschatting van de dikte van de zouttong (en bijv. door onvoldoende horizontale resolutie in het model?).
- Zoals hierboven geconcludeerd lijkt het zouttransport vanuit de erosiekuil via de vaargeul richting het meer kleiner in het model dan in de (profiel)metingen. Het zou kunnen dat het model daardoor ook het effect van de zoutlek bij de spuisluizen op de vaargeul onderschat. Vanwege de natuurlijke drempel tussen de erosiekuil en de vaargeul op ongeveer -4,6 m NAP en de conclusies op basis van Figuur 5-29, zoals hierboven beschreven, is het echter onwaarschijnlijk dat de hoge chloridegehalten in de vaargeul het gevolg zijn van zout vanuit de erosiekuil.



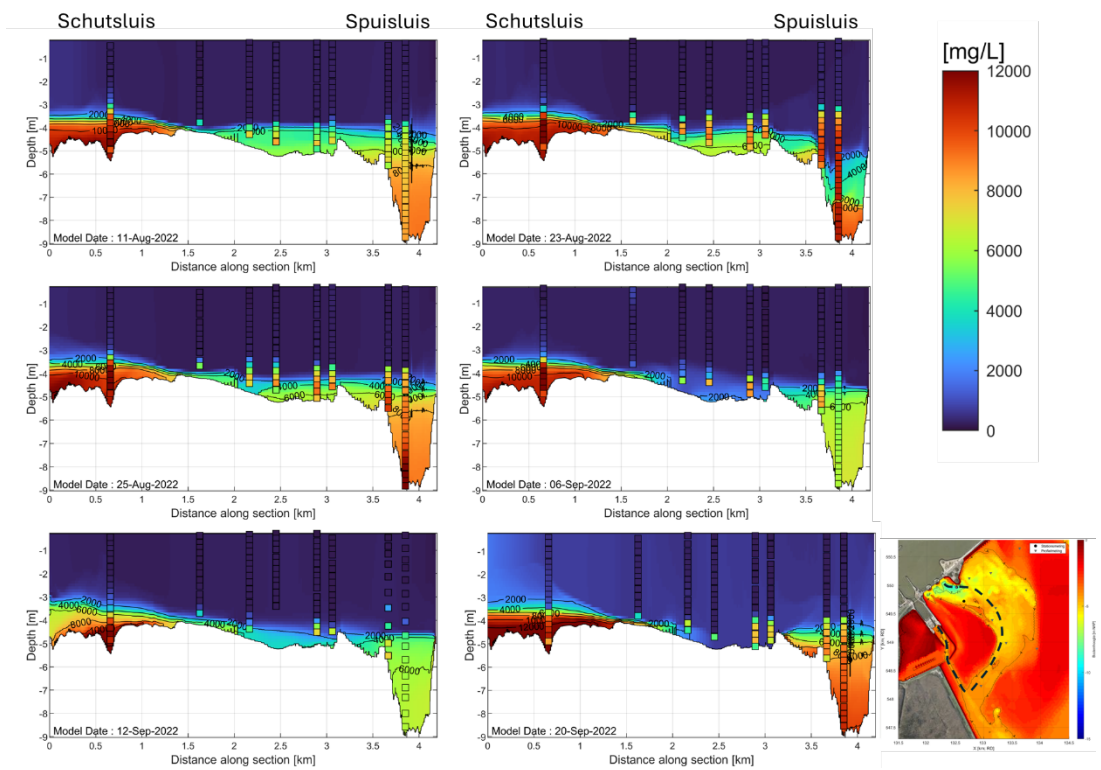
Figuur 5-26 Vergelijking chloridegehalte model en metingen langs een doorsnede vanaf de schutsluis bij Den Oever (links) door de vaargeul (rechts).



Figuur 5-27 Vergelijking gemeten en gemodelleerde chloridegehalte in de verdiepte vaargeul bij Kornwerderzand (OEVB, OEVMb, OEVMo, OEVo). Voor het bovenste paneel zijn andere limieten gebruikt voor de verticale as!

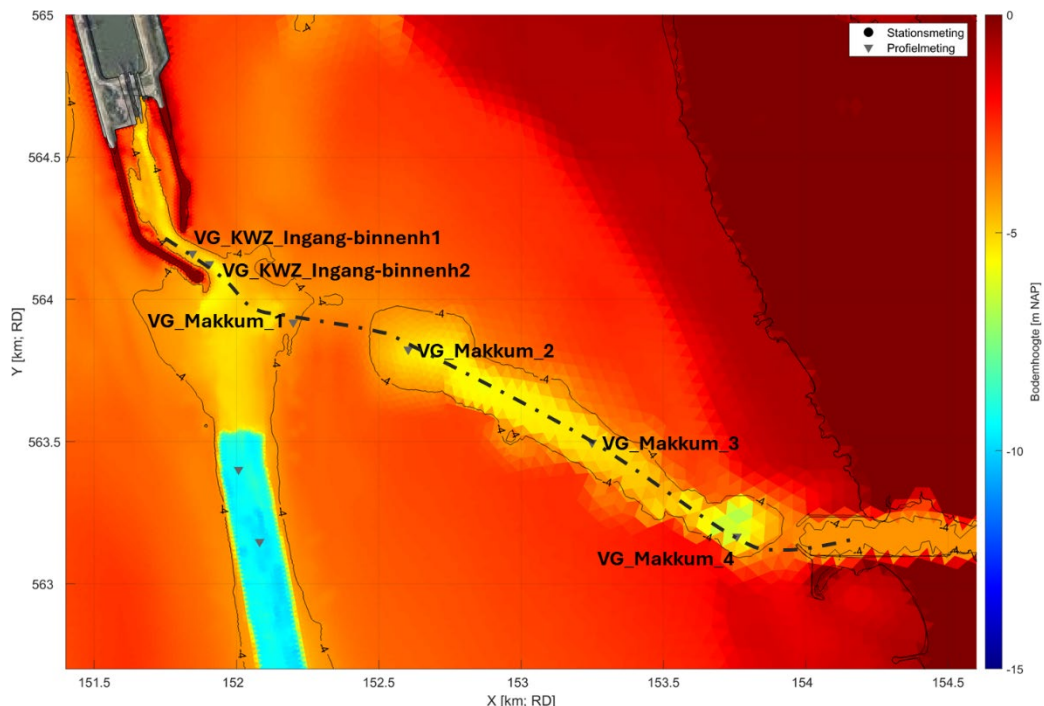


Figuur 5-28 Chloridegehalte in het model op 1 augustus 12:00. Links: nabij de bodem, rechtsboven: verticale doorsnede vanaf de spuisluisen t/m de aansluiting met de vaargeul van DO, rechtsonder: verticale doorsnede vanaf de schutsluisen t/m de locatie van de KOV* metingen. Zie Figuur 5-18 voor de locaties van de meetstations.



Figuur 5-29 Vergelijking van modelresultaten en metingen langs een doorsnede vanaf de schutsluis t/m de spuisluis bij Den Oever (zie het paneel rechtsonder voor het traject). Er worden zes verschillende momenten getoond waarop profielmetingen beschikbaar zijn. Opgemerkt wordt dat de modeluitvoer met een interval van 2 dagen beschikbaar is. Er zit dus een tijdsverschil (maximaal 1 dag) tussen het modelresultaat (altijd middernacht) en de metingen (overdag).

5.3.6 Vaargeul Makkum

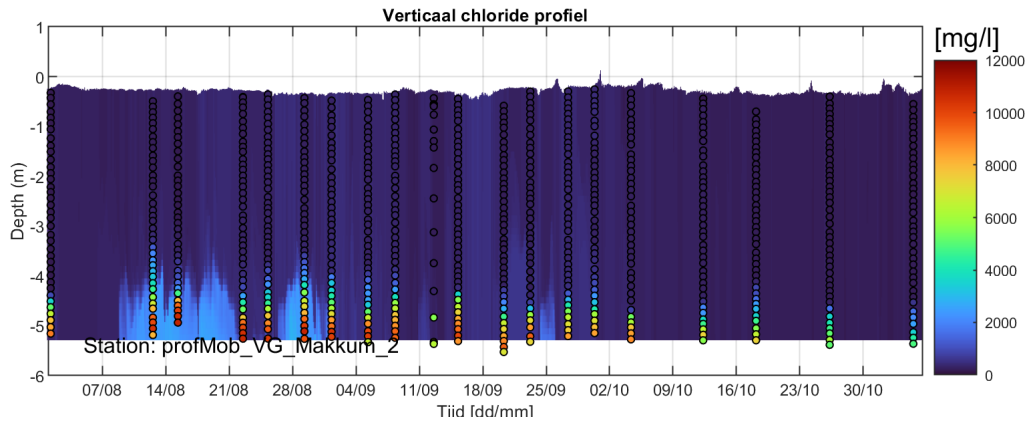


Figuur 5-30 Overzicht van de vaargeul richting Makkum en de meetlocaties die in deze paragraaf besproken worden. De stippellijn geeft de locatie weer van de doorsnede zoals getoond in Figuur 5-32.

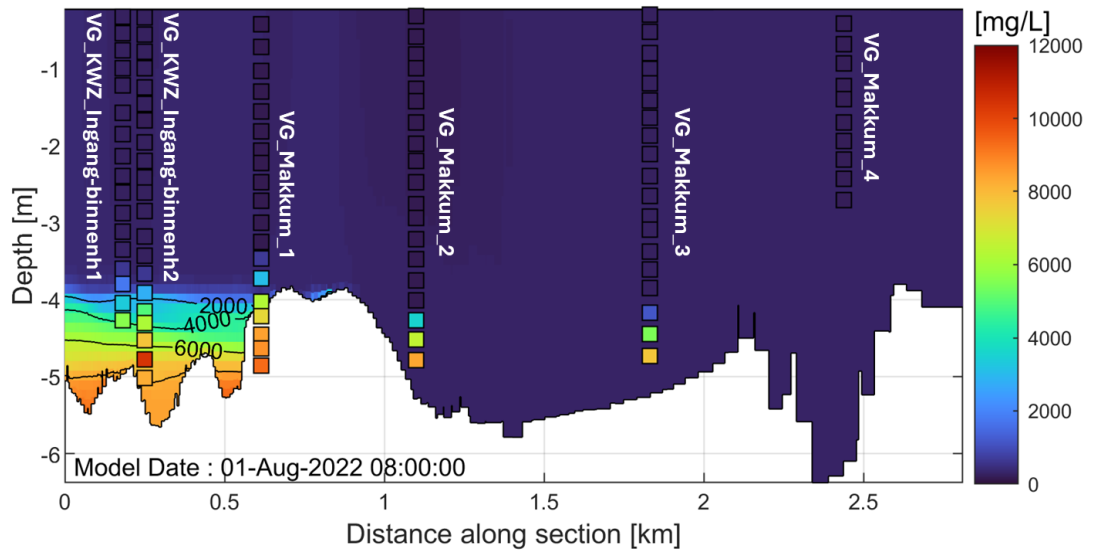
In de vaargeul van Makkum zijn ook regelmatig profielmetingen uitgevoerd vanaf de zomer van 2022. Figuur 5-31 toont een vergelijking van het gemodelleerde chloridegehalte en de profielmetingen op locatie VG_Makkum_2. Het gemeten zout in de vaargeul is afkomstig van de schutsluis bij Kornwerderzand. In het model vindt er echter nauwelijks zoutindringing plaats richting de vaargeul van Makkum. Waar de metingen in augustus en september regelmatig chloridegehaltes tot ongeveer 11000 mg/L laten zien, komt het model niet verder dan 3000 mg/L in deze periode.

Het zout vanuit de Binnenhaven/vaargeul van Kornwerderzand loopt in het model nauwelijks richting de vaargeul van Makkum vanwege een natuurlijk drempel op ongeveer -4 m NAP. Dit is geïllustreerd in Figuur 5-32 waar een doorsnede wordt getoond van het model vanaf de voorhaven van Kornwerderzand tot en met ver in de vaargeul van Makkum. Op dat moment (1 augustus 2022) werden op verschillende locaties ook profielmetingen uitgevoerd. In de vaargeul van Makkum zijn chloridegehaltes gemeten tot ongeveer 8000 mg/L op een hoogte van ongeveer -5 m NAP. In de monding van de voorhaven van Kornwerderzand werden dergelijke chloridegehaltes gemeten op ongeveer -4,5 m NAP. Het is mogelijk dat in werkelijkheid het zout op een eerder moment over de drempel van -4 m NAP is gestroomd, omdat de halocline op dat moment hoger lag, of omdat er sprake was van scheefstand van de halocline door wind. Op basis van de gehele set aan metingen bij VG_Makkum_1 lijkt dit echter niet voldoende te zijn om de hoge chloridegehaltes in de vaargeul van Makkum te verklaren, Figuur 5-33. Het chloridegehalte op -4 m NAP is maximaal 6000 mg/L, terwijl het chloridegehalte bij VG_Makkum_2 bij de bodem regelmatig oploopt tot 11000 mg/L. Op basis hiervan lijkt het onwaarschijnlijk dat er in werkelijkheid een drempel is rond -4 m NAP tussen de vaargeul van Makkum en de Binnenhaven van Kornwerderzand.

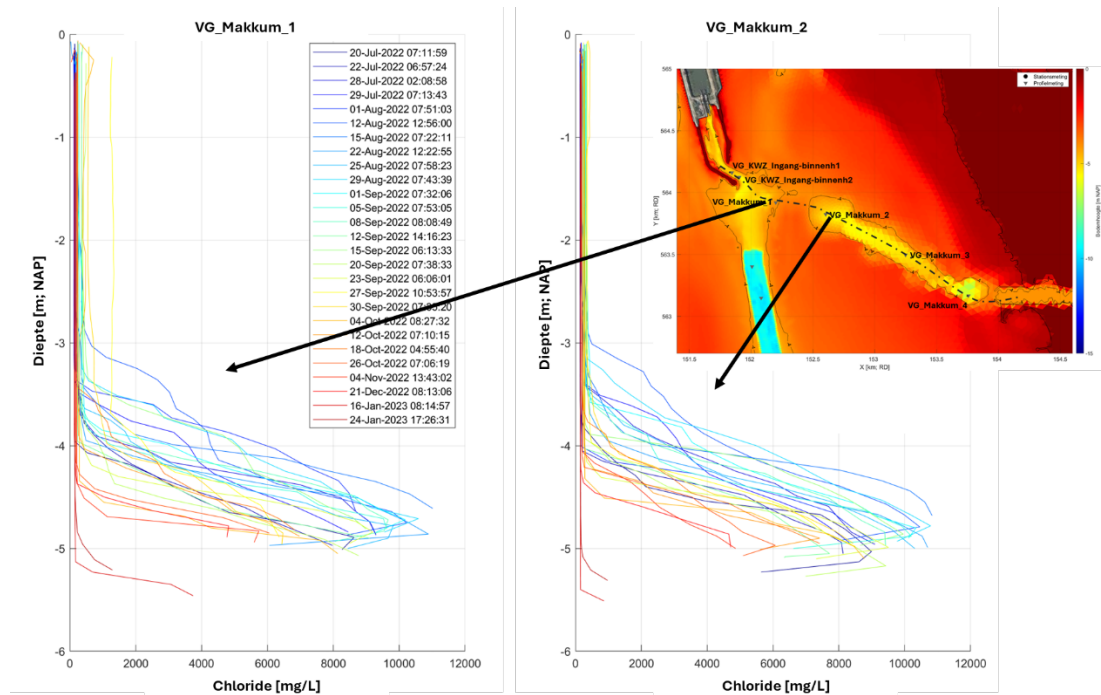
Voor een verbeterde validatie in de vaargeul van Makkum is het dus belangrijk om na te gaan of de modelbodem (i.e. de bodemschematisatie in Baseline) representatief is voor de werkelijkheid.



Figuur 5-31 Z-T diagram voor chloride bij de meetlocatie VG_Makkum_2 voor de periode aug. – okt. 2022, zie Figuur 5-30 voor de locatie.

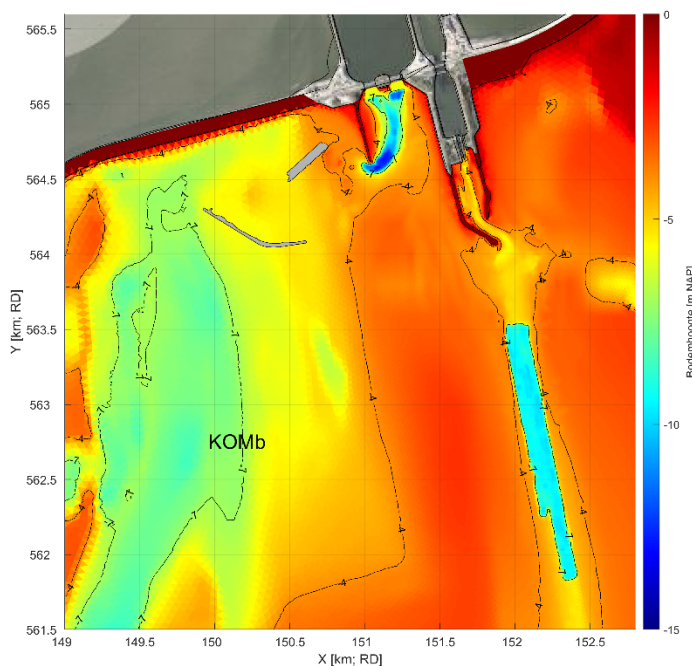


Figuur 5-32 Vergelijking gemodelleerde en gemeten chloridegehalte voor een verticale doorsnede vanaf de voorhaven van Kornwerderzand t/m de vaargeul richting Makkum, zie Figuur 5-30 voor de locatie.



Figuur 5-33 Gemeten chlorideprofielen bij VG_Makkum_1 (links) en VG_Makkum_2 (rechts)

5.3.7 Geul van de Middelgronden



Figuur 5-34 Overzicht van de modelbodem rondom de meetlocatie KOMb.

In Figuur 5-35 zijn de validatieresultaten weergegeven voor chloride bij meetlocaties KOMb, KOMbm, KOMbo, KOMo. Het bodemniveau ter plaatse van dit meetstation is -8,2 m NAP. De meethoogtes zijn ten opzichte van de waterstand. Op basis van de metingen kan het volgende worden geconcludeerd:

- In de bovenste 5 m van de waterkolom is het chloridegehalte uniform. Het maximale chloridegehalte is ongeveer 300 mg/L.

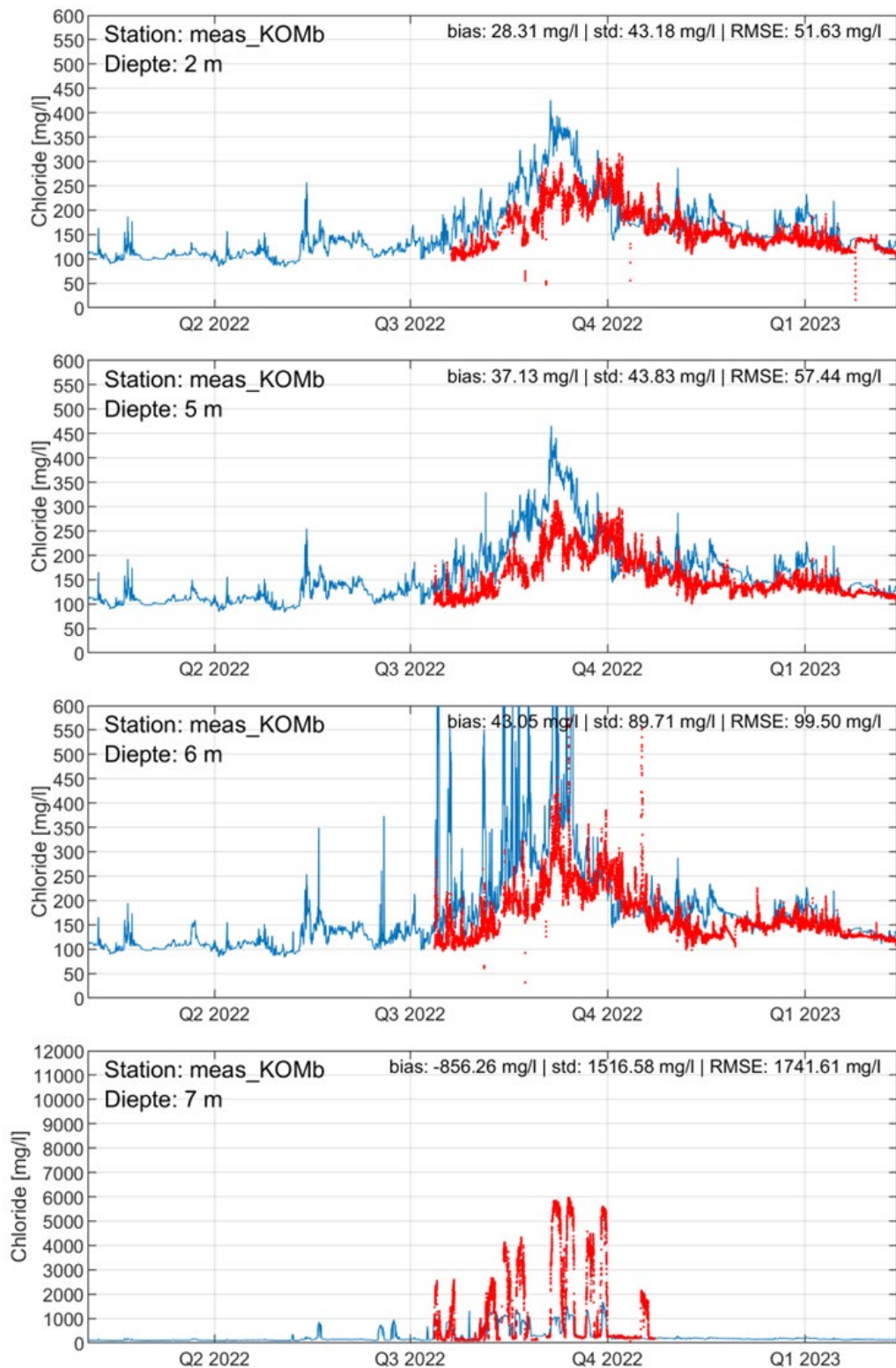
- Op 6 m onder de waterspiegel is het chloridegehalte over het algemeen vergelijkbaar met het bovenste gedeelte van de waterkolom. Zeer incidenteel worden hier hogere chloridegehalten gemeten.
- Op 7 m onder waterspiegel (dus ongeveer 1 m boven de bodem) worden in de zomer van 2022 enkele pieken in chloridegehalte waargenomen. Deze pieken variëren tussen de 3000 mg/L en 6000 mg/L. De verzilting ontstaat abrupt en wordt vervolgens enkele dagen later ook weer abrupt afgebroken.

De seizoen trend in het bovenste gedeelte van de waterkolom wordt redelijk goed weergegeven in het model. Het absolute chloridegehalte wordt voornamelijk in de maanden augustus en september overschat met ongeveer 50 tot 100 mg/L. Het chloridegehalte bij de Middelgronden is grotendeels gerelateerd aan de zoutdynamiek bij de erosiekuil van Kornwerderzand. Zoals paragraaf 5.3.2 ook laat zien wordt in dezelfde periode (aug. en sep. 2022) het chloridegehalte aan het wateroppervlak ook overschat in de erosiekuil (meetstation KOSb).

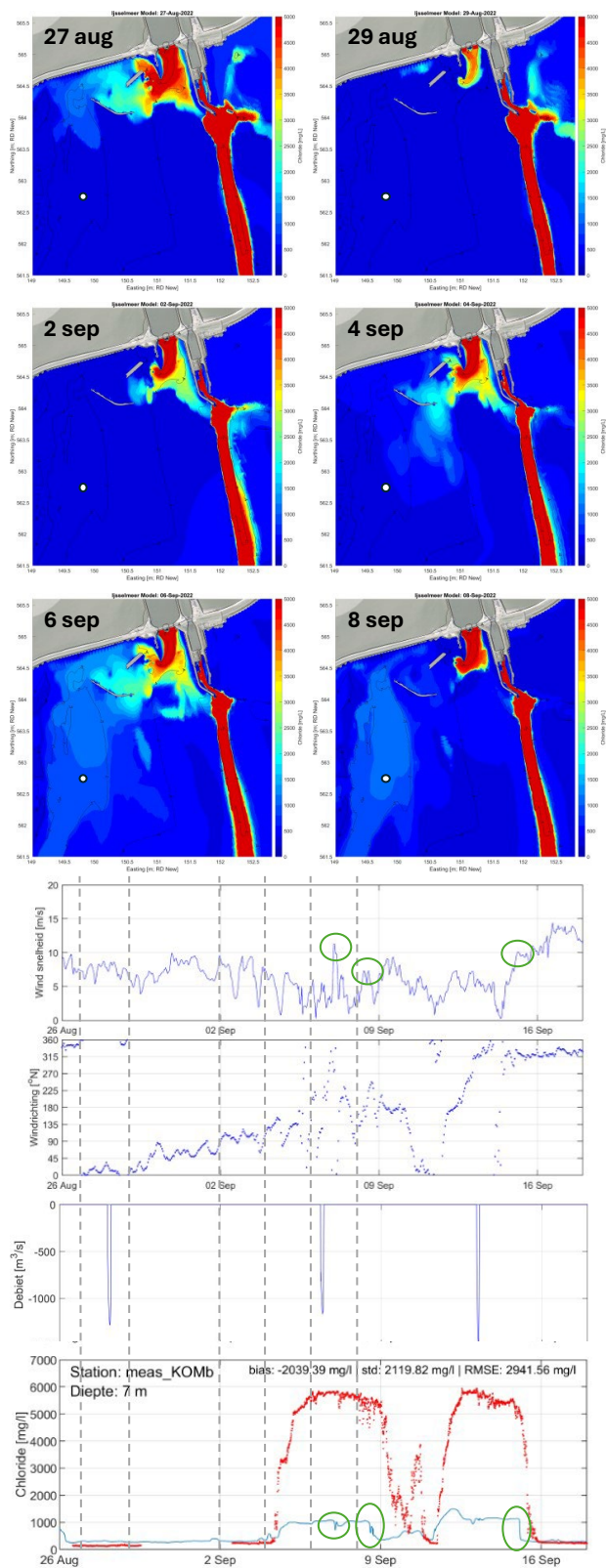
Bij de bodem wordt het zoutgehalte in het model onderschat. De gemeten pieken zijn op dezelfde momenten ook terug te zien in het model, echter is het maximale chloridegehalte in het model rond de 1000 tot 1500 mg/L (tegenover 3000 – 6000 mg/L in de metingen). Om het ontstaan en verdwijnen van de pieken in chloride beter te begrijpen is Figuur 5-36 toegevoegd. Deze figuur zoomt in op de chloridepiek die rond 4 tot 5 september 2022 ontstaat. Aangezien de timing in het model zeer vergelijkbaar is met de metingen, kan aangenomen worden dat het model de juiste processen weergeeft die deze piek kunnen verklaren. Het gemodelleerde chloridegehalte nabij de bodem wordt getoond voor 6 verschillende momenten. De eerste 2 figuren tonen dat het gebied tussen de Geul van de Middelgronden en de erosiekuil wordt schoongespoeld ten gevolge van het spuien op 28 augustus en/of windgedreven stroming. Vervolgens loop na het spuien de erosiekuil weer vol met zout en stroomt er steeds meer zout over de drempel richting het zuidwesten. Het zout wordt vervolgens enigszins geblokkeerd door de golfbreker van de Vismigratierivier, waarna het vanaf 4 september in het model ten noorden⁶ en zuiden van deze golfbreker richting de geul van de Middelgronden stroomt. Vanaf 5 september wordt vervolgens een verhoogd chloridegehalte waargenomen bij het vaste meetstation. Door het spuien op 6 september en/of windgedreven stroming wordt het zout rond de Vismigratierivier schoongespoeld. In de geul van de Middelgronden blijft het zout echter aanwezig en lijkt het niet direct door het spuien te worden beïnvloed. In de getoonde periode zijn 2 momenten te zien waarop het zoutgehalte nabij de bodem sterk reduceert en ook enkele momenten met kleine reducties. Deze momenten zijn aangegeven met de groene cirkels. Deze momenten van verzoeting lijken samen te vallen met verhoogde windsnelheden en de daaraan gerelateerde verticale menging en windgedreven stroming. De verzoeting vindt in het model iets eerder plaats dan in de metingen. Dit is waarschijnlijk gerelateerd aan het feit dat de stratificatie in het model minder sterk is (lagere chloridegehalten bij de bodem), waardoor een lagere stroomsnelheid al tot verticale menging leidt. Het chloridegehalte bij de bodem in de Middelgronden is gerelateerd aan het maximale chloridegehalte dat vanuit de erosiekuil richting het meer stroomt. Vanwege de drempel op ongeveer -4,5 m NAP tussen de kuil en de rest van het meer komt het zoutste water vanuit de erosiekuil vanuit de laag op ongeveer -4,5 m NAP. Zoals besproken in paragraaf 5.3.2 wordt het chloridegehalte op -4,5 m NAP behoorlijk onderschat (in de zomermaanden 4000 – 6000 mg/L in het model, terwijl de metingen oplopen tot 9000-11000 mg/L). Dat verklaart ook de onderschatting nabij de bodem bij meetstation KOMo. De onderschatting bij KOMo is in relatieve zin groter dan de onderschatting op -4,5 m NAP in de erosiekuil (factor 4 tot 6 tegenover een factor 2). Dit komt waarschijnlijk doordat het zoutgehalte in de dichtheidsstroming nabij de bodem onderschat

⁶ Mogelijk is de route ten noorden langs de golfbrekers in werkelijkheid geblokkeerd in deze periode, zie paragraaf 4.2.3

wordt, waardoor deze zich minder snel voortplant. Daarnaast is de zoute onderlaag in het model gevoeliger voor verticale mengingsprocessen vanwege de kleinere dichtheidsverschillen.

