

D-HYDRO Haringvliet

Modelontwikkeling en toetsing ter ondersteuning van het Lerend Implementeren onderzoek voor het Kierbesluit.



D-HYDRO Haringvliet

Modelontwikkeling en toetsing ter ondersteuning van het Lerend Implementeren onderzoek voor het Kierbesluit.

Auteur(s)

Meinard Tiessen
Wouter Kranenburg
Theo van der Kaaij
Luuk van der Heijden

D-HYDRO Haringvliet

Modelontwikkeling en toetsing ter ondersteuning van het Lerend Implementeren onderzoek voor het Kierbesluit.

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer dr. Y.F. Friocourt
Referenties	
Trefwoorden	Haringvliet, Kier, Lerend Implementeren, D-HYDRO, 3D, verzilting, zoutindringing, menging, verspreiding, transport processen.

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	28-02-2023
Projectnummer	11208051-004
Document ID	11208051-004-ZKS-0002
Pagina's	123
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Meinard Tiessen	
	Wouter Kranenburg	
	Theo van der Kaaij	
	Luuk van der Heijden	

Samenvatting

Ter ondersteuning van het traject Lerend Implementeren behorend bij het Kierbesluit is een 3D hydrodynamisch model van het Haringvliet opgezet en getoetst. Dit model is opgezet met het doel ingezet te kunnen worden voor onderzoek ter beantwoording van kennisvragen op het gebied van:

- Het effect van spuien door de Haringvlietsluizen op ontzilting van een gedeeltelijk verzilt Haringvliet
- Nalevering van zout uit de verzilte diepe delen van het Haringvliet naar zoete delen van het Haringvliet onder andere als gevolg van wind.

Het 3D D-HYDRO Haringvlietmodel is gebaseerd op een uitsnede van het D-HYDRO Rijn-Maasmondingsmodel en het beschrijft het Haringvliet vanaf de Haringvlietsluizen tot aan de overgang naar het Hollandsch Diep. Het model maakt in de verticaal gebruik van z-lagen, met laagdikten verkleind tot 0.125 m. De randvoorwaarden op de Haringvlietsluizen, het Spui en het Hollandsch Diep zijn grotendeels gebaseerd op de jaarsommen van het SOBEK3 RMM model.

Om de kwaliteit van het model te toetsen en een oordeel te vormen over de model-inzetbaarheid is een simulatie gedaan van de Naleverproef van 2019-2020. In deze proef is getoetst onder welke afvoer- en windcondities de verzilte onderlaag in het Haringvliet wordt opgemengd (Nalevering) en wanneer het zout wordt afgevoerd naar zee (Zoetspoelen). Omdat inlaten van zout water tijdens Kieren nog niet goed met het huidige model kan worden gesimuleerd, is het model daarbij gebruikt met begincondities waarin zout water aanwezig is in de putten en geulen in het westelijke deel van het Haringvliet tot op -10m NAP. De modelresultaten voor zoutgehaltenes en stroomsnelheden zijn vergeleken met metingen. Op grond waarvan wordt geconcludeerd dat het model de dynamiek in het Haringvliet redelijk goed beschrijft. Zo wordt de ontzilting van de diepe putten kwalitatief goed en kwantitatief redelijk gereproduceerd. Ook zijn berekende en gemeten stroomsnelheden goed vergelijkbaar, zowel wat betreft sterkte als richting als variatie over de verticaal. Daarnaast wordt ook de variatie over de verticaal en horizontaal van zoutgehaltenes en stroomsnelheden als gevolg van onder andere wind en afvoer goed door het model gereproduceerd.

Aansluitend is een analyse uitgevoerd van het modelgedrag voor verschillende forceringen. Daaruit bleek dat de stroming tegen de windrichting in boven de diepe delen, zoals in eerdere data-analyses is waargenomen voor wind in langsricting van het Haringvliet, ook aanwezig is in de modelresultaten en leidt tot transport van zout tegen de windrichting in. Daarnaast laten de modelresultaten zien dat ook bij hoge afvoeren door de Haringvlietsluizen er slechts sprake is van een afschavend effect, en dat niet de gehele verzilte put in één keer wordt schoongespoeld. Dit sluit aan bij de waargenomen dynamiek. Tot slot laat het model zien dat Visvriendelijk sluisbeheer in potentie de ontzilting van het Haringvliet kan vertragen, hetgeen aansluit bij mogelijke te verwachten effecten. Als het inkomende zoute water zich verspreidt voorbij de zoutvang (put A), vormt het een tussenlaag bovenop de verzilte onderlaag, waardoor de onderlaag wordt afgeschermd van ontziltingsprocessen.

Op basis van de tijdens dit onderzoek uitgevoerde toetsing wordt geconcludeerd dat het model de processen Nalevering en Zoetspoelen kwalitatief goed en kwantitatief redelijk kan beschrijven.

Inhoud

Samenvatting		4
1	Inleiding	9
1.1	Achtergrond	9
1.1.1	Haringvliet	9
1.1.2	De Kier	10
1.1.3	Lerend Implementeren	10
1.2	Verziltingsdynamiek in het Haringvliet	11
1.3	Doel van project	13
1.4	Omschrijving naleverproef 2019 - 2020	13
1.5	Onderzoeksopzet	15
1.6	Leeswijzer	15
2	Modelopzet	16
2.1	Beoogde toepassingen van het model	16
2.2	Rooster	16
2.2.1	Methodiek roosteropbouw	16
2.2.2	Rekenrooster en domeingrenzen	17
2.3	Beschikbare meetdata	18
2.4	Omschrijving simulatieperiode	19
2.5	Randvoorwaarden	20
2.6	Initiële condities	21
2.7	Schematisatie kunstwerken	21
2.8	Numerieke instellingen	22
2.9	Gebruikte programmatuur en hardware	22
2.10	Beperkingen modelopzet	22
2.10.1	Dieptegemiddelde randvoorwaarden	23
2.10.2	Haringvlietcomplex eenvoudig gemodelleerd	24
2.10.3	Initiële zoutgehaltenes alleen onder -10m	24
2.10.4	Zoutgehalte bij bovenstroomse randvoorwaarden	24
2.10.5	Verticale laagverdeling nabij het wateroppervlakte	24
2.10.6	Betrouwbaarheidsgrenzen van het model	25
3	Toetsing	26
3.1	Waterstanden	26
3.2	Globaal beeld zoutgehalte	26
3.2.1	Vergelijking tussen gemeten en gemodelleerd zoutgehalte	26
3.2.2	Conclusies globaal beeld zoutgehalte	28
3.3	Zoutgehaltenes bij continue meetpunten	28
3.3.1	Zoutgehalte in de verzilte diepe delen	28

3.3.2	Zoutgehalte in de diepe delen van de zoutvang (put A)	29
3.3.3	Zoutgehalte nabij het oppervlakte	31
3.3.4	Zoutgehalte in het midden van de waterkolom	33
3.3.5	Conclusies zoutgehalte bij continue meetpunten	34
3.4	Zoutprofielen langs transecten door het Haringvliet	34
3.4.1	Vergelijking tussen gemeten en gemodelleerd transecten	34
3.4.2	Conclusies zoutgehalte langs transecten in het Haringvliet	36
3.5	Ontwikkeling zoutmassa	36
3.5.1	Vergelijking tussen gemeten en gemodelleerd zoutmassa	36
3.5.2	Conclusies ontwikkeling zoutmassa	38
3.6	Ontwikkeling spronglaag	38
3.6.1	Vergelijking van de spronglaaghoogte in de metingen en in de modelresultaten	38
3.6.2	Conclusies ontwikkeling spronglaag	39
3.7	Stroomsnelheden	39
3.7.1	Stroomsnelheden in put D	39
3.7.2	Stroomsnelheden in put F	41
3.7.3	Vergelijking van snelheidsprofielen voor spui- en windsituatie	42
3.8	Discussie ontwikkeling zoute onderlaag in put D en put F	44
3.9	Conclusies	45
3.10	Vervolg vragen	46
4	Analyse modelgedrag	47
4.1	Effect van wind	47
4.1.1	Bevindingen uit data-analyse	47
4.1.2	Verband wind-stroming in model	49
4.1.3	Ruimtelijke stromingspatronen	49
4.1.4	Van stroming naar zouttransport	51
4.1.5	Effect wind op verzilting in putten	53
4.1.6	Conclusies effect van wind	53
4.2	Effect afvoer door de Haringvlietsluizen	54
4.2.1	Periodes met grote spuidebieten	54
4.2.2	Kwantificering effect spuien Haringvlietsluizen op verzilting en zoutfluxen	55
4.2.3	Conclusies effect van afvoer door de Haringvlietsluizen	56
4.3	Effect van getij door het Spui	57
4.4	Effect van Visvriendelijk sluisbeheer	58
5	Beschouwing van de modeltoepasbaarheid	62
5.1	Zoetspoelen door middel van afvoer door de Haringvlietsluizen	62
5.2	Nalevering en het effect van wind	63
5.3	Kieren	63
5.4	Visvriendelijk sluisbeheer	64
5.5	Uitbreiding van de inzetbaarheid van het model	64
6	Samenvatting, conclusies en aanbevelingen	67
6.1	Samenvatting	67

6.2	Conclusies	68
6.2.1	Vergelijking met metingen	68
6.2.2	Analyse modelgedrag	68
6.3	Aanbevelingen	69
6.3.1	Aanbevelingen voor de experimenten, de meetcampagne en de analyse van de data	69
6.3.2	Aanbevelingen voor verdere analyse	70
6.3.3	Aanbevelingen voor de modelschematisatie en simulatie	70
6.3.4	Aanbevelingen voor uitbreiding van de modeltoepasbaarheid	71
7	Referenties	72
A	Karakteristieken van het Haringvlietsluizencomplex	73
A.1	Kentallen	73
A.2	Ligging van de verschillende elementen van het Haringvlietcomplex	74
A.3	Dwarsdoorsnede van de spuisluis	74
B	Toetsing - Aanvullende figuren	75
B.1	Waterstanden	75
B.2	Globaal beeld zoutgehalte	75
B.2.1	Vergelijking tussen gemeten en gemodelleerd zoutgehalte	75
B.3	Zoutgehalte continue metingen	75
B.3.1	Zoutgehalte in de verzilte diepe delen	75
B.3.2	Zoutgehalte in de diepe delen van de zoutvang (put A)	75
B.3.3	Zoutgehalte nabij het oppervlakte	76
B.3.4	Zoutgehalte in het midden van de waterkolom	77
B.4	Zoutgehalte langs transects door het Haringvliet	78
B.5	Ontwikkeling spronglaag	80
B.6	Ontwikkeling zoutmassa	80
B.7	Stroomsnelheden	80
C	Analyse modelgedrag - aanvullende figuren	81
C.1	Effect van wind	81
C.2	Effect van afvoer door de Haringvlietsluizen	81
C.2.1	Periodes met grote spuidebieten	81
C.2.2	Periodes waarin kleinschalig wordt gespuid	81
C.2.3	Kwantificering effect van afvoer door de Haringvlietsluizen	81
C.3	Effect van getij door het Spui	85
C.4	Effect van visvriendelijk sluisbeheer	90
D	Zoutfluxen tussen deelgebieden Haringvliet	91
D.1	Zoutfluxen voor perioden met grote afvoer	93
D.2	Zoutfluxen voor periode met kleine afvoer	94
E	Bevindingen uit voorafgaande projecten	96

E.1	Modelontwikkeling Kier op basis van een uitbreiding van het OSR-NSC model (presentatie, 29-11-2017)	96
E.2	Modelontwikkeling Kier op basis van uitsnede zede generatie D-HYDRO RMM 3D model (presentatie, 20-12-2020)	109
F	Opgeleverde animaties	122

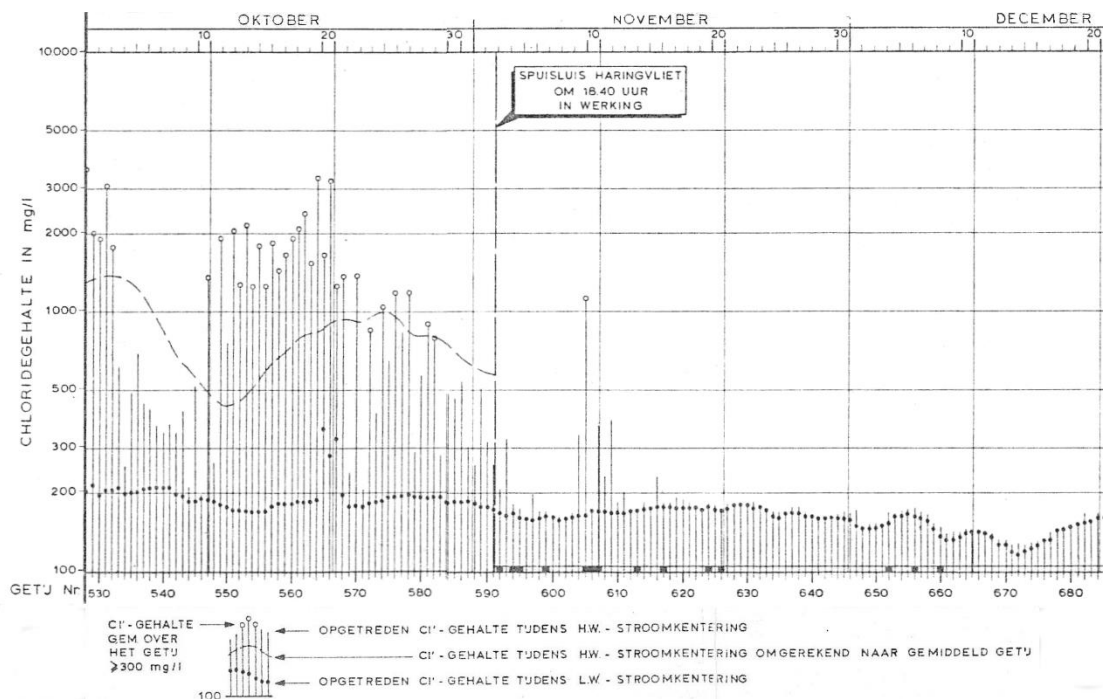
1 Inleiding

1.1 Achtergrond

1.1.1 Haringvliet

Het Haringvliet vormt de zuidelijke tak van de Rijn-Maasmonding. De noordelijke tak is de Nieuwe Waterweg, die via verschillende noord-zuid verbindingen (het Spui en de Dordtsche Kil) in verbinding staat met het Haringvliet. Vroeger vormden beide takken een open verbinding naar zee, waarbij de balans tussen afvoer en getij de mate van zoutindringing bepaalde. Al deze wateren vormen onderdeel van het hoofwatersysteem van Nederland en worden beheerd door Rijkswaterstaat.

In 1970 is het Haringvliet afgesloten met de Haringvlietsluizen. Deze sluizen zijn bedoeld om bij eb de uitstroom naar zee te controleren, terwijl de sluizen bij vloed zijn gesloten. Door de uitstroom uit het Haringvliet te controleren, kan de uitstroom via de Nieuwe Waterweg ook worden gestuurd. Hierdoor is de gehele waterhuishouding in het gebied veranderd en is de zoutindringing via de noordelijke tak aanzienlijk beperkt (Figuur 1.1), waardoor de zoetwatervoorziening naar grote delen van westelijk Nederland wordt gefaciliteerd.



Figuur 1.1 Effect van ingebruikname van de Haringvlietsluizen (november 1970) op het zoutgehalte in de Nieuwe Maas ter hoogte van de Brienoordbrug (Rijkswaterstaat, 1972).

Voor de bouw van de Haringvlietsluizen en de Volkerakdam was het Haringvliet een estuarium met een open verbinding naar zee en onderhevig aan de invloed van getij en zoutindringing. Het gebied bestond uit getijdegeulen en platen die na de bouw van deze kunstwerken onderdeel bleven van het systeem. Na de bouw van de Haringvlietsluizen veranderde het in een zwak-dynamisch zoetwater systeem en werd dit zoetwaterreservoir betrokken in de lokale waterhuishouding. Door de bouw van de Haringvlietsluizen was echter ook een migratieroute voor vissen afgesloten. Met de bouw van de Deltawerken en de Afsluitdijk liep de enige open verbinding van de Rijn naar zee door de haven van Rotterdam.

De verdwijning van de vismigratiemogelijkheden en de afname van de ecologische waarde van het gebied vormen sinds de jaren '80 aanleiding voor discussie over de mogelijkheden voor ecologisch herstel. In de decennia daarna is onderzoek gedaan naar mogelijkheden om de Haringvlietsluizen geheel of gedeeltelijk open te stellen. Uiteindelijk is in 2018 het Kierbesluit in werking getreden.

1.1.2 De Kier

Het Kierbesluit heeft tot doel om vismigratie te bevorderen. Door bij vloed de Haringvlietsluizen beperkt open te zetten (de Kier) wordt het voor meer vissen mogelijk om te migreren tussen het Haringvliet en de Noordzee. Een gevolg van deze vloedopening is dat zout water vanuit zee ook het Haringvliet binnendringt. Het is wenselijk om de mate van zoutindringing en de verspreiding van verzilt water te beheersen, zodat de zoetwaterfunctie van het Haringvliet niet in gevaar komt. Een deel van het Haringvliet is daarom aangewezen als zone waar zoutindringing mag plaatsvinden. Daarnaast zijn de innamepunten naar het oosten toe verplaatst zodat deze zich in de zoete zone bevinden (Figuur 1.2).

Om kennis op te doen over de beheersbaarheid van de zoutindringing worden sinds 2018 experimenten uitgevoerd om de zoet-zout dynamiek van het systeem beter te begrijpen.



Figuur 1.2 Ontwerp van de mitigerende maatregelen voor de Kier. De zone waar zoutindringing mag plaatsvinden is rood gearceerd. De oostelijke grens tot waar verzilting is toegestaan, is de lijn Middelharnis-Spui (oranje gestippelde lijn). De pijlen geven innamepunten weer, waarbij de innamepunten in de verzilte zone (in licht blauw en oranje) zijn verplaatst naar de pijlen ten oosten van deze zone (in donkerblauw) (Projectplan Waterwet (2016)).

1.1.3 Lerend Implementeren

De periode waarin kennis wordt opgedaan van de beheersing van de zoutindringing in het Haringvliet heet de Lerend Implementeren fase. Het einddoel van dit traject is om tot een sturingsprotocol te komen voor de bediening van de Haringvlietsluizen, waarbij vismigratie wordt gefaciliteerd en de zoutverspreiding in het Haringvliet wordt beheerst.

Het Lerend Implementeren traject is een meerjarig traject waarbij door middel van een combinatie van veldexperimenten, dataverzameling en -analyse en de inzet van een numeriek model kennis wordt opgebouwd. Daarbij wordt aandacht besteed aan de kennisbasis van zowel vismigratie als verzilting. De experimenten lopen sinds 2018 en worden met name in de winter uitgevoerd vanwege de relatief hoge afvoer en omdat in deze

periode de watervraag van de omliggende gebieden beperkt is. De ontwikkeling van een numeriek D-HYDRO model van het Haringvliet ten behoeve van het Lerend Implementeren is gestart in 2019. De beschrijving en toetsing van het dit model zijn het onderwerp van dit rapport.

1.2 Verziltingsdynamiek in het Haringvliet

Tijdens het Lerend Implementeren worden verschillende situaties en mogelijkheden voor beheer van het Haringvliet onderzocht. In de volgende alinea's worden de verschillende beheeropties kort omschreven, samen met de processen die daarbij een rol spelen

Kieren

Onder 'Kieren' wordt het beheer van de Haringvlietsluizen verstaan waarbij de sluisen niet alleen bij eb (uitstroom) open staan, maar ook bij vloed (instroom) gedeeltelijke worden geopend, waardoor de mogelijkheden voor vismigratie worden vergroot. De opening bij vloed (instroom) is relatief klein ten opzichte van de opening bij eb (uitstroom) om de mate van verzilting beperkt te houden.

Als bij vloed de deuren zijn geopend, stroomt zout water door de Haringvlietsluizen het Haringvliet in. Dit zoute water verplaatst zich dan door de grotere dichtheid naar de bodem. Doordat de rest van het Haringvliet zoet is, ontstaat er een twee-lagensysteem: een verzilte onderlaag met een zoete bovenlaag. Doordat het Haringvliet een voormalig getijdegebied is, is er sprake van diepe geulen met daartussen minder diepe drempels. Het zoute water komt eerst terecht in de diepe delen nabij de Haringvlietsluizen, en als deze vol zitten verspreidt dit zoute water zich van west naar oost over de bodem. Daarbij vult het iedere geul en put tot de hoogte van de drempels voordat het in een oostelijker gelegen geul terechtkomt.

Als bij eb wordt gespuid, wordt met name water op de diepte van de sluisopening (vanaf de drempel op -5.5m NAP tot de hefhoogte, of – bij volledige opening - het waterniveau) gespuid, waardoor vooral water uit de zoete bovenlaag wordt weggespoeld. De zoute onderlaag wordt hierbij slechts in geringe mate beïnvloed door entrainment van water uit de onderlaag in de sneller stromende bovenlaag. Alleen bij grotere spuidebieten wordt ook het water uit de onderlaag direct meegevoerd, waardoor alleen bij bovengemiddelde Rijnafvoer de diepe delen in korte tijd zoetgespoeld kunnen worden. In de Kier-experimenten is tot nu toe gezocht naar een dynamisch evenwicht tussen de inkomende en uitgaande zoutvracht zodat er sprake is van een semi-stabiele zoutmassa in het Haringvliet (communicatie WNZ, dit wordt in lopende experimenten verder onderzocht).

Het kieren moet vismigratie bevorderen zonder problemen te veroorzaken voor de zoetwatervoorziening. De zoetwatervoorzieningsfunctie die het Haringvliet sinds 1970 heeft, is daarom verschoven naar het oosten van het bekken. Om de zoetwatervoorziening niet in gevaar te brengen, mag de verzilting niet verder komen dan de lijn Middelharnis – Spui (Figuur 1.2). Daarom moet in de nieuwe bedieninstructie behalve met de afvoer bij Lobith, ook rekening worden gehouden met de vismigratiemogelijkheden en de risico's op verzilting en de beheersbaarheid daarvan. Omdat de innamepunten zich vooral nabij het wateroppervlakte bevinden, is daarbij in het bijzonder van belang dat de bovenlaag niet verzilt raakt.

Spuien en zoetspoelen

Als de afvoer afneemt¹, wordt geen zout water meer ingelaten, maar wordt nog wel tijdens eb naar zee gespuid. In deze periode waarin alleen wordt gespuid, is sprake van het verzoeten van het Haringvliet doordat er geleidelijk zout naar zee terug wordt afgevoerd.

Zoals gezegd, is uit onderzoek tijdens het Lerend Implementeren gebleken dat het Haringvliet pas grotendeels ontzilt raakt als er sprake is van een zeer hoge afvoerpiek². Maar spuien is, ook bij gering debiet, effectief in het zoetspoelen van de bovenlaag. Hierdoor kan, als er sprake is van opmenging vanuit de verzilte onderlaag waardoor de bovenlaag boven de grens van 150mg/l dreigt uit te komen, de bovenlaag met relatief lage spuidebieten zoet gehouden worden. De effectiviteit waarmee de bovenlaag kan worden zoetgespoeld wordt nog verder onderzocht.

Nalevering

Als de Haringvlietsluizen na inlaten van zout water en een periode van spuien voor langere tijd continue gesloten moeten worden vanwege lage rivierafvoeren, kan het zo zijn dat er nog wel zout water in het Haringvliet aanwezig is. In deze periode kan opmenging als gevolg van wind en diffusie van de zoute onderlaag er toe leiden dat de tot dan toe zoete bovenlaag verzilt raakt. Veelal is dit met relatief lage zoutgehalten, en is er sprake van een geleidelijk proces waarbij iedere windpiek weer tot een kleine verhoging leidt.

Windgedreven stroming kan significant bijdragen aan de verspreiding van zout water. Stroomsnelheidsmetingen in de diepe delen van het Haringvliet hebben laten zien dat er bij wind in de lengterichting van het meer in de geulen een stroming optreedt tegen de wind in (Kranenburg, 2020). De interpretatie is dat over de platen en ondieptes water met de wind mee wordt getransporteerd en in de geulen juist een retourstroming tegen de wind in ontstaat. Deze retourstroming leidt er bij verzilte putten toe dat zout dat wordt opgemengd zich tegen de windrichting in kan verplaatsen (Kranenburg et al., 2023), zoals in de kier-experimenten ook daadwerkelijk is waargenomen bij oostenwind (Fioole, 2020).

Het risico op nalevering en de mogelijkheden om zoet te spoelen waren de processen die de focus vormden van de eerste proeven bij het Lerend Implementeren. Deze processen zijn cruciaal om zoutverspreiding voorbij de lijn Middelharnis-Spui te voorkomen. De modelontwikkeling zoals die in dit rapport staat beschreven, heeft als primaire focus deze processen te beschrijven.

Visvriendelijk sluisbeheer

In periodes waarbij de afvoer te laag is om de Haringvlietsluizen bij elke vloed gedurende de hele vloed te openen (omdat er anders te veel zout water het systeem inkomt), wordt Visvriendelijk sluisbeheer toegepast. Door de Haringvlietsluizen een deel van de vloedperiode zeer beperkt te openen, wordt vismigratie mogelijk gemaakt zonder dat de zoutindringing veel toeneemt. Door tijdens deze periodes ook de kering te openen bij vloed, kan de vismigratie worden bevorderd onder een groter aantal condities dan onder Kieren alleen. Het risico op een toename van verzilting in het bovenstroomse deel van het Haringvliet wordt in deze situatie beheerd, door de hoeveelheid in te laten zout water af te laten hangen van de mate waarmee in de volgende ebfase het zoute water weer kan worden gespuid en zoutindringing te beperken tot alleen de zoutvang (put A).

¹ Tot een minimale afvoer van 1100m³/s bij Lobith. Dit is daarnaast afhankelijk van het seizoen en de windcondities.

² Bij een afvoer van meer dan 3500m³/s bij Lobith, waarbij het soms nodig blijkt dat dit gedurende meerdere opeenvolgende ebfases optreedt.

Haringvlietcomplex

Het Haringvlietcomplex is een groot civiel technisch kunstwerk, waar verschillende bronnen van verzilting en mogelijkheden tot ontzilting samenkomen. Zie Bijlage A voor een overzicht van de dimensies van de verschillende onderdelen:

- Spuisluizen: De spuisluizen bestaan uit 17 openingen die vroeger alleen bij eb werden geopend om zoet water naar zee te spuien, en nu ook bij vloed worden geopend ten behoeve van vismigratie.
- Zoutriolen: Een vijftal duikers maakt het mogelijk om verzilt water uit de diepe delen van de zoutvang (put A) naar zee te spuien bij eb. De opening van deze riolen is variabel, afhankelijk van het getij (bij vloed zijn ze gesloten) en de mate van verzilting. Deze zoutriolen zijn erg effectief in het iedere getijperiode weer zoet krijgen van de zoutvang bij Visvriendelijk sluisbeheer.
- Visriolen: Er zijn zes visriolen (ook wel visluizen genoemd) in het Haringvliet complex opgenomen. Dit zijn kokers door een zestal pijlers tussen de spuisluizen. Deze liggen onder het wateroppervlakte en kunnen aan twee zijden worden geopend. Ze werken daarmee als schutsluizen voor vissen en hierdoor wordt ook een beperkte hoeveelheid zout water het Haringvliet ingelaten.
- Schutsluis: Aan de zuidzijde van de spuisluizen bevindt zich een scheepvaartsluis, de Goereese sluis. Als gevolg van schuttingen wordt zout water naar het Haringvliet getransporteerd (en zoet water naar zee).

1.3 Doel van project

Dit project heeft tot doel om het huidige D-HYDRO model van het Haringvliet (haringvliet-dflowfm3d-v2023, met de domeingrens op de Haringvlietsluizen) zoals dat is ontwikkeld in de afgelopen jaren te beschrijven en in kaart te brengen in hoeverre het huidige model geschikt is voor toepassing binnen de Lerend Implementeren fase van de Kier.

Specifiek is daarbij het doel het toetsen van de geschiktheid van het D-HYDRO Haringvlietmodel voor het simuleren van Zoetspoelen en Nalevering³. Dit zal gebeuren aan de hand van een vergelijking tussen gemodelleerde en gemeten parameters voor de naleverproef van 2019-2020.

Onderzoeksvragen die daarbij aan bod komen zijn:

- 1) Hoe goed beschrijft het model naleveren en zoetspoelen, zoals deze zijn opgetreden tijdens de naleverproef? Daarbij worden de modelresultaten vergeleken met metingen en wordt specifiek aandacht besteed aan de beschrijving van:
 - Zoutgehaltenes
 - Stroomsnelheden
- 2) Begrijpen we het modelgedrag?
 - Bij veranderingen in wind, afvoer en Visvriendelijk sluisbeheer.
 - Hoe dit doorwerkt op stroming en zout.
- 3) Wat betekenen deze zaken voor de toepassingsmogelijkheden van het model?

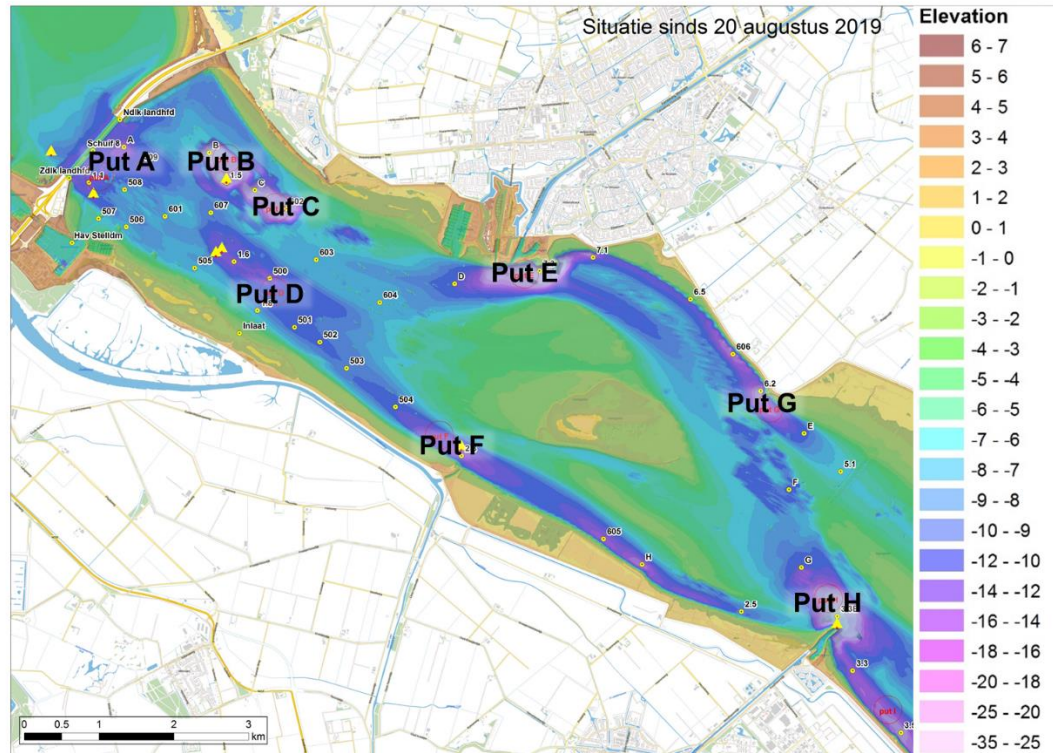
1.4 Omschrijving naleverproef 2019 - 2020

De Kierproef NL2019_1 beschrijft een experiment waarin nalevering van verzilting in het Haringvliet centraal staat. Daarnaast bevat het experiment ook fasen die meer gekenmerkt worden door zoetspoelen. De beschrijving van de proef hieronder is gebaseerd op het data-analyse verslag van Rijkswaterstaat (2020).

³ Het inlaten van zout water door de Haringvlietsluizen wordt door het huidige model nog niet beschreven. Daardoor wordt dit model op dit moment ook nog niet getoetst voor geschiktheid van het simuleren van het Kieren zelf.

De proef begint met het verzilten van de voordelta door bewust minder te spuien via de Haringvlietsluizen (4-9 oktober 2019). Dit is gedaan om bij het inlaten (9-10 oktober 2019) een zo zout mogelijke onderlaag te creëren. Er is slechts één vloed-fase ingelaten, waarbij in putten A, B, C, D en F een verzilte onderlaag ontstaat (Figuur 1.3 en Tabel 1.1 geven een overzicht van de locaties en karakteristieke van de putten). Aansluitend is 11 dagen beperkt gespuid om de bovenlaag zoet te spoelen (10-21 oktober 2019). Nadat de bovenlaag was verzoet, kon het experiment gericht op nalevering worden gestart.

In de periode na 21 oktober worden fasen waarin niet (of zeer beperkt) wordt gespuid afgewisseld met periodes waarin wordt doorgespoeld (of zoetgespoeld). Uit de metingen bleek dat tijdens de naleverperiodes sprake was van (geleidelijke) oplading van de zoete bovenlaag, welke periodiek is tegengegaan door weer zoet te spoelen. De proef is 15 februari 2020 afgerond toen bleek dat putten D en F volledig waren ontzilt⁴.



Figuur 1.3 Geografische locatie van de verschillende putten in het Haringvliet in combinatie met de bodemhoogte.

⁴ Putten B en C zijn zeer diep. In de diepe delen van deze putten is verzilting aanwezig tot het einde van de proef.

Tabel 1.1 Benaming en maximale dieptes van putten en geulen in het Haringvliet, in combinatie met of de put bij de start van de Naleverproef 2019-2020 verzilt is geraakt.

Naam van putten en geulen	Maximale diepte	Initieel verzilt tijdens Naleverproef 2019-2020
Put A (Zoutvang)	17.1m	Ja
Put B (Zandwinput)	30.3m	Ja
Put C (Zandwinput)	25.6m	Ja
Put D (Deltageul)	16.1m	Ja
Put E (Lens)	34.7m	Ja
Put F (Aardappelengat)	18.5m	Ja
Put G (Hoornsche Gat)	22.2m	Nee
Put H (Put bij Middelharnis)	38.7m	Nee

1.5 Onderzoeksopzet

Het onderzoek is opgezet in vier stappen:

1. Ontwikkeling modelschematisatie en simulatie van Naleverproef 2019-2020
2. Toetsing van de modelresultaten aan de hand van metingen
3. Interpretatie van modelgedrag en uitbouwen van het begrip van fysische processen
4. Duiding van de bevindingen ten behoeve van de toepassingsmogelijkheden van het model

De laatste stap vormt een vertaling van de bevindingen uit stappen 2 en 3 waarin de eigenlijke modelresultaten worden geëvalueerd. In stap 4 wordt daarbij specifiek gekeken naar de beoogde toepassingen en kennisvragen die bij RWS WNZ spelen met betrekking tot de Kier en het beheer van zoutindringing in het Haringvliet. Het onderscheid tussen stappen 2 en 3 zit vooral in wat op basis van een vergelijking met gemeten parameters kan worden bepaald (stap 2) en een toetsing van de dynamiek zoals beschreven door het model op basis van systeembegrip en proceskennis (stap 3).

1.6 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgezet: Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van de modelschematisatie, de voor het model benodigde informatie en de conceptuele beperkingen van de huidige modelopzet. In Hoofdstuk 3 volgt een vergelijking van de modelresultaten met metingen. Aansluitend wordt het modelgedrag verder onderzocht in Hoofdstuk 4, waarna in Hoofdstuk 5 verder wordt ingegaan op de betekenis van de resultaten van Hoofdstuk 3 en 4 voor de toepassingsmogelijkheden van het model. In hoofdstuk 6 volgen daarna conclusies en aanbevelingen.

2 Modelopzet

2.1 Beoogde toepassingen van het model

De in dit ontwikkeltraject opgebouwde modelschematisatie heeft tot doel het beschrijven van de zoet-zout dynamiek in het Haringvliet voor de Kier-fasen *Zoetspoelen* (spuien) en *Nalevering*.

De beoogde toepassing van het model is om in de situatie waarin het Haringvliet is verzilt, de effecten van spuien door de Haringvlietsluizen op de verzilting in het Haringvliet te kunnen onderzoeken. Daarnaast is het model bedoeld om te onderzoeken hoe wind en mogelijk het getijde-gedreven debiet door het Spui zorgen voor opmenging en hoe dat de verzilting in het Haringvliet beïnvloedt. Dit is in het bijzonder relevant tijdens periodes waarin de Haringvlietsluizen zijn gesloten en (langdurig) niet kan worden gespuid. Daarbij is het de bedoeling dat het model toegepast kan worden in scenario-onderzoek, om daarmee kennis te kunnen verzamelen gericht op de ontwikkeling van een bedienprotocol.

Beschrijven van het Kieren zelf, en daarmee van de instroom van zout water is voorzien voor een latere modelontwikkeling en geen beoogde toepassing van het hier beschreven model⁵.

2.2 Rooster

Het rekenrooster is een uitsnede van het zesde-generatie rekenrooster van D-HYDRO Rijn-Maasmond. Met het oog op de beoogde toepassingen (onderzoek naar Nalevering en Zoetspoelen) van het model, is de modelschematisatie begrensd tot het Haringvliet zelf, en bevat niet de Haringvlietsluizen of een zeedomein om de dynamiek aan zeezijde van de kering te beschrijven.

2.2.1 Methodiek roosteropbouw

De roosteropbouw voor het Haringvlietdeel van het grotere zesde generatie RMM model wordt beschreven in Veenstra et al (2020): "Het driehoeksrooster van het Haringvliet is op de volgende manier gemaakt:

- Uitgaande van de oriëntatie van de Haringvlietsluizen is een regelmatig driehoeksrooster (kantlengte 60m) gemaakt dat het hele gebied dekt. Op die manier wordt elke spuiopening afgebeeld door één roostercel.
- Langs de rand van het model is een zone van ongeveer 400m breed afgeknipt en met behulp van polygonen opgevuld met onregelmatige driehoeken in vergelijkbare resolutie tot een rooster dat zo goed mogelijk is uitgelijnd met de modelrand.
- Handmatig (met behulp van polygonen) is het rooster vervolgens uitgelijnd aan belangrijke structuren zoals de geleidedammen naar de Volkeraksluizen, de Sassenplaat en de kade van Moerdijk."

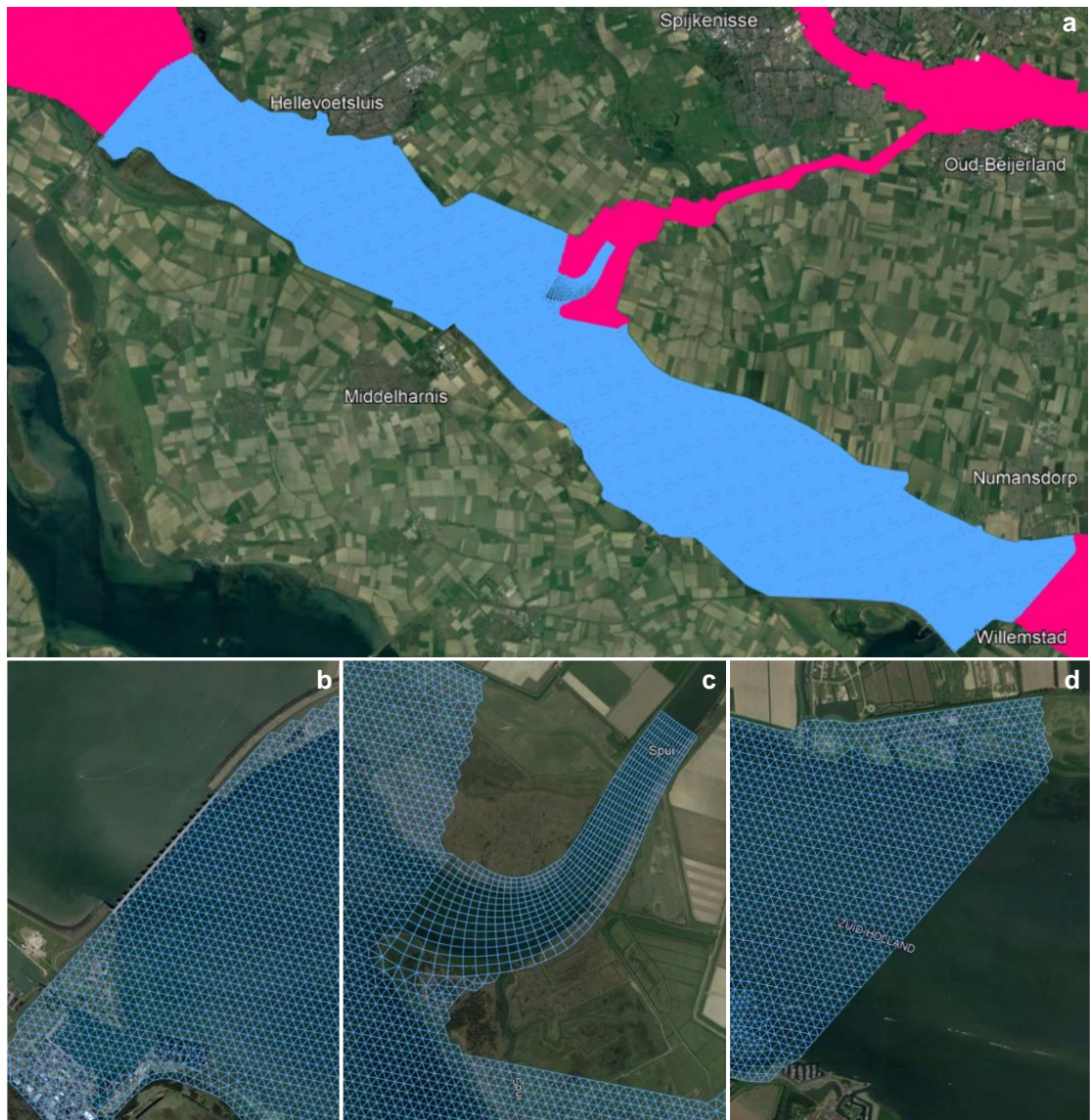
Voor het genereren van driehoeksroosters is een Python-script gebruikt dat stapsgewijs de nodige polygonen aanmaakt. Na elke stap worden bestaande functies voor de roostergeneratie uit de D-HYDRO-Suite (RGFGRID) gebruikt om deelroosters te genereren, die vervolgens samengevoegd worden.

⁵ Daarnaast worden andere elementen van het Haringvlietcomplex buiten beschouwing gelaten, zoals lekkage, het effect van de schutsluis, de visluizen en de zoutriolen. De gevolgen hiervan worden kort benoemd in paragraaf 0.

2.2.2 Rekenrooster en domeingrenzen

Het onderzoeksdomein 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 2.1).

Omdat de beoogde toepassing onderzoek naar Nalevering en Zoetspoelen is, kan worden volstaan met een benedenstroomse rand op de Haringvlietsluizen. De bovenstroomse randen (Hollandsch Diep en Spui) zijn zo gekozen dat in de huidige proefperiode geen sprake is van zoutindringing.



Figuur 2.1 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.

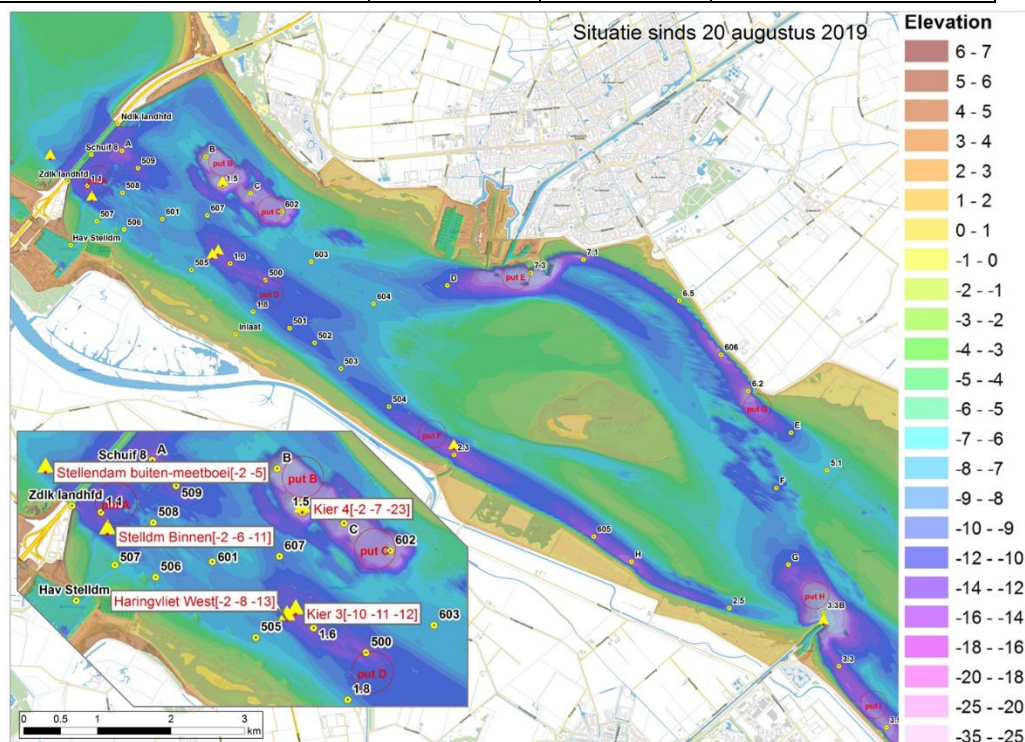
2.3 Beschikbare meetdata

De volgende meetdata zijn beschikbaar voor gebruik bij het opzetten en het toetsen van de modelschematisatie.

Voor het zoutgehalte (chlorideconcentratie) zijn vaste en varende metingen beschikbaar. De vaste meetpunten bestaan uit een ponton waaronder een kabel is bevestigd waarin op verschillende dieptes zoutsensoren zijn aangebracht. De locaties en dieptes zijn weergegeven in Tabel 2.1 en in Figuur 2.2. Tijdens de varende metingen wordt over een selectie van meetpunten een verticaal profiel vastgelegd van het zoutgehalte. De meetlocaties zijn voor elke vaartocht grotendeels het zelfde. In Figuur 2.3 zijn deze meetpunten onderverdeeld in een noordelijk en zuidelijke transect. Varende metingen zijn uitgevoerd op 14-10, 22-10, 6-11, 27-11, 5-12 en 23-12 in 2019 en op 10-1 en 14-2 in 2020⁶.

Tabel 2.1 Vaste zoutmeetpunten in het Haringvliet.

Naam	X [m, RD]	Y [m, RD]	Z [m tov water oppervlakte]
Stelldm Binnen	62823	427301	-2 -6 -11
Haringvliet West	64458	426516	-2 -8 -13
Kier 1	67739	423926	-2 -7 -15
Kier 3	64305	426405	-10 -11 -12
Kier 4	64600	427500	-2 -7 -23
Middelharnis	72760	421550	-2 -8 -15
Inloop Spui	75618	422145	-1 -5
Stellendam buiten-meetboei	62258	427863	-2 -5

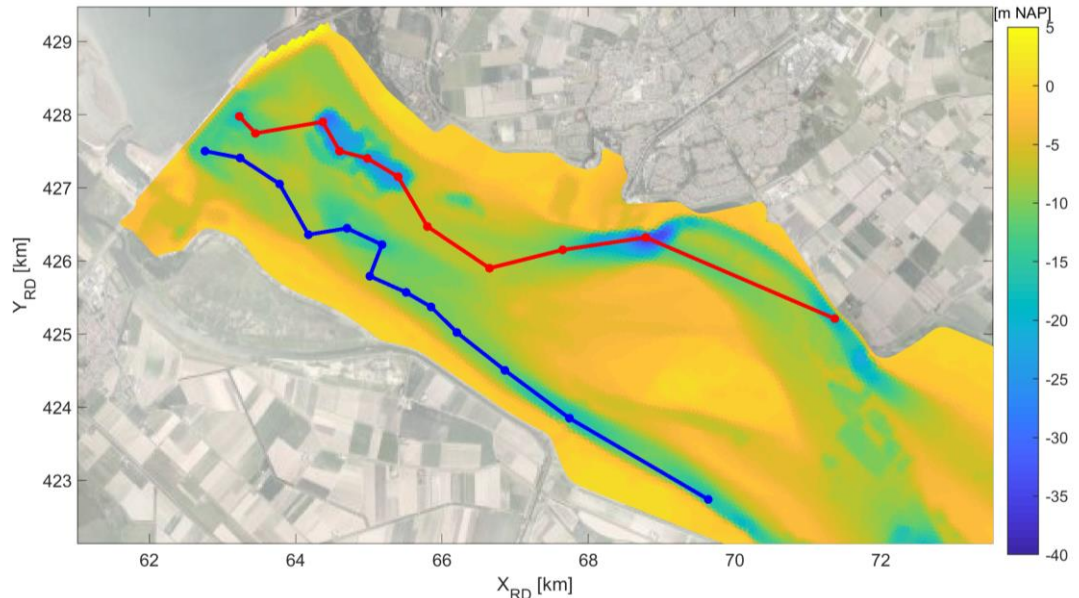


Figuur 2.2 Topografische weergave van het westelijk deel van het Haringvliet in combinatie met de meetlocaties voor verzilting. De gele driehoeken geven vaste meetpunten weer, en de gele stippen de meetpunten van de varende metingen. Daarnaast zijn in Put D en Put F ADCP stromingssensoren aanwezig. De rode cirkels geven de putten en geulen weer in het Haringvliet, zoals weergegeven in Figuur 1.3.

⁶ De meting van 22-10 en 6-11 zijn na validatie afgekeurd, terwijl de meting van 28-11 als twijfelachtig wordt gekwalificeerd (Fioole, 2020).

Naast zoutgehalten zijn ook stroomsnelheden gemeten met behulp van ADCPs. Voor deze metingen is meetapparatuur op de bodem van het Haringvliet geplaatst nabij de meetlocaties voor verzilting in twee van de putten, te weten Put D en Put F (Figuur 2.2) waar ze het stromingsprofiel over de verticaal registreerden.

Naast de voor de Kier uitgevoerde metingen, zijn ook meetdata gebruikt afkomstig van het Landelijk Meetnet Water (LMW). Dit betreft waterstandsdata bij Stellendam Buiten en Hellevoetsluis, en meteogegevens van het meetpunt op de Haringvlietsluizen (beschikbaar via waterinfo.rws.nl).



Figuur 2.3 Transecten van de varende metingen met meetposities (bollen). Noordzijde is weergegeven in rood, de zuidzijde in blauw.

2.4 Omschrijving simulatieperiode

De modelsimulatie begint op 27 november 2019 aansluitend op een varende meting waarin het zoutgehalte in de diepere delen van het Haringvliet gedetailleerd is gemeten. Deze meting is als uitgangssituatie gebruikt voor de simulatie en als initiële conditie aan het model opgelegd.

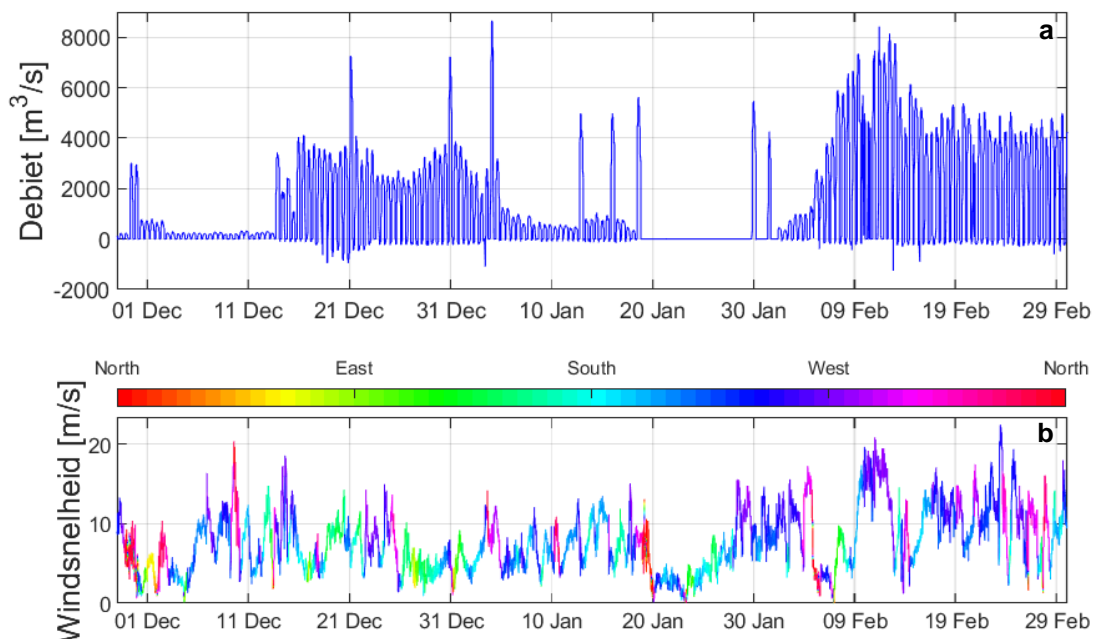
De daaropvolgende periode is gesimuleerd tot 1 maart 2020. De tijdens de simulatieperiode opgetreden forceringscondities (wind en afvoer door de Haringvlietsluizen) zijn weergegeven in Figuur 2.4. Te zien is dat in deze periode de nalever-fasen (met lage spuidebieten) en zoetspoel/spui fasen elkaar afwisselen. Deels is dit het gevolg van verzilting van de bovenlaag (wanneer dit optrad, moest worden doorgespoeld om verzilting ten oosten van de lijn Middelharnis-Spui te voorkomen), maar voor het grootste deel wordt de vraag of er gespuid moet worden, bepaald door de grote van de afvoer vanuit Lobith (welke ten dele door de Haringvlietsluizen naar zee wordt gespuid).

