

Ontwikkeling en eerste resultaten D-HYDRO model Voordelta en Haringvliet



Ontwikkeling en eerste resultaten D-HYDRO model Voordelta en Haringvliet

Auteur(s)

Theo van der Kaaij

Ontwikkeling en eerste resultaten D-HYDRO model Voordelta en Haringvliet

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer dr. Y.F. Friocourt
Referenties	SITO MAD07 Ontwikkeling WQ schematisaties; 2.6a Ontwikkeling Kier Haringvliet planfase
Trefwoorden	Haringvlietsluizen; Zoutindringing; Kieren; Lerend Implementeren

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	13-03-2024
Projectnummer	11209231-002
Document ID	11209231-002-ZKS-0008
Pagina's	49
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Theo van der Kaaij	

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	Theo van der Kaaij	Arno Nolte	Toon Segeren

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de opzet van een D-HYDRO model van het Haringvliet en de Voordelta, het zeegebied voor de Haringvlietssluisen. Naast de opzet van het model worden ook eerste berekeningsresultaten en een vergelijking met metingen gepresenteerd. De doelstelling van het model is de simulatie van kierscenario's waarin tijdens vloed zout zeewater wordt ingelaten in het Haringvliet.

De modelschematisatie is gebaseerd op:

- Het bestaande D-HYDRO model van de RijnMaasMonding (RMM) zoals beschreven in (Veenstra, et al., 2022) en (Kaaij, et al., 2020).
- Het bestaande D-HYDRO model van het Haringvliet zoals beschreven in (Tiessen, et al., 2023).

Het rekenrooster/netwerk is een uitsnede van het RMM rekenrooster/netwerk. De verticale schematisatie is gebaseerd op het Haringvliet model. Dit betekent rekenlagen met een laagdikte van 0,125 m. Deze, dunne, lagen zijn noodzakelijk om stratificatie in diepe putten in het Haringvliet in stand te houden gedurende een berekening. De laagdikte en daardoor volgende grote aantal rekenlagen heeft extreme doorlooptijden tot gevolg. Dit bemoeilijkt het uitvoeren van berekeningen en de vergelijking met metingen.

De in dit rapport gepresenteerde berekening en data model vergelijking betreft het door Rijkswaterstaat uitgevoerde eerste "Lerend Implementeren" experiment uit 2019. Gedurende dit experiment is kortdurend, één vloedperiode, zout zeewater ingelaten waarna is bemeaten hoe dit zoute zeewater zich verspreid in het Haringvliet en hoe dit vervolgens wordt uitgespoeld.

Om de berekening in doorlooptijd mogelijk te maken is het inspelen van het zeedeel van het model effectief overgeslagen. De berekening start vlak voor het inlaten. Het zoutgehalte van het ingelaten water is het zoutgehalte zoals voorgeschreven door de initiële conditie voor zout die is gebaseerd op gemeten zoutgehalten te Stellendam Buiten (een meetlocatie aan zeezijde van het sluisencomplex pal voor de sluisen). Deze aanpak geeft de mogelijkheid het modelgedrag in het Haringvliet zelf te beoordelen. Voor het zeedeel geldt dat de mate waarin de dynamiek, resulterend in de verhouding zout zeewater en zoet rivierwater, wordt gereproduceerd slechts beperkt is vast te stellen.

Voor het Haringvliet geldt dat gemeten zoutgehalten kwalitatief goed worden gereproduceerd. Kwantitatief is de hoeveelheid zout wat kleiner, ongeveer 15% minder, dan "gemeten". Het gemiddelde zoutgehalte aan de zee kant van het sluisencomplex, meetlocatie Stellendam Buiten, wordt goed gereproduceerd door het model. Echter, de variatie in zoutgehalte wordt onderschat. Een mogelijke verklaring is dat de zoutgradiënt loodrecht op de sluisen in werkelijkheid groter is dan in de modelberekeningen. Metingen om deze hypothese te bevestigen dan wel ontkennen ontbreken.

Het gebruik van het model wordt bemoeilijkt door de extreme rekentijden. Mogelijke oplossingen om hiermee om te gaan zijn:

- Uitbreiding van de functionaliteit van het rekenhart van de D-HYDRO simulatie software waarbij de laagverdeling ruimtelijk afhankelijk kan worden gespecificeerd. Voor het Haringvliet zijn de dunne rekenlagen noodzakelijk. Voor het zeedeel van het model niet maar momenteel is er geen mogelijkheid om in het zeedeel met dikkere lagen te rekenen.
- Het uitvoeren op externe, zware, rekensystemen zoals bijvoorbeeld het cloud cluster van Amazon.
- Een hybride modeleeraanpak waarbij een berekening twee maal wordt uitgevoerd. Eerst met een beperkt aantal rekenlagen bedoeld voor het zeedeel van het model. Vervolgens een tweede berekening, met een Haringvliet uitsnede van het model, waarbij dunne rekenlagen worden gebruikt. Berekeningsresultaten van de eerste, grove, berekening worden gebruikt als randvoorwaarden voor de tweede, fijne, berekening. Of deze aanpak werkt zal nader moeten worden onderzocht.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Metingen naar zoutindringing in het Haringvliet	7
1.3	Eerdere modellering zout in het Haringvliet	7
1.4	Dit project	8
1.5	Dit rapport	9
2	Eerdere modellering	10
2.1	SIMONA/TRIWAQ model Haringvliet/Voordelta 2017; Grotendeels overgenomen uit (Kaaij, 2023)	10
2.1.1	Modelopzet	10
2.1.2	Samenvatting belangrijkste resultaten	11
2.2	Haringvliet model 2020-2022; grotendeels overgenomen uit (Tiessen, et al., 2023)	13
2.2.1	Modelopzet	13
2.2.1.1	Rooster	13
2.2.1.2	Randvoorwaarden	14
2.2.1.3	Initiële condities voor saliniteit	15
2.2.2	Samenvatting belangrijkste resultaten	16
2.2.2.1	Waterstanden	16
2.2.2.2	z-t plots (chloride/zoutgehalte)	17
3	Opzet D-HYDRO model Haringvliet/Voordelta	19
3.1	Rekenrooster/netwerk	19
3.2	Bathymetrie en geometrie	20
3.3	Randvoorwaarden	20
3.4	Schematisatie Haringvlietsluizen in model	21
3.5	Overige modelinvoer	22
3.5.1	Bodemruwheid	22
3.5.2	Effect turbulentie	22
3.6	Rekentijden model	22
4	Eerste berekeningsresultaten	23
4.1.1	Algemeen	23
4.1.2	Referentieberekening	23
4.1.2.1	Resultaten: Waterstanden	24
4.1.2.2	Resultaten: Afvoer door Haringvlietsluizen	24
4.1.2.3	Resultaten: Tijdreeksen saliniteit Zee/Voordelta	25
4.1.2.4	Resultaten: Tijdreeksen chloride diepe putten Haringvliet (vaste metingen “Lerend Implementeren”).	27

4.1.2.5	Resultaten: z-t figuur chloride diepe putten Haringvliet (vaste en varende metingen “Lerend Implementeren)	28
4.1.2.6	Resultaten: Massa zout (chloride) in diepe putten.	30
4.1.3	Alternatieve, hybride, modeleeraanpak	30
5	Samenvatting, conclusies, modeltoepasbaarheid en aanbevelingen	32
5.1	Samenvatting	32
5.2	Conclusies	32
5.3	Modeltoepasbaarheid	34
5.4	Aanbevelingen	35
6	Literatuur	37
A	Schatting afvoercoëfficiënt Haringvlietsluizen	38
A.1	Algemeen	38
A.2	Afvoercoëfficiënt Spuien	39
A.3	Afvoercoëfficiënt Inlaten	39
B	Resultaten referentie berekening: Waterstanden	41
C	Resultaten referentie berekening: Tijdreeksen saliniteit Voordelta/Zee	43
D	Resultaten referentie berekening: Tijdreeksen Chloride Diepe Putten Haringvliet	45
D.1	Oppervlak	45
D.2	Rond Spronglaag	46
D.3	Bodem	47

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Sinds halverwege de jaren '90 van de vorige eeuw zijn er plannen de Haringvlietsluizen gedeeltelijk te openen gedurende vloed, als de waterstand op zee hoger is dan in het Haringvliet. De oorspronkelijk doelstelling was het herstellen van de estuariene dynamiek in het Haringvliet. In de loop der tijd is de doelstelling minder ambitieus geworden en momenteel is de doelstelling om trekvissen meer de gelegenheid te geven de sluisen te passeren richting het Haringvliet. Dit staat bekend als het “kieren” met de Haringvlietsluizen.

Openstellen van de Haringvlietsluizen gedurende vloed betekent dat niet alleen trekvissen, maar ook zout zeewater het Haringvliet kan binnendringen. Ten behoeve van zoetwaterbeheer is als eis gesteld aan het zogenaamde kieren met de Haringvlietsluizen dat zout vanuit zee de denkbeeldige lijn Monding Spui – Middelharnis niet mag passeren.

Voor een uitgebreide beschrijving van de achtergrond van het “kieren” met de Haringvlietsluizen wordt verwezen naar (Tiessen, et al., 2023).

1.2 Metingen naar zoutindringing in het Haringvliet

Er is in het verleden, en wordt momenteel, gemeten aan zoutindringing door de sluisen. Aangezien zouttransport niet direct te meten is, wordt de resultante van dit transport, de zoutgehalten in het Haringvliet, gemeten als indicator voor de hoeveelheid zout die door de sluisen het Haringvliet binnendringt. De uitgevoerde meetexperimenten zijn:

- De visintrek proef uit 1994 (Bol, 1995),
- De inlaatproef uit 1997 (Jacobs, et al., 2003),
- Het huidige meetprogramma dat “Lerend Implementeren” is genoemd (Stone, 2021).

De eerdere proeven, de visintrek en de inlaatproef, gingen verder dan de huidige “Lerend Implementeren” experimenten. Hiermee wordt bedoeld dat de sluisen vaker en meer werden geopend tijdens vloed.

1.3 Eerdere modellering zout in het Haringvliet

Vanaf halverwege de jaren 90 van de vorige eeuw is geprobeerd het zouttransport door de sluisen en de resulterende zoutgehalten in het Haringvliet uit te rekenen.

Met het SIMONA/TRIWAQ rekensysteem voor water en zoutbeweging:

- Halverwege de jaren 90 met het toenmalige RIJMAMO model van de gehele RijnMaasMonding (Zijlema, et al., 2001),
- In 2017 met een aangepaste versie van het door het Havenbedrijf Rotterdam (HBR) ontwikkelde NSC (Nautisch Stromings Centrum) model.

Beide modeleerexercities lieten zien dat uitrekenen van zoutgehalten in het Haringvliet allesbehalve triviaal is. Een belangrijke tekortkoming van de modellen was dat de stratificatie, het verschil in zoutgehalte tussen de zoute onderlaag en de zoete bovenlaag, werd onderschat in de berekeningen. Voor de 2017 berekeningen geldt wel dat de totale hoeveelheid zout in het Haringvliet, geschat op basis van varende metingen zoals uitgevoerd gedurende de inlaatproef, goed werd gereproduceerd maar de verdeling van dit zout over de diepte niet.

Tussen 2020 en 2022 is een model van het Haringvliet gemaakt gebaseerd op het D-HYDRO rekensysteem, de opvolger van het SIMONA/TRIWAQ systeem. Hiermee zijn “Lerend Implementeren” experimenten uit 2019 nagerekend, zie (Tiessen, et al., 2023). Doelstelling was vast te stellen in welke mate het zogenaamde naleveren, transport van zout uit de zoute onderlaag naar de zoete bovenlaag, en zoetspoelen, uitspoelen van zout door de Haringvlietsluizen tijdens het spuien met de sluisen, gereproduceerd kon worden. De hoofdconclusie was dat deze processen redelijk te modelleren waren, maar dat wel een hele hoge verticale resolutie, rekenlagen met een dikte van 0.125 m resulterend in een paar 100 rekenlagen, noodzakelijk was. Berekeningen zoals uitgevoerd in het verleden gebruikten rekenlagen met een dikte van enkele meters wat verklaard dat de waargenomen stratificatie niet kon worden gereproduceerd.

Belangrijk verschil tussen het Haringvliet D-HYDRO model en de eerdere SIMONA/TRIWAQ modellen is dat niet geprobeerd is het zouttransport door de sluisen uit te rekenen. De berekeningen beginnen met putten in het Haringvliet gevuld met zout (gebaseerd op “Lerend implementeren” profielmetingen) waarna de verandering van zoutgehalten wordt vergeleken met de waargenomen verandering.

1.4 Dit project

Vanuit Rijkswaterstaat West Nederland Zuid is de wens geuit, met het oog op het voorziene Kieren met de Haringvlietsluizen, zout in het Haringvliet te kunnen schatten middels modelberekeningen. Deze wens betekent dat ook het inlaten van zout tijdens vloed moet kunnen weergegeven door het beoogde model (wat in het D-HYDRO model van het Haringvliet effectief wordt voorgeschreven). Dit betekent dat het rekendomein ook de Voordelta/Zee voor de Haringvlietsluizen moet omvatten en dat ook de transport van zout in de Voordelta voldoende nauwkeurig moet kunnen worden bepaald. Dit betreft de mate waarin tijden spuien geloosd zoet water wordt afgevoerd in Noordelijke richting en, deels, vervangen wordt door zout zeewater. Immers wat tijdens een volgende inlaatperiode aan zout wordt binnengelaten is afhankelijk van hoeveel van het in de voorgaande spuiperiode geloosde Haringvlietwater is afgevoerd. De *dynamiek* in de Voordelta moet dus ook goed beschreven worden door het model.

Het doel van dit project is de ontwikkeling en toetsing van een 3D model opgebouwd uit bestaande elementen dat Kieren kan beschrijven. De randvoorwaarden daarbij zijn:

- De modelschematisatie zal zo veel mogelijk bestaan uit D-HYDRO RMM 3D (rooster & externe forceringen). Het Haringvliet model is uitgebreid met een zeedeel om zo ook het inlaten van zeewater tijdens vloed te kunnen bepalen. Uit het oogpunt van onderlinge consistentie tussen verschillende modelschematisaties is, vergelijkbaar met het Haringvliet model, het rekenrooster gebaseerd op het bestaande rekenrooster van de gehele Rijn Maas Monding (Veenstra, et al., 2022).
- De toetsing zal gebeuren aan de hand van de Naleverproef 2019-2020, zoals ook gebruikt in (Tiessen, et al., 2023). Waar toen de simulatie is gestart nadat het Haringvliet was verzilt, richt deze modelstudie zich op de periode van verzilten en direct daarna.

Het D-HYDRO Haringvliet/Voordelta model is opgezet als onderdeel van het SITO project “BOO Waterkwaliteitsmodelschematisaties”. De werkzaamheden, inclusief de rapportage, zijn uitgevoerd door Th. Van der Kaaij. Projectleiding was in handen van Meinard Tiessen. De review van dit rapport is uitgevoerd door Arno Nolte. Vanuit Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL) zijn de werkzaamheden begeleid door Yann Friocourt.

1.5 Dit rapport

Eerder modellering betrekking hebbend op “zout in het Haringvliet” wordt beschreven in Hoofdstuk 2 van dit rapport. De opzet van het D-HYDRO model van het Haringvliet/Voordelta model wordt gegeven in Hoofdstuk 3. De vergelijking met “Lerend implementeren” metingen is het onderwerp van Hoofdstuk 4. Tenslotte worden de conclusies, de daaruit volgende toepasbaarheid van het model, en de aanbevelingen gegeven in Hoofdstuk 5.

Voor zeeën en oceanen is een gebruikelijke eenheid van het zoutgehalte van het water de Practical Salinity Unit (PSU). Voor rivieren wordt veelal chloriniteit, in mg/l, gebruikt. Om aan te sluiten bij deze twee werelden, van elkaar gescheiden door de Haringvlietsluizen, wordt in dit rapport de eenheid PSU gebruikt voor het zeedeel/de Voordelta maar chloriniteit voor het Haringvliet.

2 Eerdere modellering

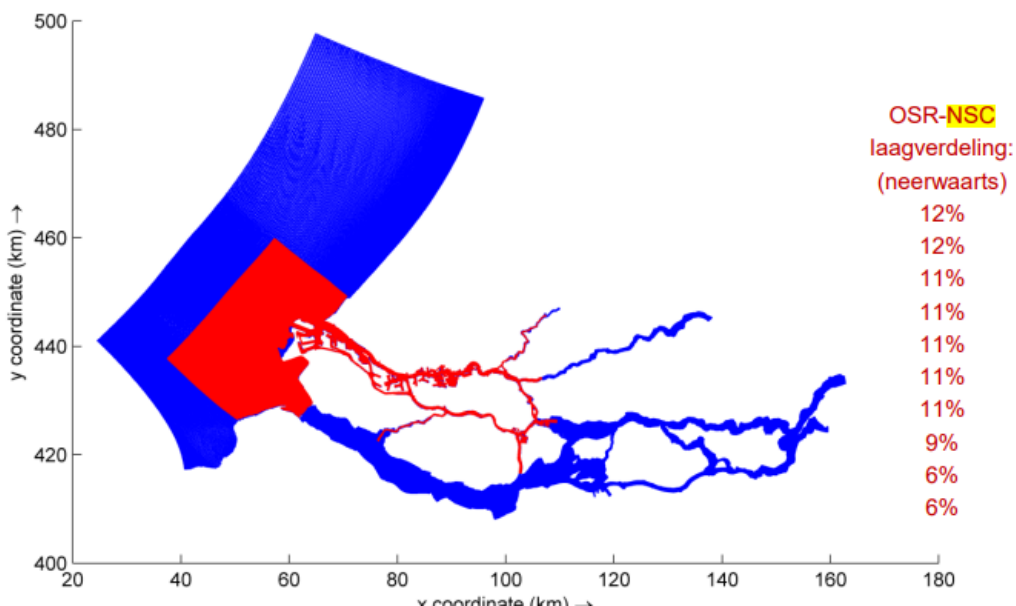
2.1 SIMONA/TRIWAQ model Haringvliet/Voordelta 2017; Grotendeels overgenomen uit (Kaaij, 2023)

2.1.1 Modelopzet

Het Haringvliet/Voordelta model in SIMONA/TRIWAQ is gebaseerd op het door het Havenbedrijf Rotterdam, HBR, ontwikkelde Operationele Stromingsmodel Rotterdam, OSR. Dit is een combinatie van een tweetal modellen (Kranenburg, 2015) , zie Figuur 2-1:

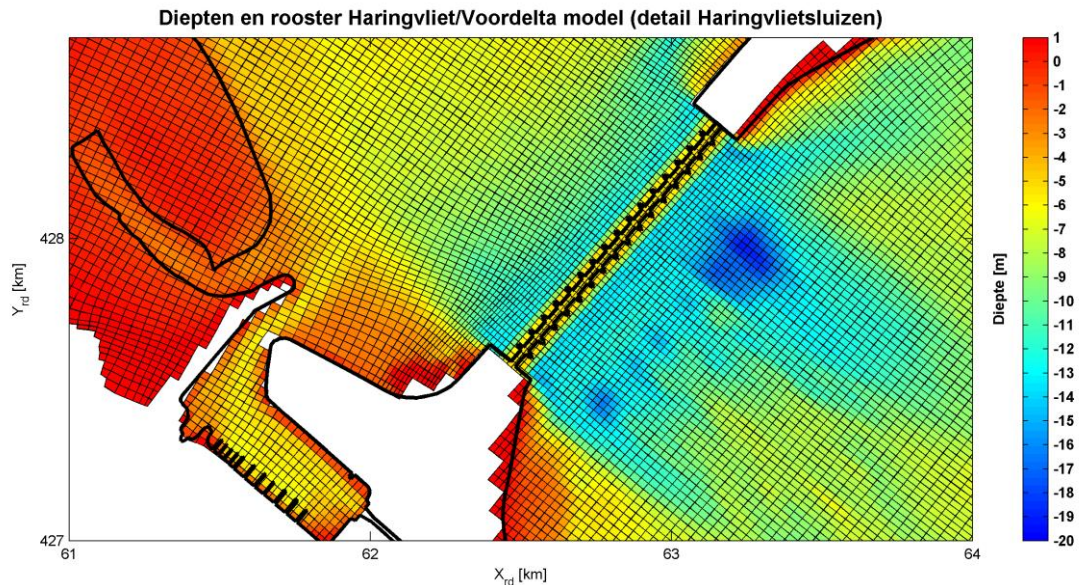
- 1) Het dieptegemiddelde “Havenmodel”, en het,
- 2) 3-Dimensionale “Nautische Service Centrum”, het NSC model.