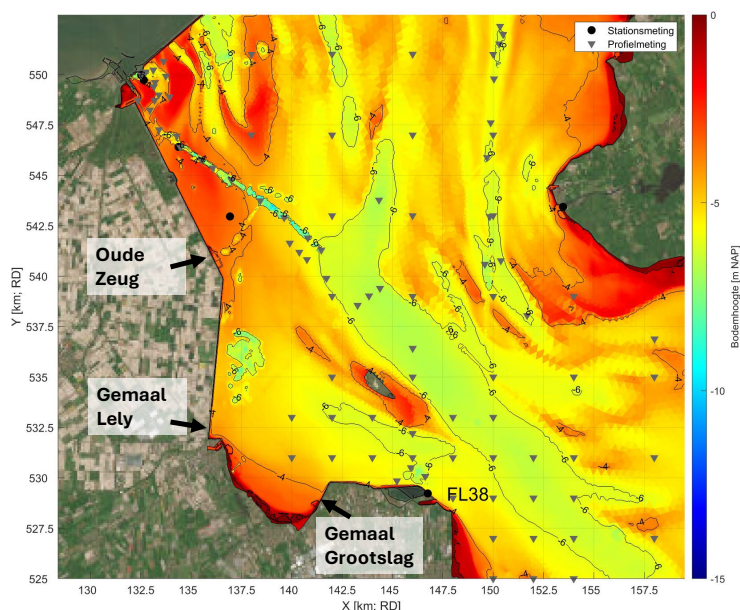


Figuur 5-35 Vergelijking gemeten en gemodelleerde chloridegehalte op de Middelgronden (KOMb, KOMmb, KOMmo, KOMo). Voor het onderste paneel zijn andere limieten gebruikt voor de verticale as!



Figuur 5-36 Analyse van zoutindringing vanuit de erosiekuil van Kornwerderzand richting de Middelgronden. Bovenste 6 panelen: Momentopname van de ruimtelijke verdeling van chloride bij de bodem. De witte stip geeft de locatie weer van meetstation KOM*. Bovenste tijdserie: windsnelheid in model, 2^e tijdserie: windrichting, 3^e tijdserie: spuidebieten bij Kornwerderzand, onder: gemeten (rood) en gemodelleerde (blauw) chloride op -7 m NAP bij KOMo. De groene cirkels geven de momenten aan waarop er verzoeting plaatsvindt nabij de bodem bij KOMo

5.3.8 Andijk



Figuur 5-37 Overzicht van de modelbodem in het noordelijke gedeelte van het IJsselmeer. De zwarte stip toont de locatie van meetstation FL38, ter hoogte van drinkwaterinname voor PWN, bij Andijk.

In Figuur 5-38 en Figuur 5-39 zijn de validatieresultaten weergegeven voor chloride bij meetlocatie FL38. In de metingen varieert het chloridegehalte tussen de 80 en 160 mg/L. In de modelresultaten zijn enkele hogere chloridepieken te zien (tot aan 250 mg/L). De seizoenstrend wordt redelijk goed weergegeven in het model. In de periode juli – september overschat het model het chloridegehalte echter structureel met ongeveer 15 tot 50 mg/L. Vanaf november 2022 onderschat het model het langeretermijn chloridegehalte tot maximaal 40 mg/L. Een aantal pieken in de metingen komen qua timing goed overeen met pieken in het model (zie bijvoorbeeld begin april 2022, mid september 2022, etc.). In geval van die pieken kan worden aangenomen dat het model de juiste processen weergeeft die tot deze chlorideverhoging hebben geleid. Echter, een aantal pieken in het model zijn in de metingen niet terug te zien. Opgemerkt wordt dat het voorspellen van pieken in chloridegehalte bij Andijk complex is, omdat er een grote vertraging zit tussen het moment dat het zout in het systeem werd geïntroduceerd (bijvoorbeeld via de schutsluizen bij Den Oever, via Gemaal Lely, etc.) en het moment dat het aankomt bij FL38. Naast het correct weergegeven van de zoutlast bij de relevante bronnen is dus ook van belang dat alle transportprocessen (t.g.v. wind, spuien, dichtheidsverschillen, etc.) goed worden weergegeven in het model. De modelprestatie bij FL38 is daarom zo goed als de zwakste schakel in deze keten (vooral als er gekeken wordt naar de korte termijn variatie).

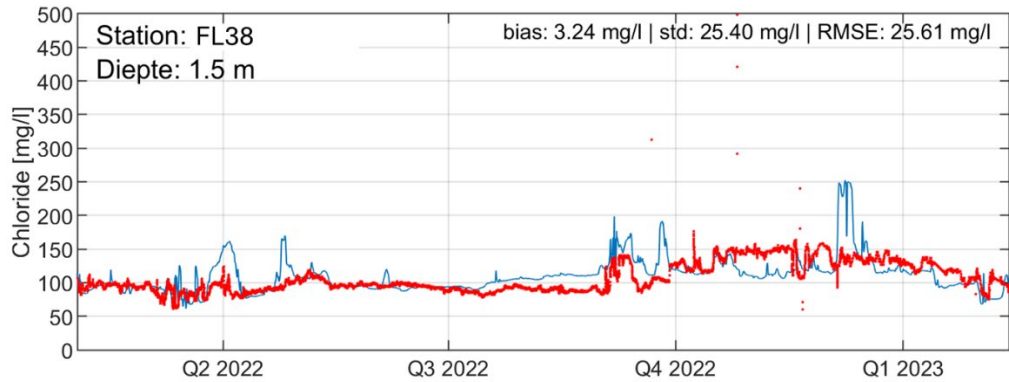
De meest significante korte-termijn verhoging in de metingen is begin september 2022, zie “Piek 1” in Figuur 5-40. De meest waarschijnlijke verklaring voor deze piek (zowel zichtbaar in de metingen als in het model) is de aanhoudende wind vanuit N/NO/O in de dagen voorafgaand aan Piek 1, zie Figuur 5-41. Vanwege de oriëntatie van de oever tussen de Oude Zeug en Medemblik leidt een wind vanuit de sector tussen noord en oost tot een transport in zuidelijke richting. Van 27 augustus t/m 1 september draait de wind langzaam van noord naar oost. In de bovenste 3 panelen van Figuur 5-41 is duidelijk te zien dat ten gevolge van deze wind de zouttong vanuit Den Oever in zuidelijke richting verplaatst. Wanneer de wind in de periode 31 augustus – 4 september loodrecht op de oever (ten noorden van Medemblik) staat ontstaat er bij de bodem een retourstroom in zuidoostelijke richting, waardoor het zoutfront zich over de bodem in oostelijke richting verplaatst, richting

Andijk, zie Figuur 5-42. Tijdens dat transport treedt er verticale menging op en neemt ook het chloridegehalte aan het oppervlak toe. Vervolgens bereikt deze zoutpluim FL38 rond 4 september. Van 2 t/m 4 september draait de wind van oost naar zuidoost. Vanaf 5 september zwakt de wind af en wordt de windrichting variabel. Het draaien van de wind naar het zuidoosten is ook terug te zien in de het chloridegehalte aan het wateroppervlak op 4 en 6 september. Op die momenten verplaatst de zouttong vanuit Den Oever zich weer terug naar het noorden. In Figuur 5-41 is op 27 – 31 augustus ook de zoutpluim vanuit Gemaal Lely te zien (geloosd op 26 augustus). Als we de zoutpluim vanuit Gemaal Lely op 31 augustus vergelijken met de zoutpluim bij Andijk op 4 en 6 september is het onwaarschijnlijk dat het geloosde zout vanuit Gemaal Lely significant heeft bijgedragen aan de verhoogde chloridegehalten bij FL38 tijdens “Piek 1”. Opgemerkt wordt echter wel dat de kwaliteit van de debietgegevens bij Gemaal Lely onzeker is. Daarnaast zijn voor Gemaal Lely ook geen chloridemetingen beschikbaar. Er is in de huidige modellering uitgegaan van een constante chlorideconcentratie van 3000 mg/L. Hoewel de zoutpluim vanuit Gemaal Lely in deze periode vrij klein is, is het aannemelijk dat in andere periodes Gemaal Lely wel een effect kan hebben op het chloridegehalte bij FL38. Voor Gemaal Grootslag geldt hetzelfde als voor Gemaal Lely. Over het algemeen wordt aangenomen dat het chloridegehalte bij Gemaal Grootslag lager is als bij Gemaal Lely. Gemaal Grootslag ligt echter wel dichterbij FL38 en kan daardoor ook in bepaalde situaties mogelijk een effect hebben op FL38. NB: Het meetsignaal gaat soms geleidelijk wat afwijken, en dit wordt dan gecorrigeerd bij het periodiek schoonmaken van de sensoren, zie bijvoorbeeld de plotselinge verhoging eind september die niet in het model is te zien. Het is aannemelijk dat de metingen het chloridegehalte in de voorliggende periode onderschatten, waardoor de prestatie van het model eigenlijk (nog) beter is dan het lijkt op basis van Figuur 5-40.

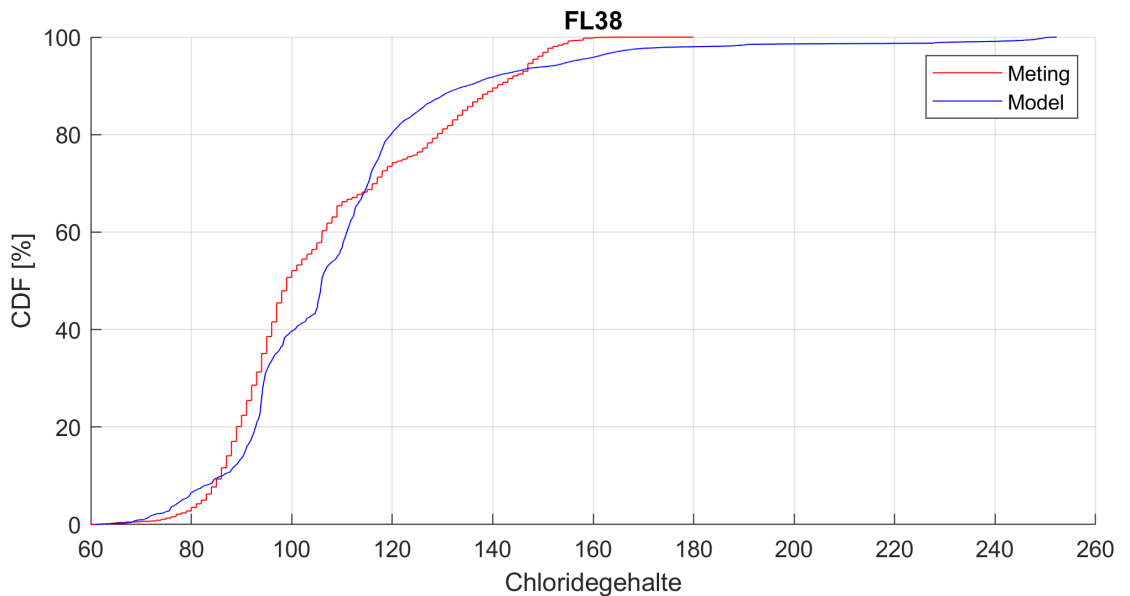
Voor het beter begrijpen van de verschillen tussen het model en de metingen is het ook van belang om verder in te zoomen op “Piek 2” in Figuur 5-40. Deze piek van 23 – 27 september komt in de metingen niet voor. Het chloridegehalte aan het wateroppervlak in de voorliggende periode is weergegeven in Figuur 5-43. Op 12 september is tussen Gemaal Lely in Gemaal Grootslag een zoutpluim te zien. Deze zoutpluim is het gevolg van lozingen vanuit Gemaal Lely en Gemaal Grootslag die in deze periode water hoger zijn als daarvoor, zie ook Figuur 5-40. In de dagen daarna wordt het zout vanaf de bodem opgewoeld door de hoge windgedreven stroming. Vervolgens wordt dit zout tussen 16 en 24 september in oostelijke richting getransporteerd richting FL38. Aangezien deze piek niet terug te zien is in de metingen is het waarschijnlijk dat de zoutlast vanuit Gemaal Lely en/of Gemaal Grootslag worden overschat. Dat kan zijn door een overschatting van de debieten (kwaliteit van de data onbekend) of een overschatting van de chloridegehalten van het geloosde water (geen data voor beschikbaar dus gebaseerd op typische waarden van 3000 mg/L bij Gemaal Lely en 1500 mg/L bij Gemaal Grootslag). Voor het verder verbeteren van de prestatie van het model bij FL38 is het dus van belang om de kwaliteit van de randvoorwaarden bij Gemaal Lely en Gemaal Grootslag verder te onderzoeken en waar mogelijk te verbeteren. Eventueel zouden dergelijke pieken ook gerelateerd kunnen zijn aan een overschatting van de verticale menging (door bijvoorbeeld een overschatting van de windschuifspanning of onderschatting van de verticale dichtheid gradiënten). Een overschatting van de windschuifspanning rondom Andijk is echter niet waarschijnlijk gezien de verschillen tussen de gebruikte ERA5 forcering en hogere resolutie HARMONIE data (zie Figuur 5-4).

In Figuur 5-44 wordt de gemodelleerde piek van begin december 2022 verder geanalyseerd. In de periode voorafgaand aan de piek is er sprake van een continue lozing vanuit Gemaal Lely (gemiddeld ongeveer 8 m³/s gedurende 14 dagen). Op 3 december is vlakbij Gemaal Lely dan ook een zoutpluim te zien met chloridegehalten tot ongeveer 400 mg/L. Vervolgend wordt deze pluim vanaf 5 december richting Andijk getransporteerd door windgedreven stromingen. In het model neemt in ongeveer een dag tijd het chloridegehalte bij FL38 toe van 120 mg/L tot 250 mg/L. In de metingen is een dergelijke piek niet te zien. Dit bevestigt de

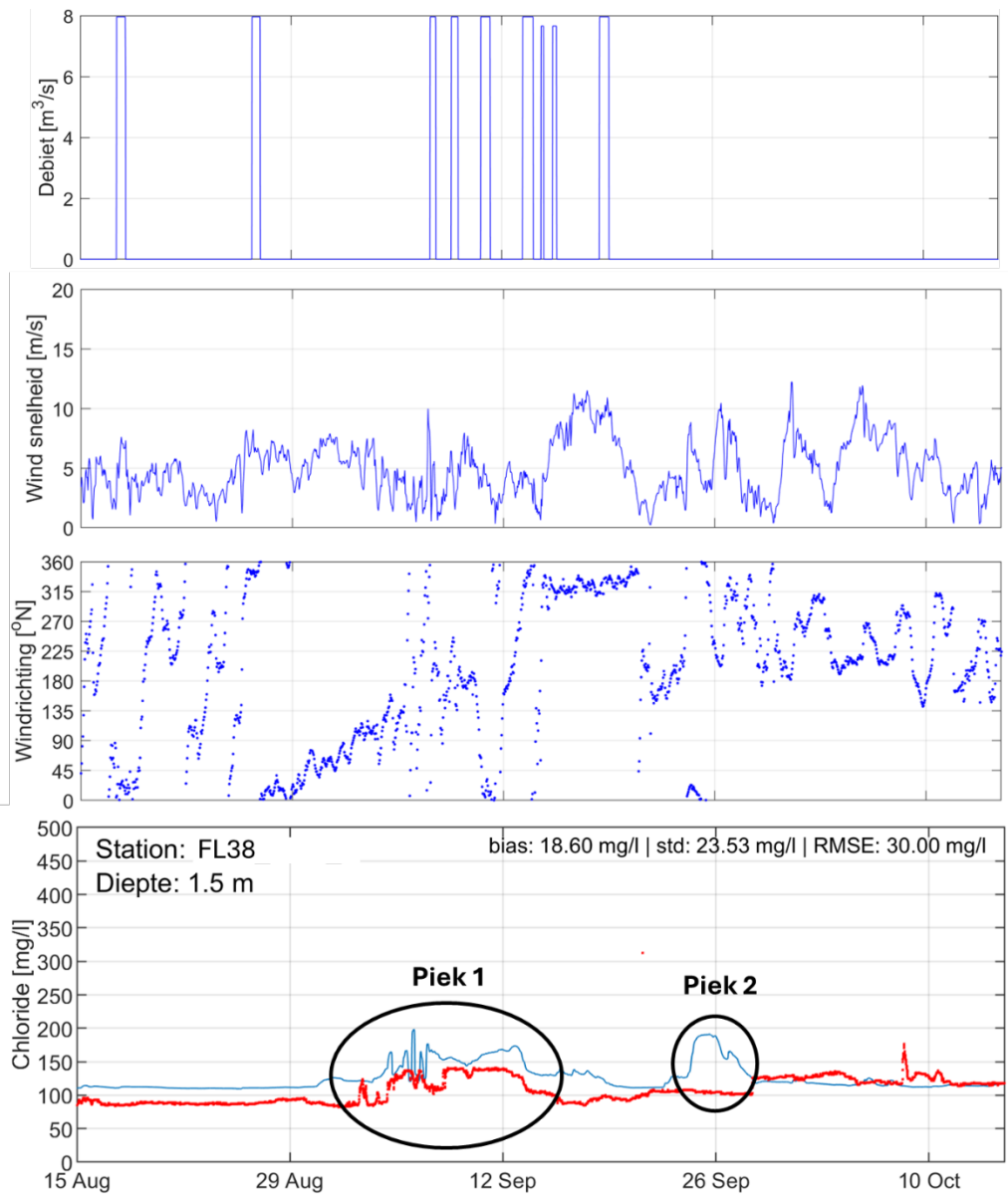
aanname hierboven dat de zoutlast vanuit Gemaal Lely en Gemaal Grootslag worden overschat. Het is voorstelbaar dat het chloridegehalte daalt als er meer wordt geloosd door deze gemalen. In de metingen is in deze periode overigens sprake van een kleine verhoging van ongeveer 25 mg/L. Het is mogelijk dat deze verhoging, die qua timing bijna gelijk valt met "Piek 3" in het model, veroorzaakt wordt door zoutlozing vanuit Gemaal Lely en/of Grootslag.



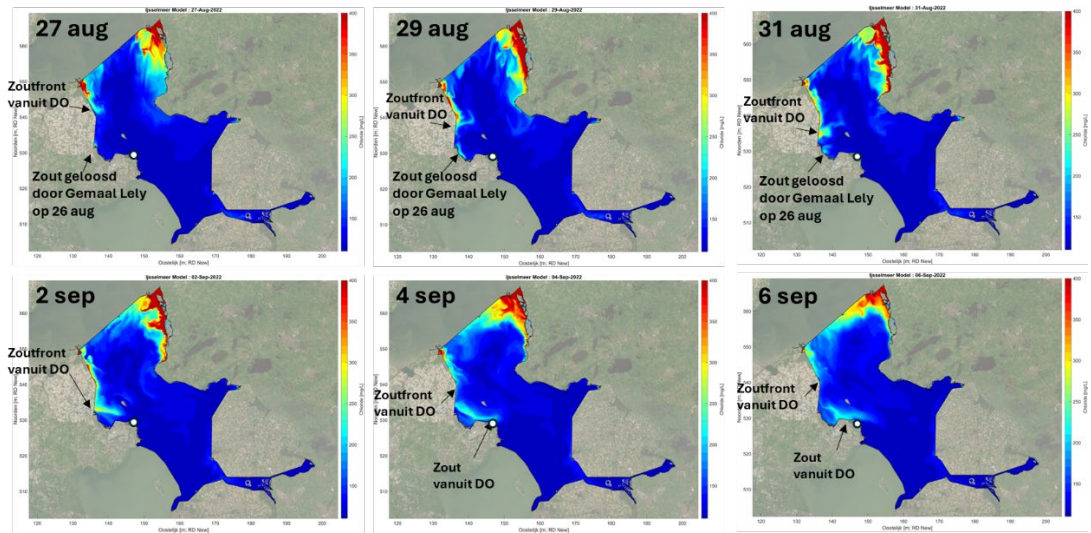
Figuur 5-38 Vergelijking gemeten en gemodelleerde chloridegehalte bij station FL38.



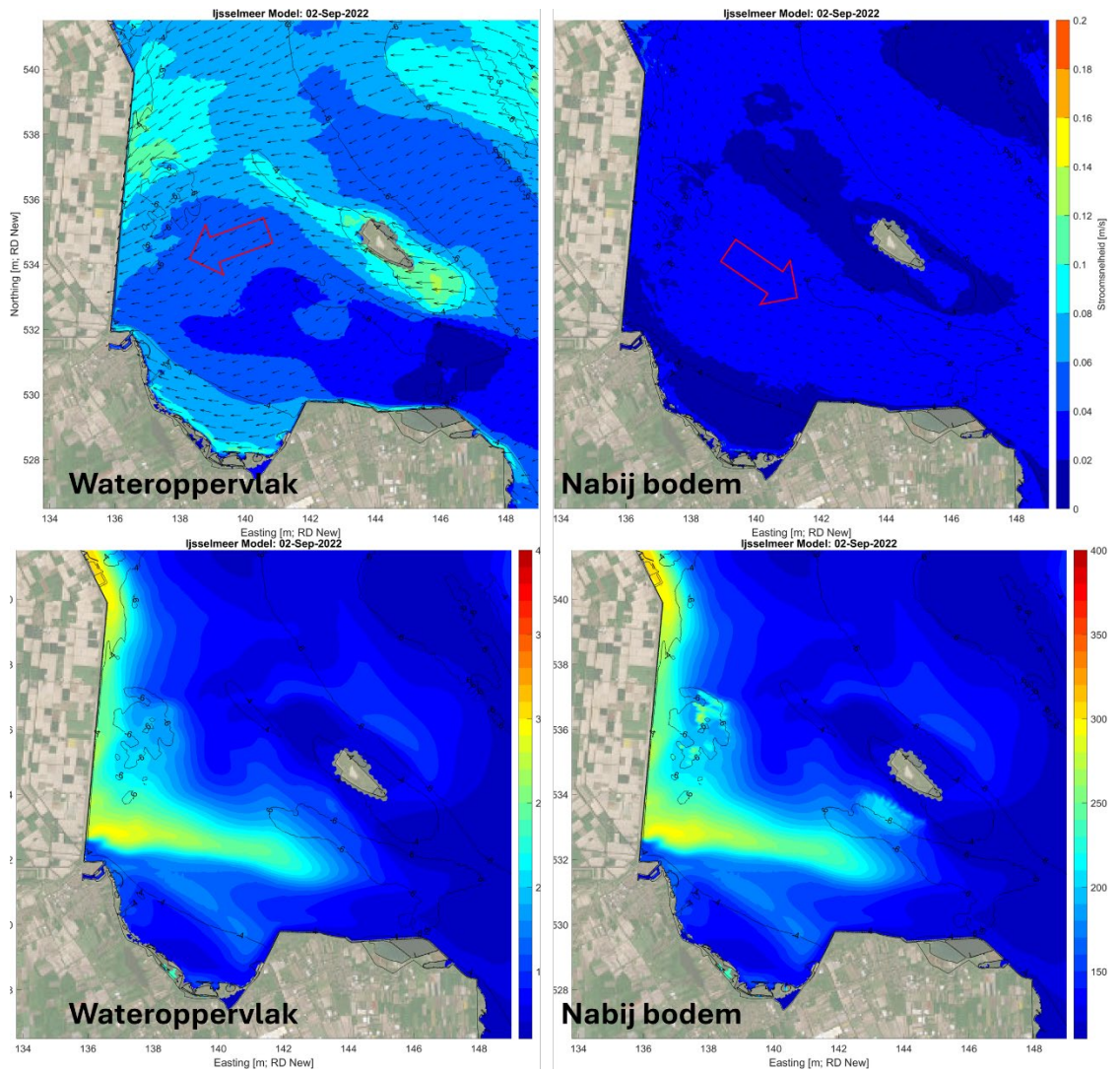
Figuur 5-39 Statistische analyse van de gemeten en gemodelleerde chloride bij station FL38. Opgemerkt wordt dat alle metingen boven 200 mg/L zijn genegeerd, vanwege het vermoeden van meeton nauwkeurigheden, zie ook individuele rode punten in Figuur 5-38.



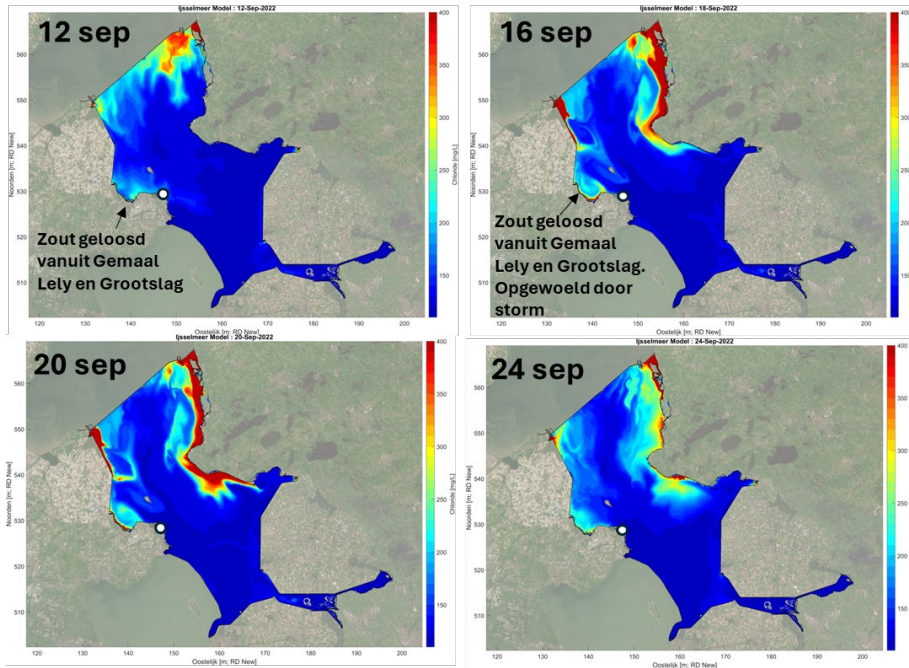
Figuur 5-40 Analyse van pieken in chloridegehalte bij FL38 in de maand september 2022. Boven: Maaldebiet bij Gemaal Lely, 2^e paneel: windsnelheid in model nabij Andijk, 3^e paneel: windrichting, 4^e paneel: vergelijking gemeten (rood) en gemodelleerde (blauw) chloridegehalte bij station FL38.



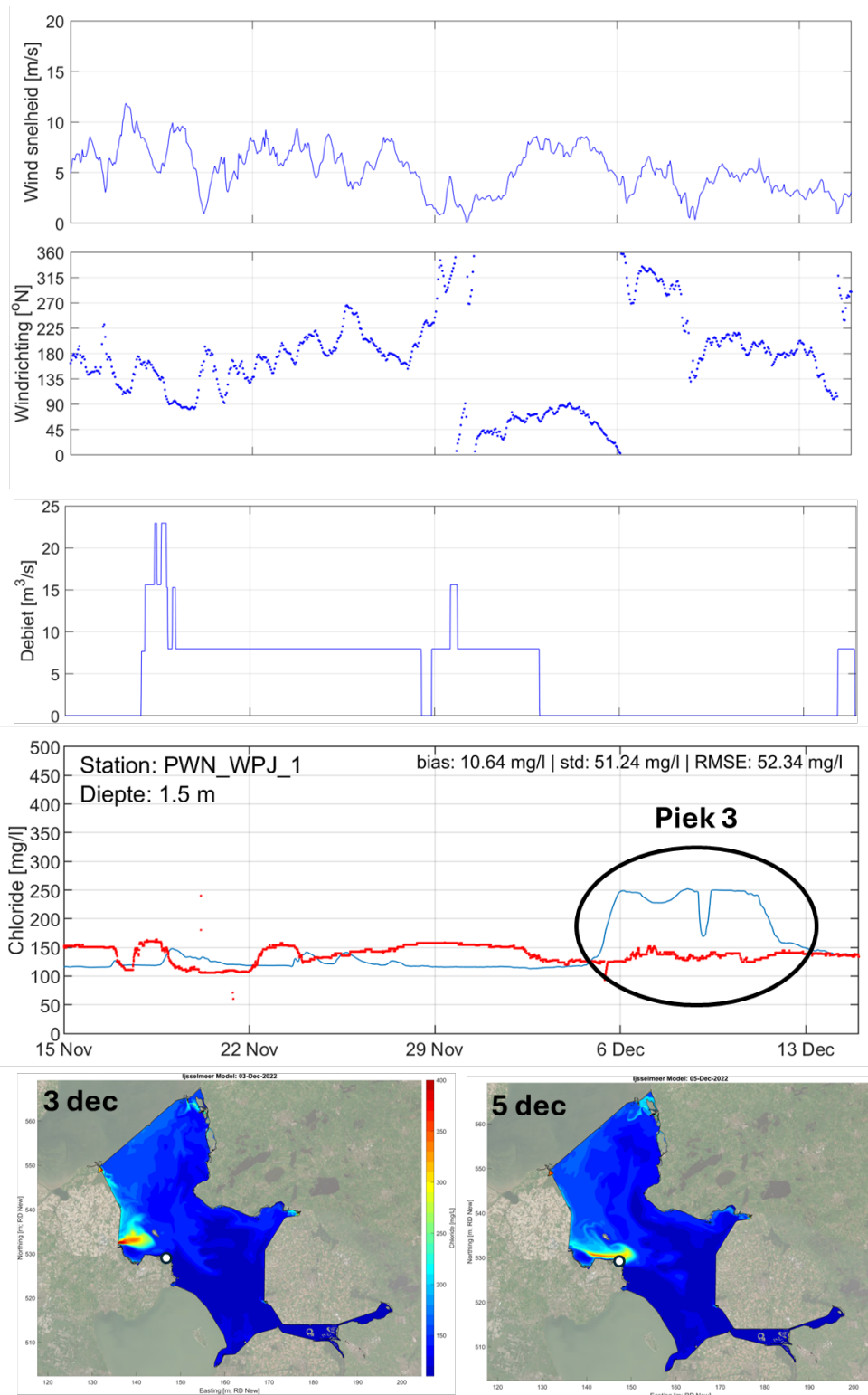
Figuur 5-41 Analyse van de piek in chloride bij FL38 vanaf begin september 2022, "Piek 1" in Figuur 5-40. De witte stip geeft meetlocatie FL38 weer. De figuren geven het gemodelleerde chloridegehalte aan de waterspiegel weer. In de figuren wordt het zoutfront vanuit Den Oever aangegeven evenals de vermoedelijke pluim vanuit Gemaal Lely.



