

Zoetwatersverspreiding Voordelta Haringvliet



Zoetwatersverspreiding Voordelta Haringvliet

Auteur(s)

Wouter Kranenburg

Theo van der Kaaij

Famke Kovacs

Zoetwaterspreiding Voordelta Haringvliet

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Karin Stone
Referenties	
Trefwoorden	Zoetwaterspreiding, Voordelta, Haringvliet, pluim, spuidebiet

Documentgegevens

Versie	2.1
Datum	22-12-2024
Projectnummer	11210363-004
Document ID	11210363-004-ZKS-0003
Pagina's	53
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Wouter Kranenburg
Theo van der Kaaij
Famke Kovacs

Samenvatting

In het programma Lerend Implementeren van het Kierbesluit werkt Rijkswaterstaat momenteel toe naar een bedienprotocol voor de Haringvlietsluizen waarbij visintrek zoveel als mogelijk wordt bevorderd binnen randvoorwaarden voor verzilting. Als onderdeel daarvan is inzicht nodig in de zoetwatersverspreiding in de Voordelta en de variatie hierin onder invloed van spuidebiet en wind. Dit is relevant omdat de zoetwatersverspreiding bepalend is voor het zoutgehalte van water dat instroomt wanneer de sluisen geopend worden tijdens het 'Kieren'. Daarnaast zijn de zoutgehalten in de Voordelta van belang voor het inschatten van de ecologische baten van het Kieren in de Voordelta en van eventuele verschillen daarin tussen mogelijke bedienprotocollen.

Deze studie brengt in kaart hoe zoetwater dat wordt gespuid via de Haringvlietsluizen zich over de loop van het getij verspreidt over de Voordelta. Dit wordt onderzocht voor zowel een laag, een middelhoog en een hoog spuivolume door de Haringvlietsluizen (getijgemiddelde debieten rond 75, 750 en 2000 m³/s), middels simulaties met een 3D stromingsmodel. Daarbij wordt voor elk spuiscenario ook een ruimtelijk beeld gegeven van de minimale en maximale zoutgehalten over het getij en de variatie daarin onder invloed van wind.

Uit deze studie komt naar voren dat bij aanvang van het spuien in eerste instantie zoetwater wordt afgevoerd naar/door de noordelijke geul, snel gevolgd door een toenemende afvoer door de zuidelijke geul. Enige tijd (1-2 uur) later vindt nagenoeg de hele afvoer plaats via de zuidelijke geul. De zoetwaterafvoer leidt tot stratificatie, het sterkst bij het middelhoge en hoge spuidebiet. Voor die debieten 'botst' de zoetwaterafvoer door de zuidelijke geul tegen de (zoute) ebstroming op zee, wat aan het oppervlak leidt tot de formatie van een lange, scherpe scheidslijn tussen zoet en zout water (front). Al voor de eb-vloed stromingsomkering op zee, gaat de zoetwatermassa aan het oppervlak zich verplaatsen in noordwestelijke richting. Zodra de vloed op gang komt, gaat die de beweging dicteren en treedt er veel menging op. Tijdens de vloed op zee (hoogwaterfase) vindt instroom van water vanuit zee plaats door voornamelijk de zuidelijke geul. Aan de bodem betreft dit een zoutwaterinstroom, aan het oppervlak kan de stroming richting de Haringvlietsluizen een stuk zoeter zijn, afhankelijk van het voorafgaande spuidebiet. Bij het hoge spuidebiet kan de zoutindringing via de zuidelijke geul het sluisencomplex niet bereiken en blijft het water in de oostelijke delen van de geulen en de ondieptes zowel aan het oppervlak als aan de bodem nagenoeg volledig zoet. De instroom via de zuidelijke geul duwt het in de Voordelta aanwezige zoete water tegen de noordoostelijke oever, wat tijdens de tweede helft van de hoogwaterfase van het getij al resulteert in afvoer van relatief zoet water via de noordelijke geul.

De windinvloed is zichtbaar gemaakt met kaarten van de standaarddeviatie van de minimale en maximale zoutgehalten per getij. Hierbij wordt voor het middelhoge spuidebiet voor de maximale saliniteit aan het wateroppervlak nabij de sluisen een waarde gevonden van ongeveer 3+/-2 PSU (chlorideconcentraties van ongeveer 1650+/-1100 mg/l). Dit betekent dat het water aldaar het gehele getij weliswaar vrij zoet blijft, maar toch makkelijk een factor drie verschil in saliniteit kan vertonen afhankelijk van de wind. Bij het hoge spuidebiet is het water nabij de sluisen altijd nagenoeg zoet, ongeacht de windcondities. Pas in het meest westelijke deel van de ondiepte en de geulen neemt de maximale saliniteit en de variatie daarin toe (12+/-7 PSU, ongeveer 6600+/-3850 mg/l). Dat is daarmee ook het gebied waar het erg afhangt van de wind of er veel of weinig zoetwater terecht komt.

De inzichten uit deze studie kunnen gebruikt worden bij het inschatten van de verschillen in 'natuurwaarde' van de Voordelta tussen verschillende mogelijke bedienprotocollen. Daarvoor

is vooral het scenario met een laag spuidebiet relevant. Dat laat min of meer de situatie zien van de variant “Inlaatbeheer met permanent doorspoelen” uit de Variantenstudie, waarbij ook ten tijde van lage rivierafvoeren elk getij en geringe hoeveelheid water wordt gespuid.

Inhoud

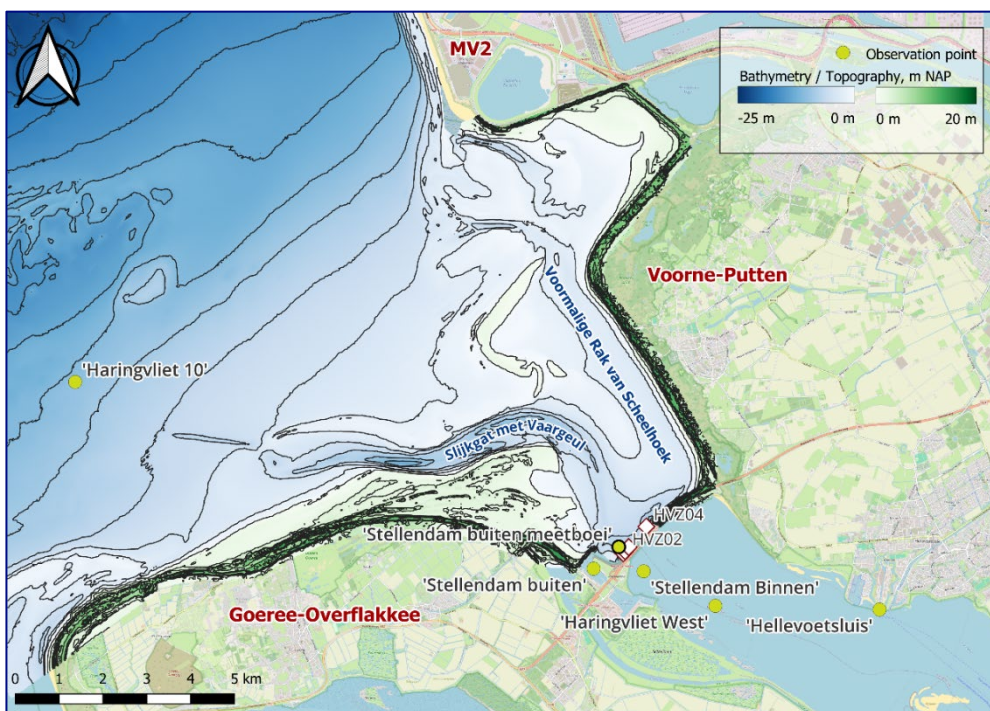
	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Doel en aanpak	9
1.2.1	Doel	9
1.2.2	Aanpak	9
1.3	Leeswijzer	9
2	Methode	11
2.1	Model	11
2.2	Opzet simulaties	12
2.3	Opzet analyse	13
2.4	Afvoerscenario's en bepaling doorstroomoppervlak	13
3	Resultaten	16
3.1	Omgevingscondities	16
3.2	Verloop zoetwatersverspreiding over het getij voor 3 spuicondities	17
3.2.1	Minimale spuiafvoer	17
3.2.2	Piekafvoer Haringvlietsluizen van 1300 m ³ /s	20
3.2.3	Piekafvoer Haringvlietsluizen van 3300 m ³ /s	22
3.2.4	Situatie nabij sluisen aan begin en einde spuiperiode	24
3.3	Variatie ten gevolge van wind	26
3.3.1	Voor scenario met minimale spuiafvoer	26
3.3.1.1	Variatie minima en maxima bij Stellendam-buiten (tijdserie)	26
3.3.1.2	Variatie minimale en maximale saliniteit in de Voordelta	27
3.3.2	Voor scenario met een piekafvoer van 1300 m ³ /s	28
3.3.3	Voor scenario met een piekafvoer van 3300 m ³ /s	29
4	Discussie	31
4.1	Verbinding met bedienvarianten	31
4.2	Beperkingen van deze studie	32
4.3	Ideeën	33
5	Conclusies en aanbevelingen	34
5.1	Conclusies	34
5.2	Aanbevelingen	35
6	Referenties	36
A.	Appendix: Relatie spuidebiet, spuivolume en Rijnafvoer	37

B.	Appendix: Verloop zoutgehalte over de getijperiode – zoom	40
C.	Appendix: Relatie saliniteit - chlorideconcentratie	47
D.	Appendix: Tijdseries saliniteit Stellendam-buiten	49
E.	Appendix: Tijdseries Stellendam-buiten met maxima & minima	51

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In het programma **Lerend Implementeren van het Kierbesluit** werkt Rijkswaterstaat toe naar een **bedienprotocol** voor de Haringvlietsluizen waarbij wordt gestreefd naar het maximaliseren van de visintrek binnen de randvoorwaarden voor verzilting. In dit kader vinden diverse deelonderzoeken plaats in de onderzoeksporen Verzilting en Natuur. Een van de onderwerpen binnen het **Onderzoeksprogramma Verzilting** is de zoetwatersverspreiding in de Voordelta van het Haringvliet. Hier bedoelen we daar grofweg mee het gebied aan de westzijde van de Haringvlietsluizen van de zuidpunt van Maasvlakte II tot de westpunt van Goeree-Overflakkee, zie Figuur 1¹. Inzicht in de chloridesituatie in de Voordelta is van belang omdat de **chloridesituatie in de Voordelta** bepalend is voor de chlorideconcentratie van instromend water, die op zijn beurt mede bepalend is voor wanneer en hoever de sluisen geopend kunnen worden. Daarnaast zijn de concentraties en de omvang van de 'brakke zone' in de Voordelta van invloed op de ecologische waarde van de Voordelta. Inzicht in de verschillen hierin voor verschillende mogelijke bedienprotocollen is van belang voor het inschatten van de ecologische baten van de diverse opties.



Figuur 1: De Voordelta van het Haringvliet en omgeving.

Relevante systeemkennisvragen over de chloridesituatie in de Voordelta zijn: Wat is het effect van het spuibeheer op de chloridesituatie (ruimtelijk patroon) in de Voordelta? Hoe gevoelig is de chloridesituatie in de Voordelta voor variaties in de wind en het getij?

¹ Merk op dat elders met 'de Voordelta' soms ook het hele Natura2000 gebied voor de Zeeuwse en Hollandse eilanden wordt bedoeld (<https://nl.wikipedia.org/wiki/Voordelta>). Hier hebben we het specifiek over de Voordelta van het Haringvliet, een gebied dat overigens ook wel eens aangeduid wordt als Haringvlietmonding (<https://www.voorneaanzee.nl/verzanding-haringvlietmonding-onderzoek-nadert-einde/>).

In 2023-2024 is in het kader van SITO-PS WBB02 Waterverdeling en Verziltig, onderdeel Haringvliet, gewerkt aan een **'Verkenning Dynamiek Voordelta Haringvliet'** (Kranenburg et al., 2024) waarin werkhypothese zijn ontwikkeld over de zoetwatersverspreiding in de Voordelta op grond van literatuur en reeds aanwezige meetdata en modelresultaten. Vervolgens is in 2024 een **tool ontwikkeld voor de inschatting/berekening van de chlorideconcentratie in de Voordelta bij Stellendam-buiten -5.0 m** als functie van spuidebiet, inlaatdebiet, getijsituatie en wind-condities (Steenman, 2024). Deze parameter is namelijk een goede proxy van de chlorideconcentratie van instromend water bij Kieren. Deze tool is vervolgens verder gebruikt om te onderzoeken hoe de concentratie bij Stellendam-buiten -5.0m varieert onder invloed van variatie in spuidebiet en wind (Kranenburg en Kovacs), en om statistiek te genereren van de chlorideconcentratie (90-jarige reeks) ter ondersteuning van de ontwikkeling van het bedienprotocol (Talstra en Steenman, 2024). Er is echter ook behoefte aan nadere inzichten in de **ruimtelijke verspreiding van zoetwater in de Voordelta** en de mogelijke verschillen daarin tussen bedienprotocolvarianten. Hiermee kan beter beschreven en begrepen worden hoe de chloridesituatie varieert onder invloed van variatie in spuidebiet, wind en getij, en kan ook de betekenis van verschillende situaties voor de natuur(waarde) van de Voordelta beter worden ingeschat. Dit is van belang voor het Natuurspoor van het onderzoeksprogramma Lerend Implementeren, waarin de natuureffecten van verschillende Kier-varianten worden onderzocht. De ruimtelijke verspreiding van zoetwater in de Voordelta is het onderwerp van deze rapportage.

1.2 Doel en aanpak

1.2.1 Doel

Het doel van deze studie 'Zoetwatersverspreiding Voordelta' is:

- Nader in kaart brengen van de ruimtelijke verspreiding van zoetwater in de Voordelta voor een aantal verschillende spuidebieten, en daarbij ook de variatie daarin onder invloed van wind zichtbaar maken.
- Met behulp van bovenstaande, een eerste inschatting geven over de te verwachten verschillen tussen verschillende mogelijke bedienprotocollen.

1.2.2 Aanpak

In deze studie onderzoeken we de ruimtelijke verspreiding van zoetwater in de Voordelta en de verschillen daarin onder invloed van spuidebiet en variatie in wind met behulp van een 3D stromingsmodel voor de Voordelta van de Haringvliet. Daarmee simuleren we drie situaties, te weten een met het minimaal mogelijke spuidebiet, een midden-debiet en een hoog debiet en bestuderen we de zoutgehalten². Dit geeft inzicht in het gedrag / de verspreiding van de zoetwaterpluim over tijd en de invloed van debietvariatie daarop. Voor elk van deze debietsituaties simuleren we een zekere periode, voor elke simulatie gebruikmakend van eenzelfde realistische, variabele, windforcering. Hiermee krijgen we een beeld van de variatie onder invloed van wind. Merk op dat deze studie niet ingaat op specifieke effecten van specifieke windrichtingen, maar zich richt op het beschrijven van variaties onder invloed van wind middels een standaarddeviatie.

1.3 Leeswijzer

De opzet van deze rapportage is als volgt: Hoofdstuk 2 gaat kort in op het gebruikte 3D model en omschrijft de opzet van de simulaties en gebruikte forceringscondities. Hoofdstuk 3 beschrijft de berekeningsresultaten, waarbij eerst wordt ingegaan op het verloop van de

² In het Onderzoeksprogramma Verziltig wordt verziltig van het Haringvliet ten gevolge van Kieren omschreven in termen van chlorideconcentratie en wordt gesproken over 'de chloridesituatie'. In deze studie naar zoetwatersverspreiding in de Voordelta wordt het zoutgehalte in de Voordelta beschreven in termen van saliniteit (PSU). In de bijlagen is een omreken tabel opgenomen.