In de toegeleverde randvoorwaarden wordt in de periode 19-30 januari niet gespuid. In werkelijkheid is gedurende deze periode iedere ebfase met beperkte spuiopening water naar zee gespuid, vergelijkbaar met spuidebieten rond 10 december.

Vanaf 15 december is gestart met Visvriendelijk sluisbeheer. Vanaf dit moment worden de Haringvlietssluizen ook bij vloed beperkt geopend ten behoeve van vismigratie. De inkomende zoutlast wordt opgevangen in de zoutvang, en de overloop naar verder oostelijk gelegen gebieden wordt geminimaliseerd. Er is alleen Visvriendelijk sluisbeheer toegepast

tijdens periodes waarin ook sprake is van substantiële afvoer door de Haringvlietsluizen. Hierdoor is getracht iedere ebfase de zoutvang zoet te spoelen⁷.

Tijdens de gehele proefperiode is er sprake van afname van de mate van verzilting in het Haringvliet. Rond 15 februari is het Haringvliet zo goed als schoongespoeld, met uitzondering van de zeer diepe putten B en C. Op dat moment is de proef beëindigd.



Figuur 2.4 Forcing (wind en afvoer door de Haringvlietsluizen) gedurende de simulatieperiode. Merk op: de debieten zijn bepaald met behulp van het SOBEK3 RMM model.

2.5 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.
 - Zoutgehalte⁸: Bij Visvriendelijk sluisbeheer is sprake van een inkomende zoutvracht. Hiervoor wordt het zoutgehalte bij Stellendam Buiten gebruikt, waarbij een gemiddelde van de boven- en ondersonder is genomen (sensordieptes NAP -2 en -5m).
- Hollandsch Diep:
 - Waterstandsrand op basis van SOBEK3 RMM Jaarsom.
 - Zoutgehalte: Hiervoor wordt een vaste achtergrondswaarde gebruikt van 0.1PSU (55mg/l chloride)⁹.
- Spui:
 - Debietrand op basis van SOBEK3 RMM Jaarsom.
 - Zoutgehalte: Hiervoor wordt een vaste achtergrondswaarde gebruikt van 0.1PSU.

⁷ In werkelijkheid is de via Visvriendelijk sluisbeheer naar binnengekomen zoutvracht ook teruggedrongen door het gebruik van de zoutriolen. Deze zijn niet opgenomen in de modelschematisatie. Dit effect wordt beschouwd in paragraaf 0.

⁸ Voor alle drie de randlocaties geldt dat er sprake kan zijn van zowel in- als uitstroom. De randvoorwaarde voor zout is hier alleen van toepassing bij instroom. Voor uitstroom wordt het zoutgehalte genomen in de rekencel waaruit het water wordt onttrokken.

⁹ In paragraaf 2.10.4 volgt een beschouwing van de implicaties van deze modelkeuze.

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 voorgeschreven¹⁰. 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 (tijdens deze proef) verwaarloosbaar is geweest.

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

Naast deze randvoorwaarden voor de basis-simulatie, zijn nog aanvullende simulaties uitgevoerd, waarbij ofwel geen wind is opgelegd, of een ander zoutgehalte op de Haringvlietssluisen. Dit laatste betekende effectief dat de mate van zoutindringing tijdens Visvriendelijk Sluisbeheer kon worden aangepast in de modelsimulatie. Gekozen is om voor gevoeligheidstesten, naast een simulatie met het gemeten zoutgehalte van Stellendam Buiten als randvoorwaarde, simulaties te doen met een instroom-zoutgehalte van 10PSU en van 0PSU. In dit laatste geval is het effect van Visvriendelijk Sluisbeheer verwaarloosbaar, omdat het inkomende debiet zich alleen verspreidt via de oppervlaktelaag.

2.6 Initiële condities

Als start voor de modelsimulatie worden de volgende initiële condities gebruikt¹¹:

- Waterstand: Gemeten waterstand bij Hellevoetsluis (+0.45m NAP).
- 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 2019¹² (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.

2.7 Schematisatie kunstwerken

In het model zijn geen kunstwerken opgenomen. De zeewaartse modelrand ligt op de Haringvlietssluisen. Deze rand is geschematiseerd als een open rand waar een debiet en zoutgehalte worden opgelegd. Op deze rand correspondeert de bodemhoogte met de drempeldiepte van de sluis (-5.5m NAP).

¹⁰ Met name bij Visvriendelijk sluisbeheer heeft deze modelkeuze consequenties. Deze worden beschouwd in paragraaf 2.10.1.

¹¹ 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.

¹² 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.

2.8 Numerieke instellingen

Over het algemeen is gebruik gemaakt van de numerieke instellingen zoals die zijn gebruikt in D-HYDRO RMM 3D (Kaaij et al, 2022). Omdat sinds de start van dit project ook de ontwikkeling van het D-HYDRO RMM model heeft doorgelopen, volgt hieronder een overzicht van de belangrijkste parameterinstellingen en verschillen tussen RMM 3D en het Haringvlietmodel (Tabel 2.2).

Tabel 2.2 Verschillen in de modelinstelling voor D-HYDRO RMM 3D en D-HYDRO Haringvliet.

Naam	D-HYDRO RMM 3D	D-HYDRO Haringvliet
Dztop	1	0.125
Keepzlayeringatbed [-]	2	3
Vicouv	0.1	0.001
Dicouv	0.1	0.0
Dicoww	5.d-5	0
Smagorinsky	0.2	0
ICdtyp	4	2
Cdbreakpoints	2.5d-2	6.3d-4 7.23d-3
Windspeedbreakpoints	-	0 100
DtMax	30	2.5

Hierbij speelt dat de verticale laagverdeling (Dztop) is aangepast om de stratificatie in het Haringvliet te kunnen beschrijven. In het RMM model is sprake van z-sigma lagen met een laagdikte van 1m. Voor het Haringvliet model zijn alleen z-lagen met een laagdikte van 0.125m toegepast. Deze aangepaste laagdikte leidt ook tot een beperking van de maximale rekentijdstep (DtMax). De diffusivity-parameters (Vicouv, Dicouv, Dicoww en Smagorinsky) zijn aangepast om de stratificatie in het Haringvliet stabiel te maken. De instellingen in het RMM model zijn gericht op de reproductie van de dynamiek in de Nieuwe Waterweg. Het Haringvliet is veel minder dynamisch en vereist daarom andere instellingen, specifiek gericht op het in stand houden van de sterke zoutstratificatie. Voor de wind-forcering (Cdbreakpoints and Windspeedbreakpoints) is gebruik gemaakt van gemeten windcondities bij het Haringvliet met coëfficiënten van Smith en Banke (1975), terwijl voor RMM 3D ruimtelijk variërende windvelden afkomstig van HIRLAM zijn toegepast.

2.9 Gebruikte programmatuur en hardware

De gebruikte modelsoftware is D-HYDRO en de simulaties worden gedraaid op het H6 rekencluster van Deltares. De laatste versie van de basis-modelsimulatie is uitgevoerd met D-Flow FM versie 1.2.127.69374M (op 3 februari 2022).

2.10 Beperkingen modelopzet

Sommige modelkeuzes en modelinstellingen hebben gevolgen voor hoe goed het model in staat zal zijn de Naleverproef te simuleren. Hieronder volgt een kort overzicht van deze modelkeuzes en -beperkingen en de mogelijke consequenties daarvan.

Let wel: de ontwikkeling van de huidige opzet had tot doel om Nalevering en Zoetspoelen te beschrijven. In het ontwikkeltraject zijn keuzes gemaakt met de op dat moment aanwezige kennis en stand van zaken van de software. Recentere inzichten en ontwikkelingen geven aanleiding en mogelijkheden voor toekomstige modelaanpassingen. Hier komen we aan het einde van deze studie op terug. Hier bespreken we eerst enkele modelkeuzes in het huidige model.

2.10.1 Dieptegemiddelde randvoorwaarden

In de huidige modelopzet wordt alleen gebruik gemaakt van dieptegemiddelde randvoorwaarden. Dit is een vereenvoudigde beschrijving van de eigenlijke dynamiek die in het gebied optreedt. Voor de verschillende randlocaties is dit in meer of mindere mate van invloed op wat het gedrag is.

- Voor de saliniteit op de bovenstroomse randen op het Hollandsch Diep en het Spui is dit een goed te verantwoorden aanname omdat er hier daadwerkelijk sprake is van een situatie met uniforme concentraties over de verticaal.
- Voor de rand op de Haringvlietsluizen geldt dat hier echter wel sprake is van verticale stratificatie.
 - Bij grote spuidebieten zal het dieptegemiddeld opleggen van de uitgaande debieten nog redelijk nauwkeurig het effect op de verzilting in het Haringvliet kunnen beschrijven omdat de onttrekking in zowel model als werkelijkheid over een grote diepte-range (boven de drempelhoogte) zal plaatsvinden¹³.
 - Bij kleinere spuidebieten zal dit mogelijk leiden tot een grotere uitstroom van de zoete bovenlaag dan in werkelijkheid.
 - Daarnaast zal bij inlaten van zout water vermoedelijk te veel menging plaatsvinden. Dit speelt wanneer deze manier van modelleren gebruikt zou worden om het inlaten bij Kieren te berekenen. Maar het speelt in verhouding nog sterker bij Visvriendelijk sluisbeheer. In de huidige modelsimulatie wordt Kieren niet gesimuleerd (de simulatie start met een al verzilt Haringvliet), Visvriendelijk sluisbeheer wel. Het gevolg van het op deze wijze modelleren van instroming is dat het model de zoutgehalten in het Haringvliet direct na Visvriendelijk sluisbeheer mogelijk onderschat¹⁴.

Om met name Kieren en Visvriendelijk sluisbeheer beter te beschrijven in het numerieke model is een diepteafhankelijke beschrijving van de processen door de Haringvlietsluizen noodzakelijk. Daarnaast is het nodig een nauwkeurige beschrijving te geven van de inkomende zoutgehalten. Voor dit laatste is (vooral voor scenario-berekeningen) een beschrijving van de Voordelta aan zeezijde van de kering een mogelijke oplossing. Met de beschrijving van de Voordelta binnen het modeldomein wordt de menging van gespuid (relatief) zoet water vanuit het Haringvliet met zout omgevingswater binnen het modeldomein gemodelleerd. Daarnaast is de beschrijving van het kunstwerk cruciaal en zijn er verschillende projecten (onder andere: Ontwikkeling van de Spuisluisformulering binnen Kennisprogramma Natte Kunstwerken (nog lopend onderzoek) en D-HYDRO modelontwikkeling in het IJsselmeer (Bijlsma et al., 2022) en Noordzeekanaal (Verbruggen en Van der Baan, 2020)) waaruit kennis en ervaring kan worden geput om de meest geschikte opzet ten behoeve van de beschrijving van zoutindringing te bepalen.

¹³ Een verdere analyse van de stroomsnelheden in de Haringvlietsluizen en de mate waarin dit diepte-variabel is wordt verwezen naar Stelling et al., 1994 en Van Kester en Stelling 1996.

¹⁴ Daarnaast spelen mogelijk nog andere factoren zoals de steilheid van het talud en de mate waarin dit door het rekenrooster wordt beschreven, zoals bijvoorbeeld ook speelt bij een vaargeul in het IJsselmeer (Bijlsma et al, 2022).

2.10.2 Haringvlietcomplex eenvoudig gemodelleerd

In de huidige modelopzet wordt alleen een (vereenvoudigde) beschrijving gegeven van de dynamiek door de Haringvlietsluizen, door middel van een dieptegemiddelde randvoorwaarde waar debiet en zoutgehaltes worden opgelegd. Echter, het Haringvlietcomplex is veel uitgebreider ook met het oog op de nauwkeurige beschrijving van verzilting. In de huidige modelopzet ontbreken bijvoorbeeld:

- Schutsluis
- Visluizen
- Lekkage
- Zoutriolen¹⁵

De eerste drie punten zullen naar verwachting leiden tot een vergroting van de zoutlast op het Haringvliet. De zoutriolen daarentegen helpen bij het zoethouden van het Haringvliet door uit de diepe delen van de zoutvang (put A) water te onttrekken en te spuien aan de zeezijde van de kering. Naar verwachting zijn deze zoutriolen van groot belang bij Visvriendelijk sluisbeheer, omdat daarmee iedere ebfase de zoutvang kan worden ontzilt, waardoor deze niet bij opeenvolgende periodes met Visvriendelijk sluisbeheer gaat overlopen naar de volgende put. De afwezigheid van de zoutriolen in het model leidt dus mogelijk tot een overschatting van de saliniteit na perioden met Visvriendelijk sluisbeheer.

2.10.3 Initiële zoutgehaltes alleen onder -10m

Vanwege numerieke stabiliteit bij de start van de simulatie is er voor gekozen initieel alleen verhoogde zoutgehaltes op te nemen voor gebieden onder -10m NAP. In werkelijkheid ligt de overgang tussen de verzilte onderlaag en de zoute bovenlaag op dat moment voor verschillende putten rond de -8m NAP. Het model onderschat daarmee de mate van verzilting bij de start van de simulatie. Afhankelijk van de ontziltingsdynamiek, is het de verwachting dat dit verschil tussen model en meting nog een tijd kan blijven bestaan.

2.10.4 Zoutgehalte bij bovenstroomse randvoorwaarden

In de huidige simulatie is gebruik gemaakt van een vast zoutgehalte op de bovenstroomse modelranden (Spui en Hollandsch Diep). Dit zoutgehalte (0.1PSU) ligt rond de achtergrondwaarde bij gematigde en hoge rivierafvoeren. Echter, in werkelijkheid is er sprake van een geleidelijke variatie in het bovenstroomse zoutgehalte, bepaald door de aanvoer vanuit de Rijn en Maas. Om de modelmatige beschrijving van het zoutgehalte in de zoete bovenlaag verder te verbeteren is het daarom aan te bevelen om in toekomstige simulaties gebruik te maken van gemeten zoutgehaltes voor de bovenstroomse randvoorwaarden. Voor scenarioberekeningen zou gebruik gemaakt kunnen worden van een relatie tussen Rijnafvoer en zoutgehaltes.

2.10.5 Verticale laagverdeling nabij het wateroppervlakte

In de huidige modelopzet wordt gebruik gemaakt van een vaste verticale (z-)laagdikte van 0.125m. Dit geldt echter niet voor de bovenste verticale laag. Deze groeit en krimpt mee met de waterstand. De dunne z-lagen in combinatie met een waterstandsvariatie van meerdere decimeters kan ertoe leiden dat de bovenste laag veel dikker is dan de laag daaronder. Voor nauwkeurige numerieke oplossingen is zo'n verhouding ongunstig. Dit kan met name van invloed zijn op het doorwerken van de windschuifspanning op de verticale snelheidsverdeling. Door gebruik te maken van een *z-sigma* laagverdeling (waarin de diepe delen met z-lagen en het bovenste deel van de waterkolom met *sigma*-lagen wordt beschreven) kan de waterstandvariatie worden opgevangen over meerdere lagen. Hierdoor zal de verhouding tussen de lagen in het bovenste gedeelte van de waterkolom gunstiger zijn en zal de doorwerking van de wind over de verticaal netter worden beschreven.

¹⁵ Voor vervolgonderzoek wordt geadviseerd om een inschatting van de zoutlast (of onttrekking) via deze elementen van deze elementen te vergelijken met de in het model opgenomen processen, om een beter beeld te krijgen van de relatieve relevantie.

2.10.6 Betrouwbaarheidsgrenzen van het model

Naast de hierboven beschreven beperkingen, is er ook sprake van een algemene inschatting van de te verwachten nauwkeurigheid van de modeluitkomsten. Dit is specifiek relevant voor zoutgehalten, waarbij in de ondiepe delen vaak sprake is van variaties in chlorideconcentratie van tussen de 10 en 80mg/l. Het is onze inschatting dat een hydrostatisch model met de eigenschappen zoals hierboven staan beschreven een geschatte modelnauwkeurigheid zal hebben die ongeveer overeenkomt met deze variatie (modelnauwkeurigheid van orde grootte 50-100mg/l chloride)¹⁶. Daarom zullen bij variaties in chlorideconcentraties de modeluitkomsten qua zoutgehalte vooral kwalitatief moeten worden beschouwd. De timing van een zoutpiek is daarbij bijvoorbeeld met meer vertrouwen kwantitatief uit te drukken terwijl de eigenlijke hoogte van de piek slechts indicatief kan worden beschouwd.

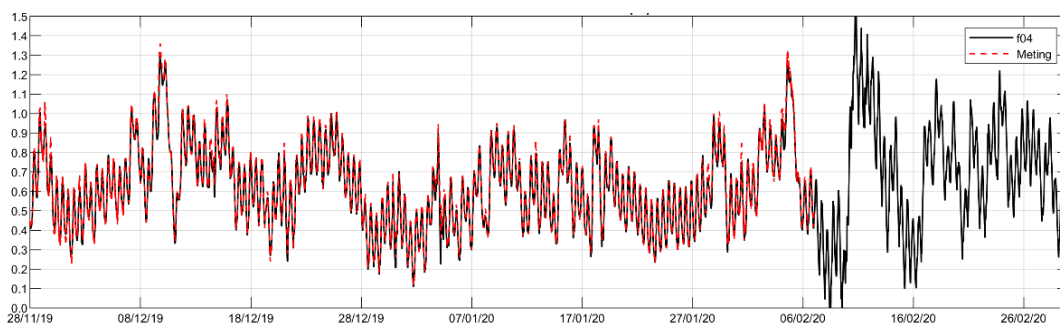
¹⁶ Deze expert-judgement is gebaseerd op ervaringen met modellen van andere gebieden als ook voorlopige simulaties met het Haringvlietmodel, zoals die zijn uitgevoerd tijdens de ontwikkeling van de modelschematisatie.

3 Toetsing

In dit hoofdstuk worden modelresultaten voor de simulatieperiode vergeleken met metingen. Na een korte vergelijking voor waterstanden, worden de zoutgehaltenes en daaraan gekoppelde parameters zoals zoutmassa beschouwd. Daarna worden de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheden vergeleken. Aansluitend volgt een korte conclusie. Alleen de belangrijkste figuren worden in dit hoofdstuk weergegeven, voor de resterende figuren wordt verwezen naar Bijlage B.

3.1 Waterstanden

In Figuur 3.1 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.



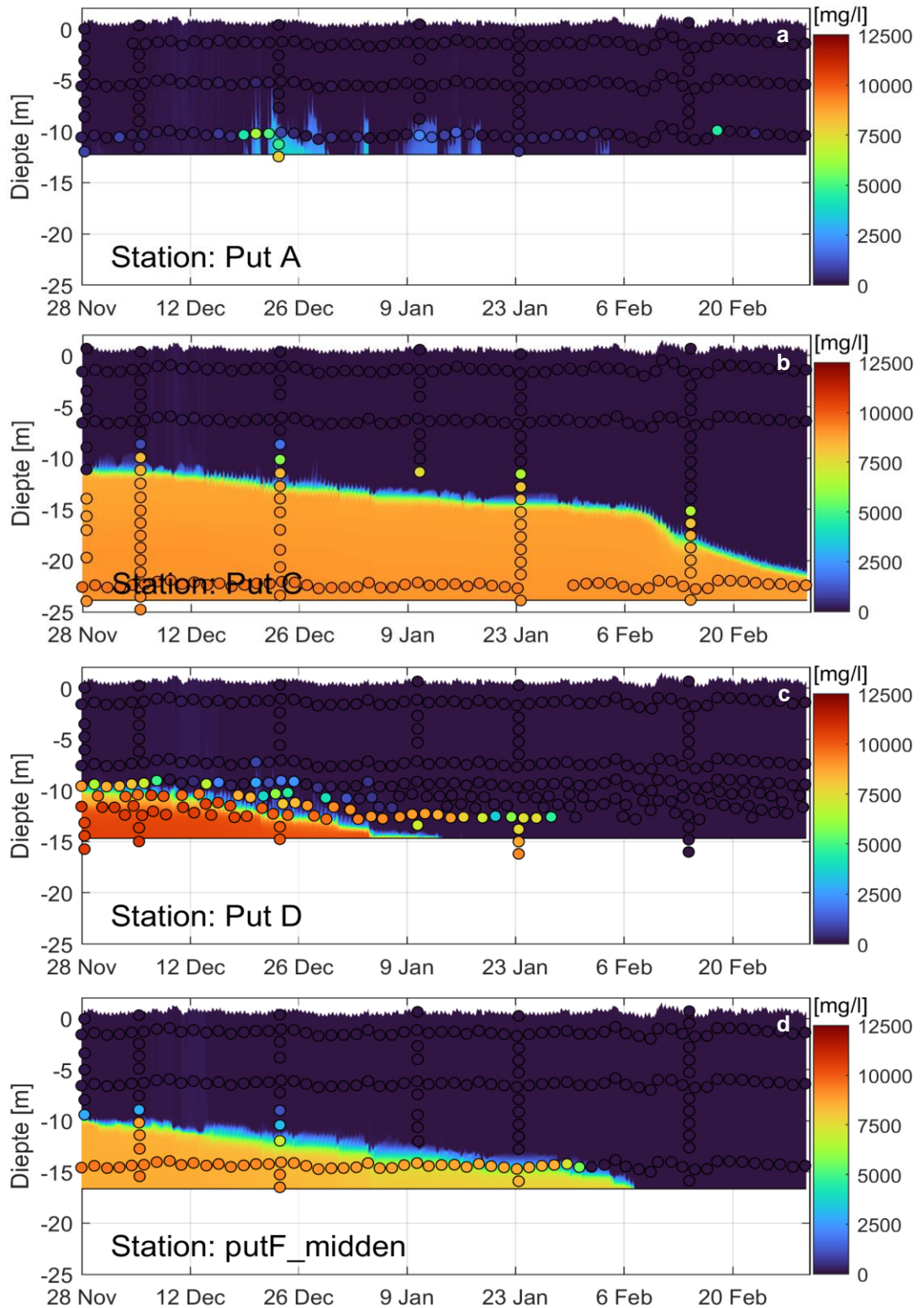
Figuur 3.1 Vergelijking gemeten (rood gestreepte lijn) en gemodelleerde waterstand (zwarte continue lijn) bij meetlocatie Hellevoetsluis ten tijde van de simulatieperiode.

3.2 Globaal beeld zoutgehalte

3.2.1 Vergelijking tussen gemeten en gemodelleerd zoutgehalte

Een vergelijking van het gemodelleerde zoutgehalte over de diepte en tijd voor de initieel verzilte putten met de gemeten zoutgehaltenes (varend en vast) is weergegeven in Figuur 3.2. Over het geheel genomen laat dit zien dat metingen en modelresultaten in grote lijnen overeenkomen. In meer detail:

- De zoute onderlaag blijft goed in stand. Vooral Putten B, C en F (figuur voor put B opgenomen in Bijlage B.2) laten een zeer geleidelijk verloop zien van de ontwikkeling van de zoute onderlaag. Dit is zeer goed vergelijkbaar met metingen.
- Het zoutgehalte in de onderlaag blijft redelijk gelijk over tijd, zoals ook is waargenomen. Dit geldt in bijzondere mate voor put C (en B) en D. In Put F is een geleidelijke afname in het zoutgehalte te zien. De gemeten zoutgehaltenes (met name zichtbaar in Put F) nemen ook af, maar die afname vindt wat later plaats en gaat wat sneller dan in de modelresultaten.
- De scherpe overgang tussen de zoete bovenlaag en de zoute onderlaag, zoals die initieel is opgelegd, blijft langdurig bestaan. Alhoewel dit slechts beperkt is gemeten (alleen aan de hand van de varende metingen), is het gemodelleerde beeld hierbij in lijn met de waarnemingen.



Figuur 3.2 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.

- Wel blijkt dat de spronglaag in het model in het merendeel van de simulatieperiode op grotere diepte zit dan in de metingen. Er zijn hiervoor twee aanleidingen:
 - Ten eerste is in het model het initiële verziltingsveld zo opgelegd dat het zout niet bij de start van de simulatie over de drempels tussen de putten gaat stromen. Dit is gedaan om een zo stabiel mogelijke uitgangspositie te hebben. Het gevolg is echter dat in het model alleen verhoogde zoutgehalten worden opgelegd beneden -10m. In werkelijkheid zijn sommige putten tot een ondieper niveau gevuld, zie paragraaf 2.6.
 - Daarnaast laat de varende meting van 28 november, die wordt gebruikt voor het opleggen van de initiële condities, een aanzienlijk diepere spronglaag zien (goed te zien voor put C) dan wordt gemeten in de varende metingen direct daarvoor (niet weergegeven) en daarna. Omdat er in die fase geen sprake is van inlaten van zout, is het onrealistisch dat het totale zoutvolume in een put kan toenemen. Het is daarom waarschijnlijk dat dit de aanleiding was om deze meting als “twijfelachtig” te kwalificeren door Fioole (2020).
- Het grootste verschil tussen de gemeten en gemodelleerde zoutgehalten is echter dat put D in het model te snel ontzilt. Het zoutgehalte in de diepe delen van put D is redelijk constant over tijd (en vergelijkbaar met metingen), maar de spronglaaghoogte neemt te snel af. Er is vermoedelijk sprake van te snelle afschaving van de zoute onderlaag, waardoor de relatief ondiepe put snel volledig ontzilt raakt. Een korte beschouwing over het verschil in ontzilting van putten D en F ten opzichte van metingen volgt aansluitend op de beschouwing van de stroomsnelheden, in paragraaf 3.8.
- Het zoutgehalte in de zoete bovenlaag is zowel in het model als in de metingen zeer laag. Rondom 12 december is er sprake van een lichte toename in het zoutgehalte, welke ook wordt waargenomen in metingen (dit is wat duidelijker te zien in de afzonderlijke tijdserievergelijking, hieronder besproken bij Figuur 3.6). Na verloop van tijd wordt (als gevolg van het hervatten van het spuien) de bovenlaag weer ontzilt. Ook dit laatste is in overeenstemming met de metingen.
- Het zoutgehalte in Put A laat een duidelijk ander verloop zien dan in de overige putten. Hier is geen sprake geweest van initiële verzilting, maar neemt het zoutgehalte gedurende de simulatieperiode verschillende keren toe en af, als gevolg van Visvriendelijk sluisbeheer en de inzet van zoutriolen. De vergelijking met gemeten zoutgehalten suggereert een vergelijkbare dynamiek en respons. Een directe vergelijking met de gemeten waarden volgt in paragraaf 3.3.2 en een analyse van het effect van Visvriendelijk sluisbeheer op de verziltingdynamiek in het systeem volgt in paragraaf 4.4.

3.2.2 Conclusies globaal beeld zoutgehalte

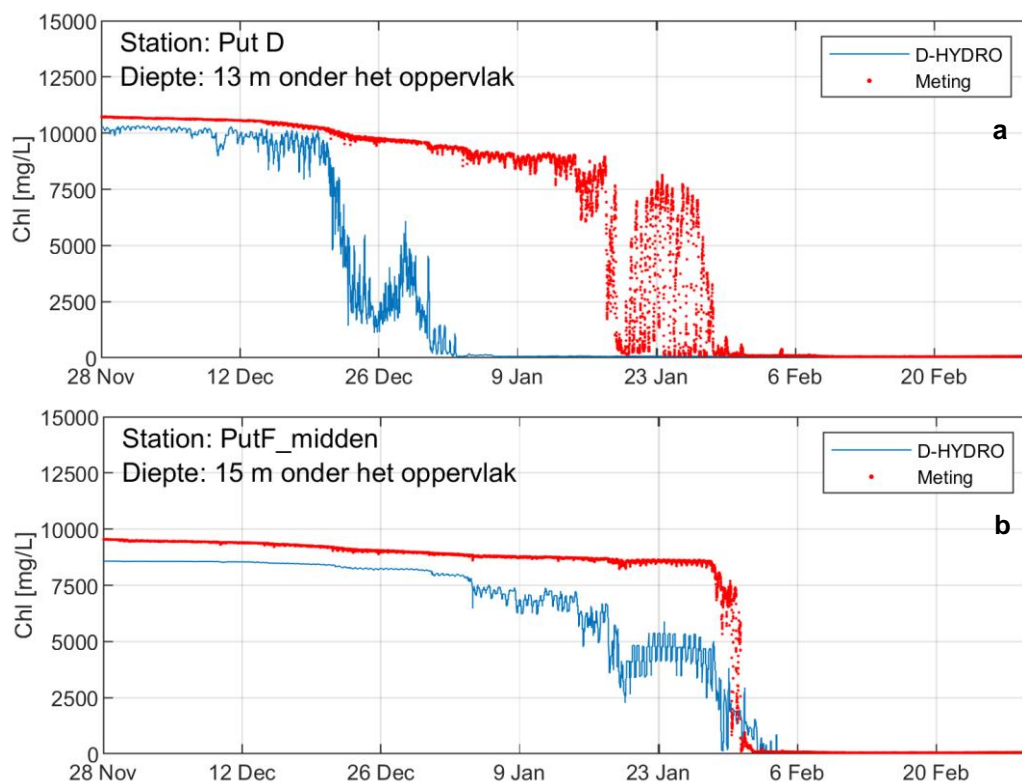
Concluderend kan worden gesteld dat het model een realistisch verloop laat zien van de geleidelijke ontzilting van de diepere delen van het Haringvliet. De gemodelleerde ontzilting is in goede overeenstemming met de gemeten zoutgehalten over tijd. De grootste verschillen zijn zichtbaar voor put D, die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

3.3 Zoutgehalten bij continue meetpunten

Naast het globale beeld van de ontwikkeling van de verzilting in het Haringvliet, kan ook een directe vergelijking worden gemaakt van de gemeten en gemodelleerde zoutgehalten bij de vaste meetpunten op verschillende dieptes onder het wateroppervlak.

3.3.1 Zoutgehalte in de verzilde diepe delen

Voor putten D en F is de ontwikkeling van het zoutgehalte voor de onderste meetsensoren weergegeven in Figuur 3.3. Hiermee wordt een aanvullend beeld gegeven van de ontwikkeling van het zoutgehalte in de verzilde onderlaag.

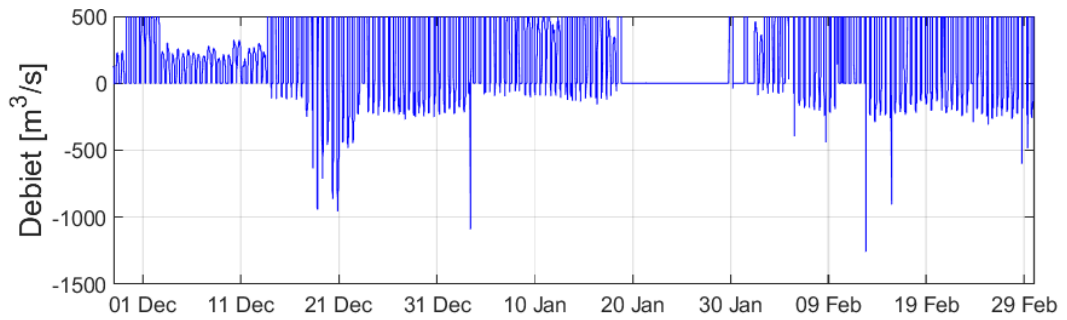


Figuur 3.3 Gemeten (rood) en gemodelleerd (blauw) zoutgehalte in de verzilte diepe delen van het Haringvliet.

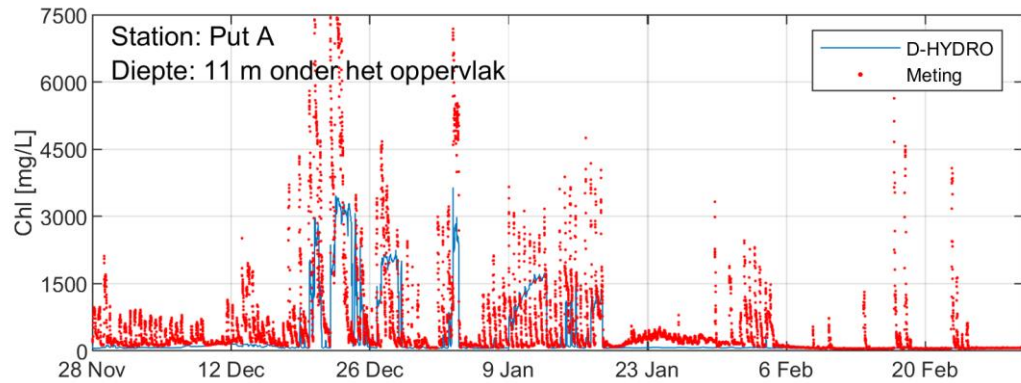
- Het algemene beeld is dat het model de ontwikkeling van het zoutgehalte in de diepe delen redelijk goed beschrijft. Er is sprake van een onderschatting van het zoutgehalte, maar dit speelt vanaf het begin van de simulatie, en komt vermoedelijk door een onderschatting van het zoutgehalte in de varende meting van 28 november.
- Zoals ook al te zien was in de diepte-afhankelijke figuur (Figuur 3.2), is er duidelijk sprake van een te snelle ontzilting van put D. De grote fluctuaties in het zoutgehalte (van put D) tijdens de periode van gemeten ontzilting (rondom 23 januari) suggereren dat in die periode de spronglaag ongeveer op de sensorhoogte zit. Doordat de sensor ieder getij verticaal met de waterstandvariatie op en neer gaat, wordt ieder getij zowel de zoete bovenlaag als de zoute onderlaag geregistreerd. De modelresultaten suggereren dat de spronglaag eerder onder het niveau van rond de 13m onder het wateroppervlak zakt.
- De ontwikkeling van het zoutgehalte in put F is redelijk in lijn met de gemeten waarden: Voor put F is er sprake van een geleidelijke afname in het zoutgehalte vanaf ongeveer 1 januari 2020 (zoals hierboven al beschreven), maar het uiteindelijke moment waarop dit diepste meetpunt ontzilt is gelijk met de metingen, en valt samen met een periode waarin geleidelijk weer meer wordt gespuid. De volledige put ontzilt in het model echter pas ongeveer een week later, als ook de diepste delen zoetgespoeld worden als gevolg van toegenomen afvoer.
- Naast putten D en F, is ook put B/C verzilt. Deze put is tijdens de meetproef echter permanent verzilt, waardoor de onderste meetsensor en de modelresultaten beide een constant zoutgehalte aangeven (figuur opgenomen in bijlage B.3.1)

3.3.2 Zoutgehalte in de diepe delen van de zoutvang (put A)

De zoutvang was niet initieel verzilt bij de start van de simulatie. Put A ondervindt echter wel significante verzilting, als gevolg van onder andere Visvriendelijk sluisbeheer.



Figuur 3.4 Negatieve debiet door de Haringvlietsluizen ten behoeve van Visvriendelijk sluisbeheer.



Figuur 3.5 Gemeten (rood) en gemodelleerd (blauw) zoutgehalte onderin de zoutvang (put A).

Een belangrijk secundaire proef die parallel aan het onderzoek naar nalevering en zoetspoelen was uitgevoerd, was onderzoek naar het effect van Visvriendelijk sluisbeheer. Hierin worden bij opkomend tij, als de waterstand op zee net hoger is dan in het Haringvliet, de sluisen tijdelijk opgehouden om vismigratie te bevorderen. Hierdoor komt echter ook een beperkte hoeveelheid verzilt water in het Haringvliet.

Figuur 3.4 geeft de instroming (negatieve debieten) door de Haringvlietsluizen weer, als gevolg van Visvriendelijk sluisbeheer. Te zien is dat Visvriendelijk sluisbeheer alleen is toegepast in de periode van half december tot half januari en vanaf begin februari. In Figuur 3.5 is het effect van deze zoutlasten op het zoutgehalte onder in de zoutvang terug te zien.

De metingen laten verschillende de effecten van verschillende processen en maatregelen zien:

- In de metingen (rood) is vrijwel iedere vloedfase sprake van een (kleine) zoutpiek. Dit geldt ook voor periodes waarin geen Visvriendelijk sluisbeheer wordt gehanteerd. Deze zoutpieken worden vermoedelijk veroorzaakt door andere processen zoals de schutsluis-operatie en lekkage.
- Wat daarnaast opvalt is dat de zoutpiek in de meting bijna ieder getij weer wordt weggespoeld. Vermoedelijk komt dit door de inzet van de zoutriolen die iedere eb fase zout water vanuit de diepste delen van de zoutvang naar zee spuien.
- Doordat Visvriendelijk sluisbeheer alleen op relatief grote schaal is toegepast tijdens specifieke periodes is het effect daarvan tot op zekere hoogte te bepalen in vergelijking met andere periodes.
 - Te zien is dat in de periode na 15 december sprake is van een sterke toename in de zoutgehaltes van de pieken, met gemeten zoutgehaltes tot meer dan 7000mg/l Cl⁻.
 - Echter, een enkele uitzondering daargelaten, is hier ook sprake van dat iedere eb fase de zoutvang A ontzilt en de sensor weer zoet water registreert.

De modelresultaten laten door de vereenvoudigde opzet van het gehele Haringvlietcomplex een enigszins ander gedrag zien:

- Doordat de zoutlast vanuit andere bronnen dan Visvriendelijk sluisbeheer¹⁷ niet wordt meegenomen in het model, is er tijdens periodes zonder Visvriendelijk sluisbeheer sprake van zeer lage zoutgehaltenes.
- Doordat in de modelschematisatie geen zoutriolen zijn opgenomen, is daarnaast ook de ontzilting tijdens iedere ebfase niet waar te nemen. Zout kan in het model alleen via de spuisluizen tijdens spuien naar zee worden gespoeld. Behalve dat dit niet altijd (significant) optreedt, is dit ook minder effectief dan de inzet van het zoutriool om zout uit de diepere delen van de zoutvang te krijgen. Hierdoor is in de periodes met Visvriendelijk sluisbeheer in het model sprake van meer permanente verzilting in put A die meerdere malen enkele getijperiodes blijft bestaan. In de metingen is bijna iedere ebfase sprake van volledige ontzilting (met uitzondering van enkele getijperiodes rond 25 december).
- Daarnaast beschrijft het model een veel lager zoutgehalte in put A in periodes met Visvriendelijk sluisbeheer dan gemeten.
 - Het model legt het inkomende debiet dieptegemiddeld op. Ter plaatse van de Haringvlietsluizen is de bodem op -5.5m NAP. Door het debiet dieptegemiddeld op te leggen, wordt dit over alle verticale cellen opgelegd tussen -5.5m en 0m NAP en wordt dit (kleine) inkomende zoute debiet volledig vermengd met het al aanwezige water in deze rekencellen. In werkelijkheid is er sprake van een veel kleinere doorlaatopening (van enkele decimeters) waardoor vermoedelijk veel minder menging optreedt met hogere concentraties tot gevolg.
 - Een secundair aspect is dat in het model Visvriendelijk sluisbeheer wordt meegenomen door het inkomende debiet een zoutgehalte te geven zoals is gemeten aan de buitenzijde van de Haringvlietsluizen (Stellendam Buiten, gemiddelde van de onder (-5m) en boven (-2m) sensoren). Het is onzeker of deze sensoren volledig representatief zijn voor het eigenlijke inkomende zoutgehalte. Het is echter de verwachting dat dit slechts in geringe mate het waargenomen verschil in zoutgehaltenes in de zoutvang kan verklaren.
 - Tot slot is ook het inkomende debiet zoals dat in het model is opgelegd onzeker. Dit is bepaald aan de hand van het SOBEK3 RMM model op basis van het gemodelleerde verhang over de kering in combinatie met de waargenomen sluisoperatie. Het gemodelleerde verhang (met name als er sprake is van nagenoeg gelijke waterstanden aan weerszijden van de sluisen) is echter niet perfect in lijn met het gemeten verhang en daarmee de sluisoperatie. Er is daardoor in het model regelmatig sprake van kleine inkomende debieten die in werkelijkheid niet optreden. Het effect is naar verwachting marginaal ten opzichte van het effect van Visvriendelijk sluisbeheer.

3.3.3 Zoutgehalte nabij het oppervlakte

Het zoutgehalte aan het oppervlakte is cruciaal voor het waterbeheer van het Haringvliet. De bovenlaag vormt de bron voor verschillende innamepunten en hier gelden scherpe grenzen aan het toegelaten zoutgehalte (150mg/l Cl⁻). Echter, in vergelijking tot de zoutgehaltenes in de diepe delen van het Haringvliet, gaat het om zeer kleine toenames in chlorideconcentratie ten opzichte van de achtergrondwaarde (vaak zelf rond 100mg/l Cl⁻, maar bij zeer lage afvoeren kan de achtergrondwaarde richting 150mg/l Cl⁻ gaan).

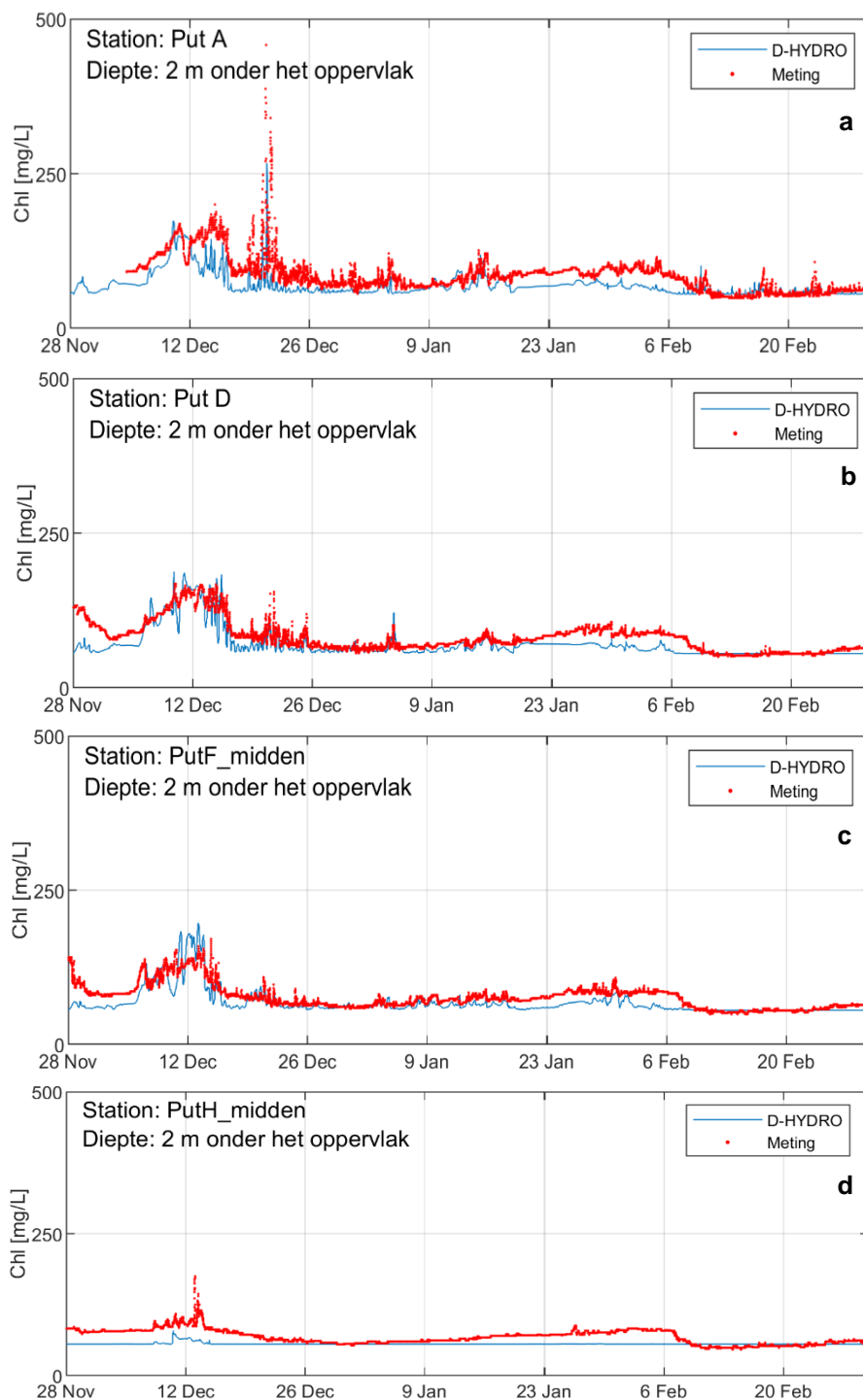
¹⁷ De zoutlast als gevolg van Visvriendelijk sluisbeheer is vele malen kleiner dan door Kieren. Mogelijk ligt de zoutlast door Visvriendelijk sluisbeheer in lijn met de zoutlast vanuit andere bronnen, zoals de scheepvaartsluis, zoutlekkage en de visriolen.

Daarbij heeft een 3D model van een zwak-dynamisch systeem vaak de neiging om te sterke verticale menging te laten zien als gevolg van numerieke diffusie en kan een model erg gevoelig zijn voor gekozen (fysische en numerieke) parameters, zoals diffusiviteitsparameters, de beschrijving van wind-effecten en de laagverdeling. Deze zaken maken het moeilijk om de kleine veranderingen in concentratie in de bovenlaag nauwkeurig te simuleren (zie ook paragraaf 2.10.6 over de betrouwbaarheidsgrenzen van het model).

Figuur 3.6 geeft een vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde zoutgehalten nabij het wateroppervlakte voor de verschillende meetpunten.

- Over het algemeen laat het model een goede beschrijving zien van de zoutgehalten in de bovenlaag.
- De toename van het zoutgehalte rondom 12 december lijkt het gevolg van opmenging van de zoute onderlaag (in die periode is nog geen sprake van Visvriendelijk sluisbeheer). De windpiek rond 10 december leidt tot een toename van het chloridegehalte in de bovenlaag, waarna door gebrek aan spuien deze enkele dagen blijft bestaan. De verhoging in het zoutgehalte in de bovenlaag is goed vergelijkbaar met de waargenomen toename. De metingen laten iets grotere variatie en hogere pieken zien (vooral Put D en F), maar de algemene trend is zeer vergelijkbaar.
- In de periode waarin sprake is van Visvriendelijk sluisbeheer (na 15 december) is ook een toename in het zoutgehalte in de bovenlaag te zien voor putten A en D. Dit is zowel in de metingen als in de modelresultaten te zien, al is ook hier sprake van hogere zoutpieken in de metingen dan in het model.
- In de periode tussen half januari en begin februari is voor alle putten sprake van een onderschatting van het zoutgehalte. In de modelberekening wordt op de bovenstroomse randen een constante achtergrondswaarde voor het zoutgehalte opgelegd. In deze periode is in werkelijkheid echter sprake van een lichte toename in verzilting bovenstrooms, waardoor ook op de meetpunten in het Haringvliet een hoger zoutgehalte wordt waargenomen.
- Het meest bovenstroomse meetpunt (put H, nabij Middelharnis) laat zien dat het model de ruimtelijke verspreiding van de verzilting in de bovenlaag onderschat. Alhoewel de langdurige onderschatting te maken zal hebben met het opleggen van het constante zoutgehalte bovenstrooms, laten de metingen in de periode rondom 12 december een duidelijke toename in het zoutgehalte zien. In het model is in die periode ook wel een geringe verhoging zichtbaar ten opzichte van de achtergrondconcentratie, maar deze is minder sterk dan in de meting.

Concluderend kan worden gesteld dat het model de pieken in het zoutgehalte in de bovenlaag boven de verzilte putten redelijk goed weergeeft, maar dat de bovenstroomse respons, mede door het opleggen van een constant zoutgehalte op de bovenstroomse randen, wordt onderschat. Daarnaast is variatie in de bovenlaag zeer beperkt en ligt deze binnen de geschatte betrouwbaarheidsgrenzen van het model. Op grond hiervan worden de modelresultaten voor de bovenlaag vooral geschikt geacht om kwalitatieve uitspraken te doen. Daarnaast wordt aanbevolen bij verdere validatiesimulaties gebruik te maken van gemeten achtergrondconcentraties.



Figuur 3.6 Gemeten (rood) en gemodelleerd (blauw) zoutgehalte nabij het oppervlakte voor de verschillende meetlocaties in het Haringvliet.

3.3.4 Zoutgehalte in het midden van de waterkolom

De zoutmeetstations in het midden van de waterkolom worden niet apart besproken. Een vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde waarden is opgenomen in Bijlage B.3.4 en de resultaten beschrijven vergelijkbaar gedrag zoals is waargenomen in de bovenlaag en de onderlaag, afhankelijk van de diepte en locatie van de meetsensor.

3.3.5 Conclusies zoutgehalte bij continue meetpunten

- Over het algemeen kan het model het verloop van de gemeten zoutgehalte op de vaste meetpunten in de diepe delen van verzilte putten kwalitatief goed beschrijven. Voor kwantitatieve uitspraken zoals te verwachten zoutgehaltes en timing van ontzilting, is het model redelijk geschikt. Op basis van deze eerste vergelijking met metingen blijkt dat put D in dit geval echter te snel ontzilt.
- Ook kan worden gesteld dat het model de pieken in het zoutgehalte in de bovenlaag boven de verzilte putten redelijk goed weergeeft, maar dat de bovenstroomse respons (mede door het opleggen van een constant zoutgehalte op de bovenstroomse randen) wordt onderschat. Daarnaast is variatie in de bovenlaag zeer beperkt en ligt deze binnen de geschatte betrouwbaarheids grenzen van het model. Om deze redenen zijn de modelresultaten voor de bovenlaag met name geschikt om kwalitatieve uitspraken te doen.
- Het zoutgehalte in de diepe delen van de zoutvang (put A) laat een ander gedrag zien dan het zoutgehalte in de diepe delen van de verzilte putten B/C, D en F. Dit komt doordat er in put A sprake is van een zoutlast door het Haringvlietcomplex en afvoer door de zoutriolen. In het model wordt het eerste beperkt en het tweede helemaal niet beschreven, waardoor zoutgehaltes in de zoutvang met de huidige modelopzet worden onderschat en het zout langduriger aanwezig is.