In het 3-dimensionale NSC model wordt in de verticaal gebruik gemaakt wordt van zogenaamde σ -rekenlagen waarbij elke rekenlaag een dikte heeft van een zeker percentage van de waterdiepte.



Figuur 2-1: Overzicht OSR modelsysteem; Havenmodel blauw, NSC model rood.

In het oorspronkelijke model is het Haringvliet niet in het 3D NSC-model opgenomen. Ten behoeve van het modelleren van de zoutindringing in het Haringvliet is het NSC-model in 2017 uitgebreid met het Haringvliet.



Figuur 2-2: Rekenrooster en diepteschematisatie Haringvliet/Voordelta model (detail Haringvlietsluizen).

De Haringvlietsluizen worden weergegeven middels zogenaamde “barriers”. Ter plekke van een barrier wordt de afvoer (debiet) door de barrier, en het daarmee gepaard gaande transport van zout, benaderd door een afvoerrelatie waarin empirische coëfficiënten (afvoercoëfficiënten) zijn opgenomen. Ter plaatse van de Haringvlietsluizen is ook een drempel in de bodemschematisatie van het model opgenomen met een hoogte van -5.5 [m] ten opzichte van NAP, zie Figuur 2-2. De 17 sluizen zijn ieder afzonderlijk opgenomen als een afzonderlijke barrier.

In 2017 zijn de afvoercoëfficiënten van de sluizen bepaald middels een aantal gevoeligheidsberekeningen. Het betreft hier de zogenoemde “restricting” coëfficiënten die betrekking hebben op schuifbeperkte stroming (“gate restricted flow”). De beste resultaten werden verkregen met een coëfficiënt van 1.0 voor vloedstroming (inlaten) en een coëfficiënt van 0.7 voor ebstroming (spuien).

Op open zee wordt het model aangestuurd met randvoorwaarden gegenereerd met het 3D DCSM model (versie uit 2017). Het betreft voornamelijk snelheidsranden met maar een klein deel open waterstandrand (op het diepste deel van de open rand, de noordwestelijke zeerand). Deze randvoorwaardencombinatie beoogt, zo goed als mogelijk, de resttransporten zoals die optreden in het grootschalige model ook op te leggen aan het detailmodel.

Naast snelheden en waterstanden worden ook door het 3D-DCSM model berekende saliniteiten als randvoorwaarden voorgeschreven. Zowel voor de voorgeschreven snelheid als voor de voorgeschreven saliniteit worden de waarden per rekenlaag voorgeschreven, i.e. zogenaamde 3D randvoorwaarden.

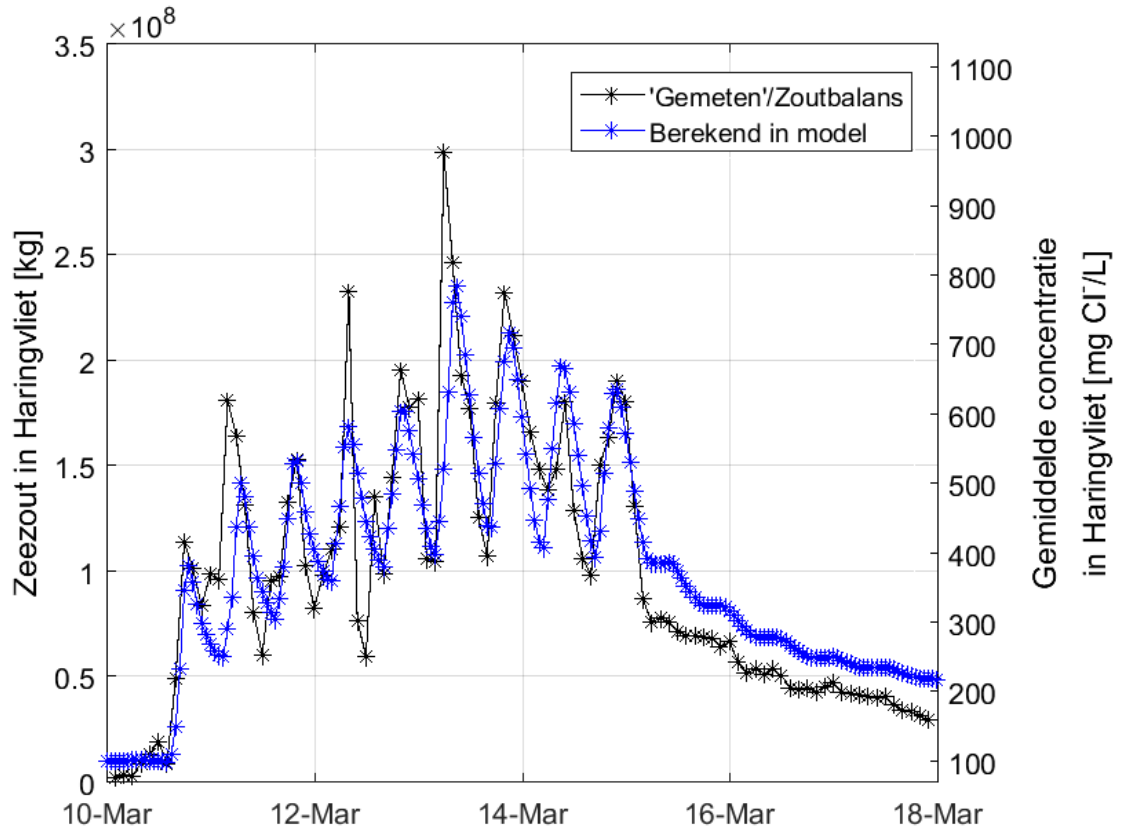
Op de open rivierranden worden zowel de debieten als de saliniteit berekend met het Havenmodel voorgeschreven.

2.1.2 Samenvatting belangrijkste resultaten

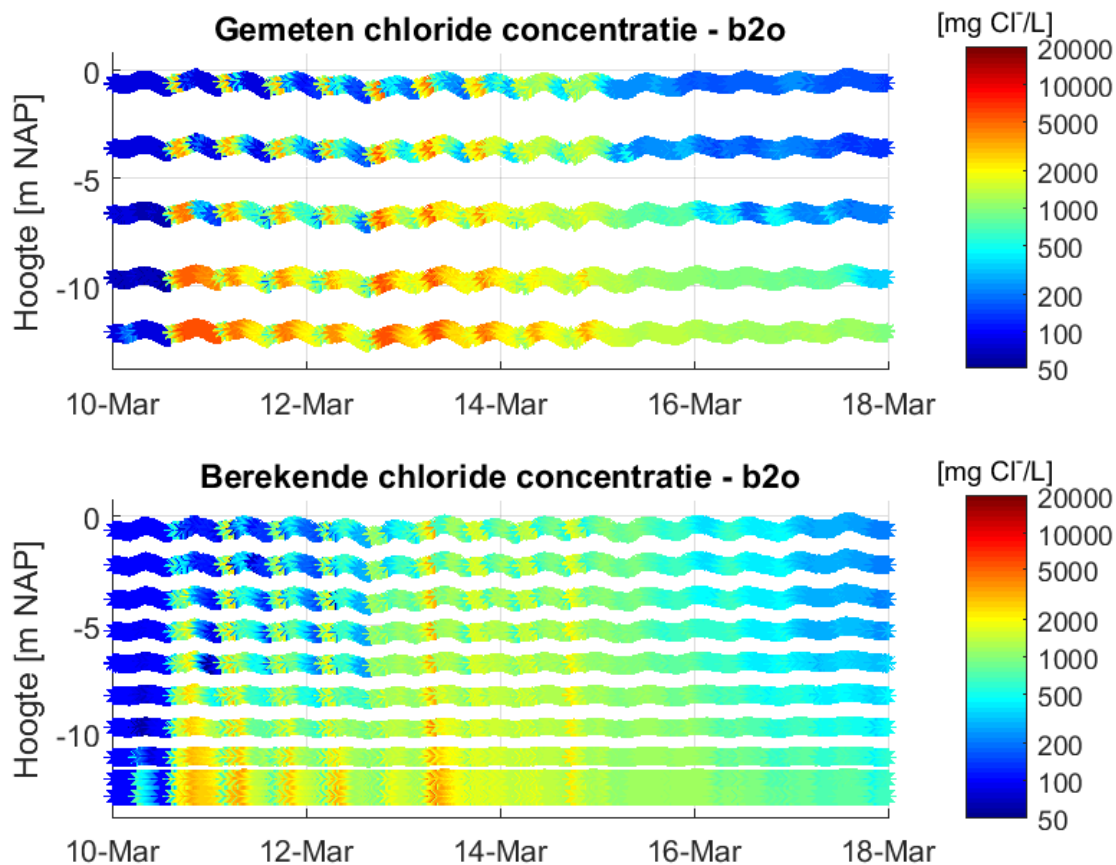
Met het model is de inlaatproef uit 1997 gesimuleerd. Tijdens deze proef is gedurende 5 dagen veel zout ingelaten. Voor het laatste deel van de proef geldt dat een aantal van de sluisdeuren de sluizen bijna geheel geopend waren. De zoutgehalten in het Haringvliet zijn zowel tijdens het inlaten als in de periode daarna, waarin geprobeerd werd het Haringvliet schoon te spoelen,

intensief bemeten. Het betreft hier zowel een groot aantal varende metingen als profielmetingen (gemeten zoutgehalten over de verticaal). Uit deze metingen is geschat hoeveel zout in het gehele Haringvliet aanwezig was. Dit is vergeleken met de berekende hoeveelheid zout in het Haringvliet, zie Figuur 2-3. Deze grootte kan worden gezien als indicator voor het netto zouttransport door de sluisen, inkomend – uitgaand. Uit de figuur blijkt dat de overeenstemming tussen meting en berekening goed is.

Vergelijking van de verdeling over de verticaal van het zout in het Haringvliet laat zien dat de gemeten zoutgehalten nabij de bodem hoger zijn dan berekend. Nabij het wateroppervlak geldt het omgekeerde, de berekening is zouter dan de meting. Anders gezegd, het model onderschat de daadwerkelijk optredende stratificatie, zie Figuur 2-4.



Figuur 2-3: "Gemeten" en berekende hoeveelheid zout in het Haringvliet.



Figuur 2-4: Gemeten, bovenste viewport, en berekende, onderste zoutgehalte (als chloride in mg/l) in het Haringvliet pal voor de sluizen ('Put A').

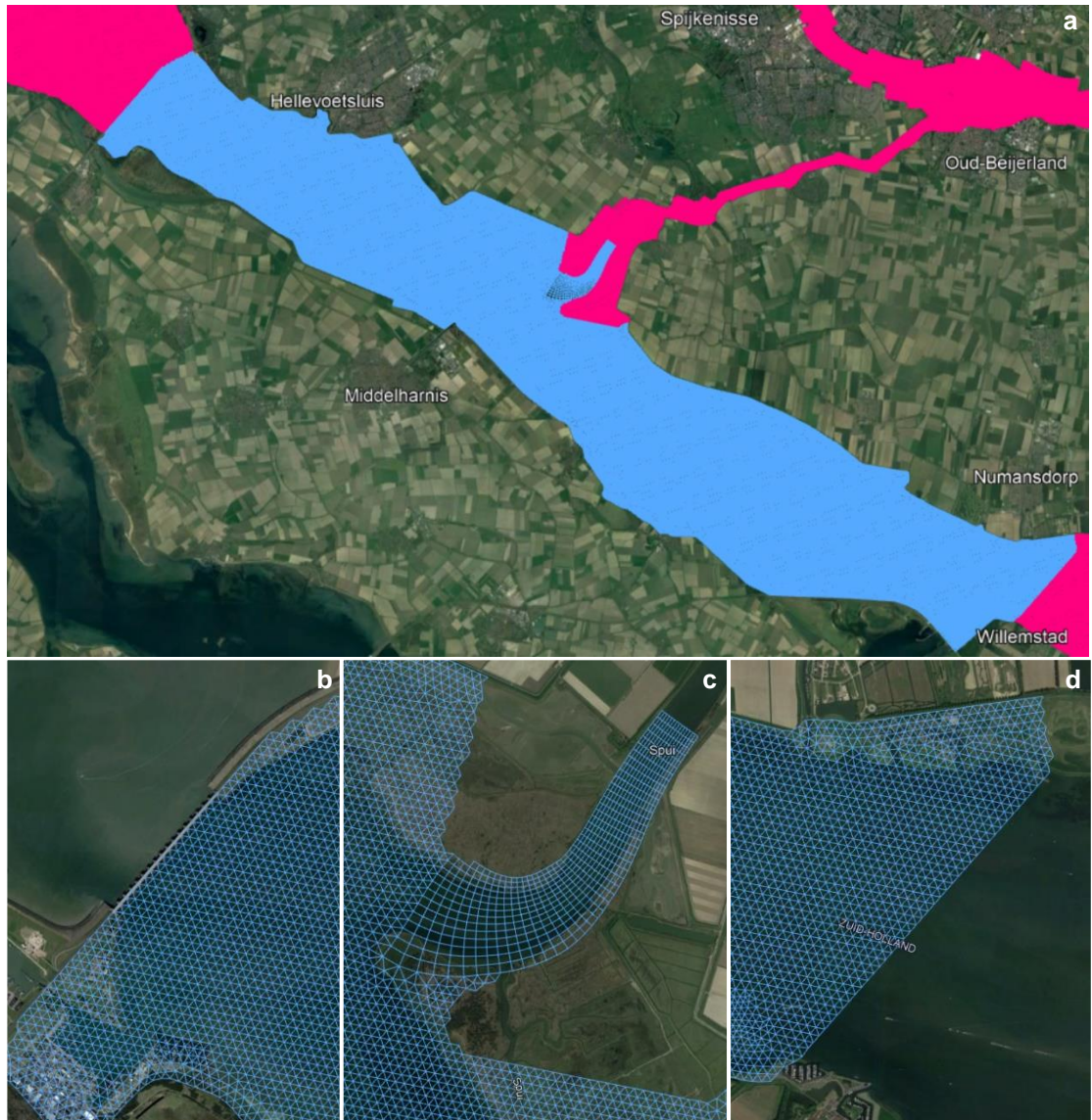
2.2 Haringvliet model 2020-2022; grotendeels overgenomen uit (Tiessen, et al., 2023)

2.2.1 Modelopzet

2.2.1.1 Rooster

Het rekenrooster is een uitsnede van het zesde-generatie rekenrooster van D-HYDRO Rijn-Maasmonding (Veenstra, et al., 2022). De modelschematisatie is begrensd tot het Haringvliet zelf, en bevat niet de Haringvlietsluizen of een zeedomein om de dynamiek aan zeezijde van de kering te beschrijven.

Het modeldomein wordt begrensd door de Haringvlietsluizen aan de westzijde, en heeft open verbindingen over de randen aan de oostzijde op het Hollandsch Diep en aan de noordzijde op het Spui (Figuur 2-5).



Figuur 2-5 a) Rekenrooster van het Haringvlietmodel (blauw) en overige gebieden van het RMM rekenrooster (roze). Rekenrooster en domeingrens bij b) de Haringvlietsluizen met één rekencel per spuiopening, en c) de monding van het Spui en d) het Hollandsch Diep.

De verticale laagverdeling is aangepast ten opzichte van het D-HYDRO RMM model. Daarin wordt gebruik gemaakt van een z -sigma laagverdeling, met voor de z -lagen een laagdikte van 1.0m. Dit is aangepast omdat uit eerste berekeningen met het Haringvlietmodel bleek dat de sterke verticale stratificatie zoals die optrad in de diepe delen van het Haringvliet niet goed werd beschreven. Daarom is ervoor gekozen om gebruik te maken van een verticale laagverdeling volledig bestaand uit z -lagen met een laagdikte van 0.125m.

De oorspronkelijke vaste lagen schematisatie is recent door Svasek aangepast. In plaats van enkel vaste lagen is overgestapt op een combinatie van sigma lagen nabij het wateroppervlak en vaste lagen nabij de bodem. Op -4 m NAP wordt overgegaan van sigma lagen naar vaste lagen. Voor de dikte van de vaste lagen is de oorspronkelijke laagdikte, 0.125 m, gebruikt.