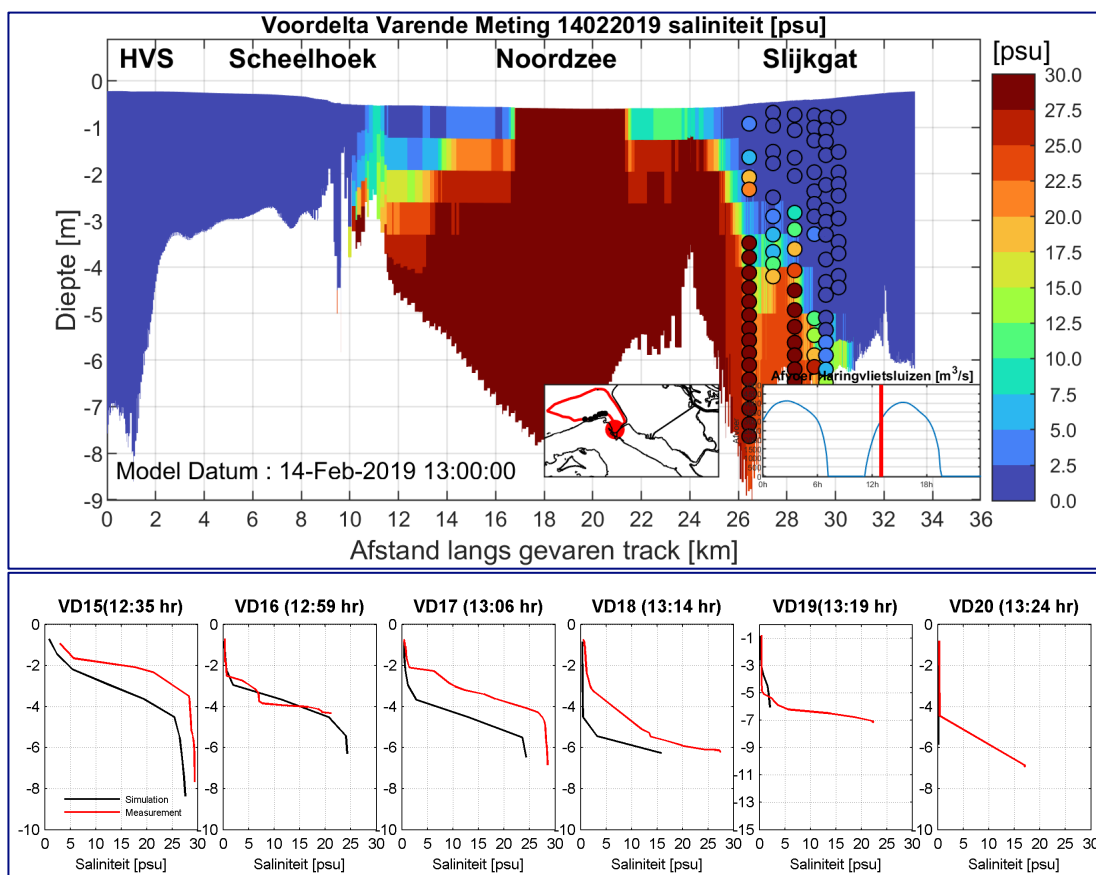
zoetwatersverspreiding in de Voordelta over de tijd en de verschillen daarin voor verschillende spuicondities, en vervolgens wordt gekeken naar de variatie in minimale en maximale saliniteit onder invloed van variatie in wind. Hoofdstuk 4 bevat een korte discussie van de resultaten, met een eerste inschatting van de te verwachten verschillen tussen verschillende mogelijke bedienprotocollen. De conclusies worden samengevat in hoofdstuk 5. Merk op dat in de bijlagen informatie is opgenomen over de relatie tussen spuidebieten, spuvolumes en Rijnafvoeren (bijlage A), en over de relatie tussen saliniteit en chlorideconcentraties (bijlage C), ter ondersteuning van interpretatie van de resultaten door de lezer.

2 Methode

2.1 Model

Om de ruimtelijke verdeling van zout water in de Voordelta te bepalen, voeren we in deze studie berekeningen uit met een 3-dimensionaal rekenmodel van de water- en zoutbeweging in de Voordelta en het Haringvliet. De opzet van dit model en reproductie van zoutindringing in het Haringvliet is beschreven in (Kaaij, 2024a). De vergelijking van berekeningsresultaten met varende metingen in de Voordelta is gepresenteerd in (Kaaij, 2024b).

Als voorbeeld van de modelreproductie van de varende metingen toont Figuur 2 de vergelijking tussen gemeten en berekende saliniteitsprofielen in het "Slijkgat" (de zuidelijke geul waardoor de Voordelta in de nabijheid van de Haringvlietsluizen gevuld wordt met zout zeewater).

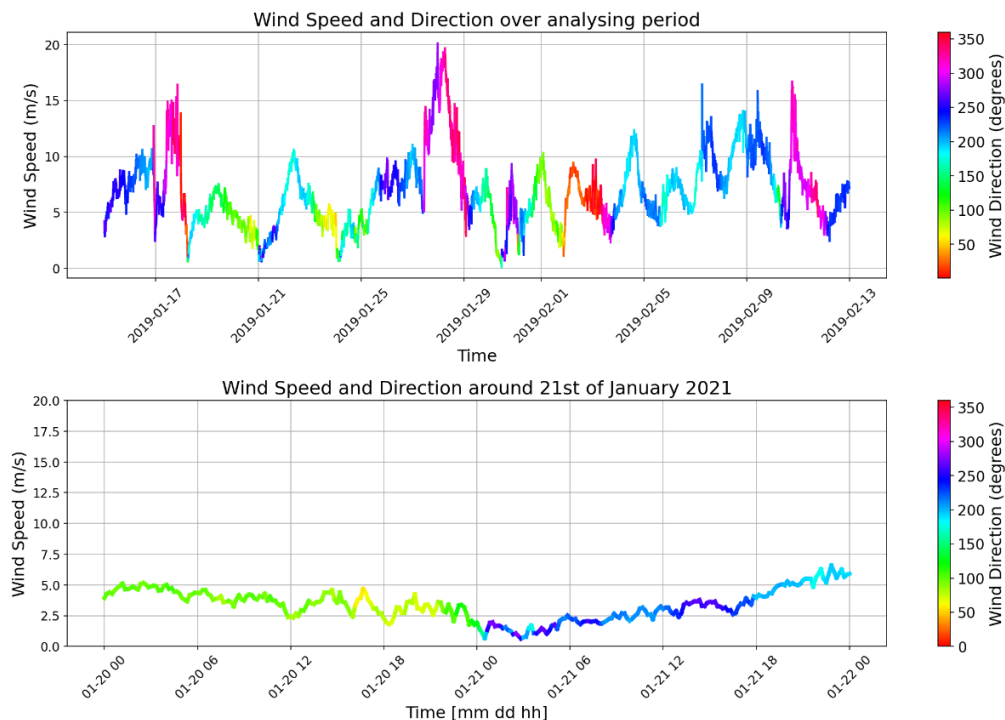


Figuur 2: Gemeten en berekende saliniteit in de Voordelta. Boven: Berekende saliniteit langs de track zoals gevaren op 14 februari 2019, startend bij de Haringvlietsluizen (HVS) en in oplopende afstand eerst door de Voormalige Rak van Scheelhoek, daarna door de Noordzee en tenslotte via het Slijkgat terug naar de Haringvlietsluizen (berekeningsresultaat voor 13:00 uur), met daar bovenop met bolletjes de gemeten saliniteitsprofielen in het Slijkgat (profielmetingen tussen 12:30 en 13:30). De linker inzet toont de gevaren track met de locaties van de weergegeven profielmetingen (zwarte punten). De rechter inzet toont het debiet door de Haringvlietsluizen, met een rode balk ter indicatie van het tijdsbestek van de metingen in het Slijkgat. Onder: Individuele gemeten en berekende saliniteitsprofielen in het Slijkgat.

Net als de metingen, laten de modelresultaten een sterke stratificatie zien in het Slijkgat. Deze stratificatie duidt erop dat zoetwater aan het oppervlak wordt afgevoerd over een tong van zoutwater aan de bodem, en dat dit fenomeen wordt gereproduceerd door het model. In de directe nabijheid van de sluizen geven de modelresultaten wel een lagere saliniteit dan de metingen, wat betekent dat de toevoer van zout water door het Slijkgat in werkelijkheid waarschijnlijk groter is dan in de model-berekeningen. Dit wordt ook genoemd in (Kaaij, 2024b). Daar wordt verder genoemd dat de kwalitatieve overeenstemming tussen meting en berekening goed is: het model laat het gedrag zien qua stratificatie en ruimtelijke verdeling dat ook in de metingen zichtbaar is. Daarmee wordt het model geschikt geacht voor toepassingen die draaien om de *orde van grootte* van het zoutgehalte en/of variaties daarin. Ook wordt genoemd dat het model inzetbaar is voor analyses ten behoeve van de ecologie, maar dat de kwantitatieve resultaten niet goed genoeg worden geacht voor precieze voorspelling van de grootte van het zouttransport door de sluizen. Het gedeelde oordeel van Rijkswaterstaat en Deltares bij aanvang van deze studie was dat we het model hiermee toe kunnen passen in deze studie naar het ruimtelijk beeld van de zoetwatersverspreiding en de variatie daarin onder invloed van wind.

2.2 Opzet simulaties

Met het model worden simulaties uitgevoerd voor de periode 1 januari 2019 tot 13 februari 2019, een periode die ook is gesimuleerd in de modelvalidatiestudie (Kaaij, 2024b). In de analyse wordt in het bijzonder de periode 15 januari 2019 tot 13 februari 2019 beschouwd. De eerste 2 weken van de simulatieperiode worden niet meegenomen in de analyse vanwege het inspelen van het model. De analyseperiode is gekozen omdat in deze periode vrij grote windsnelheden plaatsvinden, en ook redelijk wat variatie in de windsnelheid optreedt. Ook komen er in deze periode genoeg verschillende windrichtingen aan bod om de variatie onder invloed van wind te kunnen onderzoeken. Voor de analyseperiode wordt elke 2 uur ruimtelijke uitvoer weggeschreven. Tijdsree uitvoer voor specifieke stations of andere sleutellocaties wordt per minuut weggeschreven.



Figuur 3: Windcondities. Boven: voor de gehele analyseperiode. Onder: voor de periode van twee dagen gebruikt sectie 3.2. De geplote waarde geeft de windsnelheid en de kleur van de lijn de richting waaruit de wind afkomstig is (0 graden is wind vanuit het noorden).

2.3 Opzet analyse

Het ruimtelijk beeld van de zoetwatersverspreiding in een getijcyclus en de verschillen daarin voor verschillende spuiscenario's worden onderzocht door in te zoomen op de eerste 10 uur van 21 januari 2019 en de resultaten te vergelijken voor de afvoerscenario's. Op 21 januari is de wind relatief laag, zie Figuur 3 (onderste 2 panelen). Om inzicht te krijgen in de invloed van wind wordt voor elke getij in de analyseperiode voor het hele modeldomein bepaald wat het maximale en minimale zoutgehalte in die getijperiode was. Dit levert dus per spuiperiode een ruimtelijk beeld op van maximale en minimale zoutgehaltes. Vervolgens worden hiermee zowel voor de maximale als de minimale zoutgehaltes een gemiddelde en standaarddeviatie bepaald over de analyseperiode. Zo verkrijgen we een ruimtelijk beeld van 'het gemiddelde maximale zoutgehalte' en de variatie in dat maximale zoutgehalte, en hetzelfde voor het minimale zoutgehalte. Merk op dat in deze analyse de periode waarvoor het minimale en maximale zoutgehalte wordt bepaald, loopt van het begin van een spuiactie tot het begin van de volgende spuiactie. Dat betekent dat de enkele keer dat er niet gespuid wordt vanwege opzet op zee, een minimum en maximum bepaald wordt over een langere periode.

De resultaten voor zoutgehaltes worden hierbij hoofdzakelijk weergegeven met saliniteit in PSU. In bijlage C zijn twee tabellen en een grafiek opgenomen om waarden voor de saliniteit eenvoudig te kunnen vertalen in chlorideconcentratie en vice versa. Voor enkele waarden van bijzondere betekenis is hieronder een kleine tabel opgenomen.

Tabel 1: Conversie saliniteit – chlorideconcentratie (bovengrenswaarden op aangeven van Rijkswaterstaat).

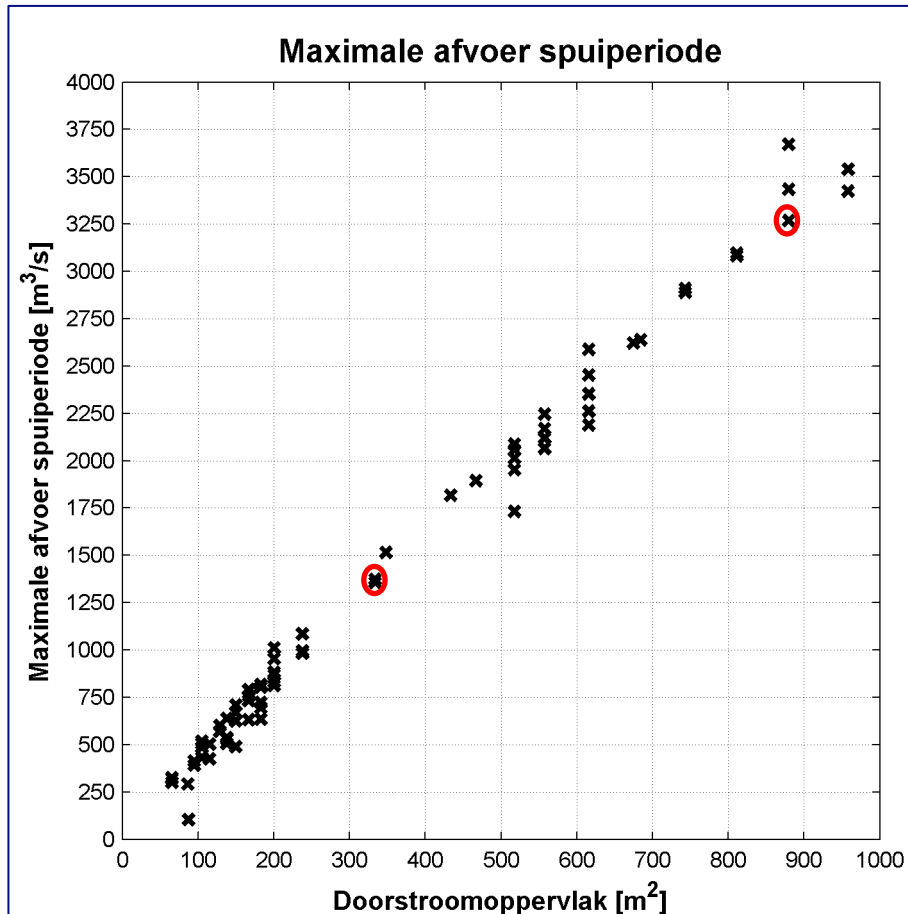
Saliniteit (PSU)	Chlorideconcentratie (mg/l)	Betekenis
0.3	≈ 160	Realistische achtergrondconcentratie voor zoetwater
1.0	≈ 550	(handige waarde voor overige omrekeningen)
1.8	≈ 1000	Min of meer bovengrens voor zoetwatersoorten
9.0	≈ 5000	Min of meer bovengrens voor matig brakwatersoorten
18.0	≈ 10000	Min of meer bovengrens voor meeste brakwatersoorten
30.0	≈ 16600	Bijna volledig zeewater

2.4 Afvoerscenario's en bepaling doorstroomoppervlak

Er zijn simulaties uitgevoerd voor 3 verschillende 'afvoersituaties'. Om precies te zijn, zitten de verschillen tussen de simulaties in het doorstroomoppervlak van de Haringvlietssluisen dat wordt opgelegd. De 3 simulaties behoren respectievelijk bij:

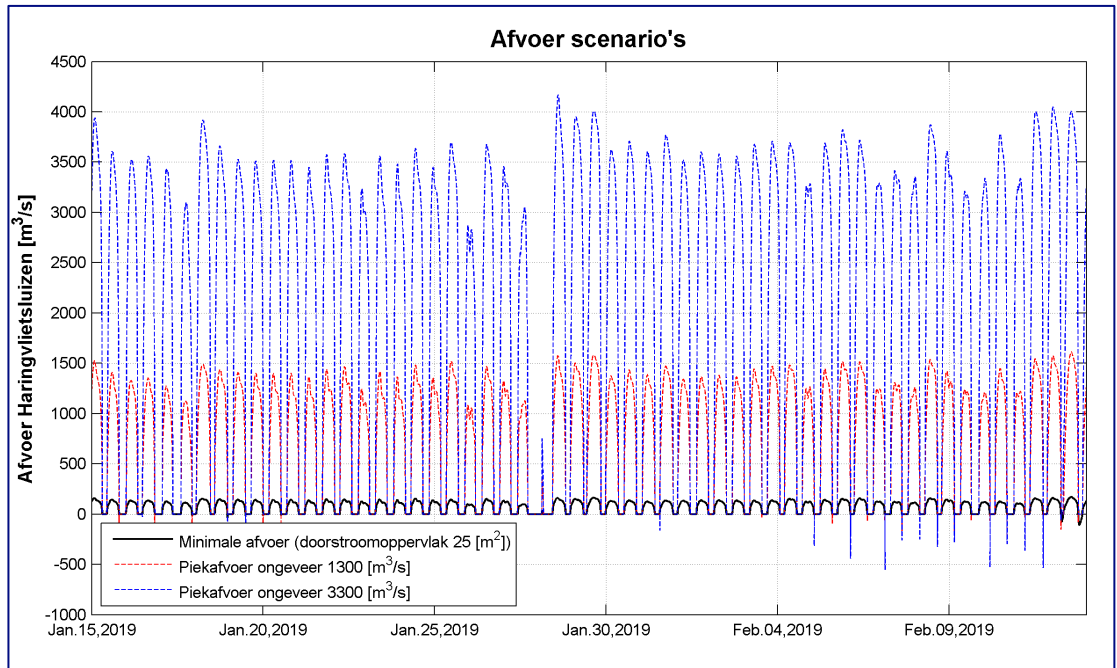
- 1) Een klein doorstroomoppervlak, te weten 25 m², wat een getijgemiddeld spuidebiet oplevert van rond de 75 m³/s, met piekafvoeren door de sluisen rond de 130 m/s.
- 2) Een doorstroomoppervlak resulterend in piekafvoeren door de sluisen rond de 1300 m³/s. Dit is een doorstroomoppervlak van 330 m² en levert getijgemiddelde spuiafvoeren rond de 750 m³/s. Dit zijn spuiafvoeren passend bij veel voorkomende rivierafvoer, $Q_{Lobith} = 2000 - 2300 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 3) Een doorstroomoppervlak resulterend in piekafvoeren door de sluisen rond de 3300 m³/s. Dit is een doorstroomoppervlak van 880 m² en levert getijgemiddelde spuiafvoeren iets onder de 2000 m³/s. Dit zijn spuiafvoeren passend bij een hogere rivierafvoer $Q_{Lobith} = 3000 - 3200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Bij deze scenario's wordt niet gekierd.



Figuur 4: Berekende maximale afvoer door de Haringvlietsluizen en bijbehorende doorstroomoppervlakte voor simulaties uit (Kaaij, 2024b). De rode cirkeltjes geven aan hoe uit de informatie in die simulaties gezocht is naar een doorstroomoppervlak passend bij het gewenste piekspuidebiet.