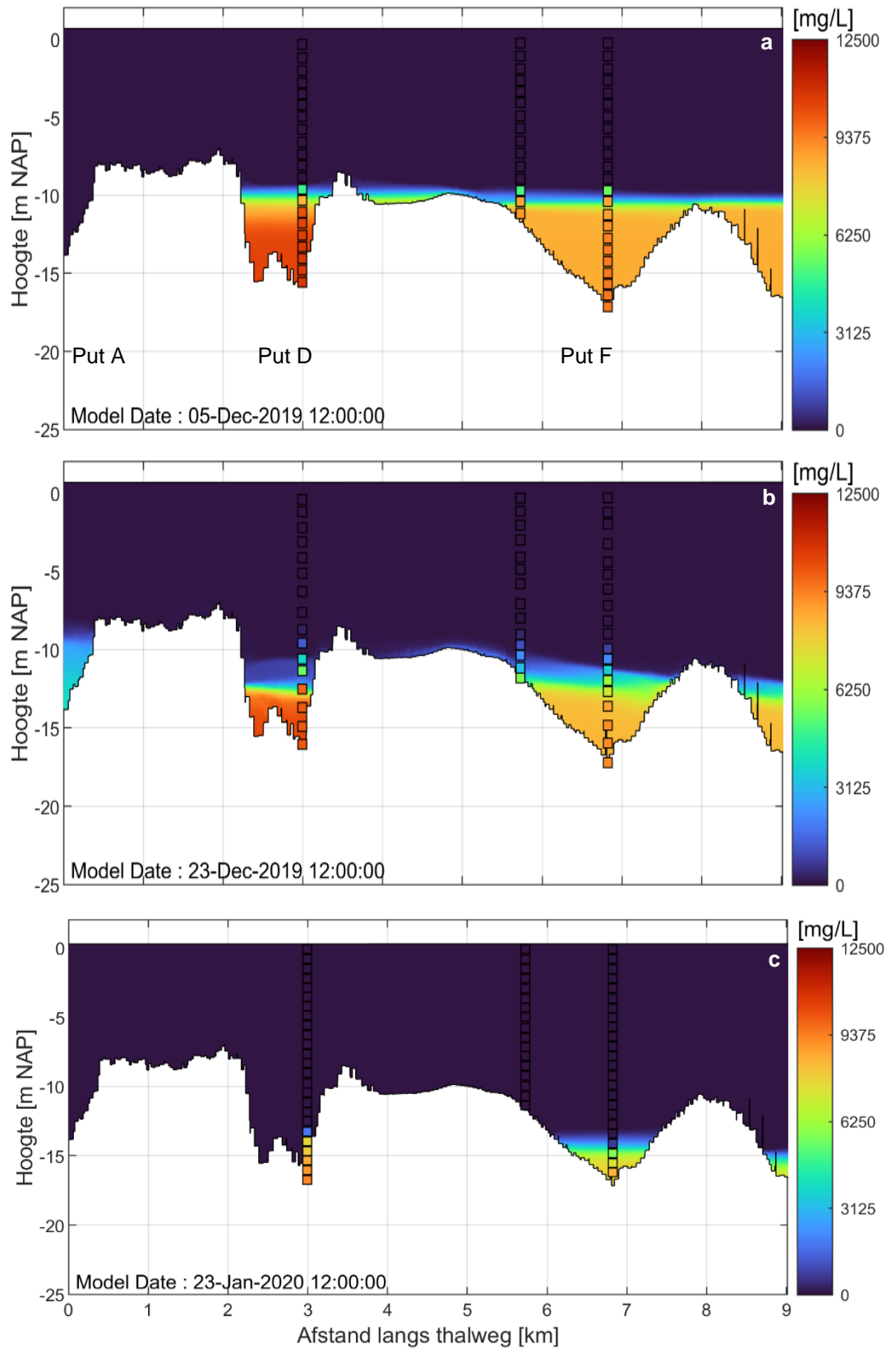
3.4 Zoutprofielen langs transecten door het Haringvliet

3.4.1 Vergelijking tussen gemeten en gemodelleerd transecten

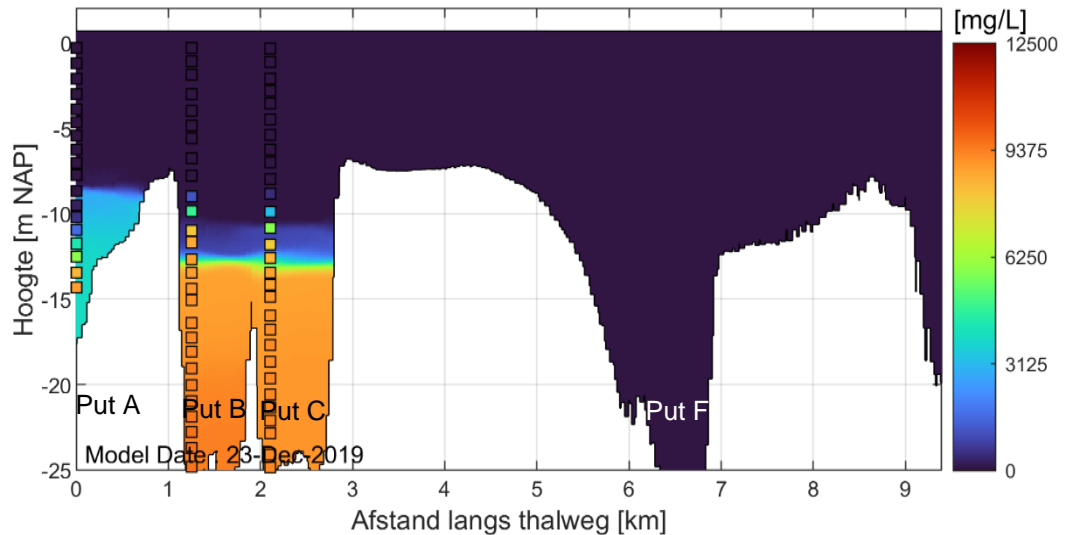
Bij de varende metingen tijdens de proefperiode zijn zoutprofielen gemeten op verschillende punten in het Haringvliet. Deze metingen geven een beeld van de verticale verdeling door het Haringvliet heen. Deze varende metingen worden aan de hand van transecten door de modelresultaten met elkaar vergeleken. De meetlocaties zijn weergegeven als punten op model-transecten in de lengterichting van het meer (Figuur 2.3). Met name de zuidelijke transect correspondeert met een transportpad waarover het zoute water vanaf de Haringvlietsluizen zich verspreidt: vanuit de zoutvang, over een drempel naar put D die daarna overloopt richting put F.

In Figuur 3.7 wordt het transect aan de zuidzijde weergegeven voor de momenten waarop varende metingen zijn uitgevoerd (met uitzondering van 28 november, de initiële condities, en 14 februari, als alle putten zijn zoetgespoeld. Deze zijn opgenomen in Bijlage B.4.

- Te zien is het model een goede beschrijving geeft van zowel de ontwikkeling van de spronglaaghoogte als van het zoutgehalte in put F. Wel is er vanaf het begin van de modelsimulatie sprake van een lichte onderschatting van de spronglaaghoogte.
- De ontzilting van put D gaat in het model te snel.
- Verder is mogelijk het effect van Visvriendelijk sluisbeheer te zien. Naast dat Put A is verzilt op 23 december, is er ook sprake van een verandering in de spronglaagsterkte voor putten D en F: waar op 5 december nog sprake is van een relatief scherpe overgang tussen de zoete bovenlaag en de zoute onderlaag, is op 23 december sprake van een meer geleidelijke overgangszone. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door het inlaten van minder verzilt zout water, wat zich als een tussenlaag bovenop de zoute onderlaag verspreidt naar het oosten toe.



Figuur 3.7 Zoutgehalte langs het transect aan de zuidzijde van het Haringvliet. Gemeten zoutgehaltes op deze momenten zijn weergegeven in de kleur van de vierkanten.



Figuur 3.8 Zoutgehalte langs het transect aan de noordzijde van het Haringvliet. Gemeten zoutgehaltes op deze momenten zijn weergegeven in de kleur van de vierkanten.

Voor de noordelijke transect is sprake van een minder variabel beeld (Figuur 3.8 en Bijlage B.4).

- Alleen Put B/C is verzilt aan het begin van de modelsimulatie, en alhoewel er sprake is van geleidelijke afschaving, blijft de put aanzienlijk verzilt tot aan het einde van de simulatieperiode.
- Alhoewel de spronglaaghoogte door het model wordt onderschat, mede veroorzaakt door de te lage inschatting aan de start van de simulatie, is de trend vergelijkbaar met metingen.
- Ook hier is op 23 december het vermoedelijke effect van Visvriendelijk sluisbeheer te zien. In Put A (ander meetpunt dan bij het zuidelijke transect) wordt de verzilting aanzienlijk onderschat, maar de vullingsgraad overschat. In het model lijkt daardoor sprake te zijn van de vorming van een licht verzilte tussenlaag in put B/C. In hoeverre de spronglaagovergang op dit moment ook in de metingen een tussenstap lijkt weer te geven, is onduidelijk. Deze is in ieder geval beperkt qua laagdikte, en minder prominent dan in het model.

3.4.2 Conclusies zoutgehalte langs transecten in het Haringvliet

De vergelijking met de varende metingen aan de hand van transecten in de lengterichting van het Haringvliet laat een goede overeenkomst zien tussen de gemodelleerde en gemeten zoutgehaltes, in het bijzonder wat betreft de spronglaaghoogte-ontwikkeling in put F. Put D ontzilt in de modelresultaten wel te snel.

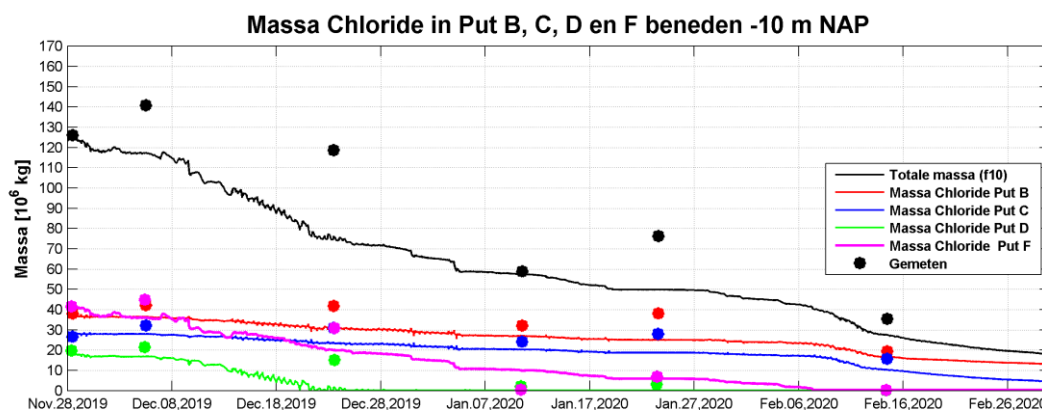
3.5 Ontwikkeling zoutmassa

3.5.1 Vergelijking tussen gemeten en gemodelleerd zoutmassa

Een globaal beeld van de manier waarop het model de verzilting in het Haringvliet beschrijft kan worden verkregen door de zoutmassa per put (en gezamenlijk) te bepalen. Dit is gedaan aan de hand van een hypsometrische curve van de verzilte putten (B, C, D en F) en het gemeten zoutprofiel afkomstig van de varende metingen en modeluitvoer van de uitvoerlocatie in iedere put. Voor iedere diepte wordt een zoutgehalte gekoppeld aan een

watermassa¹⁸, waarna door te integreren over de waterkolom een totale chloridemassa per put kan worden verkregen. Omdat de dynamiek van de verzilte onderlaag verschillend is van de bovenlaag, is daarnaast de zoutmassa in de putten (beneden -10m NAP, Figuur 3.9) en in de bovenlaag (boven -8m NAP, Figuur 3.10) apart beschouwd.

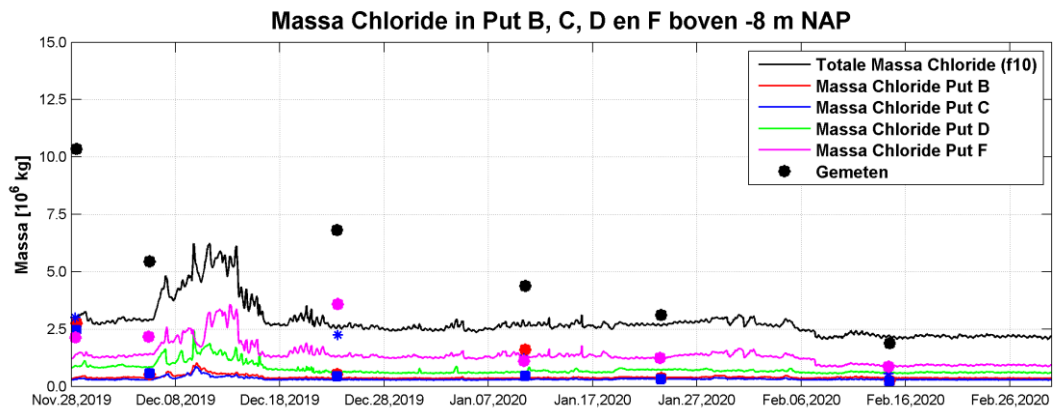
- Bij de start van de simulatie is als gevolg van het opgelegde initiële zoutveld de hoeveelheid chloride onder -10m NAP in het model gelijk aan de gemeten hoeveelheid chloride. Aansluitend is te zien dat de gemodelleerde chloridemassa in de putten geleidelijk afneemt. De gemeten chloridemassa in de putten neemt bij de volgende meting eerst toe (zie paragraaf 3.2) waarna een vergelijkbaar verloop wordt waargenomen. De sterke afname in de totale chloridemassa op 9 januari komt doordat tijdens die meting putten D en F niet over de volledige diepte zijn bemeaten en de waarde van het diepste meetpunt is geëxtrapoleerd tot de bodem.
- Met name halverwege december (rond 15 december) en begin februari (vanaf 6 februari) is er sprake van een aanzienlijke daling in de chloridemassa. Die voor de modelresultaten gekoppeld lijkt aan de aanzienlijke afvoer door de Haringvlietssluisen. De metingen suggereren met name in relatie tot de verhoogde afvoer na 6 februari een vergelijkbaar effect, maar zijn over het algemeen te laagfrequent om deze effecten af te kunnen leiden. Daarnaast is het lastig een vergelijkbare trend bij individuele putten waar te nemen.



Figuur 3.9 Chloridemassa in diepe putten (beneden -10m NAP) voor de verschillende putten. Modelresultaat: continue lijn. Stippen: varende metingen. Kleur is indicatie van de put, zwart is totale chloridemassa.

- Voor de chloridemassa in de bovenlaag (Figuur 3.10) geldt dat initieel hier de modelresultaten juist een significant verschil laten zien met metingen. Doordat in het model initieel alleen verhoogde zoutgehalten zijn opgenomen beneden -10m NAP, onderschat het model de totale chloridemassa in de bovenlaag.
- De modelresultaten laten daarnaast een significante toename in de chloridemassa zien in de periode rondom 12 december. Omdat er geen varende metingen zijn uitgevoerd in deze periode, is het niet mogelijk hier een directe vergelijking te doen.
- De varende meting van 23 december laat een verhoging in de zoutmassa in de bovenlaag zien. Dit valt samen met de periode met Visvriendelijk sluisbeheer. Het model laat in de aanloop naar deze meting ook kleine fluctuaties zien in de zoutmassa, die mogelijk worden veroorzaakt door Visvriendelijk sluisbeheer. Echter, het meest significante effect wordt hier verwacht net boven de spronglaag, en deze bevindt zich (zeker in de modelresultaten) onder de -8m NAP grens.

¹⁸ Hier is gekozen om de aanpak bij het model zo veel mogelijk gelijk te houden met de metingen en de chloridemassa te bepalen op basis van 1 uitvoerpunt per put. Het is ook mogelijk de eigenlijke zoutmassa in een put te bepalen op basis van de eigenlijke ruimtelijke zoutverdeling (zoals weggeschreven in mapvelden).



Figuur 3.10 Chloridemassa in de bovenlaag, boven verzilte putten (boven -8m NAP) voor de verschillende putten. Modelresultaat: continue lijn. Stippen: varende metingen. Kleur is indicatie van de put, zwart is totale chloridemassa.

3.5.2 Conclusies ontwikkeling zoutmassa

Op basis van de bepaling van de zoutmassa kan worden gesteld dat het model weliswaar grofstoffelijk vergelijkbare zoutmassa's in de verschillende putten beschrijft als zijn waargenomen, maar dat er verder aanzienlijke verschillen bestaan, zowel tussen de verschillende metingen, als tussen de metingen en de modelresultaten. Hierdoor en als gevolg van de beperkte meetfrequentie, is het niet mogelijk de conclusies uit eerdere analyses in dit hoofdstuk met deze methode te onderschrijven.

3.6 Ontwikkeling spronglaag

3.6.1 Vergelijking van de spronglaaghoogte in de metingen en in de modelresultaten

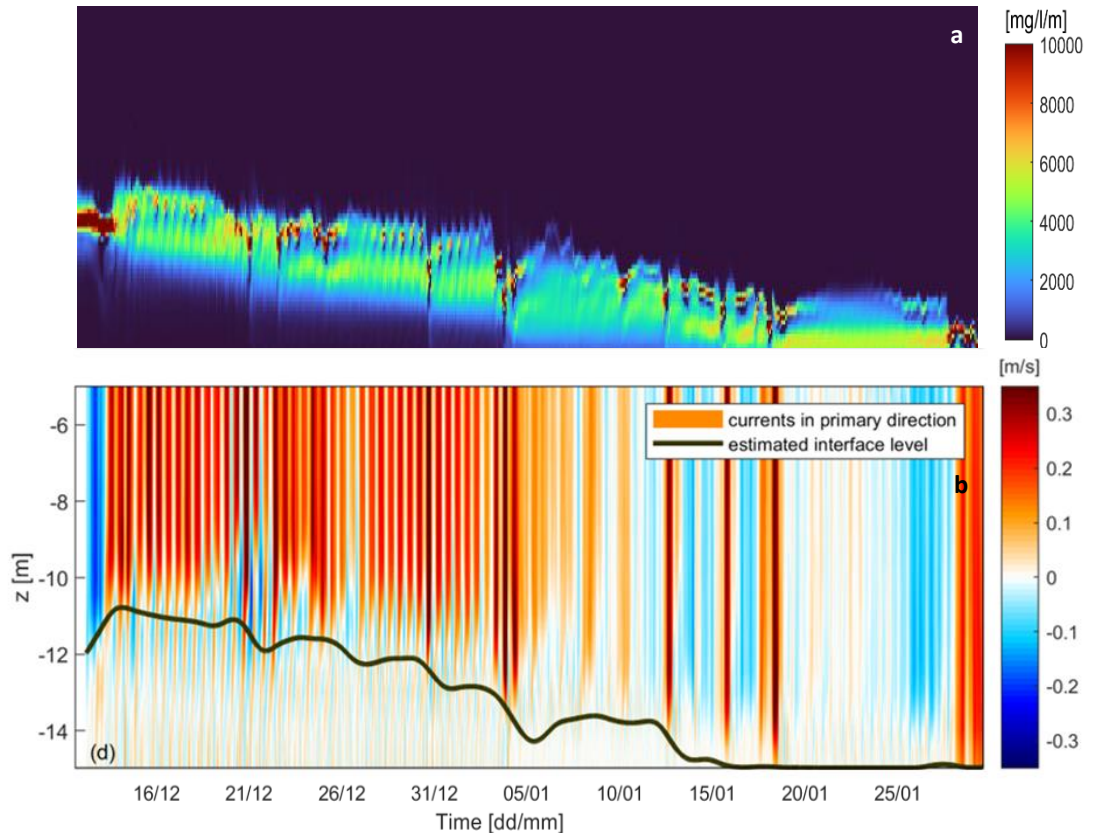
Varende en vaste meetpunten hebben beide hun eigen beperkingen met betrekking tot resolutie in ruimte en tijd. De vaste meetpunten beschrijven de zoutgradiënt in de verticaal niet in detail (de meetopstellingen in het Haringvliet maken gebruik van sensoren op 3 niveaus). De varende metingen geven wel een gedetailleerder verticaal beeld, maar worden slechts incidenteel (tijdens deze proef ongeveer eens per maand) uitgevoerd, waardoor het verloop over tijd niet in detail bekend is.

Om een nader beeld te krijgen van de ontwikkeling van de verzilting in diepe putten, is daarom in een eerdere data-analyse aan de hand van de ADCP data een schatting gemaakt van de ontwikkeling van de spronglaaghoogte in de tijd (zie Kranenburg, 2020). Hier wordt deze inschatting vergeleken met de verticale zoutgradiënt in de modelresultaten (Figuur 3.11). Merk op dat inschatting van de spronglaaghoogte vanuit de ADCP-data niet gebaseerd is op directe meting van de zoutconcentraties, maar op verschillen in akoestische reflectie (backscatter) rondom de zoet-zout overgang vanwege de dichtheidsverschillen. Het geeft daarmee dan ook vooral een beeld van de ontwikkeling in de tijd en niet zozeer een precieze beschrijving van de exacte spronglaaghoogte. Dit ook vanwege de beperkte resolutie van de ADCP-metingen (50cm bins). Het is belangrijk dit in het achterhoofd te houden bij de vergelijking met de modelresultaten.

- Over het algemeen laten de modelresultaten en de metingen een vergelijkbaar geleidelijk verloop zien.
- De op basis van ADCP data afgeleide trend laat op specifieke momenten significante verlagingen van de spronglaag zien. Deze zijn veelal terug te voeren tot afvoerpieken (Kranenburg, 2020), herkenbaar aan relatief hoge snelheden in de oppervlaktelaag. Het model laat op deze momenten een vergelijkbaar effect zien. In de verticale gradiënt in het chloridegehalte is dit zichtbaar doordat de overgangszone tussen de

zoete bovenlaag en de zoute onderlaag op die momenten intensiever wordt (van een brede groene zone, naar een rood punt).

- Hierboven is alleen de spronglaaghoogte in put F besproken. Uit eerdere analyses is al gebleken dat Put D te snel ontzilt, waardoor de trend en de effecten van afvoerpieken en wind events minder goed vergeleken kunnen worden.



Figuur 3.11 De ontwikkeling van de spronglaaghoogte in put F. Boven: Verticale gradiënt in het zoutgehalte over tijd, berekend vanuit de modelresultaten. Onder: inschatting van de ontwikkeling van de spronglaaghoogte (zwarte lijn) op basis van de backscatter van de ADCP data, samen met stroomsnelheden in de hoofdrichting (kleurenschaal).

3.6.2 Conclusies ontwikkeling spronglaag

De ontwikkeling van de spronglaaghoogte in het model is zeer goed vergelijkbaar met de schatting van de spronglaaghoogte-ontwikkeling op grond van de ADCP data. Zowel voor het model als in de metingen leiden afvoerpieken tot scherpe veranderingen in de overgang tussen de zoete bovenlaag en zoute onderlaag.

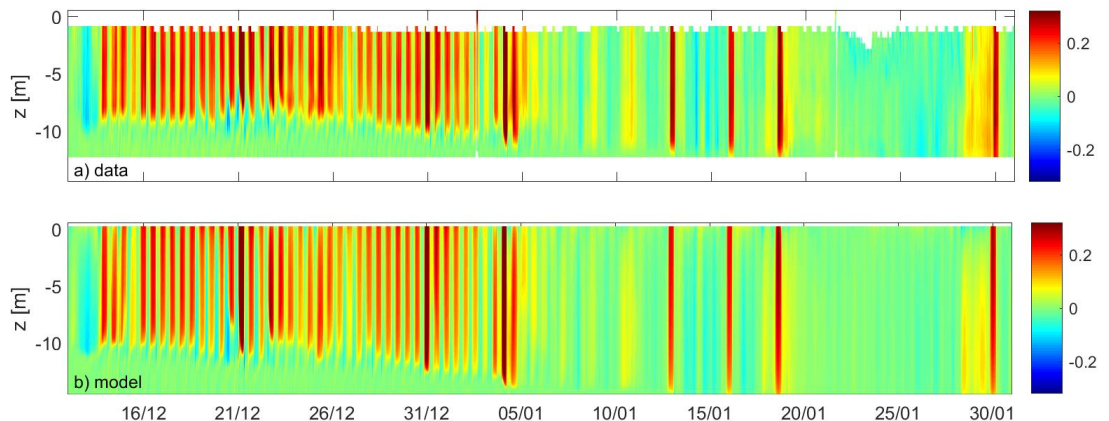
3.7 Stroomsnelheden

3.7.1 Stroomsnelheden in put D

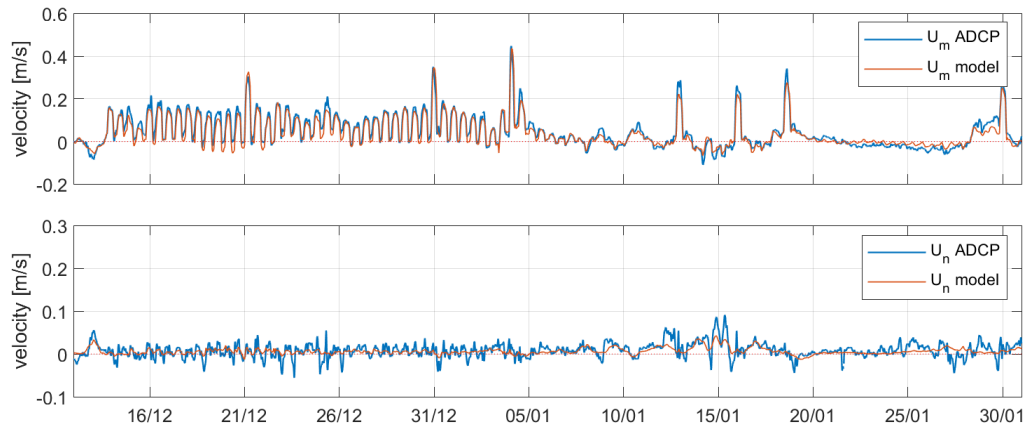
Figuur 3.12 toont een vergelijking van gemeten en berekende stroomsnelheden. De gemeten stroomsnelheden zijn afkomstig van de ADCP in put D. In postprocessing van deze data is de hoofdrichting van de snelheid bepaald door – gebruik makend van de volledige lengte van de meting – te zoeken naar de richting met maximale variantie. Dit blijkt, niet geheel verrassend, in min of meer noord-westelijke richting te zijn. Hierna zijn de oostwaartse en noordwaartse snelheidscomponenten geprojecteerd op een as in de hoofdrichting en een as (met de klok mee) haaks daarop. Na de as rotatie zijn de snelheden enigszins gefilterd met een boxcar filter met filterlengtes van 1 uur en 1.5m, om fluctuaties en ruis op zeer korte tijd

en ruimteschaal uit het signaal te verwijderen, zie Kranenburg et al. (2023) voor meer informatie over deze postprocessing. De getoonde gemeten snelheden zijn de snelheden in de hoofdstroomrichting en na filtering. De modelresultaten voor oostwaartse en noordwaartse snelheden zijn geprojecteerd op dezelfde assen in de hoofd- en dwarsrichting, en de figuur toont ook voor de modelresultaten de snelheidscomponent in de hoofdstroomrichting. Merk op dat voor het model de stroomsnelheden over de volledige waterdiepte worden gegeven, maar dat bij de ADCP als gevolg van de meettechniek een zone bij oppervlak en bodem niet bemeten is.

Figuur 3.12 laat zien dat de gemeten en berekende snelheden in de hoofdstroomrichting voor put D zeer vergelijkbaar zijn. Ze laten snelheden zien met overeenkomende stroomsterkte, vertonen goed vergelijkbare gedrag over de verticaal, en laten overeenkomende reacties zien op pieken in de forcering door spuidebiet (bijvoorbeeld 13 januari) of wind (bijvoorbeeld 12 december). Het kleurverschil over de verticaal laat zien dat het verschil in gedrag tussen de stroming in de bovenlaag en de onderlaag hetzelfde is in meting en model: in beide gevallen is er tijdens spuien een sterke stroming in hoofdrichting in de bovenlaag, met daaronder een nagenoeg stagnante zone. Verder kan in beide gevallen soms tegen het einde van een spui-event een kleine stroming in tegengestelde richting optreden rond de spronglaag, en wordt de zone waarin dit optreedt rond 20 december tijdelijk een stuk dikker. (Dat laatste is waarschijnlijk gelinkt aan de vorming van een tussenlaag als gevolg van Visvriendelijk spuien in de tweede helft van december). Ook de verlaging van de spronglaag is terug te zien zowel in meting als model. Wel is te zien dat in de modelresultaten de hoge snelheden zich eind december / begin januari uitstrekken over een groter deel van de verticaal. Dit is consistent met het eerder gevonden resultaat dat put D in het model sneller ontzilt dan in de metingen.



Figuur 3.12 Vergelijking van gemeten en berekende stroomsnelheden voor put D. a) Gemeten stroomsnelheden in de hoofdstroomrichting (308°) als functie van diepte en tijd. b) Berekende stroomsnelheden in de hoofdrichting.

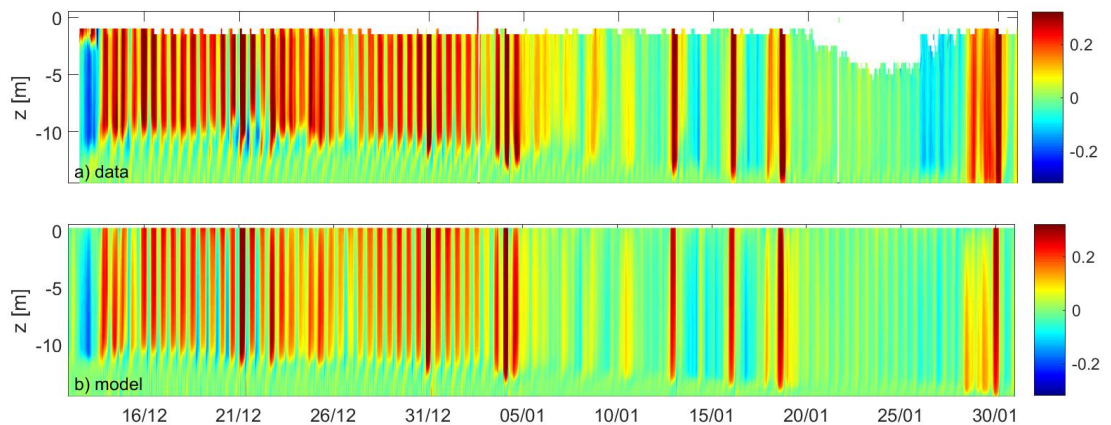


Figuur 3.13 Vergelijking van gemeten en berekende dieptegemiddelde stroomsnelheden voor put D. Boven: Stromingscomponent in de hoofdrichting (308°). Onder: Stromingscomponent in de dwarsrichting. Meetresultaten zijn weergegeven in blauw, modelresultaten in oranje.

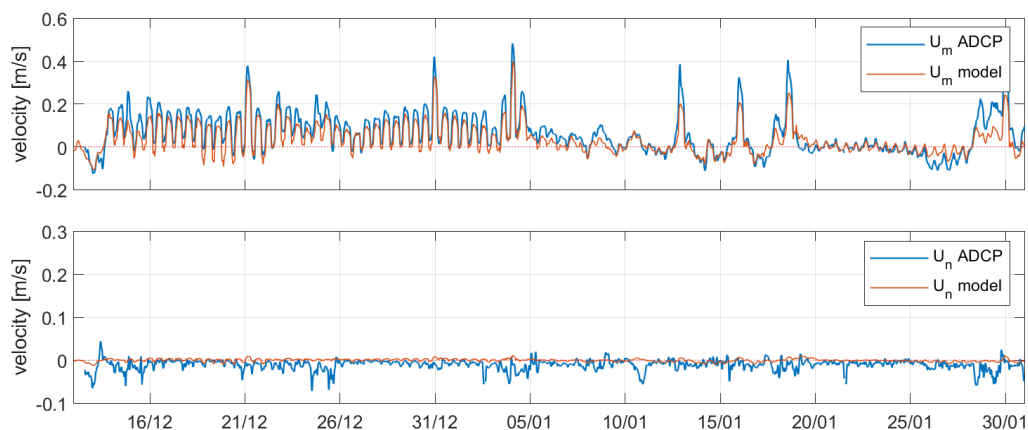
Figuur 3.13 toont de gemeten en berekende dieptegemiddelde stroomsnelheden in put D in hoofd- en dwarsrichting. Net als voor de diepte-variërende snelheden laten de dieptegemiddelde snelheden in hoofdrichting zien dat het model goede resultaten geeft voor de grootte van de stroomsnelheden. Het feit dat de berekende (dieptegemiddelde) snelheden in dwarsrichting zeer klein zijn, betekent dat ook de richting van de berekende stroming over het geheel record genomen goed overeenkomt met de metingen. Het is opvallend dat de dieptegemiddelde stroming in dwarsrichting voor de meting een stuk meer varieert dan voor het model (merk op dat de schaal wel anders is in het onderste figuur). Blijkbaar is de stroomrichting in de metingen gevoeliger voor veranderingen onder invloed van bijvoorbeeld wind dan in de modelresultaten. Maar het verschil tussen 'dieptegemiddelde' dwarsstroming in model en meting kan wellicht ook komen doordat de ADCP-metingen niet de hele diepte bestrijken. De vergelijking zou wat dat betreft netter zijn als de 'dieptegemiddelde' stroming vanuit de modelresultaten berekend wordt voor hetzelfde deel van de verticaal dat in de metingen aanwezig is.

3.7.2 Stroomsnelheden in put F

Figuur 3.14 en Figuur 3.15 tonen een zelfde data-modelvergelijking voor de stroomsnelheden in put F.



Figuur 3.14 Vergelijking van gemeten en berekende stroomsnelheden voor put F. a) Gemeten stroomsnelheden in de hoofdstroomrichting (303°) als functie van diepte en tijd. b) Berekende stroomsnelheden in de hoofdrichting.



Figuur 3.15 Vergelijking van gemeten en berekende dieptegemiddelde stroomsnelheden voor put F. Boven: Stromingscomponent in de hoofdrichting (303°). Onder: Stromingscomponent in de dwarsrichting. Meetresultaten zijn weergegeven in blauw, modelresultaten in oranje.

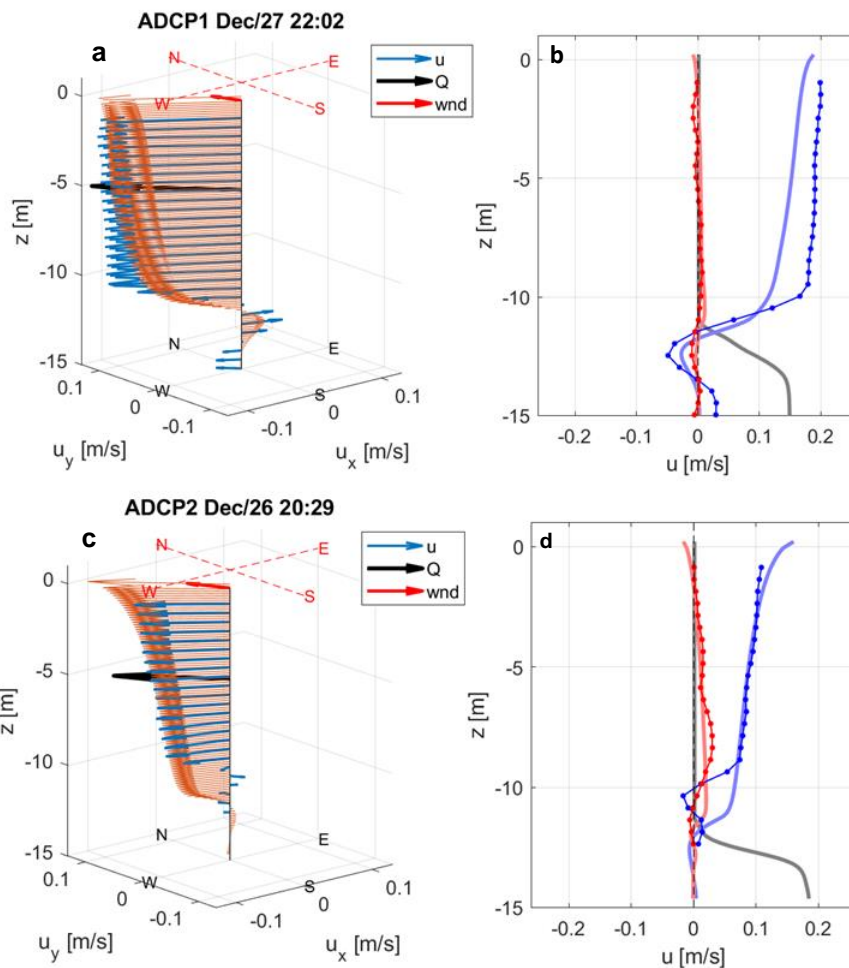
Deze figuren laten zien dat de ook voor put F de modelresultaten voor stroming in het algemeen goed vergelijkbaar zijn met de metingen: we zien weer dat zowel in data als model de stroming vooral plaatsvindt in de zoete bovenlaag en dat deze het grootst is tijdens het spuien; verder is ook de vergelijkbare verlaging van de spronglaag goed terug te zien. Een verschil is dat de gemodelleerde dieptegemiddelde snelheden in hoofdstroomrichting een stukje kleiner zijn dan die in de metingen. Het model lijkt de stroomsnelheden in put F dus iets te onderschatten.

3.7.3 Vergelijking van snelheidsprofielen voor spui- en windsituatie

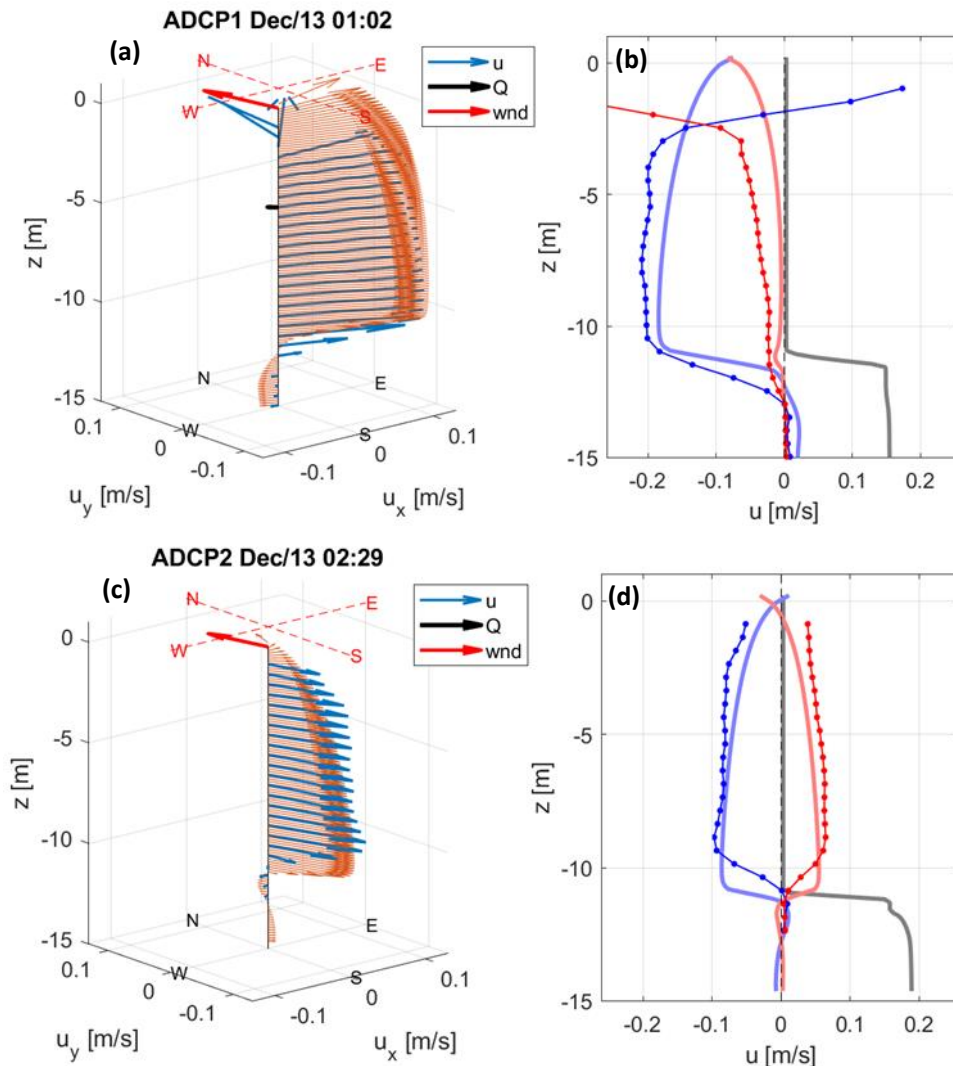
In Figuur 3.16 en wordt ingezoomd op een moment waarop aanzienlijk wordt gespuid en in Figuur 3.17 op een moment waarin de sluizen dicht zijn en de wind de dominante forcering is.

Figuur 3.16 bevestigt het eerdere beeld dat modelresultaten en metingen voor stroomsnelheden en stroomrichtingen goed vergelijkbaar zijn. Het stromingsprofiel in de modelresultaten lijkt wat uitgesprokener: waar de metingen een kleine retourstroom laten zien in/onder de grenslaag, is deze in de modelresultaten wat sterker aanwezig, inclusief nog een stromingsomkering nog dicht bij de bodem. Ook lijkt de windinvloed nabij het oppervlak wat duidelijker aanwezig in de modelresultaten dan in de data, al kan dat ook komen doordat de data niet helemaal doorlopen naar het oppervlak en doordat er op de data een filter is toegepast. Verder is in deze profielen ook terug te zien dat de modelresultaten de stroming in put F iets onderschatten en dat put D te snel ontzilt, waardoor in het model de grenslaag lager ligt en het stroomprofiel bij het spuien tot iets grotere diepte stroming in de hoofdrichting laat zien.

Figuur 3.17 laat zien dat ook voor een wind-gedomineerde situatie de modelresultaten en metingen zeer vergelijkbaar zijn wat betreft de richting en grootte van de stroomsnelheden. Hier is vooral relevant dat de modelresultaten in overeenstemming met de metingen een stroming laten zien tegen de windrichting in. Deze stroming tegen de windrichting in bij wind in langsricting was een belangrijke observatie in de data-analyse (Kranenburg, 2020; Kranenburg et al., 2023), en het is voor onderzoek naar zoutverspreiding bij nalevering zeer positief dat dit fenomeen goed wordt gereproduceerd. Hier gaan we in paragraaf 4.1 nog wat dieper op in.



Figuur 3.16 Vergelijking gemeten en gemodelleerde stroomsnelheidsprofielen in put F (ADCP1) en put D (ADCP2) voor een spui-situatie. a & c) Blauwe pijlen tonen meting, oranje pijlen modelresultaat (per laag). b & d) Blauw is stroming in hoofdrichting (grofweg noordwest), rood stroming in dwarsrichting. De doorgetrokken strepen tonen de modelresultaten, de lijnen met bolletjes de metingen. De grijze lijn laat de vorm zien van het berekende dichtheidsprofiel op dat moment.



Figuur 3.17 Vergelijking gemeten en gemodelleerde stroomsnelheidsprofielen in put F (ADCP1) en put D (ADCP2) voor een wind-situatie. a & c) Blauwe pijlen tonen meting, oranje pijlen modelresultaat. b & d) Blauw is stroming in hoofdrichting (grootweg noordwest), rood stroming in dwarsrichting. De doorgetrokken strepen tonen de modelresultaten, de lijnen met bolletjes de metingen. De grijze lijn laat de vorm zien van het berekende dichtheidsprofiel op dat moment.

3.8 Discussie ontwikkeling zoute onderlaag in put D en put F

Het model laat een aanzienlijk snellere ontzilting van Put D zien dan wordt gemeten. De overgang tussen de zoete bovenlaag en de zoute onderlaag wordt door het model sneller afgeschaafd dan zichtbaar in de metingen, terwijl het zoutgehalte in de onderlaag relatief vergelijkbaar blijft. Daarnaast is relevant dat metingen en model voor put F juist een vergelijkbare ontwikkeling van het zoutgehalte laten zien. De vraag die daarbij opkomt, is of aan de hand van de hierboven beschreven vergelijkingen een verklaring kan worden gegeven waarom put D in het model te snel ontzilt, en put F niet.

De wat te snelle ontzilting van put D in het model betekent waarschijnlijk dat er in het model wat te veel menging optreedt. De vraag is dan waardoor deze menging wordt veroorzaakt.

- Er zijn verschillende zaken van invloed op de snelheid van de menging. Sommige kunnen al op voorhand worden uitgesloten als mogelijke oorzaak van de hier waargenomen ontzilting. Dit geldt bijvoorbeeld voor een lager zoutgehalte (put D is juist sterker verzilt) of een meer geleidelijke spronglaagovergang tussen de zoete

bovenlaag en de zoute onderlaag (in het model wordt de spronglaag juist scherper opgelegd, doordat alleen onder -10m NAP verhoogde zoutgehaltenes worden opgelegd).

- iets wat wel relevant kan zijn, is dat juist in put F de stroomsnelheden worden onderschat. In put D zijn de stroomsnelheden juist, maar lijkt iets teveel menging aanwezig. In put F is de snelheid van de ontziltting goed vergelijkbaar met metingen, maar de stroomsnelheid wat te laag. Mogelijk geeft het model voor gelijke stroomsnelheden als in de metingen een iets grotere menging dan aanwezig in de metingen, en daardoor een wat snellere afschaving van de onderlaag.
- Een andere mogelijke oorzaak, die verder niet is onderzocht, is de mate waarin de bathymetrie een rol heeft gespeeld in de versnelde opmenging van put D. Mogelijk heeft de hydrostatische modelaanpak in combinatie met de hellingshoek van de taluds van de drempels¹⁹ er toe geleidt dat de stroming over de drempel tussen putten D en A wordt overschat, of alternatief dat de hoogte van de drempel als gevolg van het (relatief grove) rekenrooster en de interpolatie van bodempunten naar het rekenrooster er toe heeft geleidt dat de drempelhoogte wordt onderschat.
- Tot slot zou in het model ook sprake kunnen zijn van een overschatting van de menging door numerieke oorzaak. Dit is echter nog niet verder onderzocht.

Maar mogelijk is er ook sprake van een andere relatie tussen de verschillende putten dan door het model wordt beschreven. De snelheid waarmee de spronglaag in de modelberekeningen uitzakt is in put D niet zo verschillend van putten F en C, terwijl de gemeten vullingsgraad redelijk constant lijkt. Mogelijk wordt in werkelijkheid de ontziltting van put D aangevuld met zout vanuit bijvoorbeeld de zoutvang.

3.9 Conclusies

Een directe vergelijking tussen model en meting laat zien dat het model de hydrodynamica in het Haringvliet redelijk goed beschrijft.

Het model beschrijft de zoet-zout dynamiek in het Haringvliet voor de situatie waarbij er sprake is van verzilte diepe delen redelijk goed. Het model kan de dynamiek kwalitatief goed beschrijven, en is redelijk in staat de processen kwantitatief te beschrijven.

- Het zoutgehalte in de diepe delen waar sprake is van een verzilte onderlaag wordt door het model vrij goed beschreven, en is in lijn met gemeten waardes. De enige locatie waar dat minder het geval is, is Put D die te snel ontzilt.
- Het zoutgehalte in de zoete bovenlaag vertoont dezelfde patronen als gemeten, maar omdat het gaat over zeer kleine schommelingen in het zoutgehalte die de orde grootte hebben van de geschatte modelonzekerheid, wordt geadviseerd modelresultaten kwalitatief te beschouwen.
- De ontwikkeling van de spronglaag tussen de zoete bovenlaag en de zoute onderlaag is voor put F ook in lijn met de gemeten condities. Het model beschrijft het stapsgewijze afschaven van de zoute onderlaag als gevolg van wind en afvoerpieken, dit is vergelijkbaar met wat is waargenomen.

¹⁹ Bij verzilttingsonderzoek in het IJsselmeer aan de hand van een 3D model is ook geopperd dat de horizontale resultie van invloed kan zijn op de beschrijving van de stratificatie over sterk variërende bodems (Bijlsma et al, 2022).

- Het model is beperkt in staat het inlaten van zout als gevolg van Visvriendelijk sluisbeheer te beschrijven. De beschrijving van het gedrag in de zoutvang (put A) wordt door het model slechts beperkt weergegeven voornamelijk als gevolg van de gehanteerde randvoorwaarden bij de sluisen. Het resulterende effect op de verder stroomopwaarts gelegen gebieden kan alleen indicatief worden vergeleken met metingen. Daar lijkt het model de vorming van een licht-verzilte tussenlaag als gevolg van Visvriendelijk sluisbeheer redelijk te beschrijven.

Het model beschrijft de stroomsnelheden in het Haringvliet redelijk tot goed:

- Het model weet de diepte-gemiddelde stroomsnelheid goed te reproduceren, met name in de hoofdrichting. Het model laat wel een lichte onderschatting van de maximale stroomsnelheden zien in put F.
- Over de diepte beschrijft het model de variatie in de stroomsnelheid zeer vergelijkbaar met de gemeten profielen. Stroming treedt vooral op in de zoete bovenlaag, met slechts een zeer beperkte doorwerking in de zoute onderlaag. Door afschaving van de spronglaag, wordt het stroomvoerende deel zowel in het model als in de metingen groter over tijd.
- Het model beschrijft de afvoerafhankelijke stroomsnelheidsvariatie goed, en laat een vergelijkbare dynamiek zien als is gemeten.
- De wind-gedreven stromingsomkering in de diepe delen van het bekken (met name bij NW en ZO wind) wordt door het model goed gereproduceerd.

3.10 Vervolg vragen

Om een verdere uitspraak te doen over de toepasbaarheid van het model, zal in het volgende hoofdstuk in meer detail worden gekeken naar de manier waarop het model de fysische processen kan beschrijven. Deze vervolgstap gaat voorbij aan de vergelijking met metingen, en bevat een beschouwing van de dynamica die het model laat zien. De vraag daarbij is met name in hoeverre de gevolgen van externe invloeden op de hydrodynamica en in het bijzonder de zoet-zout dynamiek in het meer kunnen worden verklaard.

4 Analyse modelgedrag

Als vervolg op de toetsing van de modelresultaten door directe vergelijkingen met metingen in het vorige hoofdstuk, wordt in dit hoofdstuk nader ingegaan op meer geaggregeerd modelgedrag. Dat is enerzijds nog steeds een soort van toetsing: is het modelgedrag plausibel? We trachten ter beantwoording van deze vraag het door het model beschreven effect (of gedrag) aan de hand van de te verwachten fysische processen te verklaren. Anderzijds is het ook een stap in het uitbouwen van het begrip van de fysische processen: wat vertelt de huidige toepassing van het model ons over de werking van het systeem? Beide dragen bij aan de discussie over toepassingsmogelijkheden van het model.

Bij deze nadere interpretatie van de modelresultaten zal de aandacht specifiek uitgaan naar de respons van het systeem onder verschillende externe invloeden, namelijk:

- Het effect van de wind
- Het effect van afvoer door de Haringvlietsluizen
- Het effect van het getij-gedreven debiet door het Spui
- Het effect van Visvriendelijk sluisbeheer

Om dit te onderzoeken zijn enkele aanvullende simulaties uitgevoerd waarin specifieke processen (wind, Visvriendelijk sluisbeheer) zijn aangepast of uitgeschakeld. Aan de hand van deze aanvullende simulaties kan een goed beeld worden verkregen van hoe de verschillende externe invloeden de dynamica in het meer beïnvloeden.

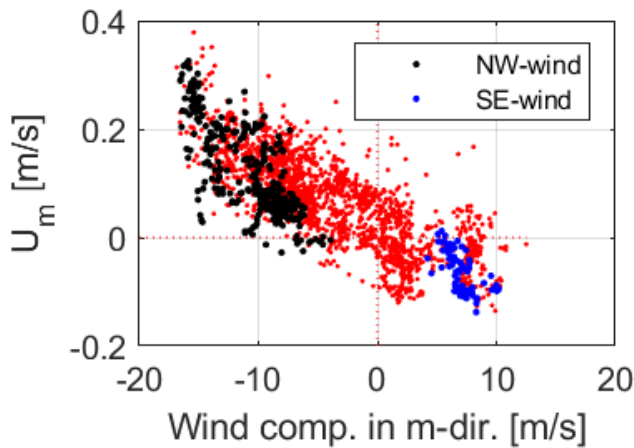
In dit hoofdstuk worden alleen de belangrijkste figuren weergegeven, voor de resterende figuren wordt verwezen naar Bijlage C.

4.1 Effect van wind

4.1.1 Bevindingen uit data-analyse

In de eerdere analyse van de metingen van seizoen 2019-2020 (Kranenburg, 2020; Kranenburg et al., 2023) is voor de situatie met gesloten sluisen gevonden dat wind in de lengterichting van het Haringvliet in geul D en F zorgt voor een (dieptegemiddelde) stroming tegen de wind in. Dit komt erop neer dat voor wind uit het noordwesten in de geulen een stroming wordt gevonden in noordwestelijke richting, terwijl wind uit zuidoostelijke richting in de geulen leidt tot een dieptegemiddelde stroming richting het zuidoosten. Dat was al zichtbaar voor een instantaan profiel in put D en F in Figuur 3.17. Figuur 4.1 laat zien dat dit geen incidentele waarneming was. In dit figuur is voor put F de (dieptegemiddelde) stroming in hoofdrichting uitgezet tegen de component van de wind in die richting. Dit laat duidelijk zien dat hier sprake is van een negatieve correlatie.