Figuur 5-42 Boven: Gemodelleerde stroompatronen op 2 september 2022 00:00. Links: nabij het wateroppervlak. Rechts: nabij de bodem. De rode pijl is toegevoegd om de dominante richting aan te geven. Onder: chloridegehalte bij het wateroppervlak (links) en de bodem (rechts).

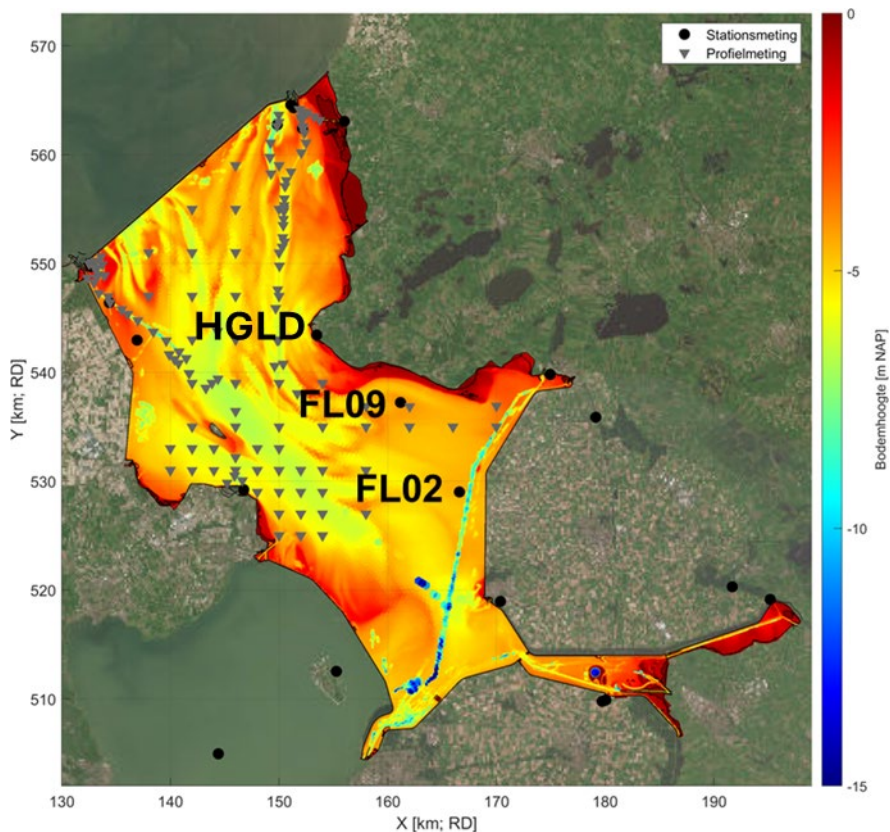


Figuur 5-43 Analyse van de piek in chloride bij FL38 eind september 2022, "Piek 2" in Figuur 5-40. De witte stip geeft meetlocatie FL38 weer. De figuren geven het gemodelleerde chloridegehalte aan de waterspiegel weer.



Figuur 5-44 Analyse van de piek in chloride bij FL38 begin december 2022. Boven: windsnelheid, 2^e paneel: windrichting, 3^e paneel: vergelijking gemeten en gemodelleerde chloridegehalte bij FL38. Onder: het gemodelleerde chloridegehalte aan de waterspiegel op 3 en 5 december. De witte stip geeft meetlocatie FL38 weer.

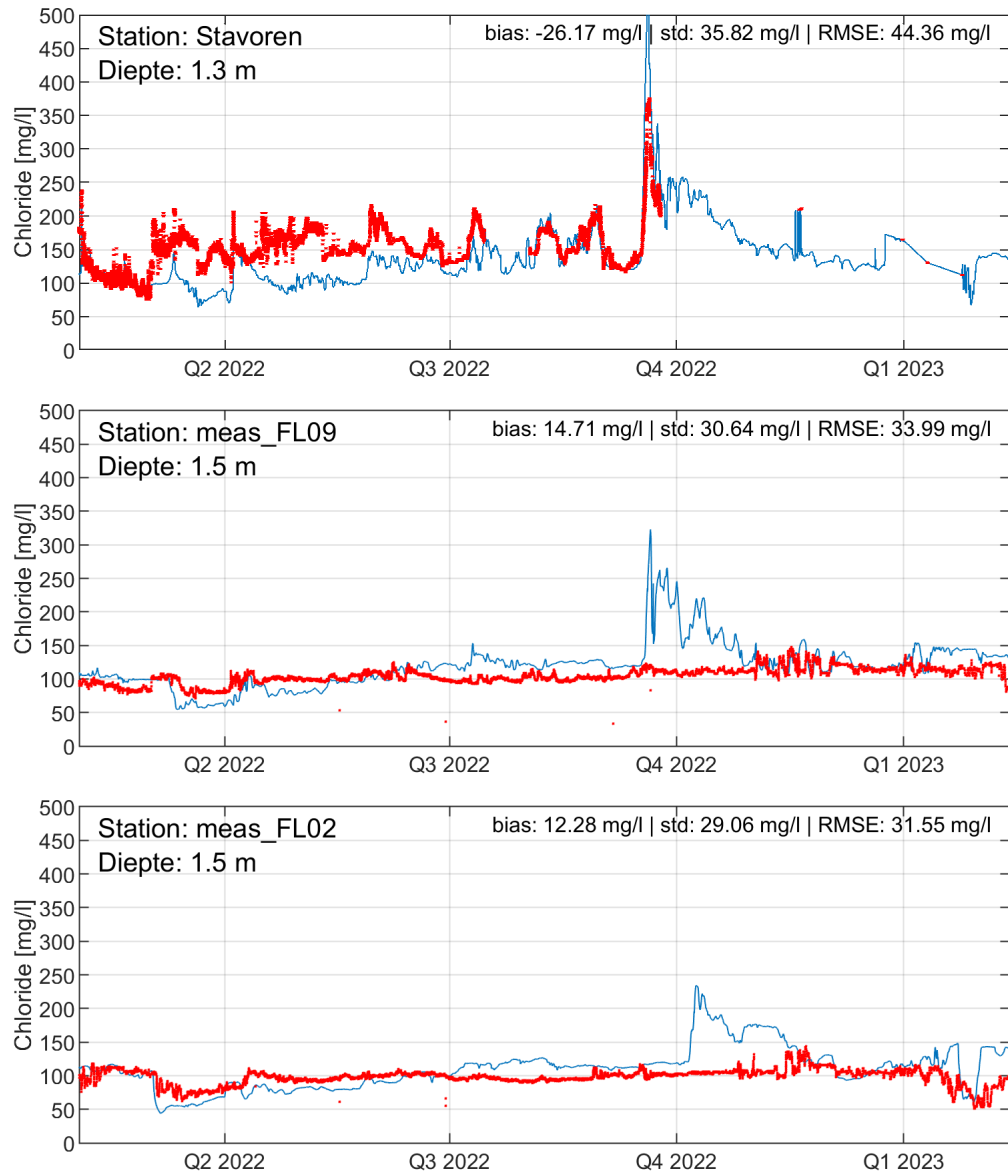
5.3.9 Overig



Figuur 5-45 Overzicht van de modelbodem en de locaties van meetstations HGLD, FL09 en FL02.

In Figuur 5-46 zijn de validatieresultaten weergegeven voor chloride bij meetlocatie HGLD (Stavoren), FL09 (Friese kust) en FL02 (Rotterdamse hoek). Bij meetlocatie HGLD (Stavoren) wordt de variatie in chloridegehalte goed weergegeven in het model. Bijna alle pieken in de metingen worden door het model qua timing goed weergegeven en in veel gevallen ook in absolute zin. Vooral de zoutdynamiek in augustus en september 2022 wordt zeer goed weergegeven. In de periode maart – juli 2022 valt op dat de metingen consistent hoger uitvallen.

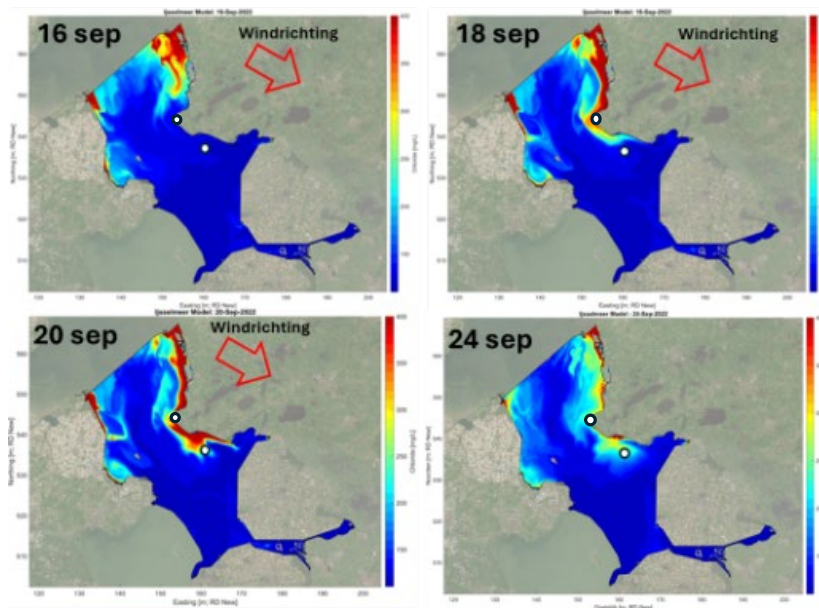
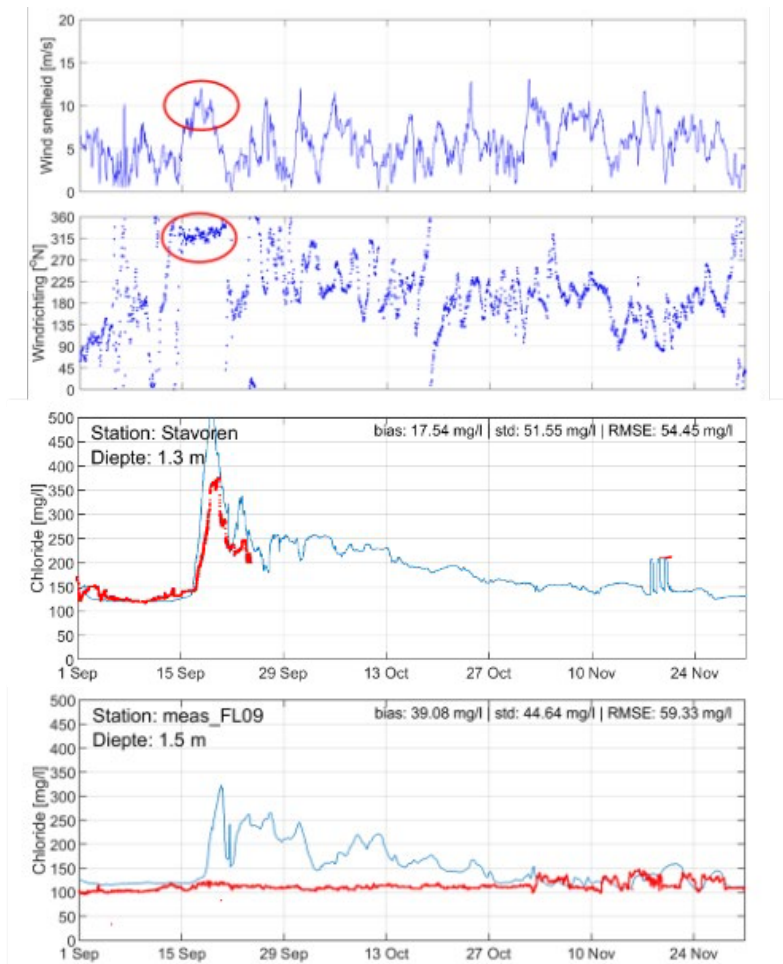
Voor de overige locaties valt op dat het model een grote piek voorspelt in september bij FL09 en oktober bij FL02, terwijl deze pieken niet/nauwelijks zichtbaar zijn in de metingen. Enkele andere kleinere schommelingen in de meting worden kwalitatief wel goed weergegeven door het model (zie bijvoorbeeld het eerste kwartaal in 2022).



Figuur 5-46 Vergelijking gemeten en gemodelleerde chloridegehalte bij station HGLD (boven), FL09 (midden) en FL02 (onder).

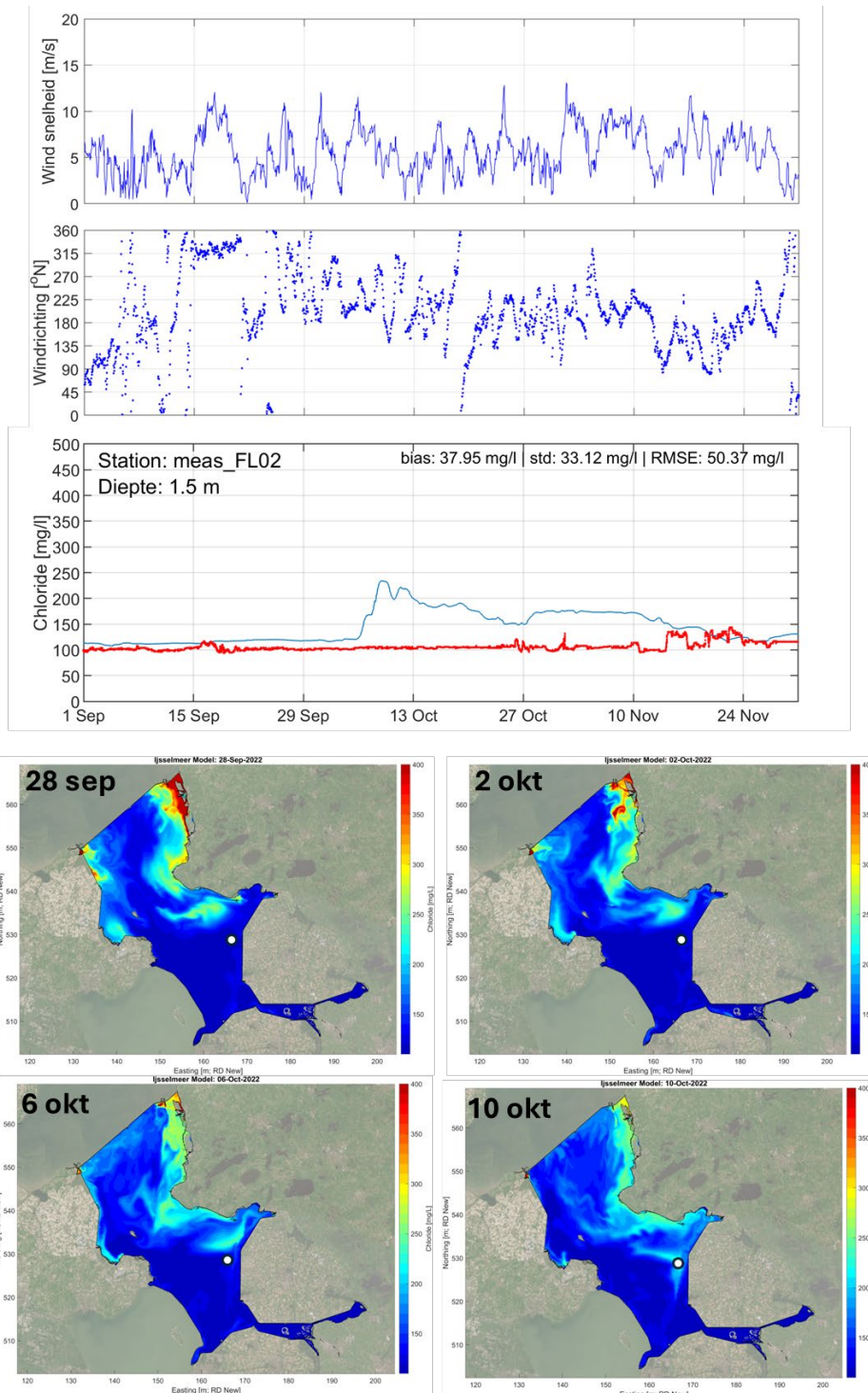
Figuur 5-47 geeft een analyse van de hoge chloridegehalten in september bij FL09 in het model. In de dagen voorafgaand aan de piek, komt de wind aanhoudend uit noordwestelijke richting (aangegeven met rode cirkels). Ten gevolge van deze wind, wordt relatief zout water vanuit Kornwerderzand tegen de oostelijke oever aangedrukt en langs de oever naar het zuiden getransporteerd. Vanaf 17 september is dit terug te zien bij meetlocatie HGLD. De timing van de zouttong bij HGLD/Stavoren wordt zeer goed weergegeven in het model. Het chloridegehalte in het model wordt tijdens de piek met ongeveer 100 mg/L overschat.

Vervolgens bereikt het zoutfront in het model meetstation FL09 rond 19/20 september. In de daaropvolgende maand blijft het zout in dat gebied hangen vanwege de wind die voornamelijk uit het zuidwesten tot noordwesten komt. In werkelijkheid heeft dit zoutfront het meetstation FL09 niet bereikt. Opgemerkt wordt dat het zout in het model meetstation FL09 net raakt. Op basis daarvan is het niet eenduidig om vast te stellen of het om een grote of geringe overschatting van het zuidelijke transport gaat. De overschatting in het model zou kunnen komen door een overschatting van het zuidelijke transport ten gevolge van de wind, door bijvoorbeeld een overschatting van de windsnelheden (voornamelijk ter hoogte van de oevers), fout in de windrichtingen, etc. Mogelijk is het zout in werkelijkheid meer aan de kust blijven 'plakken' dan in het model. Daarnaast kan het ook zijn dat er in het model te veel zout aanwezig was in het bovenste gedeelte van de waterkolom door een overschatting van de verticale menging dicht bij de schutsluis van Kornwerderzand en daarnaast misschien de spuisluis van Kornwerderzand.



Figuur 5-47 Analyse van piek in chloridegehalte bij FL09 in de maand september 2022. Boven: windsnelheid, 2^e paneel: windrichting, 3^e paneel: vergelijking gemeten (rood) en gemodelleerde (blauw) chloridegehalte bij station HGLD, 4^e paneel: vergelijking gemeten (rood) en gemodelleerde (blauw) chloridegehalte bij station FL09, onder: chloridegehalte aan het wateroppervlak gedurende 4 momenten net voor en tijdens de piek. De rode pijl geeft de dominante windrichting aan tijdens de periode met hogere windsnelheden.

In Figuur 5-48 wordt de chloride piek bij FL02 verder geanalyseerd. De figuur laat zien dat de overschatting bij FL02 gelinkt is aan de overschatting bij FL09 in september. De momentopnames laten zien dat het zoute water bij FL09 blijft hangen vanaf eind september en dat het vervolgens door een variabele noordwestelijke wind richting FL02 wordt getransporteerd. Voor de oorzaak van de overschatting bij FL02 is het dus beter om te kijken naar de overschatting bij FL09, zoals hierboven beschreven.



Figuur 5-48 Analyse van piek in chloridegehalte bij FL02 in de maand oktober 2022. Boven: windsnelheid, 2^e paneel: windrichting, 3^e paneel: vergelijking gemeten (rood) en gemodelleerde (blauw) chloridegehalte bij station FL09, onder: chloridegehalte aan het wateroppervlak gedurende 4 momenten net voor en tijdens de piek.

5.4 Validatie temperatuur

De vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde tijdseries van temperatuur geeft een consistent beeld voor vrijwel alle meetstations, zie Tabel 5-4. De seizoen trend wordt goed weergegeven door het model, met over het algemeen een onderschatting in de orde van -0,3 en -0,6 °C. De RMSE is over het algemeen tussen de 0,5 en 0,8 °C.

Tabel 5-4 Overzicht validatie temperatuur voor de vaste meetstations.

Globaal gebied	Meetstation	Verticale niveau	Bias [°C]	RMSE [°C]
Den Oever	OESb	-1.5 m t.o.v. waterspiegel	-0.62	0.71
	OESmb	-4.5 m t.o.v. waterspiegel	-0.41	0.55
	OESmo	-5.6 m t.o.v. waterspiegel	-0.34	0.49
	OESo	-6.7 m t.o.v. waterspiegel	-0.33	0.49
	FL17	-1.5 m NAP	-0.52	0.69
	OEVB	-2 m NAP	-0.65	0.75
	OEVmb	-4 m NAP	-0.62	0.72
	OEVmo	-5.5 m NAP	-0.43	0.71
	OEVo	-7 m NAP	-0.43	1.00
	FL48	-1.5 m NAP	-0.47	0.59
Kornwerzand	KOSb	-1.5 m NAP	-0.58	0.70
	KOSmb	-4.5 m NAP	-0.28	0.67
	KOSmo	-10.25 m NAP	-0.44	0.53
	KOSo	-12 m NAP	-0.24	0.65
	FL16	-1.5 m NAP	-0.53	0.71
	KOMB	-2 m t.o.v. waterspiegel	-0.52	0.62
	KOMmb	-5 m t.o.v. waterspiegel	-0.40	0.51
	KOMmo	-6 m t.o.v. waterspiegel	-0.51	0.61
	KOVb	-2 m NAP	-0.63	0.73
	KOVmb	-5 m NAP	-0.31	0.73
	KOVmo	-7 m NAP	-0.96	1.84
	KOV0	-8.5 m NAP	-1.1	3.43
Overig	FL38	-1.5 m NAP	-0.55	0.83
	FL09	-1.5 m NAP	-0.54	0.66
	FL02	-1.5 m NAP	-0.46	0.55

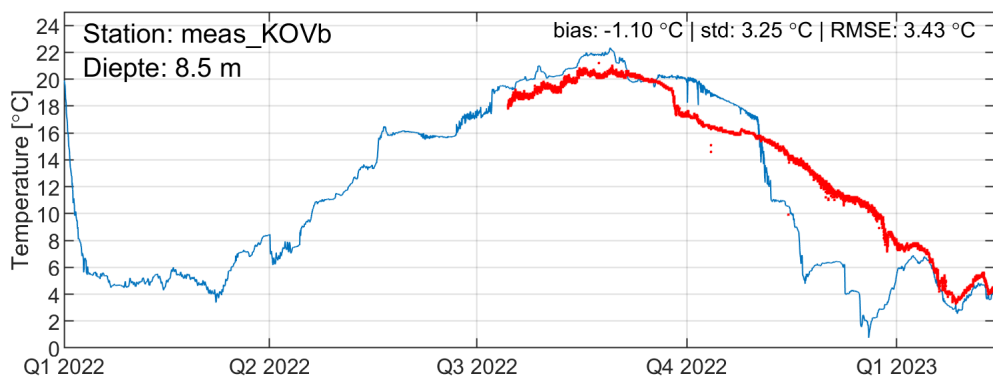
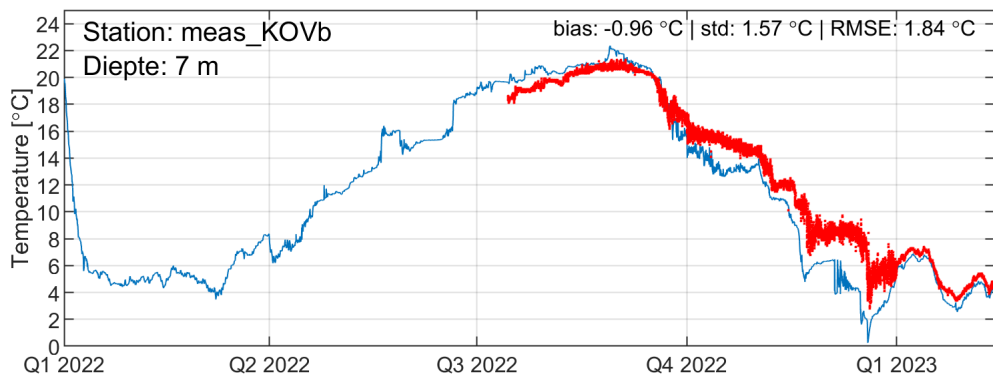
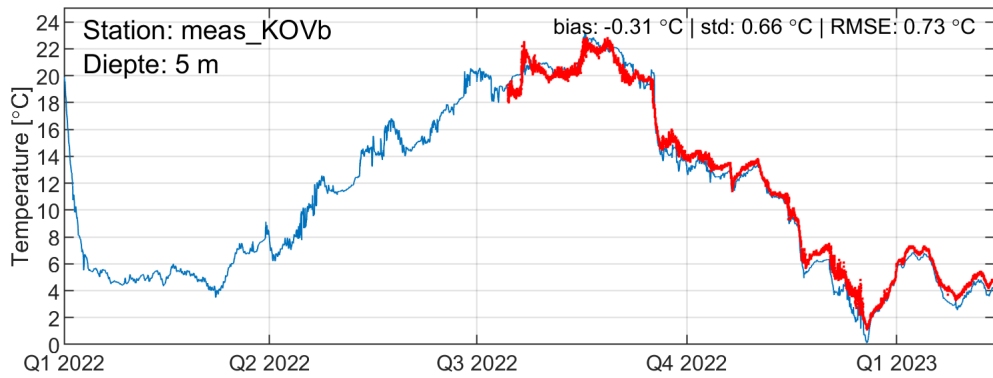
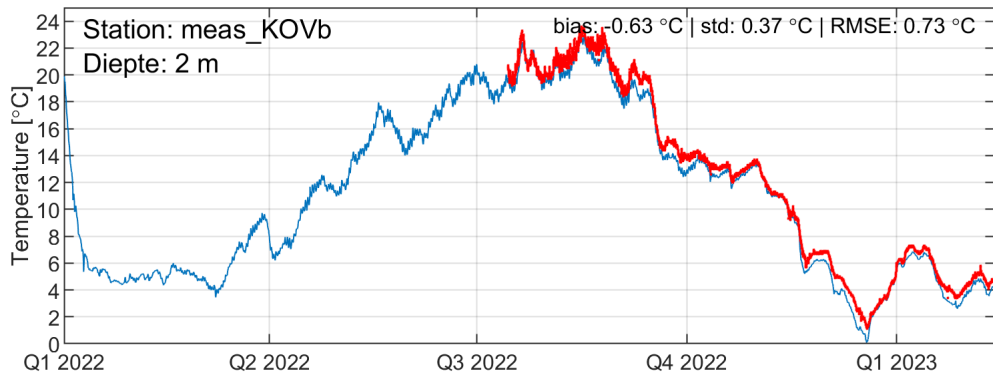
Figuur 5-49 toont voor station FL02 (centraal in het IJsselmeer) de gemeten en gemodelleerde tijdseries. Deze locatie is gekozen omdat er gedurende de hele periode metingen beschikbaar zijn en vanwege de centrale ligging. De onderschatting is het grootst in de herfst/winter van 2022/2023. Aangezien de bias en RMSE behoorlijk uniform zijn over het gehele meer is het aannemelijk dat de onderschatting wordt veroorzaakt door grootschalige processen en niet zozeer door een onderschatting van de watertemperatuur in bijvoorbeeld de debietrand bij de mond van de IJssel. Gedacht kan worden aan de meteorologische forcering (luchttemperatuur, windsnelheden) of de instellingen van het temperatuurmodel (bijv. Stanton en Dalton coëfficiënten). Indien bijvoorbeeld de windsnelheid in het model niet overeenkomt met de werkelijkheid heeft dit een impact op de evaporatieve en convectieve warmtefluxen. Op basis van Figuur 5-4 kan geconcludeerd worden dat de windsnelheden (en

daarmee waarschijnlijk de verdamping en convectie) worden overschat in het Noordelijke gedeelte van het IJsselmeer, terwijl het tegenovergestelde geldt voor het grootste gedeelte van het IJsselmeer. Daarnaast kan het ook te maken hebben met de afhandeling van de zoninstraling indien de bodem wordt bereikt. In D-HYDRO wordt aangenomen dat het gedeelte van de zoninstraling dat de bodem raakt geen effect meer heeft op de watertemperatuur of de bodemtemperatuur. In relatief ondiepe gebieden (ten opzichte van de Secchi diepte) zorgt dit voor een systematische verlaging van de watertemperatuur.

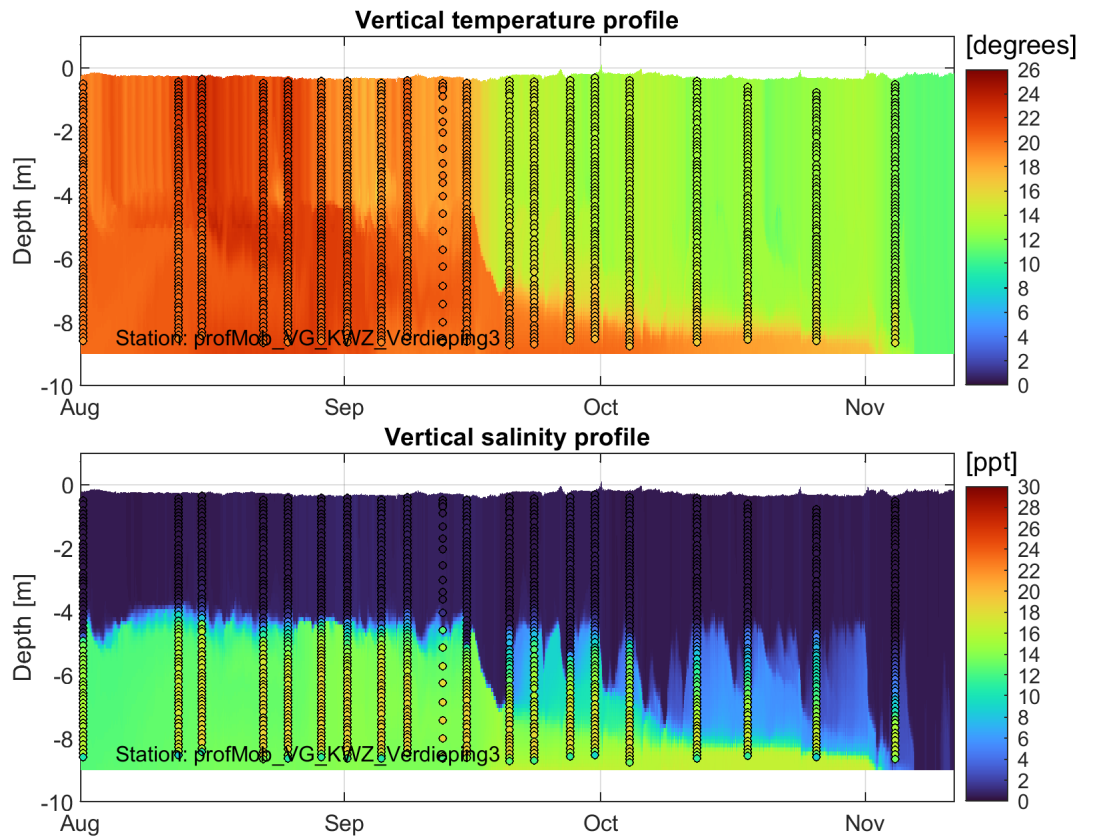


Figuur 5-49 Vergelijking gemeten en gemodelleerde watertemperatuur bij meetstation FL02.