Voor berekening 1 is enkel gespuid met sluis 16 waarbij de hefhoogte de kleinst mogelijke hefhoogte is. Hefhoogten voor berekening 2 en 3 zijn bepaald door in de bestaande berekeningen (Kaaij, 2024b) te zoeken naar spuiperioden met het gewenste piekspuidebiet, de hefhoogten te bepalen die horen bij die spuiperiode(n) (zie Figuur 4), en vervolgens een tijdserie te maken waarin die hefhoogte wordt toegepast in alle spuiperioden. In die tijdserie is de hefhoogte dus hetzelfde voor alle spuiperioden. Maar omdat het waterstandsverloop voor verschillende spuiperioden verschilt, zal ondanks het gebruik van een constante hefhoogte de (piek)afvoer voor verschillende spuiperioden toch enigszins verschillend zijn. Dat is ook zichtbaar in Figuur 5, die de tijdseries van de spuidebieten voor de drie simulaties weergeeft.



Figuur 5: Afvoer door de Haringvlietsluizen in de verschillende afvoerscenario's.

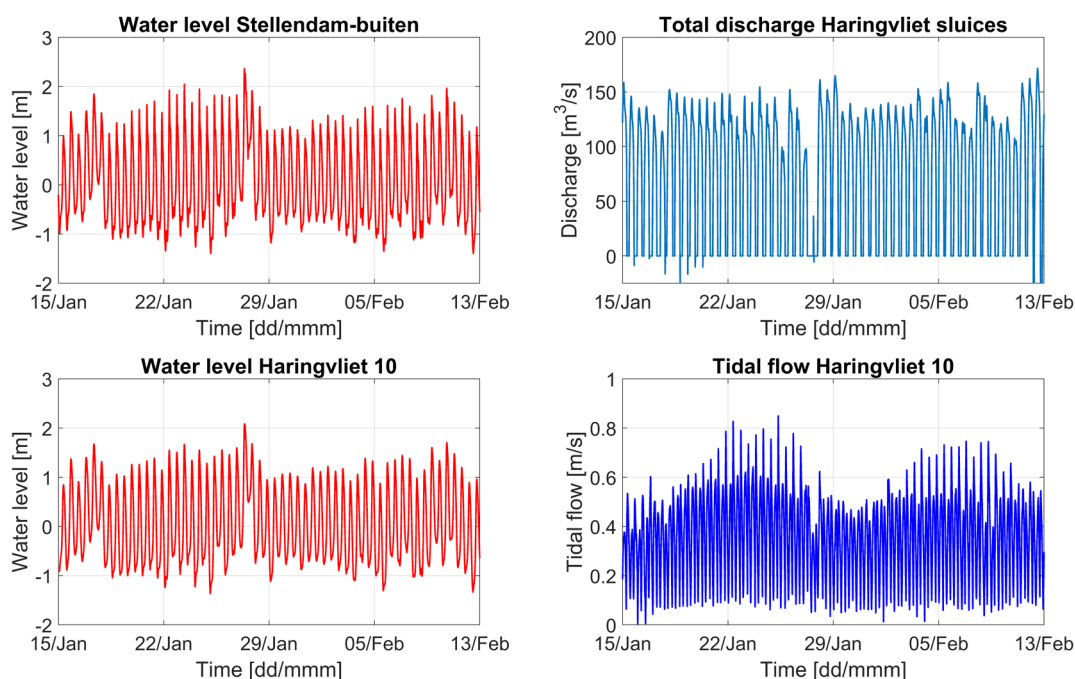
In bijlage A zijn grafieken opgenomen om de verschillende piekafvoeren te kunnen linken aan getijgemiddeld debiet door de Haringvlietsluizen en het totale volume van de uitstroming naar zee tijdens het getij. Voor de volledigheid zijn ook (van Rijkswaterstaat afkomstige) grafieken opgenomen over de relatie tussen Rijnafvoer en uitstroomdebiet en -volume door de Haringvlietsluizen voor protocol LPH'84. Vanuit de tijdseries voor de afvoer is bepaald dat de getijgemiddelde afvoeren door de Haringvlietsluizen in de hier gebruikte scenario's overeenkomen met respectievelijk ongeveer 75 m³/s, 750 m³/s en net iets minder dan 2000 m³/s.

3 Resultaten

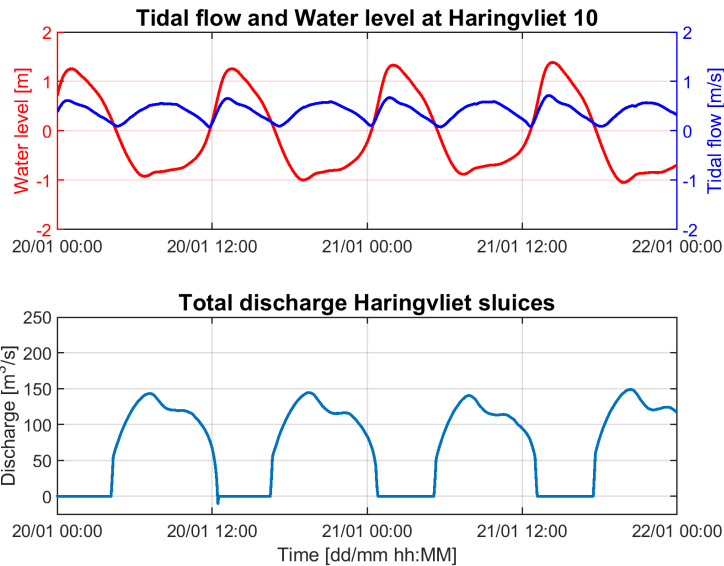
3.1 Omgevingscondities

Figuur 6 geeft een beeld van de omgevingscondities voor de gehele analyseperiode. Hier is te zien dat het piekdebiet door de Haringvlietsluizen negatief gecorreleerd is met de waterstand op zee. De waterstand bij Stellendam-buiten varieert tussen de -1.4 en 2.4 m. De waterstand bij Haringvliet 10 varieert tussen de -1.4 en 2.1 m. De pieksterkte van de getijstrooming bij Haringvliet 10 varieert tussen eb en vloed en springtij en doottij, met maximale stroomsnelheden van 0.85 m/s. Merk verder op dat de dieptegemiddelde strooming bij Haringvliet 10 voornamelijk van kustparallel gericht is (niet weergegeven).

De waterstand en stroomsnelheid bij Haringvliet 10 en het debiet door de Haringvlietsluizen zijn in meer detail weergegeven in Figuur 7. In de figuur valt te zien dat de getijstrooming op zee goed in fase is met de waterstanden, wat betekent dat de vloedstrooming samenvalt met bovengemiddelde waterstanden en de ebstrooming met waterstanden lager dan de gemiddelde waterstand. Voor vloed is de piekstroming ongeveer 0.6 m/s en de hoogwaterstand ongeveer 1.25 m, terwijl de ebstrooming een piekwaarde heeft van ongeveer 0.5 m/s, samenvallend met laagwater van ongeveer -0.9 m. Ook is te zien dat de spuiperioden samenvallen met laagwater / waterstanden lager dan de gemiddelde waterstanden, wat betekent dat de uitstroming naar zee vanuit het Haringvliet samenvalt met de (voornamelijk zuidwestelijk gerichte) ebstrooming op zee.

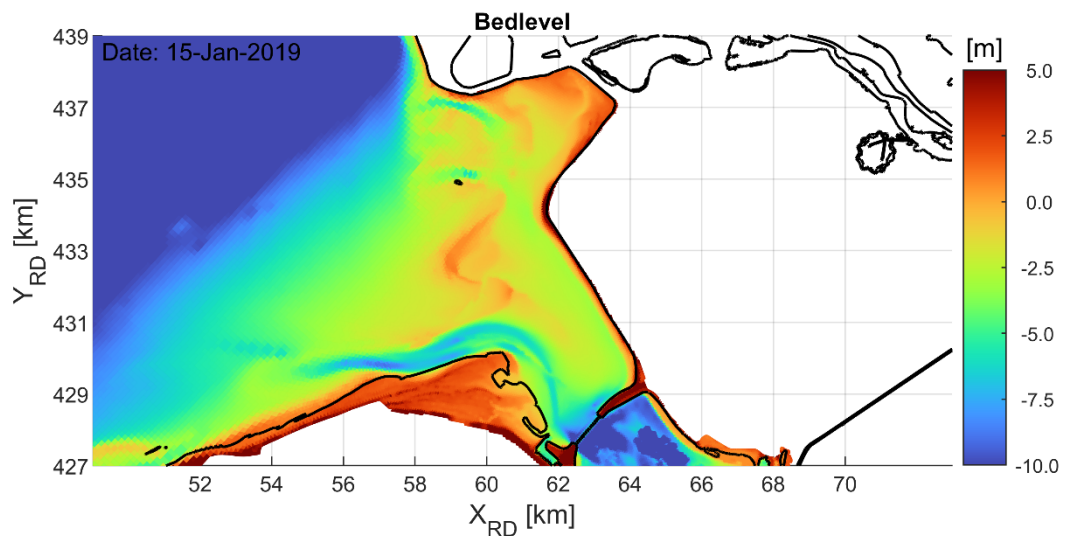


Figuur 6: Omgevingscondities voor de gehele analyseperiode. Links: waterstand Stellendam-buiten en Haringvliet 10; Rechts: totale debiet door de Haringvlietsluizen (hier weergegeven voor simulatie 1 met de kleinste afvoer) en (getij)stroomsterkte bij Haringvliet 10.



Figuur 7: Boven: waterstand (rood) en stroomsterkte (blauw) bij Haringvliet 10 (boven). Onder: totale debiet door de Haringvlietsluizen (behorend bij simulatie 1, met minimalen afvoer). Beide voor de periode gebruikt voor analyse van de ruimtelijke variatie in de zoetwatersverspreiding over het getij.

Figuur 8 geeft de bathymetrie weer van de Voordelta van het Haringvliet, met een diepe geul aan de zuidzijde (Slijkgat), een aanzienlijk minder diepe geul aan de noordzijde (Voormalig Rak van Scheelhoek) en een grote plaat in het midden (zie ook Figuur 1).

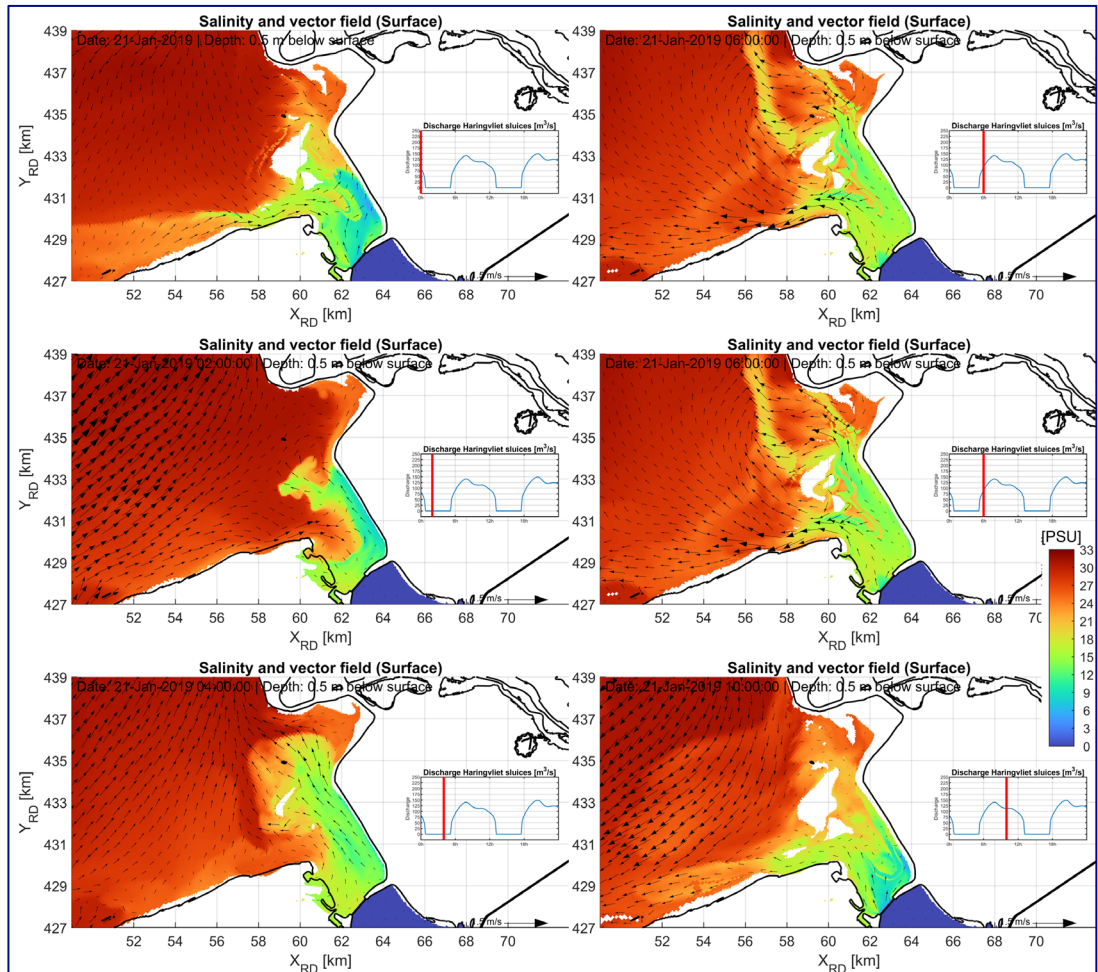


Figuur 8: Bathymetrie van de Voordelta van het Haringvliet.

3.2 Verloop zoetwatersverspreiding over het getij voor 3 spuicondities

3.2.1 Minimale spuifvoer

Figuur 9 toont resultaten voor het scenario met een minimaal spuidebiet (doorstroomoppervlak 25 m^2). De figuur toont de berekende saliniteit in de Voordelta nabij het wateroppervlak, samen met het stromingspatroon, voor verschillende momenten in het getij, zowel tijdens het spuien en gedurende gesloten sluisen.



Figuur 9: Saliniteit 0.5 m onder het wateroppervlak voor het scenario met minimale afvoer voor de periode 21 januari 2019 van 00:00 tot en met 10:00. De vectoren geven de snelheid weer van de stroming 0.5 m onder het wateroppervlak. De panelen hebben een 2 uur interval en beginnen aan het einde van de spuiperiode. Volgorde: linker kolom van boven naar beneden, dan rechterkolom van boven naar beneden.

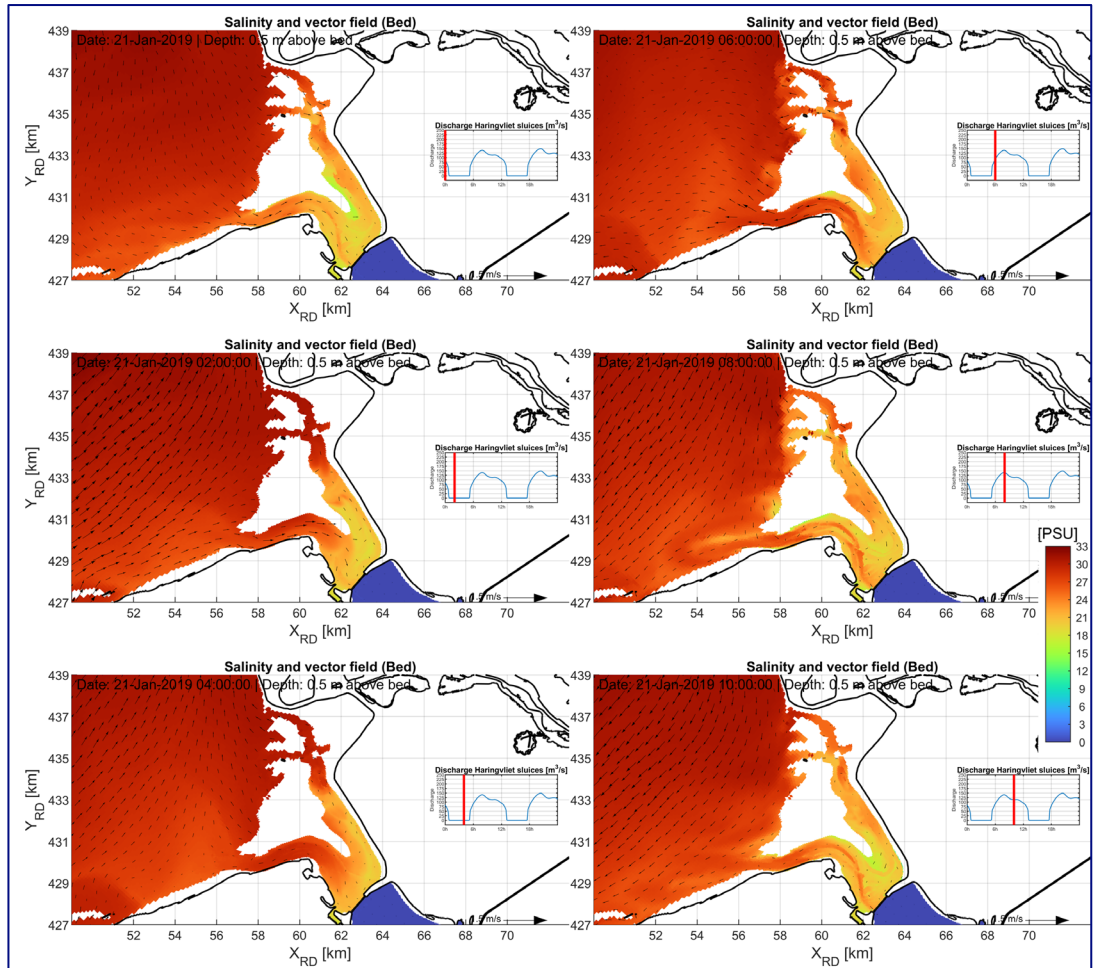
De figuur laat het volgende zien:

- Bij de kleine doorstroomopening en minimale spuidebeten van scenario 1 is, zelfs aan het einde van een spuiperiode (*paneel a, linksboven*), de Voordelta in de directe nabijheid van de Haringvlietssluisen niet volledig zoet. De saliniteit ter plaatse van de Haringvlietssluisen bedraagt dan ongeveer 7.5 PSU (ongeveer 4150 mg/l).
- Aan het einde van de spuiperiode (*paneel a, linksboven*), vindt instroom van relatief zout zeewater plaats door de zuidelijke geul. Op dat moment wordt relatief zoetwater afgevoerd door de noordelijke geul, het “voormalig rak van Scheelhoek”.
- Dit proces, instroom van zout water door zuidelijke geul en uitstroom van zoet water door noordelijke geul, is ook zichtbaar ongeveer 2 uur na het einde van de spuiperiode (*paneel b, linker kolom, middelste figuur*). Als gevolg van de zoute instroom is de Voordelta nabij het oppervlak zouter geworden.
- Aan het einde van de periode met gesloten sluisen (*paneel c, onderste linker figuur*), en het begin van de volgende spuiperiode (*paneel d, bovenste rechter figuur*), kentert de stroming op zee (van noordoostwaarts gericht naar zuidwestwaarts gericht). De Voordelta loopt op dat moment “leeg”, wat begint in de noordelijke geul.
- Gedurende de spuiperiode wordt de Voordelta geleidelijk aan minder zout (*paneel e, middelste rechter figuur, paneel f, onderste rechter figuur*). Het gespuide water wordt

afgevoerd, in eerste instantie door zowel de noordelijke als de zuidelijke geul, en later voornamelijk door de zuidelijke geul.