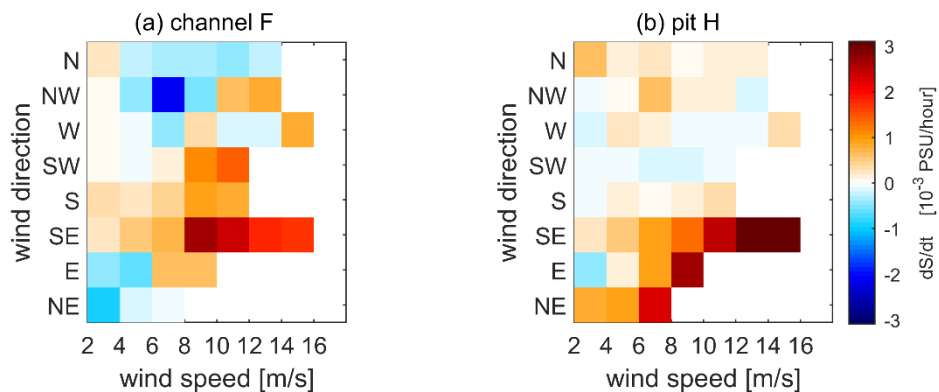
Deze observatie van stroming tegen de wind in boven put D en F is eerder als volgt verklaard: de windschuifspanning zorgt voor opzet aan de benedenwindse kant van het Haringvliet. Deze opzet zorgt voor een drukgradiënt, die een kracht levert tegen de wind in. Voor een meer met constante diepte zijn de krachten ten gevolge van windschuifspanning en opzet met elkaar in evenwicht. Maar in geval van niet-uniforme diepte is er zowel boven de ondiepe delen als boven de diepere delen sprake van een onbalans. Boven de ondiepe delen wint de windschuifspanning en wordt er een (dieptegemiddelde) stroming aangedreven in de richting van de wind (die versnelt totdat bodemschuifspanning zorgt voor een evenwicht). Boven de diepe delen wint de kracht ten gevolge van de opzet, en ontstaat er een stroming tegen de wind in.



Figuur 4.1 Stroming versus wind. De component in de hoofdrichting (303°) van de dieptegemiddelde stroming boven put F (ADCP1), uitgezet tegen de wind-component in die richting. De zwarte en blauwe bolletjes geven de resultaten aan voor situaties met wind uit noordwestelijke respectievelijk zuidoostelijke richting. (Nader uitgewerkte versie te vinden in Kranenburg et al., 2023).

De stroomsnelheid kan natuurlijk nog steeds variëren over de verticaal. Zo zal de wind ervoor zorgen dat het profiel aan de bovenkant met de wind mee buigt (al kan de stroming zelfs aan het oppervlak nog steeds tegen de wind in gericht zijn). Verder is de stroming in de zoute onderlaag klein – en als aanwezig vaak tegengesteld. De sterkste stroming tegen de wind in wordt dan dus gevonden op ongeveer halve diepte van de zoete bovenlaag.

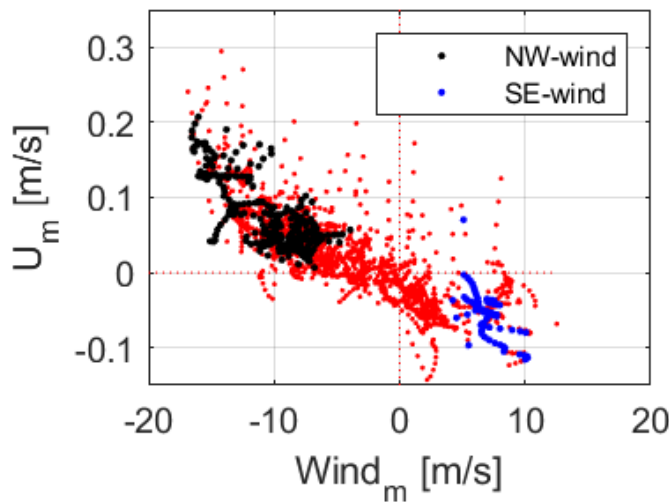
De stroming tegen de wind in bleek een belangrijk mechanisme te zijn voor transport van zout in zuidoostelijke richting. In de data analyses werd voor de niet-verzilte putten F en H gemiddeld genomen een toename gevonden van de chlorideconcentraties nabij het oppervlak voor wind vanuit het zuidoosten, zie Figuur 4.2.



Figuur 4.2 Gemiddelde snelheid van verandering van de saliniteit op 2m onder het water oppervlak voor put F (a) en H (b) als functie van de windsnelheid en windrichting, berekend over de perioden in het seizoen 2019-2020 met gesloten sluizen en zout aanwezig in de putten. Zuid-oostelijke wind leidt duidelijk tot toenemende concentraties zowel boven put F als put H, zoals zichtbaar is aan de rode kleur. Omrekening: een saliniteitsverandering van $3 \cdot 10^{-3}$ PSU/uur komt overeen met een chlorideconcentratieverandering van 1.7mg/l/uur. (Figuur afkomstig uit Kranenburg et al., 2023).

4.1.2 Verband wind-stroming in model

De stroming tegen de wind boven de putten D en F voor wind in de lengterichting van het Haringvliet is ook terug te vinden in de modelresultaten. We zagen dat al in de vergelijking van twee gemeten en gemodelleerde stroomprofielen in Figuur 3.17. We zien dat voor een hele verzameling aan dieptegemiddelde snelheden ten tijde van gesloten sluizen in Figuur 4.3. Net als voor de meetdata wordt voor de modelresultaten een negatieve correlatie gevonden tussen de component van de dieptegemiddelde stroming in hoofdstroomrichting en de component van de wind in die richting, met daarbij stroming in zuidoostelijke richting voor wind vanuit het zuidoosten. Hoewel de grootte van de gegenereerde stroming in het model iets kleiner lijkt, draagt deze bevinding van een vergelijkbaar verband tussen stroming en wind in data en modelresultaten bij aan het vertrouwen in het gedrag van het model.

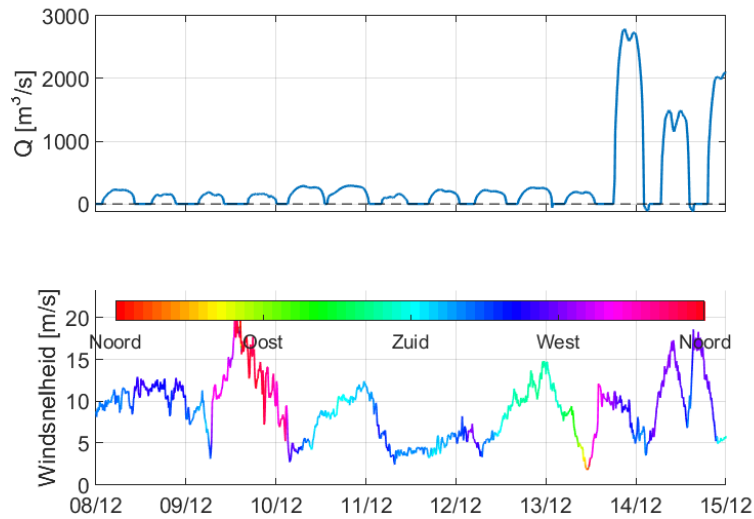


Figuur 4.3 Stroming versus wind voor put F, als Figuur 4.1, maar nu voor modelresultaten.

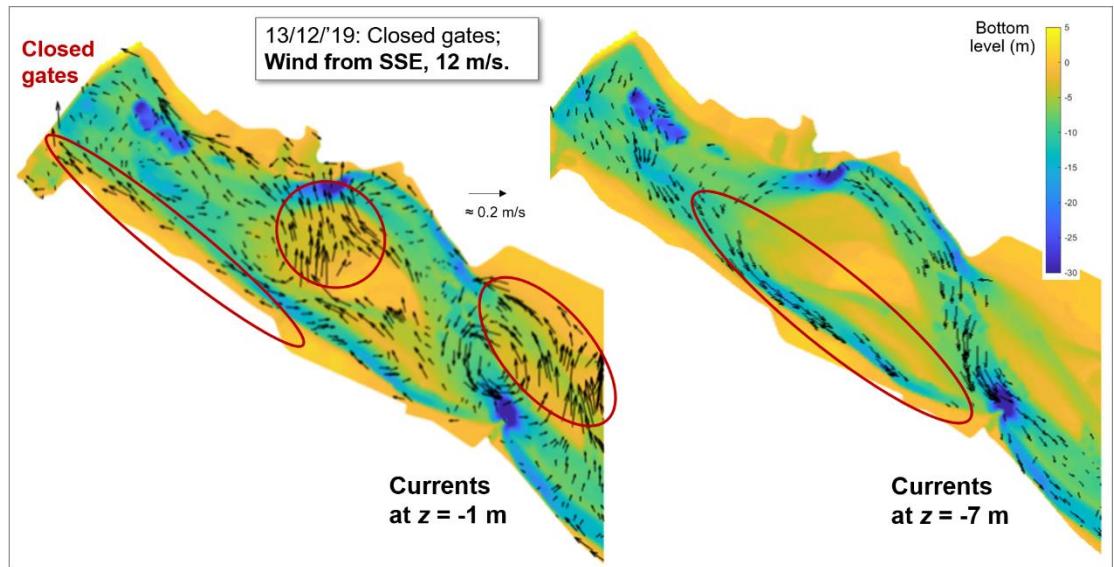
4.1.3 Ruimtelijke stromingspatronen

Waar de metingen alleen inzicht geven in de stroming op de meetlocaties, geven de modelresultaten een ruimtelijk beeld. Dat biedt de gelegenheid de eerdere verklaring voor de gevonden stroming tegen de wind in bij wind in langsrichting nader te toetsen en de kennis van het systeemgedrag uit te breiden. Als de eerdere verklaring juist is, mogen we in zo'n geval boven de ondiepe delen een stroming verwachten met de wind mee.

Figuur 4.5 toont de stroomsnelheden op -1m en -7m NAP voor een situatie met gesloten sluizen en wind vanuit het zuid-zuidoosten (zie Figuur 4.4 voor de forcerings-condities op en rondom het geselecteerde moment, 13 december 00:00 uur). Dit proces wordt echter meerdere malen onder verschillende windcondities waargenomen in de modelresultaten.

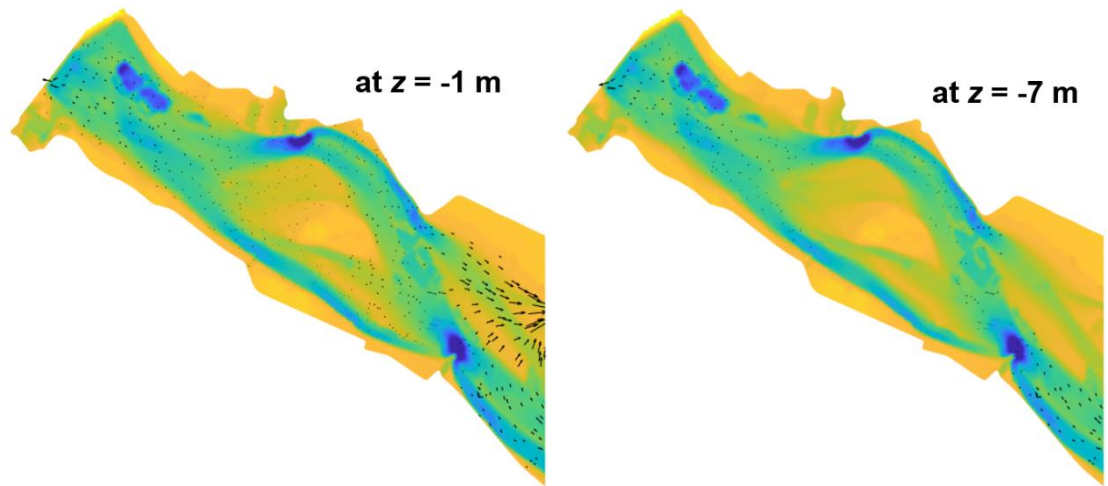


Figuur 4.4 Spuidebiet en windcondities voor een week in december 2019.



Figuur 4.5 Stroomsnelheden op 1m en 7m beneden NAP voor een situatie met gesloten sluisen en wind van 12m/s vanuit het zuid-zuidoosten (13/12/2019, 00:00).

De figuur toont inderdaad voornamelijk stroming in westelijke tot noordelijke richting over de ondiepere delen van het Haringvliet. Dit geldt bijvoorbeeld voor de ondiepe plaat in het midden van het systeem, maar ook voor de ondiepe strook aan de zuidwestelijke zijde. Boven een groot deel van de diepere delen van het systeem wordt daarentegen een (geulvolgende) stroming in zuidelijke tot oostelijke richting gevonden (merk op dat de figuur de stroming toont op -7m NAP, dus nog ruim boven de positie van de gemodelleerde spronglaag). Deze resultaten zijn in lijn met de uitleg dat er sprake is van een wind-gedreven horizontale circulatie met stroming met de wind mee over de ondiepe delen en stroming tegen de wind in boven de diepere delen, verklaard door een onbalans tussen de kracht ten gevolge van de windschuifspanning en van de opzet. Om nog zekerder te weten dat het stroombeeld inderdaad veroorzaakt wordt door de wind – en niet door bijvoorbeeld getijstrooming via het Spui – worden in Figuur 4.6 resultaten getoond voor hetzelfde moment, maar dan uit een simulatie zonder windforcering. Hierin is de stroming in het grootste deel van het systeem bijzonder klein en nagenoeg verwaarloosbaar, wat aangeeft dat hier daadwerkelijke sprake is van windgedreven stromingspatronen.



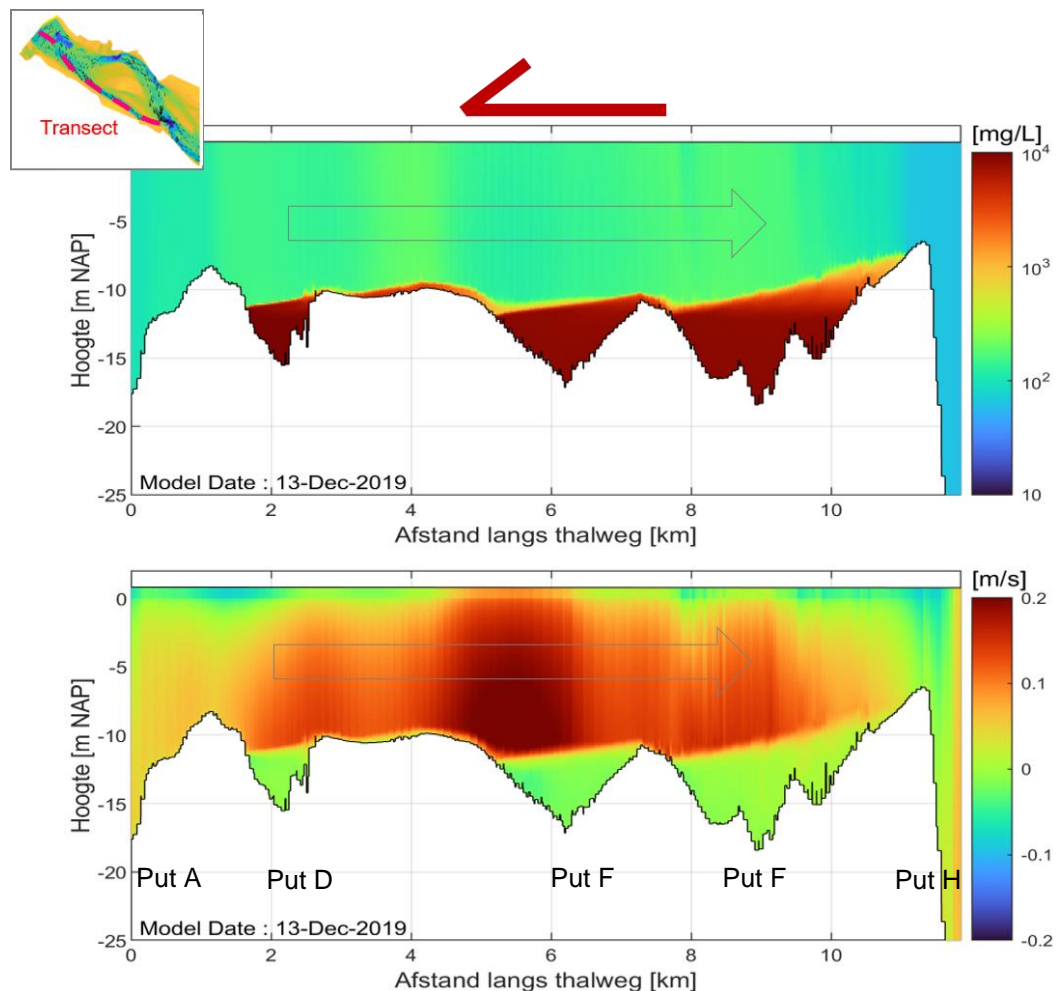
Figuur 4.6 Stroomsnelheden op 1m en 7m beneden NAP voor hetzelfde moment als in Figuur 4.5, maar dan uit een simulatie zonder windforcering.

4.1.4 Van stroming naar zouttransport

Figuur 4.7 toont langsdoorsneden van de chlorideconcentratie en de stroomsnelheid in langsricting voor hetzelfde moment als in de voorgaande figuren, dus weer met gesloten sluizen en 12m/s wind vanuit het zuid-zuidoosten. De doorsnede is genomen over het zuidelijke transect put A-D-F-H en volgt min of meer de thalweg (zoals weergegeven in Figuur 3.7). In lijn met de voorgaande discussie over de horizontale circulatie zien we langs een groot deel van de doorsnede en over een groot deel van de waterkolom stroomsnelheden in zuidoostelijke richting. Nabij het oppervlak heeft de wind meer vat op de stroming en is de snelheid lager of zelfs met de wind mee gericht. Deze resultaten zijn plausibel en geven aan over hoe groot gebied de stroming tegen de wind in op kan treden.

De langsdoorsnede voor chlorideconcentraties laat zien dat de concentraties in de bovenlaag toenemen. Er wordt blijkbaar zout opgemengd en blijkt de nagenoeg verticaal uniforme concentratie in de bovenlaag, verspreidt zich dit nagenoeg direct over de hele verticaal. In een animatie van doorsneden voor opeenvolgende momenten (bij dit rapport bijgeleverd, zie Bijlage F) is te zien dat dit opgemengde zout door de stroming wordt meegevoerd. Rondom het hier getoonde moment wordt het zout door de stroming naar het zuidoosten getransporteerd. De gevonden stroomsnelheden zijn groot genoeg om zout dat wordt opgemengd vanuit put D binnen de duur van een windevent naar put H te verplaatsen (met een snelheid van 0.15m/s zijn er zo'n 18uur nodig voor een verplaatsing over 10km)²⁰.

²⁰ Deze bevindingen worden onder andere bepaald door de windrichting en -kracht in combinatie met de mate van verzilting (spronglaaghoogte en verziltingsgraad) in put D.



Figuur 4.7 Langsdoorsnede over zuidelijk transect (zie inzet). Boven) chlorideconcentratie (log-schaal); Onder) stroomsnelheden in transectrichting (hier positief naar het zuidoosten). Pijlen: overall beeld, met in rood de windschuifspanning en in grijs de stromings- en transportrichting. Doordat de transect niet exact de diepste delen van de geul wist te volgen, is put F in dit figuur onderbroken, in werkelijkheid is dit een aaneengesloten geul.

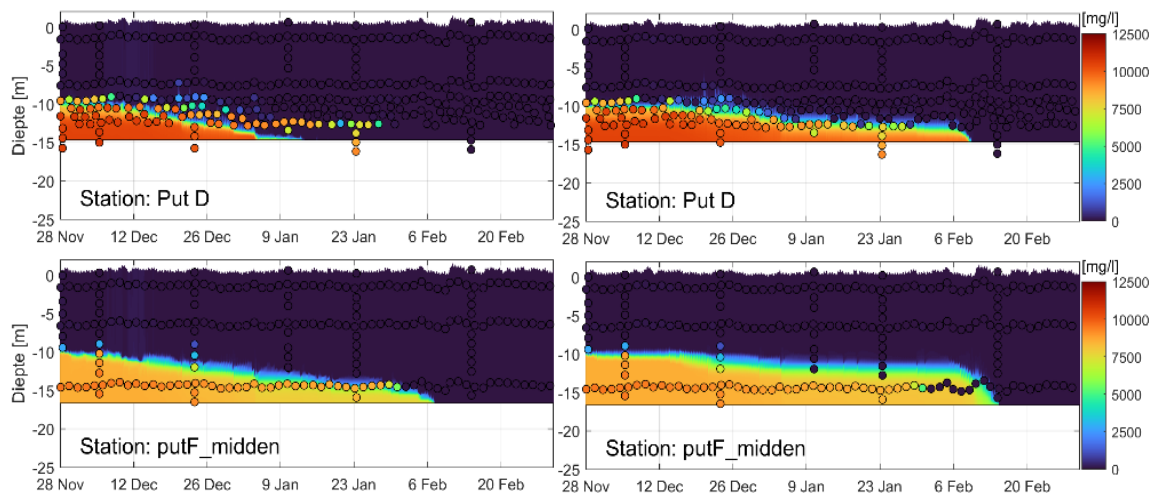
In de figuur is ook te zien dat de spronglaag scheef komt te staan, met een naar de wind gerichte oplopende helling. Dit zou kunnen komen doordat in dit geval de sterke stroming in de bovenlaag zorgt voor een (extra) schuifspanning op de onderlaag, waardoor deze schuiner gaat staan. De sterke scheefstand zorgt ervoor dat het zoute water uit de putten op ondiepere delen terecht kan komen en ook over de zadelpunten van de ene naar de andere put kan stromen.

In de data-analyse is besproken dat de stroming tegen de wind in weliswaar sterk genoeg is om opgemengd zout van put D en F naar de omgeving van put H te verplaatsen, maar dat het erop lijkt dat de wind-gegenereerde stroming niet genoeg schering veroorzaakt om te zorgen voor opmenging direct boven de diepe putten. Daarbij is de hypothese naar voren gebracht dat de opmenging vooral plaatsvindt wanneer het zoute water uit de diepe putten door de scheefstand van de spronglaag in de vorm van een dunne laag op iets minder diepe delen terecht komt. Daar kan het zout dan gemakkelijker worden opgemengd, helemaal omdat dan ook aan de bodem gegenereerde turbulentie een rol kan gaan spelen. In de animatie zijn inderdaad af en toe zoute 'pluimen' waar te nemen wanneer zout uit de putten op de minder diepe delen terechtkomt. Het nader verifiëren van deze hypothese en het vaststellen van het precieze mechanisme van menging valt buiten de scope van dit rapport.

Dit kan wel relevant zijn voor het verder in kaart brengen van de condities met het meeste risico van verzilting.

4.1.5 Effect wind op verzilting in putten

In Figuur 4.8 wordt het verloop van het zoutgehalte in put D en F vergeleken voor een simulatie met en een simulatie zonder wind. Hieraan is te zien dat in een simulatie met wind de zoute onderlaag sneller verdwijnt dan in een simulatie zonder wind, in het bijzonder voor put D. Al de tijd dat er een zoute onderlaag aanwezig is, is de concentratie met of zonder wind niet heel anders. De spronglaag is voor beide gevallen ook ongeveer even scherp (kleine zone met sterke gradiënt). Wind draagt dus zeker bij aan verwijdering van zout uit de putten, maar dat zie je (in elk geval voor deze periode) niet terug aan een veranderende spronglaagsterkte of ontstaan van een grote mengzone. Dat lijkt consistent met de hierboven genoemde hypothese dat menging vooral plaatsvindt wanneer het zoute water op minder diepe delen terecht komt bij scheefstand van de spronglaag, echter verdere analyse van meetdata en modelresultaten is gewenst om dit effect verder te duiden.



Figuur 4.8 Verloop van zoutgehalte in put D en F (locatie van meetpunten) als functie van diepte en tijd. Links: weergegeven modelresultaten afkomstig van de validatiesimulatie; Rechts: modelresultaten afkomstig van simulatie zonder windforcering.

4.1.6 Conclusies effect van wind

De manier waarop het model de windgedreven stromingspatronen en zoutverspreiding beschrijft is in lijn met metingen en kan vanuit de theorie worden verklaard. Dit geeft aan dat het model een plausibele beschrijving geeft van het effect van wind.

De in de metingen gevonden stroming in put D en F tegen de wind in bij wind in langsricting van het Haringvliet wordt ook gevonden in de modelresultaten. Dit geeft het vertrouwen dat het model dit mechanisme, van belang voor transport van zout, goed reproduceert. De ruimtelijke stromingspatronen bevestigen de eerdere interpretatie dat er sprake is van een sterke horizontale circulatie, met (dieptegemiddelde) stroming met de wind mee over de ondiepe delen en stroming tegen de wind in over de diepe delen. De langdoorsneden over de zuidelijke thalweg laten zien dat de stroming tegen de wind in over een groot deel van het transect aanwezig is. Dit betekent dat er een transportpad aanwezig is waarlangs eenmaal opgemengd zout in vrij korte tijd door het systeem getransporteerd kan worden. Ook is zichtbaar dat de spronglaag in de situatie van stroming tegen de wind in schuin gaat staan, waardoor zout uit de putten op de zadelpunten terecht kan komen en naar de volgende put getransporteerd kan worden. De hypothese dat menging vooral optreedt wanneer zout uit de putten door deze scheefstand op ondiepere delen terecht komt, is met de huidige analyse nog niet bevestigd, maar de modelresultaten lijken daarmee wel in lijn.

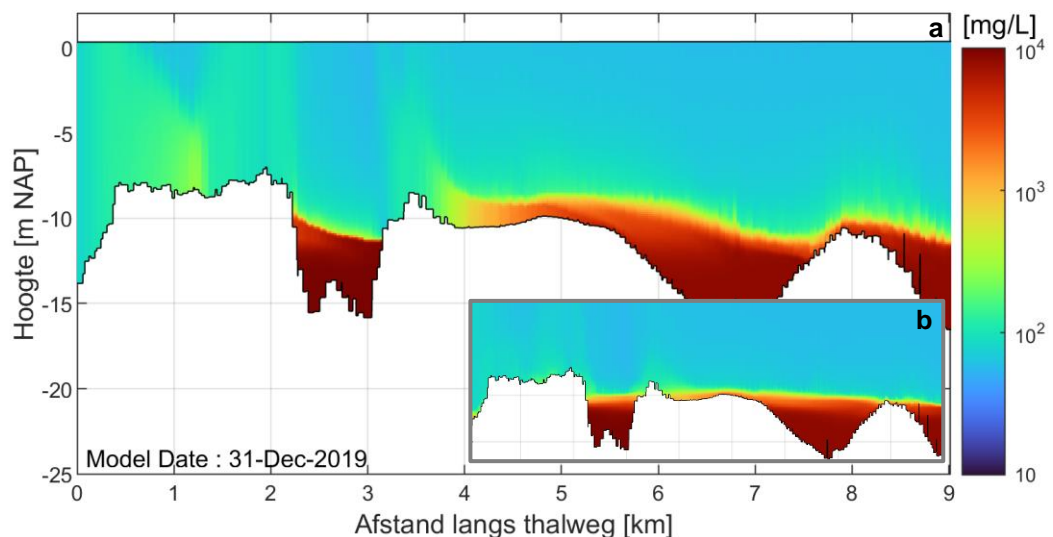
4.2 Effect afvoer door de Haringvlietsluizen

Voor de analyse van het effect van de afvoer door de Haringvlietsluizen op de zoute diepere delen van het Haringvliet, is een simulatie gedaan waarbij geen wind was meegenomen. Hierdoor is het effect van afvoer los te zien van dat van wind.

4.2.1 Periodes met grote spuidebieten

Om het effect van grote spuidebieten te bekijken wordt een specifieke periode bekeken waarin veelvuldig met grote debieten wordt gespuid (tot meer dan 8000 m³/s). Op 31 december rond middernacht was sprake van een relatief grote afvoerpiek (7000 m³/s) door de Haringvlietsluizen²¹. Een langsdoorsnede langs de zuidelijke putten (A, D, F) laat zien (Figuur 4.9) dat het grote spuivolume leidt tot een aanzienlijk westwaarts transport van zout water vanuit de verzilte putten. Het zoute water wordt als het ware meegesleurd met de snel stromende bovenlaag, gaat zich ook langs de bodem naar het westen verspreiden en wordt op een gegeven moment naar boven toe opgemengd en met de stroming van de bovenlaag naar buiten toe getransporteerd. De grote stroming als gevolg van het spuien leidt echter niet tot een volledige doormenging. Ook bij dit grote spuivolume is er sprake van afschaving²² van de zoute onderlaag, waarbij dus een klein gedeelte (naar het lijkt vooral boven de ondiepere delen) wordt opgemengd en vervolgens afgevoerd.

Het gedrag in de bovenlaag laat ook een significante ontwikkeling zien: er lijkt sprake te zijn van een behoorlijke toename in de verzilting, met name boven de drempels. In deze periode is echter ook sprake van Visvriendelijk sluisbeheer, waardoor we niet met volledige zekerheid kunnen zeggen dat de toename van de concentratie in de bovenlaag hoofdzakelijk komt door opmenging van zout uit de onderlaag²³.



Figuur 4.9 (a) Zoutgehalte langs het transect aan de zuidzijde van het Haringvliet tijdens een afvoerpiek in simulatie zonder wind, (b) Distributie van het zoutgehalte 6 uur eerder, voorafgaand aan de spuiperiode.

²¹ Het eigenlijke debiet door de Haringvlietsluizen is onbekend. Hier wordt het piek-debiet beschreven zoals dat is bepaald door het SOBEK3 RMM model. De data van de jaarsom van dat model worden gebruikt als randvoorwaarden voor dit model.

²² In dit rapport wordt het woord afschaving gebruikt om het proces van entrainment te beschrijven. Omdat het effectief leidt tot een beperkte verlaging van de spronglaaghoogte, zonder dat het zoutgehalte in de eigenlijke onderlaag significant verandert, is er sprake van afschaving van de zoute onderlaag.

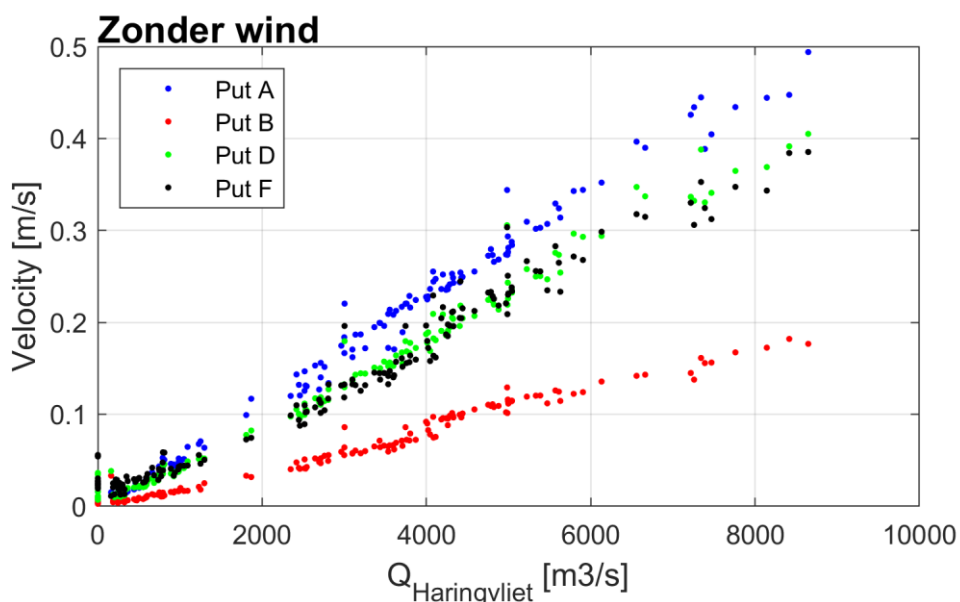
²³ Aannemelijk is dit niet want put A is leeg en indringing via visvriendelijk sluisbeheer is slechts beperkt tot put A en in uitzonderlijke gevallen in kleine mate ook put D. Voor Put F zal er geen sprake van beïnvloeding zijn. Bovendien is in deze periode sprake van spuien met grote debieten waardoor het ruimtelijk effect van visvriendelijk sluisbeheer verder beperkt zal zijn.

In een aanvullende bewerking van de modelresultaten (beschreven in Bijlage D) zijn de zoutfluxen tussen de verschillende putten en andere delen van het systeem in kaart gebracht, samen met de zoutvoorraad in ieder deelgebied. Dit geeft inzicht in hoeveel uitwisseling er plaatsvindt tussen de putten. Ook is hiermee het effect van wind bovenop spuidebiet onderzocht, en is apart gekeken naar fluxen in periodes met kleine doorspoeldebieten. De resultaten voor de flux-tijdseries worden hier niet verder besproken. De analyse is ter inspiratie voor verdere analyse opgenomen in de bijlage. Hieronder presenteren nog wel enkele geaggregeerde resultaten van deze fluxanalyse.

4.2.2 Kwantificering effect spuien Haringvlietsluizen op verzilting en zoutfluxen

Op zoek naar relaties tussen spuivolumes, snelheden en zoutfluxen zijn voor iedere getijcyclus²⁴ het maximale debiet door de Haringvlietsluizen, de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid voor een uitvoerlocatie in elke put, en de getijgemiddelde zoutflux (in-, uitgaand en netto) bepaald en naast elkaar gezet. Hieronder worden de bevindingen aan de hand van de simulatie zonder wind beschreven, voor de resultaten met wind wordt verwezen naar Bijlage C.2.3.

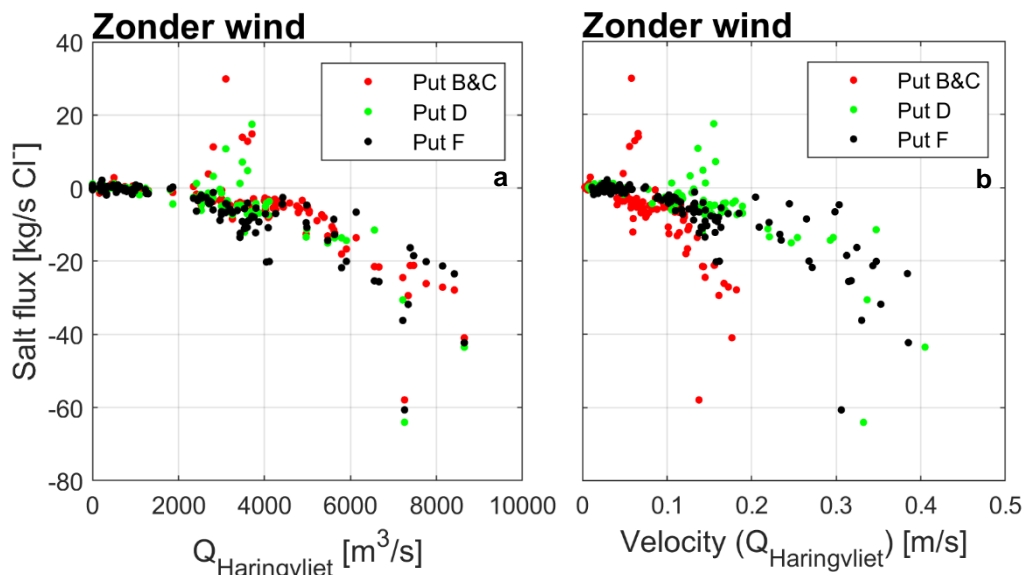
- Figuur 4.10 toont het verband tussen spuidebiet²⁵ en de stroomsnelheid in de verschillende putten in het Haringvliet. Doordat put A direct na de sluisen ligt, is hier sprake van de grootste stroomsnelheden, terwijl put B door de meer afgezonderde situatie juist veel minder effect ondervindt van het spuien. Naast dat de put B/C veel dieper is en daardoor langer zout blijft, leidt de lagere stroomsnelheid vermoedelijk ook tot een tragere ontzilting.



Figuur 4.10 Relatie tussen de getijdepiek in het spuidebiet door de Haringvlietsluizen en de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid op modeluitvoerlocaties in de putten A, B, D en F (simulatie zonder wind).

²⁴ Een analyse gedurende een getij is erg lastig, omdat het effect van een bepaalde afvoer door de Haringvlietsluizen niet overal in het gebied tegelijk merkbaar is, daarom is hier een analyse uitgevoerd waarbij de karakteristieke waarde over iedere getijcyclus is bepaald.

²⁵ Hiervoor wordt de modeluitvoer van het debiet door een dwarsdoorsnede nabij de Haringvlietsluizen gebruikt. Het eigenlijke opgelegde debiet (verdeeld over 17 sluisen) is bepaald aan de hand van de SOBEK3 RMM jaarsom.



Figuur 4.11 (a) Netto getijgemiddelde zoutflux²⁶ voor put B/C, D en F uitgezet tegen het (getij-)maximale spuidebiet door de Haringvlietsluizen. (b) Netto getijgemiddelde zoutflux voor put B/C, D en F uitgezet tegen de (getij-)maximale stroomsnelheid op een uitvoerlocatie in elke put (simulatie zonder wind).

- Het effect van de afvoer op de mate van ontzilting van de verschillende putten is te zien in Figuur 4.11. Hierin is put A niet opgenomen, omdat daar geen sprake was van doorlopende ontzilting, als gevolg van onder andere Visvriendelijk sluisbeheer in combinatie met de inzet van de zoutriolen. De zoutfluxen laten in relatie tot het eigenlijk Haringvliet-debiet een duidelijke relatie zien, met een significant grotere uitgaande zoutflux als er sprake is van spuidebieten van meer dan 4000 m³/s²⁷. De positieve fluxen in putten B&C en D zijn naar verwachting het gevolg van Visvriendelijk sluisbeheer. Dit inkomende zout lijkt zich in de modelsimulatie niet te verspreiden tot put F.
- Daarnaast liggen deze netto fluxen voor de verschillende putten redelijk op een lijn. Dat is niet het geval bij de netto fluxen uitgezet tegen de stroomsnelheden terwijl dit wellicht wel verwacht kon worden omdat de stroomsnelheden de eigenlijke veroorzaker van de ontzilting zijn (Figuur 4.11b). Put B&C is onderhevig aan beperkte stroomsnelheid, maar er is sprake van een naar verhouding grote uitgaande netto zoutflux. Een mogelijke verklaring kan zijn dat door de geïsoleerde ligging ten opzichte van de andere verzilte putten de mate waarin die put vanuit bovenstrooms kan worden bevoorradat beperkt is. Dit wordt verder uitgewerkt in Bijlage C.2.3, waarin de netto zoutflux (zoals weergegeven in Figuur 4.11) wordt vergeleken met de bruto zoutfluxen tussen de verschillende putten. Andere mogelijke verklaringen voor de verschillen in ontziltingsgedrag zouden de vullingsgraad van de verschillende putten en de helling en lengte van de drempels tussen de verschillende putten kunnen zijn. Beide aspecten zijn niet verder onderzocht.

4.2.3 Conclusies effect van afvoer door de Haringvlietsluizen

De manier waarop het model het effect van de afvoer door de Haringvlietsluizen op stromingspatronen en zoutverspreiding beschrijft lijkt in lijn met metingen en kan vanuit de theorie worden verklaard. Dit geeft aan dat het model een plausible beschrijving geeft van het effect van afvoer door de Haringvlietsluizen.

²⁶ Let wel: In deze beschouwing worden alleen putten meegenomen die op dat moment nog zijn gevuld zijn met zout.

²⁷ Als er sprake is van een groter aantal simulatie periodes, waarbij een breder scala aan condities is getoetst, kan dit (soort) figuur als basis dienen voor het afleiden van een relatie tussen het spuidebiet en de mate van ontzilting.

- Vanuit de fysica zou je verwachten dat er een duidelijke relatie bestaat tussen de spuidebieten door de Haringvlietsluizen en de stroomsnelheden in de putten. Deze wordt in de modelresultaten duidelijk teruggevonden. Er bestaat een positieve lineaire relatie tussen de piek in het spuidebiet en de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid per put.
- Daarnaast wordt duidelijk uit de modelresultaten dat er substantiële verschillen bestaan tussen de stroomsnelheden in de putten. Deze kunnen worden verklaard aan de hand van de ligging (en oriëntatie) van de verschillende putten.
- Tot slot laten deze bevindingen duidelijk een positieve relatie zien tussen het debiet door de Haringvlietsluizen, de stroomsnelheid en zoutflux in- en uit de putten.

Aanvullend kan nog het mogelijke effect van de vullingsgraad van de put en de spronglaaghoogte worden geanalyseerd en de mate van beïnvloeding van het zoutgehalte tussen de verschillende putten gekwantificeerd. Om dat te doen, moet in het model het (zoute) water in iedere put een andere tracer krijgen, die in het verloop van de simulatie kan worden gevolgd. Hiermee kan naast een verdere duiding van de fysica, ook de afhankelijkheden tussen de verschillende putten verder in kaart worden gebracht, waardoor verder inzicht kan worden verkregen in de in- en uitgaande zoutfluxen per put en waar deze vandaan komen.

4.3 Effect van getij door het Spui

Naast invloed van wind, afvoer door de sluizen, en Visvriendelijk sluisbeheer, is een laatste conditie die wordt opgelegd door het model, het getijde-gedreven debiet dat via het Spui het Haringvliet in en uitgaat. Het effect hiervan op het zoet-zout dynamiek in het systeem is veelal lastig te bepalen omdat het debiet relatief beperkt is in vergelijking met de maximale debieten door de spuisluizen (zowel in- als uitgaand maximaal 1000 m³/s versus 8000 m³/s) en vrij ver bovenstrooms (naar het oosten) wordt opgelegd op aanzienlijke afstand van de verzilte putten.

Terwijl in gemeten data het effect van het debiet door het Spui op de zoet-zout dynamiek van het Haringvliet niet te bepalen is, kan dit effect wel worden onderzocht aan de hand van modelsimulaties. Dit is gedaan door in de simulatie geen wind op te nemen, en een periode te selecteren waarin de Haringvlietsluizen permanent zijn gesloten (en dus geen spuien of Visvriendelijk sluisbeheer). Deze condities hebben zich in de modelsimulatie voorgedaan in de periode 19-30 januari²⁸. De analyse richt zich op de periode 20-25 januari.

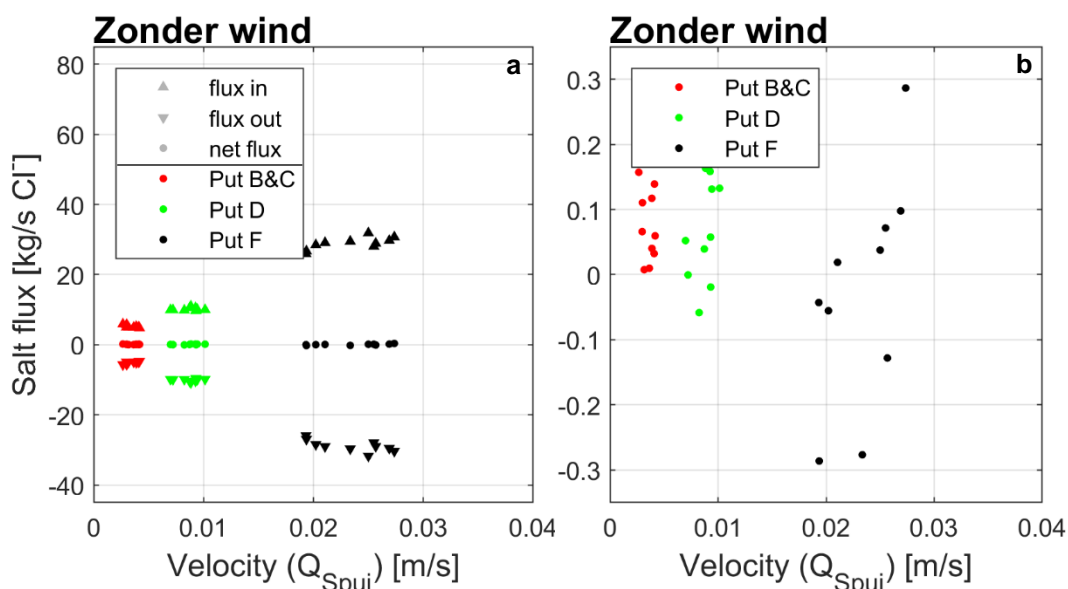
- De door het getijde debiet in het Spui veroorzaakte waterbeweging is iedere getijfase vrij vergelijkbaar (gedurende deze periode was er geen sprake van stormopzet of achterwaartse verzilting) en brengt vooral de omgeving van de monding van het Spui in beweging en dempt relatief snel uit naar het oosten en westen van het Haringvliet toe (zie Bijlage C.3).

²⁸ In werkelijkheid is in deze periode iedere eb fase gespuid. In de opzet van de modelsimulaties is gebruik gemaakt van randvoorwaarden afkomstig van de SOBEK3 jaarsom. Dit project maakt daarbij gebruik van voorlopige modeluitvoer die begin 2020 beschikbaar waren. In deze data hebben, in tegenstelling tot wat daadwerkelijk heeft plaatsgevonden, de Haringvlietsluizen in deze periode continue dicht gestaan. Omdat in deze periode in werkelijkheid alleen met zeer kleine spuiopeningen is gespuid, is het effect op de grootschalige ontzilting en de vergelijking met metingen niet terug te vinden. Dit is ook de reden geweest om de modelinvoer voor deze periode niet alsnog aan te passen.

- In combinatie met de lagere stroomsnelheden zijn de in- en uitgaande zoutfluxen voor de drie verzilte putten (Figuur 4.12) ook vele malen kleiner dan die het gevolg zijn van spuien door de Haringvlietsluizen²⁹.
- Het eigenlijke netto transport van zout is verwaarloosbaar. Bij de start van de analyse periode was nog enigszins sprake van een verstoorde bovenlaag. In de daaropvolgende dagen worden deze ruimtelijke verschillen gladgestreken, waardoor er sprake is van een zeer klein netto transport van zout van de ene naar de andere put.

Concluderend kan worden gesteld dat het getijde debiet door het Spui een verwaarloosbaar effect heeft op het transport van zout in het Haringvliet. Het meest waarneembaar is dit nog nabij de monding van het Spui waar sprake is van een nagenoeg symmetrisch transport de inkomende zoutvracht bij vloed is nagenoeg gelijk aan de uitgaande zoutvracht bij eb.

De beperkte stroming in combinatie met het ontbreken van verzilting in dit deel van het Haringvliet, maakt dat er geen directe vergelijking met metingen kan worden uitgevoerd. Het ontbreken van een significant effect is in lijn is met de effecten zoals die optreden bij zeer kleine debieten door de Haringvlietsluizen en is daarmee plausibel te noemen.



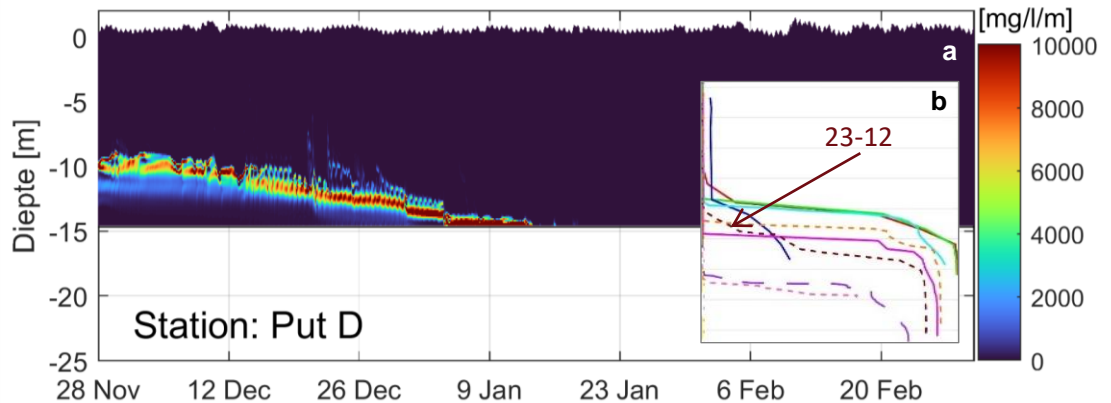
Figuur 4.12 Getijgemiddelde zoutflux per put in relatie tot de (getij-)maximale stroming per put, veroorzaakt door het debiet door het Spui (som zonder wind). a) In- en uitgaande zoutfluxen en b) de netto flux.

4.4 Effect van Visvriendelijk sluisbeheer

Deze modelschematisatie is opgezet ten behoeve van onderzoek naar nalevering en zoetspoelen (spuien) en het effect daarvan op de verzilting in het Haringvliet. Het model is niet opgezet om Visvriendelijk sluisbeheer te beschrijven. De mate waarin het model dit proces nauwkeurig kan beschrijven gaat daarmee voorbij aan het originele doel van de modelontwikkeling en toetsing. Echter, omdat tijdens de proefperiode wel is ingelaten (door middel van Visvriendelijk sluisbeheer) is het wenselijk om dit proces ook mee te nemen in de modelsimulatie. Hieronder volgt een korte beschouwing van de mate waarin het model het proces van Visvriendelijk sluisbeheer kan beschrijven. De beschouwing richt zich met name op de impact die dit heeft op de manier waarop het model nalevering en zoetspoelen (spuien) beschrijft.

²⁹ Ter vergelijking: Het getijde debiet door het Spui leidt bij een debiet van 700m³/s en een concentratie 100mg/l tot een piek-influx van 70kg/s Cl.

Uit verschillende analyses komt naar voren dat Visvriendelijk sluisbeheer de mate van verzilting in het Haringvliet kan beïnvloeden, zowel nabij de sluisen (paragraaf 3.3.2) als in de modelresultaten van de stroomopwaarts gelegen putten is een effect waarneembaar (Figuur 4.11). Mogelijk kan ook de verhoging in het zoutgehalte boven de spronglaag in de varende metingen van put D (Figuur 4.13) ook daaraan worden gekoppeld³⁰.



Figuur 4.13 a) Indicatie van de vorming van een tussenlaag in put D in de periode 20 december 2019 tot 1 januari 2020. b) Gemeten zoutgehalten in put D. De meting op 23 december laat een lichte verhoging in het zoutgehalte zien bovenop de spronglaag.

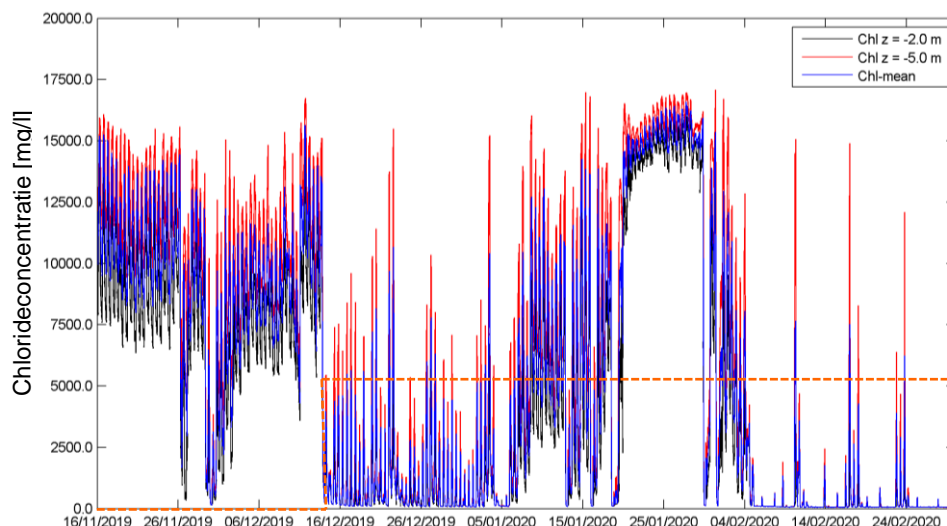
Om een beter beeld te krijgen van de mate waarin Visvriendelijk sluisbeheer (en de modelmatige implementatie daarvan) de ontzilting van het Haringvliet kan beïnvloeden is een aantal berekeningen uitgevoerd, die worden vergeleken met de originele som (met wind en het gemiddelde zoutgehalte van Stellendam Buiten bij Visvriendelijk sluisbeheer).

1. Ten eerste is een berekening gedaan waarbij het zoutgehalte van het inkomende water op de achtergrondwaarde is gezet. Hierdoor is er bij deze simulatie nauwelijks sprake van beïnvloeding van de zoet-zout dynamiek in verzilte putten in het Haringvliet door Visvriendelijk sluisbeheer.
2. In een tweede som is het inkomende zoutgehalte vanaf het moment van Visvriendelijk sluisbeheer (15 december) vastgesteld op 10PSU (5500mg/l Cl).

De gemeten zoutgehalten bij Stellendam Buiten (Figuur 4.14) laten een zeer grote variatie zien, met periodes waarbij het zoutgehalte niet lager komt dan 14000mg/l, maar ook periodes waarbij het zoutgehalte grotendeels onder 2000mg/l blijft. Het inkomende zoutgehalte in de tweede som beschrijft een relatief bescheiden zoutgehalte aan zeezijde van de kering. Voor de periode nadat wordt gestart met Visvriendelijk sluisbeheer (vanaf 15 december tot begin januari) is er sprake van zeer lage zoutgehalten aan zeezijde van de kering. Dit geldt ook voor de tweede periode met veelvuldig Visvriendelijk sluisbeheer (vanaf begin februari). Voor beide periodes geldt dat in combinatie met Visvriendelijk sluisbeheer ook relatief veel wordt gespuid, waardoor de voordelta relatief zoet is. De tweede simulatie geeft dus naar verwachting een overschatting van het effect van Visvriendelijk sluisbeheer, zoals dat daadwerkelijk is opgetreden in deze periode³¹.