2.2.1.2 Randvoorwaarden

Het modeldomein heeft randen ter plaatse van de Haringvlietsluizen, op het Hollandsch Diep en op het Spui.

- Haringvlietsluizen:
 - Debietrand op basis van SOBEK3 RMM Jaarsom.
- Hollandsch Diep:
 - Waterstandsrand op basis van SOBEK3 RMM Jaarsom.
 - Zoutgehalte: Hiervoor wordt een vaste achtergrondswaarde gebruikt van 0.1PSU (55mg/l chloride).
- Spui:
 - Debietrand op basis van SOBEK3 RMM Jaarsom.
 - Zoutgehalte: Hiervoor wordt een vaste achtergrondswaarde gebruikt van 0.1PSU.

De debietranden worden dieptegemiddeld opgelegd (bij de sluisen verdeeld over het gedeelte van de waterkolom boven de drempelhoogte), dat wil zeggen dat er een uniform profiel over de verticaal wordt voorgeschreven. Daarnaast worden in het Haringvliet ook nog onttrekkingen uitgevoerd voor de zoetwatervoorziening naar Goeree-Overflakkee. Deze onttrekking is niet meegenomen in de modelopzet om dat de impact op de zoutverspreiding verwaarloosbaar.

Op het wateroppervlakte is windforcering opgelegd als randvoorwaarde. Gekozen is om de lokale wind afkomstig van meetpunt Haringvlietsluizen (meetinterval 10min) uniform op te leggen over het hele domein.

2.2.1.3 Initiële condities voor saliniteit

Als start voor de modelsimulatie worden de volgende initiële condities gebruikt¹:

- Zoutgehalte: De modelsimulatie start op het moment waarop het Haringvliet al is verzilt. Omdat de verzilting aan de start van de simulatie stabiel moet zijn, is het onwenselijk om horizontale zoutgradiënten op te nemen. Daarom is er voor gekozen alle verzilte putten tot de drempelhoogte van -10m NAP te vullen op basis van de gemeten zoutgehalten in iedere put afkomstig van de varende meting van 28 november 2019² (de start van de modelsimulatie). In werkelijkheid zijn sommige putten tot een ondieper niveau gevuld, doordat lokaal de drempel naar een volgende put hoger is. Dit is niet gereproduceerd in het model. De startdatum van de modelsimulatie is echter wel zo gekozen dat de hoogte van de spronglaag in de varende meting dicht in de buurt van de -10m grens lag.

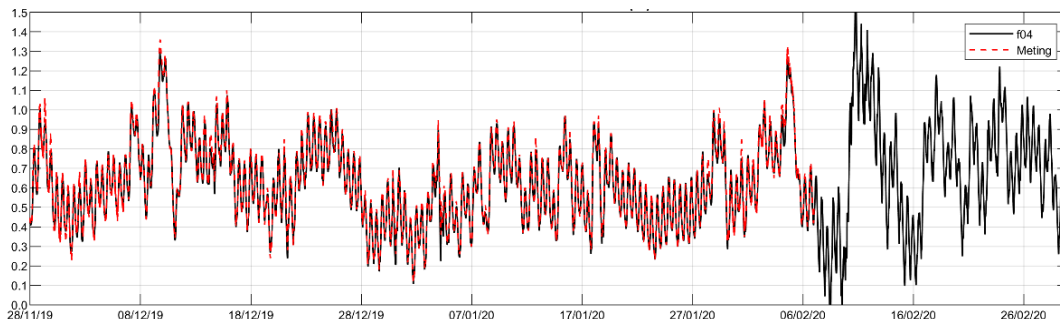
¹ De modelsimulatie begint met een week spin-up. Hierin wordt “diagnostisch” gerekend, waarbij het zout in de diepe delen niet in beroering wordt gebracht. De eigenlijke modelsimulatie begint op 28 november 2019, en de spin-up begint op 20 november 2019. De uitvoer van de spin-up is een restart-file, welke als invoer dient voor de eigenlijke modelsimulatie. De hier gepresenteerde initiële condities gelden voor de spin-up simulatie.

² Deze meting wordt door Fioole (2020) gekwalificeerd als “twijfelachtig”. Alhoewel een toelichting waarom dit zo is ontbreekt, blijkt uit analyse dat de spronglaaghoogte te diep lijkt te liggen (ten opzichte van eerdere en latere varende metingen). Dit heeft echter nagenoeg geen effect op de modelopzet: De spronglaaghoogte ligt bij deze meting rond de -10m NAP en voor het initiële zoutgehalte worden alleen waardes beneden -10m NAP gebruikt.

2.2.2 Samenvatting belangrijkste resultaten

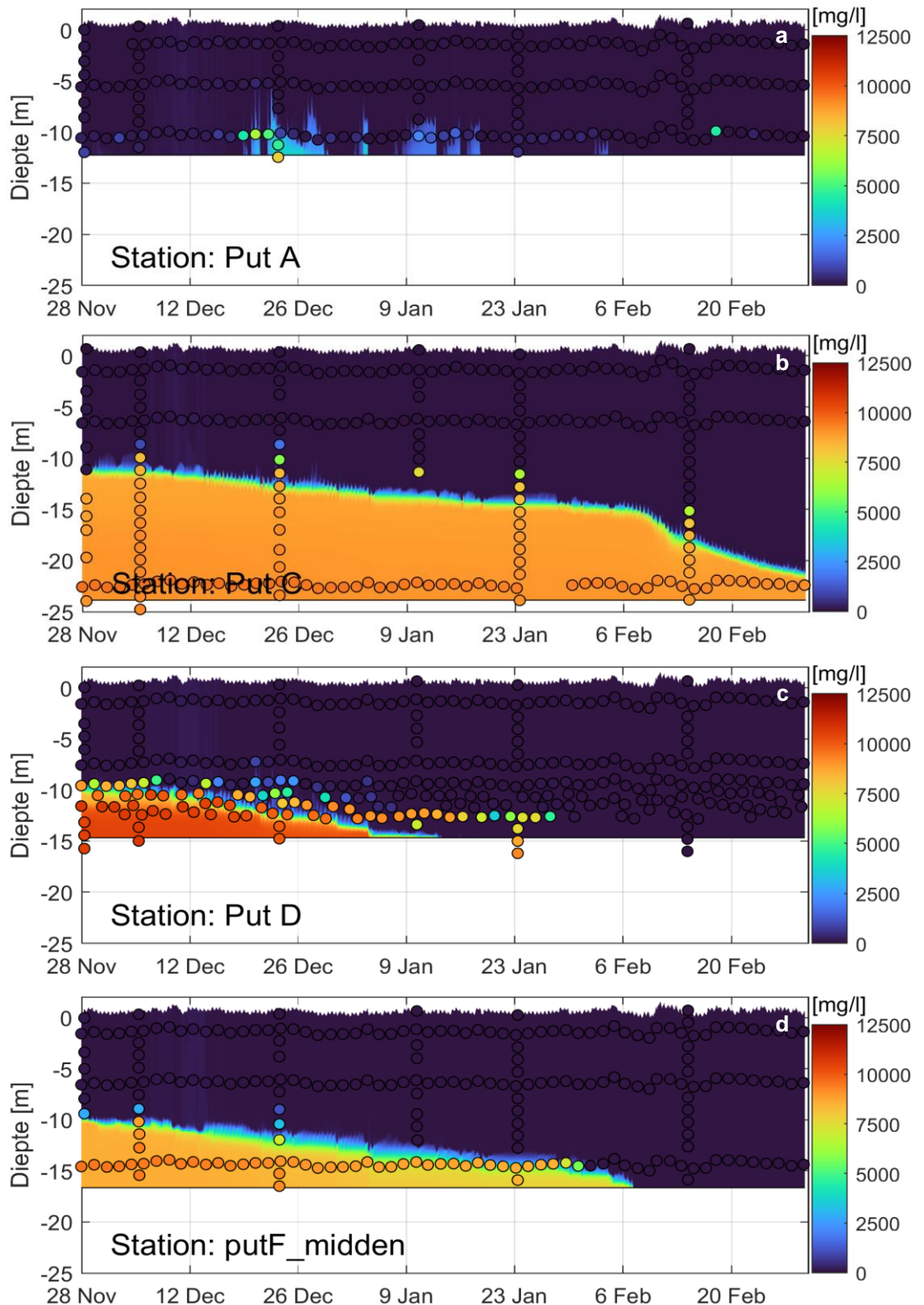
2.2.2.1 Waterstanden

In Figuur 2-6 wordt de gemeten waterstand bij Hellevoetsluis vergeleken met de gemodelleerde waterstand. Te zien is dat het model de gemeten waterstandsvariatie goed reproduceert. Door gebrek aan meer uitvoerpunten in dit gebied, is een uitgebreidere analyse niet mogelijk. Maar deze vergelijking geeft een indicatie dat het model de basale hydrodynamica goed beschrijft.



Figuur 2-6 Vergelijking gemeten (rood gestreepte lijn) en gemodelleerde waterstand (zwarte continue lijn) bij meetlocatie Hellevoetsluis ten tijde van de simulatieperiode.

2.2.2.2 z-t plots (chloride/zoutgehalte)



Figuur 2-7 Overzicht van de zoutontwikkeling over tijd voor de verschillende putten in het Haringvliet. Berekende waarden zijn weergegeven als continue kleuren, de metingen als gekleurde bollen. De diepte waarop het zoutgehalte is gemeten is opgehangen aan de gemeten waterstand bij Hellevoetsluis.

Het model laat een realistisch verloop zien van de geleidelijke ontzilting van de diepere delen van het Haringvliet. De gemodelleerde ontzilting is in goede overeenstemming met de gemeten zoutgehalten over tijd. De grootste verschillen zijn zichtbaar voor put D, die in de modelresultaten te snel ontzilt.

3 Opzet D-HYDRO model Haringvliet/Voordelta

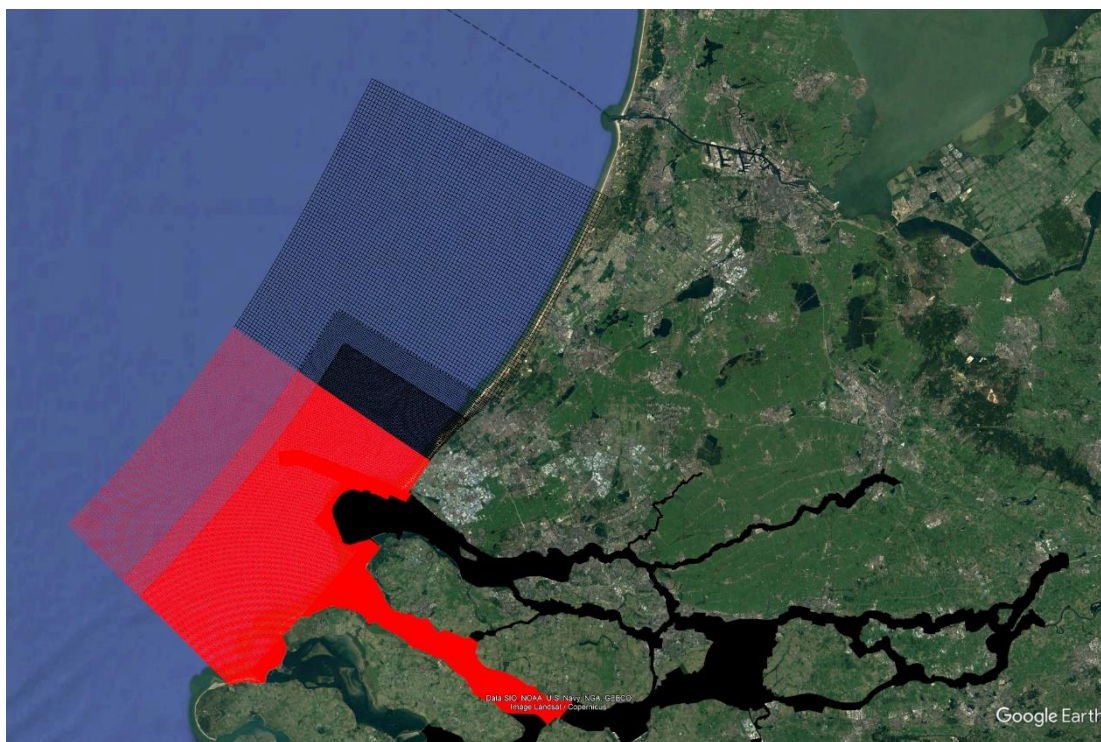
In dit hoofdstuk worden een beschrijving gegeven van de ontwikkeling van het D-HYDRO model van het Haringvliet en de Voordelta.

3.1 Rekenrooster/netwerk

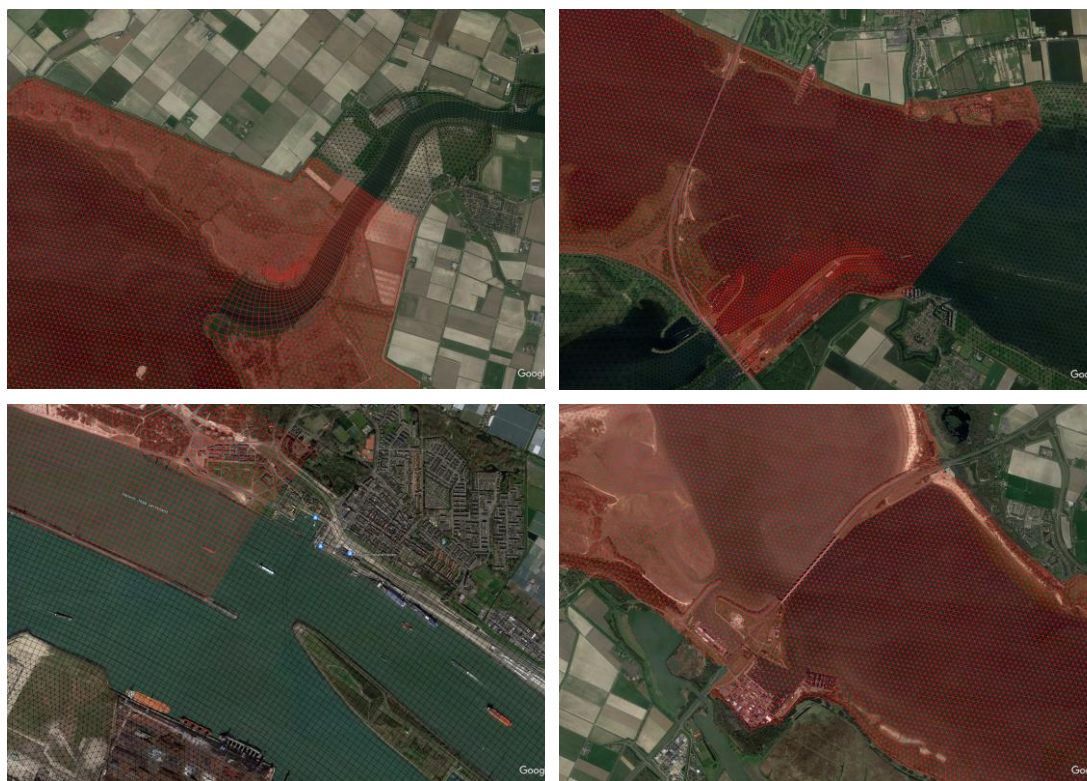
Horizontaal:

Het gebruikte netwerk/rekenrooster is een uitsnede van het rekenrooster zoals dat gebruikt wordt in het RijnMaasMonding (RMM) model, zie (Veenstra, et al., 2022) Het zeedeel/Voordelta deel van het model heeft een omvang vergelijkbaar maar niet identiek aan de omvang van het SIMONA/TRIWAQ model zoals beschreven in paragraaf 2.1 (Figuur 3-1).

Het Haringvliet heeft een open rand ter plaatse van Rak Noord en ter plaatse van de Monding van het Spui. Daarnaast is er een open rand, uitmondend in zee, ter plaatse van Maasmond (Hoek van Holland). De locaties van deze open randen wordt getoond in Figuur 3-2. De bovenstroomse randen komen overeen met die van het D-HYDRO Haringvliet model.



Figuur 3-1: Omvang van zowel het RMM model (zwart) als het Haringvliet/Voordelta model (rood).



Figuur 3-2: Open Rand lokaties: Spui (linksboven); Rak Noord (rechtsboven); Maasmond/Hoek van Holland (linksonder) en het netwerk ter plaatse van de Haringvlietsluizen (rechtsonder).

Verticaal:

Voor het zeegebied, de Voordelta van het Haringvliet, kan worden volstaan met een beperkt aantal rekenlagen. Er zijn dan ook eerste oriënterende berekeningen uitgevoerd met de sigma laag verdeling zoals gebruikt in het SIMONA/TRIWAQ model zoals beschreven in Paragraaf 2.1 (10 sigma rekenlagen). Echter, uit deze berekeningen volgde dat voor het Haringvliet zelf niets zinnigs kon worden uitgerekend. Ingelaten zout mengde direct op en spoelde weer uit in de daaropvolgende spuiperiode. Vandaar dat is besloten de laagverdeling zoals gebruikt in het D-HYDRO model van enkel het Haringvliet, beschreven in paragraaf 2.2, te gebruiken. Dit is een combinatie van 33 sigma lagen nabij het oppervlak met daaronder vaste lagen met een dikte van 0.125 m. Deze laagverdeling geeft 346 rekenlagen. Op -4 m NAP wordt overgegaan van sigma lagen naar vaste lagen.

3.2 Bathymetrie en geometrie

Zowel voor de bathymetrie, opgegeven in het netwerk, als voor de geometrie, droge punten en dunne dammen en overlaten, is de schematisatie van het RMM model zoals gebruikt voor de validatie van het model beschreven in (Zijlker, et al., 2022). Deze schematisatie, **dflowfm2d-rmm-j19_6-v2d**, heeft betrekking op het kalenderjaar 2019 en past daarmee bij de “Lerend Implementeren” experimenten.

3.3 Randvoorwaarden

Zeerandvoorwaarden

De open zee randvoorwaarden zijn gegenereerd met het 3D-DCSM model (Zijl, et al., 2022). De waterbeweging wordt aangestuurd met waterstanden zoals berekend met dit model. Voor

de zouttrandvoorwaarde wordt het daadwerkelijke profiel zoals door het DCSM model berekent ter plaatse van de randsteunpunten opgelegd.