De berekende saliniteit in de Voordelta nabij de bodem wordt getoond in Figuur 10. In vergelijking met het oppervlak, Figuur 9, geldt dat:

- De patronen erg vergelijkbaar zijn, maar dat de saliniteit nabij de bodem hoger is.
- De instroom van zout water door de zuidelijke geul bij gesloten Haringvlietsluizen, duurt tot het einde van de periode met gesloten Haringvlietsluizen (*paneel c, linker kolom, onderste figuur*) terwijl nabij het wateroppervlak er geen instroom zichtbaar was aan het einde van de periode met gesloten sluisen.

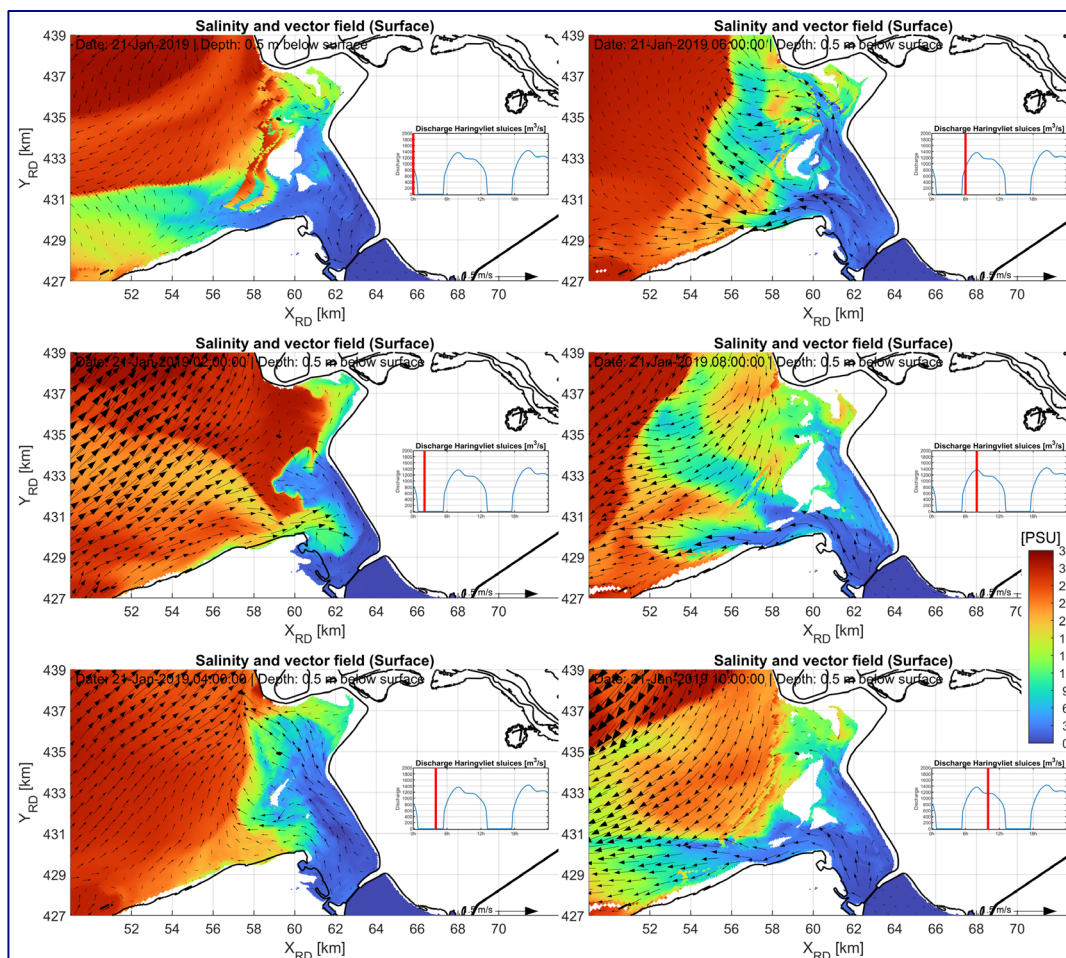


Figuur 10: Saliniteit 0.5 m boven de bodem voor het scenario met minimale afvoer voor de periode 21 januari 2019 van 00:00 tot en met 10:00. De vectoren geven de snelheid weer van de stroming nabij de bodem. De saliniteit is alleen weergegeven waar de diepte groter is dan 2 meter. De panelen hebben een 2 uur interval. Volgorde: linker kolom van boven naar beneden, dan rechterkolom van boven naar beneden.

In bijlage B zijn figuren opgenomen van saliniteit en stroming nabij het oppervlak waarin verder is ingezoomd op het deel van de Voordelta nabij de Haringvlietsluizen en andere schalen zijn gebruikt. Die figuren vertellen hetzelfde verhaal over de ontwikkeling in de tijd, maar geven de lezer aanvullende mogelijkheden om waarden voor de saliniteit nabij de sluisen af te lezen. Daarvoor zijn figuren opgenomen met schalen tot 20 en tot 10 PSU (respectievelijk ongeveer 11000 en 5500 mg/l). Zie ook weer bijlage C om waarden voor de saliniteit eenvoudig te vertalen in chlorideconcentratie en omgekeerd. In sectie 3.2.4 bespreken we kort een vergelijking van deze zoomplots voor de drie afvoerscenario's.

3.2.2 Piekafvoer Haringvlietsluizen van 1300 m³/s

Figuur 11 toont de berekende saliniteit in de Voordelta nabij het wateroppervlak samen met het stromingspatroon voor het scenario met piekspuifvoeren rond de 1300 m³/s. De transportpatronen zijn erg vergelijkbaar met de patronen zoals berekend voor de minimale afvoer door de Haringvlietsluizen.



Figuur 11: Saliniteit 0.5 m onder het wateroppervlak voor het scenario met piekafvoeren rond de 1300 m³/s, voor de periode 21 januari 2019 van 00:00 tot en met 10:00. De vectoren geven de snelheid weer van de stroming 0.5 m onder het wateroppervlak. De panelen hebben een 2 uur interval.

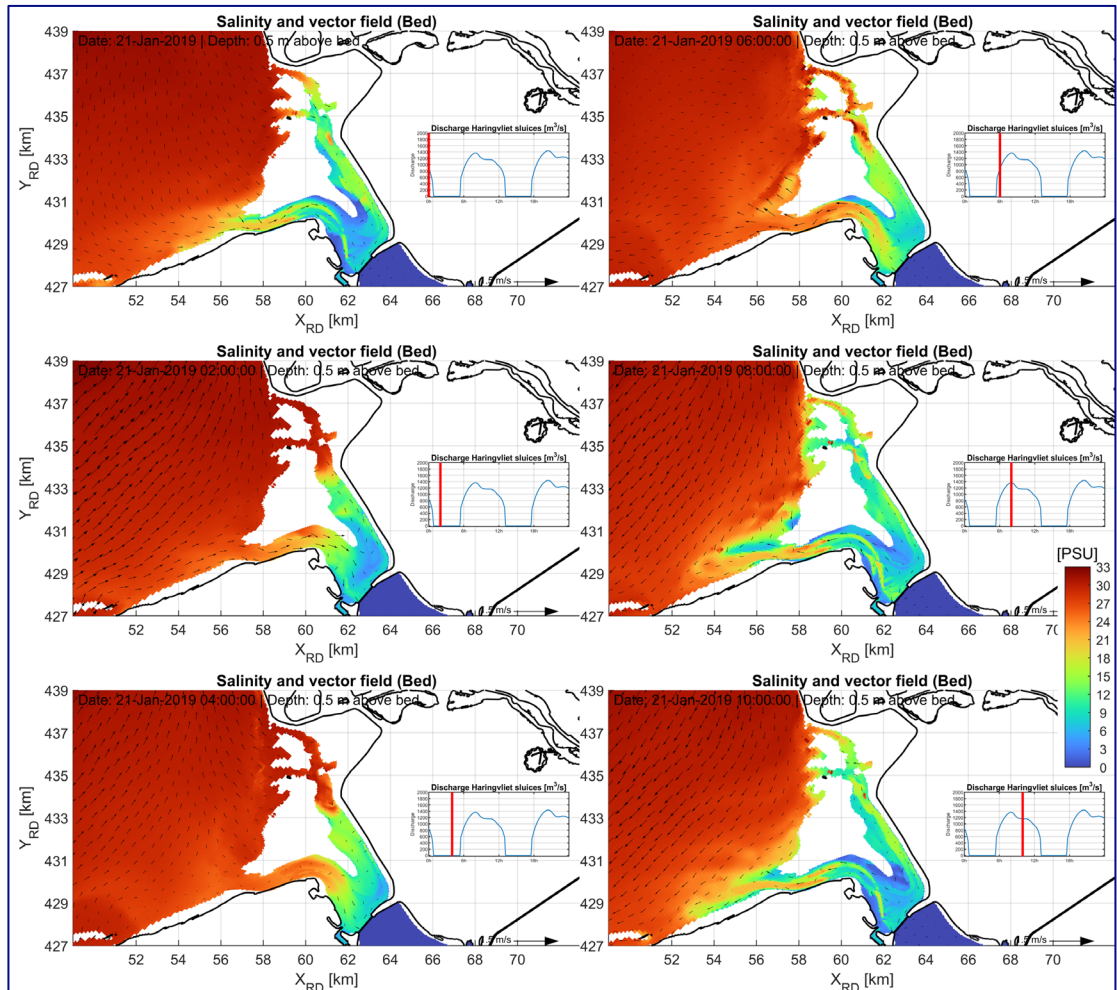
De figuur laat het volgende zien:

- Aan het einde spuiperiode (*paneel a, linksboven*) is het deel van de Voordelta nabij de Haringvlietsluizen aan het oppervlak zoet (< 2 PSU = 1100 mg/l). Op zee bevindt zich een zoetwaterpluim met een duidelijk front (de scherpe overgang tussen zoet en zout water aan de noordzijde van de zoetwaterpluim). Hoewel de getijstrooming nog zuidwestwaarts is gericht, stroomt de pluim aan het oppervlak naar het (noord)westen, waarschijnlijk aangedreven door de dichtheidsverschillen.
- In het eerste deel van de periode met gesloten sluizen (*paneel b, links midden*) neemt de vloedstroom de zoetwaterpluim mee in noordoostelijke richting en vindt er veel menging plaats. Ook stroomt er zoutwater de Voordelta in via de zuidelijke geul. Het zoete water wordt naar de noordoostzijde geduwd en er ontstaat een zeewaartse stroming van zoetwater door de noordelijke geul.
- Aan het einde van de vloedperiode (*paneel c, linksonder*), als de waterstand sterk aan het dalen is, stroomt de Voordelta leeg, m.n. via de noordzijde (of daar is tenminste de stroming sterker).

- Als vervolgens ook het spuien begint (*paneel d, rechtsboven*), neemt vooral de stroming in de zuidelijke geul toe.
- Tijdens het spuien (*paneel e, midden rechts*) neemt de stroming door noordelijke geul snel af. Dat kan komen doordat de waterstand daalt en daardoor de stroming in de geul tegengehouden wordt door de drempel aan de noordwest zijde van de geul. Het kan ook het afstoppend effect van de zuidwaartse ebstroming op zee zijn.
- Gedurende de tweede helft van de spuifase (*paneel f, rechtsonder*) is eigenlijk alleen via de zuidelijke geul sprake van zeewaartse stroming. Deze westwaartse uitstroming van zoetwater ontmoet de zoute, zuidwaarts gerichte getij-gedreven stroming op zee, wat een front tot gevolg heeft. Daarmee wordt weer min of meer uitgangspositie in paneel links boven bereikt.

Samenvattend, tijdens gesloten sluizen vindt instroom van zout zeewater plaats door de zuidelijke geul tot vlak voor het einde van de periode met gesloten sluizen. Tijdens de tweede helft van de periode met gesloten sluizen vindt met name door de noordelijke geul zeewaartse stroming plaats. Tijdens het spuien wordt het gespuide, zoete, rivierwater in eerste instantie afgevoerd door zowel de noordelijke als de zuidelijke geul, maar later gedurende de spuiperiode voornamelijk door de zuidelijke geul. Vanzelfsprekend is bij grotere spuidebieten de saliniteit nabij het oppervlak veel lager dan in geval van minimale hefhoogten en dus kleinere spuidebieten. Ter plaatse van het sluizencomplex is nabij het wateroppervlak het aanwezige water zoet rivierwater. Uitzondering is de tweede helft van de vloedperiode. Dan wordt een lichte verhoging van de saliniteit berekend.

Ook nabij de bodem, Figuur 12, wordt in essentie het zelfde transportpatroon gevonden als bij de minimale doorstroomoppervlakken. In vergelijking met de oppervlaktesaliniteit geldt wel dat, in de gehele Voordelta, de saliniteit veel hoger is. In bijna het gehele geplote domein is stratificatie aanwezig (of in ieder geval in de getoonde gebieden met een waterdiepte groter dan 2 m, uitgezonderd het meest zeewaartse deel van het domein). Dit geldt voor de gehele getijperiode, dus gedurende het spuien en in geval van gesloten sluizen. In de nabijheid van de sluizen varieert de bodemsaliniteit tussen de 10 PSU, aan het einde van een spuiperiode, en de 20 PSU, aan het einde van de periode met gesloten sluizen.



Figuur 12: Saliniteit nabij de bodem voor het scenario met piekafvoeren rond de $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ voor de periode 21 januari 2019 van 00:00 tot en met 10:00. De vectoren geven de snelheid weer van de stroming nabij de bodem. De saliniteit is alleen weergegeven waar de diepte groter is dan 2 meter. De panelen hebben een 2 uur interval.