De bias en RMSE wijkt alleen significant af nabij de bodem in de vaargeul van Kornwerderzand (KOV*) en in mindere mate in Den Oever (OEV*). Figuur 5-50 toont de vergelijking voor de vaargeul van Kornwerderzand. Nabij de waterspiegel is de validatie vergelijkbaar met de hierboven meetstation FL02. Bij de bodem zijn grote verschillen te zien in de periode oktober - december 2022. Figuur 5-51 toont een Z-T diagram waarbij gemeten profielen van de watertemperatuur en het zoutgehalte worden vergeleken met het model ter hoogte van het permanente meetstation KOV*. Tot en met midden september is er zowel in de metingen als in het model een duidelijke stratificatie te zien met een scherpe overgang van zoet naar zout ter hoogte van ongeveer -4 m NAP. Vanaf midden september neemt de watertemperatuur aan het oppervlak af door de afnemende luchttemperatuur en toegenomen windsnelheid. Bij de bodem blijft de temperatuur in de meting (en in eerste instantie ook in het model) echter relatief hoog, omdat deze watermassa in beperkte mate in contact staat met het oppervlaktewater vanwege het hogere zoutgehalte. In het model wordt de stratificatie echter te snel afgezwakt (zie ook 5.3.4), waardoor de gemodelleerde temperatuur bij de bodem vanaf oktober/november 2022 significant lager is dan in de metingen. Deze afwijking komt dus niet door een fout in het temperatuurmodel, maar door het te snel opbreken van de zoutstratificatie aan de hand van (wind-gedreven) stroming.



Figuur 5-50 Vergelijking gemeten en gemodelleerde watertemperatuur in de vaargeul van Kornwerderzand (KOVb, KOVmb, KOVmo, KOVo).



Figuur 5-51 Boven: Z-T diagram van de watertemperatuur op locatie 'VG_KWZ_Verdieping3' voor de periode aug – nov 2022. Onder: Z-T diagram van het zoutgehalte. Het modelresultaat is te zien in de achtergrond, de metingen zijn met bolletjes te zien in de voorgrond.

6 Discussie

6.1 Analyse zoutlek vanuit spuisluisen

In deze paragraaf wordt een vergelijking gemaakt tussen de zoutlast door lekkage bij de spuicomplexen en de zoutlast vanuit de schutsluisen van Kornwerderzand en Den Oever. Opgemerkt wordt dat de zouttransporten in deze paragraaf corresponderen met de totale zouttransport en niet het totale chloridetransport. Het chloridetransport (kg Cl-/s) is gelijk aan het zouttransport (kg zout/s) gedeeld door 1,80655.

Figuur 6-1 toont de analyse van de gemodelleerde zoutlasten bij Kornwerderzand. Voor deze analyse is gefocust op de maanden juli, augustus en september van 2022, omdat de intervallen tussen opvolgende spuiperiodes het langst waren in deze periode. In Figuur 6-2 (linker deel) worden de gemiddelde zouttransporten visueel weergegeven. Over de hele periode gemiddeld (3 maanden) is de netto zoutlast vanuit het spuicomplex 4 kg/s in richting van de erosiekuil⁷. Dat kon worden uitgesplitst in een netto inkomend zouttransport ten gevolge van lekkage naar binnen en buiten (+32,1 kg/s) en een uitgaand zouttransport ten gevolge van spuien (-28,1 kg/s)⁸. Het inkomende zout t.g.v. lekkage wordt voor een deel gebufferd in de erosiekuil. Dat bufferen gebeurt vooral in de eerste 1 à 2 dagen na het spuien, vergelijk bijvoorbeeld de rode en blauwe lijn in het middelste paneel van Figuur 6-1. Na 1 a 2 dagen is de erosiekuil over het algemeen grotendeels gevuld met zout en ontstaat er een significant zouttransport over de drempel richting het meer. Van de 32,1 kg/s richting de erosiekuil stroomt 21,2 kg/s uiteindelijk richting het meer. Mede dankzij de erosiekuil is de zoutlek richting het meer dus ongeveer 30% lager dan de zoutlek bij het spuicomplex in de zomerperiode en volgens het model.

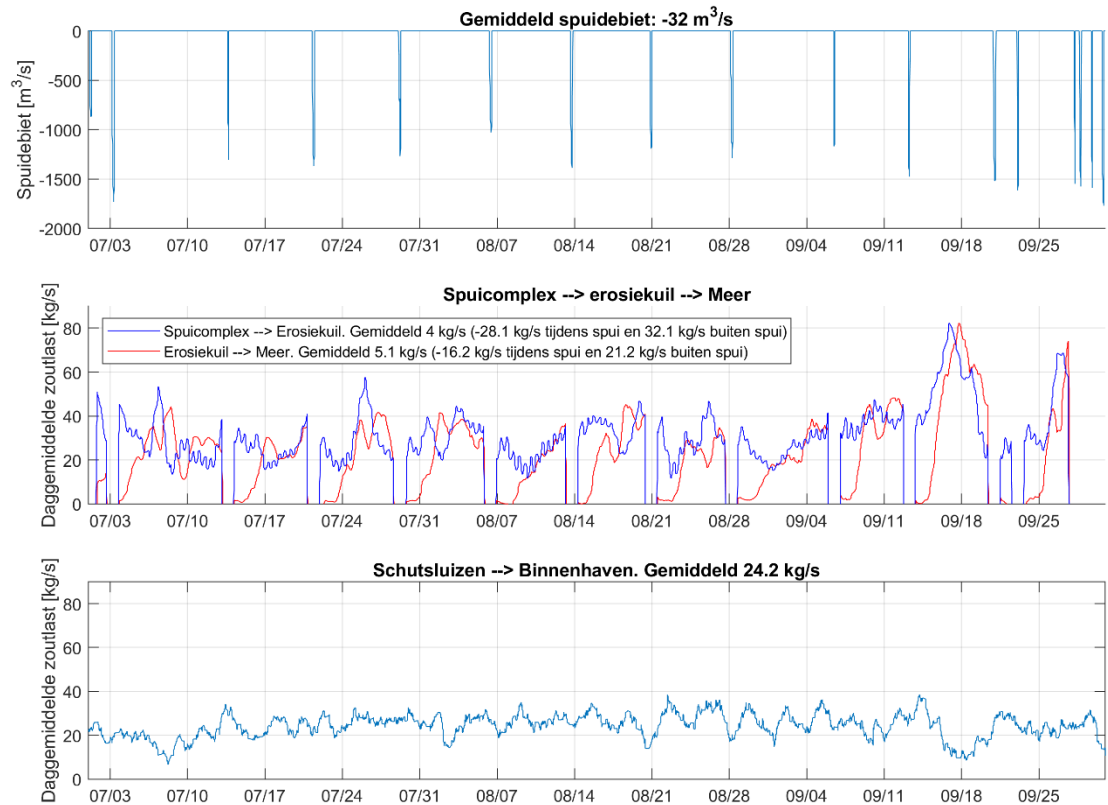
Vanuit de schutsluisen is de gemiddelde zoutlast in deze 3 maanden 24,2 kg/s. De gemiddelde zoutlast vanuit de erosiekuil richting het meer ten gevolge van lekkage zijn dus in dezelfde orde (21,2 kg/s) als de zoutlast vanuit de schutsluisen. Verwacht wordt echter wel dat tijdens het spuien een groot gedeelte van de zoutlek van de spuisluisen weer zal worden afgevoerd. Het zout ten gevolge van lekkage zal daarom waarschijnlijk minder ver het meer op worden getransporteerd. Hoe dit zich verhoudt tot het zout vanuit de schutsluisen kan alleen worden vastgesteld als er tracers worden toegevoegd aan de simulatie.

Naast de gemiddelde zoutlast over de gehele periode is het ook interessant om te kijken naar de daggemiddelde zoutlast vanuit het spuicomplex. Indien er niet wordt gespuid varieert de daggemiddelde zoutlek over het algemeen tussen de 20 en 40 kg/s. Midden september 2022 is een uitschieter te zien tot 80 kg/s. Deze uitschieter komt vanwege de hoge waterstand op zee door een aanhoudende noordenwind, waardoor het verval over het complex relatief groot is en daarmee ook de lekdebieten.

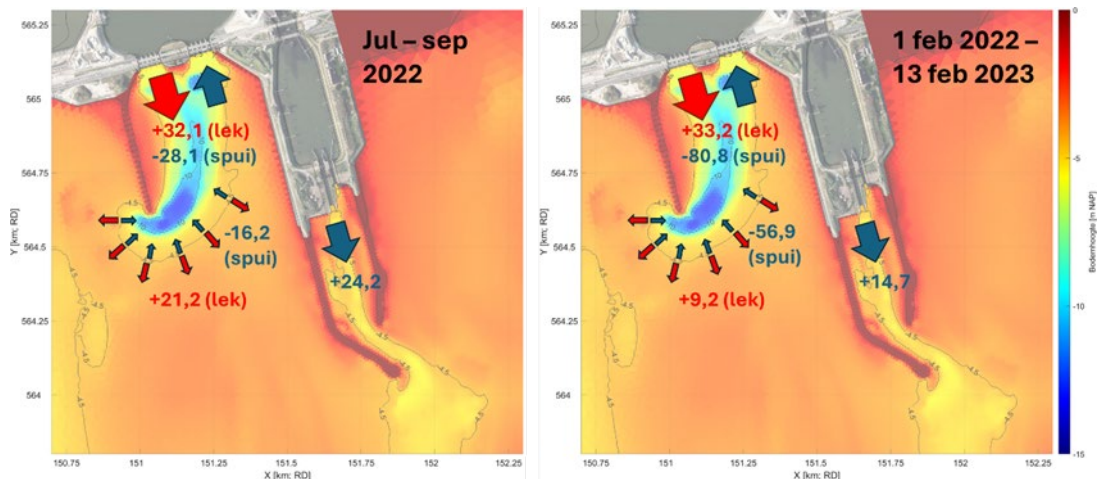
⁷ De netto zoutlast vanuit de erosiekuil richting het meer is groter (5,1 kg/s) dan de zoutlast vanuit het spuicomplex richting de erosiekuil (4 kg/s) in de periode 1 jul 2022 t/m 1 okt 2022. Dit komt waarschijnlijk grotendeels doordat de erosiekuil op 1 jun 2022 meer zout bevat (chloridehaltes rond de 6000 mg/L op -4,5 m NAP en dieper) dan op 1 okt 2022 (vrijwel zoet). Daarnaast kan een deel van het verschil ook zijn veroorzaakt door de numerieke implementatie van cross-sections in D-HYDRO.

⁸ Het onderscheid tussen spuien en lekkage is gemaakt op basis van de spuitijdsreeksen. Alle transporten die tijdens een actieve spuiperiode vallen worden gecategoriseerd als spui-gerelateerd en alle overige transporten als lek-gerelateerd. Opgemerkt wordt dat in beide periodes de transporten kunnen worden aangepast door windgedreven uitwisseling. Op de langere termijn valt dit effect echter grotendeels weg.

Naast de boven beschreven periode zijn in Figuur 6-2 (rechter deel) ter vergelijking ook de gemiddelde transporten voor de hele simulatieperiode van 1 februari 2022 – 13 februari 2023 weergegeven. De (~jaar) gemiddelde zoutlast van de schutsluizen bij Kornwerderzand is 14,7 kg/s in het model. Jaargemiddeld gaat er 47,6 kg/s uit via de spuisluisen van Kornwerderzand (inkomende zoutlek 33,2 kg/s en uitgaand met spuien 80,8 kg/s).



Figuur 6-1 Analyse van zoutlast vanuit spuicomplex (t.g.v. lekkage) en de schutsluizen in de periode juli 2022 t/m eind september 2022 bij Kornwerderzand. Boven: spuidebiet, midden: daggemiddelde zoutlast vanuit spuicomplex (positief is transport richting de erosiekuil), onder: daggemiddelde zoutlast vanuit de schutsluizen (positief is transport richting de binnenhaven).



Figuur 6-2 Gemiddelde zouttransporten nabij Kornwerderzand. Links: periode jul-sep 2022, rechts: periode 1 feb 2022 – 13 feb 2023.

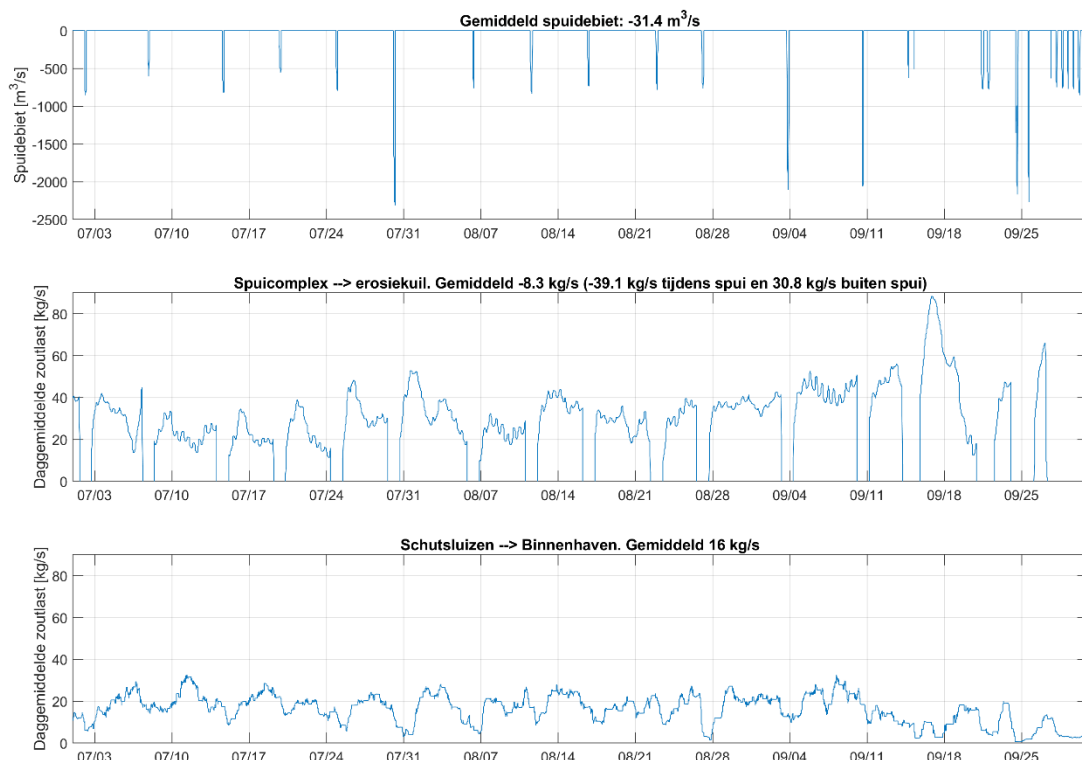
Figuur 6-3 en Figuur 6-4 tonen dezelfde analyse voor Den Oever. Opgemerkt wordt dat in het model geen cross-secties zijn opgenomen op de rand van de erosiekuil van Den Oever. Er kan daarom niet geanalyseerd worden welk gedeelte van de zoutlek vanuit de erosiekuil verder het meer op stroomt.

Opvallend ten opzichte van Kornwerderzand is dat er in de zomerperiode een netto negatief zouttransport is bij het spuicomplex van $-8,3$ kg/s, tegenover $+3$ kg/s bij Kornwerderzand. Het verschil komt grotendeels doordat er tijdens het spuien meer zout wordt afgevoerd. Het gemiddelde spuidebiet over deze periode is namelijk zeer vergelijkbaar voor beide locaties (-32 m³/s bij Kornwerderzand en $-31,4$ m³/s bij Den Oever), terwijl het gemiddelde zouttransport t.g.v. spuien een stuk hoger is bij Den Oever ($-39,1$ kg/s vs $-28,1$ kg/s bij Kornwerderzand). Gemiddeld heeft het afgevoerde water bij Den Oever dus een zoutgehalte van ongeveer $1,25$ psu (chloridegehalte: 690 mg/L) in de beschouwde zomerperiode en bij Kornwerderzand een zoutgehalte van ongeveer $0,88$ psu (490 mg/L). De effectievere afvoer van zout bij Den Oever komt mogelijk door het feit dat er vanaf de erosiekuil geulen lopen richting de vaargeul. Zout dat via lekkage vanuit de erosiekuil richting het meer stroomt zal voornamelijk in deze diepere geulen blijven. Tijdens een spui zal het water ook voornamelijk vanuit deze geulen worden onttrokken, waardoor een groot gedeelte van het weggelekte zout weer richting de Waddenzee wordt getransporteerd. Bij Kornwerderzand kan het zout bij het overstromen van de erosiekuil in een breder gebied wegstromen (voornamelijk richting de brede geulen bij de Middelgronden). Tijdens een spui zal dan een kleiner gedeelte van het weggelekte zout worden meegenomen.

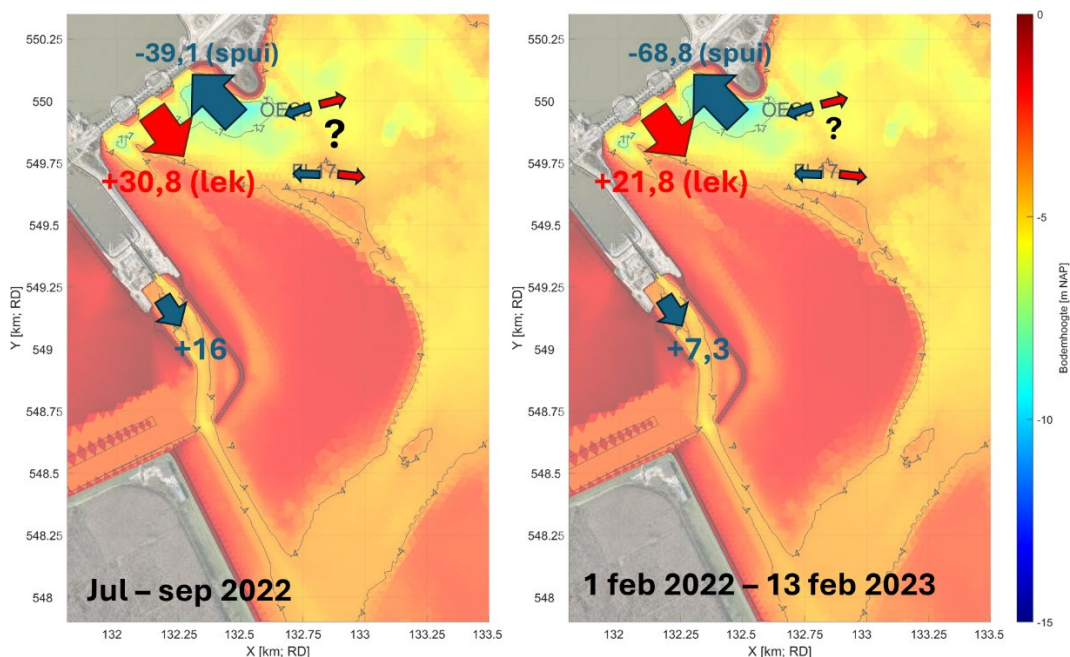
De gemiddelde zoutlast ten gevolge van zoutlek bij de spuisluizen is in de zomerperiode $30,8$ kg/s, vergelijkbaar met Kornwerderzand ($33,2$ kg/s). De zoutlast vanuit de schutsluis is 16 kg/s in deze periode en dus bijna 50% lager dan de zoutlast vanuit de spuisluizen. Zoals beschreven in de analyse voor Kornwerderzand zal de erosiekuil een gedeelte van de zoutlek vanuit het spuicomplex bufferen. Hoe het bruto zouttransport richting het meer zich verhoudt tot het zout vanuit de schutsluizen kan alleen worden vastgesteld als er tracers worden toegevoegd aan de simulatie. In paragraaf 5.3.5 zagen we dat in de metingen het zout verder het IJsselmeergebied indringt dan in het model. Het is nog niet duidelijk waaraan dat verschil is te wijten (zoutlast schutsluizen, zoutlek spuisluizen, bathymetrie, etc.).

In het rechter deel van Figuur 6-4 zijn ter vergelijking ook de gemiddelde transporten voor de hele simulatieperiode van 1 februari 2022 – 13 februari 2023 weergegeven. De (~jaar) gemiddelde zoutlast van de schutsluizen bij Den Oever is $7,3$ kg/s in het model. Over het jaar gemiddeld gaat er 47 kg/s uit via de spuisluizen van Den Oever (inkomende zoutlek $21,8$ kg/s en uitgaand met spuien $68,8$ kg/s). Dit is vrijwel gelijk aan de spuisluizen van Kornwerderzand (48 kg/s). Dit komt goed overeen met de verhouding tussen de (jaar)gemiddelde afvoeren bij beide complexen, respectievelijk 212 m³/s bij Den Oever en $217,8$ m³/s bij Kornwerderzand (zie Tabel 4-2).

Dat er jaargemiddeld een export van zout plaatsvindt via de Afsluitdijk komt omdat er sprake is van een systeem dat in evenwicht is. Op een langere tijdschaal (van bijvoorbeeld een jaar) zal de export van zout ongeveer gelijk moeten zijn aan de totale import van zout (via onder andere via de IJssel). De totale instroom in het meer is jaargemiddeld ongeveer 460 m³/s (zie paragraaf 4.3.3). Onder de aanname van een gemiddelde instromende chlorideconcentratie van 110 mg/L, stroomt er dus jaargemiddeld ongeveer 50 kg/s chloride het meer in (ongeveer 90 kg/s zout). Daarnaast stroomt er via de schutsluizen in totaal ook nog ongeveer 20 kg/s zout het IJsselmeer in. De totale zoutlast is dus jaargemiddeld ongeveer 110 kg/s. Dat zout wordt grotendeels via de spuisluizen afgevoerd (85% van de totale uitstroom). In het geval dat de export van zout evenredig is met het volume zou er via de spuisluizen dus ongeveer 95 kg/s moeten worden afgevoerd. Dat komt goed overeen met de in deze paragraaf berekende netto zouttransporten ($47 + 48$ kg/s) bij de spuisluizen.



Figuur 6-3 Analyse van zoutlast vanuit spuicomplex (t.g.v. lekkage) en de schutsluizen in de periode juli 2022 t/m eind september 2022 bij Den Oever. Boven: spuidebiet, midden: daggemiddelde zoutlast vanuit spuicomplex (positief is transport richting de erosiekuil), onder: daggemiddelde zoutlast vanuit de schutsluizen (positief is transport richting de binnenhaven).



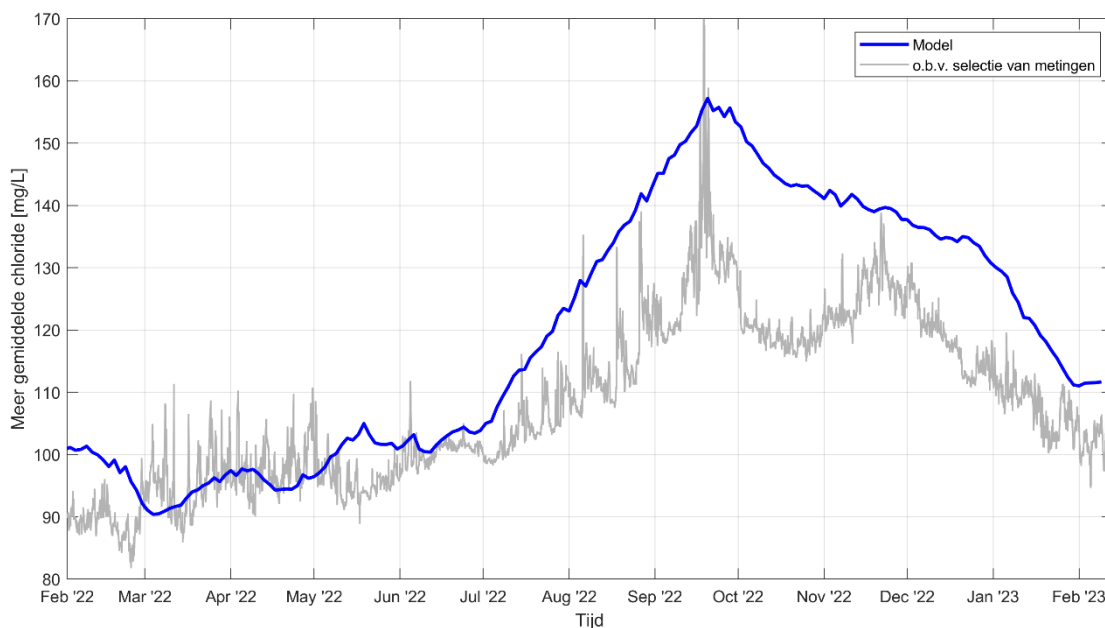
Figuur 6-4 Gemiddelde zouttransporten nabij Den Oever. Links: periode jul-sep 2022, rechts: periode 1 feb 2022 - 13 feb 2023.

6.2 Volume gemiddelde chloridegehalte

Figuur 6-5 toont het gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer (blauwe lijn). Het gemiddelde chloridegehalte is bepaald op basis van de mapvelden die met een interval van 2 dagen zijn weggeschreven. Het gemiddelde chloridegehalte is berekend door de totale hoeveelheid zout te delen door het totale volume. Het gemiddelde chloridegehalte varieert tussen de 90 mg/L (begin maart 2022) en bijna 160 mg/L (midden september 2022). In de eerste helft van 2022 varieert het gemiddelde chloridegehalte tussen 90 en 105 mg/L. Vervolgens neemt het vanaf begin juli 2022 in ongeveer 2,5 maand toe van 105 mg/L tot 158 mg/L (gemiddeld 0,8 mg/L toename per dag). Vanaf midden september neemt het gemiddelde chloridegehalte af tot ongeveer 135 mg/L eind december 2022 (gemiddelde afname ongeveer 0,25 mg/L per dag). Vervolgens neemt het gemiddelde chloridegehalte in een maand tijd af tot ongeveer 110 mg/L (gemiddelde afname van ongeveer 0,8 mg/L per dag).

Aan het eind van de simulatie is het gemiddelde chloridegehalte ongeveer 10 mg/L hoger dan een jaar daarvoor. Dit verschil lijkt op basis van een gemiddelde van een selectie⁹ van stationsmetingen aannemelijk (zie grijze lijn in Figuur 6-5). Op basis hiervan lijkt de systeemdynamica van het model op seizoensschaal te kloppen met de metingen.

Opgemerkt wordt dat de grijze lijn in Figuur 6-5 niet gebruikt kan worden om te beoordelen of het model het volume-gemiddelde chloridegehalte correct weergeeft, aangezien de accumulatie van zout bij de Afsluitdijk onvoldoende wordt meegenomen in de geselecteerde meetlocaties.



Figuur 6-5 Het gemodelleerde volume-gemiddelde chloridegehalte in het IJsselmeer (blauwe lijn). Ter interpretatie is ook het gemiddelde chloridegehalte gevisualiseerd o.b.v. een selectie van metingen (grijze lijn).