³⁰ De ruis in de meetdata ook significant. Het is daarom niet uit te sluiten dat deze kleine verhoging daar in wegvalt.

³¹ Waarbij kan worden opgemerkt dat visvriendelijk sluisbeheer in een periode waarin minder zou worden gespuid, naar verwachting zal gaan leiden tot nog hogere inkomende zoutgehalten dan hier gesimuleerd.



Figuur 4.14 Zoutgehalte bij Stellendam Buiten met daarin ter vergelijking geplot het opgelegde zoutgehalte van 10PSU (vanaf de start van Visvriendelijk sluisbeheer).

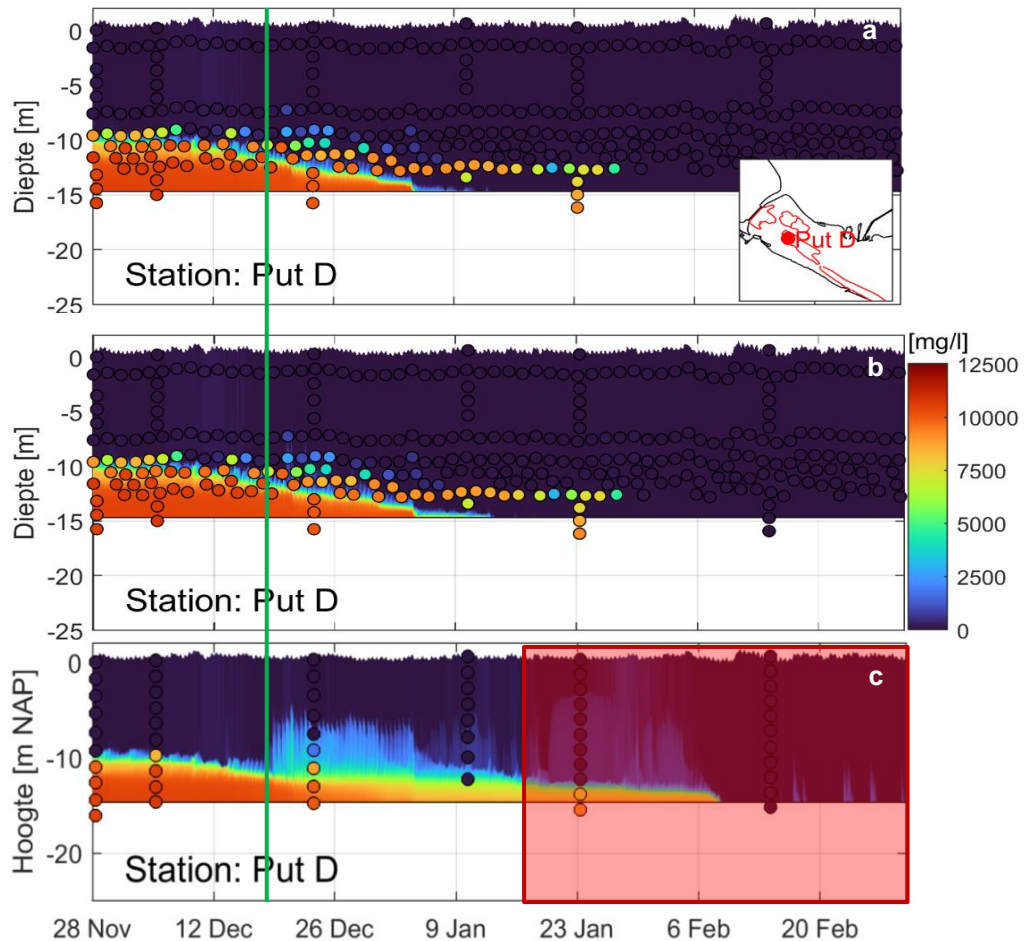
De ontwikkeling van het zoutgehalte over de diepte over tijd is voor put D weergegeven in Figuur 4.15 (eenzelfde figuur voor put F is opgenomen in Bijlage C.4).

- Ten eerste is te zien dat vanaf het moment dat Visvriendelijk sluisbeheer wordt toegepast (groene lijn) het zoutgehalte in de simulatie zonder Visvriendelijk sluisbeheer zeer vergelijkbaar is met de originele som met zoutgehalte zoals gemeten bij Stellendam Buiten. Alhoewel er in de originele modelsimulatie sprake is van de tijdelijke vorming van een tussenlaag, leidt het lage inkomende zoutgehalte tot een verwaarloosbaar effect op het gedrag in put D.
- De ontwikkeling van het zoutgehalte in put D voor de som met een constant zoutgehalte van 10PSU laat zien dat Visvriendelijk sluisbeheer wel degelijk effect kan hebben op de zoet-zout dynamiek. Vanaf de start van Visvriendelijk sluisbeheer, ontstaat boven op de sterk verzilte onderlaag een lichter verzilte tussenlaag. Deze tussenlaag vormt vervolgens een afscheiding tussen de zoete bovenlaag en de zoute onderlaag, waardoor ontziltingsprocessen zoals wind en afvoer minder direct de zoute onderlaag kunnen bereiken en de ontzilting wordt vertraagd, hetgeen aansluit bij een mogelijk te verwachten effect in werkelijkheid.

Deze bevindingen zijn echter alleen indicatief voor wat het potentiële effect van Visvriendelijk sluisbeheer kan zijn. De modelmatige implementatie van Visvriendelijk sluisbeheer (dieptegemiddeld instroming) in combinatie met het versimpeld weergegeven van het Haringvlietcomplex (ontbreken zoutriolen) maakt dat dit model het effect alleen indicatief kan beschrijven.

Concluderend kan worden gesteld dat voor deze proefperiode naar verwachting slechts een beperkt effect is geweest van Visvriendelijk sluisbeheer op de dynamiek in grote delen van het Haringvliet. Doordat Visvriendelijk sluisbeheer tijdens de proefperiode vooral is toegepast in periodes met beperkte verzilting aan zeezijde van de kering en zoutindringing veelal niet verder is gekomen dan put A, is het effect op de dynamiek in het Haringvliet beperkt. Tekortkomingen in de modelmatige implementatie van Visvriendelijk sluisbeheer zullen daardoor slechts zeer beperkt effect hebben op de manier waarop het model nalevering en zoetspoelen (spuien) beschrijft.

Aanvullend kan worden gesteld dat Visvriendelijk sluisbeheer de zoet-zout dynamiek in diepe delen van het Haringvliet in potentie significant kan beïnvloeden, maar dat de huidige beperkte model-implementatie van het Haringvlietcomplex en specifiek Visvriendelijk sluisbeheer maakt dat hierover geen kwantitatieve uitspraken gedaan kunnen worden. Het antwoord op de vraag naar de mate waarin het model het effect van visvriendelijk sluisbeheer plausibel beschrijft, is tweedelig: Nabij de Haringvlietssluisen is in de huidige opzet het model niet plausibel, verder naar het oosten toe is de verwachting dat het effect mogelijk wel plausibel door het model zou kunnen worden beschreven, mits de zoutindringing door de sluisen beter wordt beschreven.



Figuur 4.15 Zoutgehalte over de diepte in put D. a) simulatie zonder het effect van Visvriendelijk sluisbeheer op de verzilting. b) met Visvriendelijk sluisbeheer, waarbij het inkomende zoutgehalte gelijk is aan het gemeten gehalte bij Stellendam buiten (referentie som). c) Met Visvriendelijk sluisbeheer, waarbij het inkomende zoutgehalte constant is op 10 PSU. De groene lijn geeft het moment aan waarop wordt gestart met Visvriendelijk sluisbeheer. Het rode veld aan het einde van de simulatie in c) is indicatief van een periode waarin de modelinstellingen voor deze simulatie leiden tot modelresultaten die niet direct meer vergeleken kunnen worden met die van de daarboven weergegeven simulaties.

5 Beschouwing van de modeltoepasbaarheid

Hieronder volgt een algemene beschouwing op basis van de bevindingen zoals die in het vorige hoofdstuk zijn gepresenteerd van de toepasbaarheid van het model in zijn huidige vorm voor onderzoek naar verschillende fasen en processen die optreden binnen de beoogde operationele sturing tijdens uitvoer van het Kierbesluit. Dit onderzoek is gericht op het beschrijven van Zoetspoelen en Nalevering. In dit hoofdstuk worden echter ook andere fasen en processen beschreven, omdat de inzichten uit dit onderzoek ook indicatief zijn voor deze processen. Daarnaast kan bij een verdere ontwikkeling van dit model de hier beschreven modeltoepasbaarheid naar aanleiding van nieuwe ontwikkelingen en bevindingen worden aangescherpt en aangepast. In paragraaf 5.5 wordt vervolgens gekeken naar de huidige inzetbaarheid aan de hand van de verschillende beheersvragen en de mogelijkheden om het bestaande model door te ontwikkelen om het breder toepasbaar te maken.

5.1 Zoetspoelen door middel van afvoer door de Haringvlietsluizen

Het model is geschikt voor het grofstoffelijk beschrijven van het effect van grote spuidebieten op de ontzilting van de diepe delen van het Haringvliet. Het model is in staat de afschaving van de zoute onderlaag goed te beschrijven. Alleen geldt voor put D dat het model de ontzilting overschat. Hierdoor zijn modelresultaten met name geschikt voor een kwalitatieve toepassing, en minder geschikt voor kwantitatieve analyses.

- De modelresultaten laten zien dat de dynamiek die wordt veroorzaakt door grote spuidebieten via de Haringvlietsluizen op de ontzilting van verzilte putten in het Haringvliet goed kan worden gereproduceerd.
- Zowel model als meting laten een geleidelijke verlaging van de spronglaag zien, waarbij uit modelresultaten blijkt dat zelfs bij de grootste spuivolumes de ontzilting primair plaatsvindt als gevolg van afschaving van de zoute onderlaag, zonder dat de volledige verzilte onderlaag significant in beweging komt.
- Het model beschrijft daarnaast het zoutgehalte in de diepere verzilte delen vergelijkbaar met metingen. Dit zoutgehalte neemt zeer geleidelijk licht af over tijd, terwijl de spronglaag naar beneden verschuift.
- De spronglaagsterkte (de scherpte van de overgang tussen de zoete bovenlaag en de zoute onderlaag) blijft in de modelsimulatie ook langdurig bestaan. Dit is in lijn met de metingen.
- De enige locatie waar het model een significant verschillende ontzilting laat zien is put D, waar het model de snelheid waarmee de ontzilting optreedt overschat, en een te snelle afschaving van de zoute onderlaag beschrijft.

Het model is daarnaast goed in staat het effect van kleine spuien op de zoet-zout dynamiek in een verzilt Haringvliet te beschrijven. Klein spuien lijkt effectief in het zoet houden van de bovenlaag. Ontzilting van de onderlaag is verwaarloosbaar onder deze omstandigheden. Beide aspecten worden door het model goed beschreven, maar met het oog op de te snelle ontzilting van put D, is het model met name geschikt voor kwalitatieve uitspraken.

- De modelresultaten laten daarnaast een duidelijke relatie zien tussen het debiet door de Haringvlietsluizen, de stroomsnelheid in verschillende diepe delen van het Haringvliet, en de zoutflux. Putten nabij de Haringvlietsluizen ondervinden een hogere stroomsnelheid, en daarmee ook een hogere zoutflux dan putten die verder stroomopwaarts gelegen zijn.
- De in- en uitgaande zoutfluxen in een put zijn vele malen groter dan het netto effect dat spuien teweeg brengt. Doordat verschillende putten zijn verzilt, transporteert zout

zich als gevolg van spuien van de ene naar de andere put, richting de Haringvlietsluizen. Daarnaast is er aansluitend op een spuiperiode sprake van een retour-effect op het moment dat wordt gestopt met spuien.

5.2 Nalevering en het effect van wind

Het model beschrijft de toename van verzilting in de bovenlaag redelijk goed. In verhouding tot de zoutgehaltes in de diepe delen van het Haringvliet, gaat het echter om marginale veranderingen, die qua orde grootte in lijn zijn met de geschatte modelonzekerheid. Het is daarom wenselijk de modelresultaten vooral kwalitatief toe te passen.

- Het model laat in een duidelijke relatie zien dat de toename in verzilting in de bovenlaag gekoppeld is aan kleine spui volumes en opmenging als gevolg van wind.
- Het model beschrijft daarbij relatief in overeenkomst met de metingen de momenten waarop verzilting in de bovenlaag optreedt.
- De ruimtelijke verspreiding van verzilt water in de oppervlakte laag (bijvoorbeeld naar het niet-verzilde oostelijke deel van het Haringvliet) is slechts eenmaal waargenomen. Het model heeft dit geval slechts ten dele gereproduceerd.
- Het model zou het zoutgehalte in de bovenlaag beter beschrijven als de bovenstroomse randvoorwaarde het eigenlijke opgetreden zoutgehalte beschreef, in plaats van een vaste constante waarde, zoals nu is gebruikt. Voor vergelijkende en scenario-studies kan een vaste waarde echter handig zijn.

Het model beschrijft daarnaast duidelijk de respons van de stroming op de wind en de resulterende verplaatsing van zout via de diepere delen van het meer. Dit is in lijn met observaties in de data-analyse en verklaringen daarvan vanuit impulsvergelijkingen (Kranenburg et al, 2023).

- Het model laat een duidelijke relatie zien tussen wind en stroming. Bij wind in de lengterichting van het Haringvliet ontstaat een stroming met de wind mee over de ondiepe delen en tegen de wind in door de diepe geulen. Deze stroming kan zout tegen de richting van de wind in transporteren. Dit sluit aan bij wat voor andere periodes ook is waargenomen in het Haringvliet.
- Daarnaast lijken de modelresultaten in lijn met de hypothese dat opmenging van zout uit de onderlaag vooral plaatsvindt als het zoute water uit de onderlaag op ondiepere delen (de drempels) tussen de putten terecht komt door scheefstand van de spronglaag.

5.3 Kieren

De mate waarop het model in staat is om het Kieren te beschrijven, is niet onderzocht en gaat voorbij aan het doel van deze modelontwikkeling. Zowel tijdens de meetproef als de modelsimulatie is deze conditie niet opgetreden. Echter, op basis van de ervaringen uit dit onderzoek kan al wel worden geconcludeerd dat de modelschematisatie in de huidige vorm slechts ten dele dit proces zal kunnen beschrijven. Belangrijke onderdelen ontbreken om het proces van Kieren robuust voor een breed bereik aan omstandigheden en betrouwbaar te simuleren.

De huidige modelschematisatie beschrijft alleen het Haringvliet, en niet de Haringvlietsluizen of de dynamiek aan zeezijde van de kering. Beide aspecten zijn cruciaal voor een realistische beschrijving van het Kier-proces in een model dat niet alleen geschikt is voor het simuleren van historisch opgetreden condities, maar ook voor scenario-studies waarbij een ander debiet en een andere zoutvracht door de sluisen optreedt dan in het verleden is gemeten:

- Het drie-dimensionale beschrijven van de zoet-zout dynamiek door het kunstwerk is nodig om met name het inlaten en de resulterende turbulentie en menging te beschrijven.

- Om het zoutgehalte dat door de Haringvlietsluizen het Haringvliet inkomt te beschrijven, is het wenselijk de kustzone aan zeezijde van de Haringvlietsluizen te beschrijven: Het effect van het spuien van relatief zoet water heeft een significant effect op het zoutgehalte aan zeezijde van de kering, en daarmee op het in te laten water bij Kieren (en Visvriendelijk sluisbeheer). Voor het simuleren van historische periodes kan mogelijk worden volstaan met het opleggen van gemeten zoutgehaltenes afkomstig van Stellendam Buiten³².

De beschrijving van de zoet-zout dynamiek in het Haringvliet onder naleveringscondities en tijdens spuien geven wel vertrouwen in dat het model in aangepaste vorm in staat gaat kunnen zijn dit proces te kunnen beschrijven.

5.4 Visvriendelijk sluisbeheer

Net als voor Kieren is het model bij Visvriendelijk sluisbeheer niet goed in staat de dynamiek rondom de Haringvlietsluizen te beschrijven bij een inkomende zoutvracht (en uitgaande zoutvracht via de zoutriolen). Het effect van Visvriendelijk sluisbeheer op de zoet-zout dynamiek stroomopwaarts in het Haringvliet wordt naar verwachting wel redelijk beschreven door het model, echter waarnemingen hiervan ontbreken nagenoeg en wekken alleen de indruk van vergelijkbaar gedrag in het model. Het model (met de huidige randvoorwaarden) is vooralsnog ongeschikt om het eigenlijke inlaten door de Haringvlietsluizen als gevolg van Visvriendelijk sluisbeheer te beschrijven, maar mogelijk wel in staat de gevolgen (kwalitatief) in het stroomopwaartse deel van het Haringvliet weer te geven.

- Doordat het model alleen het Haringvliet beschrijft en niet de spuisluizen en de Voordelta, wordt een benaderd debiet gekoppeld aan een aan buitenzijde gemeten zoutgehalte dieptegemiddeld opgelegd aan de binnenzijde van de Haringvlietsluizen. Hierdoor laat het model een duidelijke onderschatting van het inkomende zoutgehalte zien (het model overschat de menging als gevolg van de dieptegemiddelde benadering) in de zoutvang (put A).
- Doordat in het model geen zoutriolen zijn opgenomen, wordt de mate van ontzilting van de zoutvang iedere getijperiode onderschat. In metingen lijkt de zoutvang ieder getij schoongespoeld te worden, terwijl dit in het model niet het geval is.
- De verspreiding van zout vanuit de zoutvang naar de stroomopwaarts gelegen putten lijkt wel redelijk te worden beschreven. Gemeten zoutgehaltenes in put D lijken ook de vorming van een beperkte tussenlaag te schetsen, iets wat ook tijdelijk door het model wordt beschreven.
- Uit de huidige simulaties wordt ook duidelijk dat het beperkt inlaten als gevolg van Visvriendelijk sluisbeheer een significant effect kan hebben op het effect op het zoutgehalte. Bij inlaten met hoger zoutgehaltenes wordt naar verwachting een sterkere tussenlaag gevormd, die de ontzilting van de zoute onderlaag vertraagd.

5.5 Uitbreiding van de inzetbaarheid van het model

De modelontwikkeling voor D-HYDRO Haringvliet 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:

³² De representativiteit van deze meetgegevens om de inkomende zoutvracht voor de gehele Haringvlietsluizen te beschrijven, zou echter nog wel moeten worden onderzocht.

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 - stromingspatronen 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)

A. Spuien – stromingspatronen op het Haringvliet

Het model is geschikt om dit proces te beschrijven.

B. Voordelta – dynamiek van de chloride randvoorwaarde

Het model is in zijn huidige vorm ongeschikt om dit proces te beschrijven.

Om dit te kunnen beschrijven moet het model uitgebreid worden met de Voordelta aan zeezijde van de Haringvlietsluizen. Onderzoek met behulp van het (aangepaste) OSR model van Havenbedrijf Rotterdam kan helpen met het definiëren van geschikte randlocaties (opgenomen in Bijlage E.1).

C. Inlaten – Zoutvracht en instroom Haringvliet, en

D. Wisselwerking inlaten en spuien op het Haringvliet

Het model is in zijn huidige vorm ongeschikt om beide processen te beschrijven.

Alhoewel het model de dynamiek in het stroomopwaartse deel van het Haringvliet naar verwachting redelijk zal kunnen beschrijven, is een modelbeschrijving van het Haringvlietcomplex vereist. Hiervoor is een driedimensionale kunstwerk formulering nodig om het diepte-afhankelijke proces door de Haringvlietsluizen (inclusief energieverliezen en dergelijke) te beschrijven (zie Bijlage E voor enkele voorbeelden van de toepassing van de kunstwerkformulering van de Haringvlietsluizen in numerieke 3D modellen). Ook zal gekeken moeten worden in hoeverre het rekenrooster en bodemrepresentatie nabij de sluisen geschikt is om de hoogdynamische omgeving voor en achter de kering goed te beschrijven.

Daarnaast, zullen ook de andere elementen van het Haringvlietcomplex moeten worden meegenomen, zoals de zoutriolen, vissluizen, lekkage en de scheepvaartsluis. Tot slot moet om het inlaten van zout water het Haringvliet in te beschrijven, ook een beschrijving van de Voordelta worden meegenomen om het inkomende zoutgehalte te beschrijven.

E. Nalevering in relatie tot verziltingsgraad Haringvliet

Het model is geschikt om dit proces te beschrijven.

F. Bovenregionale effecten

Het D-HYDRO Haringvlietmodel is ongeschikt om bovenregionale vragen te beantwoorden, *Echter het 3D D-HYDRO RMM model is hiervoor geschikt en direct beschikbaar.*

6 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

Hieronder volgen een beknopte samenvatting en de conclusies, beide gebaseerd op de bevindingen en voorlopige conclusies als gepresenteerd in de eerdere hoofdstukken. Aansluitend wordt in de aanbevelingen stilgestaan bij hoe de inzetbaarheid van het model kan worden vergroot om ook andere kennisvragen die spelen bij het Lerend Implementeren van het Kier-besluit te beantwoorden. Daarna volgen ook nog enkele generieke aanbevelingen zoals voortgekomen uit dit modelontwikkeltraject.

6.1 Samenvatting

Ter ondersteuning van het traject Lerend Implementeren behorend bij het Kierbesluit is een 3D hydrodynamisch model van het Haringvliet opgezet en getoetst. Dit model is opgezet met het doel ingezet te kunnen worden voor onderzoek ter beantwoording van kennisvragen op het gebied van:

- Het effect van spuien door de Haringvlietsluizen op ontzilting van een gedeeltelijk verzilt Haringvliet
- Nalevering van zout uit de verzilte diepe delen van het Haringvliet naar zoete delen van het Haringvliet onder andere als gevolg van wind.

Het 3D D-HYDRO Haringvlietmodel is gebaseerd op een uitsnede van het D-HYDRO Rijn-Maasmondingsmodel en het beschrijft het Haringvliet vanaf de Haringvlietsluizen tot aan de overgang naar het Hollandsch Diep. Het model maakt in de verticaal gebruik van z-lagen, met laagdikten verkleind tot 0.125 m. De randvoorwaarden op de Haringvlietsluizen, het Spui en het Hollandsch Diep zijn grotendeels gebaseerd op de jaarsommen van het SOBEK3 RMM model.

Om de kwaliteit van het model te toetsen en een oordeel te vormen over de model-inzetbaarheid is een simulatie gedaan van de Naleverproef van 2019-2020. In deze proef is getoetst onder welke afvoer- en windcondities de verzilte onderlaag in het Haringvliet wordt opgemengd (Nalevering) en wanneer het zout wordt afgevoerd naar zee (Zoetspoelen). Omdat inlaten van zout water tijdens Kieren nog niet goed met het huidige model kan worden gesimuleerd, is het model daarbij gebruikt met begincondities waarin zout water aanwezig is in de putten en geulen in het westelijke deel van het Haringvliet tot op -10m NAP. De modelresultaten voor zoutgehalten en stroomsnelheden zijn vergeleken met metingen. Op grond waarvan wordt geconcludeerd dat het model de dynamiek in het Haringvliet redelijk goed beschrijft. Zo wordt de ontzilting van de diepe putten kwalitatief goed en kwantitatief redelijk gereproduceerd. Ook zijn berekende en gemeten stroomsnelheden goed vergelijkbaar, zowel wat betreft sterkte als richting als variatie over de verticaal. Daarnaast wordt ook de variatie over de verticaal en horizontaal van zoutgehalten en stroomsnelheden als gevolg van onder andere wind en afvoer goed door het model gereproduceerd.

Aansluitend is een analyse uitgevoerd van het modelgedrag voor verschillende forceringen. Daaruit bleek dat de stroming tegen de windrichting in boven de diepe delen, zoals in eerdere data-analyses is waargenomen voor wind in langsrichting van het Haringvliet, ook aanwezig is in de modelresultaten en leidt tot transport van zout tegen de windrichting in. Daarnaast laten de modelresultaten zien dat ook bij hoge afvoeren door de Haringvlietsluizen er slechts sprake is van een afschavend effect, en dat niet de gehele verzilte put in één keer wordt schoongespoeld. Dit sluit aan bij de waargenomen dynamiek. Tot slot laat het model zien dat Visvriendelijk sluisbeheer in potentie de ontzilting van het Haringvliet kan vertragen, hetgeen aansluit bij mogelijke te verwachten effecten. Als het inkomende zoute water zich verspreidt

voorbij de zoutvang (put A), vormt het een tussenlaag bovenop de verzilte onderlaag, waardoor de onderlaag wordt afgeschermd van ontziltingsprocessen.

Op basis van de tijdens dit onderzoek uitgevoerde toetsing wordt geconcludeerd dat het model de processen Nalevering en Zoetspoelen kwalitatief goed en kwantitatief redelijk kan beschrijven.

6.2 Conclusies

6.2.1 Vergelijking met metingen

- Het model beschrijft de zoet-zout dynamiek in het Haringvliet redelijk goed. De beschrijving van de ontzilting van de diepe putten wordt kwalitatief goed en kwantitatief redelijk beschreven.
- Het zoutgehalte in de verzilte onderlaag is vrij goed in lijn met gemeten zoutgehaltes. Er is sprake van een vrij constant zoutgehalte dat alleen zeer geleidelijk afneemt. Ontzilting vindt plaats doordat de zoute onderlaag wordt afgeschaafd. Dit wordt door het model goed beschreven. Het uitzakken van de spronglaag tussen de zoete bovenlaag en de zoute onderlaag wordt door het model redelijk goed beschreven voor put F waar vergelijkbare afschavingsgebeurtenissen optreden in reactie op wind- en afvoerpieken. Echter de ontzilting van put D gaat in het model te snel.
- Het zoutgehalte in de zoete bovenlaag vertoont hetzelfde gedrag als wordt waargenomen in de metingen. Bij zeer lage spuidebieten (of gesloten sluisen) leidt de windgedreven opmenging tot een geleidelijke toename in het zoutgehalte in de bovenlaag. Deze toename is in verhouding tot het zoutgehalte in de onderlaag marginaal, maar wel groot genoeg om richting de streefwaarde toe te nemen.
- Het inlaten van zout als gevolg van Visvriendelijk sluisbeheer wordt slechts beperkt door het model beschreven. Dit komt omdat het model de Haringvlietssluisen zelf niet beschrijft maar alleen het effect in vereenvoudigde vorm wordt opgelegd. Het model lijkt het gedrag in de bovenstroomse delen redelijk te beschrijven. Alhoewel het Visvriendelijk sluisbeheer alleen de zoutvang beoogt te beïnvloeden, laten model en metingen (indicatief) zien dat het zout zich kortdurend verder naar het oosten kan verspreiden. Hierbij ontstaat een licht-verzilte tussenlaag die zich over de verzilte diepe delen verspreidt.
- Het model laat een goede reproductie van de gemeten stroomsnelheden zien. Niet alleen is de diepte gemiddelde stroomsnelheid in lijn met metingen, ook de interactie tussen de spronglaag en de stroming worden goed door het model gereproduceerd. Voor put F is wel sprake van enige onderschatting van de diepte-gemiddelde stroomsnelheid.

6.2.2 Analyse modelgedrag

- Modelresultaten laten zien dat wind kan leiden tot een karakteristiek stromingspatroon: Als de wind in de lengterichting van het Haringvliet blaast, stroomt het water over de ondieptes met de wind mee, en stroomt het in de geulen tegen de windrichting in. Daardoor wordt opgemengd zout door de geulen heen tegen de windrichting in verplaatst. Daarnaast treedt er scheefstand op van de spronglaag, waarbij zout water zich over de drempels kan verspreiden. Opmenging lijkt vooral op te treden wanneer zout water uit de onderlaag op deze manier op ondiepere delen terecht komt.
- Bij hoge afvoer is sprake van substantiële afschaving van de zoute onderlaag maar geen sprake van volledige doormenging. Bij kleine afvoer nauwelijks invloed op de verzilting in de diepe delen van het Haringvliet en wordt alleen de beperkte verzilting in de bovenlaag teruggedrongen. Uit modelberekeningen blijkt dat pas bij een

maximaal spuidebiet over het getij van meer dan 4000m³/s er sprake is van substantiële ontzilting.

- Visvriendelijk sluisbeheer leidt tot vorming van een licht-verzilte tussenlaag boven op de zoute onderlaag. Deze tussenlaag kan bij grotere inlaatdebieten en hogere zoutgehaltes afschermend werken voor de zoute onderlaag, waarbij wind- en afvoer gedreven ontzilting wordt gereduceerd. De modelbeschrijving van de zout-dynamiek in het Haringvliet blijkt daardoor relatief gevoelig voor de beschrijving van het inlaten.
- Het effect van het getij dat via het Spui het Haringvliet in en uitstroomt heeft een verwaarloosbaar effect op verzilting in het Haringvliet.

6.3 Aanbevelingen

Hieronder worden enkele punten naar voren gehaald die bij een vervolgonderzoek meegenomen zouden kunnen worden. De bevindingen vanuit dit onderzoek gaan voorbij aan alleen het verbeteren van de modelschematisatie, maar beslaan ook verdere analyse van modelresultaten en de meetdata.

6.3.1 Aanbevelingen voor de experimenten, de meetcampagne en de analyse van de data

- De beschikbare meetdata maakten het mogelijk een globale vergelijking te maken tussen modelresultaten en metingen. De vergelijking tussen model en metingen is echter niet mogelijk voor meer specifieke en kleinschaligere processen.
- Bijvoorbeeld om een proces als Visvriendelijk sluisbeheer te toetsen, kan aan de hand van stroomsnelheidsdata alleen een indicatie gevonden worden van de vorming van een tussenlaag. Hoogfrequenter varende metingen die in hoog detail de verticale zout gradiënt in kaart brengen, zouden kunnen helpen de vorming en het gedrag van een tussenlaag te onderzoeken (bijvoorbeeld via een “ondulerende meetvis”). Deze kennis is relevant omdat de opmenging van de diepere delen van het Haringvliet mogelijk wordt vertraagd door de aanwezigheid van een tussenlaag.
- Daarnaast zouden bij vaste meetpunten de middelste zoutsensoren kunnen worden verlaagd. Nu zitten ze boven de drempelhoogte en meten ze veelal een vergelijkbare waarde als de bovenste sensor. Door deze sensoren net onder de drempelhoogte (in te plaatsen, kan een beter beeld worden verkregen van de zoet-zout dynamiek op die cruciale hoogte.
- Daarnaast zijn er divermetingen gedaan van zoutgehaltes op de drempels tussen de verschillende putten. Deze metingen zijn interessant voor het analyseren van de transportprocessen van zout tussen de verschillende putten. Zoals uit modelresultaten al naar voren kwam, is de dynamiek tussen putten buitengewoon interessant en cruciaal voor een beter begrip van het effect van spuien door de Haringvlietsluizen op de zoutmassa in het Haringvliet als ook met betrekking tot windgedreven opmenging en nalevering.
- De stroomsnelheidsanalyse zoals is gepresenteerd in Hoofdstukken 3 en 4 laat zien hoe waardevol ADCP-data kan zijn. Kennis van de stroming vormt de link tussen forcering (wind, afvoer door de sluisen) en het resulterende verziltingsgedrag. Maar daarnaast is de ADCP-data met enige analyse en interpretatie te gebruiken om de kennisleemtes uit de zoutmetingen op te vullen. Het afleiden van de spronglaaghoogte aan de hand van “bijvangst” van de stromingssensor³³ biedt echter meer mogelijkheden om de specifieke respons van een verzilte put op forcering uit te werken dan in dit modeltoetsingstraject gebruikt kon worden.
- Voor een analyse van de verschillende processen van Visvriendelijk sluisbeheer, spuien en nalevering is het wenselijk dat deze processen elkaar zo min mogelijk overlappen. Dit kan in een model worden gedaan door processen uit te schakelen

³³ Als in: De eigenlijk stroomsnelheidsdata wordt niet gebruikt, maar informatie over de mate van reflectie van het uitgezonden geluidssignaal.

(zoals voor wind en Visvriendelijk sluisbeheer is gedaan in Hoofdstuk 4). Als daarnaast het ook wenselijk is om deze processen van elkaar los te kunnen koppelen in de vergelijking tussen model en meting, is uitgebreide kennis van de daadwerkelijk opgetreden processen een vereiste.

- Bij het opzetten van het model voor het beschrijven van Visvriendelijk sluisbeheer werd duidelijk dat er relatief veel onzekerheid is met betrekking tot de dynamiek in en rondom de Haringvlietsluizen. Het is daarom aan te bevelen om lokale metingen te doen in en nabij de Haringvlietsluizen³⁴.

6.3.2 Aanbevelingen voor verdere analyse

- Een belangrijk verschil tussen de gemodelleerde zoutgehaltenes en de gemeten zoutgehaltenes was de te snelle ontzilting van put D. Alhoewel enkele hypothesen zijn geopperd in paragraaf 3.8 is er geen duidelijke aanleiding gevonden. Als uit andere model-meting vergelijkingen een zelfde beeld naar voren komt, is het aan te bevelen verder te onderzoeken waar dit verschil door komt.
- Voor een verdere analyse van de zoutvrachten tussen verschillende putten is het wenselijk om in de toekomstige simulaties gebruik te maken van tracers om het zout dat in verschillende putten zit apart te kunnen volgen. De balans-tool zoals die nu wordt gebruikt om de zoutfluxen te ontrafelen kan ook deze tracers volgen, waardoor het vullen van de ene put met zout uit de andere put beter in kaart kan worden gebracht.

6.3.3 Aanbevelingen voor de modelschematisatie en simulatie

- Neem als bovenstroomse randvoorwaarde een gemeten zoutgehalte. Nu is gekozen voor een vaste lage waarde. Echter hierdoor is het minder eenvoudig om stroomopwaartse effecten van opmenging en stroming in kaart te brengen.
- Maak gebruik van een z-sigma laagverdeling over de verticaal. Nu is alleen van z-lagen gebruik gemaakt. Om het effect op stroming (en transport) nabij het oppervlakte beter te beschrijven, is een flexibele laagverdeling nodig die meegroeit met de waterstand. De overgang tussen sigma-lagen (aan het oppervlakte) en z-lagen nabij de bodem moet dan rond de -4m NAP liggen, zodat het zout transport nabij de bodem niet wordt beschreven door sigma-lagen.
- Er is bij de modelopzet gekozen om bij de start van de modelsimulatie de mate van verzilting in het Haringvliet na te bootsen zoals die op dat moment werd gemeten. Doordat alleen verzilting in de diepe delen kan worden opgelegd, is de verzilting beperkt tot een diepte van meer dan -10m NAP. In werkelijkheid is de verzilting dan nog tot boven -10m NAP en zakt die spronglaag pas later uit tot onder -10m NAP. Een modelsimulatie van de periode waarin de putten in werkelijkheid al tot een diepte van -10m NAP zijn schoongespoeld, zou een meer directe vergelijking mogelijk maken tussen model en meting, maar zou tot een zeer korte simulatieperiode leiden waarin de resultaten geanalyseerd kunnen worden. De modelopzet zou ook kunnen worden aangepast zodat het model het proces van verzilting van het Haringvliet beschrijft. Hiervoor moeten aannames worden gedaan over de inkomende verzilting (en debieten) en het gedrag door de Haringvlietsluizen. Een mogelijkheid is om de modelschematisatie voor dat type simulaties uit te breiden met de voordelta en een beschrijving van het Haringvlietsluizencomplex, zoals wordt benoemd in paragraaf 6.3.4.
- Sinds het D-HYDRO Haringvlietmodel als uitsnede van het D-HYDRO RMM model is gemaakt in 2019, is het D-HYDRO RMM model verder doorontwikkeld. Dit model is in 2022 opgeleverd. Het is aan te bevelen om de D-HYDRO Haringvliet

³⁴ Eind 2022 zijn continue metingen in de Haringvlietsluizen gestart (ADCP en CTD). Daarnaast worden aanvullende metingen incidenteel in (op) de sluisen gedaan.

modelschematisatie opnieuw uit te knippen uit het D-HYDRO RMM model en daarmee de meest recente gebiedsbeschrijving over te nemen³⁵.

- Voeg aan de modelsimulatie de temperatuur toe. Mogelijk leidt temperatuur stratificatie tot een stabiliserend effect op bijvoorbeeld de zoute onderlaag in put D, waardoor deze minder snel ontzilt in werkelijkheid dan nu wordt beschreven in de modelresultaten.
- Voor vervolgonderzoek wordt geadviseerd om een inschatting van de zoutlast (of onttrekking) van de verschillende elementen van de Haringvlietsluizen te vergelijken en waar relevant mee te nemen.

6.3.4 Aanbevelingen voor uitbreiding van de modeltoepasbaarheid

- Om het proces Kieren te kunnen beschrijven, zal het huidige model moeten worden uitgebreid met een beschrijving van het gebied zeewaarts van de Haringvlietsluizen in combinatie met een nauwkeurige beschrijving van de processen in en rondom de Haringvlietsluizen zelf. Hiervoor is een driedimensionale kunstwerk formulering nodig om het diepte-afhankelijke proces door de Haringvlietsluizen te beschrijven. Ook zullen ook de andere elementen van het Haringvlietcomplex moeten worden meegenomen, zoals de zoutriolen, visluizen, lekkage en de scheepvaartsluis. Tot slot moet om het inlaten van zout water het Haringvliet in te beschrijven, ook een beschrijving van de Voordelta worden meegenomen om het inkomende zoutgehalte te beschrijven.
- Deze uitbreiding van het modeldomein met de Voordelta maakt het daarnaast ook mogelijk om kennisvragen specifiek gericht op dit gebied te kunnen beantwoorden.

³⁵ Gegevens over bijvoorbeeld dunne dammen waren nog niet beschikbaar in het D-HYDRO RMM model in 2019 toen het D-HYDRO Haringvlietmodel is uitgeknipt. Deze gegevens zijn van belang bijvoorbeeld voor de stroming en zoutverspreiding rondom de havenhoofden van Middelharnis.

7 Referenties

- Bijlsma, A.C., Chavarrias, V., Genseberger, M. (2022). 3D modelonderzoek verdieping vaargeul Kornwerderzand. Deltares rapport 11208075-002-ZWS-0001. Delft: Deltares.
- Foole, A. (2020). Analyseren meetgegevens Haringvliet – nalevering. Memo 2020.07.
- Kaaij, T. v.d., Chavarrias, V. & Kranenburg, W.M. (2022). RMM 3D, een nieuw 3D model van de RijnMaasMonding in D-HYDRO; Vergelijking met zout- en debietmetingen najaar 2018. Delft: Deltares rapport 11206813-007-ZWS-0002.
- Kranenburg, W.M. (2020). Ontzilting Diepe Putten: verbanden spuidebiet, wind, stroomsnelheden, spronglaaghoogte. Deltares rapport 11205272-021, Delft, 50 pp.
- Kranenburg, W.M., Tiessen, M., Blaas, M., Van Veen, N. (2023). Circulation, stratification and salt dispersion in a former estuary after reintroducing seawater inflow. Accepted for publication in Estuarine, Coastal and Shelf Science.
- Projectplan Waterwet (2016). Compenserende maatregelen Kierbesluit Goeree-Overflakkee Oost. Projectplan Waterwet ex art. 5.4 Waterwet.
- Rijkswaterstaat (1972). De verziltingsbestrijding op het noordelijk Deltabekken na het inwerkingstellen van de Haringvlietssluisen. Rijkswaterstaat rapport. Ministerie van Verkeer en Waterstaat (https://puc.overheid.nl/doc/PUC_105200_31/1/).
- Rijkswaterstaat (2020). Data analyse Kierproef Haringvliet; Naleverproef NL19-01 4 oktober 2019 – 14 februari 2020. Rijkswaterstaat rapport (concept), door Tactisch team Lerend Implementeren Kierbesluit, WNZ.
- Smith, S.D., Banke, E.G. (1975) Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 101: 665–673
- Stelling, G.S., van Kester, J.A.Th.M., Hulsen, L.J.M. (1994). 3D-numerieke modellering Haringvlietssluisen; Sluisformuleringen voor het Haringvlietcomplex en testberekeningen. Rapport Waterloopkundig Laboratorium VR725.94/Z686. Delft: WL.
- Van Kester, J.A.Th.M., Stelling, G.S. (1996). 3D-numerieke modellering gedeeltelijk geopende Haringvlietssluisen; Sluisformulering en testberekeningen voor implementatie in TRIWAQ. Rapport Waterloopkundig Laboratorium KEPS02 / Z948, Delft: WL.
- Veenstra, J., Becker, A., Kaaij, T. v., & Yossef, M. (2020). Ontwikkeling zesde-generatie Rijn-Maasmondig-model;. Deltares rapport 11205258-006-ZWS-0001. Delft: Deltares.
- Verbruggen, W., van der Baan, J. (2020): Ontwikkeling zesde-generatie 3D Noordzeekanaal Amsterdam-Rijnkanaal model: Modelbouw, kalibratie en validatie. Deltares rapport 11205258-011-ZWS-0004. Delft: Deltares.
- Weiler, O.M., Uittenbogaard, R.E., Keetels, G.H., Bijlsma, A.C., Cornelisse, J.M. (2012) Zoutlekbeperking Volkeraksluisen; Verdere reductie van de zoutlek middels een zoutvang. Deltares rapport 1204948-000-ZKS-0013. Delft: Deltares.

A Karakteristieken van het Haringvlietsluizencomplex

A.1 Kentallen

De hieronder weergegeven data is afkomstig uit de RWS WNZ Nota Kentallen Haringvlietsluizen van Sacha de Goederen (van 2018).



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Expertteam Lerend Implementeren

Rijkswaterstaat

Boompjes 200
3011 XD Rotterdam
Postbus 556
3000 AN Rotterdam
T 010 402 62 00

Contactpersoon

Sacha de Goederen
T 06 15890465
Sacha.de.Goederen@rws.nl

nota

Kentallen Haringvlietsluizen

Datum

2 juli 2018

Ons kenmerk

RWS/WNZ/NOV/2018.07

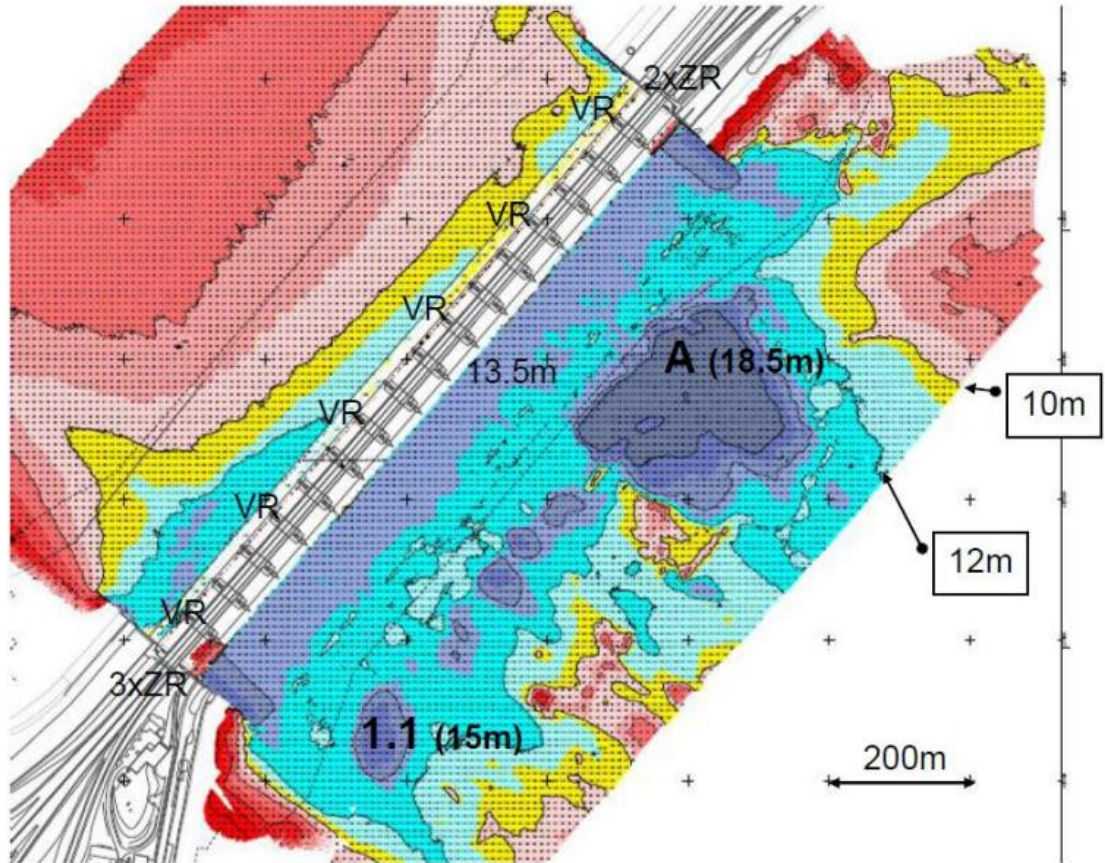
Bijlage(n)

-

Geometrie en andere kentallen

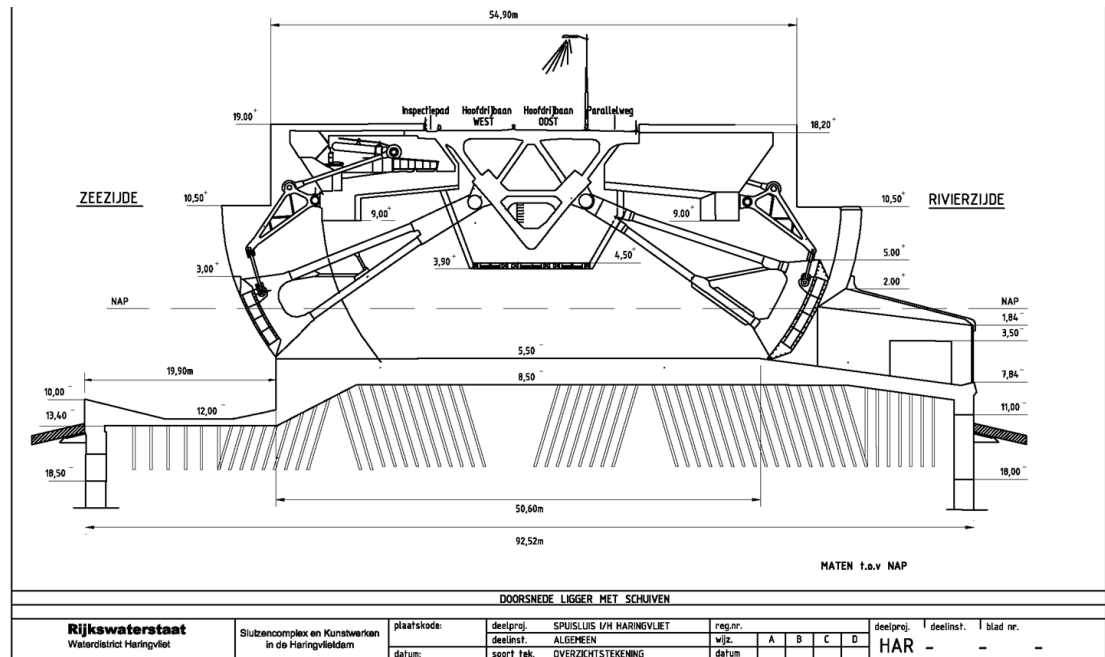
Spuisluizen	17x (nr. 1 is noordzijde)
Breedte rivierschuiven	56.50 m
Breedte zeeschuiven	58.50 m of 57.50 (nr. 1 en nr. 17)
Drempelhoogte	-5.50+NAP
Kerende hoogte	3 m+NAP (zee) en 5 m+NAP (rivier)
Beweegsnelheid	~1 cm/s (1 schuif per pijler tegelijkertijd heffen)
Minimale hefhoogte	0.40 m (praktijklimiet) 0.30 m (gedocumenteerd)
Max. hefhoogteverschil	2.50 m tussen naastgelegen openingen
Visiolen	6x (in pijlers 1,4,7,10,13,16)
Afmeting	H:2.00 m B:1.20 m
Hefhoogte deuren	0.25 m resp. volledig open, alternerend
Vloerhoogte	-5.50 m+NAP
Lengte	65 m
Zoutriolen	5x
Afmeting	2.80 x 2.80 m (7.84 m ²)
Hefhoogte	Standaard 0.30 m, bij zoutbezwaar tot 1.20 m
Instroming	-13.00 m+NAP
Schutsluis	
Afmeting	L:144.5 m B 16 m D -5 m+NAP
Kolkvolume	12700 m ³ bij 0.5 m+NAP
Doorlaatfractie zout	90% geschat
Schuttingen	17/dag gemiddeld

A.2 Ligging van de verschillende elementen van het Haringvlietcomplex



Bodemligging aan weersijden van de Haringvlietsluizen in combinatie met de verschillende kunstwerkelementen: VR = Visriool, ZR = Zoutriool. Drempel van de Haringvlietsluizen ligt op -5.5m (Weiler et al., 2012)

A.3 Dwarsdoorsnede van de spuisluis



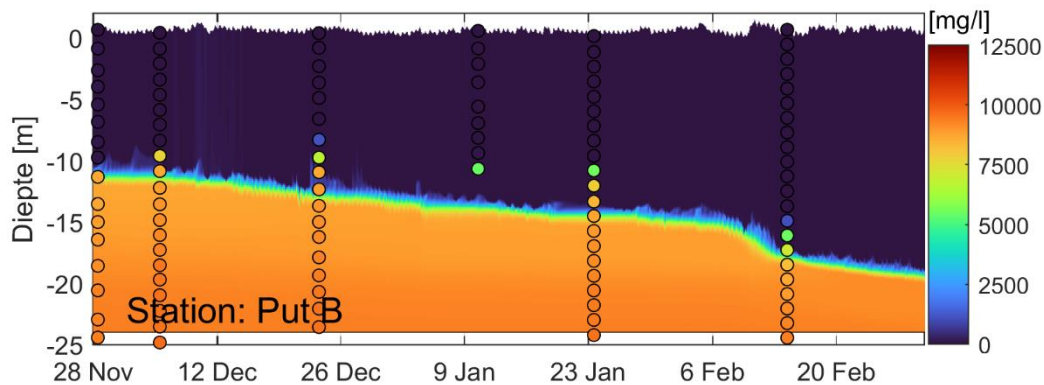
B Toetsing - Aanvullende figuren

B.1 Waterstanden

Geen aanvullende figuren.

B.2 Globaal beeld zoutgehalte

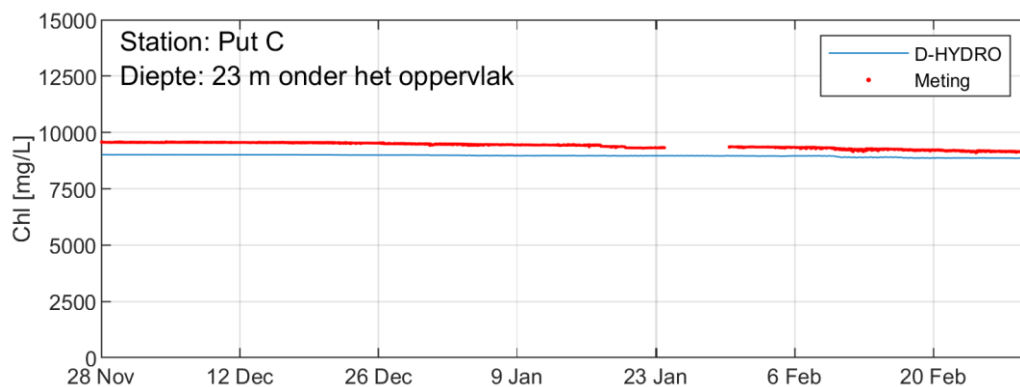
B.2.1 Vergelijking tussen gemeten en gemodelleerd zoutgehalte



Figuur B.1 De zoutontwikkeling over tijd voor put B.

B.3 Zoutgehalte continue metingen

B.3.1 Zoutgehalte in de verzilte diepe delen

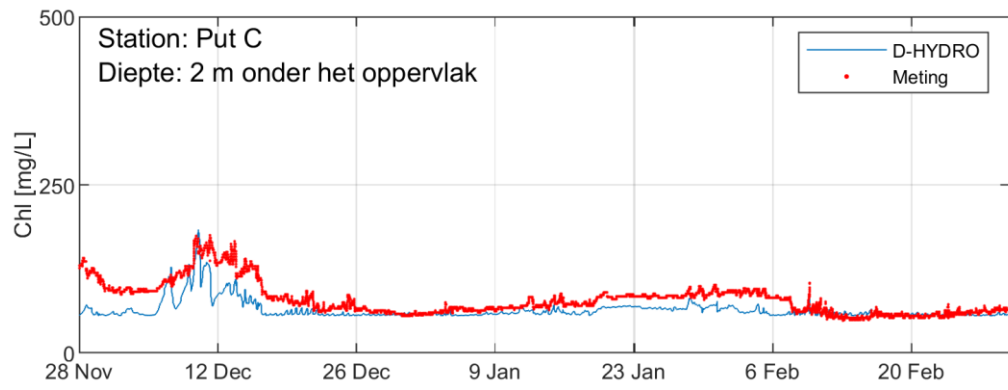


Figuur B.2 Zoutgehalte onderin put C, gemeten (rood) en gemodelleerd (blauw).