3.2.3 Piekfvoer Haringvlietsluizen van $3300 \text{ m}^3/\text{s}$

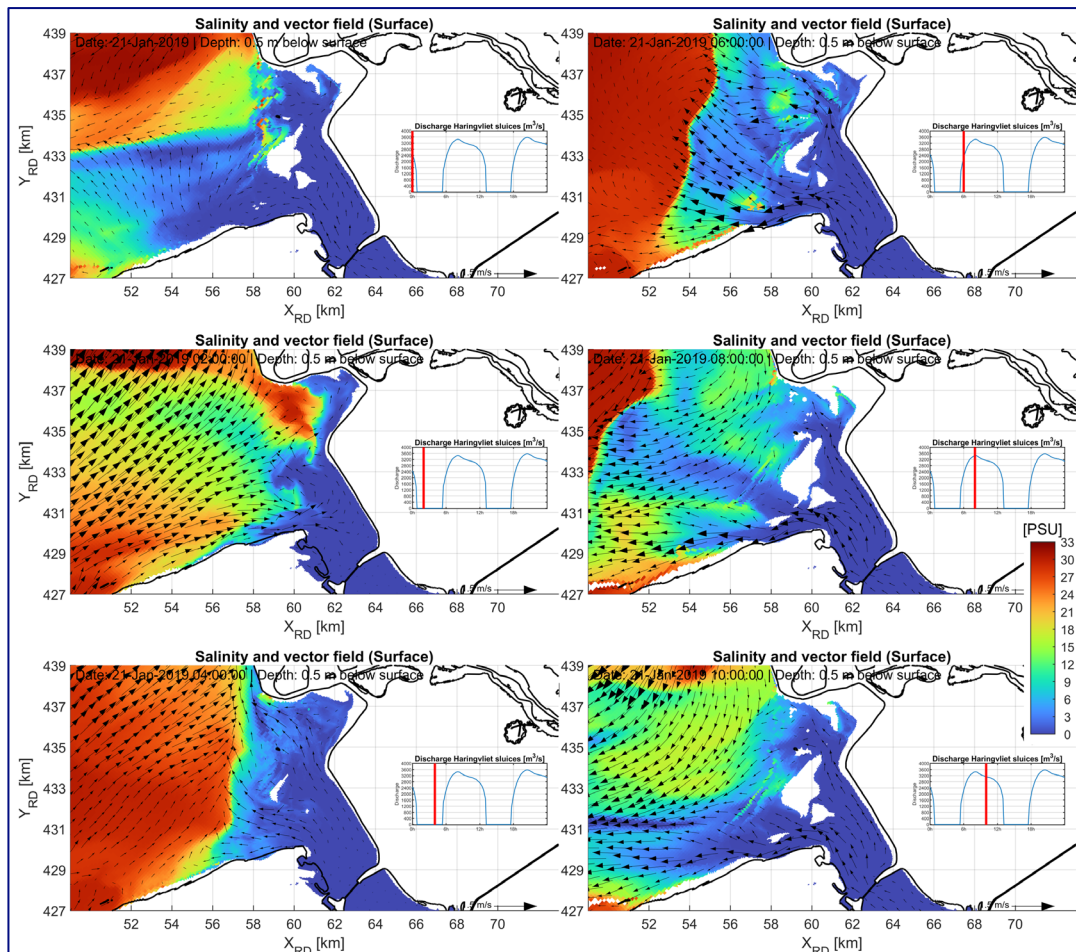
De oppervlakte en bodemsaliniteit en stroomsnelheden behorend bij een piekfvoer van $3300 \text{ m}^3/\text{s}$ worden getoond in respectievelijk Figuur 13 en Figuur 14. Deze figuren laten het volgende zien:

- Aan het einde spuiperiode (*paneel a, linksboven*) is de Haringvlietmonding, zowel nabij het wateroppervlak als bij de bodem, volledig zoet als gevolg van de grote spuihoeveelheden. Op zee bevindt zich een zoetwaterpluim met een sterk front (zichtbaar zowel aan het oppervlak als nabij de bodem, en het gevolg van botsende watermassa's). Zelfs als de getijstroming op zee nog zuidwestwaarts is gericht, stroomt de zoetwaterpluim aan het oppervlak al naar het noordwesten (zie bv coördinaat 54, 433).
- Aan het begin van de vloedperiode, met gesloten sluisen (*paneel b, links midden*) neemt de getijstroming op zee de zoetwatermassa met zich mee en vindt er veel menging plaats. Tegelijk begint er door de zuidelijke geul water richting de Haringvlietsluizen te stromen. Door de getijstroming wordt het zoete water in de Voordelta tegen de noordelijke begrenzing van Voordelta, Maasvlakte II, aangeduwd. Er ontstaat enige uitstroming via de noordelijke geul.
- Aan het einde van de vloedperiode met gesloten sluisen (*paneel c, linksonder*), en het begin van de spuiperiode (*paneel d, rechtsboven*) daalt de waterstand en vindt er

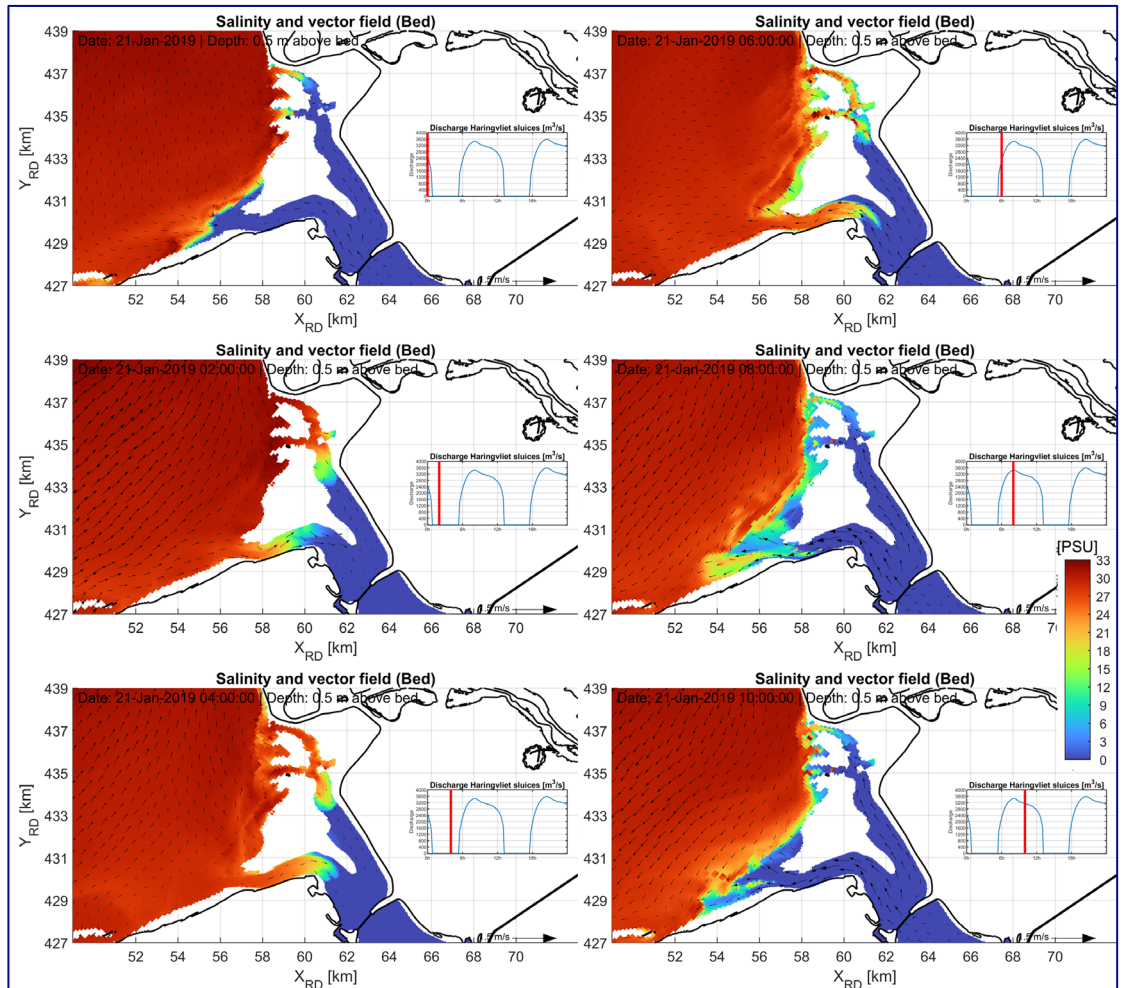
uitstroom plaats van eerder gespuid zoet water. In eerste instantie vindt de zeewaartse stroming voornamelijk plaats via de noordelijke geul, later door zowel de noordelijke als de zuidelijke geul. Door de westwaartse afvoer van zeer zoet water, ontstaat ook in dit scenario een front dat zich van zuidwest naar noordoost over de Voordelta uitstrekt.

- Tijdens de spuiperiode (*paneel e, rechts midden; paneel f, rechtsonder*) vindt op den duur de afvoer voornamelijk plaats via de zuidelijke geul.

Samenvattend, voor deze afvoer door de sluisen geldt dat zoutindringing door de zuidelijke geul tijdens de periode met gesloten sluisen niet voldoende is, ook niet nabij de bodem, om het sluisencomplex te bereiken. Zowel nabij het oppervlak als nabij de bodem is de Voordelta zo goed als zoet en gevuld met rivierwater.



Figuur 13: Saliniteit 0.5 m onder het wateroppervlak voor een maximum spuidebiet van 3300 m³/s, voor de periode 21 januari 2019 van 00:00 tot en met 10:00. De vectoren geven de snelheid weer. De panelen hebben een 2 uur interval.



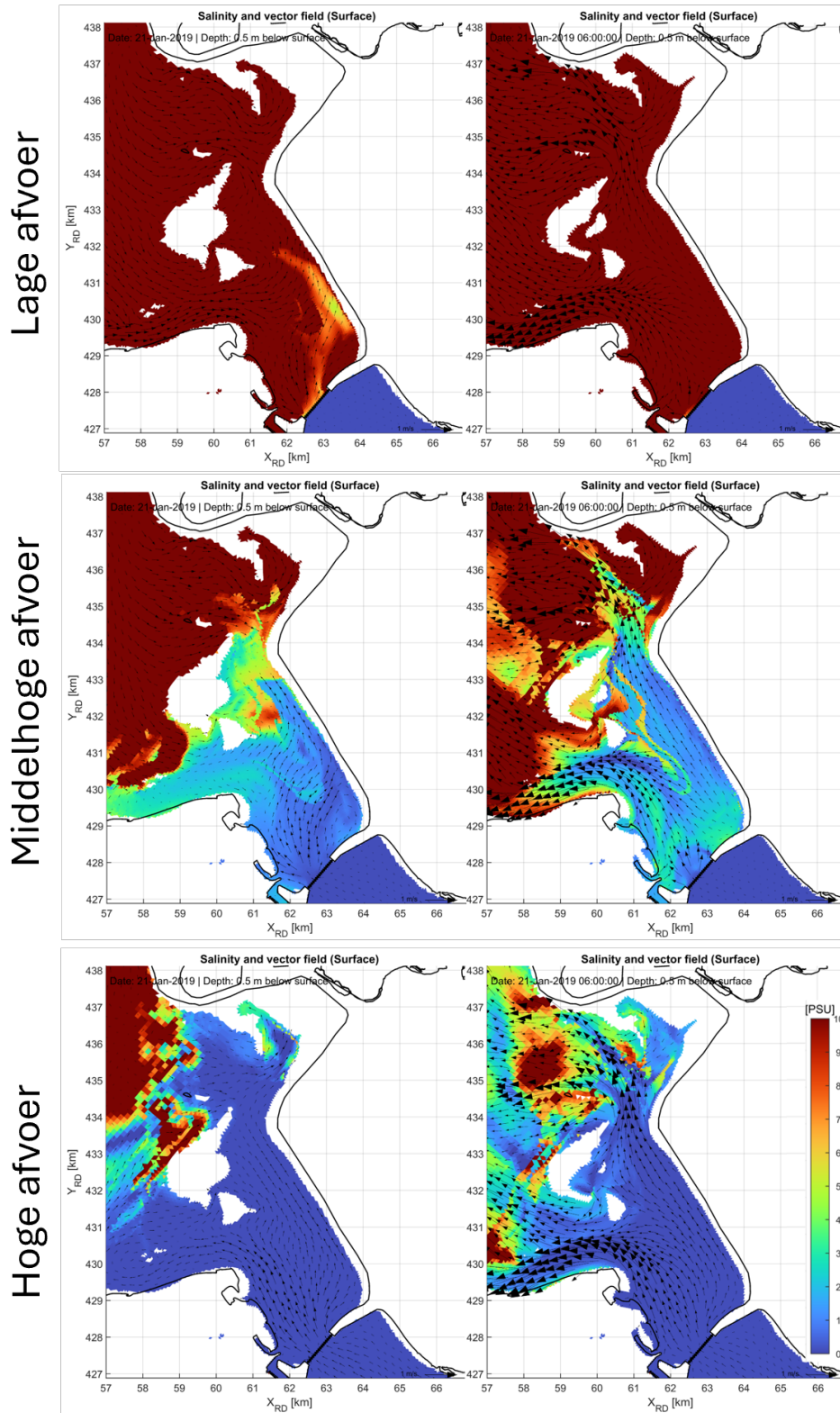
Figuur 14: Saliniteit 0.5 m boven de bodem voor een maximum spuidebiet rond de 3300 m³/s, voor de periode 21 januari 2019 van 00:00 tot en met 10:00. De vectoren geven de snelheid weer. De saliniteit is alleen weergegeven waar de diepte groter is dan 2 meter. De panelen hebben een 2 uur interval.

3.2.4 Situatie nabij sluisen aan begin en einde spuiperiode

Merk nogmaals op dat in bijlage B figuren zijn opgenomen van saliniteit en stroming nabij het oppervlak waarin verder is ingezoomd op het deel van de Voordelta nabij de Haringvlietssluisen en waarin andere schalen zijn gebruikt om zo de lezer aanvullende mogelijkheden te geven om waarden voor de saliniteit nabij de sluisen af te lezen. In Figuur 15 zijn de resultaten voor de drie scenario's op het moment net voor het einde van een spuiperiode en net na het begin van de volgende spuiperiode onder elkaar gezet. Dit zijn naar verwachting momenten in de buurt van de meest zoete en minst zoete situatie in de directe nabijheid van de Haringvlietssluisen.

Hierin zien we dat voor deze spuiperiode voor het lage afvoerscenario alleen in een heel klein gedeelte tussen de sluisen en de noordoostoever de saliniteit aan het oppervlak lager is dan 9.0 PSU, ongeveer 5000 mg/l, de waarde in Tabel 1 die min of meer de bovengrens aangeeft voor matig brakwatersoorten. Voor het middelhoge afvoerscenario liggen de waarden aan het oppervlak duidelijk onder deze grens in het hele deel van de Voordelta ten oosten van de ondiepte. In een aanzienlijk deel van dit gebied (daar waar het duidelijk blauw is) liggen de waarden ook onder de 1.8 PSU, ongeveer 1000 mg/l, de waarde in Tabel 1 die min of meer de bovengrens aangeeft voor zoetwatersoorten. Voor het hoge afvoerscenario liggen de waarden aan het oppervlak en ten oosten van de ondiepte nagenoeg allemaal ruim onder deze laatste grens. Dit ter verdere interpretatie en beoordeling door experts ecologie.

Einde spuiperiode Begin spuiperiode



Figuur 15: Saliniteit nabij de Haringvlietsluizen 0.5 m onder het wateroppervlak net voor het einde van een spuiperiode (linker kolom) en net na het begin van de volgende spuiperiode (rechterkolom) voor het lage, middelhoge en hoge afvoerscenario (respectievelijk bovenste, middelste en onderste rij). Periode 21 januari 2019 00:00 (links) en 06:00 uur (rechts). De vectoren geven de snelheid weer van de stroming -0.5 m onder het wateroppervlak. De figuren zijn geplot met een schaal lopend tot 10 PSU (ongeveer 5500 mg/l).

Merk overigens op dat in de directe nabijheid van de sluisen in het middelhoge afvoerscenario de beginnende spuistroom zich veel sterker aan het oppervlakte manifesteert dan in het hoge afvoerscenario, terwijl het debiet daarvoor veel groter is. Waarschijnlijk is dit omdat in het eerste geval het omgevingswater een hogere saliniteit heeft dan het spuiwater, waardoor het gespuide water snel omhoogkomt naar het oppervlakte en daar verder (half rondom) uitstroomt.

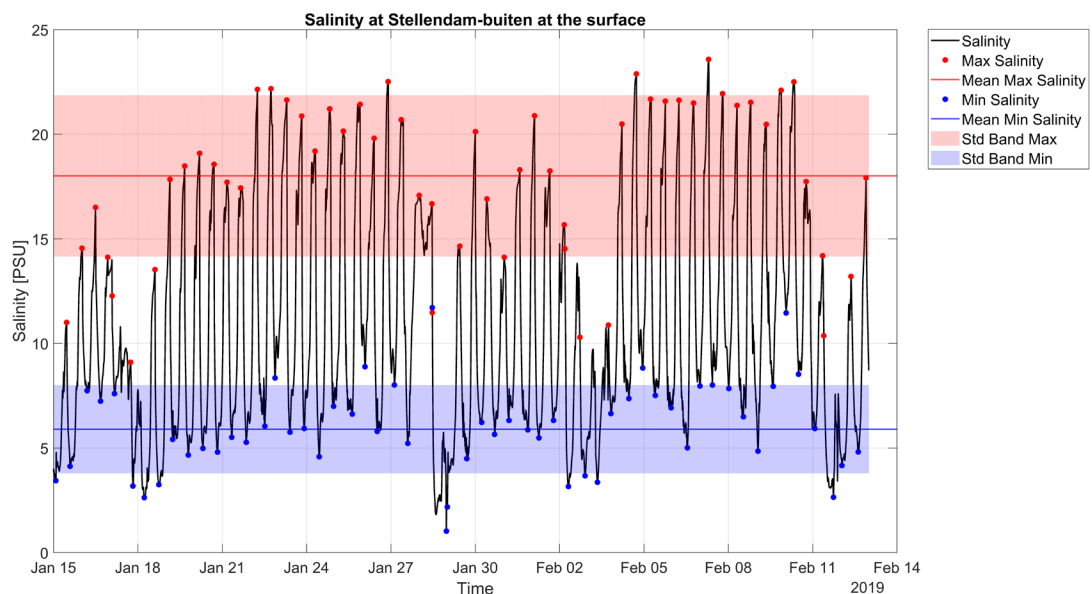
3.3 Variatie ten gevolge van wind

3.3.1 Voor scenario met minimale spuifvoer

Om een goed beeld te krijgen van de variatie in de saliniteit ten gevolgen van de wind wordt over elke getij in de analyseperiode voor het hele modeldomein bepaald wat het maximale en minimale zoutgehalte in die getijperiode was. Dit levert dus per spuiperiode een ruimtelijk beeld op van maximale en minimale zoutgehaltes. De analyseperiode van 15 januari tot 13 februari 2019 beslaat 56 getijden/spuiperiodes. Vervolgens worden zowel voor de maximale als de minimale zoutgehaltes een gemiddelde en standaarddeviatie bepaald over de hele analyseperiode. Zo verkrijgen we een ruimtelijk beeld van 'het gemiddelde maximale zoutgehalte' en de variatie in dat maximale zoutgehalte, en hetzelfde voor het minimale zoutgehalte. In deze studie passen we deze analyse toe aan het oppervlak. Voordat we dat doen op ruimtelijke informatie van de saliniteit, passen we de analyse ter illustratie toe op tijdserie-resultaten voor Stellendam-buiten.