Riviertrandvoorwaarden, zie Figuur 3-2

Het Haringvliet heeft een open rand ter plaatse van Rak Noord. Deze randlocatie is identiek aan de locatie van de open rand in het Haringvlietmodel zoals beschreven in paragraaf 2.2. Bij Rak Noord wordt de daadwerkelijk gemeten waterstand voorgeschreven. Ter plaatse van deze randlocatie betreft het zoet rivierwater waarvoor een constante waarde van 0.1 psu is gehanteerd.

Er is ook een open riviertrand in de monding van het Spui. Ook deze locatie is identiek aan de randlocatie in het Haringvliet model. Op deze open rand worden debieten voor geschreven. Voor de grootte van deze debieten worden waarden zoals berekend in de zogenaamde SOBEK -RE jaarsommen. Voor de saliniteit wordt een constante waarde van 0.1 psu gebruikt. Ook voor de open riviertrand Maasmond, uitmondend in zee, worden de debieten volgend uit de SOBEK-RE jaarsom gebruikt. Voor de saliniteit worden eveneens de waarden volgend uit jaarsommen voorgeschreven.

Wind aan het Wateroppervlak

Ook voor wind wordt de tijdreeks, grootte en richting, zoals gebruikt in de SOBEK-RE jaarsommen gebruikt (wind Hoek van Holland). Voor de vertaling van de grootte van de windsnelheid naar een kracht aangrijpend aan het wateroppervlak wordt de standaard 6^e generatie D-HYDRO modellen Cd coëfficiënt formulering gebruikt met BOI2023 coëfficiënten, zie (Groenenboom, 2022).

3.4 Schematisatie Haringvlietsluizen in model

De 17 sluisen van het Haringvlietcomplex zijn elk afzonderlijk in de schematisatie opgenomen waarbij voor elke sluis de hefhoogte van de schuif kan worden voorgeschreven. Geven de hefhoogte wordt gedurende een berekening de afvoer door de sluis bepaald met de zogenaamde “*General Structure*” relatie. Voor details met betrekking tot deze relatie wordt verwezen naar (Kaaij, 2023). Het transport van zout (of zoet) door een constructie is simpelweg de afvoer vermenigvuldigd met het bovenstroomse zoutgehalte.

De formulering bevat een coëfficiënt, de afvoercoëfficiënt, waarmee beoogd wordt het effect van contractie van stroombanen benedenstrooms van een constructie weer te geven (voor schuifbeperkte stroming, i.e. een schuif die gedeeltelijk in het water hangt). Deze onbekende coëfficiënt is geschat, zowel voor spuien als voor inlaten, op basis van gootproeven. Details van deze bepaling worden gegeven in Appendix A. De coëfficiënt voor inlaten is bepaald door te veronderstellen dat spuien met de rivierschuif gezien kan worden als inlaten met de zeeschuif. Voor het spuien respectievelijk inlaten worden afvoercoëfficiënten gelijk aan 0.73 en 0.84 gevonden³.

Het sluisencomplex kent een 5-tal zoutriolen, 2 noordelijke riolen en 3 zuidelijke riolen. De doelstelling van deze riolen is het afvoeren van door de sluisen gelekt zout water. Om het lekken van zout door de riolen te voorkomen staan ze enkel open als de waterstand op het Haringvliet hoger is dan de waterstand op zee. De riolen zijn in de modelschematisatie opgenomen als onttrekkingen waarbij de zoutrioolafvoer moet worden voorgeschreven. Een methodiek om de rioolafvoer te bepalen is gegeven in (Bom, 2023).

³ Effectief zeggen de gootmetingen dus dat spuien met de rivierschuif efficiënter is dan spuien met de zeeschuif. Dit is opvallend omdat al ruim 50 jaar met de zeeschuif wordt gespuid.

3.5 Overige modelinvoer

3.5.1 Bodemruwheid

Het RMM model is uitgebreid gekalibreerd op bodemruwheid en vervolgens gevalideerd. De uit de kalibratie volgende ruwheidsverdeling is gebruikt in het Haringvliet/Voordelta model (een uitsnede van het RMM model).

3.5.2 Effect turbulentie

Het effect van turbulentie wordt, geparameteriseerd, verdisconteerd middels viscositeit (impuls) en diffusie (transport/zout) coëfficiënten. Voor de horizontale viscositeit en diffusie wordt een constante waarde van $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ gebruikt. Hierbij opgeteld wordt een waarde volgend uit de Smagorinski viscositeits/diffusie formulering.

Verticale viscositeit- en diffusiecoëfficiënt worden geschat met het k-ε turbulentiemodel waarbij geen achtergrondwaarde wordt opgeteld.

3.6 Rekentijden model

Als gevolg van de kleine horizontale laagdikte zijn de reketijden excessief. Simulatie van 1 dag vraagt 1.25 dagen doorlooptijd (h7, 48 cores).

4 Eerste berekeningsresultaten

4.1.1 Algemeen

Om de modelreproductie zowel met betrekking tot het inlaten als met betrekking tot nalevering en doorspoelen vast te stellen, werd in 1^e instantie de “Lerend Implementeren periode” van 1 september 2019 tot 12 december 2019 beoogd als simulatie periode.

Tabel 4-1: Overzicht Naleverproef 2019 (Stone, 2021)

Periode	Proces
1 September – 9 Oktober 2019	Inspelen model, met name zeedeel
9 Oktober – 10 Oktober 2019	Inlaten zout zeewater
10 Oktober – 21 Oktober 2019	Verzoeten bovenlaag
1 November – 5 November 2019	Doorspoelen
5 November – 14 November 2019	Naleveren
14 November – 28 November 2019	Doorspoelen
29 November – 2 December 2019	Verzoeten bovenlaag
3 December – 12 December 2019	Doorspoelen

Deze beoogde simulatieduur heeft een doorlooptijd van meer dan 4 maanden. Om de doorlooptijd te bekorten is de simulatieduur ingekort, van 8 Oktober 2019 tot 25 Oktober 2019. Met deze simulatieduur kunnen berekeningsresultaten worden vergeleken met resultaten van twee van de in het kader van het “Lerend implementeren” uitgevoerde varende metingen. De varende meting van 14 Oktober 2019 en 17 Oktober 2019.

De latere startdatum van de berekening, waarmee effectief het inspelen van het zeedeel wordt overgeslagen, betekent dat slechts in beperkte mate wat gezegd kan worden over de dynamiek in het zeedeel. Het zoutgehalte van het ingelaten water, 9-10 oktober, wordt bepaald door op het model opgelegde initiële conditie voor zout in de Voordelta. Wel kan, kwalitatief weliswaar, de vergelijking tussen gemeten en berekende zoutgehalten te meetlocatie Stellendam buiten, juist voor de sluizen in de Voordelta, een indruk geven over:

- de juistheid van de grootte van de spuidebieten voor spuiperioden volgend op het inlaten, en,
- de mate waarin de Voordelta wordt ververst, gespuid zoet water wordt afgevoerd en vervangen door zout zeewater. Deze verversing is indirect een indicator voor de noordwaarts gerichte resttransporten in de Voordelta.

4.1.2 Referentieberekening

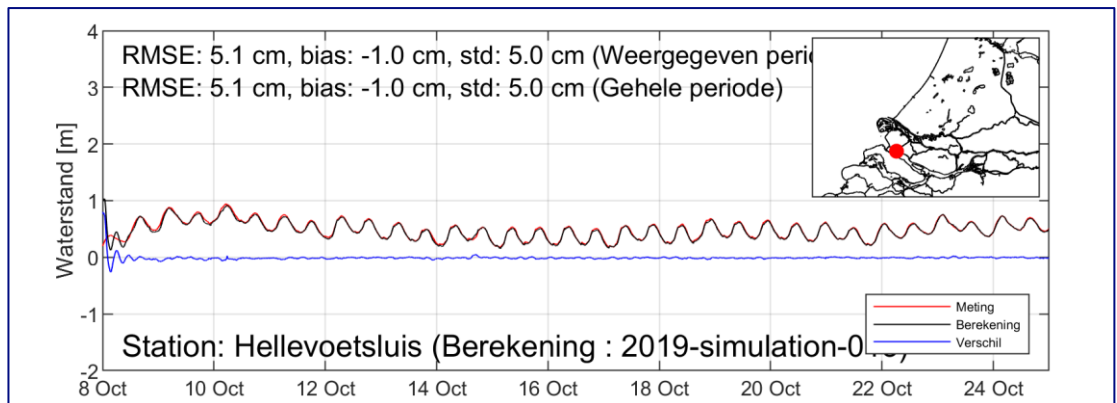
Voor het zeedeel is een initiële conditie aangemaakt waarbij het zoutgehalte in de Voordelta gebaseerd is op het gemeten zoutgehalte te Stellendam buiten juist voorafgaand aan het inlaten (27 psu). Tussen Voordelta en zee is een geleidelijke overgang van 27 psu naar 33 psu gecreëerd.

Voor de Haringvlietsluizen geldt dat alleen wordt ingelaten en gespuid door rekenlagen die effectief open zijn. Er wordt dus ingelaten en gespuid door een spleet met geringe hoogte (keyword: *Structurelayersactive* = 1). Rekenlagen boven deze spleet zijn gesloten voor water- en zouttransport.

4.1.2.1 Resultaten: Waterstanden

Berekening van waterstanden is geen doel van dit model. Echter, een redelijke waterstandreproductie suggereert dat de afvoeren door de Haringvlietsluizen goed door het model worden weergegeven. Aangezien in de gesimuleerde periode slechts eenmaal, kortdurend is ingelaten maar wel regelmatig is gespuid betreft dit met name de spuidebieten door de sluisen.

De gemeten waterstanden te Hellevoetsluis worden vergeleken met berekende waterstanden voor meetlocatie Hellevoetsluis in Figuur 4-1. De vergelijking laat zien dat gemeten waterstanden goed worden weergegeven door het model. Dit geldt ook voor overige meetlocaties waarvan de vergelijking tussen gemeten en berekend waterstanden wordt getoond in Appendix B.



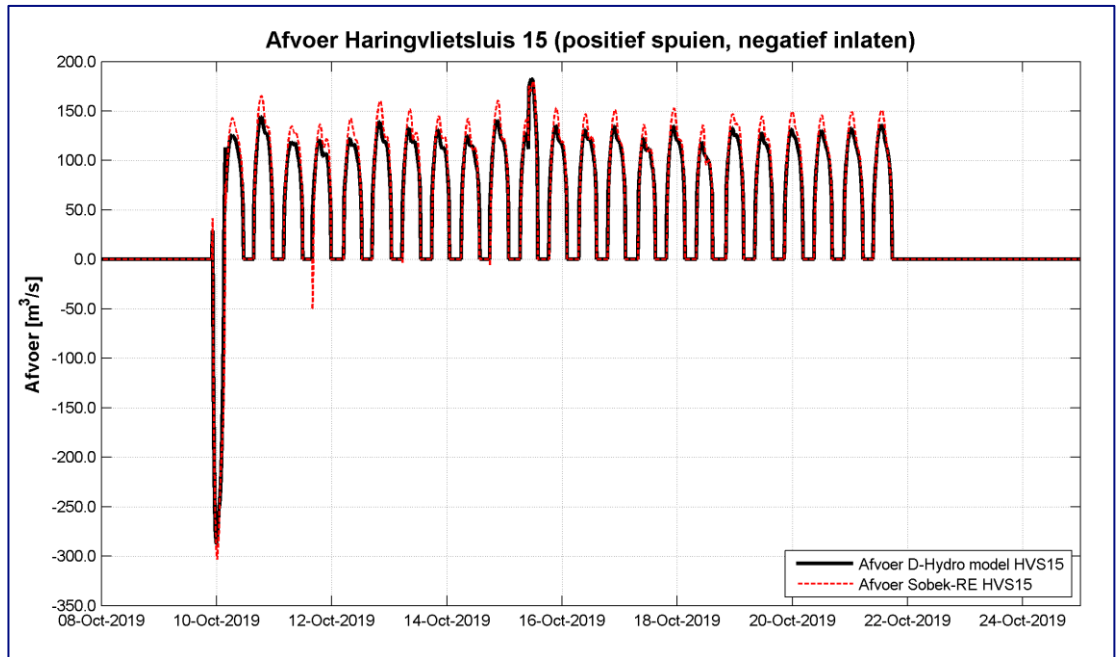
Figuur 4-1: Waterstanden Referentieberekening; Hellevoetsluis.

4.1.2.2 Resultaten: Afvoer door Haringvlietsluizen

De afvoer door de Haringvlietsluizen wordt bepaald door de “*general structure*” relatie in combinatie met het waterstandsverschil over de sluisen en de afvoercoëfficiënt. Voor het Voordelta/Haringvliet model is de afvoercoëfficiënt bepaald op basis van gootmetingen (Paragraaf 3.4; coëfficiënt spuien 0.73; inlaten 0.84). De waarden wijken af van het in het SOBEK-RE model van het RMM gebied gebruikte coëfficiënt (0.83 voor zowel spuien als inlaten).

Figuur 4-2 toont de berekende afvoer door de Haringvlietsluis 15, waarmee gedurende de naleverproef is ingelaten, van zowel het SOBEK-RE als het D-Hydro model. Zowel voor spuien als voor inlaten geldt dat de D-HYDRO afvoeren kleiner zijn dan de SOBEK-RE afvoeren. Voor spuien is dit te verklaren door de kleinere D_HYDRO afvoercoëfficiënt. Voor inlaten geldt dat, ondanks de grotere D-HYDRO afvoercoëfficiënt, de D_HYDRO afvoer toch kleiner is dan de SOBEK-RE afvoer. De D-HYDRO waterstandverschillen over de Haringvlietsluizen zijn dus kleiner dan de SOBEK-RE waterstandverschillen.

Welke van de berekende afvoeren de werkelijkheid het best benaderd is niet bekend omdat metingen van de afvoer ontbreken.



Figuur 4-2: Afvoer door Haringvlietsluis 15; Naleverproef 2019; D-Hydro en Sobek-RE model.

4.1.2.3 Resultaten: Tijdreeksen saliniteit Zee/Voordelta

Met het inlaten wordt zout getransporteerd door de sluisen. Het zouttransport door een sluis is het product van de afvoer vermenigvuldigd met de het zoutgehalte voor, aan zeezijde, van de sluis. Dit zoutgehalte is, middels de initiële conditie van de berekening, zo gekozen dat het overeenstemt met het gemeten zoutgehalte te Stellendam Buiten.

Voor de spuiperioden na het inlaten geldt dat het zoutgehalte te Stellendam buiten bepaald wordt door:

- De hoeveelheid gespuid Haringvliet water, en,
- Mengings- en transportprocessen in de Voordelta: De mate waarin dit gespuid water wordt afgevoerd in Noordelijke richting en “vervangen” door zout zeewater middels het noordoostelijk gerichte rest-transport in de Voordelta.

De vergelijking tussen gemeten en berekende zoutgehalten voor Stellendam buiten wordt getoond in Figuur 4-3. Uit deze figuur volgt dat:

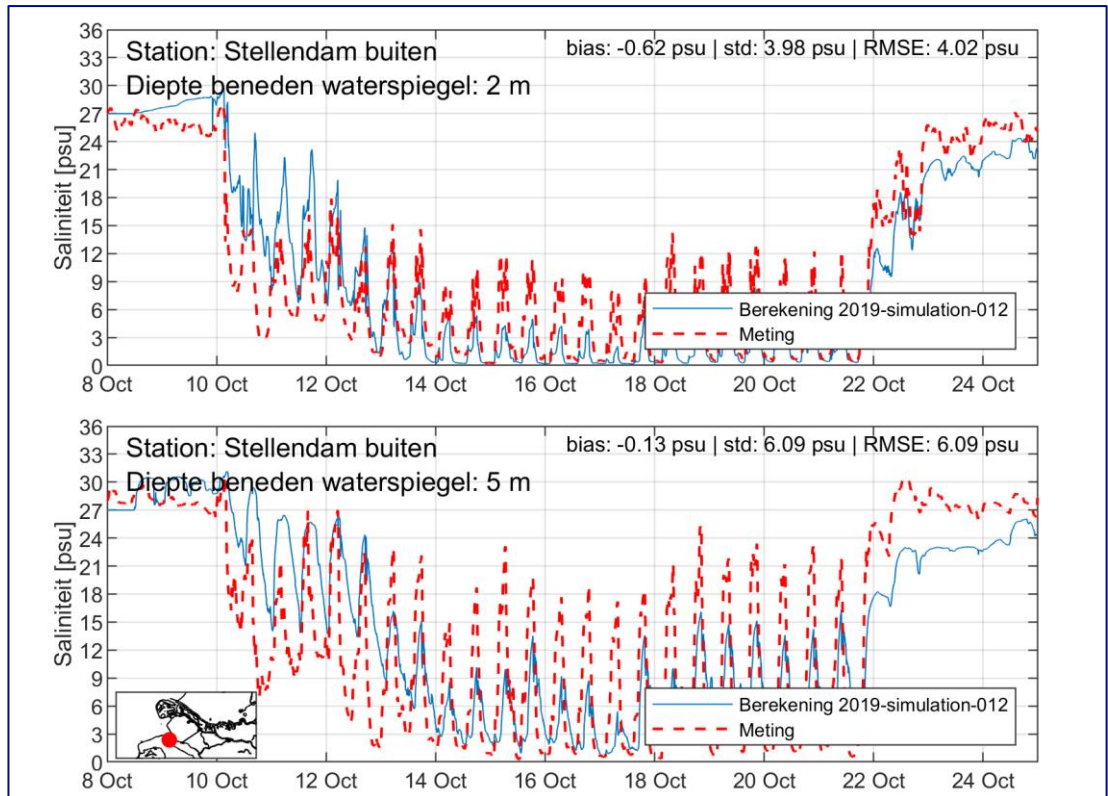
- Zowel meting als berekening laten een gestratificeerde conditie zien,
- In de spuiperioden direct volgend op het inlaten, van 10 tot 12 Oktober, is het gemeten zoutgehalte lager dan het berekende zoutgehalte,
- Gedurende het restant van de simulatieperiode, van 14 tot 25 Oktober, is het gemeten zoutgehalte structureel hoger dan de berekende waarden.

De te hoge zoutgehalten direct na het inlaten kunnen worden veroorzaakt door het niet voldoende ingespeeld zijn van het zeedeel waar het zout betreft. Te hoge zoutgehalten in de Voordelta in de initiële conditie vertalen zich in te hoge zoutgehalten voor de sluisen in de periode direct volgend op het inlaten.