6.3 Randvoorwaarden voor deelmodellen

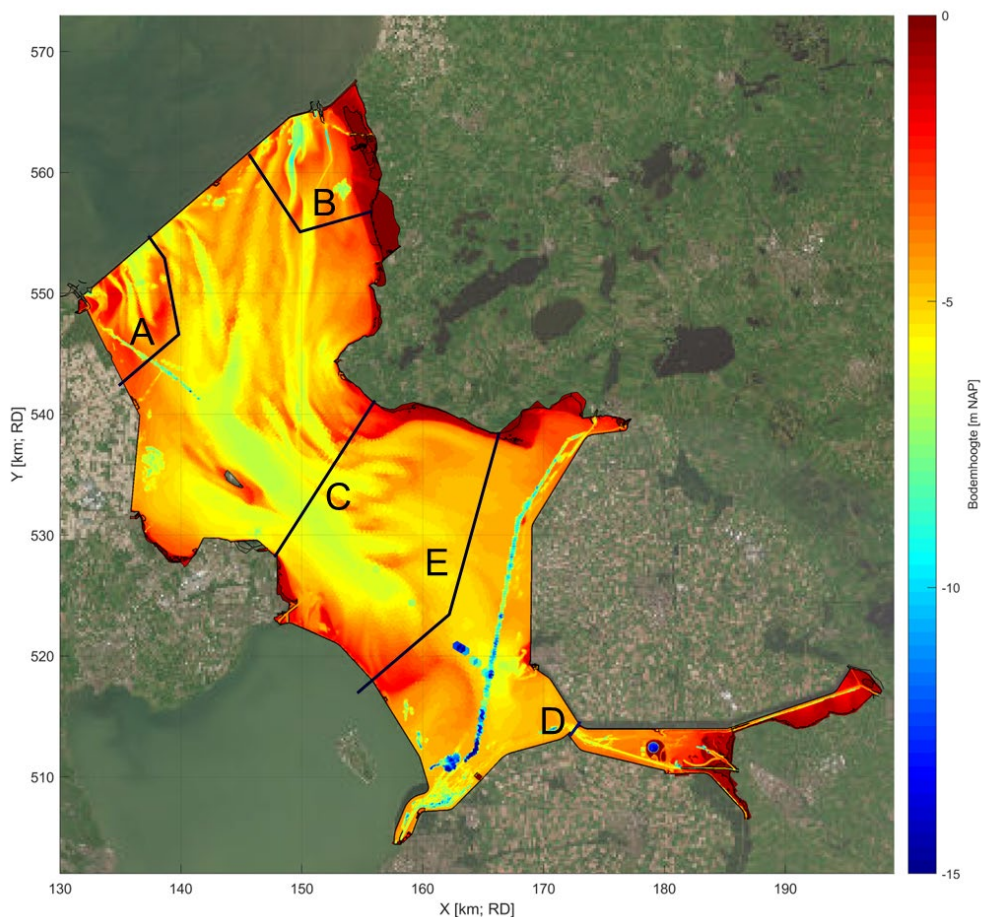
Het huidige model is rekentechnisch behoorlijk zwaar. Op het h7 cluster van Deltares neemt een berekening op 1 node met 44 cores, 3 maanden in beslag voor het doorrekenen van 1

⁹ Voor de selectie zijn alleen metingen gebruikt die gedurende de hele simulatieperiode beschikbaar zijn: FL48, FL02, LTRY, HOUTRHK, KETMWT, OUDZG, RAMSDP, STEILBK en VROUWZD.

jaar. Het wordt aanbevolen om methodes te onderzoeken om het model te versnellen. Omdat het onzeker is wat bereikt kan worden m.b.t. het versnellen is de validatiesimulatie voorzien van extra observatiepunten op de randen van mogelijke deelmodellen. De locaties van de randen van deze mogelijke deelmodellen zijn met RWS afgestemd, zie Figuur 6-6. De redenatie achter de voorgestelde gebieden:

- A,B: zouden gebruikt kunnen worden voor studies naar de zoutlek van de spuisluisen (optimalisering afmetingen erosiekuil, invloed van pompen, etc.). Deze gebieden zijn vergelijkbaar met de afmetingen van de deelmodellen die we tijdens dit project hebben gebruikt voor het valideren/kalibreren van de zoutlek bij de spuisluisen.
- C: Mogelijk toepasbaar bij kleinere ingrepen bij Kornwerderzand en Den Oever aan bijv. de schutsluisen.
- D: als mogelijk alternatief voor het gehele IJsselmeer model.
- E: Kan eventueel gebruikt worden om impact van maatregelen bij Den Oever en/of Kornwerderzand op Andijk te analyseren, en eventueel ook de invloed van gemaal Lely en Krabbergatsluisen. Of rand E hier voor geschikt is, is afhankelijk van het gebied dat door een maatregel wordt beïnvloed. Per geval zal op basis van transportpatronen geverifieerd moeten worden of de rand vergenoeg weg ligt.

De uitvoer van de simulatie is gearchiveerd bij Deltares. Voor gebruik van deze data kan contact opgenomen worden met Deltares.



Figuur 6-6 Overzicht van trajecten waar extra modeluitvoer is gegenereerd. Deze modeluitvoer kan gebruikt worden voor het generen van randvoorwaarden voor deelmodellen.

6.4 Aandachtspunten voor modelinvoer en modelinstellingen

6.4.1 Schutdata Kornwerderzand en Den Oever

De zoutdynamiek in het model hangt voor een groot gedeelte af van de schematisatie van de zoutflux vanuit de schutsluizen bij Kornwerderzand en Den Oever. De zoutflux bij de scheepvaartsluizen hangt nauw samen met de deur-open-tijden. De data die door RWS is geleverd bevat niet expliciet deze deur-open-tijden. Wel wordt er een begin- en eindtijd van een schutting weergegeven. De deur-open-tijden zijn op basis daarvan geschat met de nodige onzekerheid. Voor verdere ontwikkeling van het model is het van belang dat er toegang komt tot de exacte deur-open-tijden. Ook het in de toekomst beschikbaar komen van continue zoutmetingen aan weerszijden van de schutcomplexen zal helpen de zoutlasten van de schutsluizen nauwkeuriger te bepalen.

6.4.2 Zoutlek vanuit spuisluisen

Binnen de huidige studie is met beperkte gegevens geprobeerd om het effect van zoutlek via de spuisluisen mee te nemen. De zoutlek wordt voornamelijk bepaald door het waterstandsverschil over het spuicomplex (bekend op basis van metingen), het lekoppervlak (onzeker) en het zoutgehalte aan Waddenzee zijde (onzeker). Het zoutgehalte aan de zeezijde van het spuicomplex hangt sterk af van de meest recente en de daaraan voorgaande spuiperiodes. Binnen deze studie is daarom op basis van beschikbare simulaties met het 3D Waddenzeemodel voor de jaren 2016-2017 een relatie gelegd tussen het gemodelleerde zoutgehalte in de buitenspuihaven enerzijds en de spuidebieten en het gemodelleerde zoutgehalte bij het MWTL meetpunt Doove Balg West anderzijds. De aanpak en resultaten van deze analyse zijn in detail beschreven in Bijlage B. Echter, bevat deze aanpak nog steeds een grote onzekerheid. Zo is de schematisatie van het Waddenmodel veel te grof voor de spuihavens en wordt Doove Balg West in de zomer ongeveer eenmaal per 2 weken bemonsterd. De aanpak zou verder kunnen worden verbeterd aan de hand van zoutgehaltemetingen in de spuikom. In geval van permanente metingen op de diepte van de spuikokers kunnen de gemeten zoutgehalten in toekomstige modelvalidaties direct gebruikt worden als randvoorwaarde. Voor scenariostudies zou een relatie, zoals gebruikt in deze studie, echter nog steeds een meerwaarde hebben. Een dergelijke relatie kan op basis van metingen verder gekalibreerd worden. Dat is ook mogelijk als het om niet-continue metingen gaat, bijvoorbeeld een meetcampagne gedurende een aantal spuien.

In de huidige zoutlekrandvoorwaarden is aangenomen dat de spuikokers de gehele periode dubbel gesloten waren. Op basis van latere informatie bleek dat het dubbel sluiten alleen in de zomerperiode is uitgevoerd (exacte begin- en einddata bij ons niet bekend). Indien deze informatie mee zou zijn genomen in de randvoorwaarden zou de zoutlek in de winter groter worden dan in de huidige randvoorwaarden. Opgemerkt wordt dat de zoutgehalten in de erosiekuil bij Kornwerderzand en Den Oever worden overschat in de winter. Een dergelijke correctie in de randvoorwaarden zal dus een (klein) negatief effect hebben op de validatie. Daarnaast kunnen in de winter de rubberslabben van de spuideuren worden verwijderd. Daardoor zal de lekkage verder toe kunnen nemen.

6.4.3 Waterbalans

Zoals besproken in paragraaf 0, zijn de debieten van de IJssel met gemiddeld 15% verhoogd om tot een gesloten waterbalans te komen. De gemeten debieten bij de IJssel worden het meest onzeker verondersteld. Daarom is in deze studie gekozen om de waterbalans sluitend te maken door de debieten van de IJssel te corrigeren. Het is echter ook mogelijk dat de fout in werkelijkheid (deels) ergens anders ligt. Een gesloten waterbalans kan ook worden verkregen door het reduceren van de spuidebieten bij Kornwerderzand en Den Oever. Binnen de huidige studie is een dergelijk berekening niet uitgevoerd, vanwege het feit dat het model rekentechnisch zeer zwaar is. In een vervolgproject zou het inzichtelijk zijn om dit mee

te nemen in een gevoeligheidssimulatie. Grofweg kan gesteld worden dat een dergelijke correctie zou leiden tot langere verblijftijden in het IJsselmeer en daardoor wat hogere chloridegehalten.

6.4.4 Meteorologische forcering

Op basis van de windopzet/afwaai validatie kan geconcludeerd worden dat de windschuifspanning tijdens stormen wordt onderschat. In de huidige studie is ERA5 wind en meteorologische forcering gebruikt. Op basis van een vergelijking van de ruimtelijk variërende schuifspanning in ERA5 en HARMONIE (zie Figuur 5-4) is de verwachting dat de extreme windgedreven waterstandsverschillen beter worden weergegeven als HARMONIE gebruikt gaat worden voor de meteorologische forcering.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

7.1.1 Algemeen

In de voorliggende studie is een 6^e generatie D-HYDRO 3D model voor het IJsselmeer verbeterd en gevalideerd. Hiervoor is maximaal gebruikgemaakt van de geometrische data van Baseline, en de best beschikbare informatie over de aan- en afvoeren in het gebied. De waterbalans is sluitend gemaakt door de IJsselafvoer met gemiddeld 15% te verhogen. De zoutlast vanuit de schutsluizen bij Den Oever en Kornwerderzand zijn in het model meegenomen door middel van een offline koppeling met de Zeesluisformulering. Ook de zoutlast ten gevolge van zoutlek via de spuisluisen is meegenomen. Voor al deze zoutlastrandvoorwaarden geldt dat het effect van spuidebieten op het zoutgehalte aan de zeezijde van de complexen zo goed als mogelijk is geschat. Hiermee is op dit moment de best beschikbare modelbeschrijving voor dit gebied verkregen.

Op basis van de validatie kan geconcludeerd worden dat de belangrijkste processen voor windgedreven stroming, zouttransport en watertemperatuur (op zijn minst kwalitatief) goed worden weergegeven in het model. De afwijkingen met metingen zijn in de meeste gevallen gerelateerd aan onzekerheden in de randvoorwaarden. Naast onzekerheden in de randvoorwaarden kunnen ook numerieke fouten een rol spelen. Voor veel kwantitatieve toepassingen (bijvoorbeeld het exact voorspellen van periodes waarbij de chloride op een locatie boven een grenswaarde komt) is het van belang om eerst de kwaliteit van de relevante randvoorwaarden verder te verbeteren. Bij Andijk gaat het bijvoorbeeld om het verbeteren van de kwaliteit van de zoutlast vanuit Gemaal Lely en Grootslag. Voor toepassingen waarbij een kwalitatieve analyse is vereist kan het model in de meeste gevallen wel worden toegepast zonder verdere aanpassingen. In deze categorie vallen studies zoals:

- Beoordelen relatieve effect van beheer- en of systeemingenrepen (optimalisatie spuibeheer, nieuwe kunstwerken, etc.)
- Beter inschatten in welke mate individuele bronnen bijdragen aan chlorideconcentratie op diverse locaties
- Beter in kunnen schatten wat externe factoren (zoals wind) betekenen voor zoutverspreiding

7.1.2 Validatie

Op basis van vergelijkingen met een grote verzameling aan stations- en profielmetingen zijn de onderstaande conclusies getrokken over de prestaties van het huidige zesde-generatie D-HYDRO model van het IJsselmeer. Indien niet anders vermeld zijn de statistieken gebaseerd op de periode 1 februari 2022 t/m 13 februari 2023.

Verificatie sluiting waterbalans

- Bij het opzetten van de debietrandvoorwaarden is de waterbalans gesloten door een correctie uit te voeren op de instromende debieten bij de IJssel. In de validatiesimulatie worden zowel de lange als korte-termijn waterstandsvariaties, uitgedrukt in meerpeil, goed weergegeven. De RMSE is ongeveer 0,02 m, Dit toont aan dat de sluiting van de waterbalans goed is uitgevoerd.

Waterstanden

- Ook met betrekking tot individuele stations (Den Oever, Kornwerderzand, Lemmer en Houtribsluizen-Noord) kan gesteld worden dat zowel de lange als korte termijn variaties goed worden weergegeven. De RMSE voor de stations is over het algemeen 0,03 m tot 0,04 m (Lemmer).
- De maximale windopzet/afwaai wordt tijdens periodes met verhoogde windsnelheden vaak onderschat. Het model presteert het beste bij de locaties vlakbij de Afsluitdijk (Den Oever en Kornwerderzand), waar de onderschatting van de extremen vaak tussen de 0 en 10 cm liggen (0-25% van de gemeten opzet/afwaai).
- Bij Lemmer is de onderschatting het grootst: vaak tussen de 15 tot 35 cm (40-60% van de gemeten opzet/afwaai), maar hier schiet ook de modelschematisatie nog tekort.
- De onderschatting van de opzet/afwaai is waarschijnlijk grotendeels veroorzaakt door de relatieve lage ruimtelijke en tijdsresolutie van de windforcering. De ERA5 wind data geeft uurgemiddelde waardes, waardoor de pieken in windsnelheid onderschat kunnen worden. Daarnaast is een horizontale resolutie van ongeveer 30 km niet voldoende om de water-land overgangen in het IJsselmeer goed weer te geven. Bij de Afsluitdijk ligt de schuifspanning in ERA5 gemiddeld hoger dan de meer gedetailleerde HARMONIE43 data. Verder naar het zuiden is de schuifspanning van ERA5 algemeen lager dan HARMONIE43. Dat verklaart ook waarom de onderschatting van de opzet/afwaai bij Lemmer en de Houtribsluizen groter is als bij de meetstations langs de Afsluitdijk.

Chloride

Algemeen:

- Enkele belangrijke processen voor de verspreiding van chloride zijn:
 - Dichtheidsstroming
 - Windgedreven transport
 - Turbulentie en de invloed van stratificatie hierop
 - Turbulentieproductie door verticale snelheidsverschillen
 - Windschuifspanning
 - Bodemschuifspanning
- De trends in het model zijn goed. De timing van pieken in chloride op de verschillende locaties komen vaak overeen met de metingen. Dit onderstreept dat de belangrijkste processen hierboven goed worden weergegeven in het model.
- Randvoorwaarden:
 - De zoutlast vanuit de schut- en spuisluisen is de best beschikbare schatting, maar wordt in de huidige randvoorwaarden waarschijnlijk nog onderschat.
 - De zoutlast vanuit Gemaal Lely en Grootslag wordt overschat.

Kornwerderzand erosiekuil:

- Kwalitatief wordt de zoutdynamiek (op seizoen- en spuiperiode schaal) in de erosiekuil goed weergegeven.
- De stratificatie in de erosiekuil wordt in de zomer onderschat en in de winter licht overschat
- In de zomer is het gemodelleerde maximale chloridegehalte nabij de bodem vaak 10% tot 30% lager dan in de metingen.
- De pycnocline ligt in het model lager dan in de metingen
- De onderschatting van de stratificatie in de zomer heeft de volgende gevolgen:
 - Tijdens hogere windsnelheden wordt in het model te veel zout verticaal gemengd, waardoor de chloridepieken in het model overschat worden
 - In het model vind vaker een volledige schoonspoeling plaats dan in meting
 - Er gaat te weinig zout vanuit de erosiekuil richting de Geul van de Middelgronden.

Den Oever erosiekuil:

- Het model is zowel in kwalitatieve als kwantitatieve zin goed in staat om de gemeten chloridegehalten bij Den Oever te reproduceren ondanks de vele aannames die hieraan ten grondslag liggen. De prestatie van het model is in dit gebied beter dan bij de erosiekuil van Kornwerderzand.
- Door de goede weergave van de stratificatie wordt het effect van windmenging aan het wateroppervlak goed weergegeven (zeker in vergelijking met Kornwerderzand) en ook de relatie tussen het spuidebiet (en/of volume) en de mate van schoonspoelen. Dit ondersteunt de conclusies die hierboven bij de erosiekuil van Kornwerderzand zijn getrokken.
- Op basis van profielmetingen net buiten de erosiekuil lijkt het transport van zout vanuit de kuil richting het meer te worden onderschat in het model.

Kornwerderzand Binnenhaven:

- De dikte van de zoute laag (0,5 m tot 1,5 m) in de monding van de Binnenhaven wordt in het model over het algemeen goed weergegeven.
- Het maximale chloridegehalte (vaak onderste 0,5 m) wordt in het model regelmatig met ongeveer 1000 tot 2000 mg/L onderschat. Een onderschatting van het chloridegehalte is waarschijnlijk gerelateerd aan de randvoorwaarde bij de sluisdeuren die met behulp van het ZSF-ZTM model zijn opgezet. Één van de grootste onzekerheden hierin is het aangenomen zoutgehalte op zee. Een andere mogelijke oorzaak is het veronderstellen van volledige verticale menging in het ZSF-ZTM model, aangezien het een 1D model is. Een eventuele stratificatie in de sluiscolk wordt in deze berekening en daarom in de randvoorwaarden dus niet meegenomen.

Kornwerderzand vaargeul:

- Het proces van verzilten wordt kwalitatief goed weergegeven in het model. Het proces van verzoeten verloopt goed in de bovenste helft van de waterkolom. In de onderste helft van de waterkolom is de verzoeting echter zeer gevoelig voor de absolute zoutgehalten/stratificatie
- Bij de bodem wordt het verzilten tot aan september 2022 redelijk weer gegeven. Wel wordt het chloridegehalte in de periode augustus/september met ongeveer 2000 – 3000 mg/L onderschat (20% – 30%).
- Deze onderschatting kan deels verklaard worden door het onderschatten van het chloridegehalte bij de monding van de Binnenhaven (zie het begin van deze paragraaf). Daarnaast lijkt er te veel verticale menging op te treden op het moment dat het zoute water de verdiepte vaargeul instroomt via de relatief steile bodemhelling.
- Zoals hierboven ook al geconcludeerd voor de erosiekuil van Kornwerderzand is het proces van verzoeten zeer sterk afhankelijk van de stratificatie. Aangezien de stratificatie in het model wordt onderschat (zie vorige alinea), is er ook te weinig weerstand tegen het opmengen. Hierdoor reageert het gemodelleerde chloridegehalte op -7 m NAP sterker op menging door stroming (bijv. ten gevolge van spuidebieten) en wind dan in de werkelijkheid.

Den Oever Binnenhaven:

- De dikte van de zoutlaag (1,5 tot 2 m) in de monding van de Binnenhaven wordt goed weergegeven in het model.
- De maximale chloridegehalten (14000 mg/L eind augustus 2022) in het model komen goed overeen met de profielmetingen (onder-/overschatting meestal kleiner dan 20%).
- De afname van het maximale chloridegehalte in de tweede helft van september 2022 wordt goed weergegeven in het model. Deze afname is voornamelijk

gerelateerd aan de reductie van het zoutgehalte dat vanuit de schutsluizen het systeem binnenkomt. Deze reductie komt deels vanwege een kleiner aantal schuttingen, maar meer nog doordat het zoutgehalte op zee in deze periode flink lager is door de toegenomen spuivolumes. Dit resultaat benadrukt de meerwaarde van het meenemen van de interactie tussen het zoutgehalte op zee en de spuivolumes.

Den Oever vaargeul:

- Het chloridegehalte op -2 m NAP en -4 m NAP worden goed weergegeven door het model.
- Op de diepere lagen onderschat het model de chloridegehalten. De meeste significante schommelingen in de metingen zijn kwalitatief wel terug te zien in het model.
- Op basis van de modelresultaten en de vele profielmetingen is het waarschijnlijk dat de maximale chloridegehalten in de vaargeul voornamelijk gerelateerd zijn aan de zoutlast vanuit de schutsluis en in (veel) mindere mate van de zoutlast vanuit de erosiekuil.
- De onderschatting in de vaargeul kan mogelijk komen door een onderschatting van de zoutlast vanuit de schutsluis of door een natuurlijk/numerieke drempel in het model. Op basis van de conclusies hierboven lijkt het zoutgehalte vanuit de ZSF goed te kloppen. Voor een mogelijke onderschatting van de zoutlast moet dan ook voornamelijk gekeken worden naar de uitwisselingsdebeten. Deze debeten worden voornamelijk beïnvloedt door de deur-opentijden (onzeker) en het aantal schuttingen.

Vaargeul Makkum:

- Tussen de Binnenhaven van Kornwerderzand en de vaargeul van Makkum zit in het model een natuurlijke drempel op ongeveer -4 m NAP. Ten gevolge van deze drempel vindt er nauwelijks zoutindringing plaats richting de vaargeul van Makkum. In de metingen worden echter regelmatig chloridegehalten tot ongeveer 11000 mg/L gemeten (in het model maximaal 3000 mg/L). Dergelijke chloridegehalten komen in de monding van de Binnenhaven van Kornwerderzand alleen voor op een hoogte van ongeveer -4,5 m NAP en dieper. Het vermoeden is dat de modelbodem onbetrouwbaar is ter plaatse van deze natuurlijke drempel. Opgemerkt wordt dat er precies op die locatie geen nieuwe Baseline bodemdata beschikbaar was.

Middelgronden:

- De seizoensvariatie in het bovenste gedeelte van de waterkolom wordt redelijk goed weergegeven in het model. Het absolute chloridegehalte wordt voornamelijk in de maanden augustus en september overschat met ongeveer 50 tot 100 mg/L. Het chloridegehalte bij de Middelgronden is grotendeels gerelateerd aan de zoutdynamiek bij de erosiekuil van Kornwerderzand. In dezelfde periode (aug. en sep. 2022) wordt het chloridegehalte aan het wateroppervlak ook overschat in de erosiekuil (meetstation KOSb).
- Bij de bodem wordt het zoutgehalte in het model onderschat. De gemeten pieken zijn op dezelfde momenten ook terug te zien in het model, echter is het maximale chloridegehalte in het model rond de 1000 tot 1500 mg/L (tegenover 3000 – 6000 mg/L in de metingen).
- Het chloridegehalte bij de bodem in de Middelgronden is gerelateerd aan het maximale chloridegehalte dat vanuit de erosiekuil richting het meer stroomt. Vanwege de drempel op ongeveer -4,5 m NAP tussen de kuil en de rest van het meer komt het zoutste water vanuit de erosiekuil vanuit de laag op ongeveer -4,5 m NAP. Zoals besproken in paragraaf 5.3.2 wordt het chloridegehalte op -4,5 m

NAP behoorlijk onderschat. Dat verklaart ook de onderschatting nabij de bodem bij meetstation KOMo.

Andijk (oostelijke drinkwaterinname punt van PWN):

- De seizoenstrend wordt redelijk goed weergegeven in het model.
- In de metingen varieert het chloridegehalte tussen de 80 en 160 mg/L. In de modelresultaten zijn enkele hogere chloridepieken te zien (tot aan 250 mg/L). De RMSE over de gehele periode is 26 mg/L. Opgemerkt wordt dat de metingen in de periode juli tot eind september waarschijnlijk de werkelijke chloridegehalten onderschatten, gezien de abrupte toename eind september (schoonmaak sensor).
- Het is complex om pieken bij Andijk te voorspellen, aangezien deze het gevolg zijn van de zoutlast bij Den Oever (in mindere mate bij Kornwerderzand), zoutlast vanuit Gemaal Lely en Grootslag en het transport van zout vanuit de schut- en spuicomplexen door windgedreven stroming richting Andijk.
- De timing van de grootste waargenomen pieken in het de metingen worden goed weergegeven in het model. Het model toont aan dat dergelijke pieken vaak komen door zout vanuit Den Oever dat door een Noordoostelijke wind langs de oever van Noord-Holland richting Andijk wordt getransporteerd.
- In het model worden ook een aantal pieken voorspeld die in de metingen niet voorkomen. Meestal zijn deze pieken gerelateerd aan de gemodelleerde zoutpluimen vanuit Gemaal Lely en Grootslag. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat de zoutlast vanuit Gemaal Lely (vast aangenomen chloridegehalte van 3000 mg/L) en Gemaal Grootslag (vast aangenomen chloridegehalte van 1500 mg/L) wordt overschat. Mogelijk treden dergelijke chloridegehalten alleen op bij lage afvoeren en is er bij hogere afvoeren sprake van een significante verdunning.

Overig:

- In het midden van het IJsselmeer (FL09 en FL02) wordt in het model een chloridepiek voorspeld in september/oktober 2022. In de metingen is deze piek echter niet waar te nemen.
- De pieken in het model komen door een aanhoudende noordwesten wind waardoor zout vanuit Kornwerderzand langs de Friese kust naar het zuiden wordt getransporteerd. Metingen bij Stavoren laten zien dat dit zuidwaartse transport ook daadwerkelijk heeft plaatsgevonden, maar waarschijnlijk minder ver als voorspeld door het model. Mogelijk speelt de gebruikte ERA5 wind ook hier, bij het transport in de kustzone, een rol.

Temperatuur

- Enkele belangrijke processen voor de watertemperatuur zijn:
 - Uitwisseling van warmte met de atmosfeer (verdamping, convectie, zoninstraling, etc.).
 - Verticale menging t.g.v. turbulentieproductie door wind en stroming.
- De vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde temperatuur tijdseries geeft een consistent beeld voor vrijwel alle meetstations. De seizoensvariatie wordt goed weergegeven door het model, met over het algemeen een onderschatting in de orde van -0,3 en -0,6 °C. De RMSE is over het algemeen tussen de 0,5 en 0,8 °C.
- Op enkele diepere meetlocaties (bijvoorbeeld in de vaargeul van Kornwerderzand: KOVo) zijn de afwijkingen in temperatuur groter. Deze afwijkingen komen echter niet door een fout in het temperatuurmodel, maar door fouten in verticale menging ten gevolge van het onderschatten van de zoutstratificatie.

7.2 Evaluatie prestatie model met betrekking tot beoogde toepassingen

In deze paragraaf gaan we in op de voorziene toepassingen van het model, beschreven in paragraaf 1.3.

7.2.1 Het verklaren en voorspellen van chloride concentraties op diverse locaties

Beter in kunnen schatten wanneer de concentratie boven grenswaardes uitkomt bij innamepunten (Andijk of andere innamepunten van de waterschappen) en hoe lang dit gaat duren

De validatie heeft laten zien dat het model de processen die leiden tot verhoging van chlorideconcentraties in kwalitatieve zin goed weergeeft. Echter is accuraatheid van de absolute chloridegehalten sterk afhankelijk van de randvoorwaarden. Bij Andijk berekent het huidige model (in hindcast mode) bijvoorbeeld naast de gemeten pieken (voornamelijk t.g.v. windtransport van zoutlast vanuit Den Oever) ook pieken die niet zijn gemeten (voornamelijk t.g.v. een overschatting van zoutlast vanuit Gemaal Lely en Grootslag).

Het model kan gebruikt worden om op basis van bijvoorbeeld scenarioberekeningen pieken bij Andijk te verklaren en te relateren aan verschillende omstandigheden (bijvoorbeeld windsnelheden, richtingen, afvoeren, zoutlastscenario's, etc.)

Indien de wens is om de chlorideconcentratie bij Andijk real-time operationeel te voorspellen met het model zal het model in forecast mode moeten draaien (met een voorspelperiode van bijvoorbeeld 1 tot 14 dagen). Dat houdt in dat er voorspellingen nodig zijn van de meteorologische forcering en alle afvoeren en zoutlasten. Bovendien zal de initiële conditie voor die voorspelling zo goed mogelijk in 3D bekend moeten zijn. Daarvoor zijn goede randvoorwaarden en de opgetreden meteorologische forcering van een zekere hindcast periode nodig, idealiter inclusief data-assimilatie op basis van metingen van bijv. waterstanden en chlorideconcentraties. Het model is in de huidige vorm en met de huidige randvoorwaarden nog niet geschikt om dergelijke voorspellingen te doen. Mogelijk zou de trend van de voorspelling in combinatie met metingen wel betrouwbare waarschuwingen kunnen geven. Zeker als in de nabije toekomst de kwaliteit van de zoutlast vanuit Gemaal Lely en Grootslag wordt verbeterd.

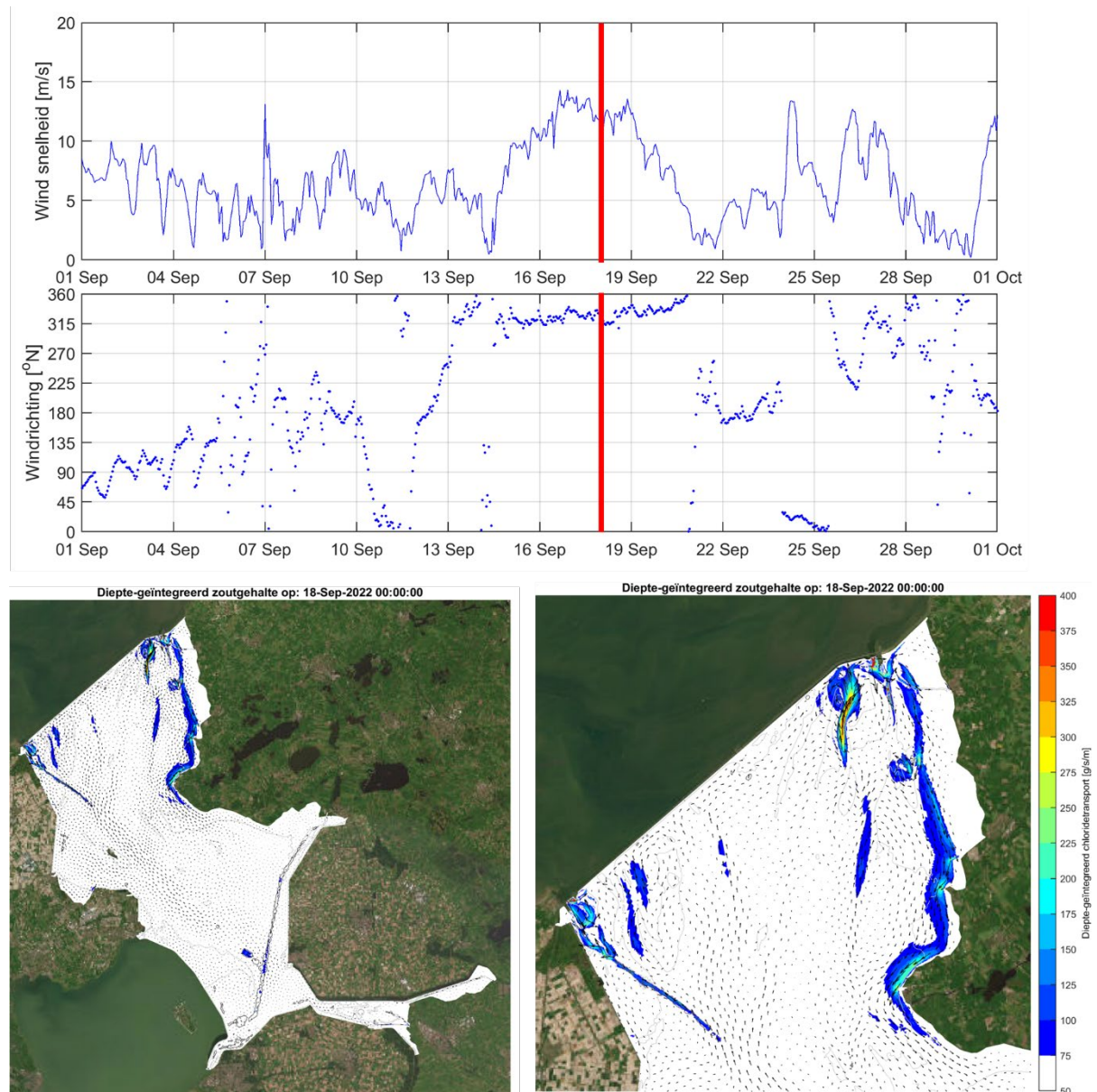
Beter inschatten in welke mate individuele bronnen bijdragen aan chloride concentratie op diverse locaties

Het huidige model is in staat om de relatieve bijdrage van de verschillende bronnen in kaart te brengen. Voor het beantwoorden van deze vragen is het van belang dat er verschillende conservatieve tracers worden toegevoegd aan de belangrijkste lozingen. Vervolgens kan op basis van de tracerconcentraties geconcludeerd worden uit welke bronnen de chlorideconcentratie in een punt is opgebouwd. Eventueel kan ook inzicht in de leeftijd van een lozing worden verkregen. Dan zijn er per lozing twee tracers nodig, een constante en een 'decaying' tracer, zie voor toepassing in het Markermeer bijvoorbeeld van Duin et al. (2023).