3.3.1.1 Variatie minima en maxima bij Stellendam-buiten (tijdserie)

Figuur 16 toont een tijdserie van de saliniteit bij Stellendam-buiten voor het scenario met minimale spuifvoer. Daaruit zijn de minimale en maximale saliniteit per getijperiode bepaald, gemarkeerd met respectievelijk rode en blauwe cirkels. Zowel van die maxima als de minima is vervolgens het gemiddelde en de standaarddeviatie bepaald, aangegeven met respectievelijk een lijn en een bandbreedte.



Figuur 16: Saliniteit (zwarte lijn) aan het oppervlak op het station Stellendam-buiten voor de gehele analyseperiode voor het scenario met het minimale debiet. De rode cirkels zijn de maxima van elke spuiperiode, de blauwe cirkels de minima van elke spuiperiode. De rode lijn is het gemiddelde van de maxima, de blauwe lijn het gemiddelde van de minima. De rode band is de standaarddeviatie boven en onder het gemiddelde van de maxima, de blauwe band is de standaarddeviatie boven en onder het gemiddelde van de minima.

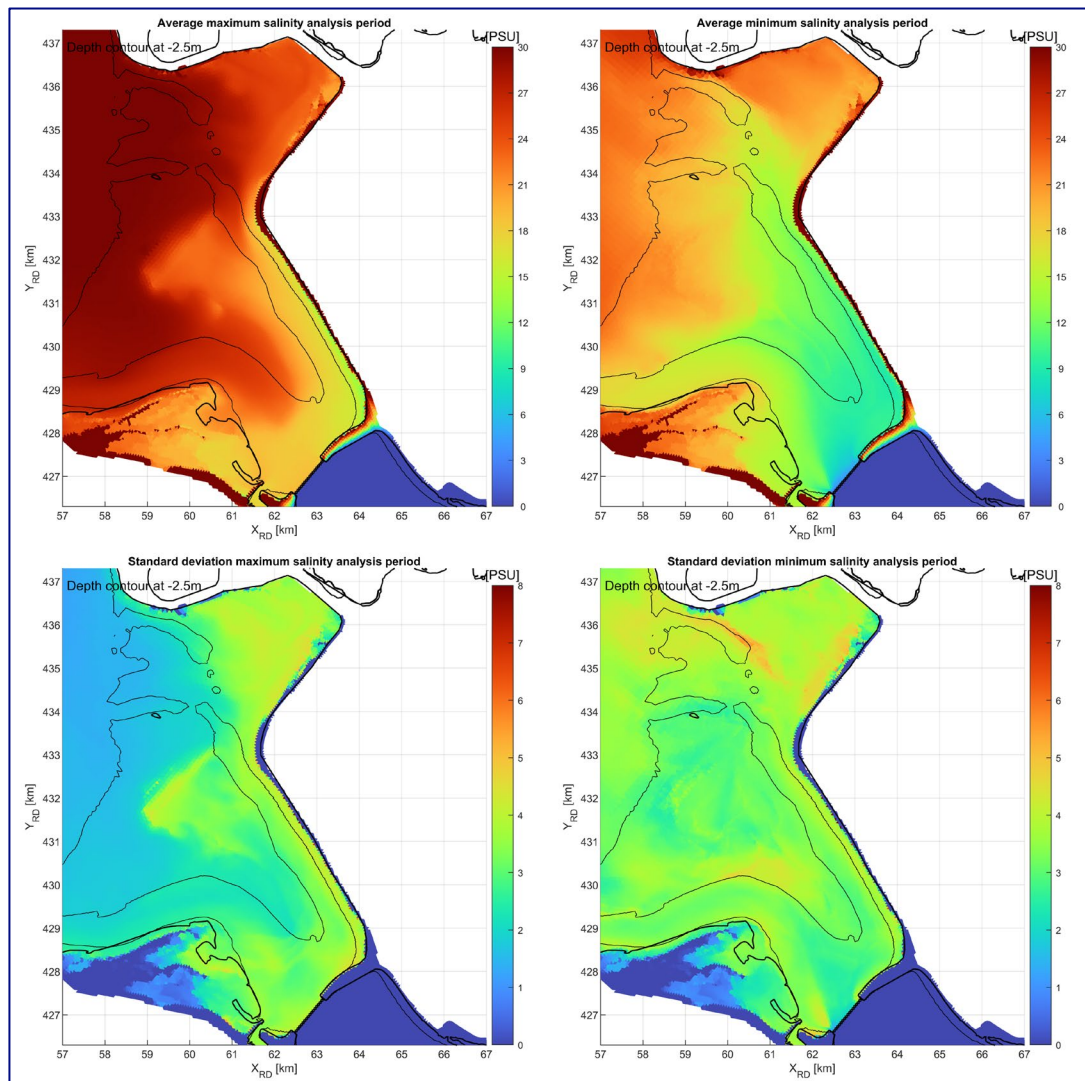
Het gemiddelde van de maxima is 18.7 PSU met een standaarddeviatie van 3.7 PSU. Voor de minima is het gemiddelde 5.9 PSU met een standaarddeviatie van 2.3 PSU. De minimale saliniteit bij Stellendam-buiten varieert een stuk minder dan de maximale saliniteit.

De figuur voor Stellendam-buiten dient hier vooral ter illustratie van de methode die hierna wordt toegepast op ruimtelijke resultaten. Maar om het mogelijk te maken de resultaten voor Stellendam-buiten in meer detail te bestuderen, zijn in bijlage D en E ook resultaten opgenomen voor 2 en 5 m diepte en maxima en minima voor de andere spuiscenario's.

3.3.1.2 Variatie minimale en maximale saliniteit in de Voordelta

Figuur 17 toont het gemiddelde voor zowel de getij-maximale als de getij-minimale saliniteit, in combinatie met de standaardafwijking voor beide. Het betreft hier maxima en minima nabij het wateroppervlak. Aangezien binnen het scenario de afvoeren per spuiperiode erg vergelijkbaar zijn, is de variatie hoofdzakelijk een gevolg van wind, die wel varieert. Er is ook nog sprake van een springtij-doodtij variatie, maar uit de verkenning van de afhankelijkheden met de Machine Learning tool (Kranenburg en Kovacs) is gebleken dat die aanzienlijk minder invloed heeft dan de wind.

Voor het scenario met minimale doorstroomopening geldt dat de maximale saliniteit over de ruimte varieert tussen de saliniteit van zeewater, ongeveer 33 PSU, tot ongeveer 20 PSU in de directe nabijheid van het sluizencomplex. Er komt – bij een 'gemiddeld getij' dus water bij de sluizen dat op het moment van maximale saliniteit voor zo'n 2/3 uit zeewater bestaat. De minimale saliniteit varieert tussen 20 PSU op het westelijk deel van de ondiepte en 5 PSU in de directe nabijheid van de sluizen. Het effect van wind, weergegeven door de standaarddeviatie van de maxima en minima, bedraagt ongeveer 3 PSU, zowel voor de maxima als voor de minima. De grootste variatie in maxima, en dus het grootste windeffect, treedt op in de directe nabijheid van het sluizencomplex en in de zowel de noordelijke als zuidelijke geul. Op zee en in het westelijk deel van de ondiepte tussen beide geulen is de variatie het kleinst. Dat betekent dat in dit scenario met lage spuidebieten eventueel aanwezig zoet water gedurende elk getij weer bijna volledig wordt vervangen door zout zeewater, ongeacht de windcondities. Voor de variatie in minima geldt dat de variatie het kleinst is in de nabijheid van de Haringvlietssluzen. De variatie is het grootst in het oostelijke deel van de ondiepte (en nabij de Maasvlakte). Dat betekent dat wind veel invloed heeft op hoeveel van het gespuide zoetwater in dat gebied terecht komt.



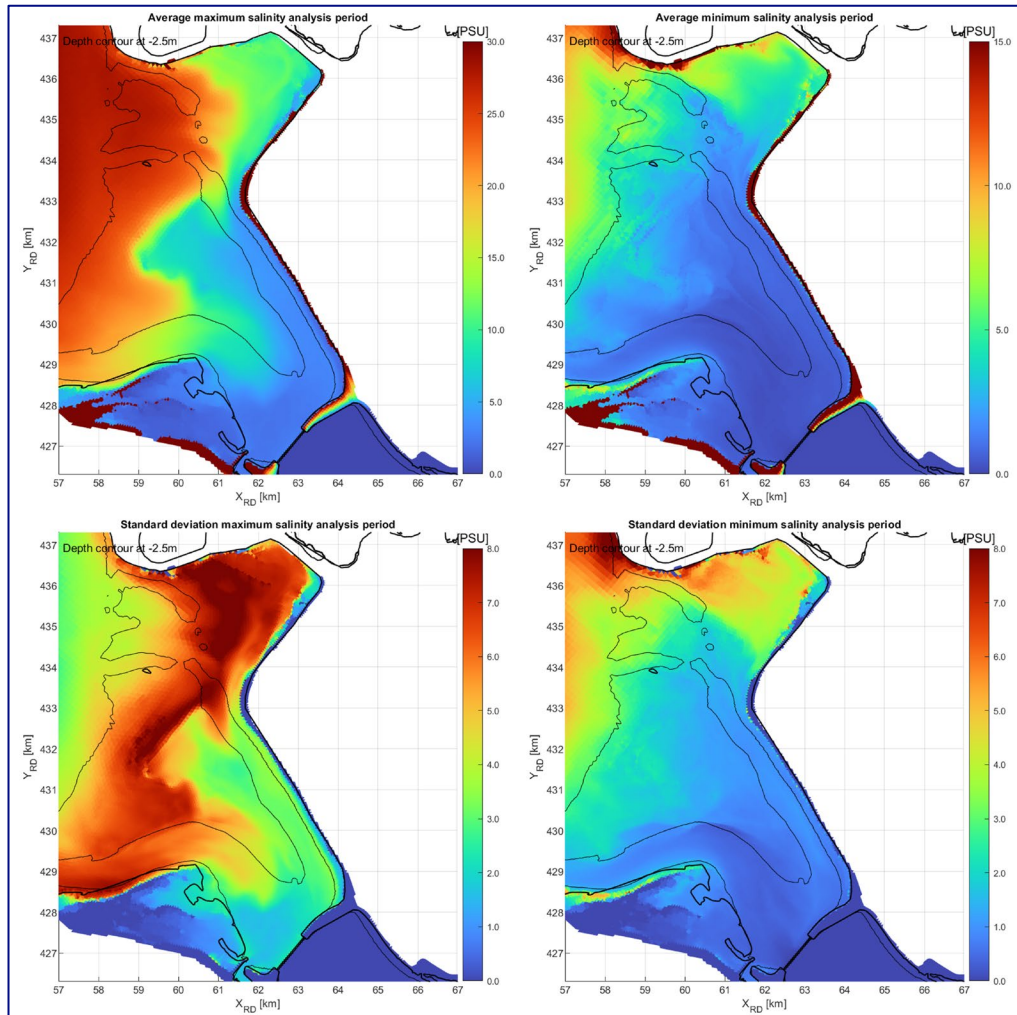
Figuur 17: Voor minimale doorstroomopening: Het gemiddelde (bovenste rij) van de maximale (linker kolom) en minimale (rechter kolom) saliniteit aan het wateroppervlak over een getijperiode en de standaarddeviatie hiervan (onderste rij). Deze resultaten zijn gemaakt over de gehele analyse-periode van 15 januari 2019 tot 13 februari 2019 (56 getijperiodes). De zwarte dunne lijnen geven de diepte op -2.5 m ten opzichte van het wateroppervlak weer.

3.3.2

Voor scenario met een piekafvoer van 1300 m³/s

Grotere spuidebieten, met een piek afvoer van 1300 m³/s, hebben logischerwijs tot gevolg dat de Voordelta veel zoeter wordt, zie Figuur 18. De maxima nabij het wateroppervlak variëren tussen de 30 PSU op zee en 3 PSU in de nabijheid van het sluiscomplex met daartussen een geleidelijke overgang. De minima (panel rechtsboven) variëren tussen 8 PSU op zee net ten westen van de ondiepte en ongeveer 0.3 PSU, volledig zoet rivierwater, in de nabijheid van het sluiscomplex. Het effect van wind is dat de variatie in maxima, de standaardafwijking, ongeveer 2 – 8 PSU bedraagt waarbij de kleinste variatie optreedt in de nabijheid van het sluiscomplex. Bij dit spuiscenario blijft het water aan het oppervlakte dus nabij de sluisen voor alle windcondities in de analyseperiode het hele getij permanent redelijk zoet tot matig brak (zeg 3+/-2 PSU). Maar de variatie onder invloed van wind kan toch gemakkelijk leiden tot een factor drie tot vijf verschil in het maximale zoutgehalte (een range van zeg 1 tot 5 PSU) afhankelijk van de wind. Merk overigens op dat het hier scenario's betreft waarin niet gekierd wordt, en dat eventuele invloed daarvan op het maximum dus niet is meegenomen. De grootste (absolute) variatie in de maximale saliniteit is te vinden in een

relatief nauwe band van noord naar zuid, van de Slikken van Voorne naast de Maasvlakte II, tot het Slijkgat. Deze band laat zien: het hangt in dit gebied van de windcondities af in hoe sterke mate het zeewater het zoete water verdringt bij binnendringen van het getij. De standaardafwijking van de minima varieert tussen de 4 ten westen van de ondiepte en 0 PSU nabij het sluisencomplex. Een piekafvoer van 1300 m³/s heeft dus tot gevolg dat bij een spuiactie, het water aan het oppervlak nabij de sluisen volledig zoetgespoeld wordt, ongeacht de windconditie.

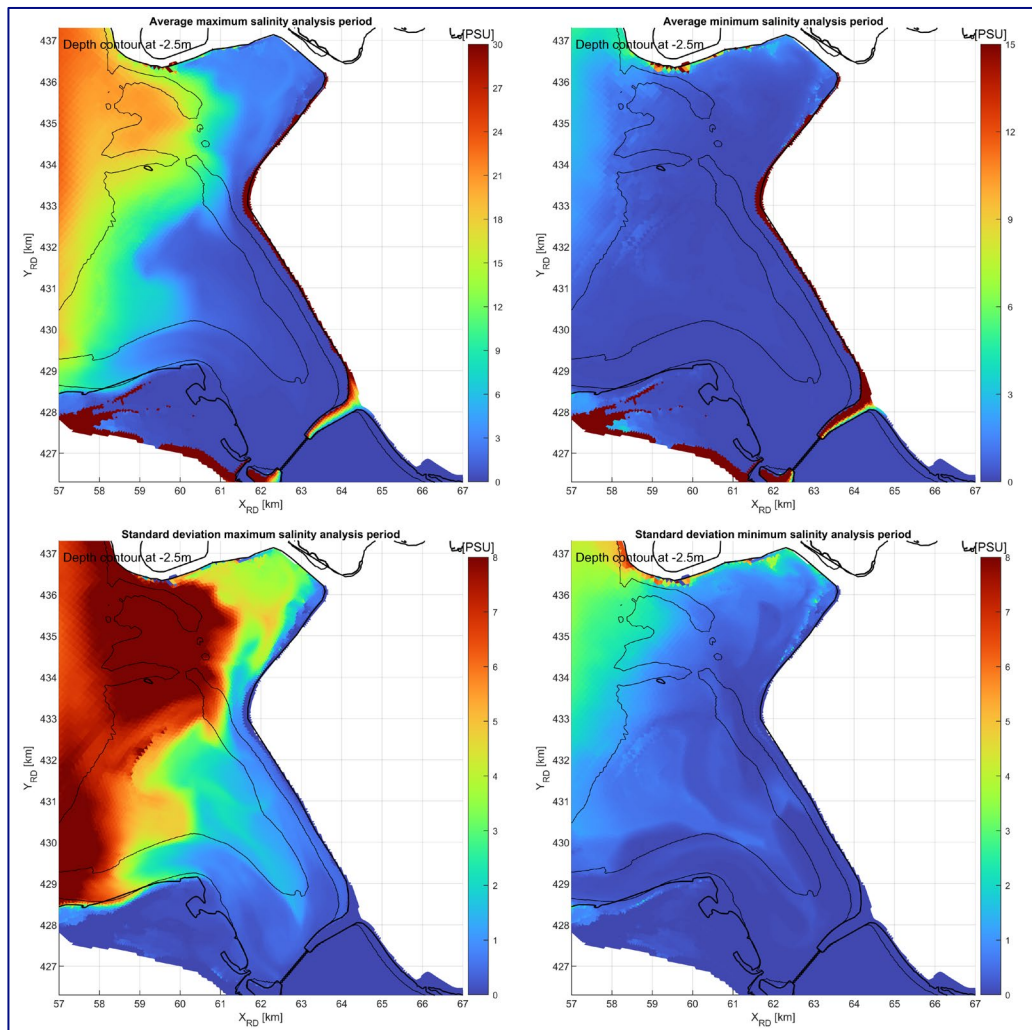


Figuur 18: Piekafvoer van 1300 m³/s: Het gemiddelde (bovenste rij) van de maximale (linker kolom) en minimale (rechter kolom) saliniteit aan het wateroppervlak over een getijperiode en de standaarddeviatie hiervan (onderste rij). Deze resultaten zijn gemaakt over de gehele analyse periode van 15 januari 2019 tot 13 februari 2019 (56 Getijperioden). De zwarte dunne lijnen geven de diepte op -2.5 m ten opzichte van het wateroppervlak weer. (NB: schaal voor gemiddelde minimale saliniteit is in deze en volgende figuren verschillend van vorige).