Voor de periode waarin gespuid is van 14 tot 25 oktober geldt dat gedurende het spuien het zoutgehalte afneemt, zowel in meting als berekening, totdat effectief zoet Haringvliet water

resteert. In de vloedperiode volgend op het spuien, bij gesloten sluizen, neemt zowel in de meting als in de berekening het zoutgehalte toe. Echter, de toename in het gemeten zoutgehalte is aanmerkelijk groter dan de toename in het berekende zoutgehalte. Oorzaken zouden kunnen zijn:

- Mogelijk te grote berekende spuidebieten resulterend in teveel zoet Haringvlietwater in de Voordelta, of,
- een te gering resttransport waardoor gespuid, zoet, water teveel blijft “hangen” voor de sluizen en te weinig wordt afgevoerd, of,
- Een zoutgradiënt in de Voordelta loodrecht op de schuiven die in werkelijkheid groter is dan in de modelberekening wat zich vertaalt in een grotere gemeten variatie in saliniteit juist voor de sluizen.



Figuur 4-3: Gemeten en berekende saliniteit te Stellendam Buiten (Voordelta), 2,5 en 9 m beneden NAP.

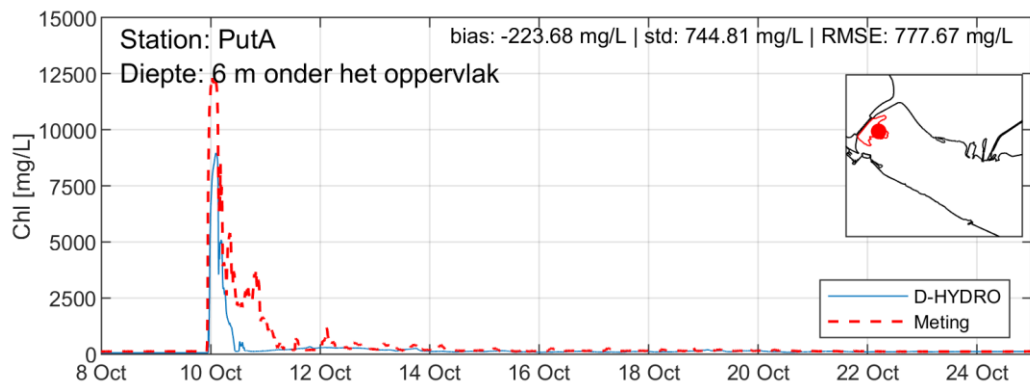
Ook te Haringvliet 10 wordt zout gemeten. Voor de volledigheid geeft Appendix C ook de vergelijking tussen het gemeten en berekende zoutgehalte ter plaats van deze meetlocatie. Zowel meting als berekening zijn geheel zout waarbij de meting iets zouter is dan de berekening. Vermoedelijk is dit een gevolg van de, door het 3D-DCSM model gegenereerde zout randvoorwaarden van het model.

4.1.2.4 Resultaten: Tijdreeksen chloride diepe putten Haringvliet (vaste metingen “Lerend Implementeren”).

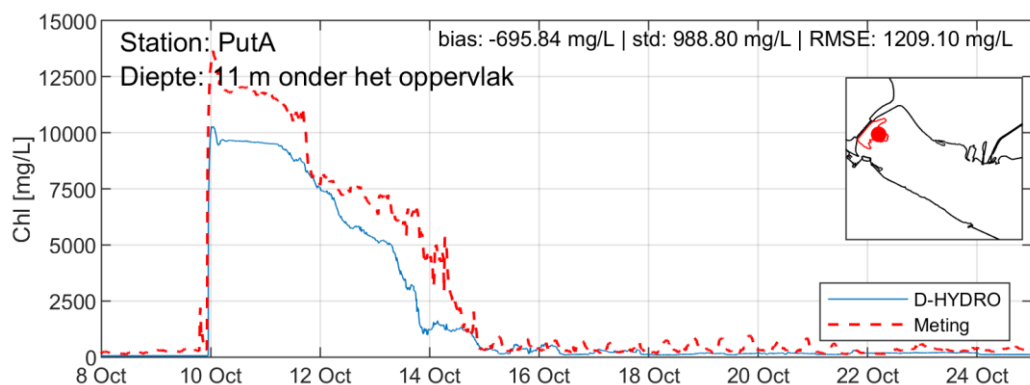
Gedurende het “Lerend Implementeren” meetprogramma zijn vaste chloridemetingen uitgevoerd in het Haringvliet. Het, op een vaste hoogte, gemeten chloridegehalte wordt vergeleken met berekende waarden voor Put A, direct voor de sluis (Haringvliet zijde), in Figuur 4-4 - Figuur 4-6. Uit deze figuren blijkt dat:



Figuur 4-4: Gemeten en berekende chloride Put A; 2 m onder wateroppervlak.



Figuur 4-5: Gemeten en berekende chloride Put A; 6 m onder wateroppervlak.



Figuur 4-6: Gemeten en berekende chloride Put A; 11 m onder wateroppervlak.

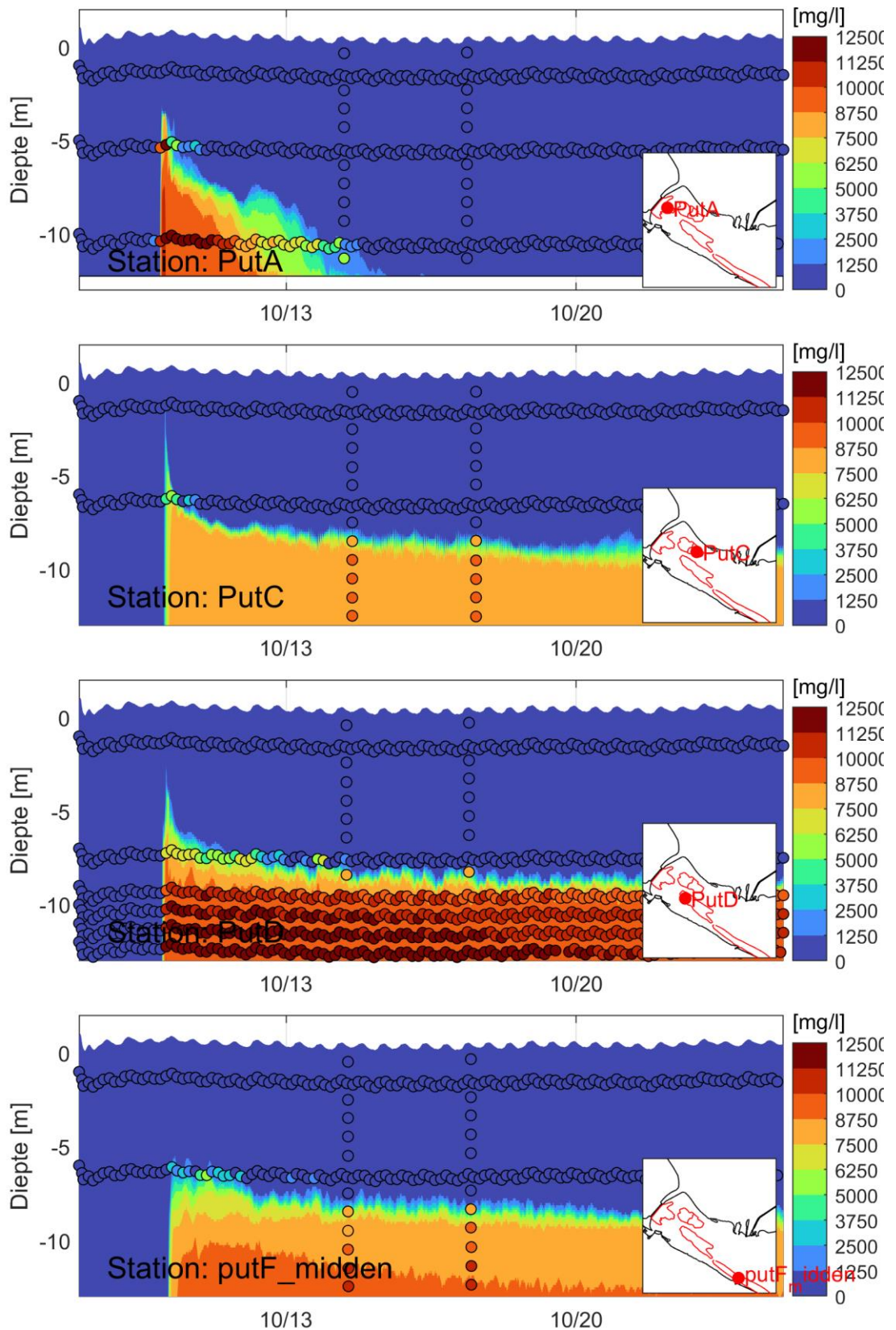
- Direct na het inlaten ontstaat, zowel in de meting als in de berekening, een sterk gestratificeerde situatie met een bijna zoete bovenlaag en een zoute onderlaag. Wel toont de berekening toename van chloridegehalten bij het oppervlak die in de meting niet wordt gezien. Dit betekent dat in de berekening wat meer menging optreedt dan in werkelijkheid.
- Halverwege de waterkolom neemt direct na het inlaten het chloridegehalte fors toe. Wat meer in de meting dan in de berekening. Ook neemt het chloridegehalte op deze diepte wat sneller af dan wordt waargenomen. De meting is na 2 dagen weer volledig zoet, het model na 1 dag. De spronglaag tussen het zoete oppervlak en de zoute bodem ligt waarschijnlijk in werkelijkheid iets hoger dan in de berekening.
- Nabij de bodem neemt direct na het inlaten het chloridegehalte fors toe. Deze toename is groter in de meting dan in de berekening. De snelheid waarmee het chloridegehalte nabij de bodem afneemt in de tijd is wel vergelijkbaar. Dit geeft aan dat het “leegtrekken” van Put A middels de zoutriolen goed wordt weergegeven in de berekening.

Samengevat geeft de vergelijking tussen het gemeten en berekende chloridegehalte aan dat te weinig zout het Haringvliet binnenkomt door de sluizen tijdens het inlaten. Verder laat het model wat meer menging zien, wat hogere chloridegehalten nabij het oppervlak, dan de meting.

De tijdreeksen chloride voor de overige diepe putten in het Haringvliet worden getoond in Appendix D. Ook deze reeksen laten zien dat direct na het inlaten het chloridegehalte nabij het oppervlak wat groter is in de berekening. Ook geven de resultaten voor de andere putten aan dat, vermoedelijk, de hoeveelheid zout die in werkelijkheid in het Haringvliet aanwezig is wat groter is dan in de modelberekening.

4.1.2.5 Resultaten: z-t figuur chloride diepe putten Haringvliet (vaste en varende metingen “Lerend Implementeren”)

Gedurende de “Lerend Implementeren” metingen zijn incidenteel varende metingen uitgevoerd. Deze profielmetingen, in combinatie met de vaste metingen worden getoond in Figuur 4-7. In het algemeen zijn de resultaten goed echter, vergelijkbaar met de tijdreeksen volgt uit deze zogenaamde z-t figuur dat een te kleine hoeveelheid zout de wordt binnengelaten. Dit is met name zichtbaar voor Put A maar vertaalt zich voor de overige putten in te lage chloridegehalten bij de bodem. Verder lijkt hoogte van de spronglaag tussen zoute bodem en zoet oppervlak in de meting ongeveer 0,5 m hoger te liggen dan in de berekening.



Figuur 4-7: Varende en vaste metingen vergeleken met berekeningsresultaten voor de diepe putten in het Haringvliet.

4.1.2.6 Resultaten: Massa zout (chloride) in diepe putten.

Het modelgedrag is gekwantificeerd door de hoeveelheid chloride, in kg, in de diepe putten te bepalen voor zowel meting (varende profielmeting) als berekening.

Voor een polygoon dat een put omsluit wordt de hypsometrische curve (volume als functie van de diepte) bepaald. Deze volumecurve vermenigvuldigd met een chlorideprofiel geeft de massa chloride. Zowel voor meting als voor berekening wordt slechts 1 profiel gebruikt dat ongeveer het midden van de put beschrijft.

De gebruikte putpolygoonen zijn identiek aan de polygoonen gebruikt in (Bom, 2023) en de methodiek is eerder toegepast in (Tiessen, et al., 2023).

Zowel de gemeten als de berekende massa chloride voor 2 meetdagen in de simulatieperiode worden gegeven in Tabel 4-2. Uit deze tabel volgt:

- De overeenstemming tussen de “gemeten” en berekende hoeveelheid chloride is goed. Echter, de “gemeten” hoeveelheid chloride is, met uitzondering van Put A op 14 Oktober 2019, groter dan de berekende hoeveelheid. Het verschil in massa chloride tussen meting en berekening bedraagt grofstoffelijk 15 %.
- Met uitzondering van Put A is er zowel in meting als berekening nauwelijks verschil tussen de hoeveelheid chloride in de putten tussen 14 en 17 oktober. Er is sprake van een uiterst geringe afname. Dit geldt niet voor Put A waar de zoutriolen de put “leegtrekken”.

Tabel 4-2: Hoeveelheid chloride, in miljoenen kg, in de diepe putten in het Haringvliet, Lerend Implementeren metingen.

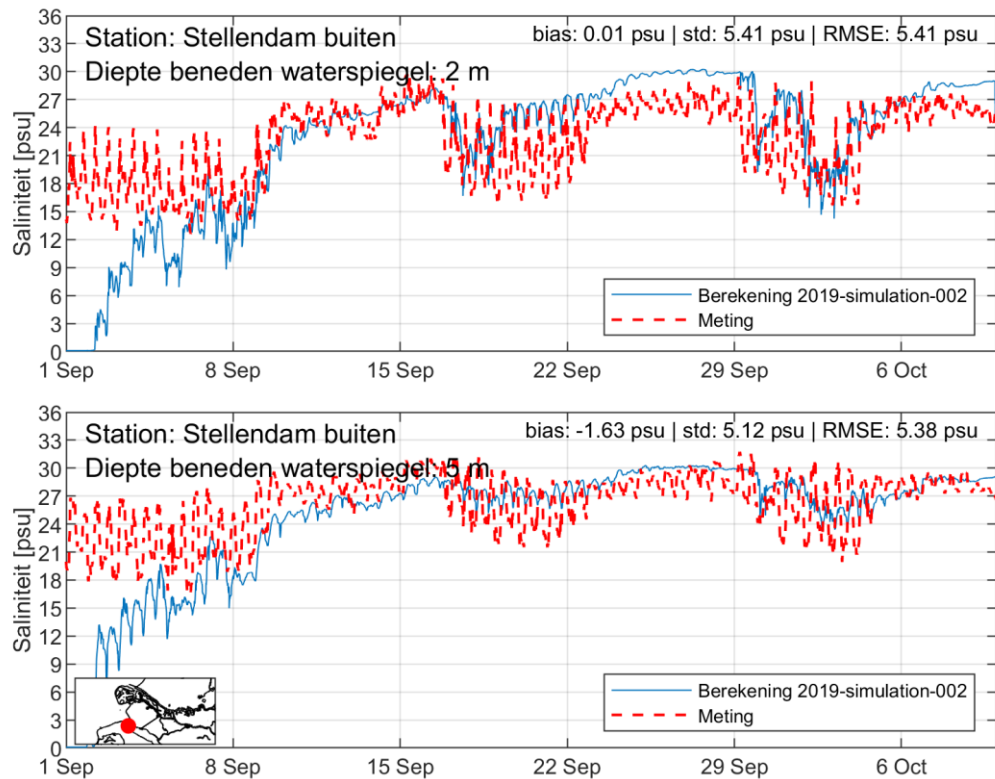
Locatie	Meting 14-10-2019	Berekening 14-10-2019	Meting 17-10-2019	Berekening 17-10-2019
Put A	12.3 miljoen kg	12.5 miljoen kg	2.9 miljoen kg	1.9 miljoen kg
Put C	41.0 miljoen kg	34.5 miljoen kg	40.0 miljoen kg	33.9 miljoen kg
Put D	45.8 miljoen kg	37.0 miljoen kg	46.5 miljoen kg	34.8 miljoen kg
Put F	79.0 miljoen kg	60.9 miljoen kg	73.0 miljoen kg	56.4 miljoen kg

4.1.3 Alternatieve, hybride, modeleeraanpak

Analyse van modelgedrag, en daarmee het vaststellen van de toepasbaarheid van het model, wordt bemoeilijkt door de grote rekentijden die een gevolg zijn de kleine laagdikte en daaruit volgend groot aantal rekenlagen. In de referentieberekening, paragraaf 4.1.2 is dat deels ondervangen door het inspelen van zout in de Voordelta en het zeedeel van het model over te slaan en middels de initiële conditie het zoutgehalte van het ingelaten water voor te schrijven.

Als alternatief daarvoor kan gedacht worden aan een hybride aanpak waarbij eerst een berekening wordt uitgevoerd met een beperkt aantal rekenlagen. Vervolgens worden resultaten van deze berekening gebruikt worden om met een uitsnede van het gehele model, met een open rand in het zeedeel van het model vlak voor de schuiven, een berekening voor het Haringvliet met de oorspronkelijke laagverdeling uit te voeren. Deze aanpak is te rechtvaardigen omdat de Voordelta en het zeedeel van het model aanmerkelijk minder gestratificeerd zijn dan de diepe putten in het Haringvliet wat betekent dat veel minder verticale resolutie noodzakelijk is. Noodzakelijke voorwaarde is wel dat het model met minder rekenlagen de zoutgehalten te Stellendam Buiten goed voorspelt, i.e. dat de dynamiek in de Voordelta/het zeedeel van het model, goed wordt weergegeven.

Figuur 4-8 toont de gemeten en de berekende saliniteit te Stellendam buiten. Deze berekening is uitgevoerd met een beperkt, 10, aantal rekenlagen. De initiële conditie is de initiële conditie zoals gebruikt in het oorspronkelijke RMM model (Veenstra, et al., 2022). De gesimuleerde periode is de beoogde inspeelperiode van het model waar het zout in de Voordelta en het zeedeel van het model betreft.



Figuur 4-8: Gemeten tegen berekende saliniteit Stellendam Buiten. Beperkt aantal rekenlagen.