Beter in kunnen schatten wat externe factoren zoals wind betekenen voor zoutverspreiding, zodat hier in het handelingsperspectief rekening mee gehouden kan worden

De validatie heeft laten zien dat de belangrijkste processen voor zoutverspreiding goed worden meegenomen in het model. Zie bijvoorbeeld de analyse van de piek in de chloride concentratie bij Andijk begin september 2022 (Figuur 5-40). Op basis van de huidige modelresultaten kan het effect van windrichting en snelheid op de zoutdynamiek al worden geanalyseerd. Zie ter inspiratie Figuur 7-1, waar het zouttransport tijdens een periode met hogere windsnelheden wordt gevisualiseerd. Daarnaast zou een scenariostudie met het huidige model een nog vollediger beeld kunnen geven. Opgemerkt wordt dat wordt

aanbevolen om voor de windforcering gebruik te gaan maken van HARMONIE in plaats van ERA5, zie paragraaf 6.4.4.



Figuur 7-1 Analyse van zouttransport tijdens periode met hogere windsnelheden. 1^e paneel: windsnelheid in het model nabij Kornwerderzand, 2^e paneel: windrichting, onder: diepte-geïntegreerd chloridetransport (g/s/m) op 18 sep 2022.

7.2.2 De effecten van diverse maatregelen in het huidige operationele beheer in te schatten

Het toepassen van het model ter optimalisatie van het spuiregime voor zoutverwijdering in een droge periode

De validatie heeft aangetoond dat het model in staat is om de zoutdynamiek in de erosiekuilen goed weer te geven. Vooral bij Den Oever is het effect van spuien op de mate van schoonspoeling van de erosiekuil zeer goed weergegeven. Bij Kornwerderzand overschat het model de mate van schoonspoeling vanwege het onderschatten van de stratificatie. Dat laatste komt waarschijnlijk grotendeels door onzekerheden in de randvoorwaarden en niet zozeer door de fysische processen in het model. Het effect van een aanpassing van het spuiregime op de zoutdynamiek in de erosiekuil kan met het huidige

model dus goed worden berekend: bij Den Oever zowel kwalitatief als kwantitatief, en bij Kornwerderzand voornamelijk kwalitatief.

Het effect van een aanpassing van het spuiregime op het schoonspoelen van gebieden verder van de erosiekuil kan met het model op een kwalitatieve (relatieve) manier worden geanalyseerd. Voor een exacte kwantitatieve analyse zijn verbeteringen nodig van (onder andere) de zoutlast vanuit de schutsluizen (zie paragraaf 6.4.1).

Minimaliseren van zoutindringing bij schut- en spuisluizen

In het huidige model is de zoutindringing vanuit de schutsluizen en spuisluizen opgelegd in de randvoorwaarden. Voor het analyseren van de gevoeligheid van de zoutindringing voor de deur-opentijd, bellenschermen, doorspoeldebiet in de kolk, enkel/dubbel sluiten spuiokers etc. kan in eerste instantie het ZSF-ZTM model gebruikt worden of de zoutlekformule zoals beschreven in paragraaf 4.3.2.

Opgemerkt wordt dat het zoutgehalte op zee een belangrijke parameter is voor zowel de zoutlek vanuit de schutsluizen als de spuisluizen. Het zoutgehalte op zee dat in deze studie is gebruikt, is ingeschat op basis van de spuien zoals gerealiseerd in 2022 (speciaal het spuibehoor in de zomer). Indien bijvoorbeeld het effect van een aangepast spuibehoor (in de zomer) op de zoutlast vanuit de schut- en spuisluizen wordt onderzocht, is het van belang om ook het zoutgehalte aan de zeezijde van de spuicomplexen opnieuw af te leiden. In geval van gecombineerde maatregelen (bijv. aangepast spuiregime, zoetspoelen schutsluizen en bellenschermen, etc.) kan het interessant zijn om de zout-zoet dynamiek in de Waddenzee opnieuw te beschouwen. Het koppelen van het volledige IJsselmeermodel aan het (westelijke) Waddenzeemodel (voorzien van nadere detaillering bij de schut- en spuicomplexen) via de Zeesluisformulering in D-HYDRO (functionaliteit in ontwikkeling) heeft als voordeel dat de interactie tussen Waddenzee en IJsselmeer op een integrale manier wordt meegenomen. Een dergelijke koppeling wordt vooralsnog niet als een praktische oplossing gezien, vanwege de (nog) grotere rekentijden die een dergelijke aanpak zal vergen.

7.2.3 Beoordelen van de effecten van (eventuele) toekomstige systeemingenrepen

Veranderingen in bodemgeometrie (bijv. vaargeul, aanleg vismigratierivier, zandwinning, etc.)

Het huidige model is goed in staat om de effecten van bodemgeometrie aanpassingen op zoutindringing in relatieve zin weer te geven. Vooral in geval van bodemaanpassingen vlakbij de grootste zoutbronnen kan het model ook in kwantitatieve zin gebruikt worden. Bij een kwantitatieve analyse is het uiteraard wel belangrijk om in paragraaf 5.3 naar de prestatie van het model te kijken in het gebied van interesse.

Effecten van veranderingen in kunstwerken, bijvoorbeeld in geval van een nieuwe schutsluis

De validatie heeft laten zien dat de prestatie van het model zo goed is als de kwaliteit van de randvoorwaarden. In geval van een nieuwe schutsluis is het dus van belang dat de zoutlast van de nieuwe schutsluis accuraat wordt berekend. Voor een consistente relatieve analyse (bijvoorbeeld t.o.v. de huidige situatie) is het van belang dat de zoutlast van de nieuwe schutsluis met dezelfde methode wordt berekend als toegepast in deze studie (ZSF-ZTM). Een voorbeeld hiervan is te vinden in Bijlsma en Verbruggen (2024).

Effecten van klimaatverandering (meteorologie, afvoeren, watervraag, zeespiegelstijging)
Ondanks alle onzekerheden in de huidige randvoorwaarden is het model in staat om de metingen in 2022 (op z'n minst) kwalitatief goed weer te geven. De verwachting is dus dat dezelfde methode gebruikt kan worden voor het afleiden van de randvoorwaarden in geval van studies waarbij klimaatsverandering wordt meegenomen. Opgemerkt wordt dat het zoutgehalte op zee een grote onzekerheid bevat in de huidige methode. Zeker in geval van zeespiegelstijging is het van belang om na te gaan hoe de zoutdynamiek in de Waddenzee hierdoor wordt beïnvloedt en daarmee het zoutgehalte bij de buitendeuren van de schutsluizen en ter hoogte van de lekopeningen in de spuikokers.

7.3 Aanbevelingen

Een aantal kleine verbeterpunten/correcties zijn opgenomen in Bijlage C. De grotere verbeterpunten/aanbevelingen zijn hieronder opgesomd:

Algemeen

- A. Om het model efficiënt toe te kunnen passen in projecten en voor verdere gevoeligheidsstudies/validatiestudies is het belangrijk om het model te versnellen. Op het h7 cluster van Deltares neemt een berekening op 1 node met 44 cores, 3 maanden in beslag voor het doorrekenen van 1 jaar. Mogelijke ideeën voor het versnellen zijn:
 - Korte termijn actie: Vergroven van het rekenrooster in gebieden waar een hoge resolutie niet nodig is.
 - Lange termijn acties:
 - In D-HYDRO is het nu nog niet mogelijk om ruimtelijk variërende verticale schematisaties toe te passen. Een dergelijke functionaliteit zou een enorm verschil maken voor het IJsselmeermodel, aangezien de 12,5 cm resolutie voornamelijk nodig is in de binnenhavens van Den Oever en Kornwerderzand en de verdiepte vaargeulen, terwijl in het verdere meer een 0,5 m resolutie waarschijnlijk voldoende is.
 - Aanpassing van de tijdsintegratie methode in D-HYDRO. Momenteel wordt de maximale tijdstap bepaald op basis van de meest limiterende cel en voor het hele rooster toegepast.
- B. De validatie van de windopzet (en afwaaiing) heeft aangetoond dat het huidige model de extremen onderschat. Mogelijk zal de weergave van deze extremen verbeteren als er gebruik gemaakt gaat worden van HARMONIE43 data, die voor de gehele validatieperiode beschikbaar zijn. De HARMONIE data heeft een veel hogere horizontale resolutie, waardoor de land-water overgangen langs de oever van het IJsselmeer veel beter worden meegenomen. Een betere weergave van windopzet/afwaai zal ook positieve gevolgen hebben voor de weergave van de grootschalige advectione transporten en daarmee mogelijk op het grootschalige transport van zout. Opgemerkt wordt dat HARMONIE boven de Noordzee wel last heeft van een systematische onderschatting van de windschuifspanning (in vergelijking met metingen en andere databronnen). De verwachting is echter dat voor het IJsselmeer de meerwaarde van extra resolutie zwaarder weegt.
- C. Een correctie was nodig op de verzamelde debietgegevens om tot een gesloten waterbalans te komen. De verblijftijden in het IJsselmeer worden beïnvloedt door de gekozen correctiepost. Voor de huidige modelschematisatie is gekozen om de correctie uit te voeren op de IJssel afvoer (+15%). Om de onzekerheid in de waterbalans te verkleinen is het aanbevolen om de kwaliteit van de grootste in- en uitstromende posten te verbeteren. Vooral de IJssel afvoer verdient speciale aandacht. Voor de IJssel debieten is in deze studie gebruik gemaakt van de gemeten afvoer bij Olst (vanuit IWP). Vervolgens is het gemeten debiet opgelegd bij de instroomrand in het model, nabij het Ketelmeer. Tussen Olst en de monding in het

Ketelmeer zijn er nog diverse lozingen en onttrekking die nu niet expliciet zijn meegenomen. Daarnaast wordt aanbevolen om een gevoeligheidsberekening uit te voeren waarbij de correctie wordt opgelegd bij de spuidebieten bij Kornwerderzand en Den Oever.

- D. Het huidige model is in staat om de relatieve bijdrage van de verschillende bronnen in kaart te brengen. Voor het beantwoorden van deze vragen is het van belang dat er verschillende conservatieve tracers worden toegevoegd aan de belangrijkste lozingen. Vervolgens kan op basis van de tracerconcentraties geconcludeerd worden uit welke bronnen de chlorideconcentratie in een punt is opgebouwd. Eventueel kan ook inzicht in de leeftijd van een lozing worden verkregen. Dan zijn er per lozing twee tracers nodig, een constante en een 'decaying' tracer
- E. De onderschatting van temperatuur kan te maken hebben met hoe er in D-HYDRO omgegaan wordt met zoninstraling die de bodem bereikt. In D-HYDRO wordt deze warmte 'weggegooid'. In relatief ondiepe gebieden (ten opzichte van de Secchi diepte) zorgt dit voor een systematische verlaging van de watertemperatuur. Aanbevolen wordt om dit (mogelijk in samenwerking met andere modelgebieden) te onderzoeken en eventueel de instellingen op dit punt te wijzigen.

Kornwerderzand erosiekuil:

Onderstaande aanbevelingen gaan in op het verbeteren van de stratificatie in de erosiekuil van Kornwerderzand door middel van het verbeteren van de randvoorwaarden. In geval van een betere stratificatie zal de zoutlek richting het meer beter worden weergegeven en zal ook de zoutdynamiek bij de Middelgronden verbeteren.

- F. Verdere analyse van testsimulaties die eerder in deze studie zijn uitgevoerd met het deelmodel van Kornwerderzand. Bij deze testsimulaties zijn verschillende combinaties van lekoppervlak en zoutgehalte op zee doorgerekend. Op basis van de beschikbare modelresultaten kan beter worden ingeschat welke combinatie van deze parameters een verbetering geeft van de stratificatie.
- G. Voor toekomstige modelschematisaties is het wenselijk om het zoutgehalte in de spuikom te meten. In recente meetcampagnes worden al regelmatig profielmetingen uitgevoerd in de spuikom. Het gebruiken van metingen heeft twee gunstige gevolgen:
 - o In geval van continuummetingen kunnen de metingen direct als randvoorwaarde worden gebruikt voor toekomstige hindcasts
 - o De metingen (continu of incidenteel) kunnen ook worden gebruikt om de afgeleide relaties, beschreven in Bijlage B, verder te verbeteren. Een verbeterde relatie kan een meerwaarde hebben voor scenariostudies.
- H. Als mogelijk alternatief voor metingen in de spuikom en/of de afgeleide relaties, beschreven in Bijlage B, kan ervoor gekozen worden om het Waddenzeemodel te gebruiken voor het berekenen van de zoutgehalten in de spuikom. Wel is het nodig om het Waddenzeemodel te verfijnen nabij de spuikommen van Kornwerderzand. Daarnaast kan het zijn dat er nog steeds kalibratiefactoren nodig zijn om tot goede zoutlekrandvoorwaarden te komen (zie Bijlage B.3). Ook zonder verfijning kan het nuttig zijn om het Waddenzeemodel in te zetten. In dat geval zou ervoor gekozen kunnen worden om bijvoorbeeld zoutgehalten te bepalen bij Doove Balg Oost (of een andere locatie nabij Kornwerderzand) voor de actuele condities in de door te rekenen periode.

Kornwerderzand Binnenhaven en vaargeul:

Onderstaande aanbevelingen gaan in op het verbeteren (i.e. verhogen) van de zoutlast en zoutgehalten vanuit de schutsluizen van Kornwerderzand richting de voorhaven en vaargeul van Kornwerderzand.

- I. Een van de grote onzekerheden in de ZSF-ZTM berekeningen is het feit dat de exacte deur-open-tijden niet bekend zijn. Het is belangrijk dat deze gegevens, die worden geregistreerd in het SCADA systeem van de schutsluis, ontsloten worden.

- J. Een andere grote onzekerheid in de ZSF-ZTM berekeningen is het zoutgehalte aan zeezijde. Permanente/incidentele metingen van het zoutgehalte bij de buitendeuren van de Grote en/of Kleine Sluis zouden zeer waardevol zijn. Een meetstation bij de binnendeuren zou ook zeer waardevol zijn, ter kalibratie van het ZSF-ZTM model.
- K. Als aanvulling op aanbeveling J zou een tijdelijke/permanente zoutlast meting in de binnenhaven zeer waardevol zijn. Momenteel wordt er binnen SITO-PS onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om tomografische doorsnedemetingen te doen van chloride. Als pilot wordt gedacht aan de binnenhaven van Kornwerderzand. Indien deze meetopstelling wordt gecombineerd met een ADCP in de vaargeul kunnen zoutlasten worden afgeleid. Dergelijke zoutlasten kunnen gebruikt worden om het ZSF-ZTM model te kalibreren of eventueel direct als randvoorwaarde (in geval van permanente metingen).
- L. Mogelijk treedt er te veel verticale menging op wanneer een dichtheidsstroming zich langs een steil talud naar beneden verplaatst. Dit zou een rol kunnen spelen bij de zoutlek richting de erosiekuilen en het zouttransport vanuit de Binnenhaven van Kornwerderzand naar de verdiepte vaargeul. Als gevoeligheidstest kan er gekeken worden naar het effect van het afvlakken van de bodemhelling in het model. Daarmee wordt de bodemschematisatie dus minder representatief voor de werkelijkheid, maar heeft het mogelijk wel een betere zoutindringing tot gevolg. Daarnaast wordt aanbevolen om ook in bredere zin te kijken naar het gedrag van dichtheidsstroming bij steile hellingen in D-HYDRO aan de hand van een goed uitgewerkte validatiecase.

Makkum

- M. Op basis van de validatie lijkt de huidige bodem tussen de vaargeul van Makkum en de Binnenhaven van Kornwerderzand niet goed. Het is van belang om de werkelijke bodemligging te achterhalen (analyseren eerdere metingen, uitvoeren metingen, etc.). De verwachting is dat de zoutindringing richting Makkum veel beter zal worden weergegeven in het model indien (waarschijnlijk) onrealistische natuurlijk drempel wordt verwijderd (of verlaagd).

Den Oever erosiekuil:

Onderstaande aanbevelingen gaan in op het verbeteren (verhogen) van de zoutlast vanuit het spuicomplex van Den Oever. In geval van een verbeterde zoutlast zal de zoutlek richting het meer beter worden weergegeven en mogelijk ook de invloed van de zoutlek op de vaargeul van Den Oever (al wordt verwacht dat dit effect beperkt is).

- N. Verdere analyse van testsimulaties die eerder in deze studie zijn uitgevoerd met het deelmodel van Den Oever. Bij deze testsimulaties zijn verschillende combinaties van lekoppervlak en zoutgehalte op zee doorgerekend. Op basis van de beschikbare modelresultaten kan beter worden ingeschat of een andere combinatie van deze parameters nog een verbetering geeft van de totale zoutlek richting het meer.
- O. Voor toekomstige modelschematisaties is het wenselijk om het zoutgehalte in de spuikom te meten. Dit heeft twee gunstige gevolgen:
 - o In geval van continuumetingen kunnen de metingen direct als randvoorwaarde worden gebruikt voor toekomstige hindcasts
 - o De metingen (continu of incidenteel) kunnen ook worden gebruikt om de afgeleide relaties, beschreven in Bijlage B, verder te verbeteren. Een verbeterde relatie kan een meerwaarde hebben voor scenariostudies.
- P. Als mogelijk alternatief voor metingen in de spuikom en/of de afgeleide relaties, beschreven in Bijlage B, kan ervoor gekozen worden om het Waddenzeemodel te gebruiken voor het berekenen van de zoutgehaltes in de spuikom. Wel is het nodig om het Waddenzeemodel te verfijnen in en nabij de spuikommen en de Buitenhaven van Den Oever. Daarnaast kan het zijn dat er nog steeds kalibratiefactoren nodig zijn om tot goede zoutlekrandvoorwaarden te komen (zie Bijlage B.3).

Den Oeverbinnenhaven en vaargeul:

Onderstaande aanbevelingen gaan in op het verbeteren (i.e. verhogen) van de zoutlast richting de vaargeul van Den Oever.

- Q. Een van de grote onzekerheden in de ZSF-ZTM berekeningen is het feit dat de exacte deur-open-tijden niet bekend zijn. Het is belangrijk dat deze gegevens, die worden geregistreerd in het SCADA systeem van de schutsluis, ontsloten worden.
- R. Een andere grote onzekerheid in de ZSF-ZTM berekeningen is het zoutgehalte aan zeezijde. Permanente/incidentele metingen van het zoutgehalte bij de buitendeuren van de Stevinsluis zouden zeer waardevol zijn. Een meetstation bij de binnendeuren zou ook zeer waardevol zijn, bij de toepassing van het ZSF-ZTM model.
- S. Als aanvulling op aanbeveling J zou een tijdelijke/permanente zoutlast meting in de Binnenhaven zeer waardevol zijn. Momenteel wordt er binnen SITO-PS onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om tomografische doorsnedemetingen te doen van chloride. Als pilot wordt gedacht aan de Binnenhaven van Kornwerderzand. Indien deze pilot succesvol is zou overwogen kunnen worden om dergelijke metingen ook bij Den Oever uit te gaan voeren.

Andijk:

Onderstaande aanbevelingen gaan in op het verbeteren van de prestatie bij Andijk:

- T. Verbeteren kwaliteit chloridegehalte vanuit Gemaal Lely en Grootslag. In huidige studie gebaseerd op een typische waarde, die een te hoge zoutlast geven bij Andijk.
- U. Analyseren en mogelijk verbeteren kwaliteit debietgegevens van Gemaal Lely en Grootslag.

Referenties

- Bijlsma, A.C., Chavarrias, V., Genseberger, M. 2022. 3D modelonderzoek verdieping vaargeul naar Kornwerderzand. Deltares rapport 11208075-002-ZWS-0001.
- Bijlsma, A.C., en W. Verbruggen (2024). *3D modelonderzoek verzilting IJsselmeer bij verruiming sluiscomplex Kornwerderzand en vaargeulverdieping - Vervolgscenario's met ambitieuze maatregelen tegen verzilting*. Deltares rapport 11210363-003-ZKS-0002. (momenteel concept, binnenkort definitief)
- Eijsberg-Bak, C. 2020. Brief bij oplevering data Balans. Deltares memo met kenmerk 11205256-001-ZKS-002. 1 december 2020.
- Friocourt, Y. 2020. *Nieuwe inzichten naar aanleiding van de verzilting van het IJsselmeer in 2018 en actualisatie van de posten van de water- en zoutbalans van het meer*. RWS-WVL rapport v0.1, 20 maart 2020.
- Genseberger M., Bijlsma, A.C. 2016. Actualisatie 3D zoutverspreidingsmodel IJsselmeer, Deltares rapport 1230069-000-ZKS-0033, 2016.
- Genseberger M., Bijlsma, A.C. 2018. Beter monitoren, begrijpen en voorspellen van zout/chloride in het IJsselmeer, Deltares rapport 11202241-001-ZWS-0002, 2018.
- Genseberger, M., Fujisaki, A., Eijsberg-Bak, C. 2020. D-HYDRO deelmodel IJsselmeer - modelbouw, eerste modelresultaten waterstanden in 2DH en zoutverspreiding in 3D, Deltares rapport 11205258-008-ZWS-0005, 2020.
- Genseberger, M.. 2023. Verbeteringen 3D D-HYDRO model IJsselmeer met zout. Deltares memo 11208053-006-ZWS-0014, 2023.
- Rijkswaterstaat 2018. Peilbesluit IJsselmeergebied, 14 juni 2028. RWS-2018/16279, mn0618TP330. https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_162522_31/
- ten Harmsen – van der Beek, N 2022. Aanpak zeesluisformulering voor Kornwerderzand. Bijlage B bij 11208075-002-ZWS-0001.
- Van Duin, O., Bijlsma, A.C., Genseberger, M. 2023. Wateruitwisseling tussen Markermeer en Amsterdam-Rijnkanaal. Deltares Rapport 11208076-003-BGS-0001
- Van Veen, N. 2021. Inventarisatie relatie spuiregime en zoetspoelen erosiekuil den Oever: Een eerste inventarisatie op basis van data tussen 26 oktober en 30 december 2020. Rijkswaterstaat rapport. 14 oktober 2021, Definitief.
- Zijl, F., Zijlker, T., Kovacs, F. 2024. Validation of DCSSM-FM (2020-2023): HARMONIE and D-HYDRO migration. Deltares Rapport 11210334-004-ZKS-0004

A Overzicht meetdata

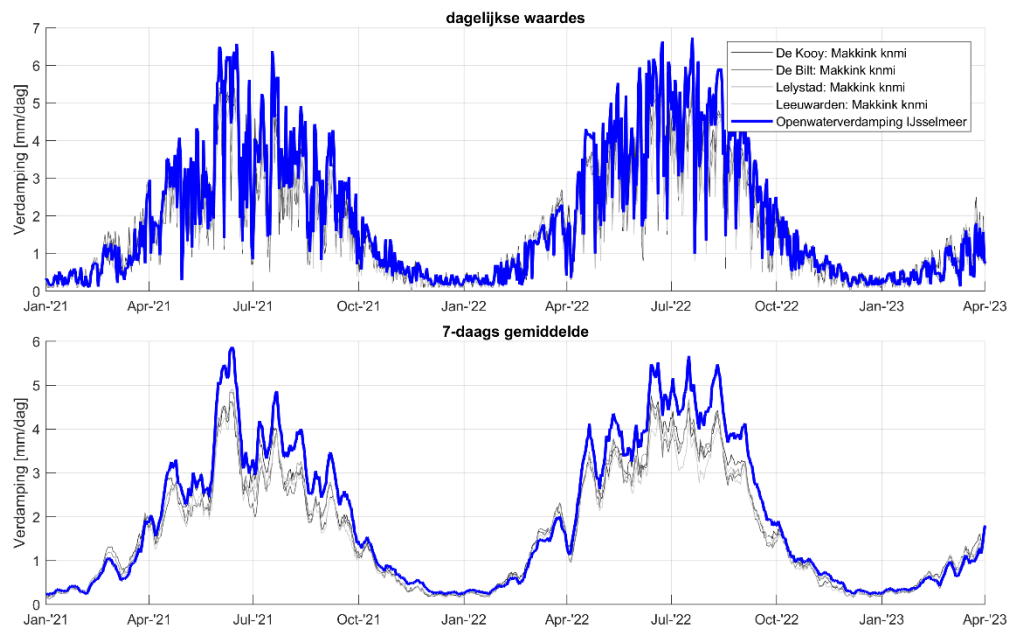
A.1 Debietmetingen

Figuur A-3 en Tabel A-2 geven een overzicht van alle debietmetingen die in deze studie zijn gebruikt. De meeste data is rechtstreeks gebruikt in de randvoorwaarden van het model. In deze paragraaf worden alleen de verdamping en de spuidebieten vanuit de Stevinsluizen (Den Oever) uitgelicht, omdat hier nog specifieke bewerkingen op zijn uitgevoerd.

Voor verdamping is gekozen om gebruik te maken van dezelfde methodiek als in BALANS. Aangezien de verdampingsgegevens vanuit BALANS alleen beschikbaar waren t/m 2020 is dit binnen de huidige studie voor 2022 afgeleid. Hiervoor zijn verdampingsgegevens (Makkink) gedownload van het KNMI voor de stations De Kooy, De Bilt, Lelystad en Leeuwarden. Vervolgens is er een gewogen gemiddelde berekend van deze stations (De Kooy: 1/6, De Bilt: 1/6, Lelystad: 1/2, Leeuwarden: 1/6). Om tot een openwaterverdamping te komen is in de periode april – september een factor 1,25 toegepast en in de andere maanden een factor 0,95. Daarnaast is per maand een correctiefactor toegepast, zoals ook gebruikt wordt in BALANS, zie Tabel A-1. Ter controle is de berekende openwaterverdamping vergeleken met de BALANS verdamping voor het jaar 2020, wat aangaf dat het resultaat identiek is. Figuur A-1 toont de berekende openwaterverdamping voor het IJsselmeer voor de periode jan 2021 – april 2023. Tijdens de zomer is de openwaterverdamping in de range 4 en 5,5 mm/dag en in de wintermaanden rond de 0,2 mm/dag.