3.3.3 Voor scenario met een piekafvoer van 3300 m³/s

Een nog grotere piekafvoer, 3300 m³/s (Figuur 19), heeft nog meer zoet water in de Voordelta tot gevolg. Nabij de sluisen is zowel de minimale als de maximale saliniteit gelijk aan die van (bijna) zoet water. Blijkens de standaard deviatie variëren de waarden ook nauwelijks. Dit betekent dat in dit scenario voor het gebied nabij de sluisen geldt dat het water aan het oppervlak permanent zoet is, ongeacht de windcondities of de fase van het getij. Tot aan de westrand van de ondiepte is de gemiddelde minimale saliniteit onder de 1.5 PSU en is ook de variatie klein. Dat betekent dat elk getij een moment bereikt wordt waarop

dit hele gebied nagenoeg zoet is. In het westelijke deel van de geulen en ter plaatse van de ondiepte tussen beide geulen is de maximale saliniteit aan het wateroppervlakte zo'n 12 PSU, maar dit kan wel flink variëren onder invloed van wind.



Figuur 19: Piekafvoer van $3300 \text{ m}^3/\text{s}$: Het gemiddelde van de maximale en minimale saliniteit aan het wateroppervlak over een getijperiode en de standaarddeviatie hiervan. Deze resultaten zijn gemaakt over de gehele analyse periode van 15 januari 2019 tot 13 februari 2019 (56 Getijperioden). De zwarte dunne lijnen geven de diepte op -2.5 m ten opzichte van het wateroppervlak weer.

4 Discussie

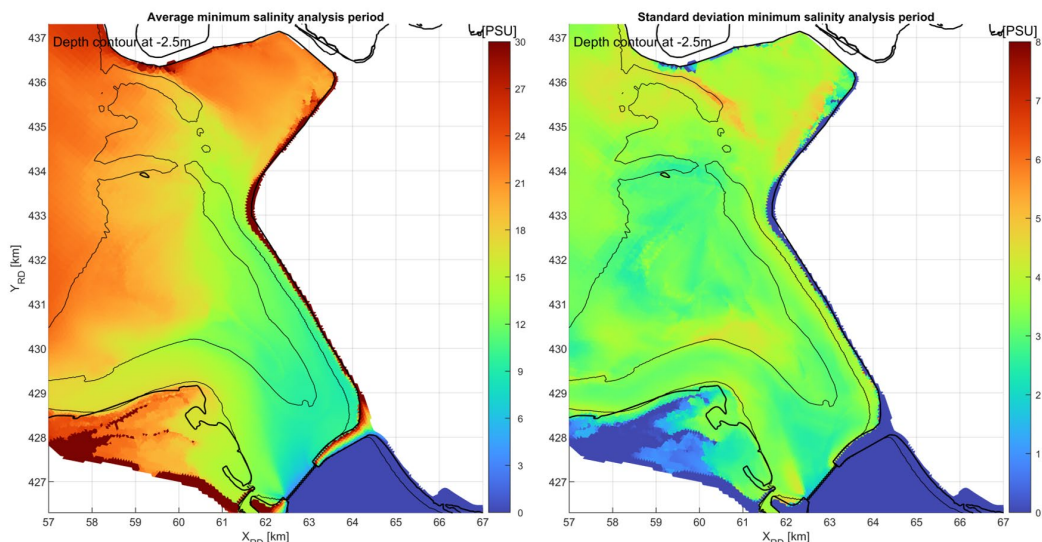
4.1 Verbinding met bedienvarianten

In de 'Variantenstudie' (Hydrologic, 2024) is voor een aantal mogelijke varianten in de regels voor de bediening van de Haringvlietsluizen onderzocht wat voor verschillen dit op zou leveren voor de kier-open tijden. Vervolgens is in het ecologie-spoor onderzocht wat dit zou betekenen voor vismigratie. Daarbij zijn de volgende varianten onderzocht:

- Variant 1 - "Inlaatbeheer": hierbij wordt zodanig gekierd dat de hoeveelheid zout in de diepe putten en geulen zo beperkt blijft dat eventuele nalevering van zout water uit de diepe delen van het Haringvliet naar de bovenlaag geen ongewenste effecten oplevert voor de zoetwaterinnamepunten. In deze variant wordt bij lage rivierafvoeren niet gespuid door de Haringvlietsluizen.
- Variant 2a – "Inlaatbeheer met gericht doorspoelen": in deze variant wordt ermee gerekend dat er ook in perioden van lage afvoer een getijgemiddeld debiet van 100 m³/s kan worden ingezet om de bovenlaag van het Haringvliet door te spoelen wanneer verhoogde chlorideconcentraties optreden als gevolg van nalevering. Het achter de hand hebben van deze maatregel geeft ruimte om vaker of met een grotere opening te kieren.
- Variant 2b – "Inlaatbeheer met permanent doorspoelen": in deze variant wordt ermee gerekend dat elke spuiperiode minimaal 100 m³/s getijgemiddeld wordt gespuid, waardoor ook elke getijperiode enige vloedopening wordt geboden.

Met het oog op ecologie is een vraag voor Rijkswaterstaat wat er bij deze varianten voor verschillen op zouden kunnen treden in de zoetwatersverspreiding in de Voordelta. De belangrijkste parameters voor de zoetwatersverspreiding in de Voordelta zijn de spuidebieten door de Haringvlietsluizen en de wind. De bedienvarianten verschillen onderling niet of nauwelijks in de hoeveelheid water die gespuid wordt bij middelhoge en hoge rivierafvoeren. Het voornaamste verschil treedt vooral op bij lage rivierafvoeren (Lobith afvoer < 1100 m³/s), waarbij in variant 2a incidenteel en in variant 2b elke getijperiode gespuid wordt met een gemiddelde afvoer van 100 m³/s, terwijl er in variant 1 niet gespuid wordt.

Vanuit de praktijk is bekend dat als er gedurende een langere periode niet gespuid wordt, de Voordelta vrij snel zal verziltten tot het zoutgehalte op zee. Dat is dus wat er gebeurt bij variant 1 en lage rivierafvoeren. Variant 2b is redelijk vergelijkbaar met het scenario voor minimale spuifvoer in deze studie. Daarin is het getijgemiddelde spuidebiet ongeveer 75 m³/s. Om het verschil tussen variant 1 en variant 2b voor de Voordelta in te schatten, kunnen we dus kijken naar hoe de saliniteit voor het lage afvoerscenario verschilt van die van zeewater. Het meest relevant zijn dan natuurlijk de minima. Om die reden zijn gemiddelde en standaarddeviatie daarvan nog een keer afgebeeld in Figuur 20. Dit laat zien dat door het spuien met een debiet van getijgemiddeld zo'n 75 m³/s de saliniteit, gemiddeld genomen, in een getijcyclus in de directe nabijheid van de sluisen daalt tot zo'n 5 PSU en in de noordelijke geul tot zo'n 10 PSU. Ook het oostelijk deel van de ondiepte en de zuidelijke geul ervaren een duidelijke invloed van dit beperkte spuivolume, waardoor de minimale saliniteit in een getijcyclus daar daalt tot tussen de 15 en 20 PSU. Daarbij is wel met name de zoetwaterinvloed op het oostelijk deel van de ondiepte afhankelijk van de wind (daar is de standaard deviatie het grootst). Kortgezegd: zelfs de bescheiden afvoer van getijgemiddeld 75 m³/s zorgt in een deel van de Voordelta voor minima in de saliniteit die flink lager zijn dan de saliniteit van zeewater, die in het gebied gevonden wordt als er langere tijd niet wordt gespuid. Mogelijk is dit van betekenis in de inschatting en afweging van de natuurwaarde van Kieren met variant 1 versus 2b, ter beoordeling in het ecologie-spoor.



Figuur 20: De gemiddelde minimale saliniteit over een getijperiode (links) en de standaarddeviatie hiervan (rechts), beide aan het wateroppervlak, voor het scenario met een spui-doorstroomopening van 25 m^2 (getijgemiddeld debiet van ongeveer $75 \text{ m}^3/\text{s}$).

4.2 Beperkingen van deze studie

Het is van belang om bij de interpretatie van de resultaten van deze studie rekening te houden met een aantal aannames, keuzes en beperkingen in de aanpak van deze studie. We noemen in het bijzonder:

- De *(un)steadiness* van de afvoersituatie (I). Binnen de simulaties wordt elke spuiperiode gespuid met dezelfde opening. Vanwege de variatie van de waterstand op zee door windopzet en afwaaiing, levert dit een zekere range aan spuidebieten op. Als we 'variatie door wind' onderzoeken, zit daar dus niet alleen het effect van wind op de stroming in de Voordelta in, maar ook enig effect van de wind op het spuidebiet zelf. Het tweede effect dempt het eerste effect: aanlandige wind zorgt ervoor dat de zoetwaterpluim zich minder goed kan verspreiden, en dus dat de saliniteit nabij de sluizen laag blijft; aanlandige wind zorgt ook voor opzet, die bij gelijke doorstroomopening zorgt voor een afname van het debiet en daarmee een minder lage saliniteit. Deze effecten zouden verder uit elkaar getrokken kunnen worden door tijdseries te genereren voor de doorlaatopeningen die voor elke spuiperiode echt tot eenzelfde debiet leiden. Dat was bij de uitvoering van deze studie niet mogelijk.
- De *(un)steadiness* van de afvoersituatie (II): In de praktijk zal bij veranderende bovenstroomse rivierafvoeren het spuidebiet veranderen, en kan het zijn dat de situatie in de Voordelta na een spuiactie met een zeker debiet nog beïnvloed wordt door de voorgaande spuiactie met een mogelijk veel groter of kleiner debiet. Anderzijds: deze aanpassing verloopt best snel, waardoor dit het gebruik van deze resultaten als richtinggevend niet in de weg staat.
- De beperkte lengte van de analyseperiode. Om de variatie onder invloed van wind zichtbaar te maken, hebben we gezocht naar een periode met variaties in zowel de sterkte als de richting van de wind. Maar de lengte van de analyseperiode is nog steeds beperkt (28 dagen) en de windvariatie maar beperkt representatief (vrij veel noordwestenwind). Gebruik van een langere simulatie- en analyseperiode zou tot

meer robuuste resultaten leiden voor gemiddelde en standaarddeviatie van minimale en maximale saliniteit.

- Het effect van het Kieren zelf: In deze studie is een mogelijk effect van debieten vanuit de Voordelta naar het Haringvliet tijdens Kieren niet beschouwd en ook niet aanwezig in de simulaties. De prioriteit ging in deze studie uit naar het effect van het spuidebiet en variatie in wind. Het effect van het Kieren zelf werd eerder klein geacht, vooral vanwege de overweging dat deze debieten een ordegrrootte kleiner zijn dan de spuidebieten. Maar als deze volumes groter zijn/worden, wordt het belangrijker het effect van de instroom apart te onderzoeken. Dit is waarschijnlijk vooral van belang voor het middelhoge afvoerscenario. Daarvoor is de nu gevonden maximale saliniteit nabij de sluis zo'n 3 ± 2 PSU. Dit zou kunnen veranderen als zout water uit de zuidelijke geul door Kieren naar de sluisen wordt getrokken.
- Onnauwkeurigheden en onzekerheden in het gebruikte model, zie Kaaij (2024b). In de validatie is gevonden dat het model de saliniteit in de Voordelta onderschatte ten opzichte van de metingen, maar dat het model qua stratificatie en ruimtelijke verdeling het gedrag laat zien dat ook in de metingen zichtbaar is. Op grond daarvan is de inschatting dat het model goed gebruikt kan worden om patronen in kaart te brengen en *verschillen* te onderzoeken voor variaties in debiet en wind. Tegelijk moet bij het gebruik van de (absolute) getalsmatige uitkomsten uit het model rekening gehouden worden met een onderschatting van de saliniteit en een onzekerheid in de modelresultaten.
- Gebruik van de huidige bathymetrie. Het model voorspelt zoutgehaltes op grond van stromingspatronen die in grote mate bepaald worden door de morfologie van de Voordelta. De morfologie is aan verandering onderhevig. Zo is de noordelijke geul geleidelijk aan het dichtslibben. De gevonden zoutgehaltes zijn dus van toepassing op de huidige situatie, maar kunnen in de toekomst veranderen met veranderende bodemgeometrie.

De belangrijkste consequentie van de aannames, keuzes en beperking in de aanpak is dat kwantitatieve resultaten van deze studie voor bijvoorbeeld de minima en maxima niet als strikte en absolute waarden moeten worden geïnterpreteerd. De waarde van de studie ligt vooral in het in beeld brengen van de patronen van zoetwatersverspreiding over de tijd en in de ruimte en de verschillen daarin voor lage, middelhoge en hoge debieten, en het verschaffen van een ruimtelijk beeld van de minimale en maximale saliniteit over een getij voor de verschillende afvoerscenario's en de variatie daarin onder invloed van wind.

4.3 Ideeën

Momenteel wordt alle windinvloed samengevat in een ruimtelijk beeld van de standaarddeviatie voor de minimale en maximale saliniteit. Uit de berekeningsresultaten kunnen waarschijnlijk ook lessen getrokken worden over de specifieke invloed van specifieke windcondities. Deze informatie is immers aanwezig in de modelresultaten. De specifieke invloed zou wellicht zichtbaar gemaakt kunnen worden door voor een aantal locaties windroos-achtige figuren te maken van de wind-invloed. Hierbij worden voor elk getij stippen geplaatst op een hoek-afstand coördinaat, waarbij de windrichting tijdens het betreffende getij de hoek bepaalt en de windsterkte de afstand vanuit het midden. Vervolgens wordt met de kleur van de stippen aangegeven of en hoeveel het maximale of minimale zoutgehalte tijdens dat getij afwijkt van het gemiddelde maximum of minimum. Specifieke locaties zouden kunnen zijn: een locatie in de noordelijke geul, de zuidelijke geul, het westen en het oosten van de ondiepte en natuurlijk Stellendam-buiten. Ook zou de specifieke windinvloed wellicht nader zichtbaar gemaakt kunnen worden door het onderzoeken van fluxen door een doorsnede over de zuidelijke geul, de ondiepte en de noordelijke geul en het correleren hiervan aan de windsterkte haaks op de kust.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Deze studie heeft voor een laag, middelhoog en hoog spuidebieten ruimtelijk in beeld gebracht hoe het zoetwater zich over de loop van het getij beweegt en verspreidt over de Voordelta. Daarnaast geeft deze studie voor de verschillende spuiscenario's een ruimtelijk beeld van de minimale en maximale saliniteit over het getij, en de variatie daarin ten gevolge van wind.

De belangrijkste bevindingen over de waterbeweging over de loop van het getij zijn:

- Bij aanvang van het spuien wordt aan het oppervlak in eerste instantie zoetwater afgevoerd naar/door de noordelijke geul, snel gevolgd door een toenemende afvoer door de zuidelijke geul. Enige tijd (orde 1-2 uur) later vindt nagenoeg de hele afvoer plaats via de zuidelijke geul.
- Tijdens de vloed op zee (hoogwaterfase) vindt instroom van water vanuit zee plaats door voornamelijk de zuidelijke geul. Deze instroming gaat door tot vlak voor het einde van de hoogwaterfase. Aan de bodem betreft dit een zoutwaterinstroom, aan het oppervlak kan de stroming richting de Haringvlietsluizen een stuk zoeter zijn, afhankelijk van het voorafgaande spuidebiet.
- De instroom vanuit zee via de zuidelijke geul duwt het in de Voordelta aanwezige zoete water tegen de noordoostelijke oever. Tijdens de tweede helft van de hoogwaterfase (dichte sluizen) resulteert dit in afvoer van relatief zoetwater door de noordelijke geul.

Gevonden verschillen tussen de drie debietscenario's zijn:

- De zoetwaterafvoer leidt tot stratificatie, waarbij de stratificatie in het oostelijke deel van de Voordelta en de geulen (over de gehele getijperiode) het grootst is voor het middelhoge debietscenario. Voor het hoge afvoerscenario wordt ook het water aan de bodem zo zoet dat er in dat gebied nauwelijks meer sprake is van stratificatie.
- Bij de middelhoge en hoge afvoer leidt de afvoer van zoetwater via de zuidelijke geul aan het einde van de ebperiode tot de formatie van een front. Dit front gaat zich al voor de eb-vloed omkering van de stroming op zee in noordwestelijke richting verplaatsen onder invloed van het dichtheidsverschil. Zodra de vloed op gang komt, gaat die de beweging dicteren en treedt er veel menging van zoet en zout water op.
- Bij het hoge spuidebiet (piekspuidebiet van 3300 m³/s) kan de zoutindringing via de zuidelijke geul het sluizencomplex niet bereiken en is het water in de oostelijke delen van de geulen en de ondiepte zowel aan het oppervlak als aan de bodem nagenoeg volledig zoet.

Over de minimale en maximale saliniteit aan het wateroppervlakte en de variatie daarin ten gevolge van de wind is gevonden:

- Voor het lage afvoerscenario is de minimale saliniteit aan het oppervlak nabij de sluizen ongeveer 5 PSU en het maximum ongeveer 20 PSU. Het effect van wind, weergegeven door de standaarddeviatie van de maxima en minima, bedraagt ongeveer 3 PSU, zowel voor de maxima als voor de minima.
- Voor het middelhoge afvoerscenario is de minimale saliniteit van het water aan het oppervlak en nabij de sluizen nagenoeg die van zoetwater. Ook de maximale saliniteit is vrij zoet, zo'n 3 PSU, met een standaard deviatie van zo'n 2 PSU. Dit betekent dat de invloed van de wind kan leiden tot een factor drie tot vijf verschil in maximale zoutgehaltes.