Uit deze berekening volgt dat ongeveer 3 weken noodzakelijk is voor het inspelen van de Voordelta en het zeedeel van het model betreft. Daarna wordt de gemiddelde saliniteit, gemiddeld over een getijperiode, te Stellendam Buiten goed weergegeven. Dit suggereert dat de afvoer van gespuid Haringvliet water goed wordt weergegeven. Wel laat de meting een grotere variatie binnen 1 getijperiode zien dan de berekening wat mogelijk verklaard wordt door een zoutgradiënt loodrecht op het spuicomples die in werkelijkheid groter is dan in de berekening.

5 Samenvatting, conclusies, modeltoepasbaarheid en aanbevelingen

5.1 Samenvatting

In dit rapport wordt een berekening gepresenteerd voor de periode van 8 oktober 2019 tot 25 oktober 2019 met een D-HYDRO model van het Haringvliet en de Voordelta, het deel van het zeegebied voor de Haringvlietsluizen. Gedurende deze periode is kortdurend, rond 9 en 10 Oktober, zout zeewater ingelaten in het Haringvliet. Vervolgens is, in het kader van het “Lerend Implementeren” meetprogramma gemeten hoe dit binnengelaten zout zich gedraagt. Deze metingen zijn vergeleken met berekeningsresultaten.

5.2 Conclusies

Uit de uitgevoerde berekening volgt voor het Haringvliet dat:

- Kwalitatief de overeenstemming tussen gemeten en berekende zoutgehalten in het Haringvliet goed is. Kwantitatief is de overeenstemming redelijk.
- De hoeveelheid ingelaten zout is in werkelijkheid wat groter dan in de modelberekening. Grofstoffelijk wordt in werkelijkheid 15% meer zout ingelaten dan in de modelberekening. Opgemerkt wordt wel dat het zoutgehalte van het ingelaten water effectief, middels de gebruikte initiële conditie in de berekening, wordt voorgeschreven (gelijk aan het gemeten zoutgehalte te Stellendam Buiten).
- Zowel meting als berekening laten sterk gestratificeerde putten zien. Deze stratificatie blijft gedurende de gehele simulatieperiode in stand. In welke mate “nalevering”, de afbraak van stratificatie of het transport van zout van onderlaag naar bovenlaag, goed wordt weergegeven kon als gevolg van de beperkte simulatieduur niet worden vastgesteld. Aangezien de schematisatie van het Haringvliet identiek is aan de schematisatie in het D-HYDRO model van het Haringvliet, (Tiessen, et al., 2023), wordt verwacht dat dit, trage, proces ook goed wordt weergegeven.
- Voor het oppervlak geldt dat direct na het inlaten de berekening een kortdurende, beperkte, toename van zoutgehalte laat zien terwijl dat niet wordt waargenomen.
- Met uitzondering van Put A, de zoutvang, geldt voor de bodemlaag dat het zoutgehalte na het inlaten min of meer constant blijft, iets lager dan waargenomen. Put A wordt “leeggetrokken” door de zoutriolen en als gevolg daarvan neemt het zoutgehalte nabij de bodem af. De snelheid van afname in de meting lijkt vergelijkbaar met de snelheid van afname in de berekening waarmee de zoutriolen zich in werkelijkheid gedragen zoals in de berekening. Dit bevestigt de methodiek gebruikt om de afvoeren door de zoutriolen te bepalen zoals beschreven in (Bom, 2023).

De mate waarin de dynamiek in de Voordelta en het zeedeel van het model wordt weergegeven wordt voornamelijk, eigenlijk enkel en alleen, afgeleid uit de weergave van de gemeten zoutgehalten te Stellendam Buiten. Voor de referentieberekening geldt dat zowel meting als berekening laten zien dat tijden het spuien het zoutgehalte in de Voordelta afneemt totdat effectief zoet Haringvliet water resteert. Tijdens een vloedperiode volgend op een spuiperiode nemen zowel gemeten als berekend zoutgehalte toe. Echter, de toename in het gemeten zoutgehalte is groter dan de toename in het berekende zoutgehalte. De gemeten variatie in zoutgehalte is dus groter dan de berekende variatie.

De duur van de berekening is beperkt door de grote doorlooptijd van de berekening. Dit is een gevolg van de hoge verticale resolutie. Deze resolutie is noodzakelijk voor het in stand houden

van de sterke stratificatie in de diepe putten van het Haringvliet. Echter, voor de Voordelta en het zeedeel van het model is deze resolutie niet nodig omdat de stratificatie hier veel minder sterk is. Uit een berekening met veel minder verticale resolutie voor de periode van 1 september tot 10 Oktober 2019, de periode voorafgaand aan het inlaten van zout water en de beoogde inspeelperiode van de Voordelta/zeedeel van het model, volgt dat het gemiddelde door het model voorspelde zoutgehalte juist zeewaarts van de sluizen (meetlocatie Stellendam Buiten) goed in overeenstemming is met de meting. Wel is de waargenomen variatie van zoutgehalte binnen 1 getijperiode veel groter dan berekend.

De wat te kleine berekende variatie in zoutgehalte te Stellendam buiten betekent dat voor toekomstige kierscenario's de hoeveelheid zout die wordt ingelaten wat wordt onderschat in modelberekeningen.

5.3 Modeltoepasbaarheid

De modelontwikkeling voor D-HYDRO Haringvliet & Voordelta heeft tot doel om bij te dragen aan kennisontwikkeling voor vragen die spelen bij het Lerend Implementeren van het Kierbesluit. Als onderdeel van dit project, is een aantal leergebieden geselecteerd, waarvoor kennis verkregen moet worden (weergegeven in Tabel 5-1). De huidige modelopzet is getoetst aan de hand van de Naleverproef van 2019-2020. Op basis van de bevindingen is gekeken voor welke kennisvragen het model wel en niet kan worden ingezet (Tabel 5-2):

Tabel 5-1 Uitwerking van kennisvragen naar de verschillende fysische proces (gemaakt door Hydrologic voor het Expertteam Kier (22-4-2022)).

	PERIODE 1. HOGE RIVIERAFVOEREN EN ZOETE VOORDELTA	PERIODE 2. MIDDELHOGE RIVIERAFVOEREN	PERIODE 3. LAGE RIVIERAFVOEREN
	P1. Veilig maximale kierruimte realiseren bij hogere afvoeren.	P2. Veilig maximale kierruimte realiseren onder middelhoge rivierafvoeren. P2a. Het optimaal inzetten van visvriendelijk sluisbeheer. P2b. Beheersmaatregel groot doorspoelen effectief inzetten om in korte tijd extra zout van Haringvliet af te voeren, en/of extra zoete voordelta te creëren. P2-var2. Inzicht extra kierruimte (t.o.v. var1) door 'klein doorspoelen'	P3. Bepalen met welke maximale verziltingsgraad op het Haringvliet in deze situatie met geen / beperkte beheersmaatregelen binnen de grens Middelhamis-Spui wordt gebleven. P3-var2. Klein doorspoelen optimaal inzetten.
A. Spuien - stroomingspatronen op het Haringvliet	A1. Stuurbereik spuien diepe putten (beheersmaatregel)		A2. Stuurbereik spuien bovenlaag (beheersmaatregelV2)
B. Voordelta - dynamiek van de chloride-randvoorwaarde	B1. Voorspelbaarheid chloridesituatie voordelta (begrip risico's en kansen)		
C. Inlaten - zoutvracht en instroom Haringvliet		C. Gevoeligheidsstuurknop inlaten (beheersmaatregel)	
D. Wisselwerking inlaten en spuien op Haringvliet		D1. Haalbaarheid dynamisch evenwicht op Haringvliet (begrip risico's en kansen) D2. Optimaliseren visvriendelijk sluisbeheer (beheersmaatregel)	
		D3. Balans inlaten en spuien (beheersmaatregel)	
E. Nalevering - in relatie tot verziltingsgraad Haringvliet			E1. Gevoeligheidsnalevering voor factoren verziltingsgraad Haringvliet (begrip risico) E2. Kans op omstandigheden nalevering (begrip risico)
F. Bovenregionale effecten	F1. Effecten op Rijn-Maasmonding als gevolg van inlaten-spuien (begrip risico's)		
		F2. Effecten op Rijn-Maasmonding als gevolg van groot doorspoelen (begrip risico's)	
			F3. Effecten op Rijn-Maasmonding als gevolg van klein doorspoelen (begrip risico's V2)

Tabel 5-2 Samenvatting van de modeltoepasbaarheid van verschillende modelschematisaties van het Haringvliet voor de kennisvragen van het Expertteam.

	Haringvliet (2023) (Tiessen, et al., 2023)	Haringvliet + Voordelta (dit Rapport)	RMM 3D (2020) (Kaaij, et al., 2020)	Alternatieven
A. Spuien – stromingspatronen op het Haringvliet	Geschikt	Zie D-HYDRO Haringvliet (2023)	Waarsch. ongeschikt (niet onderzocht)	Beperkte mate (bij geen stratificatie): RMM 2D
B. Voordelta – dynamiek van de chloride randvoorwaarde	Ongeschikt	Geschiktheid beperkt vast kunnen stellen. Lijkt dat gemiddelde zoutgehalte wel redelijk wordt voorspeld maar variatie binnen getij minder.	Mogelijk geschikt (niet onderzocht)	Mogelijk: Vuistregel / Machine learning op basis van model en metingen
C. Inlaten – Zoutvracht en instroom Haringvliet	Ongeschikt	Beperkt geschikt (deels gestuurd middel initiële conditie zout in de Voordelta)	Waarsch. ongeschikt (niet onderzocht)	Mogelijk ten dele: Spuisluit formulering (SSF), nog in ontwikkeling.
D. Wisselwerking inlaten en spuien op het Haringvliet (kierscenario's)	Ongeschikt	Geschiktheid maar beperkt kunnen vaststellen. Mogelijk beperkt geschikt. Zoutgehalte ingelaten water wordt wellicht onderschat in kierscenario's	Waarsch. ongeschikt (niet onderzocht)	Geen
E. Nalevering in relatie tot verziltingsgraad Haringvliet	Geschikt	Zie D-HYDRO Haringvliet (2023)	Ongeschikt (niet onderzocht)	Mogelijk: Vuistregel / Machine learning op basis van model en metingen

5.4 Aanbevelingen

Ten opzichte van het bestaande D-HYDRO model van het Haringvliet, (Tiessen, et al., 2023) is de meerwaarde van het in dit rapport gepresenteerde model dat het ook de Voordelta en het zeedeel voor de Haringvlietsluizen bevat. Het inlaten van zout zeewater wordt dus door het model uitgerekend. Om dit inlaten nauwkeurig weer te geven moeten wel de dynamiek en de transportpatronen in de Voordelta nauwkeurig worden berekend. Vaststellen in welke mate het model dit goed weergeeft wordt bemoeilijkt door het geringe aantal metingen in de Voordelta. Effectief betreft het alleen het gemeten zoutgehalte te Stellendam Buiten. Aanbevolen wordt voor volgende campagnes in het kader van “Lerend Implementeren” op meerdere plaatsen in de Voordelta het zoutgehalte te meten middels zogenaamde varende metingen. In (Kranenburg, et al., 2024) wordt voorgesteld met name de zuidelijke geul (Goeree Overvlakkee), waardoor de Voordelta gedurende de vloedperiode gevuld wordt met zeewater, meerdere malen gedurende een getijperiode en voor meerdere condities van spuivolume en wind te bemonsteren. Daarnaast zou een vaste meetopstelling in deze geul het begrip van de zoutdynamiek in de Voordelta bevorderen.

De doorlooptijd van berekeningen met het model is extreem. Dit is een gevolg van de, voor het Haringvliet noodzakelijke, hoge verticale resolutie en daaruit volgende groot aantal rekenlagen. Voor de Voordelta en het zeedeel van het model kan met veel minder verticale resolutie worden volstaan. Voorgesteld wordt de functionaliteit van het D-HYDRO simulatiepakket uit te breiden met een ruimtelijk variërende verticale laagverdeling waarmee hoge verticale resolutie kan worden verkregen enkel daar waar het echt nodig is.

Aangezien implementatie van een ruimtelijk variërende laagverdeling niet op korte termijn gerealiseerd kan worden, kan overwogen worden een berekening voor de gehele periode, met een uniforme laagdikte van 0.125 m in het gehele modeldomein, extern uit te voeren bijvoorbeeld bij SURFSara of Amazon. Op dit moment wordt een pilot project uitgevoerd waarin wordt onderzocht of het technisch haalbaar is dit soort extreem zware berekeningen bij Amazon uit te voeren. Vooral nog lijkt het erop dat om bij Amazon meerdere cores te kunnen gebruiken software aanpassingen noodzakelijk zijn.

Als laatste wordt een hybride modelleeraanpak voorgesteld waar 1 berekening effectief uit twee afzonderlijke berekeningen bestaat. Eén berekening met het gehele model met een beperkt aantal rekenlagen gevolgd door een berekening met een Haringvliet en klein deel van de Voordelta uitsnede van het model. In deze laatste berekening wordt dan de voor het Haringvliet noodzakelijke laagdikte van 0.125 m gebruikt. Dit kan gezien worden als een in zichzelf genest model.

6 Literatuur

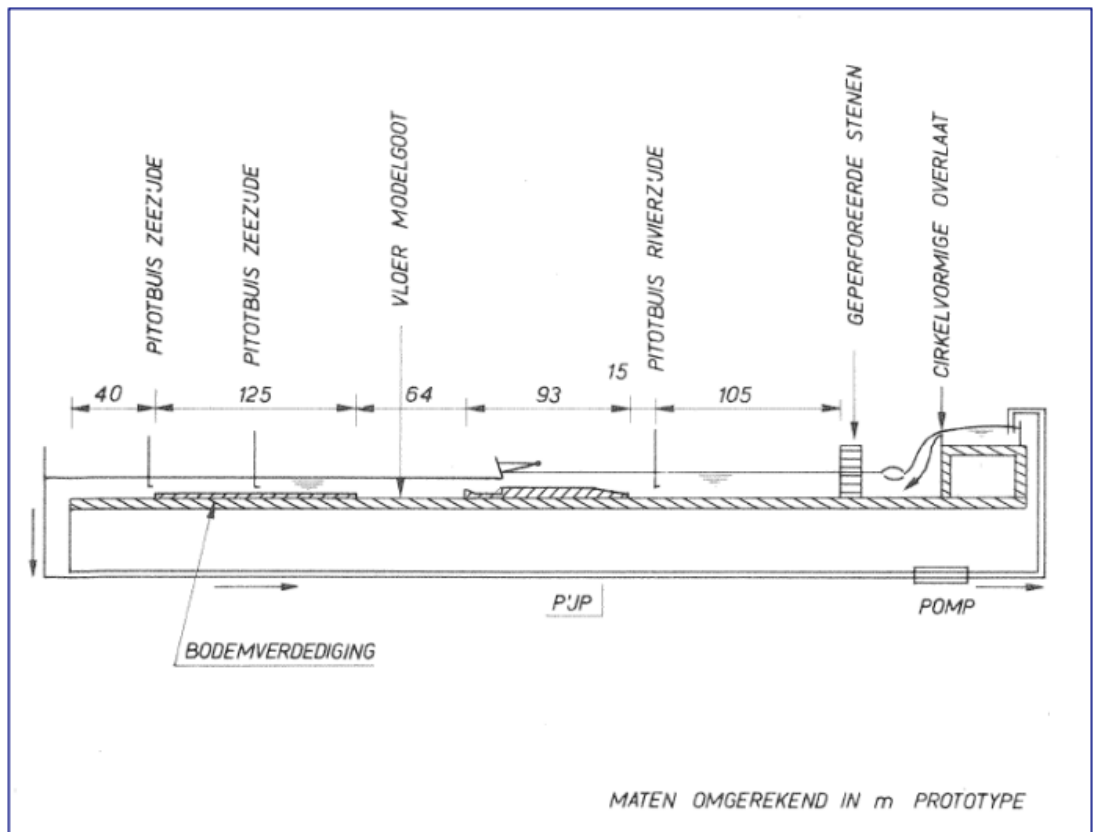
- Bol, R. 1995.** *Een snufje zout...! Verslag van de metingen naar zoutindringing via de Haringvlietsluizen in het kader van de Praktijkproef Visintrek.* sl : Rijkswaterstaat; Notanr. 94.051, 1995.
- Bom, S. 2023.** Tussentijdse resultaten 3D modellering Kier Haringvliet. Rotterdam : Svasek Hydraulics, 2023. presentation: 2122-U23001-A-SBom.
- Groenenboom, J. 2022.** Inventarisatie winddrag-relaties in zesde-generatie Rijkswaterstaatmodellen. Delft : Deltares, 2022. Memo: 11208054-009-ZKS-0002.
- Jacobs, P., Steenkamp, B.P.C. en Goederen, S. de. 2003.** *Van zoet naar zout in 5 dagen? Analyse zoutmetingen inlaatproef Haringvliet in maart 1997.* sl : Rijkswaterstaat; RIZA rapport 2003.001, 2003.
- Kaaij, Th. van der en Chavarrias, V. 2020.** *D-HYDRO RijnMaasMonding 3D; Zoutindringing in de Nieuwe Waterweg; Werkzaamheden 2020.* Delft : Deltares rapport 11205258-016-ZWS-0003. Versie 2.0. 21 December 2020, 2020.
- Kaaij, Th. van der. 2023.** *Zoutindringing door de Haringvlietsluizen : vergelijking SIMONA "barrier" formulering met D-Hydro "general structure" formulering voor Schuifbeperkte subkritische stroming.* Delft : Deltares, 2023.
- Kranenburg, W., Jaksic, L. en Leumens, L. 2024.** *Verkenning Dynamiek Voordelta Haringvliet.*; Delft : Deltares, 2024.
- Kranenburg, W.M. 2015.** *Evaluatie van het OSR-model voor zoutindringing in de Rijn-Maasmond (I); Onderdeel KPP B&O Waterkwaliteitsmodelschematisaties 2014.* Delft : Deltares, 2015.
- Rijkswaterstaat; Directie Waterhuishouding en Waterbeweging; District Zuidwest. 1979.** *Voorstudie afvoerbepaling Haringvlietsluizen; Notanummer 71.001.06.* sl : Rijkswaterstaat, 1979.
- Stone, K. 2021.** Overzicht naleverproef 2019/2020. Rotterdam : Rijkswaterstaat, 2021.
- Tiessen, M.C.H., et al. 2023.** *D-HYDRO Haringvliet : modelontwikkeling en toetsing ter ondersteuning van het Lerend Implementeren onderzoek voor het Kierbesluit.* Delft : Deltares, 2023.
- Veenstra, J., et al. 2022.** *Ontwikkeling zesde-generatie RijnMaasmond-model; Modelbouw, kalibratie en validatie 2D model.* Delft : Deltares, 2022.
- Waterloopkundig Laboratorium. 1970.** *Afvoerbepaling Haringvlietsluizen; Verslag Modelonderzoek.*; Delft : Waterloopkundig Laboratorium, 1970.
- Zijl, F., Laan, S. en Groenenboom, J. 2022.** *Development of a 3D model for the NW European Shelf (3D DCSM-FM).* Delft : Deltares, 2022.
- Zijlema, M., Bavelaar, A.E.R. en Robaczewska, K.B. 2001.** *Reproductie van de water- en zoutbeweging in het Haringvliet en het Rijn-Maasmond gebied met het Rijmamo (v4a) model; Periode 9 – 15 maart 1997.* Den Haag : Rijkswaterstaat Instituut voor Kust en Zee, 2001.
- Zijlker, T.D., Veenstra, J. en Wijk, R.M. van der. 2022.** *Aanvullende validatie RMM 2D; Validatieperiode 2018 en 2020.* Delft : Deltares, 2022. 11208053-004-ZWS-0020.