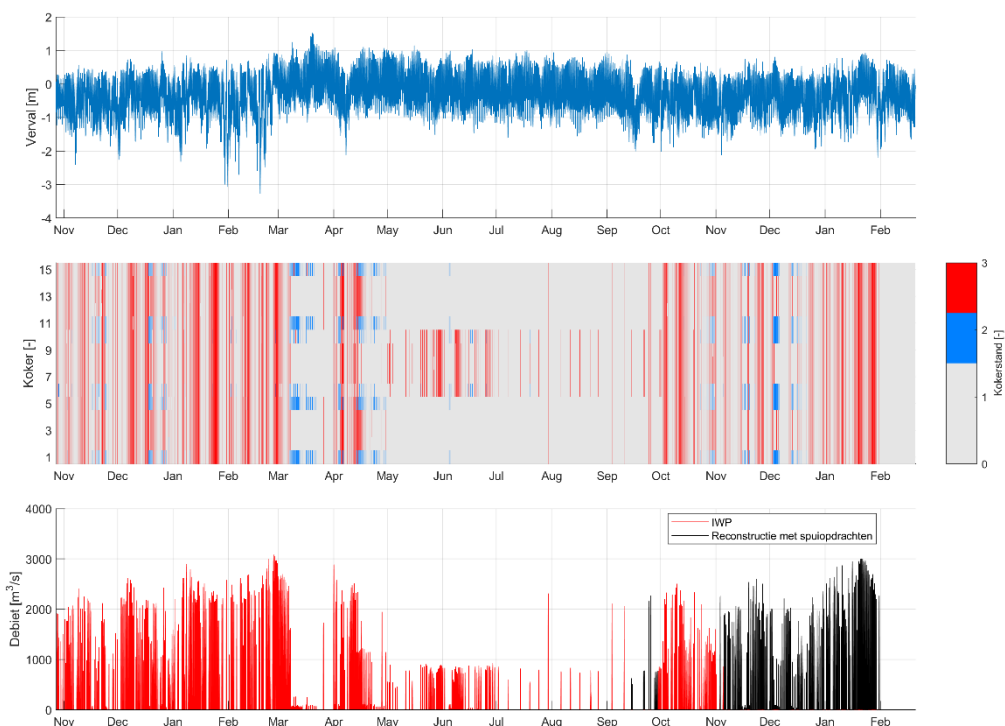
Tabel A-1 Maandelijkse correctie op openwaterverdamping o.b.v. BALANS

Maand	Correctie op verdamping [mm/maand] o.b.v. BALANS
Januari	2
Februari	-1
Maart	-3
April	-5
Mei	-6
Juni	-4
Juli	-1
Augustus	2
September	4
Oktober	5
November	5
December	2

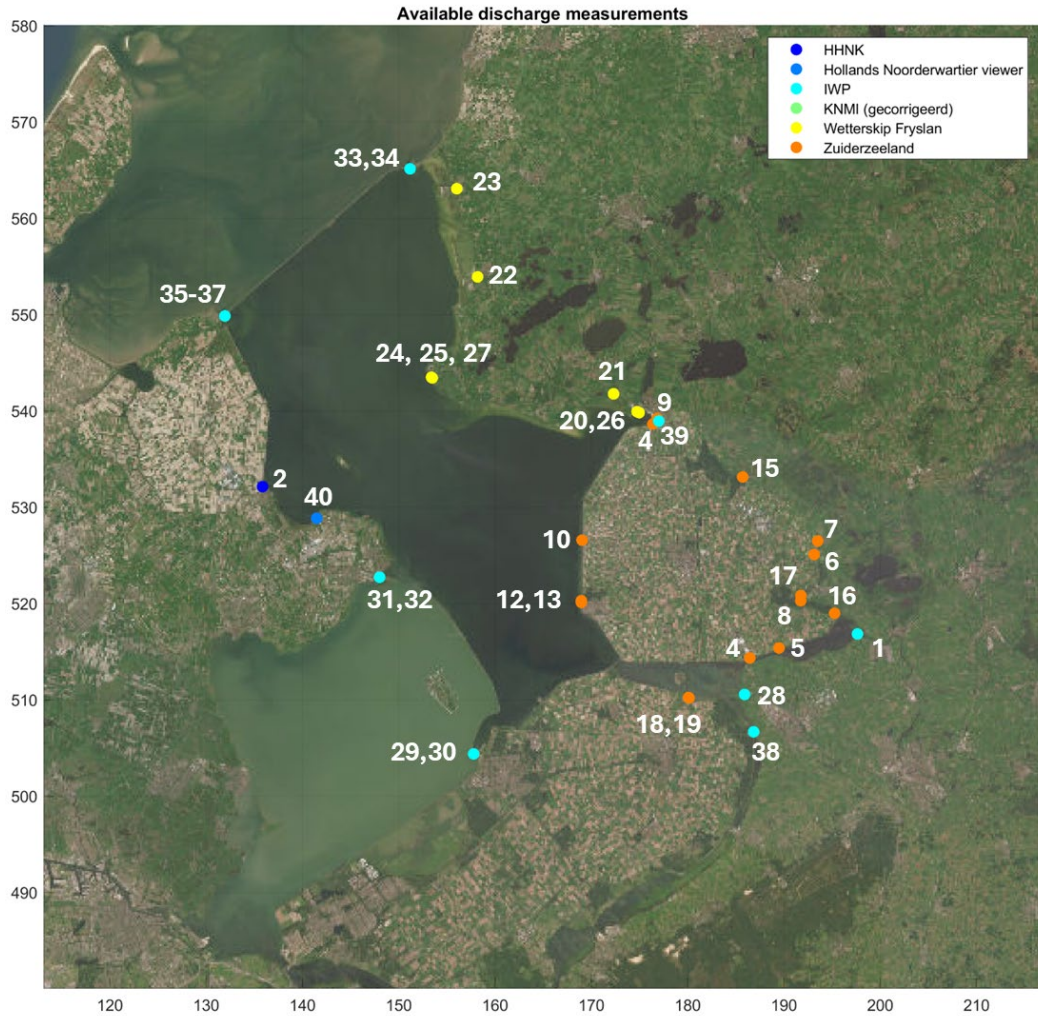


Figuur A-1 Berekende gemiddelde openwaterverdamping in het IJsselmeer (blauw) op basis van de Makkink verdampingsgegevens van het KNMI voor de stations De Kooy, De Bilt, Lelystad en Leeuwarden. Boven: dagelijkse waarden, onder: 7-daags gemiddelde.

De data van de spuidebieten bij de Stevinsluizen (Den Oever) bleek niet volledig. Vanuit IWP waren de spuidebieten niet beschikbaar voor enkele weken in september 2022 en vanaf begin november t/m eind februari 2023. Binnen de huidige studie zijn deze spuidebieten gereconstrueerd op basis van de kokerstanden en het verval over het spuicomplex (o.b.v. waterstandsmetingen bij Den-Oever binnen en Den-Oever buiten). De reconstructie volgde dezelfde regels als in IWP en gaf dezelfde spuidebieten als IWP voor de andere periodes.



Figuur A-2 Reconstructie van spuidebieten bij Den Oever o.b.v. kokerstanden. Boven: verval over het spuicomplex, midden: kokerstanden voor de 15 spuiokers, onder: spuidebiet. In rood worden de spuidebieten getoond die beschikbaar waren o.b.v. IWP. In zwart worden de gereconstrueerde getoond.



Figuur A-3 Overzicht debietmetingen

Tabel A-2 Overzicht debietmetingen

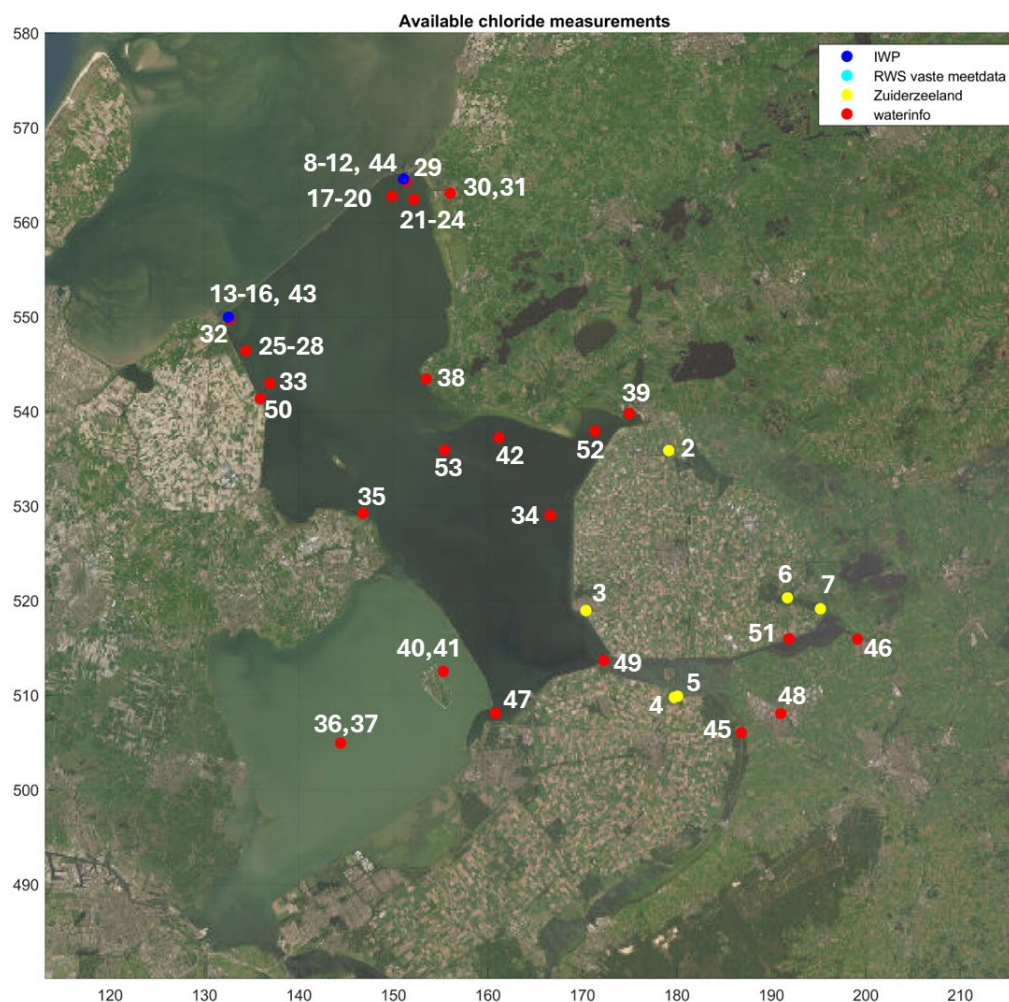
	Station	Periode	X [m; RD]	Y [m; RD]	Bron
1	Genemuiden	1 jan 2018 – 15 mei 2023	197623.17 0000000	516845.23 0000000	IWP
2	gemaal-Lely	10 jul 2019 – 15 mar 2023	135859	532147	HHNK
3	inlaat-Lemmer	1 jan 2022 – 31 mar 2023	176385.14 0625000	538656.18 7500000	Zuiderzeeland
4	hevel-Neushoornweg		186443.45 3125000	514353.43 7500000	
5	inlaat-Ramspol		189479.93 7500000	515397.84 3750000	
6	inlaat-Vollenhover		193140	525107	
7	inlaat-Blokszijl		193497	526501	
8	inlaat-Waterloopbos		191757	520842	
9	inlaat-Lemsterhop		176845.23 4375000	539215.62 5000000	
10	hevel-Geitenpad		169033	526582	

	Station	Periode	X [m; RD]	Y [m; RD]	Bron
11	hevel-Schapenpad		168995	353590	
12	hevel-Waterval		168953	520302	
13	hevel-Urk		168958	520126	
14	hevel-Ettelandseweg		193262	255698	
15	inlaat-Kuinre		185710	533148	
16	hevel-Kadoelen		195242	519001	
17	gemaal-Smeenge		191732	520302	
18	gemaal-Colijn-laag		180091.87 0000000	510252.15 0000000	
19	gemaal-Colijn-hoog		180137.68 0000000	510216.51 0000000	
20	inlaat-Teroelsterkolk	1 jan 2022 – 28 feb 2023	174954.56 0000000	539826.94 0000000	Wetterskip Fryslan
21	inlaat-Tacoziyl		172298.29 0000000	541778.99 0000000	
22	inlaat-Workum		158180.51 0000000	553928.26 0000000	
23	inlaat-Makkum		156022.75 0000000	563080.38 0000000	
24	inlaat-Johan-Frisosluis		153392.52 5853141	543500.24 4316150	
25	inlaat-Hoogland		153475.23 0000000	543432.27 0000000	
26	Woudagemaal		174736.76 0000000	539930.94 0000000	
27	Hooglandgemaal		153475.23 0000000	543432.27 0000000	
28	IJssel-bij-Olst	18 okt 2021 – 20 feb 2023	185906.76 0000000	510569.27 0000000	IWP
29	Houtribsluizen-van-IJsselmeer-naar-Markermeer	25 okt 2021 – 20 feb 2023	157769.12 0000000	504397.13 0000000	
30	Houtribsluizen-van-Markermeer-naar-IJsselmeer		157769.12 0000000	504397.13 0000000	
31	Krabbersgatsluizen-van-IJsselmeer-naar-Markermeer	26 sep 2021- 20 feb 2021	148009.37 0000000	522743.47 0000000	
32	Krabbersgatsluizen-van-Markermeer-naar-IJsselmeer		148009.37 0000000	522743.47 0000000	
33	Lorentzsluizen-groep1	25 okt 2021 – 20 feb 2023	151169.54 6875000	565143.75 0000000	
34	Lorentzsluizen-groep2		151169.54 6875000	565143.75 0000000	
35	Stevinsluizen-groep1		131941.96 8750000	549869.37 5000000	
36	Stevinsluizen-groep2		131941.96 8750000	549869.37 5000000	

	Station	Periode	X [m; RD}	Y [m; RD]	Bron
37	Stevinsluizen-groep3		131941.96 8750000	549869.37 5000000	
38	gemaal-Roggebot	26 sep 2021 – 20 feb 2023	186844.53 0000000	506696.51 0000000	
39	gemaal-Buma	18 okt 2021 – 20 feb 2023	176995.78 0000000	538959.50 0000000	
40	gemaal-Grootslag	5 jul 2017 – 24 feb 2023	141478	528865.92 0000000	
41	neerslag	26 sep 2021 – 20 feb 2023	n/a	n/a'	
42	verdamping	1 jan 1990 – 4 mei 2023	n/a	n/a	Berekend o.b.v. 4 stations van KNMI

A.2 Chloridemetingen

Figuur A-4 en Tabel A-3 geven een overzicht van alle stationsmetingen voor chloride. Daarnaast zijn door RWS ook profielmetingen aangeleverd voor de periode 20 juli 2022 t/m 24 jan 2023. De locaties van de profielmetingen zijn weergegeven in Figuur A-5.



Figuur A-4 Overzicht chloride stationsmetingen

Tabel A-3 Overzicht chloride stationsmetingen

	Station	Periode	X [m; RD}	Y [m; RD]	Z	Bron
1	Lobith	1 jan 2018 – 9 mei 2023	n/a	n/a	N/a	RWS
2	Lemstervaart	5 jan 2010 – 21 feb 2023	179139	535871	N/a	Zuiderzeeland (29 maart 2023)
3	Urkervaart	5 jan 2010 – 21 feb 2023	170370	518957	N/a	
4	Lage Vaart	5 jan 2010 – 7 mar 2023	179723	509780	N/a	
5	Hoge Vaart	5 jan 2010 – 7 mar 2023	180071	509902	N/a	
6	Zwolvevaart	5 jan 2010 – 21 feb 2023	191700	520301	N/a	
7	Kadoelermeer	5 jan 2010 – 1 mar 2023	195191	519136	N/a	
8	KOSb	11 jul 2022 – 1 mar 2023	151079.63 0018322	564575.36 5362884	-1,5 m NAP	
9	KOSm		151079.63 0018322	564575.36 5362884	-6 m NAP	
10	KOSmb		151079.63 0018322	564575.36 5362884	-4.5 m NAP	
11	KOSmo		151079.63 0018322	564575.36 5362884	-10.25 m NAP	
12	KOSo		151079.63 0018322	564575.36 5362884	-12 m NAP	
13	OESb	10 jul 2022 – 1 mar 2023	132524.95 5828839	549968.77 5362632	-1.5 m WL	
14	OESmb		132524.95 5828839	549968.77 5362632	-4.5 m WL	
15	OESmo		132524.95 5828839	549968.77 5362632	-5.6 m WL	
16	OESo		132524.95 5828839	549968.77 5362632	-6.7 m WL	
17	KOMB	19 jul 2022 – 1 mar 2023	149843.00 3366006	562757.02 3410573	-2 m WL	
18	KOMmb	12 jul 2022 – 1 mar 2023	149843.00 3366006	562757.02 3410573	-5 m WL	
19	KOMmo		149843.00 3366006	562757.02 3410573	-6 m WL	
20	KOMo	12 jul 2022 – 22 okt 2022	152158.22 1746991	562422.37 4700490	-7 m WL	
21	KOVb	11 jul 2022 1 mar 2023	152158.22 1746991	562422.37 4700490	-2 m WL	
22	KOVmb		152158.22 1746991	562422.37 4700490	-5 m NAP	
23	KOVmo		152158.22 1746991	562422.37 4700490	-7 m NAP	
24	KOVo		134377.59 2989753	546406.23 5609865	-8.5 m NAP	
25	OEVB	13 jul 2022 1 mar 2023	134377.59 2989753	546406.23 5609865	-2 m NAP	

	Station	Periode	X [m; RD]	Y [m; RD]	Z	Bron
26	OEVmb		134377.59 2989753	546406.23 5609865	-4 m NAP	
27	OEVmo		134377.59 2989753	546406.23 5609865	-5.5 m NAP	
28	OEVo		134377.59 2989753	546406.23 5609865	-7 m NAP	
29	FL16	1 jan 2022 – 11 jul 2022	151343	564311	-1.5 m NAP	waterinfo
30	MAKBb	1 jan 2022 – 27 feb 2023	156007.31 4389300	563070.43 9641008	-1,3 m NAP	
31	MAKBo		156007.31 4389300	563070.43 9641008	-1,8 m NAP	
32	FL17	1 jan 2022 – 13 jul 2022	132653	549721	-1.5 m NAP	
33	FL48	1 jan 2022 – 1 mar 2023	136934.25 2360094	542957.73 7083102	-1.5 m NAP (aangenomen)	
34	FL02		166600.01 7570859	529010.45 1190151	-1.5 m NAP (aangenomen)	
35	FL38		161172.76 2702260	537231.39 8305389	-1.5 m NAP (aangenomen)	
36	FL42b		146752.49 5841012	529225.69 1967995	n/a	
37	FL42o		144413.83 2212926	504954.34 1516735	n/a	
38	HGLD	1 jan 2022 – 24 jan 2023	144413.83 2212926	504954.34 1516735	-1,3 m NAP	
39	LTRY	1 jan 2022 – 1 mar 2023	153465.63 3138359	543433.88 2190138	-1,3 m NAP	
40	MWADb	1 jan 2022 – 12 jan 2022	174954.30 2433118	539803.54 8754038	-1,2 m NAP	
41	MWADo		155272.62 0120188	512529.43 3180843	-3,4 m NAP	
42	FL09	1 jan 2022 – 1 mar 2023	161172.76 2702260	537231.39 8305389	-1.5 m NAP (aangenomen)	
43	Stevinsluizen erosiekuil	26 sep 2021 – 1 jul 2022	155272.62 0120188	512529.43 3180843	-4,5, -5,75 en -7 m NAP	IWP (geleverd op 21 feb 2023 door RWS)
44	Lorentzsluizen erosiekuil		132524.95 5828839	549968.77 5362632	-4,5, -6, -11,5 m NAP	
45	'DRONTMDK0.4 '	11 jan 2022 – 12 dec 2023	151079.63 0018322	564575.36 5362884	-1 m NAP	waterinfo
46	'GENMDN'	12 jan 2022 – 12 dec 2023	186814.00 3424096	506052.01 1028450	-1 m NAP	
47	'HOUTRHK'	18 jan 2022 – 18 dec 2023	199100.00 3610600	515950.01 0886522	-1 m NAP	
48	'KAMPN'	11 jan 2022 – 12 dec 2023	160800.00 3353713	508100.01 1240796	-1 m NAP	
49	'KETMWT'	12 jan 2022 – 13 dec 2023	190990.00 3469823	508060.01 0985297	-1 m NAP	
50	'OUDZG'	1 jan 2022 – 31 dec 2023	172260.00 3422397	513680.01 1127511	-1 m NAP	

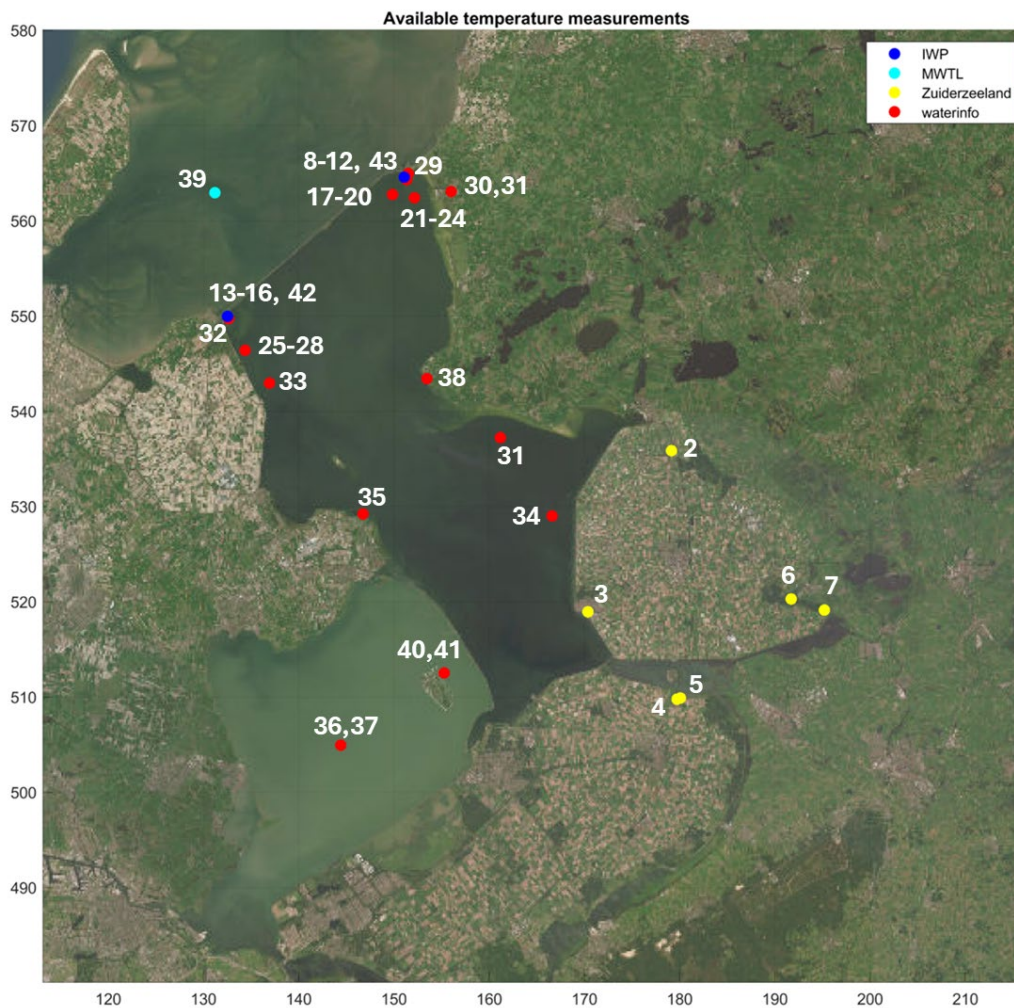
	Station	Periode	X [m; RD]	Y [m; RD]	Z	Bron
51	'RAMSDP'	12 jan 2022 – 13 dec 2023	135890.00 3621366	541370.01 1350063	-1,5 m NAP	
52	'STEILBK'	18 jan 2022 – 18 dec 2023	191865.00 3544572	515978.01 0950663	-1 m NAP	
53	'VROUWZD'	19 jan 2022 – 19 dec 2023	171333.00 3623335	537903.01 1061412	-1 m NAP	



Figuur A-5 Locaties van profielmetingen. Blauw: mobiele metingen, rood: gebiedsdekkende metingen

A.3 Temperatuurmetingen

Figuur A-6 en Tabel A-4 geven een overzicht van alle stationsmetingen voor temperatuur. Daarnaast zijn door RWS ook profielmetingen aangeleverd voor de periode 20 juli 2022 t/m 24 jan 2023. De locaties van de profielmetingen zijn weergegeven in Figuur A-5.



Figuur A-6 Overzicht temperatuur stationsmetingen

Tabel A-4 Overzicht temperatuur stationsmetingen

	Station	Periode	X [m; RD}	Y [m; RD]	Z	Bron
1	Lobith	1 jan 2018 – 9 mei 2023	n/a	n/a	N/a	RWS
2	Lemstervaart	5 jan 2010 – 21 feb 2023	179139	535871	N/a	Zuiderzeeland (29 maart 2023)
3	Urkervaart	5 jan 2010 – 21 feb 2023	170370	518957	N/a	
4	Lage Vaart	5 jan 2010 – 7 mar 2023	179723	509780	N/a	
5	Hoge Vaart	5 jan 2010 – 7 mar 2023	180071	509902	N/a	
6	Zwolvevaart	5 jan 2010 – 21 feb 2023	191700	520301	N/a	
7	Kadoelmeer	5 jan 2010 – 1 mar 2023	195191	519136	N/a	
8	KOSb	11 jul 2022 – 1 mar 2023	151079.63 0018322	564575.36 5362884	-1,5 m NAP	
9	KOSm		151079.63 0018322	564575.36 5362884	-6 m NAP	

	Station	Periode	X [m; RD]	Y [m; RD]	Z	Bron
10	KOSmb		151079.63 0018322	564575.36 5362884	-4.5 m NAP	
11	KOSmo		151079.63 0018322	564575.36 5362884	-10.25 m NAP	
12	KOSo		151079.63 0018322	564575.36 5362884	-12 m NAP	
13	OESb	10 jul 2022 – 1 mar 2023	132524.95 5828839	549968.77 5362632	-1.5 m WL	
14	OESmb		132524.95 5828839	549968.77 5362632	-4.5 m WL	
15	OESmo		132524.95 5828839	549968.77 5362632	-5.6 m WL	
16	OESo		132524.95 5828839	549968.77 5362632	-6.7 m WL	
17	KOMb	19 jul 2022 – 1 mar 2023	149843.00 3366006	562757.02 3410573	-2 m WL	
18	KOMmb	12 jul 2022 – 1 mar 2023	149843.00 3366006	562757.02 3410573	-5 m WL	
19	KOMmo		149843.00 3366006	562757.02 3410573	-6 m WL	
21	KOVb	11 jul 2022 - 1 mar 2023	152158.22 1746991	562422.37 4700490	-2 m WL	
22	KOVmb		152158.22 1746991	562422.37 4700490	-5 m NAP	
23	KOVmo		152158.22 1746991	562422.37 4700490	-7 m NAP	
24	KOVvo		134377.59 2989753	546406.23 5609865	-8.5 m NAP	
25	OEVB	13 jul 2022 - 1 mar 2023	134377.59 2989753	546406.23 5609865	-2 m NAP	
26	OEVBmb		134377.59 2989753	546406.23 5609865	-4 m NAP	
27	OEVBmo		134377.59 2989753	546406.23 5609865	-5.5 m NAP	
28	OEVBvo		134377.59 2989753	546406.23 5609865	-7 m NAP	
29	FL16	1 jan 2022 – 11 jul 2022	151343	564311	-1.5 m NAP	waterinfo
30	MAKBb	1 jan 2022 – 27 feb 2023	156007.31 4389300	563070.43 9641008	-1,3 m NAP	
31	FL09	1 jan 2022 – 1 mar 2023	161172.76 2702260	537231.39 8305389	-1.5 m NAP (aangenomen)	
32	FL17	1 jan 2022 – 13 jul 2022	132653	549721	-1.5 m NAP	
33	FL48	1 jan 2022 – 1 mar 2023	136934.25 2360094	542957.73 7083102	-1.5 m NAP (aangenomen)	
34	FL02		166600.01 7570859	529010.45 1190151	-1.5 m NAP (aangenomen)	
35	FL38		161172.76 2702260	537231.39 8305389	-1.5 m NAP (aangenomen)	

	Station	Periode	X [m; RD]	Y [m; RD]	Z	Bron
36	FL42b		146752.49 5841012	529225.69 1967995	n/a	
37	FL42o		144413.83 2212926	504954.34 1516735	n/a	
38	HGLD	1 jan 2022 – 24 jan 2023	144413.83 2212926	504954.34 1516735	-1,3 m NAP	
39	Doove Balg West	14 dec 2020 – 3 mar 2023	131200	562950	-1 m NAP	
40	MWADb	1 jan 2022 – 12 jan 2022	174954.30 2433118	539803.54 8754038	-1,2 m NAP	
41	MWADo		155272.62 0120188	512529.43 3180843	-3,4 m NAP	
42	Stevinsluizen erosiekuil	26 sep 2021 – 1 jul 2022	155272.62 0120188	512529.43 3180843	-4,5, -5,75 en -7 m NAP	
43	Lorentzsluizen erosiekuil		132524.95 5828839	549968.77 5362632	-4,5, -6, -11,5 m NAP	

A.4 Waterstandsmetingen

Figuur A-7 en Tabel A-5 geven een overzicht van alle waterstandsmetingen die in deze studie zijn gebruikt.



Figuur A-7 Overzicht waterstandsmetingen

Tabel A-5 Overzicht waterstandsmetingen

	Station	Periode	X [m; RD}	Y [m; RD]	Bron
1	Den-Oever	18 okt 2021 – 20 feb 2023	132175.570000000	549285.089600000	IWP
2	Kornwerderzand	25 okt 2021 – 20 feb 2023	151674.943100000	564686.024200000	
3	Lemmer	8 nov 2021 – 20 feb 2023	176766.628000000	539454.751500000	
4	Houtribsluizen- noord	25 okt 2021 – 20 feb 2023	158066.612900000	505034.350100000	
5	Den-Oever-buiten	18 okt 2021 – 20 feb 2023	131911.979600000	549648.239500000	
6	Houtribsluizen- zuid	25 okt 2021 – 20 feb 2023	157984.349077903	503950.867782427	
7	Kornwerderzand- buiten	25 okt 2021 – 20 feb 2023	151515.393000000	564972.899500000	

B Afleiden zoutgehalte buitenhavens Den Oever en Kornwerderzand

Voor het afleiden van de zoutlek randvoorwaarden vanuit de schutsluizen en spuisluisen van Den Oever en Kornwerderzand is het zoutgehalte in de buitenhavens van belang. Dit zoutgehalte aan de Waddenzeezijde is echter niet gemeten en is daarom afgeleid. Voor de buitenhavens geldt dat het zoutgehalte sterk afhangt van de operatie van de spuicomplexen en de langeretermijn variatie in zoutgehalte in de Waddenzee, die uiteindelijk ook gerelateerd is aan langdurige spuivolumes.



Figuur B-1: Overzicht van beschikbare gegevens (groen), benodigde gegevens (rood) en afgeleide gegevens (oranje)

Figuur B-1 toont een ruimtelijk overzicht van de beschikbare relevante gegevens. Voor de hele simulatieperiode (1 jan 2022 t/m 13 feb 2023) zijn zoutgehaltes bij Doove Balg West beschikbaar en ook de spuidebieten bij Kornwerderzand en Den Oever. Het zoutgehalte bij Doove Balg Oost is niet beschikbaar voor deze periode, maar wel voor voorgaande periodes. Daarom wordt gebruikgemaakt van een meetreeks voor Doove Balg West en een trendrelatie tussen Doove Balg Oost en West op basis van metingen in de periode 2000-2009, zoals ook gebruikt in Bijlsma et al. (2022).