B.3.2 Zoutgehalte in de diepe delen van de zoutvang (put A)

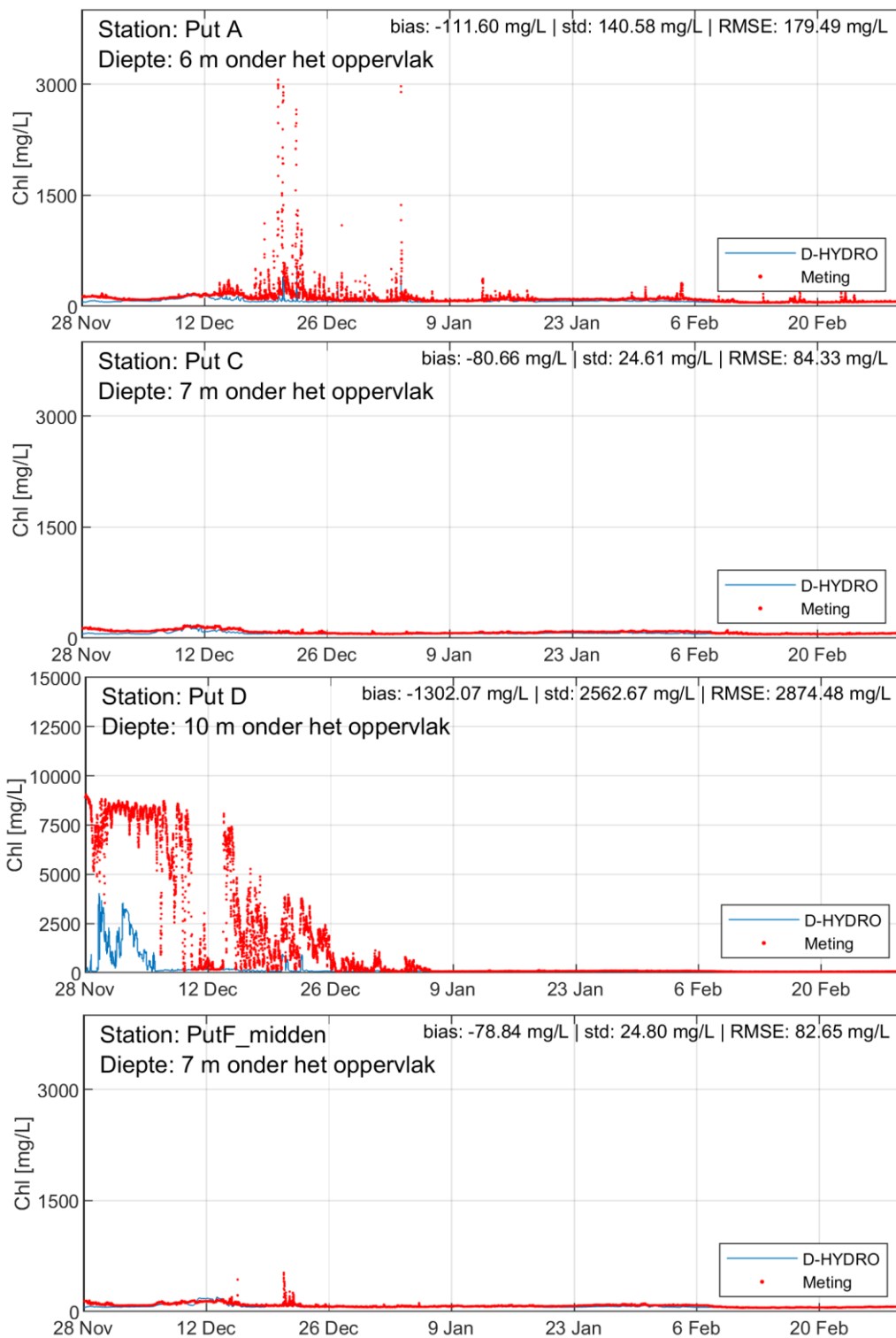
Geen aanvullende figuren.

B.3.3 Zoutgehalte nabij het oppervlakte



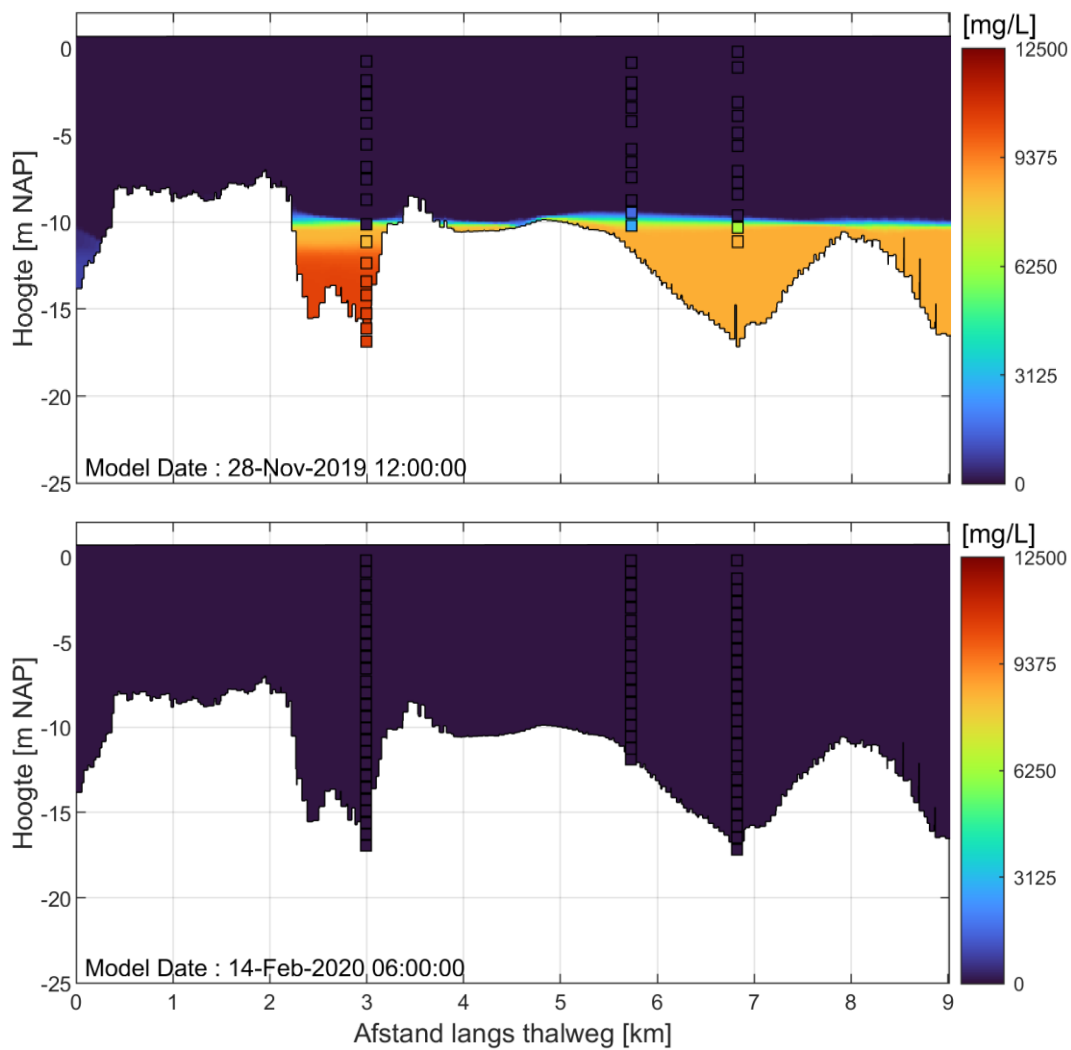
Figuur B.3 Gemeten (rood) en gemodelleerd (blauw) zoutgehalte nabij het oppervlakte.

B.3.4 Zoutgehalte in het midden van de waterkolom

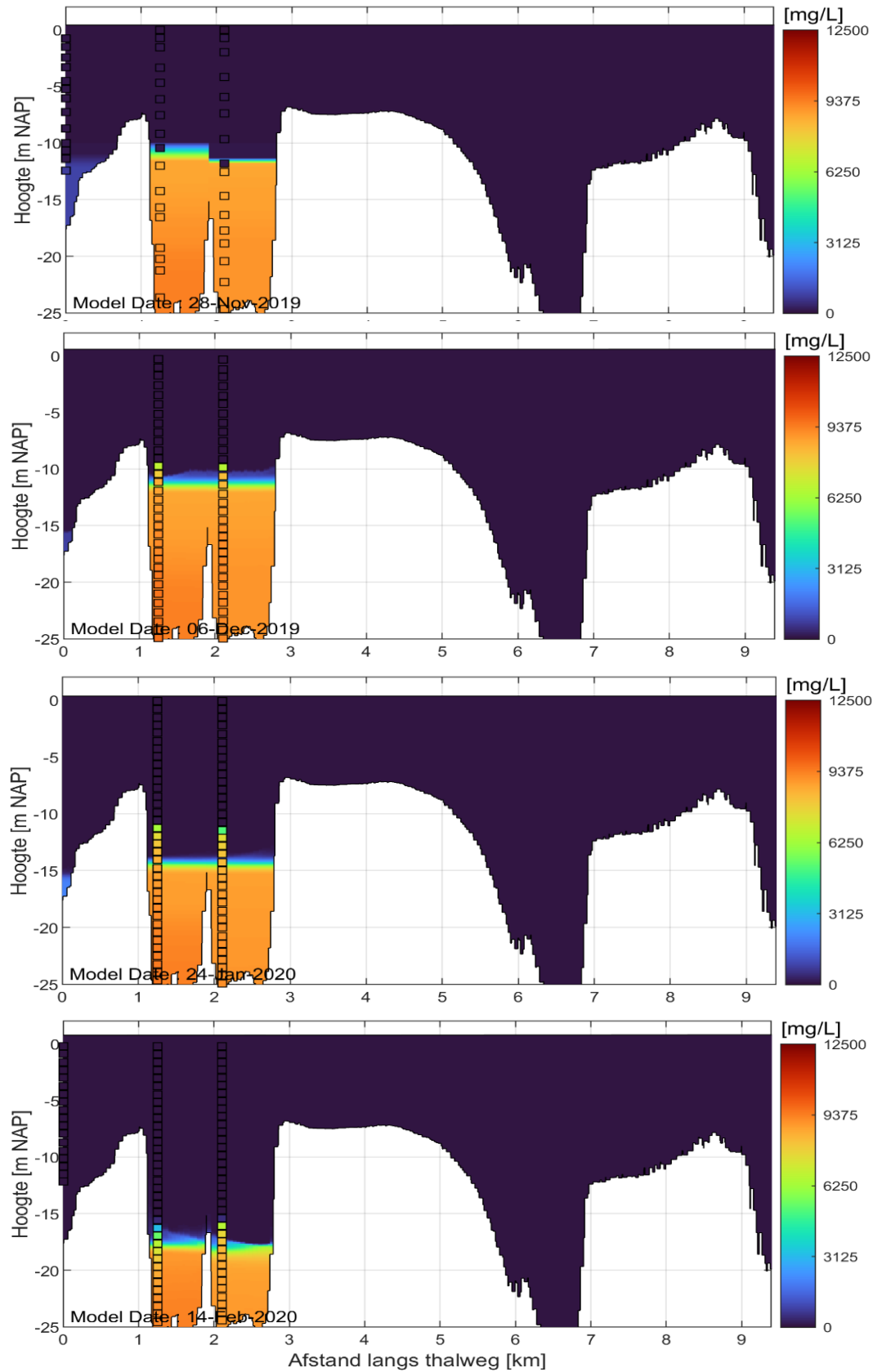


Figuur B.4 Gemeten (rood) en gemodelleerd (blauw) zoutgehalte in het midden van de waterkolom.

B.4 Zoutgehalte langs transects door het Haringvliet



Figuur B.6 Zoutgehalte langs transect aan de zuidzijde van het Haringvliet. Gemeten zoutgehaltes op deze momenten zijn weergegeven in de kleur van de vierkanten.



Figuur B.7 Zoutgehalte langs transect aan de noordzijde van het Haringvliet. Gemeten zoutgehaltes op deze momenten zijn weergegeven in de kleur van de vierkanten.

B.5 Ontwikkeling spronglaag

Geen aanvullende figuren.

B.6 Ontwikkeling zoutmassa

Geen aanvullende figuren.

B.7 Stroomsnelheden

Geen aanvullende figuren

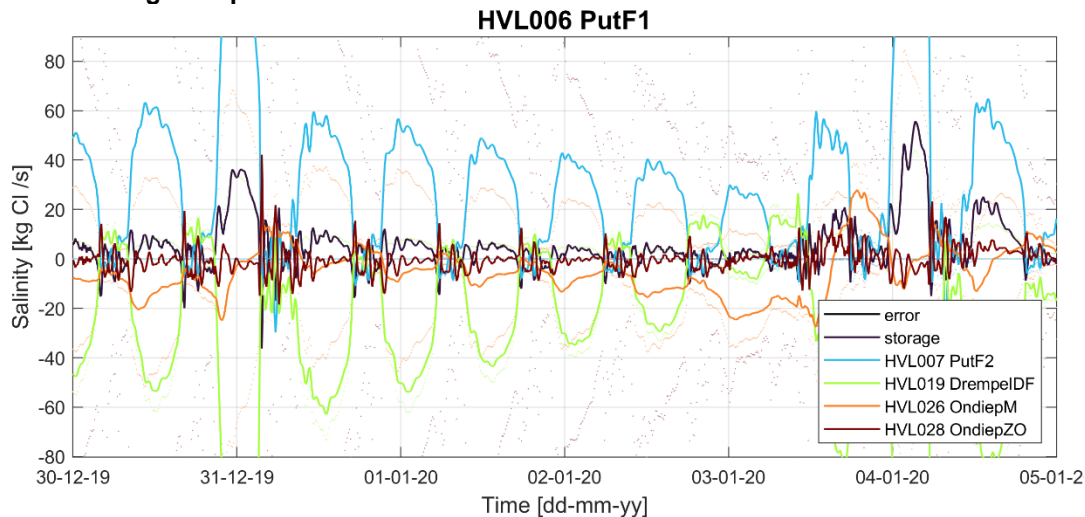
C Analyse modelgedrag - aanvullende figuren

C.1 Effect van wind

Geen aanvullende figuren.

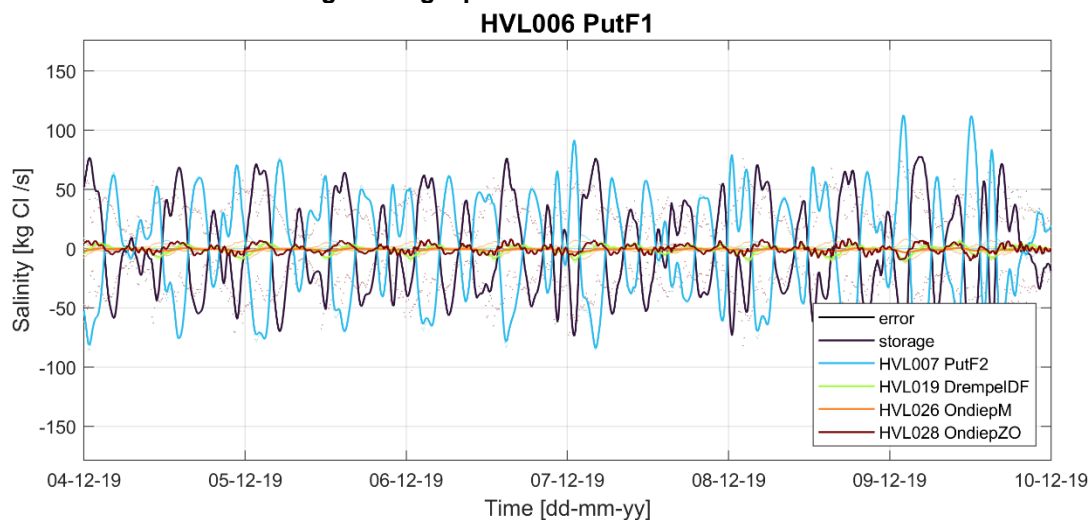
C.2 Effect van afvoer door de Haringvlietsluizen

C.2.1 Periodes met grote spuidebieten



Figuur C.1 Zoutflux van en naar put F voor de periode met grote spuidebieten door de Haringvlietsluizen

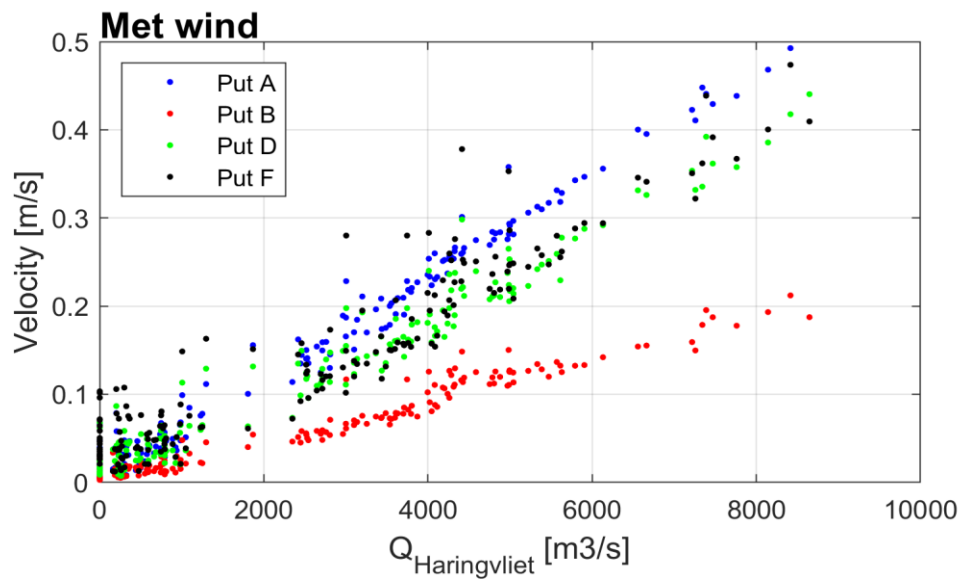
C.2.2 Periodes waarin kleinschalig wordt gespuid



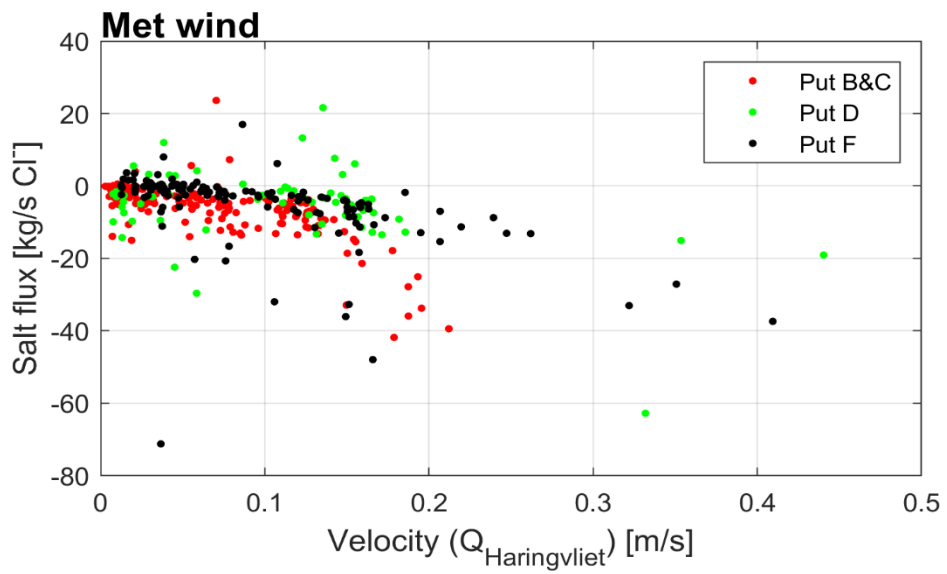
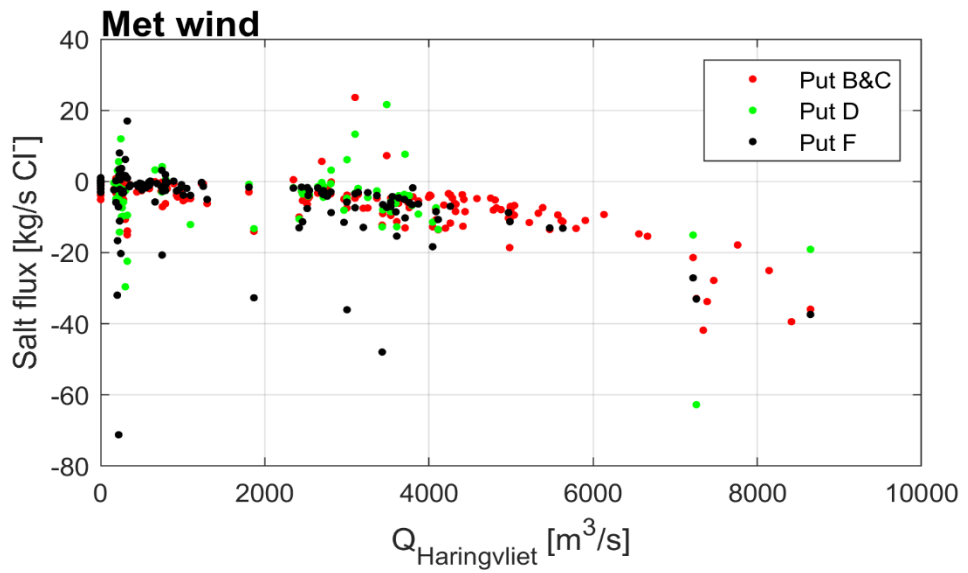
Figuur C.2 Zoutflux van en naar put F voor de periode waarin kleinschalig wordt gespuid door de Haringvlietsluizen

C.2.3 Kwantificering effect van afvoer door de Haringvlietsluizen

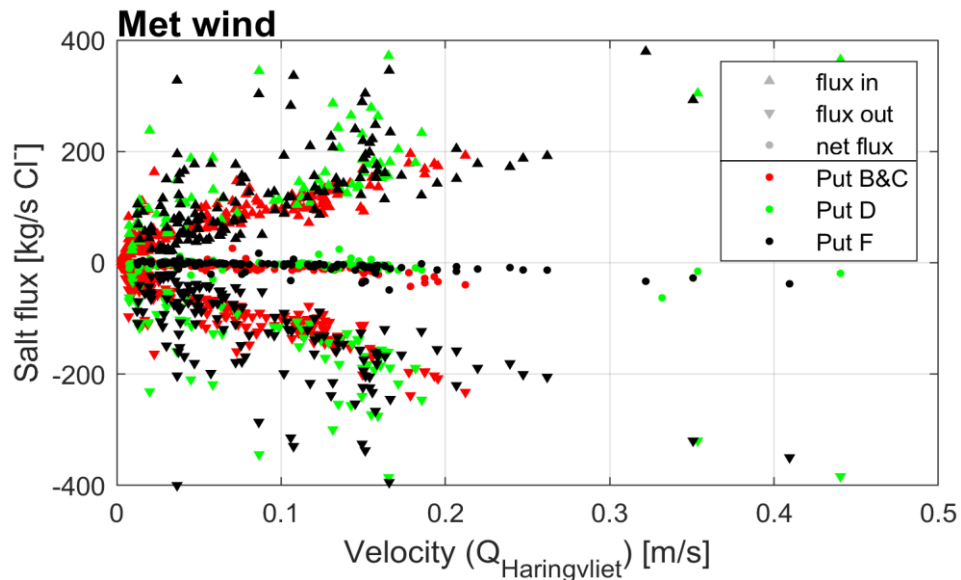
Op basis van de simulatie met wind:



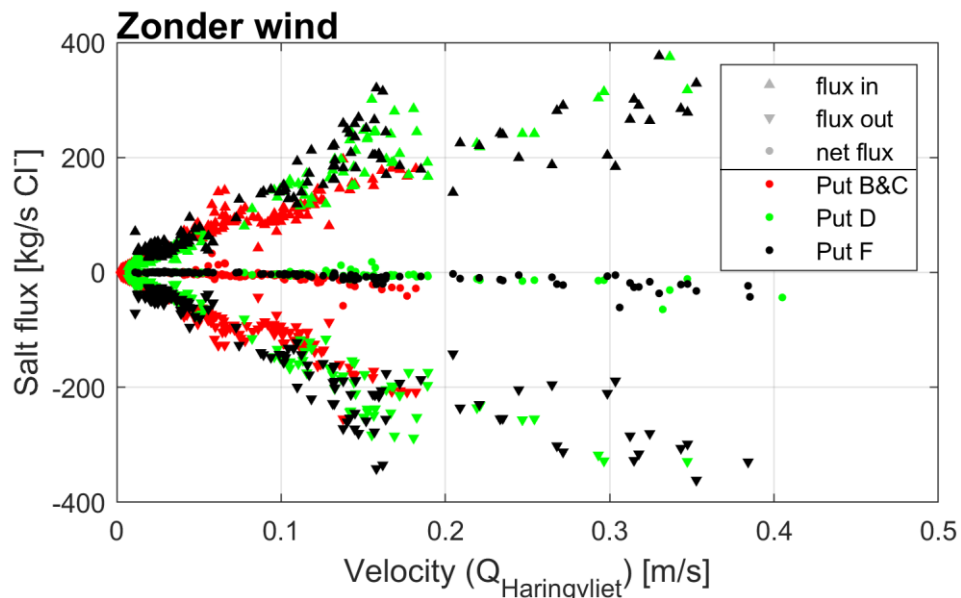
Figuur C.3 Relatie tussen de piek in het spuidebiet door de Haringvlietsluizen en de maximale stroomsnelheid voor verschillende putten in het Haringvliet.



Figuur C.4 Netto zoutflux als gevolg van het maximale spuidebiet door de Haringvlietsluizen (boven) en de maximale stroomsnelheid (onder).



Figuur C.5 In- en uitgaande zoutfluxen (in combinatie met de netto flux) per put als gevolg van de stroomsnelheid in de verschillende putten, veroorzaakt door spuien via de Haringvlietsluizen

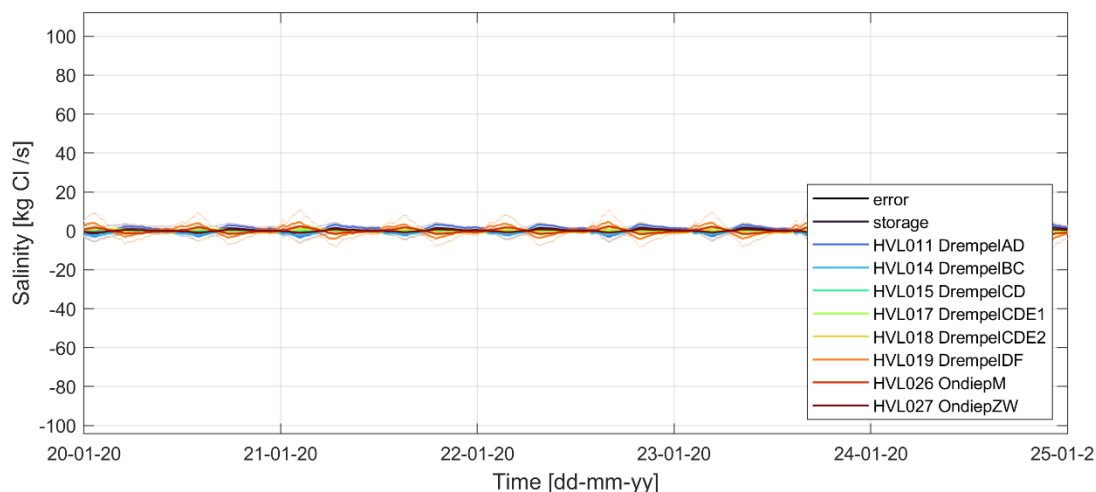


Figuur C.6 In- en uitgaande getijgemiddelde zoutfluxen (in combinatie met de netto flux) per put uitgezet tegen de als gevolg van de maximale diepte gemiddelde stroomsnelheid in de verschillende putten, veroorzaakt door spuien via de Haringvlietsluizen (som zonder wind)³⁶.

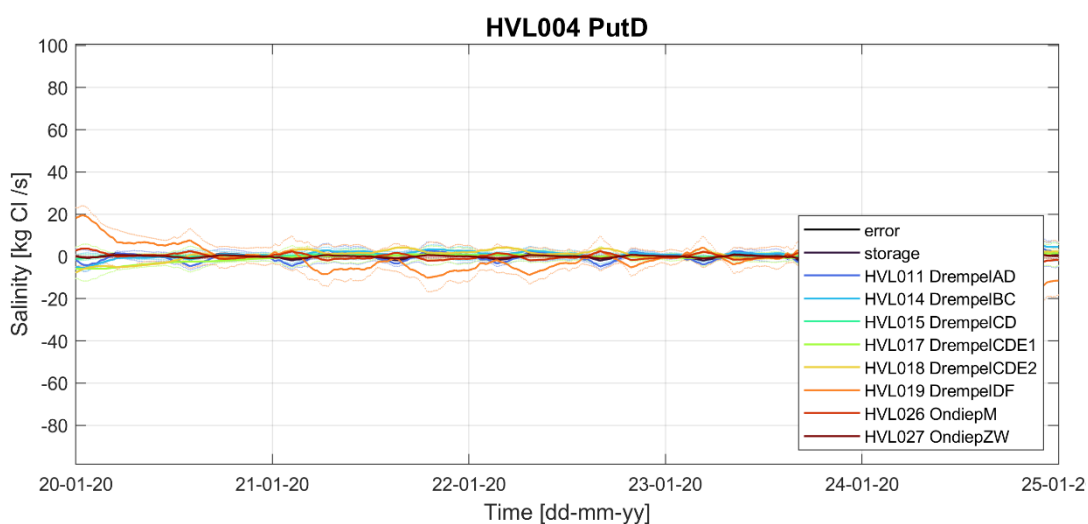
Ten opzichte van de netto getijgemiddelde zoutflux (bolletjes) zijn de inkomende en uitgaande fluxen (driehoekjes) vele malen groter. Daarnaast is hier sprake van een meer lineaire relatie tussen de zoutflux en de stroomsnelheid, waarbij kleine stroomsnelheden leiden tot een proportioneel kleinere zoutflux dan grote stroomsnelheden. Uit dit figuur blijkt dat de eigenlijke (bruto) zoutfluxen wel direct beïnvloed worden door de stroomsnelheid, en dat deze relatie relatief constant is voor de verschillende putten en de vullingsgraad.

³⁶ In tegenstelling tot putten B/C en D, leiden minimale stroomsnelheden als gevolg van spuien via de Haringvlietsluizen voor put F niet tot een minimalisering van de in- en uitgaande zoutflux. Dit wordt veroorzaakt door het getijdedebiet door het Spui.

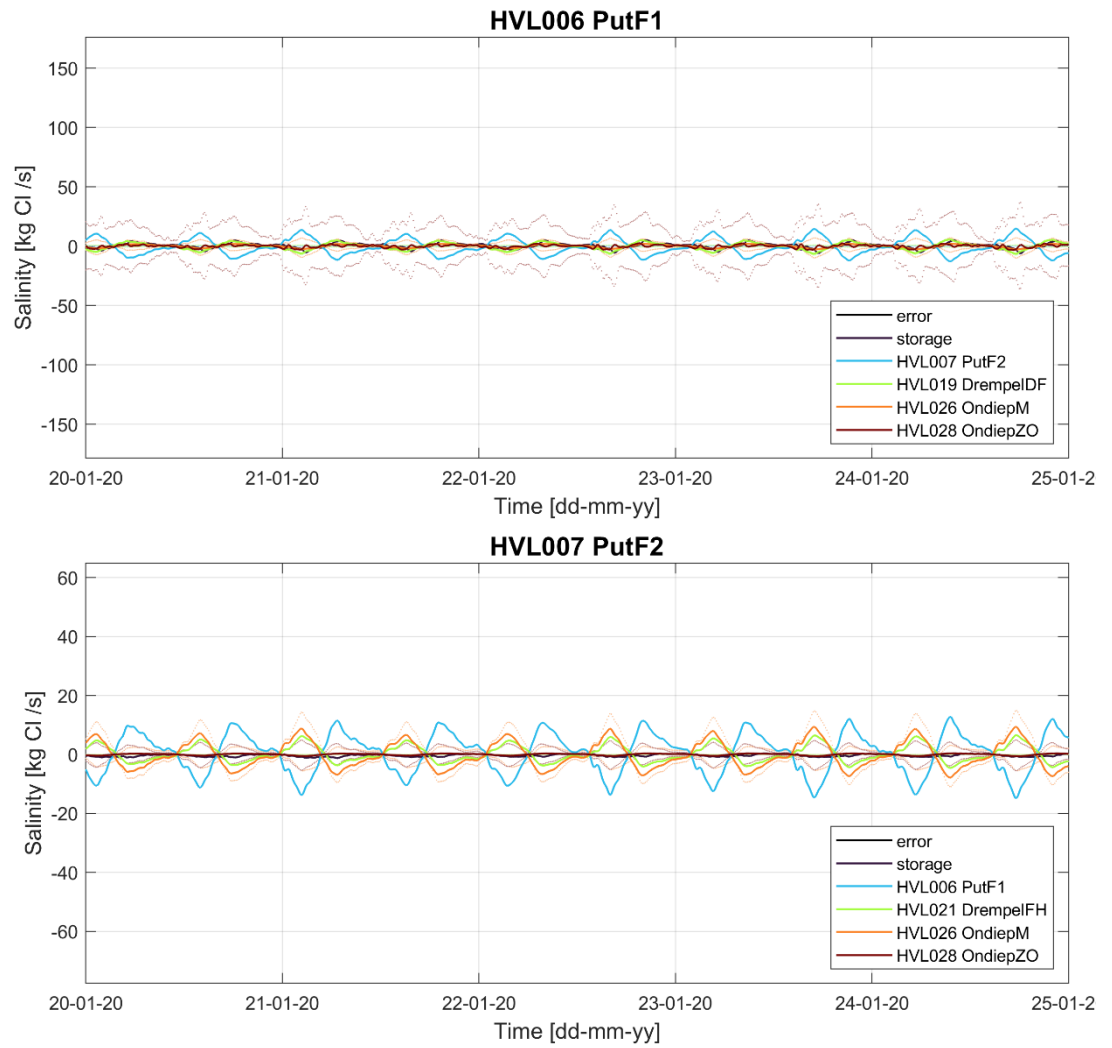
C.3 Effect van getij door het Spui



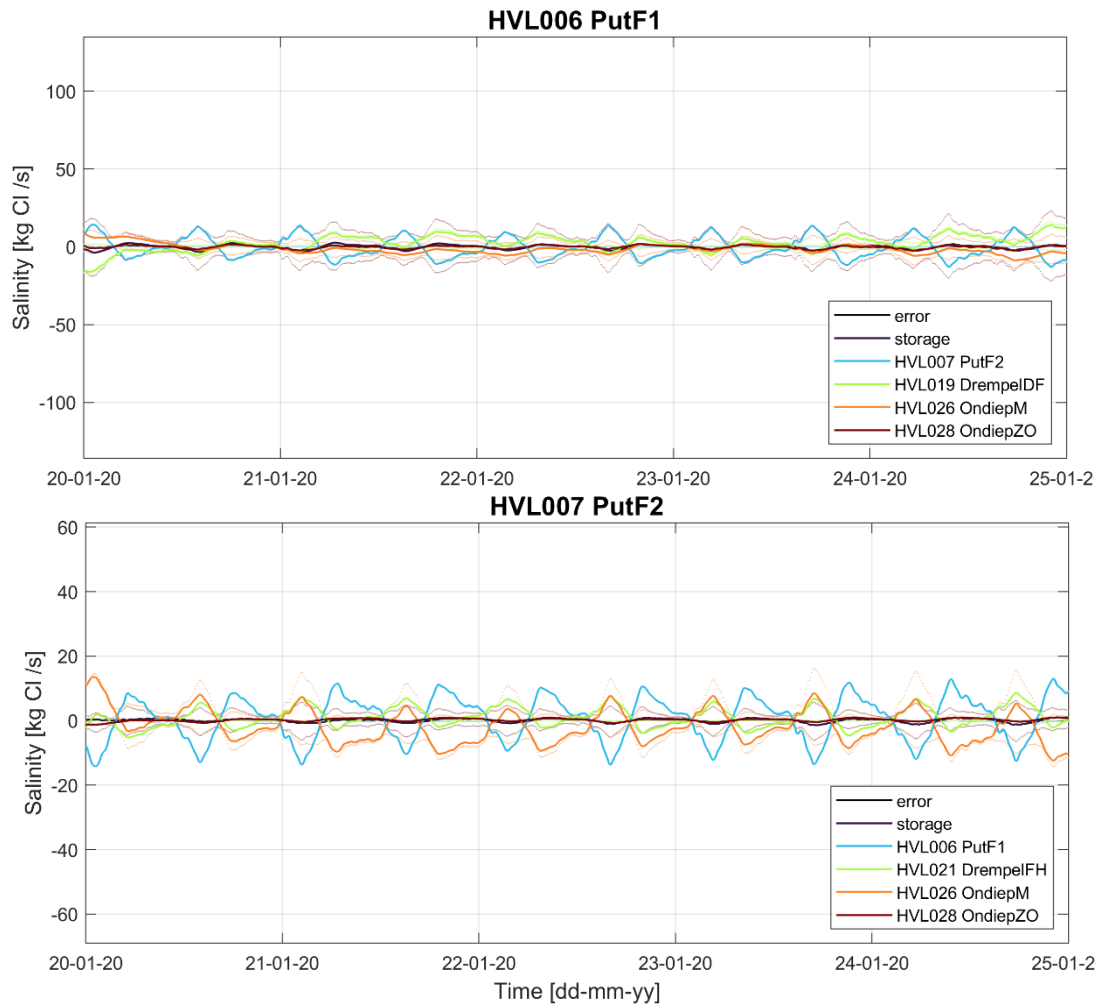
Figuur C.7 Zoutflux van en naar put D vanuit verschillende omliggende gebieden, als gevolg van het debiet door het Spui (simulatie zonder wind).



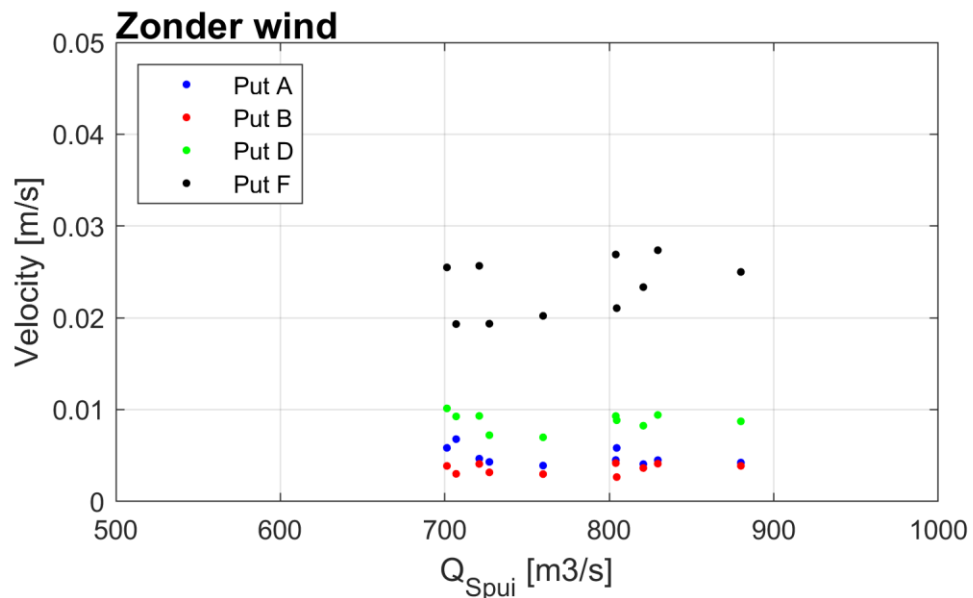
Figuur C.8 Zoutflux van en naar put D vanuit verschillende omliggende gebieden, als gevolg van het debiet door het Spui (dit is de simulatie met wind waarbij in deze periode put D al is ontzilt).



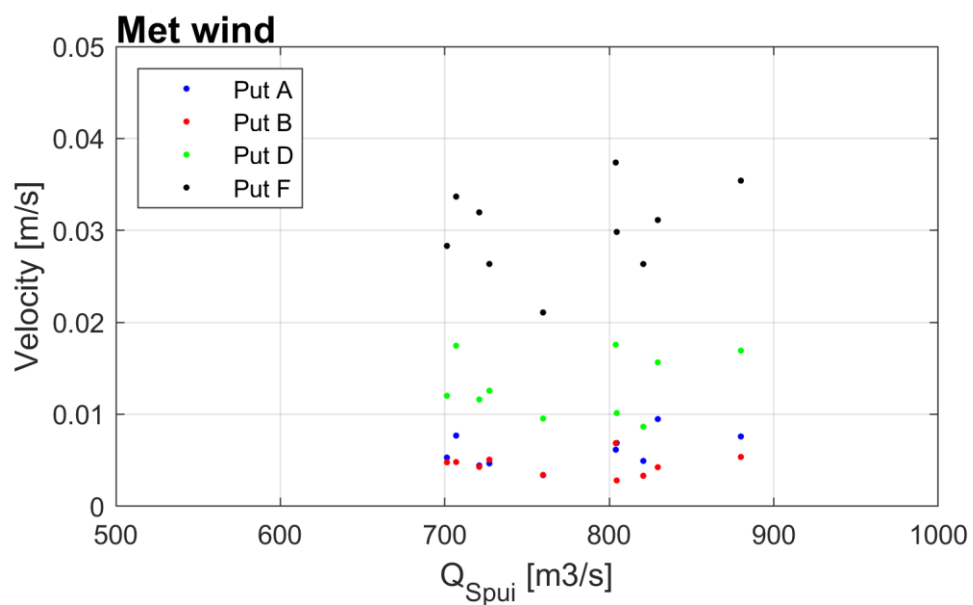
Figuur C.9 Zoutflux van en naar put F (opgesplitst in F1 en F2) vanuit verschillende omliggende gebieden, als gevolg van het debiet door het Spui (simulatie zonder wind).



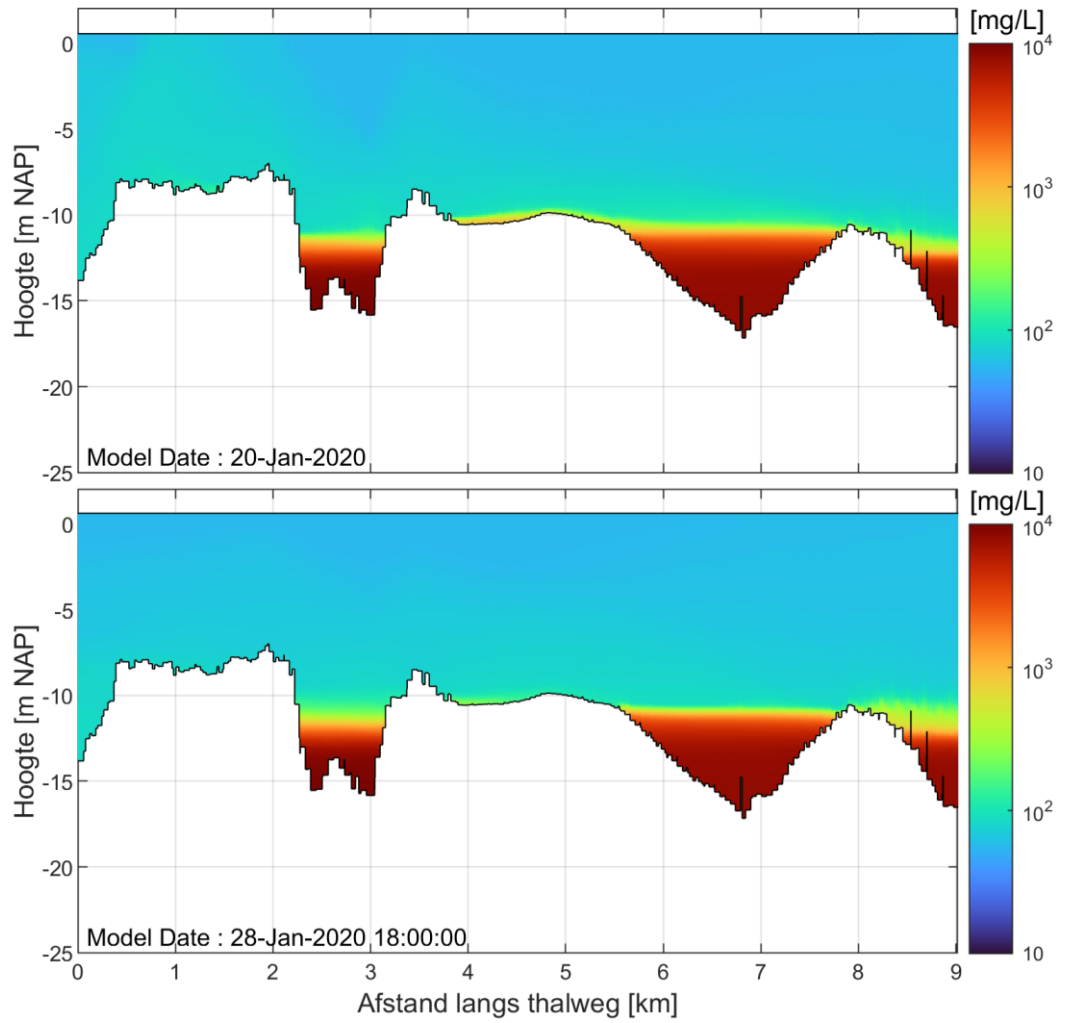
Figuur C.10 Zoutflux van en naar put F (opgesplit in F1 en F2) vanuit verschillende omliggende gebieden, als gevolg van het debiet door het Spui (simulatie met wind).



Figuur C.11 Relatie tussen de piek in het debiet door het Spui en de maximale stroomsnelheid voor verschillende putten in het Haringvliet (in de periode waarin in de modelsimulatie niet wordt gespuid door de Haringvlietsluizen en in de simulatie zonder wind).

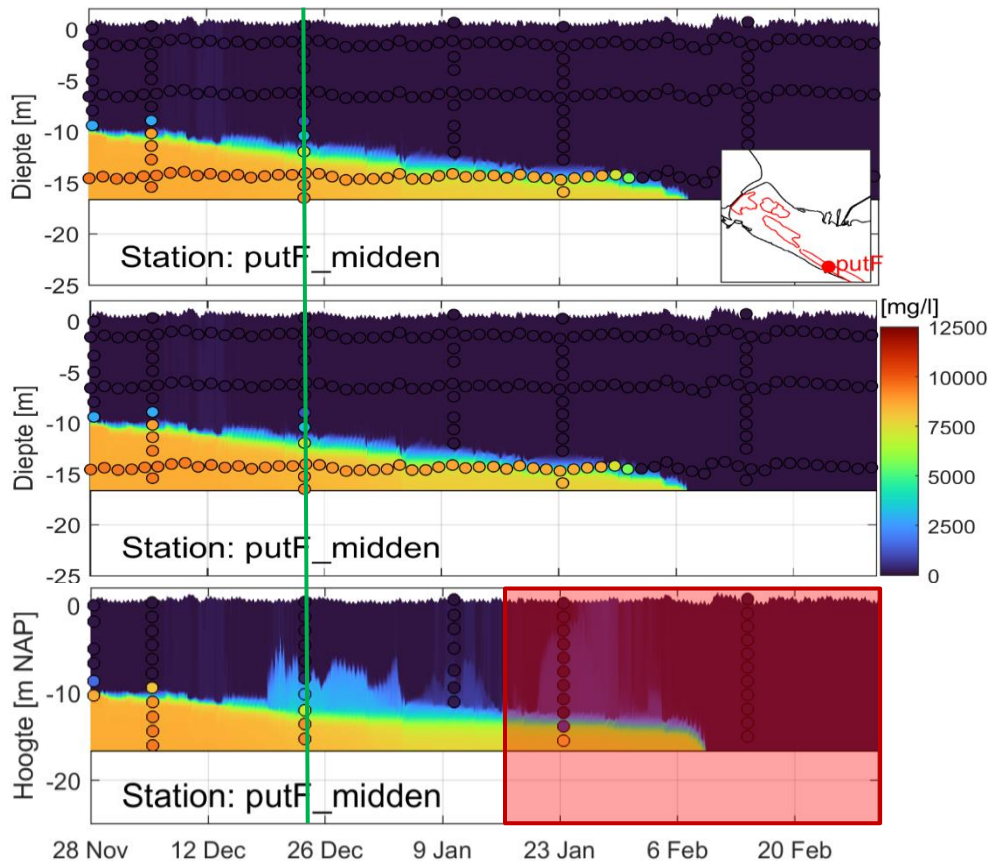


Figuur C.12 Relatie tussen de piek in het debiet door het Spui en de maximale stroomsnelheid voor verschillende putten in het Haringvliet (in de periode waarin in de modelsimulatie niet wordt gespuid door de Haringvlietsluizen).



Figuur C.13 Zoutgehalte langs transect aan de zuidzijde van het Haringvliet aan het begin en einde van de periode waarin niet wordt gespuid via de Haringvlietsluizen (simulatie zonder wind).

C.4 Effect van visvriendelijk sluisbeheer

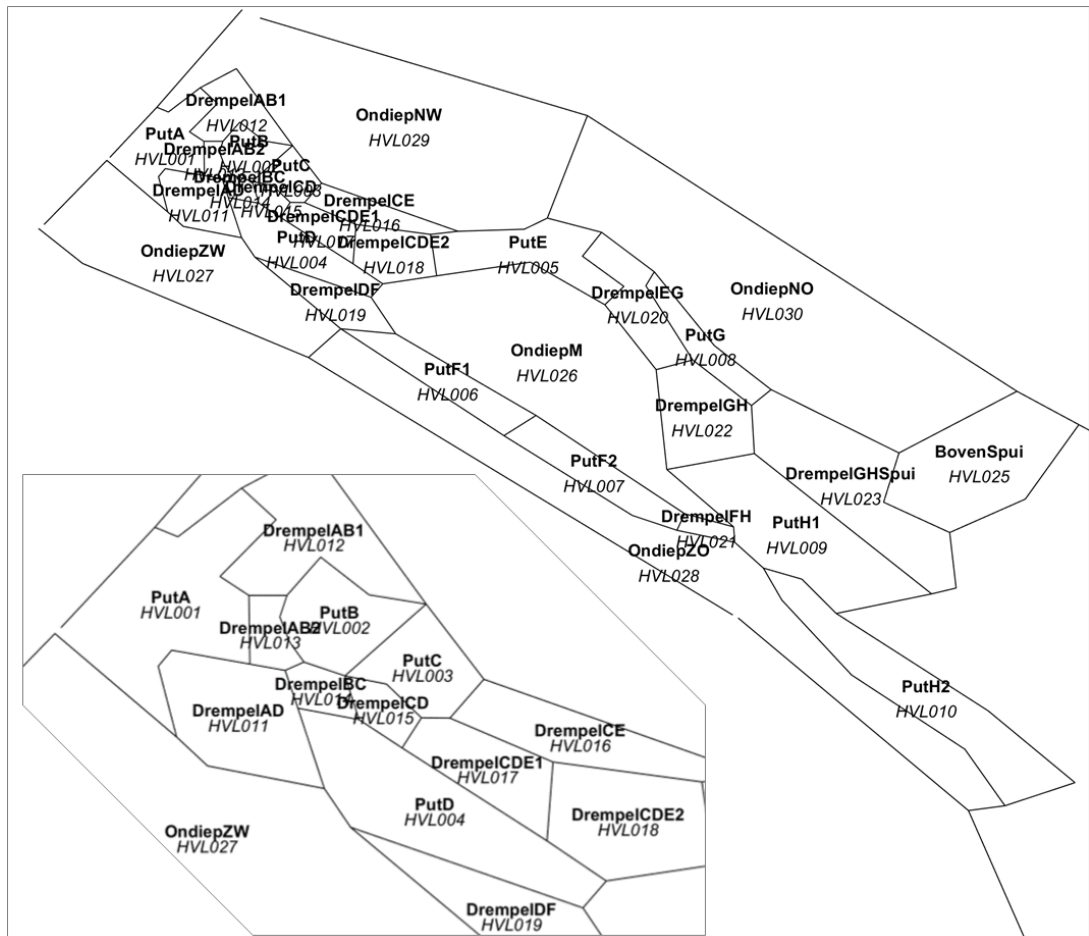


Figuur C.14 Zoutgehalte over de diepte in put F. a) simulatie zonder het effect van visvriendelijk sluisbeheer op de verzilting. b) met visvriendelijk sluisbeheer, waarbij het inkomende zoutgehalte gelijk is aan het gemeten gehalte bij Stellendam buiten. c) Met visvriendelijk sluisbeheer, waarbij het inkomende zoutgehalte constant is op 10 PSU. De groene lijn geeft het moment aan waarop wordt gestart met visvriendelijk sluisbeheer. Het rode veld aan het einde van de simulatie in c) is indicatief van een periode waarin de modelinstellingen voor deze simulatie leiden tot modelresultaten die niet direct meer vergeleken kunnen worden met die van de daarboven weergegeven simulaties.