A Schatting afvoercoëfficiënt Haringvlietsluizen

A.1 Algemeen

De afvoercoëfficiënt van een hydraulische constructie is geen constante. De waarde ervan is afhankelijk van de doorstroomopening, de hydraulische condities ter plaatse van een constructie en de gebruikte formulering om het debiet te bepalen.

In (Waterloopkundig Laboratorium, 1970) worden gootmetingen, opgeschaald naar prototype schalen, gepresenteerd waarbij de afvoer door één van de sluisen van het complex is gemeten in combinatie met de hydraulische condities ter plaatse (het waterstandverhang over de kering). Deze metingen zijn uitgevoerd voor een groot aantal doorstroomopeningen en verhangen over de constructie. De meetopstelling wordt getoond in Figuur A-1.



Figuur A-1: Proefopstelling bepaling afvoercoëfficiënten Haringvlietsluizen (Waterloopkundig Laboratorium, 1970).

Deze gootexperimenten zijn nagerekend met de in de D-HYDRO software gebruikte “General structure” formulering. Iteratief is bepaald welke waarde van de afvoercoëfficiënt, gemiddeld over alle experimenten, de beste overeenstemming tussen gemeten en berekende afvoeren gaf.

De metingen betreffen enkel het spuien van Zoet Haringvliet water. Inlaten van zout water was in 1970 geen onderdeel van het reguliere beheer. Het spuien gebeurt door de zeeschuiten van het complex gedeeltelijk te heffen.

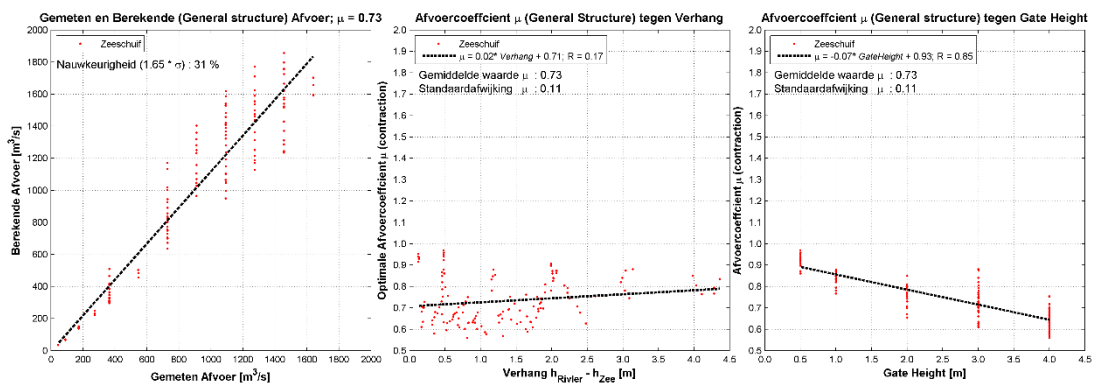
Naast spuien met de zeeschuif zijn ook experimenten uitgevoerd naar het spuien met de rivierschuif. Dit kan worden gezien als *inlaten* met *zeeschuif* zoals naar huidig inzicht ingelaten gaat worden. De rivierschuif experimenten zijn dan ook gebruikt om de afvoercoëfficiënt voor het inlaten te bepalen⁴. Effectief wordt in deze benadering volledig geometrische symmetrie van het complex en stroomop-/stroomafwaartse bodemligging verondersteld. Deze aanname is niet conform de werkelijkheid maar metingen van de afvoer door de sluisen ontbreken nu eenmaal.

A.2 Afvoercoëfficiënt Spuien

De gemeten en herberekende afvoeren worden getoond in Figuur A-2. Iteratief is bepaald dat met een *afvoercoëfficiënt* gelijk aan 0.73 de beste overeenstemming, gemiddeld over alle zeeschuifexperimenten, wordt verkregen.

De figuur laat zien dat allesbehalve een optimale terugvoorspelling van de gemeten afvoer kan worden verkregen. De nauwkeurigheid⁵ van de terugvoorspelde afvoer bedraagt niet meer dan 30 %.

Een eenduidige relatie tussen de *afvoercoëfficiënt* en het verhang over de spuisluis lijkt niet te bestaan. Wel is er een relatie tussen de hefhoogte en de *afvoercoëfficiënt*. Een betere terugvoorspelling van de gemeten afvoer kan dus verkregen worden door de *afvoercoëfficiënt* afhankelijk te maken van de hefhoogte van de spuisluis. Een relatief, ten opzichte van het gemiddelde, grote *afvoercoëfficiënt* bij kleine hefhoogten en een relatief kleine coëfficiënt bij grotere hefhoogten. Het D-HYDRO simulatiepakket ondersteunt momenteel nog geen hefhoogte afhankelijke *afvoercoëfficiënt*.



Figuur A-2: Herberekende en gemeten afvoeren gootexperimenten Haringvlietssluisen voor het spuien met de Haringvlietssluisen. Afvoercoëfficiënt 0.73 (linker figuur). Relatie afvoercoëfficiënt met verhang (middelste figuur) en relatie afvoercoëfficiënt met doorstroomoppervlak (rechter figuur).

A.3 Afvoercoëfficiënt Inlaten

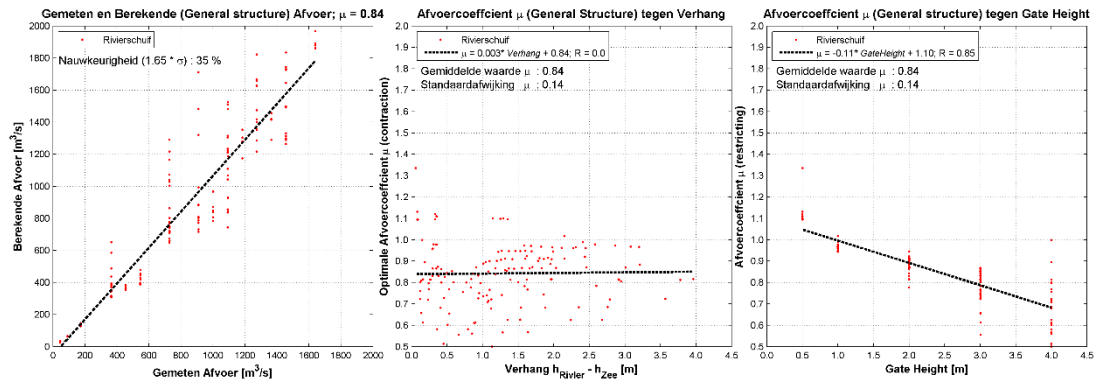
Voor het inlaten wordt een met *afvoercoëfficiënt* gelijk aan 0.84 de beste overeenstemming tussen de gemeten en berekende afvoer gevonden, zie Figuur A-3. Vergelijkbaar met het inlaten geldt dat:

- De nauwkeurigheid van de terugvoorspelde afvoer beperkt is (35%),
- Er geen eenduidige relatie tussen de *afvoercoëfficiënt* en het verhang is, en,

⁴ De aanname van symmetrie is niet juist. Zowel bodem, sluiscolk als schuiven zijn niet symmetrisch. Het is echter de enige meting van afvoer door de sluisen bij het inlaten met de zeeschuif enigszins, met beperkingen, beschrijft.

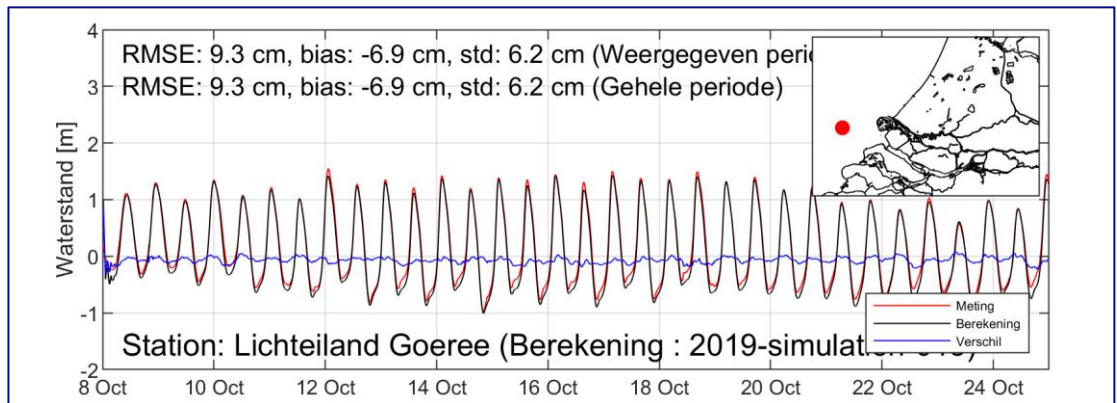
⁵ Nauwkeurigheid is, arbitrair, gedefinieerd als $1.65 \cdot$ standaardafwijking van de verhouding gemeten/berekende afvoer (in procenten).

- Er wel een eenduidige relatie tussen de afvoercoëfficiënt en de doorstroomhoogte bestaat.

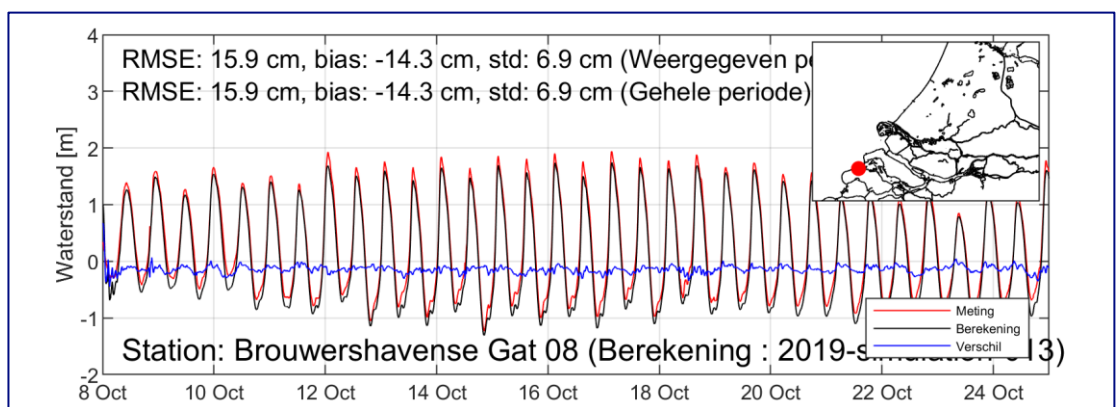


Figuur A-3: Herberekende en gemeten afvoeren gootexperimenten Haringvlietssluzen voor het spuien met de Haringvlietssluzen. Afvoercoëfficiënt 0.84 (linker figuur). Relatie afvoercoëfficiënt met verhang (middelste figuur) en relatie afvoercoëfficiënt met doorstroomoppervlak (rechter figuur).

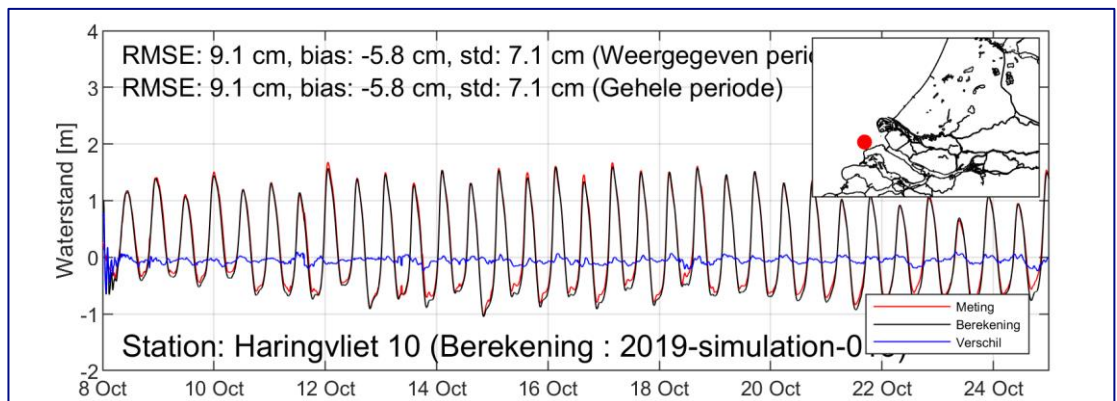
B Resultaten referentie berekening: Waterstanden



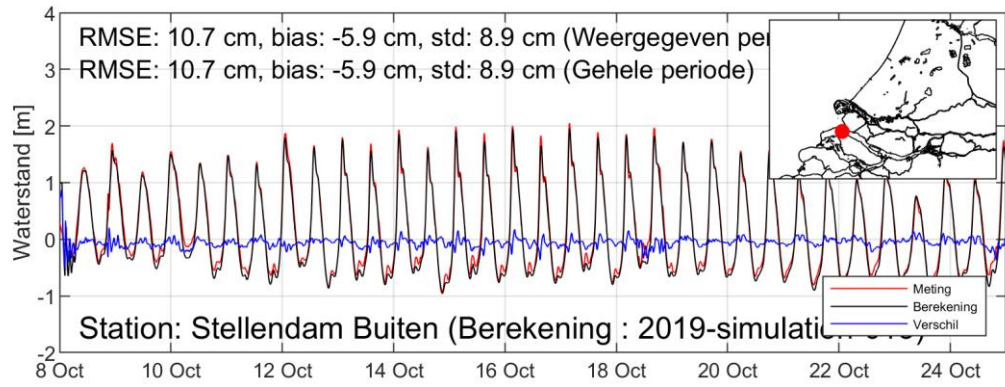
Figuur B-1: Waterstanden Referentieberekening; Lichteiland Goeree.



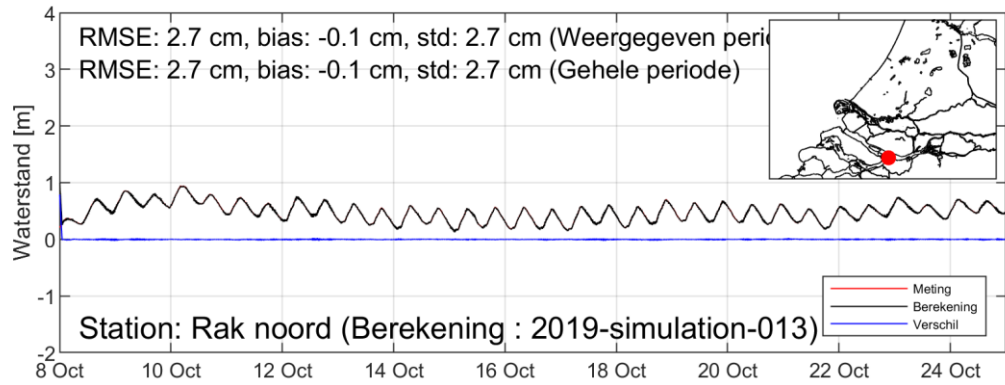
Figuur B-2: Waterstanden Referentieberekening; Brouwershavense Gat.



Figuur B-3: Waterstanden Referentieberekening; Haringvliet 10.

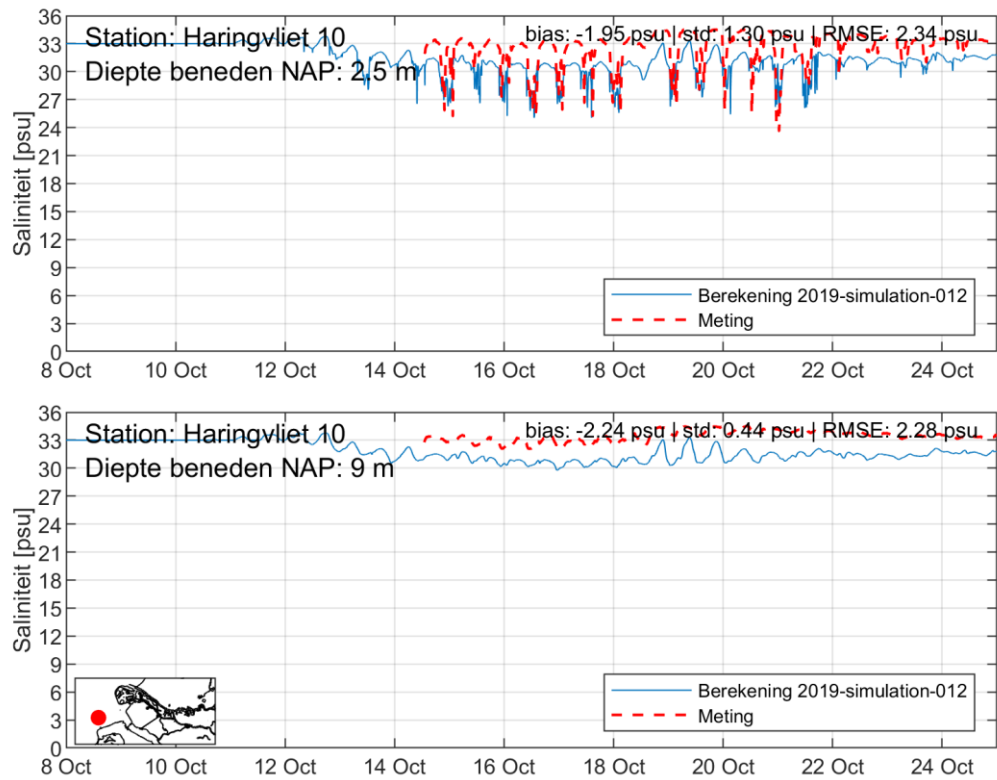


Figuur B-4: Waterstanden Referentieberekening; Stellendam Buiten.