Vanwege de geometrie van de buitenhaven bij Kornwerderzand is de verwachting dat het zoutgehalte bij de buitendeuren van de Grote en Kleine sluis in beperkte mate afhangen van de spuidebieten. Daarom is als randvoorwaarde voor de ZSF-ZTM berekeningen bij Kornwerderzand het afgeleide zoutgehalte bij Doove Balg Oost gebruikt zonder verdere correcties t.g.v. spuiperiodes.

Voor de zoutlek via het spuicomplex bij Kornwerderzand is het wel noodzakelijk om de korte termijn effecten van het spuien op het lokale zoutgehalte mee te nemen. Bij Den Oever is de verwachting dat het korte termijn effect van spuien op het lokale zoutgehalte zowel voor de zoutlek via het spuicomplex als voor de zoutlek via de schutsluizen van belang is.

Om een relatie te kunnen leggen tussen het zoutgehalte in de buitenhaven enerzijds en het spuidebiet en zoutgehalte bij Doove Balg West/Oost anderzijds is gebruik gemaakt van simulaties met het Waddenzeemodel voor de periode 2016-2017.

B.1 Afleiding van relatie

Voor de reconstructie van het zoutgehalte in de buitenhaven worden twee processen onderscheiden:

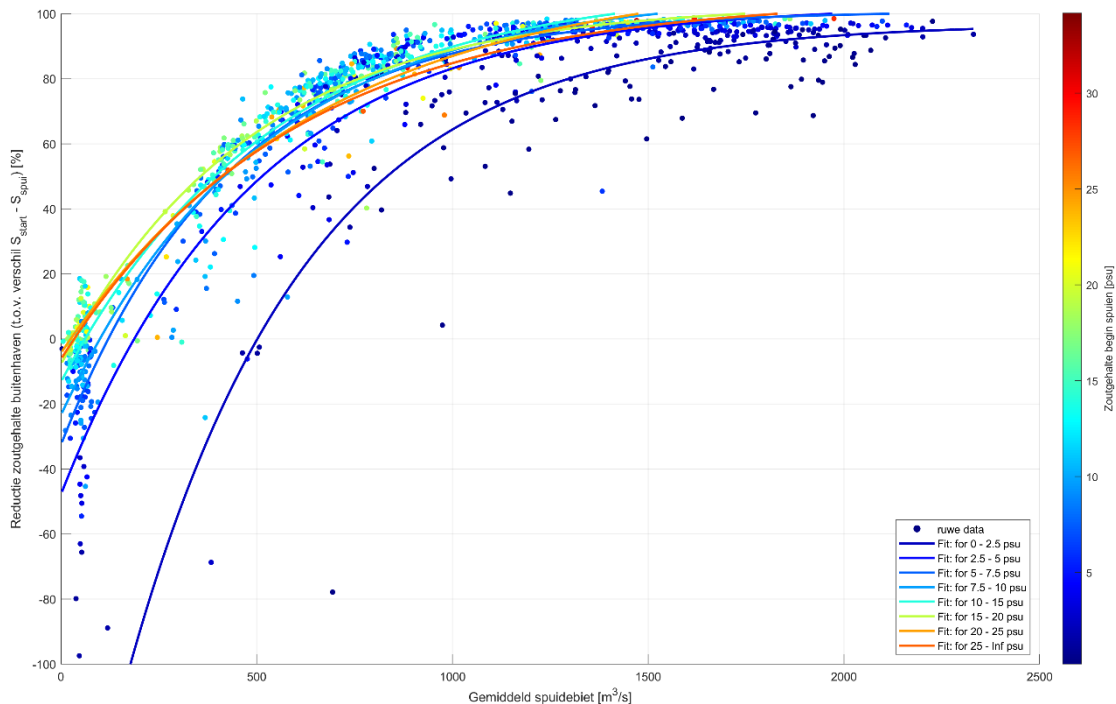
- A. Afname van het zoutgehalte tijdens het spuien
- B. Toename van het zoutgehalte na het beëindigen van het spuien

Hieronder wordt beschreven hoe deze relaties zijn afgeleid voor Den Oever.

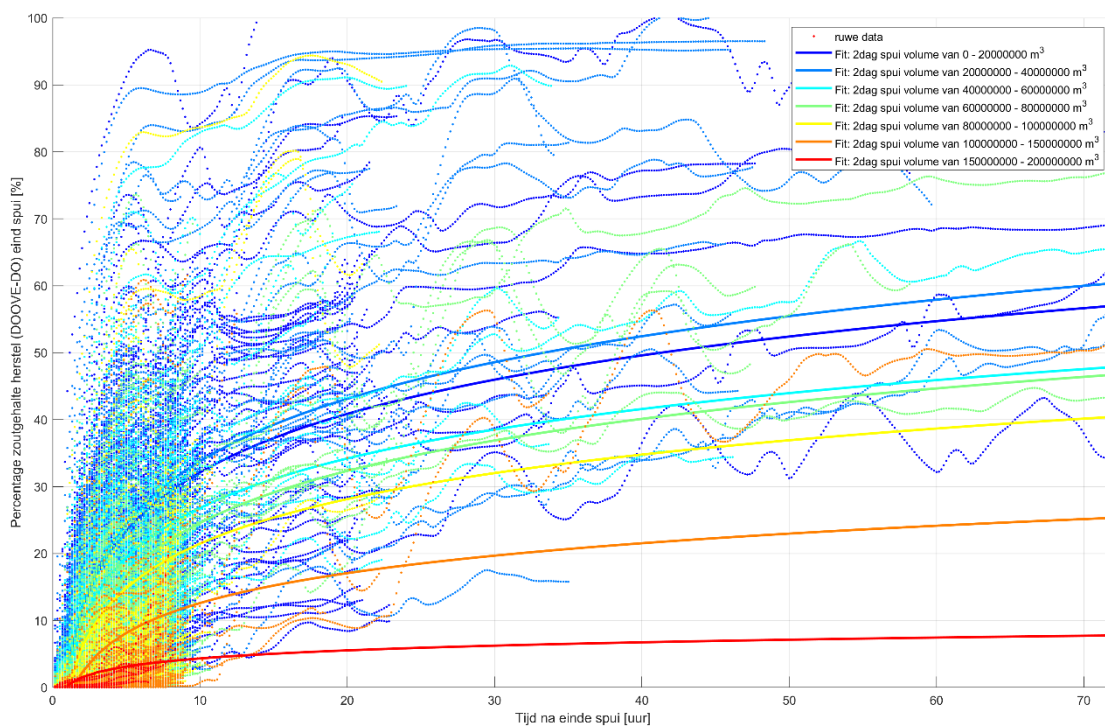
Voor proces A is in het Waddenzeemodel gekeken hoeveel procent het zoutgehalte in de buitenhaven (ter hoogte van de onderkant van de spuikokers: -4,7 m NAP voor Den Oever en -4,5 m NAP voor Kornwerderzand) is gereduceerd aan het einde van een spuiperiode t.o.v. het begin van de spuiperiode, zie Figuur B-1. De figuur laat zien dat de reductie afhangt van het gemiddelde spuidebiet en van het absolute zoutgehalte bij aanvang van het spuien. Des te hoger het gemiddelde spuidebiet, des te groter de reductie in zoutgehalte. Over het algemeen geldt ook: des te hoger het zoutgehalte bij aanvang van het spuien, des te hoger de procentuele reductie tijdens het spuien. De figuur laat voor alle gemodelleerde spuiperiodes een punt zien. Vervolgens zijn er voor een aantal ranges van initieel zoutgehalte trendcurves gefit.

Voor proces B is in het Waddenzeemodel gekeken hoe het herstel van het zoutgehalte verloopt over de tijd. Aan het eind van iedere spuiperiode is in het Waddenzeemodel is het verschil bepaald tussen het zoutgehalte bij Doove Balg West en het zoutgehalte in de buitenhaven. Vervolgens is het herstel van het zoutgehalte procentueel uitgezet tot aan de volgende spuiperiode, zie Figuur B-3. Het herstel van het zoutgehalte bleek ook sterk af te hangen van de spuivolumes in de voorgaande dagen. Indien er in de voorgaande periode veel is gespuid is er sprake van een grote zoetwaterbel in de Waddenzee en duurt het langer voordat zout water vanuit het noorden de buitenhaven indringt. Uiteindelijk is ervoor gekozen om te kijken naar het totale spuivolume in de voorgaande 2 dagen. De figuur laat zien dat er voor een aantal ranges in spuivolumes (in de voorgaande 2 dagen) grafieken zijn gefit op de modeldata.

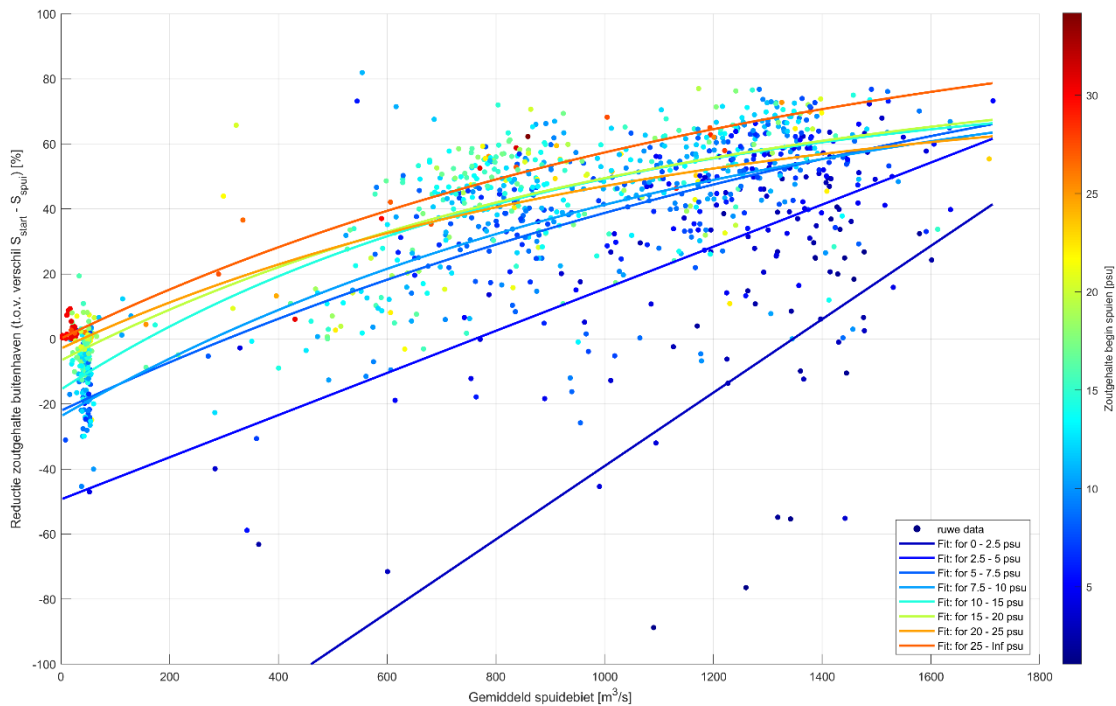
Voor Kornwerderzand zijn vergelijkbare relaties afgeleid, zie Figuur B-4 en Figuur B-5.



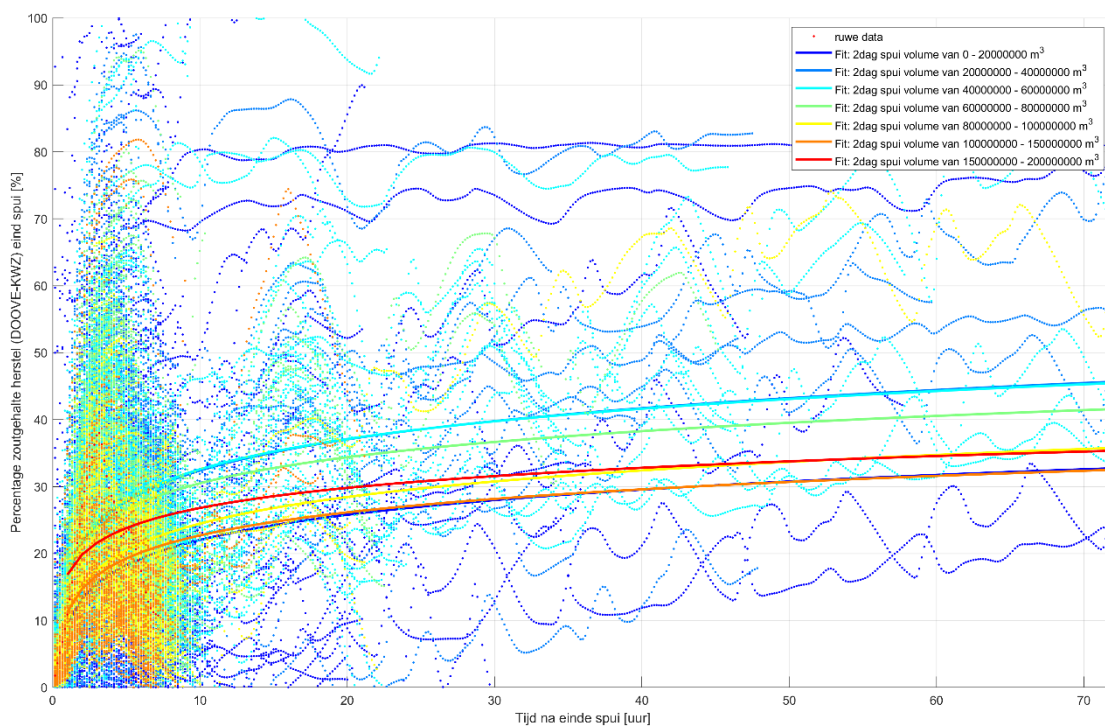
Figuur B-2 Relatie tussen gemiddeld spuidebiet en de mate van zoetspoeling van de spuijom bij de spuijom van Den Oever. Deze relatie is opgesteld op basis van een Waddenzeemodel simulatie voor de periode 2016-2017.



Figuur B-3 Tijdsverloop van verzilting voor verschillende spuivolumes in de voorgaande 2 dagen. Deze relatie is opgesteld voor de spuijom van Den Oever op basis van een Waddenzeemodel simulatie voor de periode 2016-2017.



Figuur B-4 Relatie tussen gemiddeld spuidebiet en de mate van zoetspoeling van de spuikom bij de spuikom van Kornwerderzand. Deze relatie is opgesteld op basis van een Waddenzeemodel simulatie voor de periode 2016-2017.



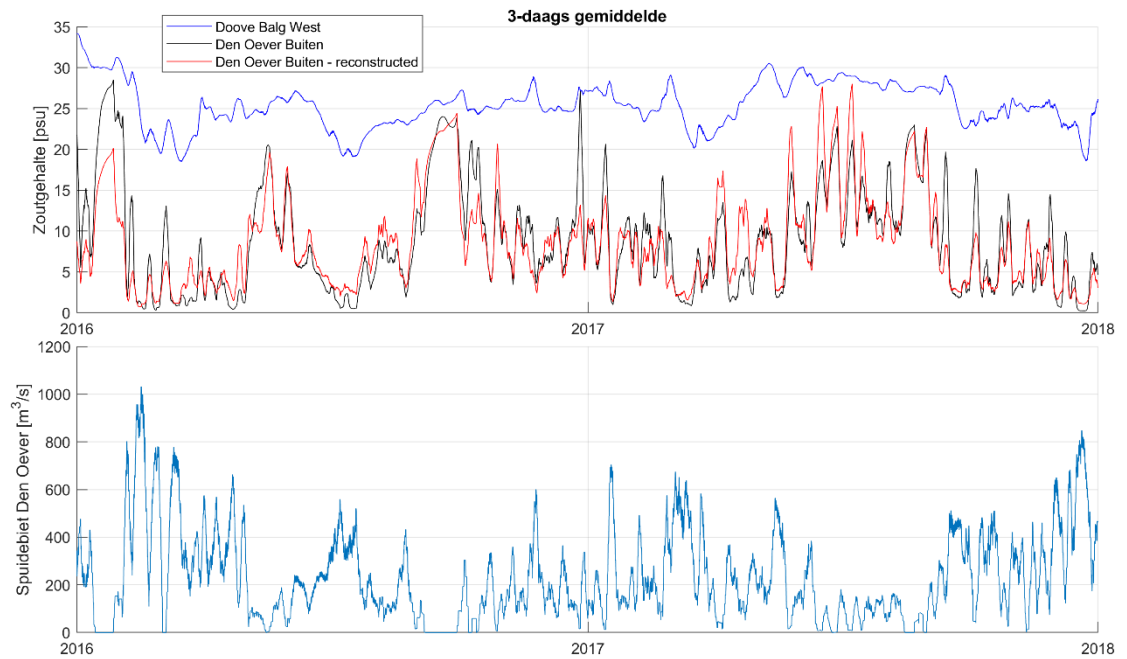
Figuur B-5 Tijdsverloop van verzilting voor verschillende spuivolumes in de voorgaande 2 dagen. Deze relatie is opgesteld voor de spuikom van Kornwerderzand op basis van een Waddenzeemodel simulatie voor de periode 2016-2017.

B.2 Validatie van relatie

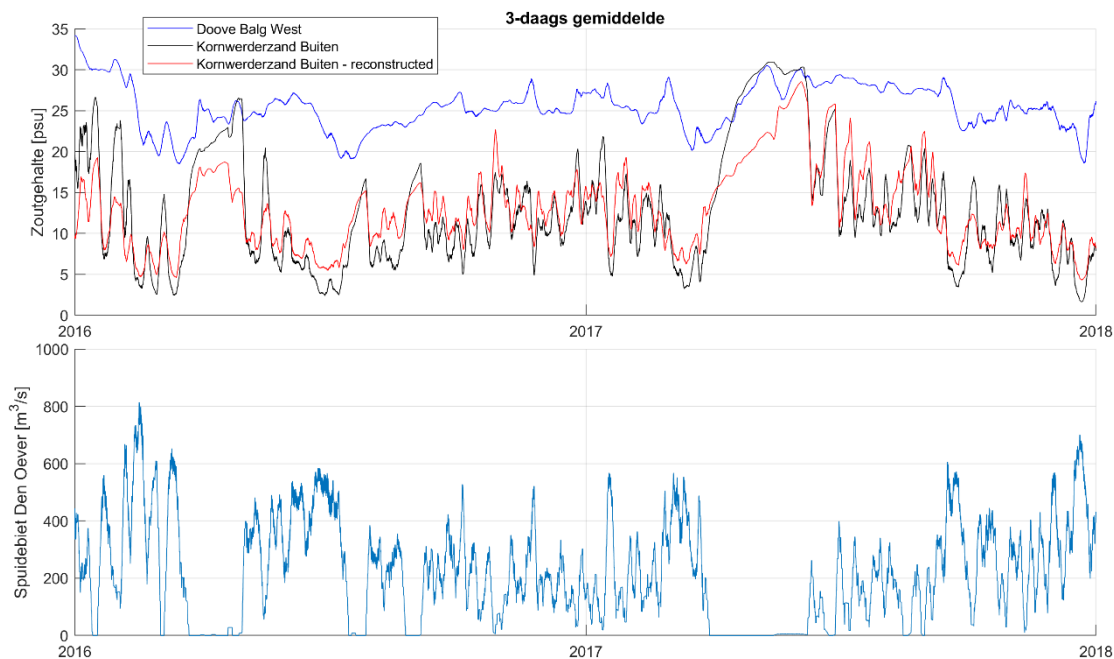
Met de afgeleide relaties, zoals hierboven beschreven, is het zoutgehalte in de buitenhaven van Den Oever en Kornwerderzand berekend voor de periode 2016-2017 en vervolgens vergeleken met het gemodelleerde zoutgehalte in de buitenhaven van Den Oever en Kornwerderzand, zie Figuur B-6 en Figuur B-7. Als input voor de herberekening zijn twee tijdseries gebruikt:

- Het gemodelleerde zoutgehalte bij Doove Balg West
- De spuidebieten bij Den Oever en Kornwerderzand zoals opgenomen in de randvoorwaarden van het model.

Deze validatie toont aan dat de routine gebruikt kan worden om het zoutgehalte her te berekenen. Een aantal pieken worden over- of onderschat, maar de algemene trend wordt goed weergegeven.



Figuur B-6 Validatie van de relaties bij Den Oever. Boven: gemodelleerd (Waddenzeemodel) zoutgehalte bij de spuirom (zwart), herberekend zoutgehalte bij de spuirom o.b.v. trendrelatie (rood), gemodelleerd zoutgehalte bij Doove Balg West (blauw). Onder: spuidebiet bij Den Oever in Waddenzeemodel.

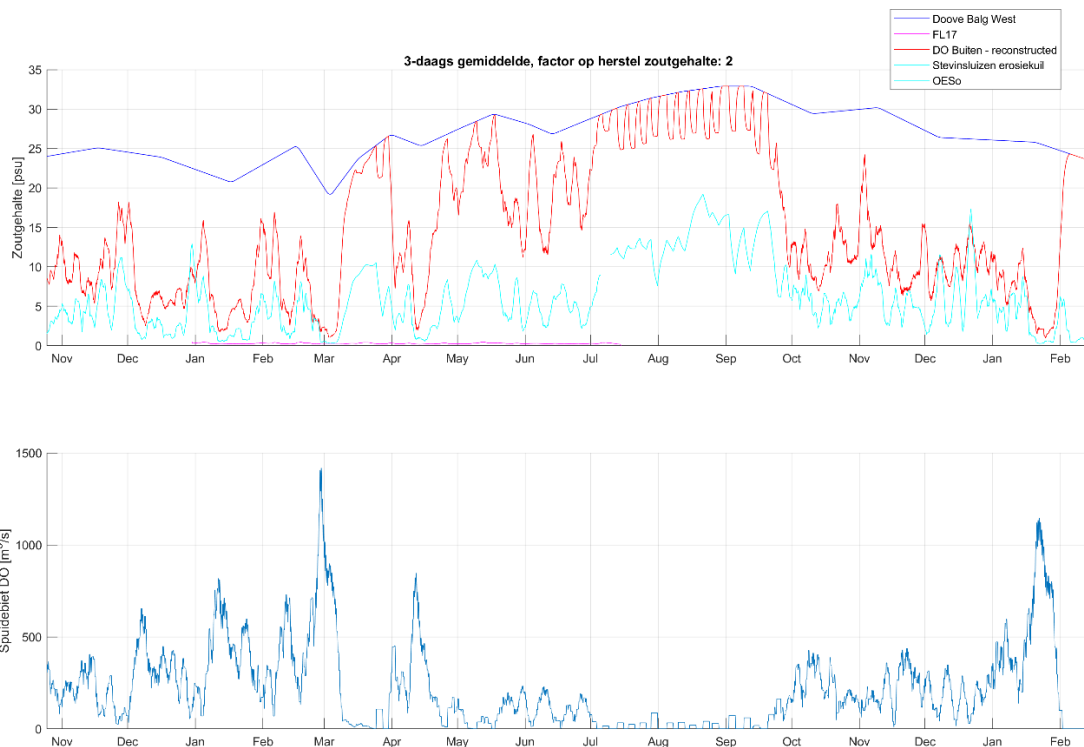


Figuur B-7 Validatie van de relaties bij Kornwerderzand. Boven: gemodelleerd (Waddenzeemodel) zoutgehalte bij de spuikom (zwart), herberekend zoutgehalte bij de spuikom o.b.v. trendrelatie (rood), gemodelleerd zoutgehalte bij Doove Balg West (blauw). Onder: spuidebiet bij Kornwerderzand in Waddenzeemodel.

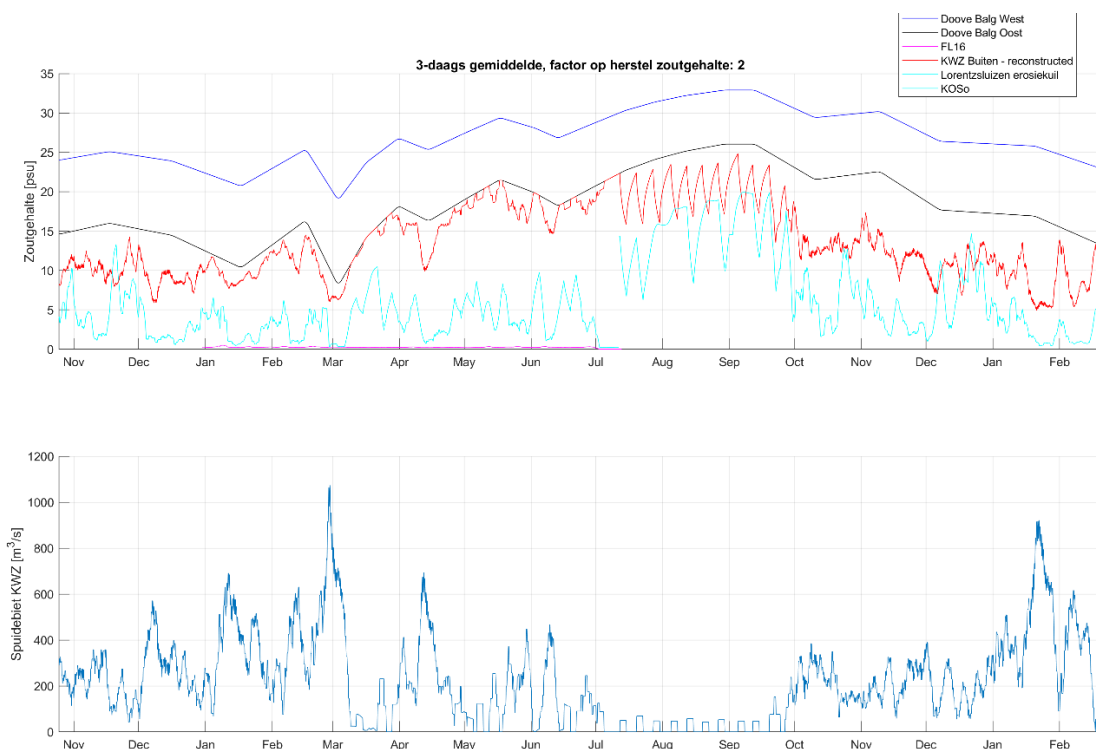
B.3 Afleiden zoutgehalte buitenhaven Den Oever en Kornwerderzand

De validatie liet zien dat de relaties gebruikt kunnen worden om de zoutgehaltes in de spuikom in te schatten op basis van een tijdserie van de spuidebieten en een tijdserie van het zoutgehalte bij Doove Balg West. De relaties zijn daarom ook toegepast om de zoutgehaltes in de spuikommen van Den Oever en Kornwerderzand te berekenen voor de simulatieperiode van deze studie (1 jan 2022 – 13 feb 2023).

Ter eerste validatie zijn de gereconstrueerde zoutgehaltes vergeleken met het maximale zoutgehalte in de erosiekuil. Vooral in de wintermaanden was het maximale zoutgehalte in de erosiekuil regelmatig hoger dan het gereconstrueerde zoutgehalte in de spuikom. Daarom is ervoor gekozen om het verzilten een factor 2 sneller te laten verlopen als afgeleid in paragraaf B.1. Voor Den Oever zijn de gereconstrueerde zoutgehaltes gelimiteerd op het gemeten zoutgehalte bij Doove Balg West. Voor Kornwerderzand zijn de gereconstrueerde zoutgehaltes gelimiteerd op het berekende zoutgehalte bij Doove Balg Oost.



Figuur B-8 Boven: Geschatte zoutgehalte in de buitenhaven van Kornwerderzand (rood) op basis van de gelegde relatie met de metingen bij Doove Balg West (blauw) en de spuidebieten bij Kornwerderzand (onder), gelimiteerd op het geschatte zoutgehalte bij Doove Balg Oost (zwart, bovenste paneel). De lichtblauwe lijn in het bovenste paneel toont het maximale gemeten zoutgehalte in de erosiekuil. Voor de gehele figuur geldt dat een lopend 3-daags gemiddelde is toegepast.



Figuur B-9 Boven: Geschatte zoutgehalte in de buitenhaven van Kornwerderzand (rood) op basis van de gelegde relatie met de metingen bij Doove Balg West (blauw) en de spuidebieten bij Kornwerderzand (onder), gelimiteerd op het geschatte zoutgehalte bij Doove Balg Oost (zwart, bovenste paneel). De lichtblauwe lijn in het bovenste paneel toont het maximale gemeten zoutgehalte in de erosiekuil. Voor de gehele figuur geldt dat een lopend 3-daags gemiddelde is toegepast.

C Overzicht van verbeterpunten

In deze bijlage wordt een beknopt overzicht gegeven van een aantal (kleine) verbeterpunten die in een volgende studie opgepakt kunnen worden. De focus is hier vooral op het corrigeren van fouten en niet zozeer op meer algemene verbeteringen, aangezien die zijn opgesomd in het hoofdrapport in paragraaf 7.3.

- Nalopen van observatiepunten en ervoor zorgen dat de observatiepunten in actieve cellen liggen. Op z'n minst de volgende observatiepunten:
 - meas_lemmer
 - meas_FL38
- Nalopen of voor alle meetlocaties observatiepunten zijn meegenomen in het model. Voor meetlocatie OUDEZG is in de huidige opzet geen observatiepunt opgenomen.
- Toevoegen cross-sections op de rand van de erosiekuil bij Den Oever. Met behulp van deze cross-sections kan beter ingeschat hoe de buffering van zout werkt in de erosiekuil.
- Toevoegen cross-secties bij alle lozingsranden om snel de zoutbalans en het gemiddelde zoutgehalte van het IJsselmeer te bepalen uit alle bron en put termen. (Het inkomende zouttransport is beschikbaar uit de randvoorwaarden, het uitgaande zouttransport niet).
- Initiële temperatuur 4,5 °C in plaats van 19,9 °C voor 1 januari 2022.
- Verbeter bodemligging, bijv. op basis van updates van Baseline: o.a. bij 'drempels' in de vaargeul naar Makkum, in de vaargeul bij Den Oever, en rond de vismigratierivier in aanleg.
- Voor toepassingen vanaf 2023 zijn aanpassingen in het rooster, bodem en randvoorwaarden nodig in verband met het vervangen van de Roggebotsluis door de Reevesluis.

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