D Zoutfluxen tussen deelgebieden Haringvliet

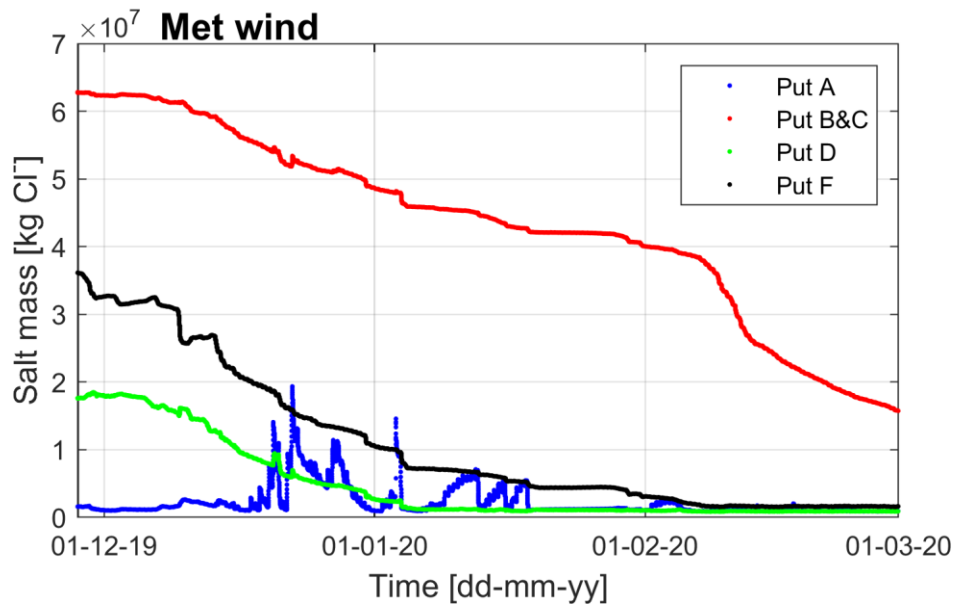
Om beter inzicht te krijgen in de transporten tussen de verschillende gebieden in het Haringvliet, is het hydrodynamische model gekoppeld met een uit waterkwaliteit overgenomen tool, Balans genaamd, waarin de massa van verschillende stoffen voor verschillende gebieden wordt bijgehouden als ook de fluxen tussen deelgebieden.

Om dit te doen wordt het modeldomein opgesplitst in verschillende deelgebieden (Figuur D.1; voor het Haringvliet wordt gebruik gemaakt van een geschematiseerde indeling die is opgesteld door Zaid Bashir van RWS-WNZ).



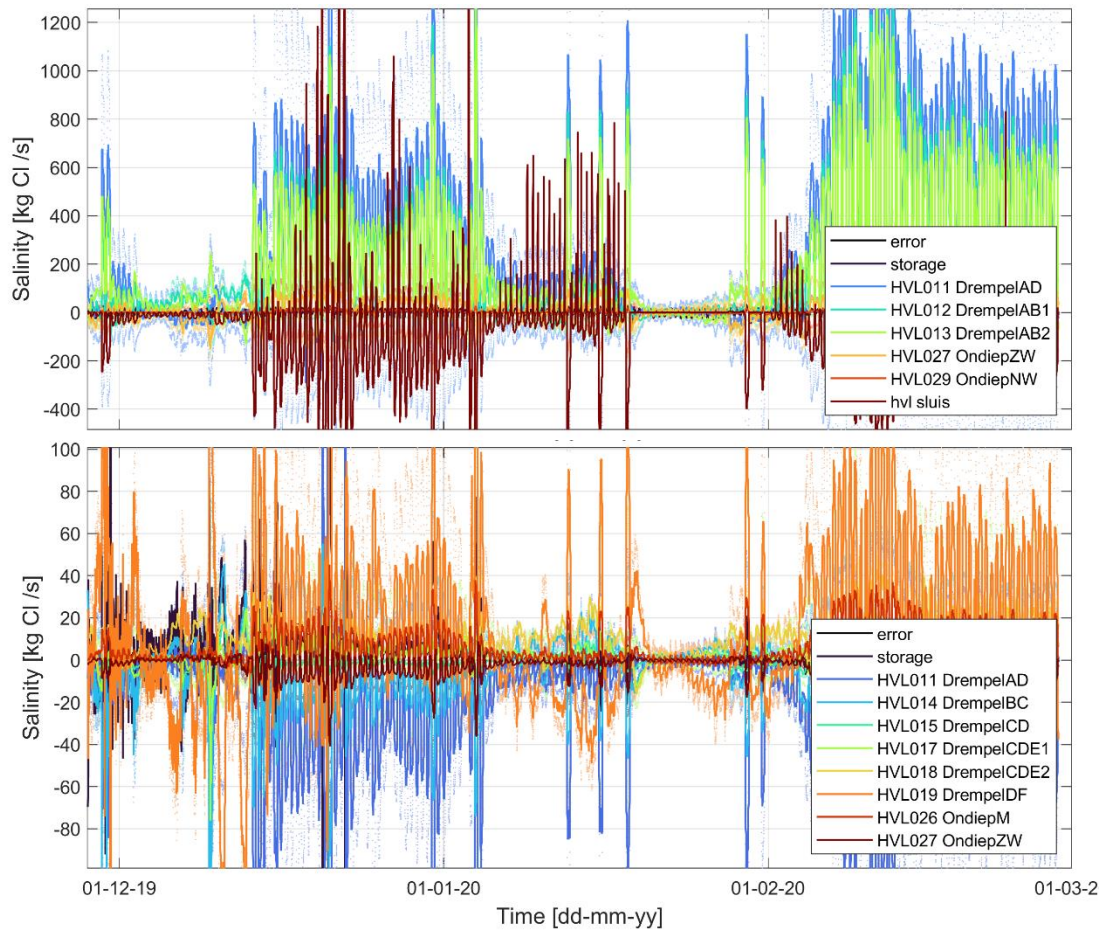
Figuur D.1 Verdeling van deelgebieden voor de bepaling van fluxen door het Haringvliet.

De zoutmassa voor de verschillende gebieden over tijd kan op basis van deze tool worden bepaald (Figuur D.2). Deze zoutmassa is vergelijkbaar met de methode gehanteerd in paragraaf 3.5 (Ontwikkeling zoutmassa). Daar wordt echter de zoutmassa bepaald op basis van een zoutprofiel en de hypsometrische curve. Daarnaast is het bij de Balans-tool niet mogelijk om een uitsplitsing te maken tussen verschillende dieptelagen. De volledige put (van wateroppervlakte tot het diepste punt) wordt als een geheel meegenomen.



Figuur D.2 Zoutmassa in verschillende putten over tijd.

Aanvullend op de zoutmassa worden door de Balans-tool de fluxen tussen de verschillende deelgebieden bepaald.

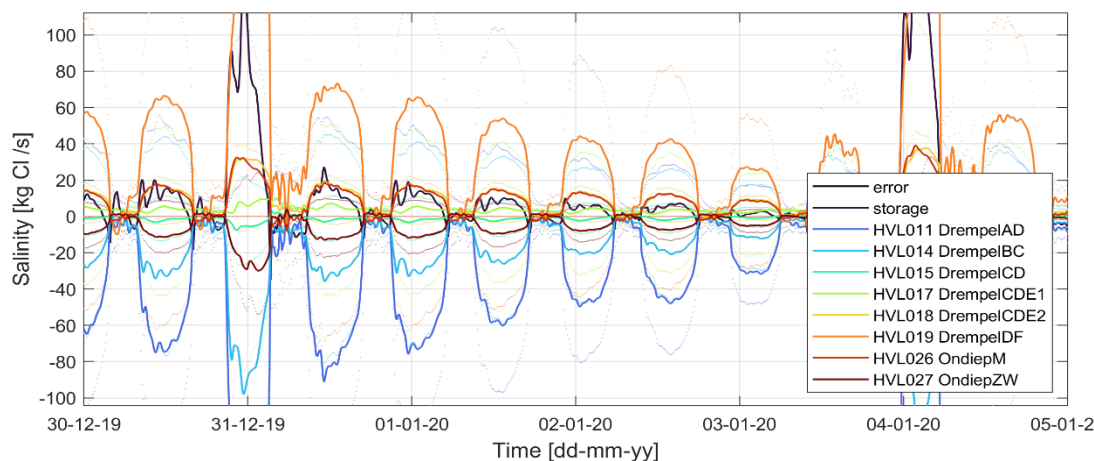


Figuur D.3 Zoutflux tussen deelgebieden. Inkomende (positief) en uitgaande (negatief) fluxen van en naar put A (boven) en: Put D (onder).

D.1 Zoutfluxen voor perioden met grote afvoer

De zoutfluxen in en uit put A worden gedomineerd door inkomende fluxen vanuit de stroomopwaarts gelegen delen (Drempels AD, AB1 en AB2) terwijl de uitgaande flux voornamelijk via de Haringvlietsluizen verloopt, met uitzondering van periodes met visvriendelijk sluisbeheer. In die periodes is er sprake van een vergelijkbare (of zelfs grotere) inkomende zoutvracht³⁷.

Figuur D.4 laat resultaten zien voor de zoutfluxen in en uit put D. Ieder spuivenster is er sprake van een aanzienlijke zoutflux van het oosten naar het westen. Met name tijdens de extreem grote spuidebieten (31 december en 4 januari) is de zoutflux richting de Haringvlietsluizen zeer groot.

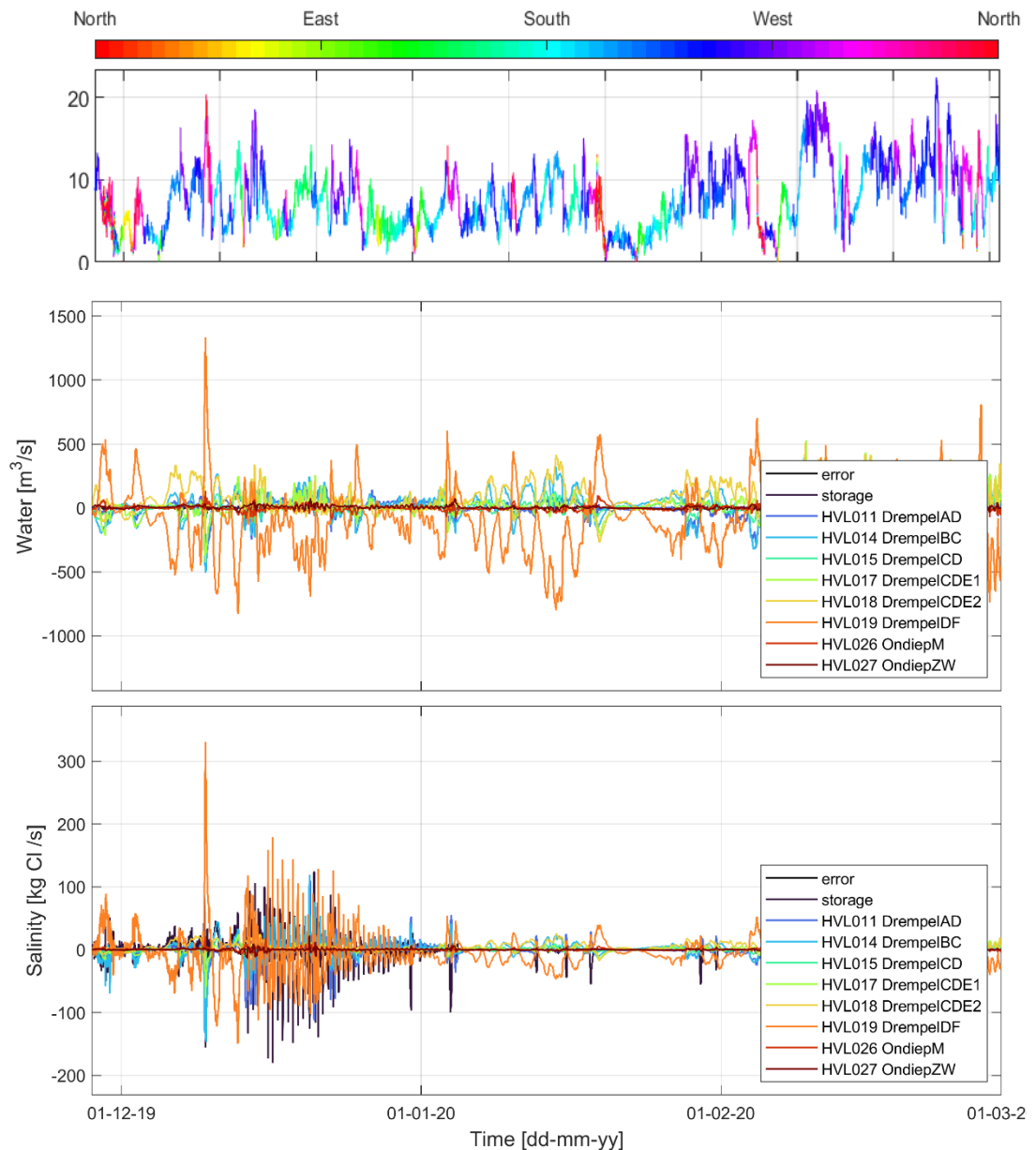


Figuur D.4 Zoutflux van en naar put D voor de periode met grote spuidebieten door de Haringvlietsluizen (simulatie zonder wind).

Daarnaast kan deze methode in de toekomst gebruikt worden voor de verdere analyse van specifieke processen en effecten. Hieronder in *Figuur D.5* is bijvoorbeeld voor put D het effect van het meenemen van wind weergegeven voor de in- en uitgaande debieten en zoutfluxen. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat dat de zoutmassa in de put na verloop van tijd aanzienlijk verschillend is in beide simulaties, en daardoor steeds meer de uitgaande fluxen gaat bepalen. In onderstaande figuren betekent een positief debiet of flux dat de som met wind een grotere toestroom (of kleinere uitstroom, maar dit komt amper voor) heeft, terwijl een negatief debiet of flux betekent dat de som met wind juist leidt tot een grotere uitstroom dan de som zonder wind.

Te zien is dat een groot aantal noordwesterwind pieken leiden tot een duidelijk netto debiet vanuit Drempel DF naar put D toe, die in de begin periode ook wordt waargenomen in de zoutflux. Een omgekeerde transportrichting geldt voor wind vanuit het zuiden en Zuidoosten. Wind vanuit het zuidwesten staat dwars op de richting van het Haringvliet en leidt tot veel minder transport.

³⁷ Let wel: In het model is de beschrijving van het Haringvlietsluizencomplex vereenvoudigd. Het ontbreken van zoutriolen betekent dat in het model het inkomende zout minder eenvoudig in de eb-fases naar zee wordt gespuid.



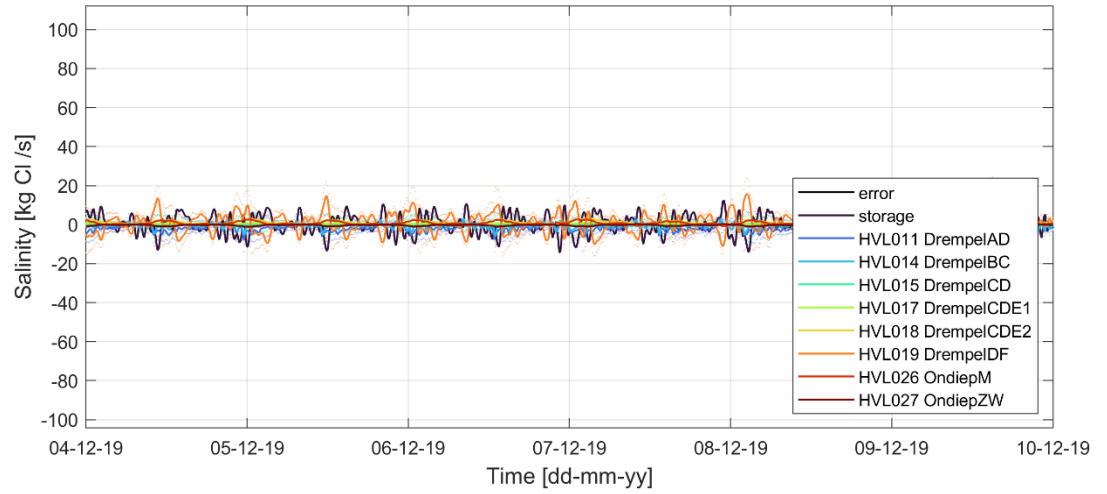
Figuur D.5 Het effect van wind op de debieten en zoutfluxen in put D: Fluxen van de simulatie met wind – fluxen zonder wind. Boven: Windcondities. Midden: Netto debieten (som met wind – som zonder wind). Onder: Zoutfluxen.

D.2 Zoutfluxen voor periode met kleine afvoer

Om het effect op het overall zoutgehalte te bepalen voor periodes waarin juist zeer beperkt wordt gespuid, wordt ingezoomd op de periode 4 december tot 10 december 2019, wanneer alleen met kleine debieten wordt gespuid (maximaal 200-300 m³/s) en nog geen sprake is van Visvriendelijk sluisbeheer.

Kijkend naar de zoutfluxen van en naar put D is voor deze periode te zien dat er sprake is van erg kleine fluxen, waarbij de ebfase deels compenseert wat er in de vloedfase aan transport heeft plaatsgevonden. Daarnaast blijkt ook dat de mate van variatie in de hoeveelheid zout in de put (de donkerblauwe lijn) een zelfde orde van grootte heeft als de

grootste transportterm, wat ook onderschrijft dat het netto transport verwaarloosbaar is in deze periode.



Figuur D.6 Zoutflux van en naar put D voor een periode waarin alleen kleinschalig wordt gespuid (simulatie zonder wind).

E Bevindingen uit voorafgaande projecten

E.1 Modelontwikkeling Kier op basis van een uitbreiding van het OSR-NSC model (presentatie, 29-11-2017)



Voorgangsoverleg: Ontwikkeling 3D model Haringvliet zoutindringing

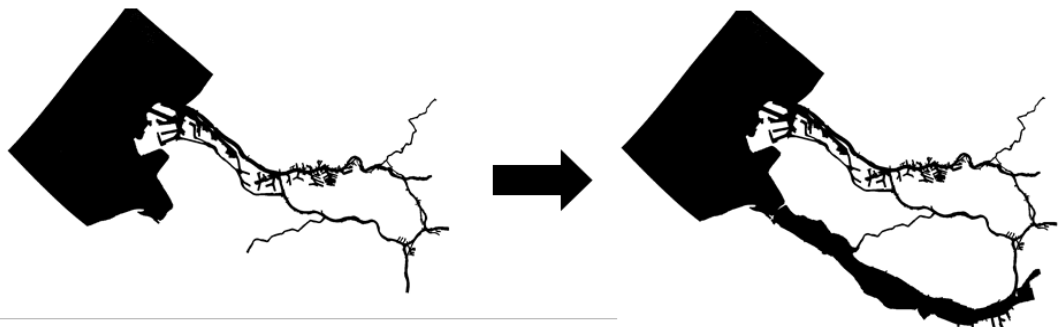
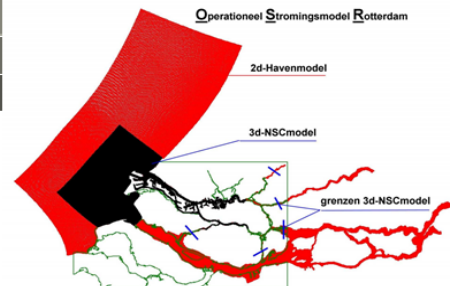
Remco Plieger, Theo van der Kaaij en Meinard Tiessen

30 november 2017

Vorig jaar: OSR modellen

Twee modellen:

- 2D OSR Havenmodel
(2D Havenmodel)
- 3D OSR-NSC model uitgebreid om Haringvliet en Hollandsch Diep te beschrijven
(3D Haringvlietmodel)



30 november 2021

2

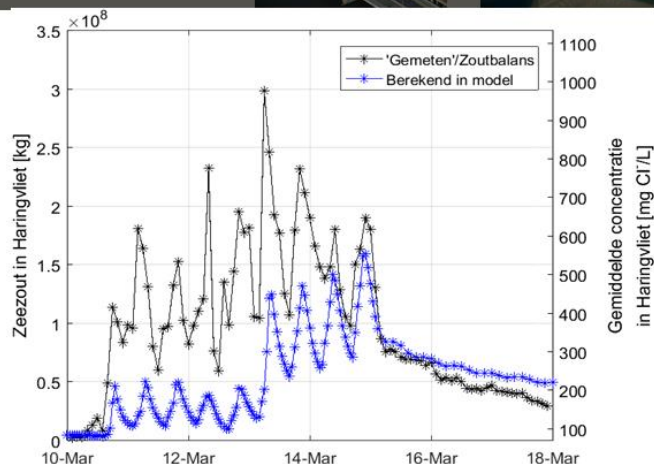
Vorig jaar: Reproductie Inlaatproef 1997

Zoutbalans

- Op basis van metingen
- Reproductie door 3D OSR Haringvlietmodel:
 - Onderschatting binnenkomende zoutgehalte

Zoutmeetpunten

- Continue onderschatting zoutgehalte, ook in de Voordelta (zeegebied)



30 november 2021

3

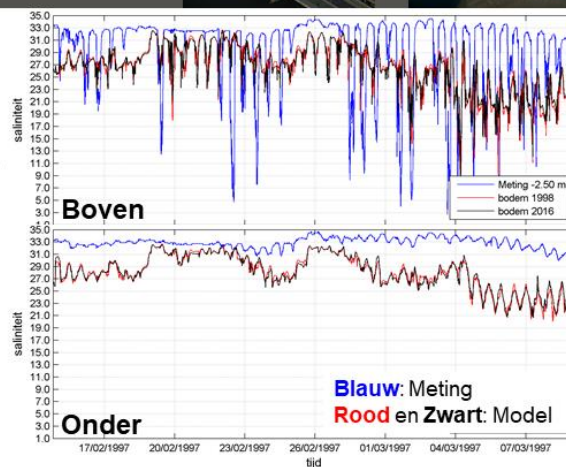
Deltares

Analyse Voordelta

Zoet-zout dynamiek Voordelta

Vergelijking tussen metingen van meetlocatie HA10 met modelresultaten:

- Metingen laten zien dat de Voordelta:
 - Periodiek is gestratificeerd wanneer er sprake is van hoge afvoer door de Haringvlietsluizen
- Model beschrijft de Voordelta:
 - Te zoet
 - Te sterk gemengd (nagenoeg geen stratificatie)



30 november 2021

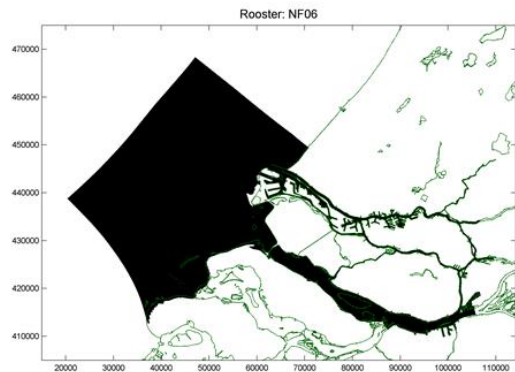
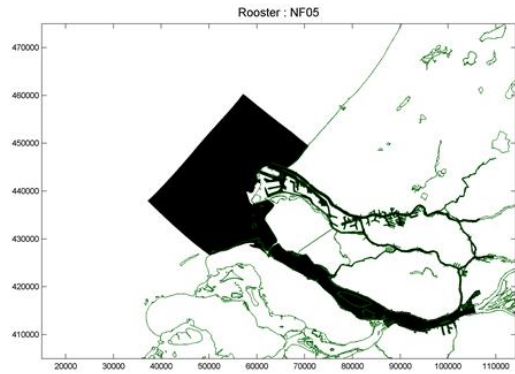
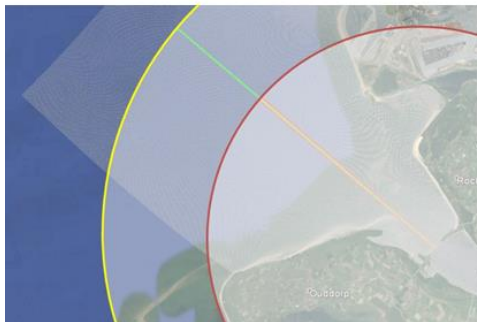
Deltares

Uitbreiding modeldomein

Aanpassingen OSR 3D model

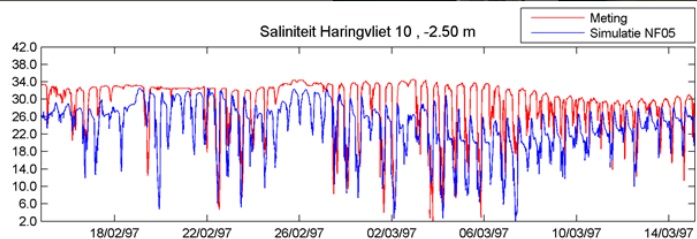
(incl Haringvliet)

1. Andere randvoorwaarden voor 2D Havenmodel
 - Alternatief voor Kalman filtering op waterstanden in zeegebied:
 - > 3D Noordzee FM model (grotendeels 3D stroming en zout, voor klein deel waterstanden en 3D zout)
2. Opschuiven van modelranden
 - 3D Haringvlietmodel uitbreiden naar ZW

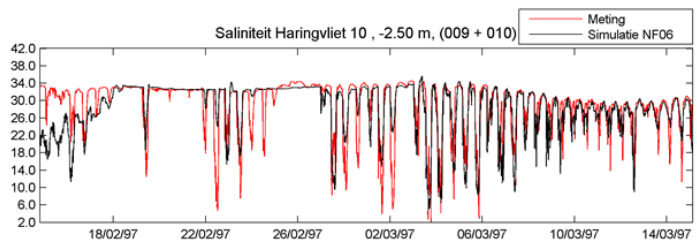


Aanpassingen aan model: Voordelta

Som met oude domein en RVW



Som met aangepast zeedomein en 3D RVW



Zoutgehalte Voordelta (oppervlakte):

- Verhoging getijgemiddelde en "achtergronds" zoutgehalte
- Grotere variatie in zoutgehalte bij periodes met hoge spuivolumes

Aanpassingen aan het model: Voordelta

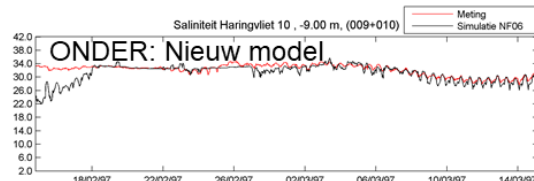
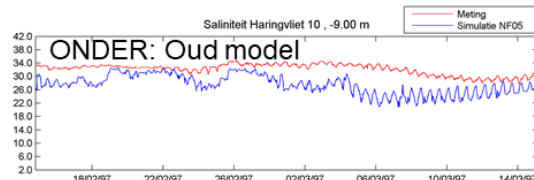
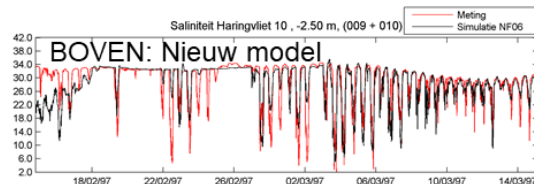
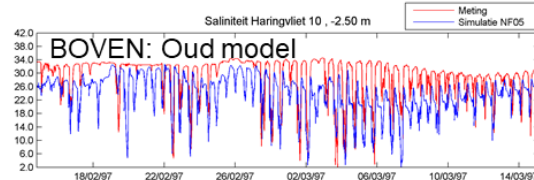
Zoutgehalte Voordelta (bodem):

- Verhoging zoutgehalte
- Beperkte (maar betere) beschrijving zout-variatie
- Sterkere mate van stratificatie

Conclusie

Aangepaste randvoorwaarden en modeldomein leiden tot verbetering beschrijving zoutgehalte Voordelta

30 november 2021

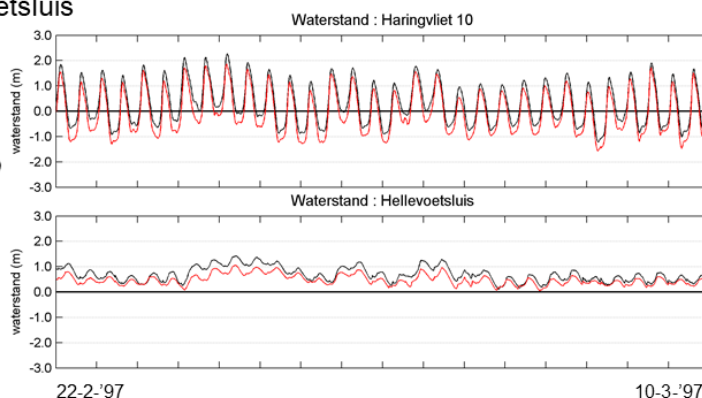


Aanpassingen aan model: Verhang over kering

- Geen direct inzicht in debieten door de kering.
- Enige proxy is waterstandsverhang over de kering:
 - Zeezijde: Haringvliet 10
 - Rivierzijde: Hellevoetsluis

— Simulatie
— Meting

Waterstanden opgelegd op modelrand te hoog voor reproductie verhang over de kering



Scen nr	Aanpassing	Periode	Bias HA10	Bias H'voetsluis	Conclusie
NF5	-	25-2 : 6-3	2.1 cm	-11.9 cm	Voordelta te zoet en te veel verticale mixing
006	Locatie zeeranden + RVW	22-2 : 10-3	33.3 cm	21.0 cm	Waterstand aan zeezijde te hoog

es

Aanpassingen aan model: Verhang over kering

- Aanpassing waterstandsrandvoorwaarde:
 - Waterstand HA10 nu goed
 - Waterstand Hellevoetsluis te laag
 - Verhang incorrect

Scen nr	Aanpassing	Periode	Bias HA10	Bias H'voetsluis	Conclusie
NF5	-	25-2 : 6-3	2.1 cm	-11.9 cm	Voordelta te zoet en te veel verticale mixing
006	Locatie zeeranden + RVW	22-2 : 10-3	33.3 cm	21.0 cm	Waterstand aan zeezijde te hoog
009	Bias correctie (-35cm)	17-2 : 9-3	-0.8 cm	-12.5 cm	Waterstand Hellevoetsluis te laag, verhang over kering fout.

Geen verdere aanpassing aan RVW want,

- Zout en WL aan zeezijde kering correct.

Vervolgstep is aanpassen keringscoëfficiënten

30 november 2021

9

Deltares

Aanpassingen aan model: Verhang over kering

Scen nr	Aanpassing	Periode	Bias HA10	Bias H'voetsluis	Conclusie
NF5	-	25-2 : 6-3	2.1 cm	-11.9 cm	Voordelta te zoet en te veel verticale mixing
006	Locatie zeeranden + RVW	22-2 : 10-3	33.3 cm	21.0 cm	Waterstand aan zeezijde te hoog
009	Bias correctie (-35cm)	17-2 : 9-3	-0.8 cm	-12.5 cm	Waterstand Hellevoetsluis te laag, verhang over kering fout.
018	Barrier coeff (REstricting) 1 -> 0.7 Barrier width 1 -> 0.94	17-2 : 1-3	1.9 cm	-1.7 cm	Tijdens alleen spuien, leiden keringsparameters tot goede waterstanden
		10-3 : 15-3	-6.2 cm	-8.0 cm	Tijdens Inlaatproef: Waterstanden Hellevoetsluis te laag.
020	Barrier coeff VLOED 0.7 -> 1	10-3 : 15-3	-6.2 cm	-3.1 cm	Tijdens Inlaatproef: Aanpassing vloed-parameter leidt tot betere beschrijving waterstand Hellevoetsluis.

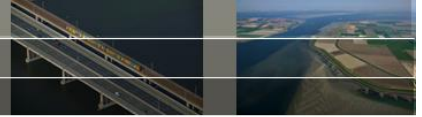
- Verhang over kering verbeterd door aanpassing aan keringscoëfficiënten
- *Aanpassingen van model als gevolg van "omgevingsfactoren" nu ongeveer afgerond*

30 november 2021

10

Deltares

Resultaten

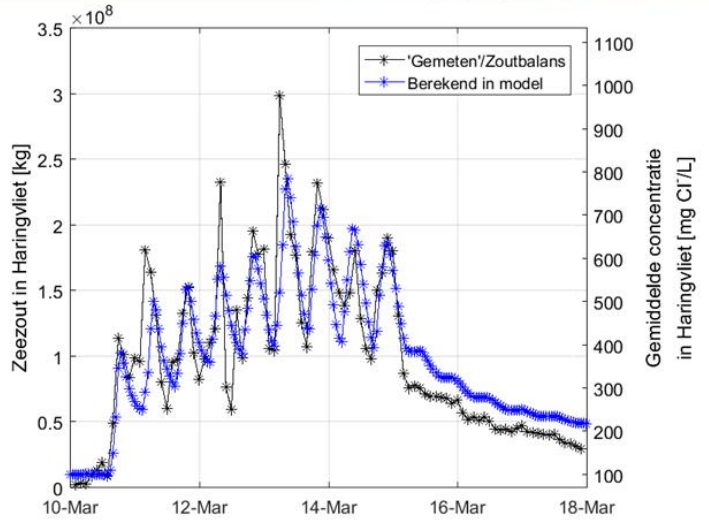


Zoutbalans

Zeer aardige reproductie

Indicatie van redelijke beschrijving grofstoffelijke zout-variabiliteit tijdens Inlaatproef.

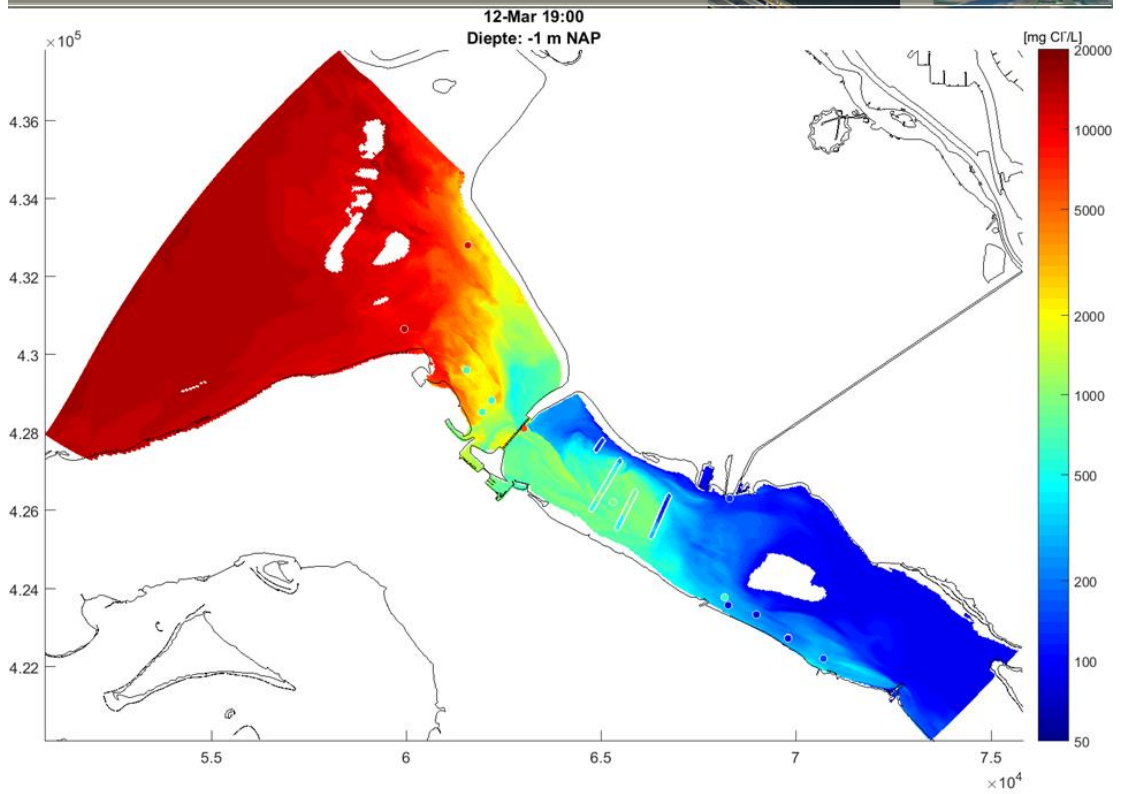
Zowel tijdens inlaatproef, als in ontziltingsperiode.

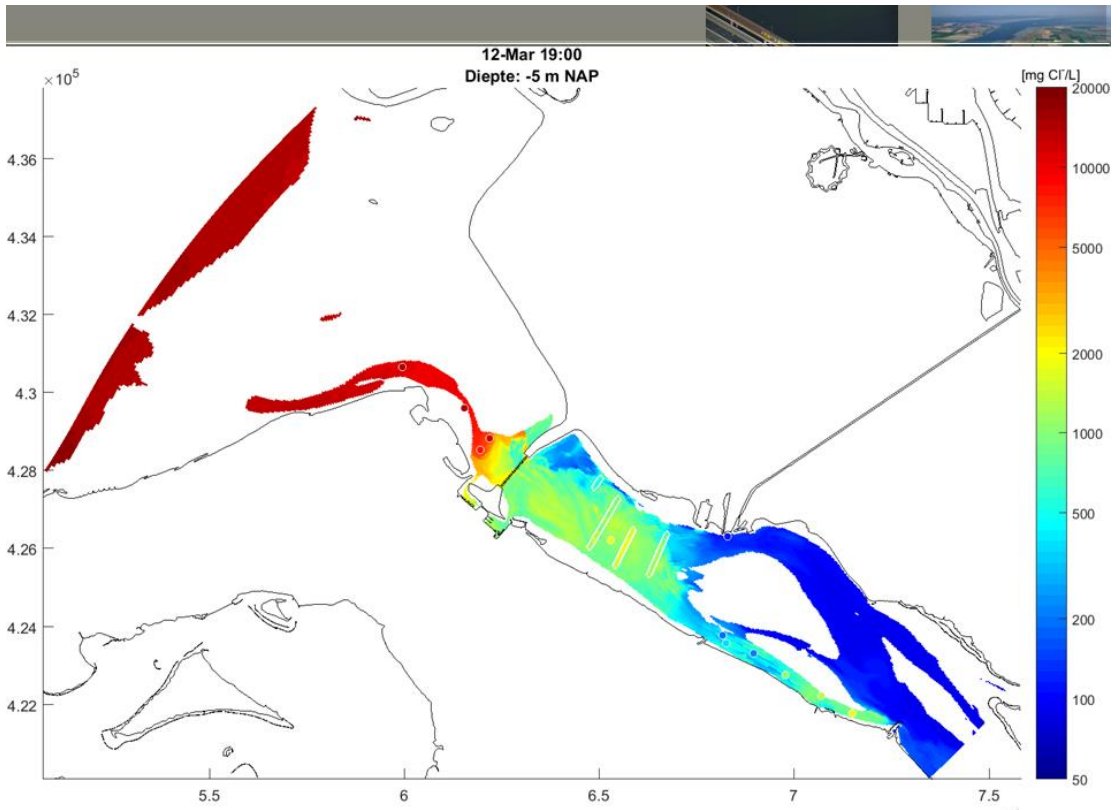


30 november 2021

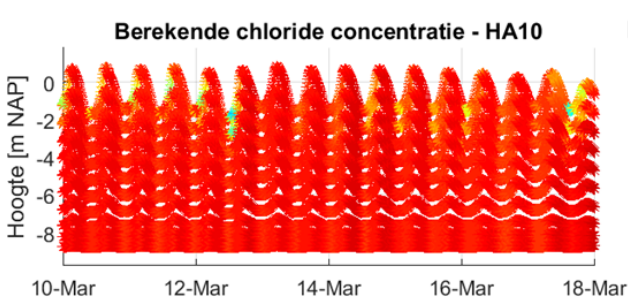
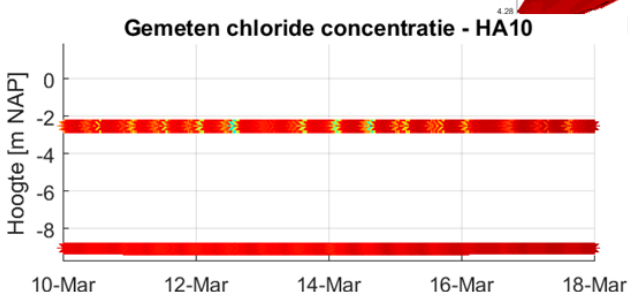
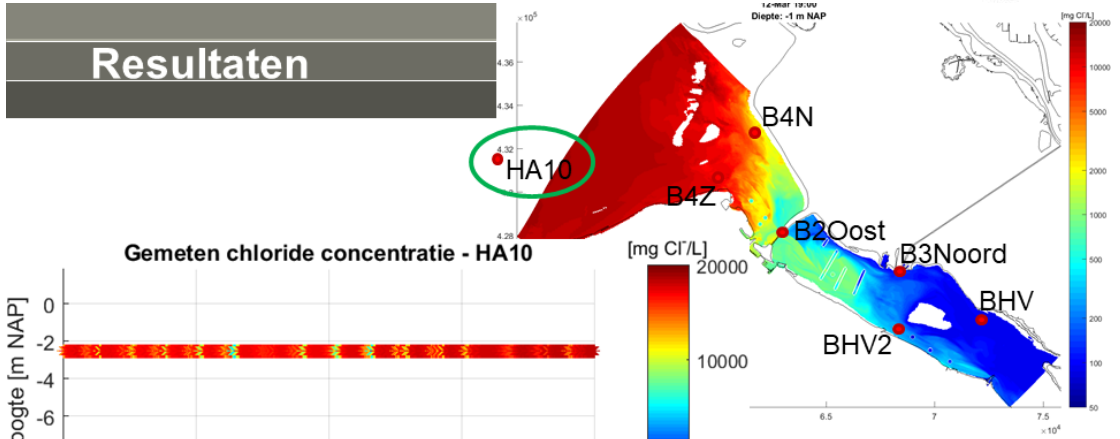
11

Deltares





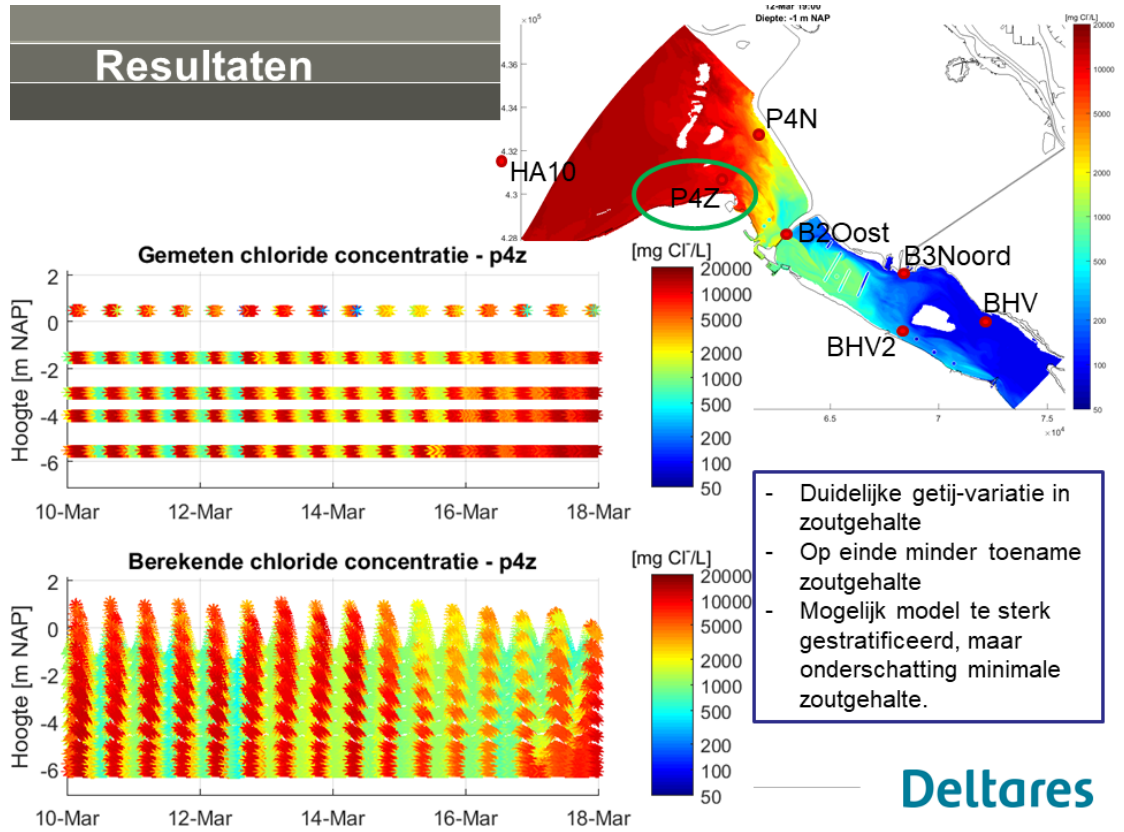
Resultaten



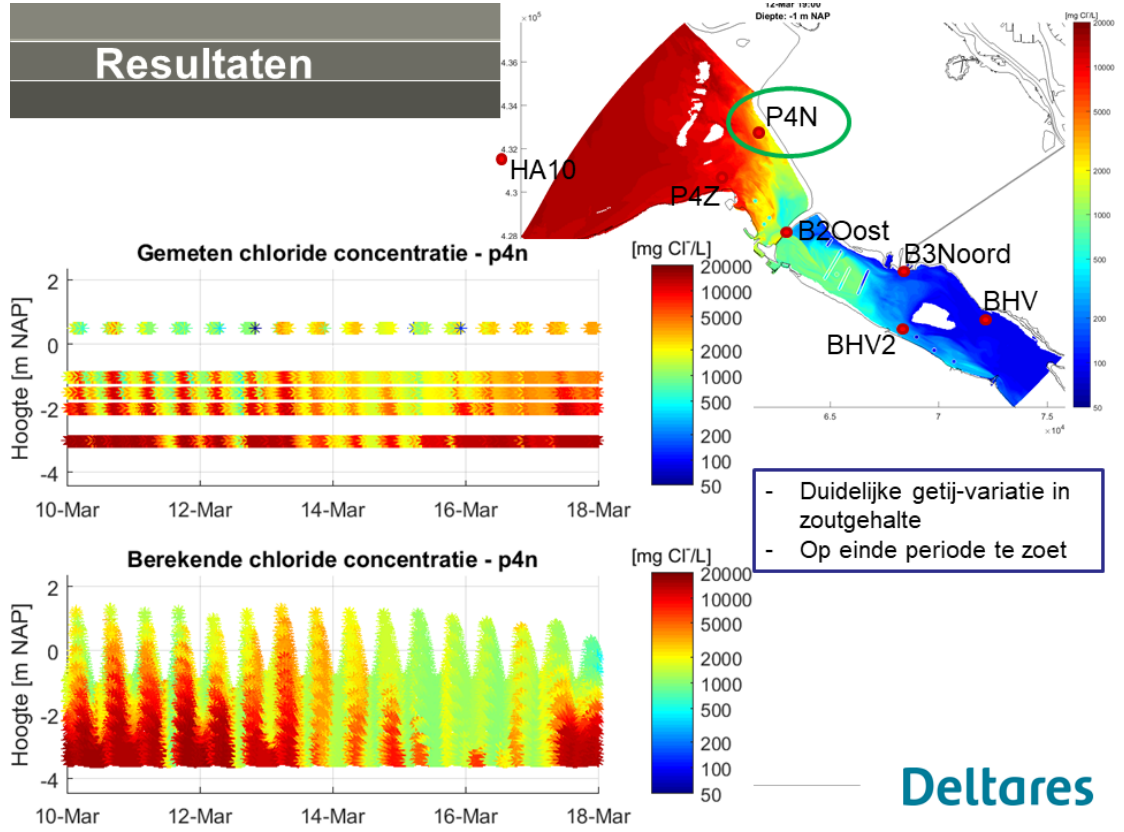
- Redelijke goede reproductie zoutgehalte nabij zeerand
- Goede beschrijving incidentele verzoeting oppervlaktelaag
- Mogelijk nog iets te zoet.