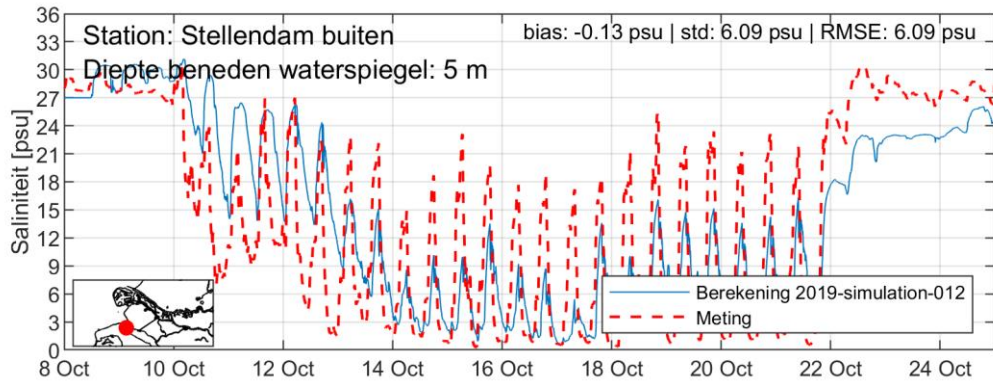
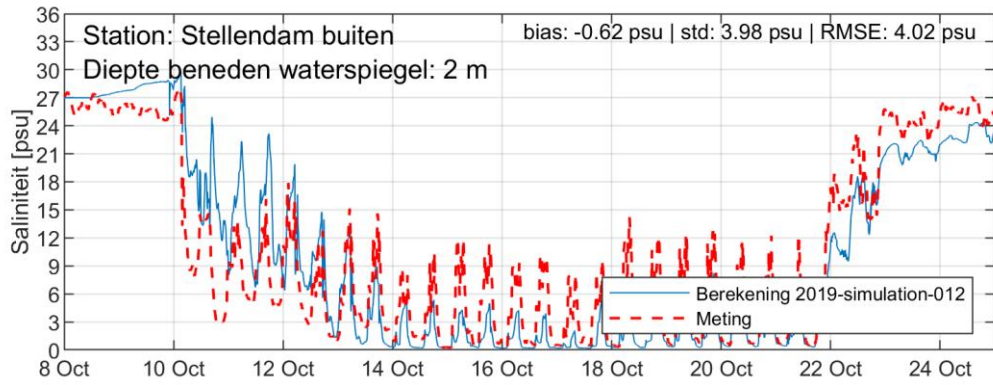


Figuur B-5: Waterstanden Referentieberekening; Rak Noord.

C Resultaten referentie berekening: Tijdreeksen saliniteit Voordelta/Zee



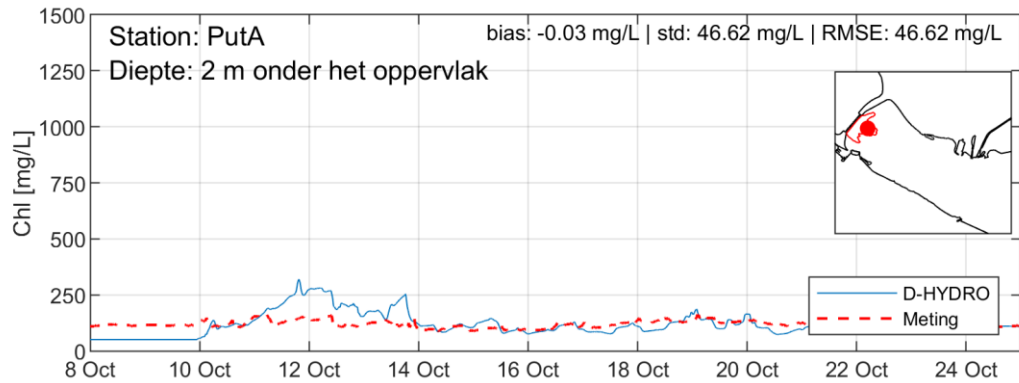
Figuur C-1: Gemeten en berekende saliniteit te HA10, 2.5 en 9 m beneden NAP.



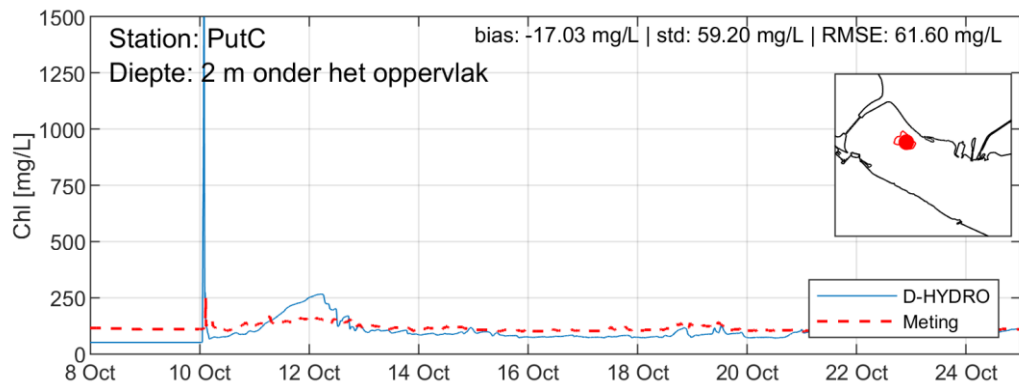
Figuur C-2: Gemeten en berekende saliniteit te Stellendam Buiten (Voordelta), 2.5 en 9 m beneden NAP.

D Resultaten referentie berekening: Tijdreeksen Chloride Diepe Putten Haringvliet

D.1 Oppervlak



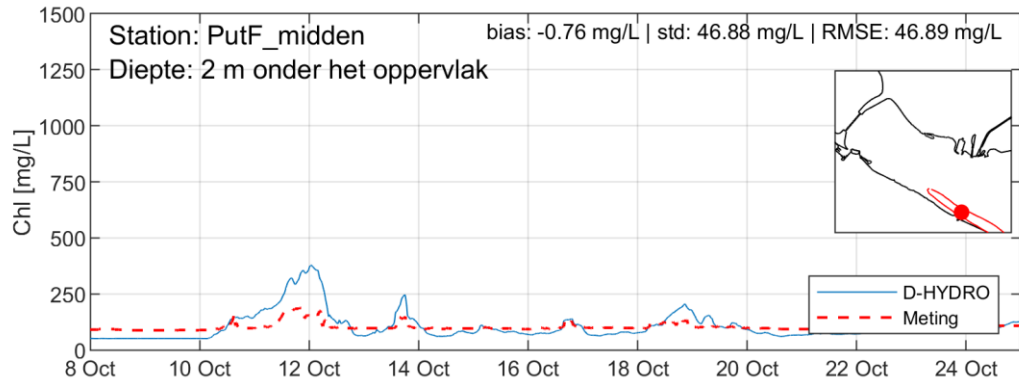
Figuur D-1: Gemeten en berekende chloride Put A; 2 m onder wateroppervlak.



Figuur D-2: Gemeten en berekende chloride Put C; 2 m onder wateroppervlak.

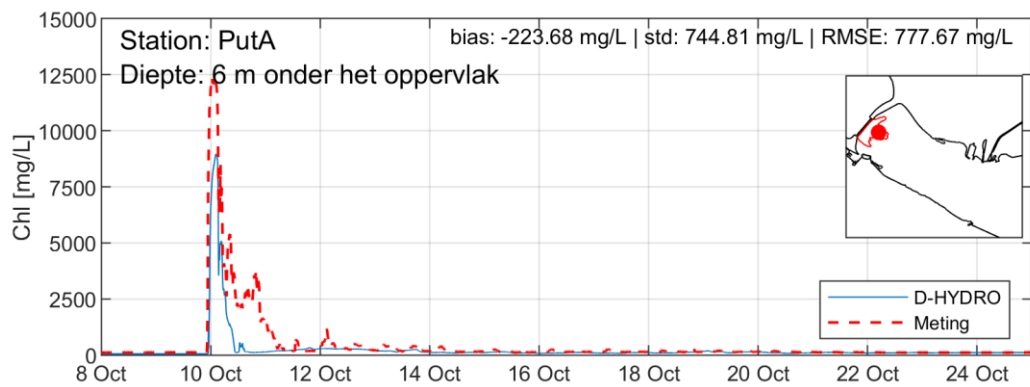


Figuur D-3: Gemeten en berekende chloride Put D; 2 m onder wateroppervlak.

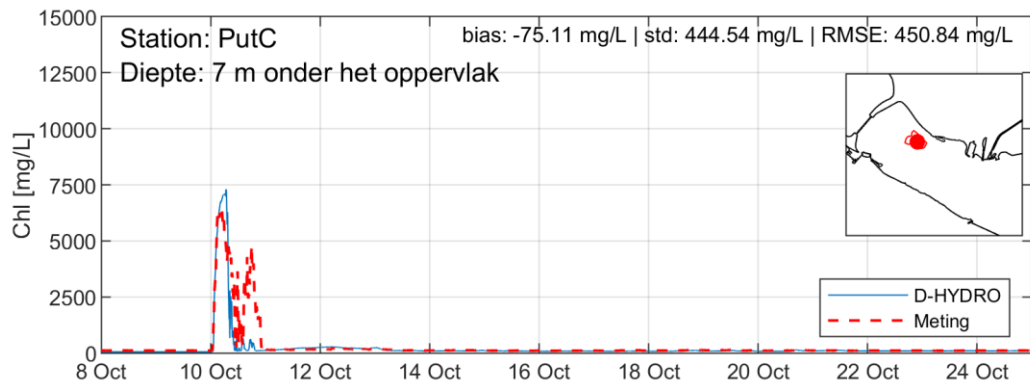


Figuur D-4: Gemeten en berekende chloride Put F; 2 m onder wateroppervlak.

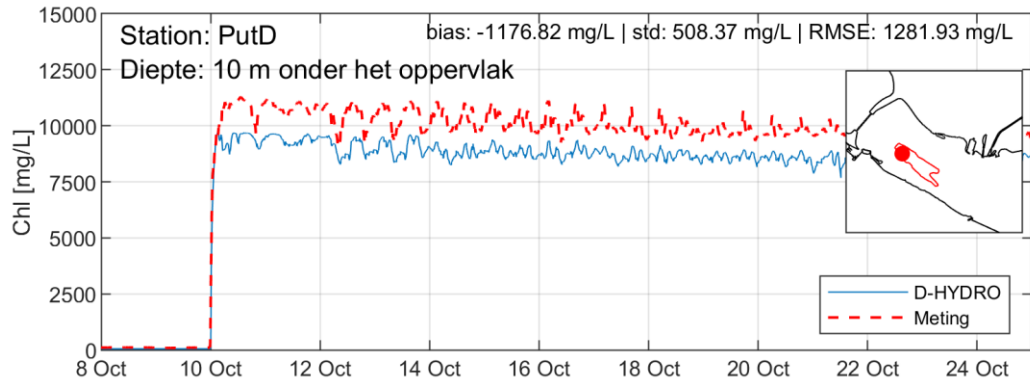
D.2 Rond Spronglaag



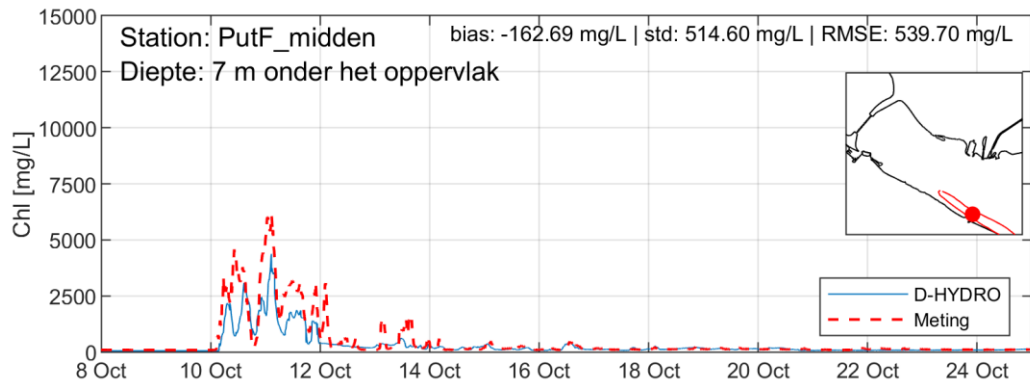
Figuur D-5: Gemeten en berekende chloride Put A; 6 m onder wateroppervlak.



Figuur D-6: Gemeten en berekende chloride Put C; 7 m onder wateroppervlak.

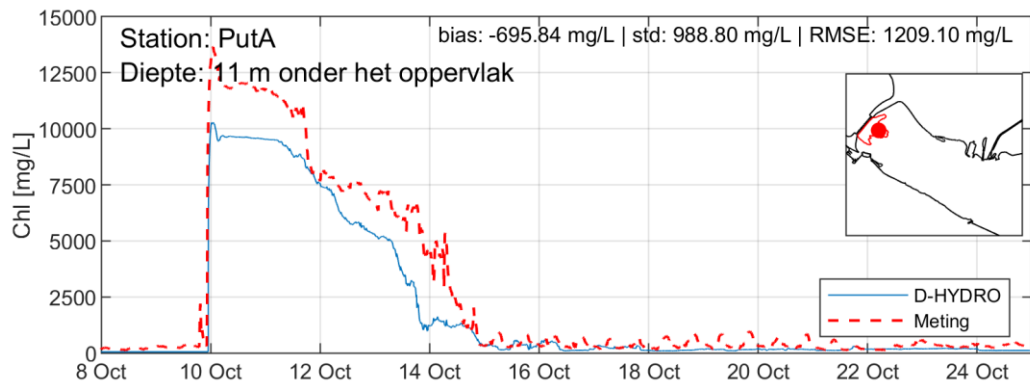


Figuur D-7: Gemeten en berekende chloride Put D; 10 m onder wateroppervlak.

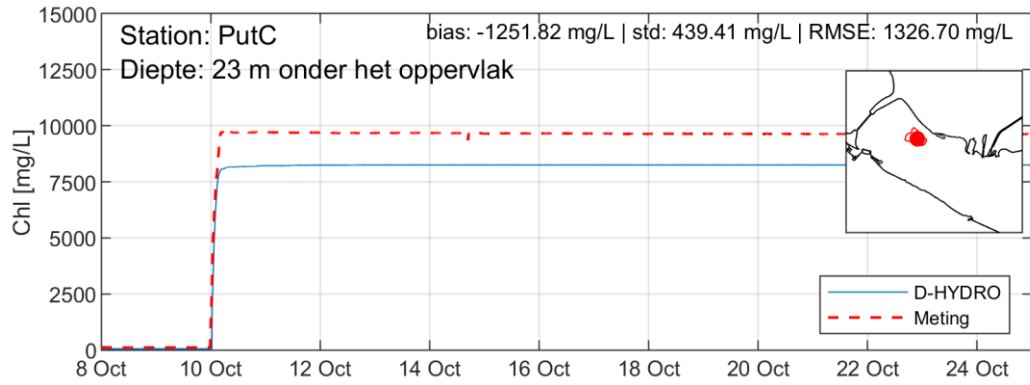


Figuur D-8: Gemeten en berekende chloride Put F; 7 m onder wateroppervlak.

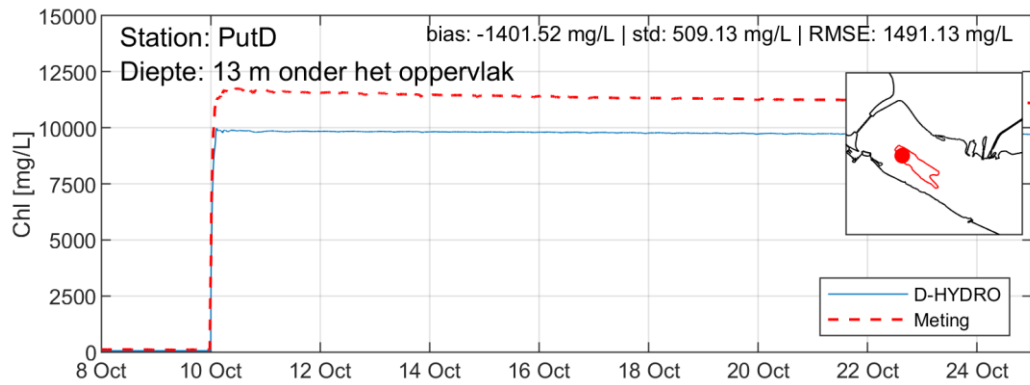
D.3 Bodem



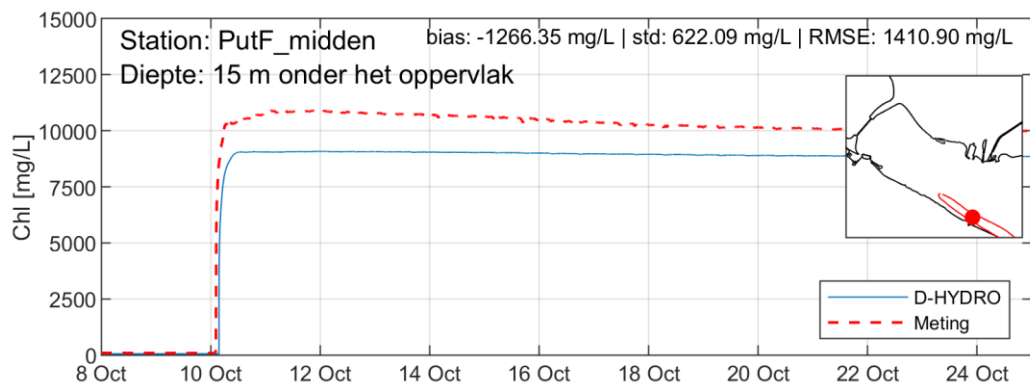
Figuur D-9: Gemeten en berekende chloride Put A; 11 m onder wateroppervlak.



Figuur D-10: Gemeten en berekende chloride Put C; 23 m onder wateroppervlak.



Figuur D-11: Gemeten en berekende chloride Put D; 13 m onder wateroppervlak.



Figuur D-12: Gemeten en berekende chloride Put F; 15 m onder wateroppervlak.

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