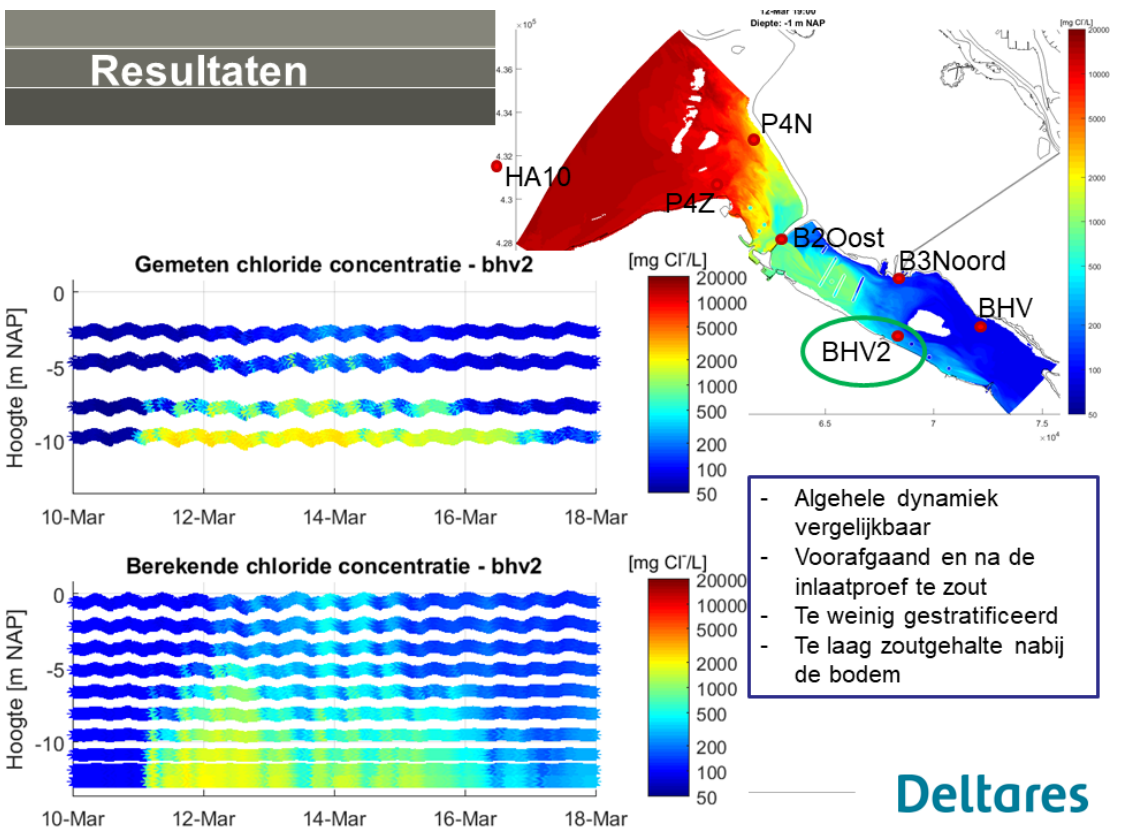
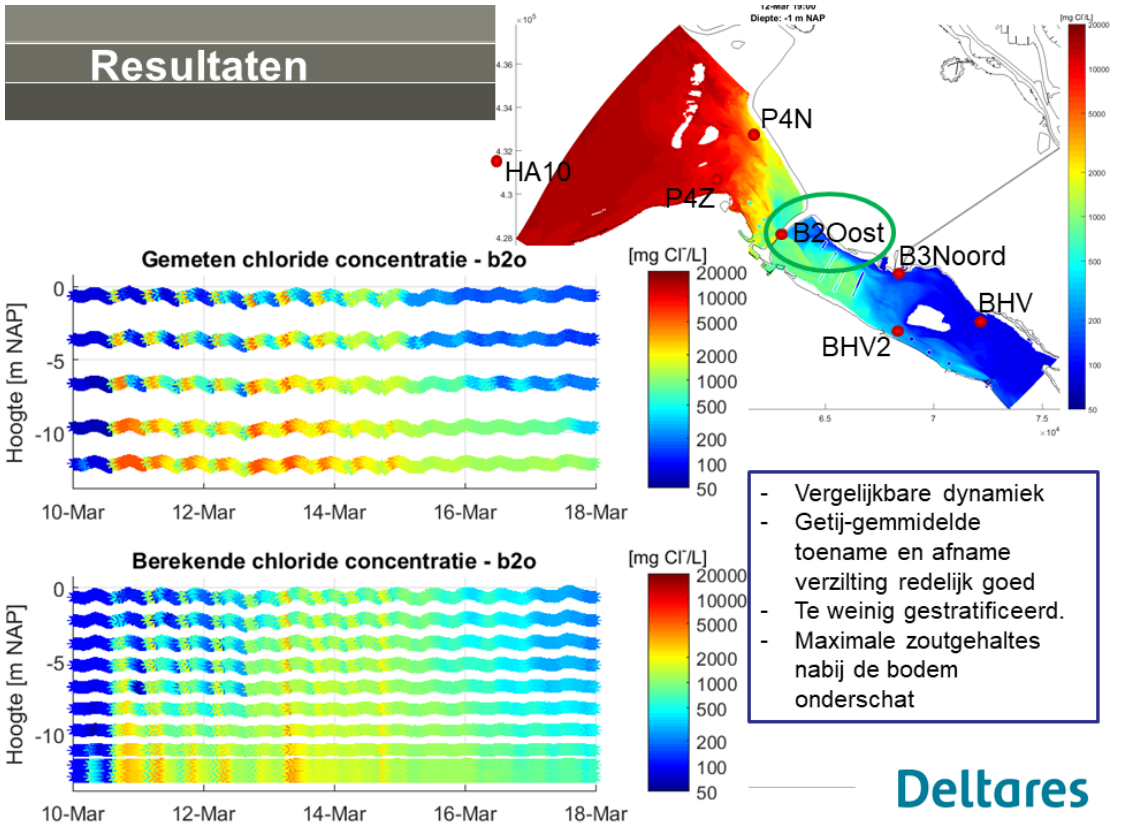
Deltares

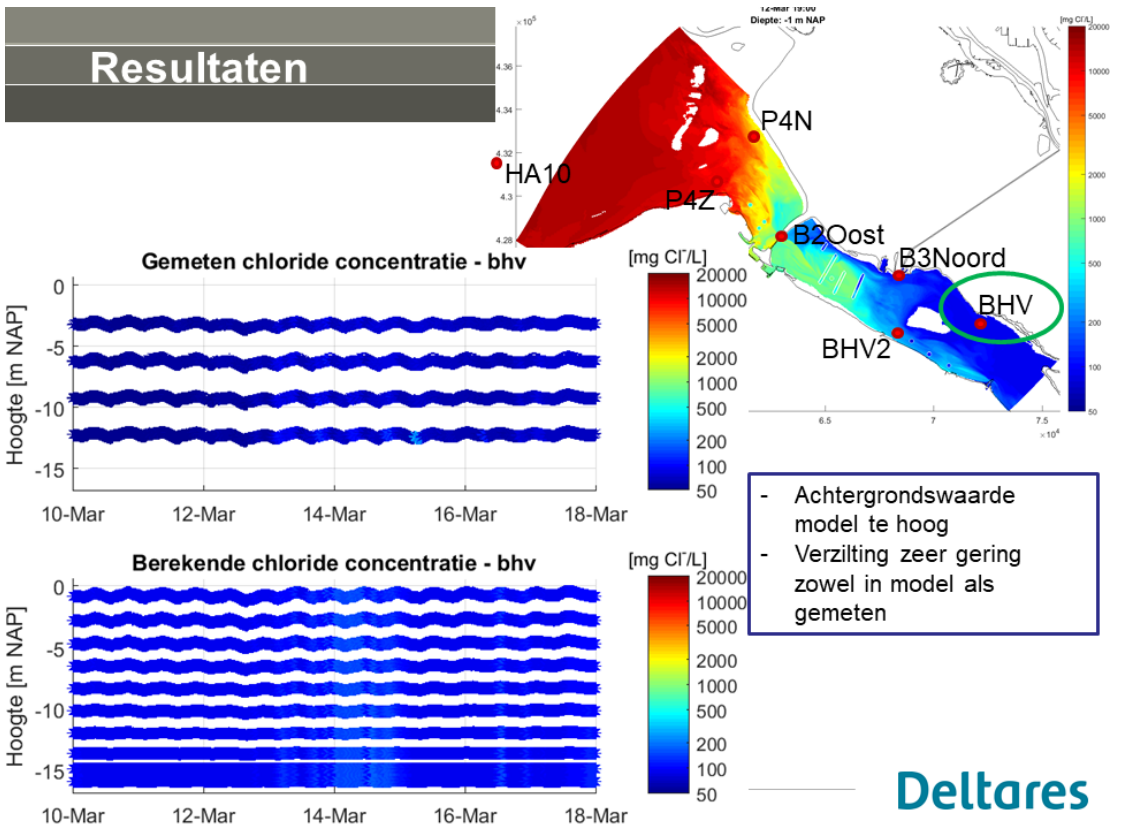
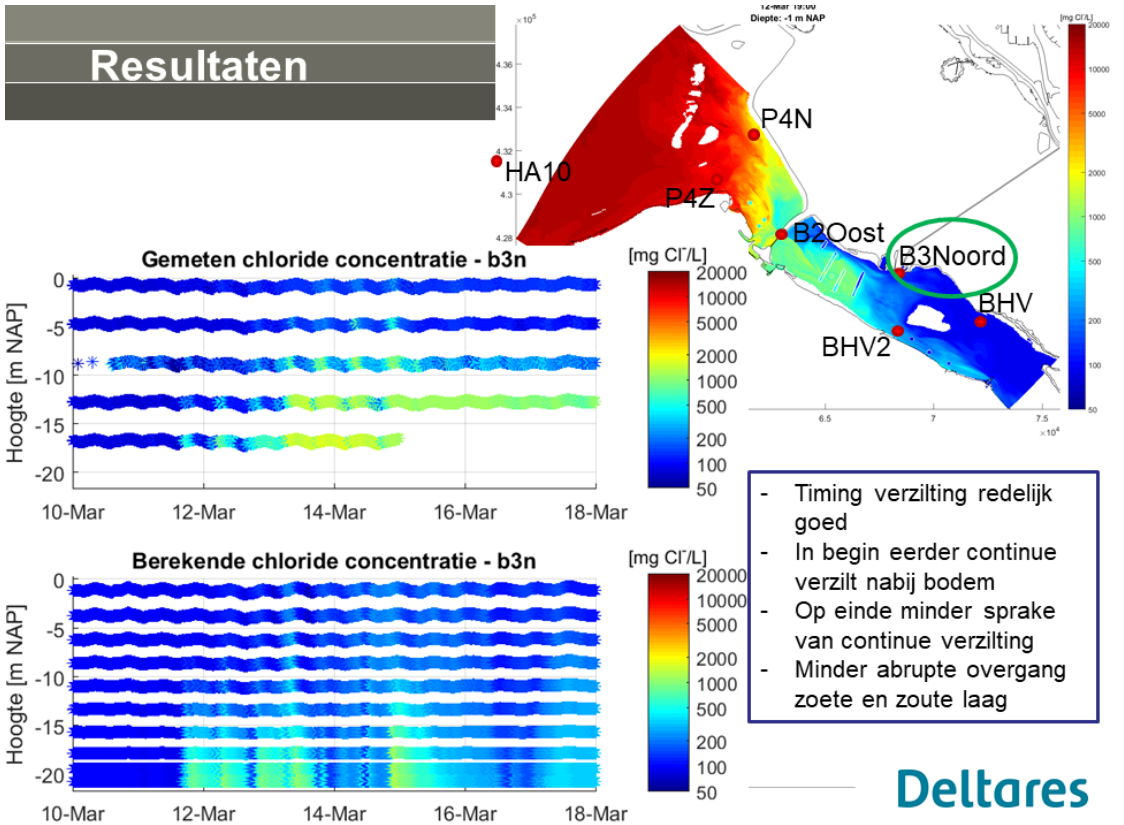
Resultaten



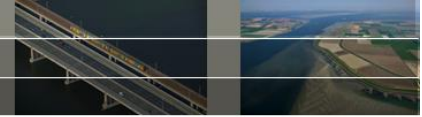
Resultaten



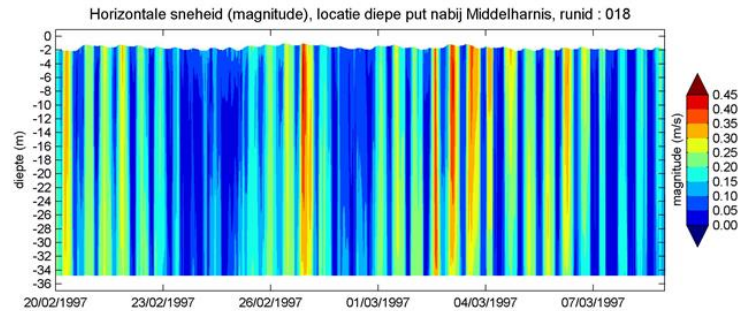
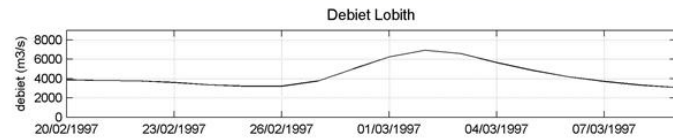




Stroming door diepe putten

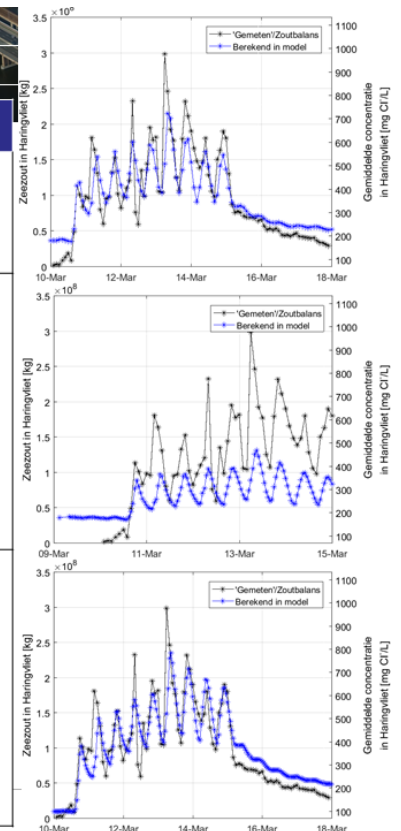


- Tijdens inlaatproef geen “zoetspoelen” of hoge afvoeren.
- Echter voorafgaand aan proef wel:
 - Geen sprake van verzilting
 - Hoge stroomsnelheden (over volledige diepte)
 - Mogelijk te onderzoeken: Effect van stratificatie. Echter, te grote opmenging.

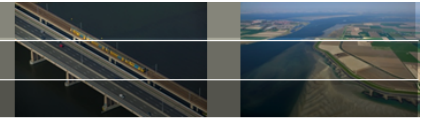


Gevoeligheid voor instellingen

Scen nr	Instellingen
006	Na aangepaste locatie zeeranden + RVW <i>(maar met foute waterstandsbias voor HA10)</i>
009	Na correctie van de bias (-35cm)
020	Na sleutelen aan de barrier coefficients <i>(in figuur voor model correctie voor achtergrondconcentratie)</i>



Conclusies



Dit onderzoek

- Aanpassing randvoorwaarden en modelranden leidt tot aanzienlijke verbetering zout-voorspelling in de Voordelta en aan zeezijde van de kering
- Op basis van het verhang over de kering, zijn de verliescoëfficiënten voor de Haringvlietssluisen aangepast.
- Het resultaat is een model dat grofstoffelijk de zoutinindringing tijdens de Inlaatproef 1997 redelijk kan reproduceren.
- Op basis van zoutmeetstations blijkt dat het model vaak een te beperkte mate van stratificatie beschrijft.

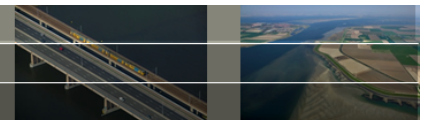
Gegeven TRIWAQ en beperkte validatiemogelijkheden bereiken we nu ongeveer de grenzen van het verbeterbereik van het model.

30 november 2021

23

Deltares

Conclusies



Inzicht in toepassingsbereik model

- Zoutvracht in het Haringvliet
- Grove inschatting zoutverspreiding in Haringvliet
 - Echter te weinig stratificatie in systeem
- Grove inschatting zoetverspreiding Voordelta
- Terugdringing zout na Inlaatproef

Aanbevelingen voor vervolg onderzoek

- Uitvoeren model-meting vergelijking voor andere verziltingssituatie.
 - Trillingstest 2008: Zoetspoelen?
- Onderzoek naar rest NDB
 - NWW: Bodem te zoet in andere projecten, wordt dit verbeterd door onze nieuwe rvw?
 - Onderzoek naar toepassen bredere toepassing: Waterstanden en stroomsnelheden?

30 november 2021

24

Deltares

Inzetbaarheid model (voor nu)

*) In zoverre als dat op basis van één vergelijking met metingen mogelijk te stellen is.

Model waarschijnlijk* geschikt/ongeschikt voor:

Normaal Kierbeheer

Geschikt:

- Inschatting grootschalige zoet-zout dynamiek Haringvliet
- Inschatting grootschalige effecten van aanpassingen in beheer (als in: meer of minder kieren)
Verziltling blijkt echter zeer gevoelig voor omgevingsfactoren

Ongeschikt:

- Detailverspreiding zout in Haringvliet
(mogelijk nog beperkt nader te onderzoeken op basis van 1997 data)
- Beschrijving gelaagdheid systeem
Geldt nog sterker voor langere termijn stratificatie
- Detailbeschrijving zoet-zout dynamiek nabij de kering
Geen meetgegevens van dus onbekend

30 november 2021

25

Deltares

Inzetbaarheid model (voor nu)

*) In zoverre als dat op basis van één vergelijking met metingen mogelijk te stellen is.

Model waarschijnlijk* geschikt/ongeschikt voor:

Zoetspoelen en zoetgespoeld

Geschikt

- Inschatting mate van reductie zoutvracht in het Haringvliet
Echter model beschrijft stratificatie minder goed, en dit geldt slechts op basis van enkele proef met bij de ontziltling zeer weinig meetpunten.
- Grove ruimtelijke inschatting terugdringing verziltling oppervlaktelaag
Echter te optimistisch mbt terugdringing zout, want bij kieren te zoute oppervlaktelaag

Ongeschikt

- Opmenging diepe putten bij lage afvoeren
Ongetest, maar onwaarschijnlijk
- Opmenging diepe putten bij gesloten kering
Ongetest, maar onwaarschijnlijk. Door te hoge menging is dit waarschijnlijk niet goed te beschrijven met het model.

30 november 2021

26

Deltares

E.2 Modelontwikkeling Kier op basis van uitsnede zede generatie D-HYDRO RMM 3D model (presentatie, 20-12-2020)



Deltares

Modellering Haringvliet - Kier

December 2020

RWS WNZ, RWS WVL en Deltares

Meinard Tiessen, Remco Plieger & Theo van der Kaaij

Opbouw presentatie

- Model opzet en afregelen: Lerend modelleren
- Modelleren zoetspoelen
Voorjaar 2019 (Zoetspoelproef 1)
- Modelleren nalevering
Najaar 2019 (Naleverproef 1)
- Eerste test: Modelleren zoutindringing
Najaar 2019 (Naleverproef 1)
- Conclusies en aanbevelingen

Deltares

Model opzet en afregelen

- Randvoorwaarden
- Meteo
- Initiele condities
- Software

Randen:

- Haringvlietsluizen (Debiet)
- Spui (Debiet)
- Rak Noord (Waterstand)

Alle randvoorwaarden moeten op elkaar aansluiten:

- Bij voorkeur zelfde bron (meting/model) en nauwkeurigheid
- Als niet goed aansluiten: Artefacten (niet fysische stromingspatronen en daaruitvolgende zoutverspreiding)

Hieronder voorbeeld van afregelen voor Zoetspoelproef 1 (januari 2019).

Deltares

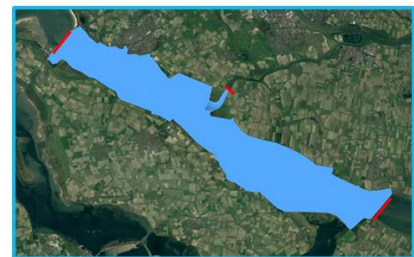
Model opzet en afregelen

Zoetspoelproef 1 (januari 2019)

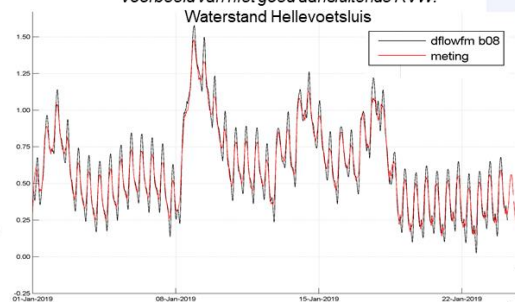
- Randvoorwaarden:
 - Begin 2020: Nog geen "grootschalig" model (SOBEK3 RMM) voor aanleveren RVW, dus verschillende bronnen:
 - Rak Noord:
 - Waterstanden: Meting Rak Noord
 - Spui:
 - Debiet: Operationele uitvoer SOBEK3
 - Haringvlietsluizen:
 - Debiet: Afleiden op basis van waterstandsverhang en QH relatie

→ Sleutelen om waterstandsreproductie goed te krijgen

Deltares



Voorbeeld van niet goed aansluitende RVW:



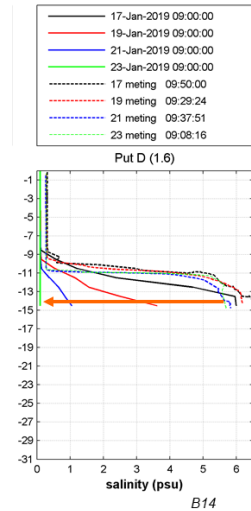
Model opzet en afregelen: Lerend modelleren

Zoetspoelproef 1 (januari 2019)

Afregelen zoutgehaltes:

- Initiele condities: Beperkte metingen (geen ruimtelijk veld van te maken)
- Initieel alleen zout in diepe putten (onder drempels, dus vanaf -10m)
- Vergelijking alleen op basis van varende metingen (vaste metingen te weinig verticale resolutie)

→ Put D onztilt (in model) te snel.



Deltares

Model opzet en afregelen

Zoetspoelproef 1 (januari 2019)

Afregelen zoutgehaltes:

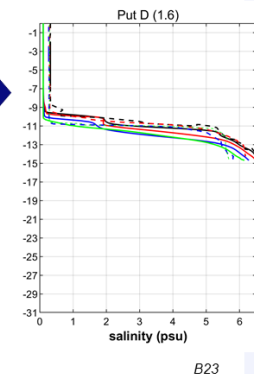
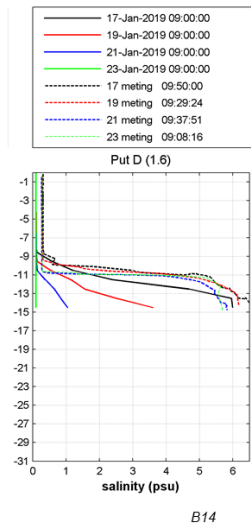
- Initiele condities: Beperkte metingen (geen ruimtelijk veld van te maken)
 - Initieel alleen zout in diepe putten (onder drempels, dus vanaf -10m)
- Put D onztilt (in model) te snel.

Aanpassen:

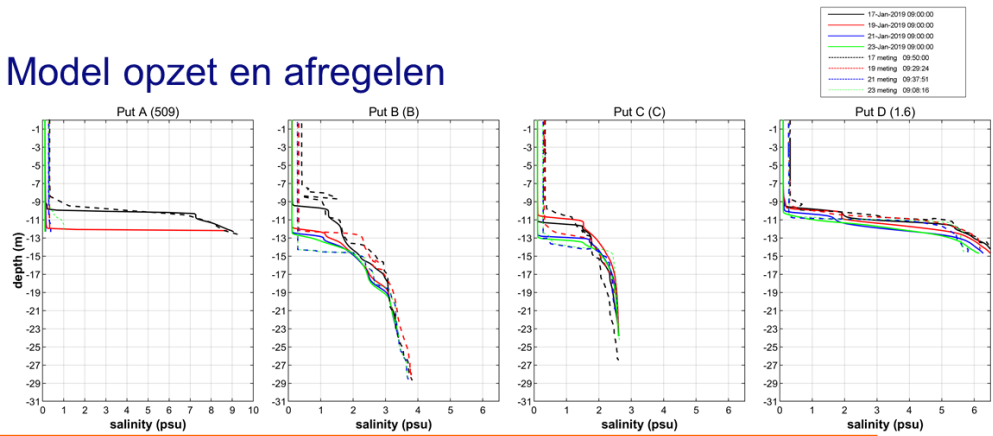
- Laagverdeling (1m → 0.25 → 0.125m)
Model Haringvliet daarmee niet verenigbaar met 3D RMM schematisatie
- Timestep (10s → 2.5s)
- Finetunen initiele zoutgehaltes

(Daarnaast nog veel parameters en instellingen getoetst)

Deltares



Model opzet en afregelen



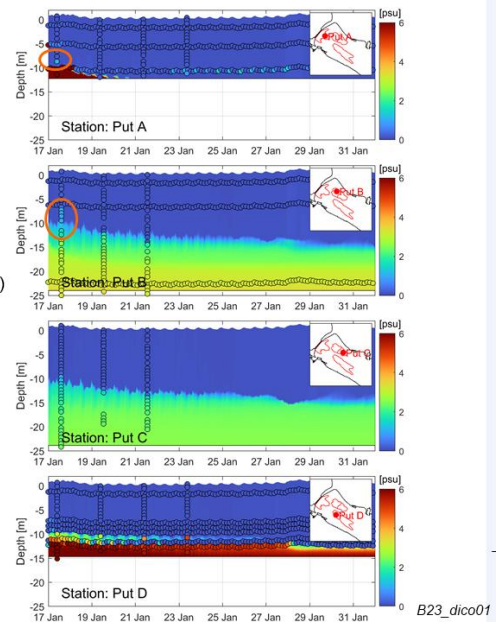
Conclusies opzetten en afregelen:

- Opzetten model afhankelijk van beschikbare data voor RVW, meteo, initieel & kalibratie en toetsing
- Met beperkte (invoer)data:
 - Veel tijd kwijt met "afregelen" model (hier nu al: 25 sommen)
 - Of wachten op betere invoer (afhankelijk van andere projecten)
- Software: Nog in ontwikkeling. Nieuwe versie betekent vaak nieuwe bugs (maar ook meer (waardevolle) functionaliteiten)

Modellering zoetspoelen

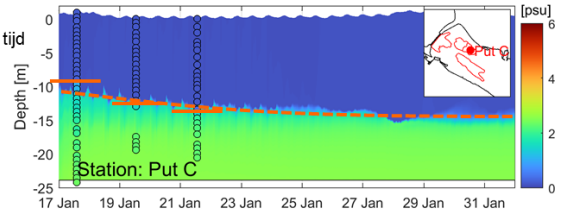
- Modelleren zoetspoelen en nalevering
 - Voorjaar 2019 (Zoetspoelproef 1)
- Modelopzet:
 - Zoutgehalte op basis van initiele varende meting (17jan)
 - Initieel alleen verzilting in putten (dieper dan -10m)
 - Alleen uitgaande debiet door de Haringvlietluizen
- Vergelijking met vaste en varende zout metingen
- Conclusie
 - Redelijk goede reproductie zoutgehaltes over tijd
 - Model beschrijft ontzilting over enkele dagen grofstoffelijk in overeenstemming met gemeten

Deltares



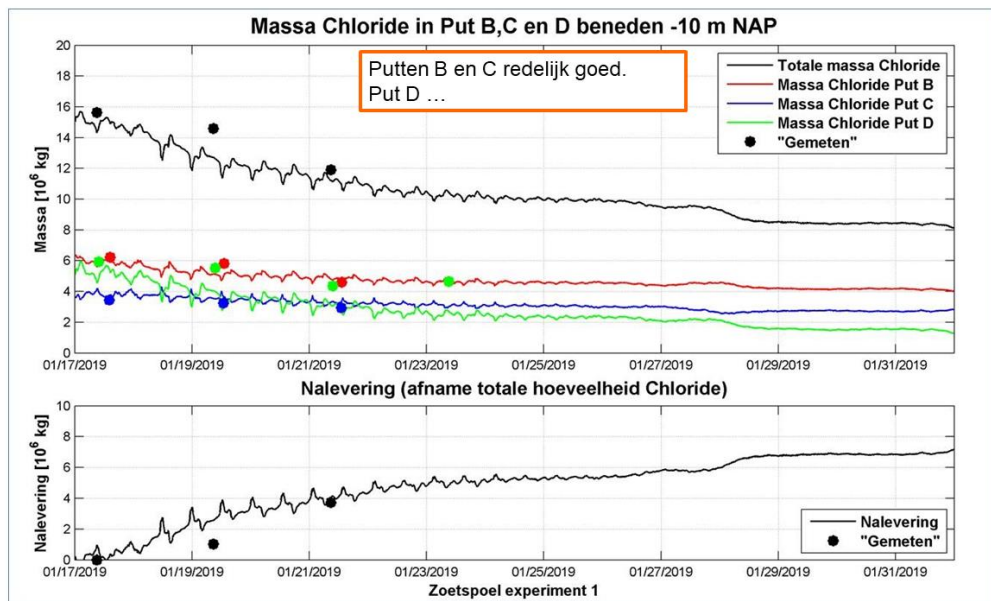
Modellering zoetspoelen

- Modelleren zoetspoelen en nalevering
 - Voorjaar 2019 (Zoetspoelproef 1)
- Modelopzet:
 - Zoutgehalte op basis van initiële vurende meting (17jan)
 - Initieel alleen verzilting in putten (dieper dan -10m)
 - Alleen uitgaande debiet door de Haringvlietsluizen
- Analyse:
 - Bepaling van mate van ontzilting/nalevering over tijd
 - Vergelijking vurende meting met (continue) modelresultaten



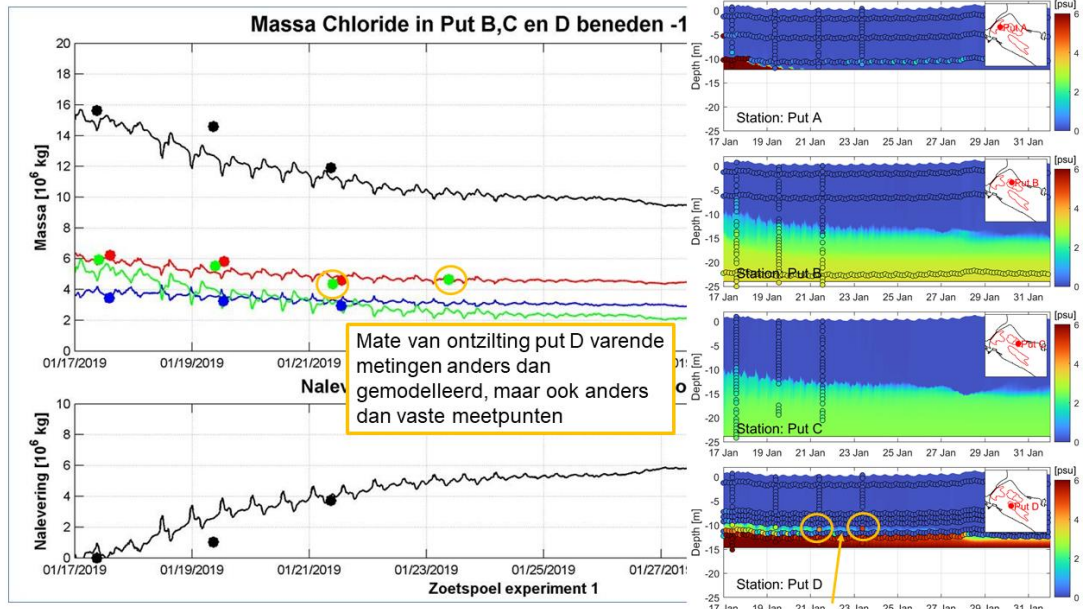
Deltares

B23_dico01



SZ Modelling - Haringvliet - Kier

10



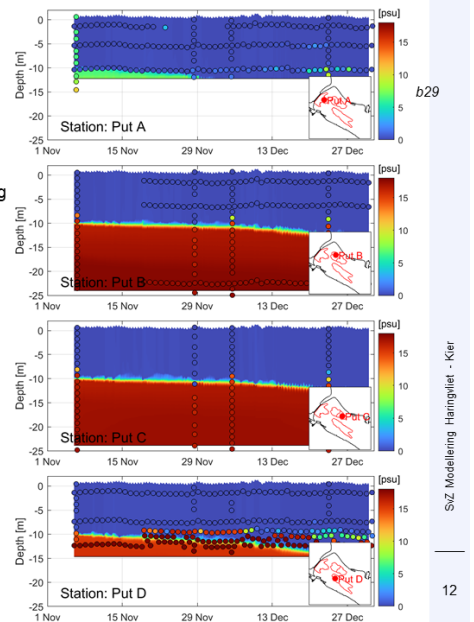
Modellering nalevering*

Najaar 2019 (Naleverproef 1)

- Initiele condities: Op basis van varende metingen:
 - Start som 6 nov, ivm ontbreken nauwkeurige data van verzilting Haringvliet voor die tijd.
 - Verzilting in model vanaf -10m (onder zadelpunten), terwijl metingen al verzilting op kleinere diepte weergeven.
- Randvoorwaarden: Op basis van SOBEK3 RMM Jaarsom:
 - Model stopt op 31 December, want einde jaarsom (proef en verzilting duurt tot begin 2020).
- Resultaat:
 - Model laat zeer geleidelijke ontzilting zien, vergelijkbaar met gemeten

**) Deze proefperiode beschrijft veel meer dan nalevering (ontzilting van onderlaag bij gesloten sluzen), omdat ook is gespoeld om de zoete bovenlaag zoet te houden. In dit stadium wordt alleen grofstoffelijk gekeken, en worden deze fasen niet uitgesplitst.*

Deltares



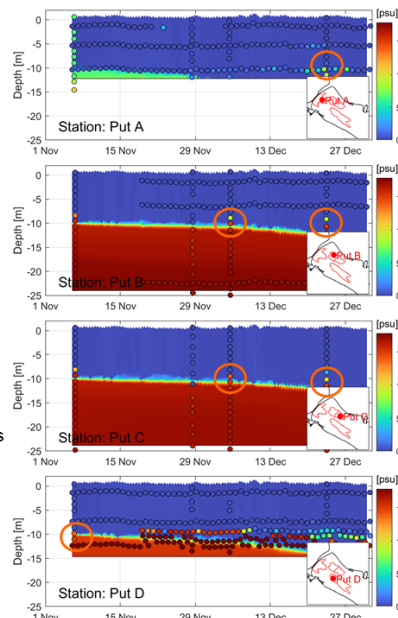
Modellering nalevering

Najaar 2019 (Naleverproef 1)

Onzekerheden:

- Gemeten zoutgehalten laten toename in zoutgehalte zien tov meting 6 november
 - Put A: Door inlaten zout (vanaf 15 dec)
 - Put B en C: Onduidelijke oorzaak (vanaf 5 dec)
 - Put D: Initiele meting (6nov) lijkt aan lage kant, in vergelijking met vaste metingen en latere varende metingen.
- Debietsen door de Haringvlietsluizen op basis van SOBEK3 jaarsom en metingen::
 - Openingsmomenten en hefhoogtes volgens werkelijke tijdreeks
 - Waterstandsverschil en debieten berekend door SOBEK3
 - mogelijk kleine verschillen in waterstanden, hierdoor (mogelijk) significante verschillen zoutindringing
 - Zoutgehalte aan zeezijde kering nu aangenomen als 0.

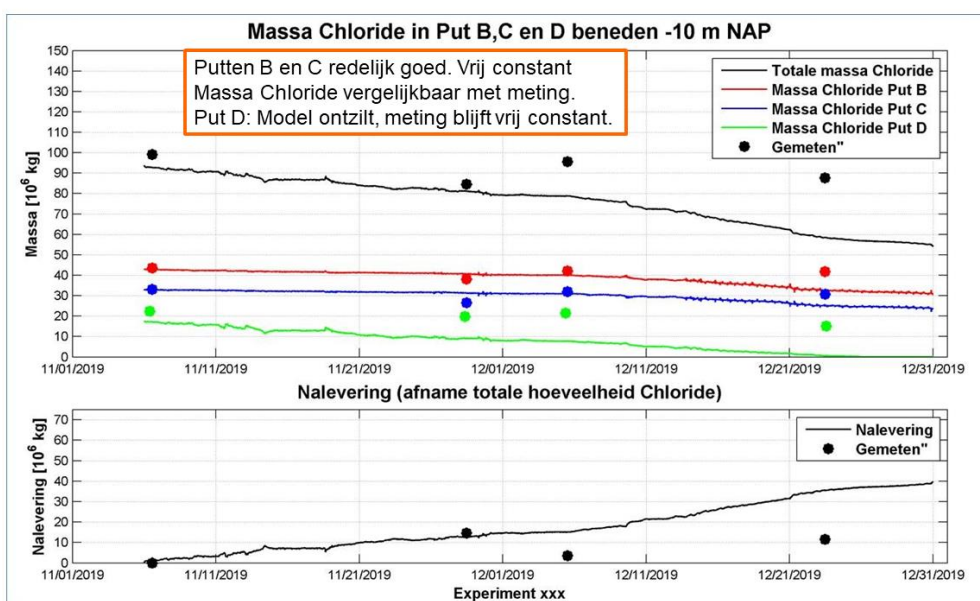
Deltares



b29

SiZ Modelling Haringvliet - Kier

13



b29

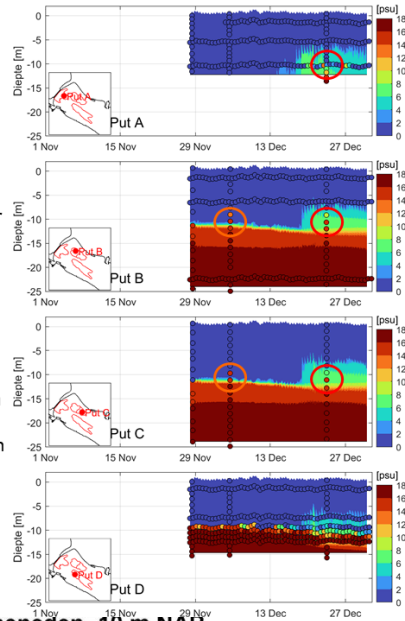
SiZ Modelling Haringvliet - Kier

14

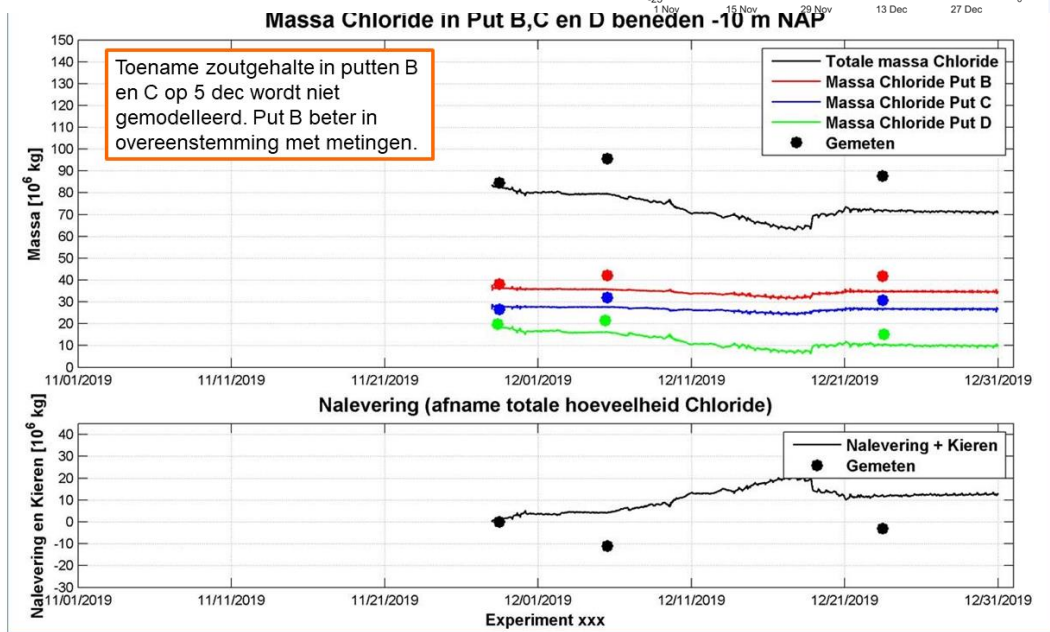
Modellering nalevering

Najaar 2019 (Naleverproef 1)

- Start som 29 nov, ivm initiele condities die beter aansluiten op gemeten spronglaagdiepte
- Modellering hernieuwde verzilting vanaf 15 December door inlaten (licht verzilt, 10 PSU) water
- Resultaat:
 - Model laat geen toename in spronglaag diepte zien (put B en C, op 5 dec). Metingen laten dit wel zien. Onduidelijk waar dit door kan worden veroorzaakt.
 - Inlaten zout (na 15dec) lijkt verzilting mogelijk te onderschatten (25dec)
 - Put D: Heel veel metingen over elkaar, maar model lijkt beter in overeenstemming te zijn met metingen.



Deltares



Modellering zoutindringing

Domein uitbreiding met zeer klein zeedeel (grotere uitsnede RMM)

- Randvoorwaarden daarmee nog wel afkomstig uit SOBEK3 RMM jaarsom
- Kan alleen want: zee = zout bij start naleverproef 2019

Bij echter Kieren kan dit niet: Want zeedeel ook deels zoet: Uitwisseling met rest zee nodig om zoutgehalte goed te krijgen.

Inbouwen kunstwerk:

- Software voorlopig: Overall formulering: Onttrekking en lozing over alle dieptelagen → Te veel verticale doormenging.
Deze versie heeft geen formele status (evaluatie in 2020), maar kan niet worden gebruikt voor "echte" onderzoeken of adviezen.
- Software toekomst (afleiden en inbouwen in 2021): Detail formulering: Dieptelaag afhankelijke debieten
 - Lozing en onttrekking op juiste diepte (en juiste zoutlaag)
 - Nog lastig: Niet-hydrostatische processen (zogezegde "jet", "plungelij", en aanzuigende werking etc)

Deltares

Modellering zoutindringing: Zeedeel

- Waterstandsrand nabij sluizen (SOBEK3 RMM)
- Haringvlietsluizen als kunstwerk
- Hefhoogtes gemeten

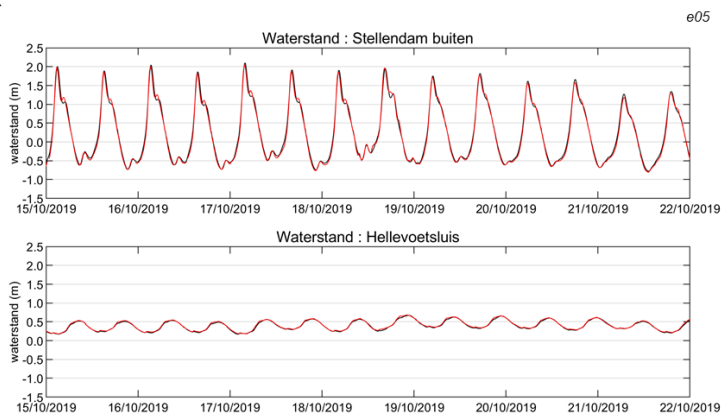
Domein uitbreiding met zeedeel:

- Eis 1: goede reproductie waterstand aan zeezijde van de kering (meting).
- Waterstand zeezijde (Stellendam Buiten) nauwkeurig beschreven

Conclusie:

Goede waterstandsrepresentatie aan de zeezijde van de kering

Deltares



Modellering zoutindringing: Haringvlietsluizen

Domein uitbreiding met zeedeel:

- Eis 1: goede reproductie waterstand aan zeezijde van de kering (meting).
- Eis 2: Reproductie debiet (vergelijking SOBEK3)

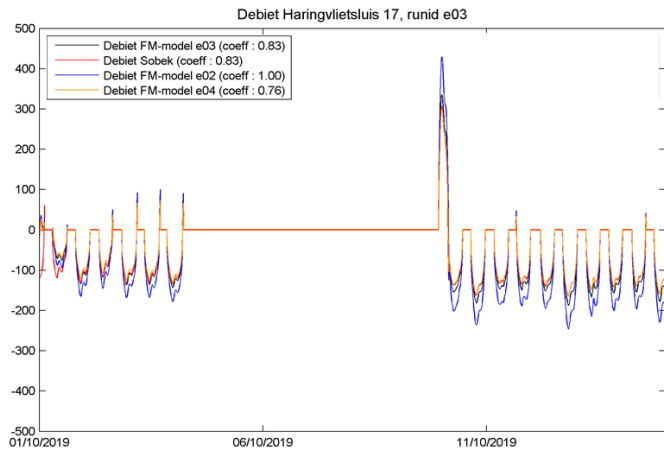
Debiet door sluisen bepalend voor zoutindringing en uitspoeling.

In model: Debiet afregelen met verlies-coëfficiënt:

- Voorlopig "grote benadering"
- Moet in toekomst beter worden bepaald, ahv gemeten debieten, zowel IN als UIT

Conclusie:

Debiet redelijk in lijn met SOBEK3 (eigenlijke debieten onbekend)

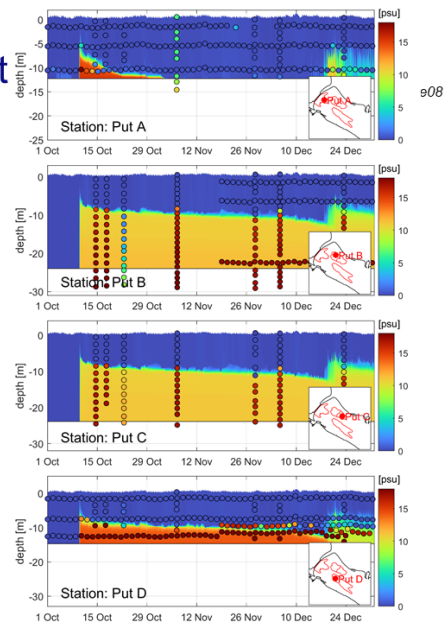


Modellering zoutindringing: Zout

Modellering zoutindringing:

- Keringsformulering lijkt te werken: Zout komt system in.
- Sprongalgdiepte redelijk in lijn met metingen.
- Maar: Te lage zoutgehalten in systeem.
- Daarnaast nogmaals onzekerheid in metingen:
 - 20 okt: Fout
 - 5 dec: Spronglaag significant lager (B en C)

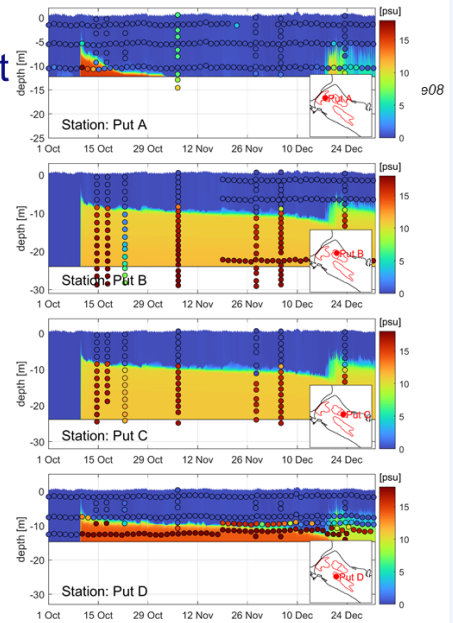
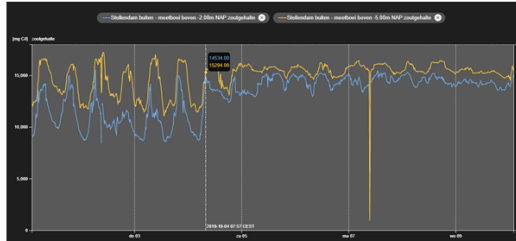
Deltares



Modellering zoutindringing: Zout

Modellering zoutindringing:

- Keringsformulering lijkt te werken: Zout komt system in.
- Maar: te lage zoutgehalten in systeem.
- Zoutgehalte zeezijde model 25 PSU, werkelijk +/- 27 PSU (verwacht effect slechts beperkt)
- Kunstwerkformulering: Voorlopig dieptegemiddeld → mogelijk te veel doormenging



Conclusies (1)

- Opzetten en afregelen model kost tijd, moeite en is afhankelijk van aanleveren data tbv:
 - Initiele condities (vertrouwen in metingen)
 - Randvoorwaarden (bij voorkeur op basis van enkel model of metingen, nauwkeurigheid moet groot zijn)
 - Meteo (gemeten, voor scenario's nog te bepalen, werkt namelijk ook door in RVW)
 - Toetsingdata (vertrouwen in metingen)
- Model getoetst voor zoetspoelen en naleveren: Resultaten redelijk goed.
 - Ontzilt put B en C in lijn met metingen.
 - Put D ontzilt in soms sneller dan gemeten (mogelijk relatie met beperkte diepte, en lagere spronglaag in model)
 - Verdere gedetailleerdere analyse gewenst, inzoomen op specifieke periodes.
 - Maar onzekerheid en lage frequentie metingen maakt verbeteren model lastig.
- Eerste proef met modelleren inlaten (start Naleverproef 2019):
 - Beschrijving kunstwerk nog grofstoffelijk, maar lijkt te werken
 - Zoutgehalte in gemodelleerde system significant lager dan gemeten (mogelijk door diepte gemiddelde beschrijving kunstwerk)

Deltares

Conclusies (2)

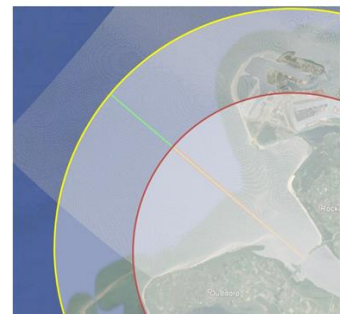
- Model lijkt op basis van deze beperkte toetsing geschikt voor scenario-studies naar zoetspoelen en naleveren
- Validatie ahv meer varende metingen wenselijk, daarnaast ook toetsing stromingspatronen
- Voor beter begrip werking systeem en validatie model: Meer varende metingen zodat specifieke periodes en maatregelen kunnen worden onderzocht (maar ook ivm onzekerheden)
- Doorontwikkeling model dat ook kan “Kieren” afhankelijk van software-ontwikkeling (kunstwerkbeschrijving).

Deltares

Aanbevelingen

- Validatie aan de hand van 2019-2020 data (Naleverproef 2019):
 - Gedetailleerdere analyse, inzoomen op specifieke periodes en maatregelen
 - Doorloop naar begin 2020: Lastig ivm RVW (SOBEK3 RMM jaarsom pas +/- najaar 2021)
 - Simulatie van gehele ontziltingsperiode, focus op put D: In model stratificatie misschien minder stabiel dan gemeten.
 - Uitbreiding validatie met put F (Aardappelengat).
 - Validatie ahv stromingsdata (Wouter analyse)
- Validatie aan de hand van 2020-2021 data (Kierproef 2020):
 - Doorontwikkeling model dat ook kan “Kieren”
 - Afhankelijk van software-ontwikkeling (kunstwerkbeschrijving).
 - Uitbreiding modeldomein: Relatief groot zeedeel nodig om zoutgehalte voor sluizen te modelleren
 - RVW worden minder eenvoudig: SOBEK3 RMM domein te klein. D-HYDRO Noordzee 3D nodig: Onduidelijk wanneer modelsom relevante periode (winter 20-21) beschrijft.
- Scenario-studies zoetspoelen, nalevering en maatregelen:
 - Uitvoeren met modelgrens op Haringvlietsluizen (alleen uitgaande debieten)
 - Hypothetische situaties: Uitwerken combinaties van forceringen (RVW, meteo)

Deltares



Contact

www.deltares.nl

[@deltares](https://twitter.com/deltares)

[linkedin.com/company/deltares](https://www.linkedin.com/company/deltares)

info@deltares.nl

[@deltares](https://www.instagram.com/deltares)

[facebook.com/deltaresNL](https://www.facebook.com/deltaresNL)

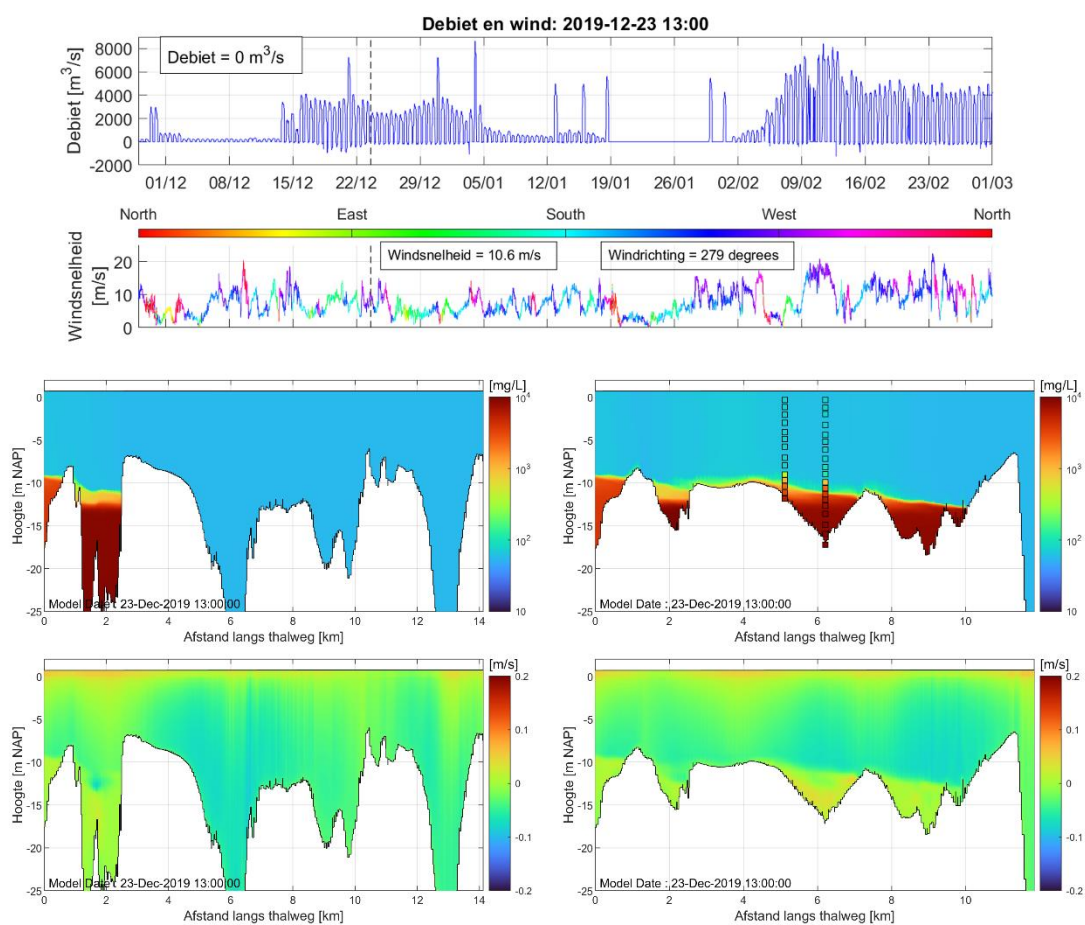


F Opgeleverde animaties

Via de Kier-FTP-site zijn video's van stroming en het zoutgehalte langs zuidelijke en noordelijke thalwegen voor periode van modelsimulatie beschikbaar voor de klant om in te zien. Deze bestanden zijn via de Kier-FTP site in te zien onder /03_Model_simulaties/2023_Naleverproef_2019-2020. De opgeleverde bestanden zijn:

- noordelijkethalweg_zout_stroming.avi
- zuidelijkethalweg_zout_stroming.mp4
- noord_zuid_thalweg_zout_stroming.mp4

Een snapshot van de gecombineerde video is hieronder weergegeven.



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