- Bij het hoge afvoerscenario zijn nabij de sluisen zowel minimale als maximale saliniteit gelijk aan die van zoetwater en is ook de standaard deviatie ter indicatie van de invloed van wind zeer gering: Het (oppervlakte)water nabij de sluisen is in dit scenario altijd nagenoeg zoet is, ongeacht de windcondities. Pas in het meest westelijke deel van de ondiepte en de geulen neemt de maximale saliniteit en de variatie daarin serieus toe (12 ± 7 PSU). Dat is dus het gebied waar het zeer afhangt van de wind of er veel of weinig zoetwater terecht komt.

Voor de reikwijdte van de zoetwaterpluim aan het oppervlak, betekenen de resultaten ongeveer het volgende:

- Voor het hoge afvoerscenario strekt de 2 PSU zoetwaterpluim (ongeveer 1100 mg/l) zich nagenoeg permanent uit tot voorbij de lijn punt Voorne tot noordpunt Kwade Hoek (knik in zuidelijke geul).
- Voor het middelhoge afvoerscenario is er eigenlijk geen pluim aanwezig waarvoor geldt dat de saliniteit permanent lager is dan 2 PSU. Wel is het zo dat als de 2 PSU zoetwaterpluim z'n maximale grootte bereikt (moment van minimale saliniteit) het gebied punt Voorne – punt Kwade Hoek daar binnen ligt.
- In het lage afvoerscenario is geen sprake van een zoetwaterpluim met een saliniteit kleiner dan 2 PSU. Wel is er een gebied waar bijna altijd invloed van de zoetwaterafvoer is op te merken. Dat is vooral het gebied direct voor de sluisen en tegen de oever van Voorne.

5.2 Aanbevelingen

Onze belangrijkste aanbeveling is om verdere stappen te zetten in de interpretatie van de resultaten. Wat betekenen deze resultaten voor de ecologische baten van het Kieren en varianten daarin? Hoe kan rekening gehouden worden met de gevonden spreidingen bij de vervolgstappen op weg naar een bedienprotocol? Wat betekenen de beperkingen van de aanpak precies voor de resultaten? (Kunnen we inschatten hoe anders ze zouden uitvallen als de gebruikte aannames en beperkingen niet aanwezig zou zijn?) Hoe verhouden deze resultaten zich precies tot de resultaten in de 'Verkenning Dynamiek Voordelta Haringvliet' en de 'Afhankelijkheden Chlorideconcentratie Voordelta'. In deze studie van zeer beperkte omvang was maar zeer beperkt gelegenheid op bovenstaande zaken in te gaan.

Wat de beperkingen betreft, is het wellicht het belangrijkste om bij een eventuele vervolgstap te onderzoeken wat de invloed is van het Kieren zelf op de zoetwaterspreiding en instroom van zoutwater in de Voordelta. Ook verdient het aanbeveling langere reeksen te onderzoeken (bijvoorbeeld een heel kierseizoen) voor het ontwikkelen van meer robuuste statistiek over de wind-gerelateerde variatie.

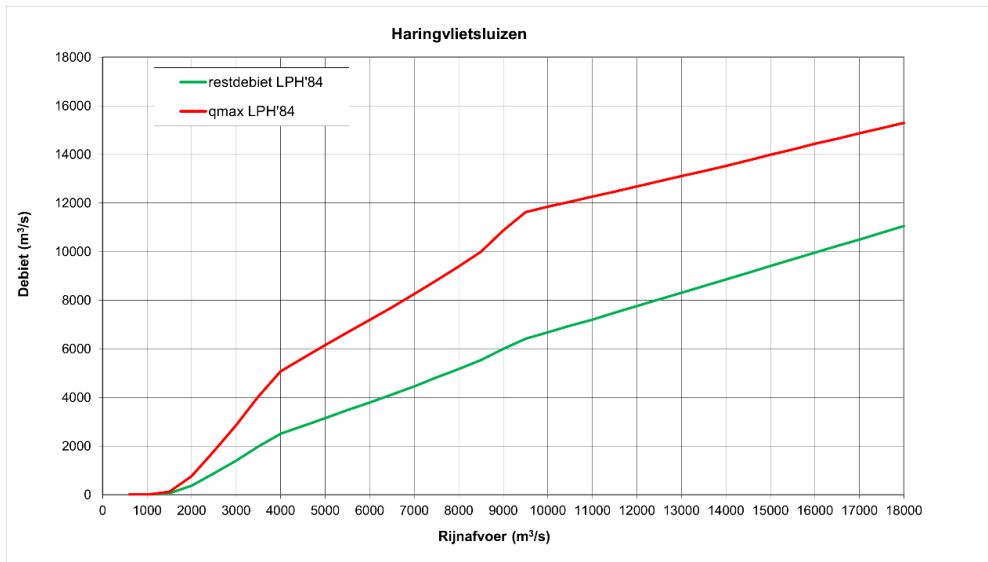
Verder valt er waarschijnlijk nog veel te leren van een nadere bestudering van de resultaten voor de windinvloed. Nu wordt alle windinvloed samengevat in een ruimtelijk beeld van de standaarddeviatie voor de minimale en maximale saliniteit. Uit de berekeningsresultaten kunnen waarschijnlijk ook lessen getrokken worden over de specifieke invloed van specifieke windcondities, bijvoorbeeld middels de windroos van invloed voor relevante locaties. Zie ideeën daarvoor in de discussie-sectie.

6 Referenties

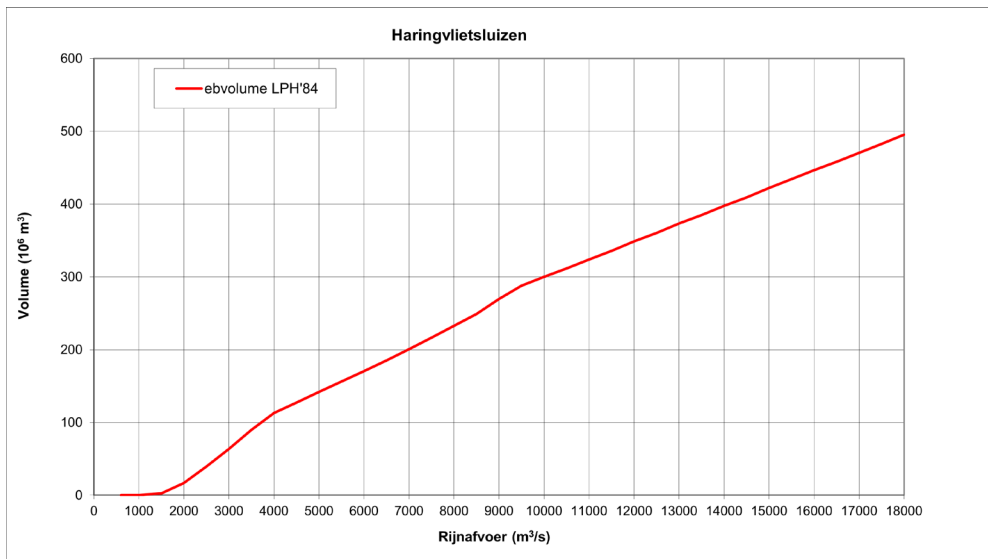
- Hydrologic (2024). Eindrapport Variantenstudie: Inzichten uit het Onderzoeksprogramma Verzilting. Rapport P1284, Hydrologic, Amersfoort.
- Kaaij, T. v. (2024a). *Ontwikkeling en eerste resultaten D-HYDRO model Voordelta en Haringvliet*. Delft: Deltares.
- Kaaij, T. v. (2024b). *Varende metingen Voordelta Haringvliet 2019; Vergelijking met berekeningsresultaten*. Delft: Deltares.
- Kranenburg, W.M., Jaksic, L. en Leummens, L. (2024). *Verkenning Dynamiek Voordelta Haringvliet*. Rapport project 11210363-004, pp 72, Deltares, Delft.
- Kranenburg, W.M. en Kovacs, F.F.M.C.J. (2024). *Memo Afhankelijkheden Chlorideconcentratie Voordelta*. Memo project 11210363-004, pp 16, Deltares, Delft.
- Steenman, Y. (2024). *Machine Learning Zoutgehalte Voordelta Haringvliet: Een Machine Learning Tool voor het voorspellen van het zoutgehalte in de Voordelta van het Haringvliet*. Rapport 2186/001/B/YSte, pp 27, Svašek, Rotterdam, Juli 2024.
- Talstra, H. en Steenman, Y. (2024). *Herkomst en Bewerking Data ten behoeve van 90-jarige reeks*. Memo 2186/006/A/HTAL, pp 3, Svašek, Rotterdam, Augustus 2024.

A. Appendix: Relatie spuidebiet, spuivolume en Rijnafvoer

De sturing van de Haringvlietsluizen voor spuien is voornamelijk gebaseerd op de Rijnafvoer. De instantane debieten door de Haringvlietsluizen geïntegreerd over de spuiperiode leiden tot een cumulatief spuidebiet, ofwel spuivolume. Hiermee zijn er min of meer vast relaties tussen de Rijnafvoer, het maximum debiet gedurende een spuiperiode, het spuidebiet en het restdebiet (de gemiddelde afvoer over een gehele getijperiode). Deze relaties zijn weergegeven in Figuur A-1 en Figuur A-2 voor bedienprotocol LPH'84.

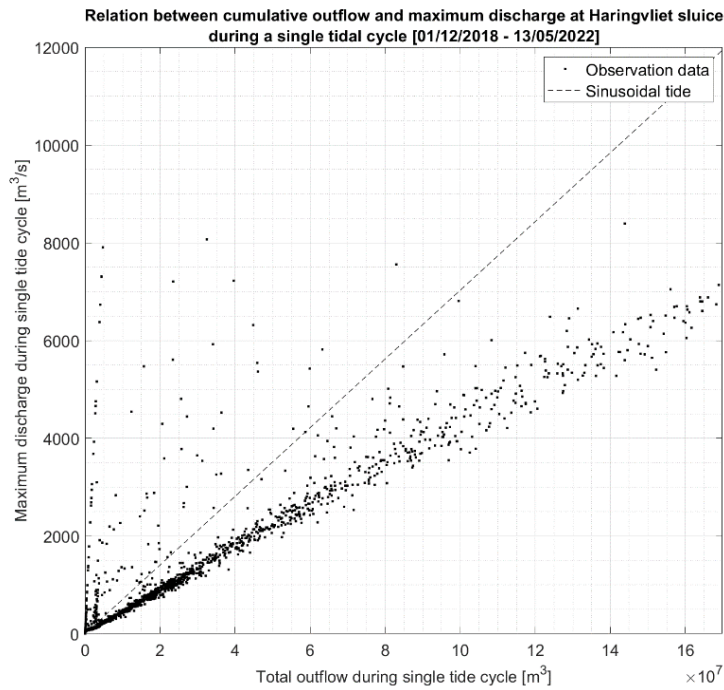


Figuur A-1: Piekdebiet (rood) en restdebiet (groen) als functie van de Rijnafvoer voor LPH'84. Het restdebiet is de gemiddelde afvoer over een gehele getijperiode. Herkomst: Getijgrootheden.xlsx, Sacha de Goederen.

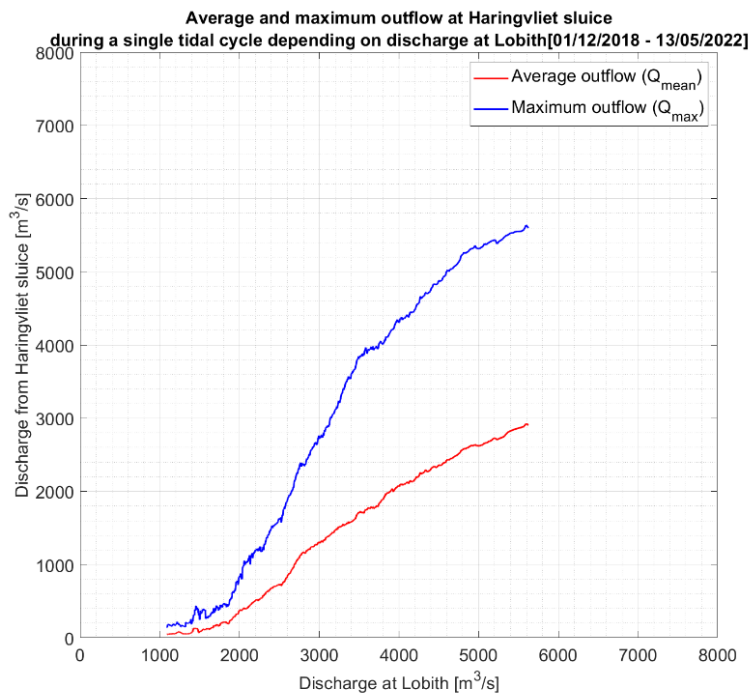


Figuur A-2: Ebvolume als functie van de Rijnafvoer voor LPH'84. Herkomst: Getijgrootheden.xlsx, Sacha de Goederen.

In Figuur A-3 en Figuur A-4 zijn relaties geplot op grond van de data gebruikt in de studie ‘Verkenning Dynamiek Voordelta Haringvliet’, hoofdstuk 5. Deze kunnen gebruikt worden om piekafvoeren door de Haringvlietsluizen eenvoudig om te zetten in spuivolumes en/of gemiddelde afvoeren over een getij.

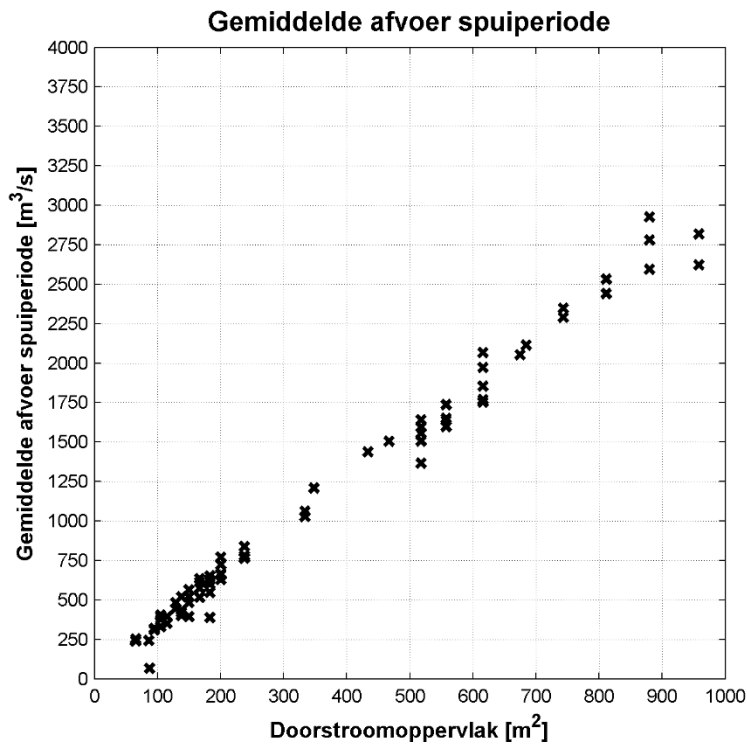


Figuur A-3: Relatie piekafvoer en spuivolume.

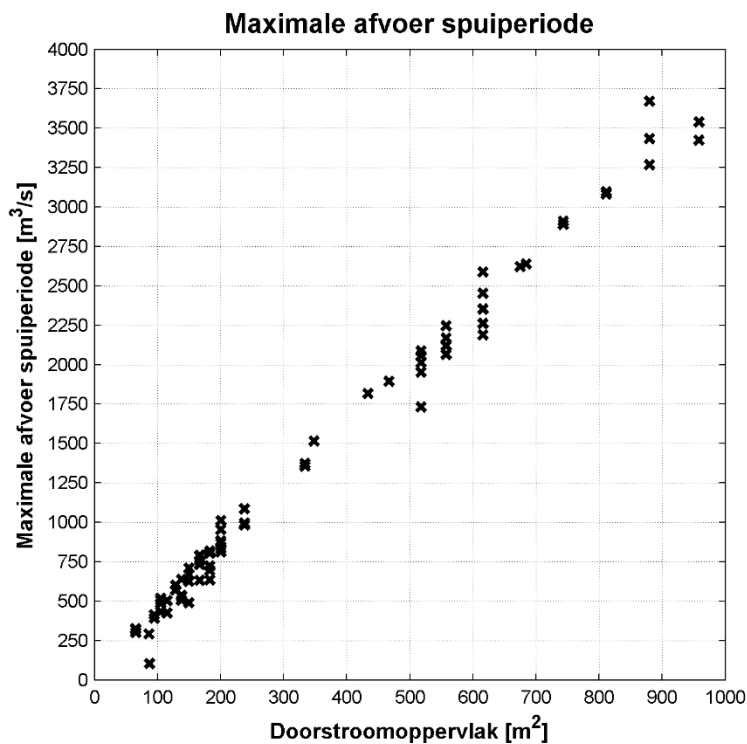


Figuur A-4: Piekdebiet (rood) en restdebiet (groen) als functie van de Rijnafvoer voor LPH'84. Het restdebiet is de gemiddelde afvoer over een gehele getijperiode.

In Figuur A-5 en Figuur A-6 zijn gemiddelde en maximale afvoer tijdens een spuiperiode uitgezet tegen het doorstroomoppervlak van de Haringvlietsluizen in de betreffende spuiperiode. De hiervoor gebruikte informatie is afkomstig uit de validatie-simulaties van het numerieke model (Kaaij, 2024b).



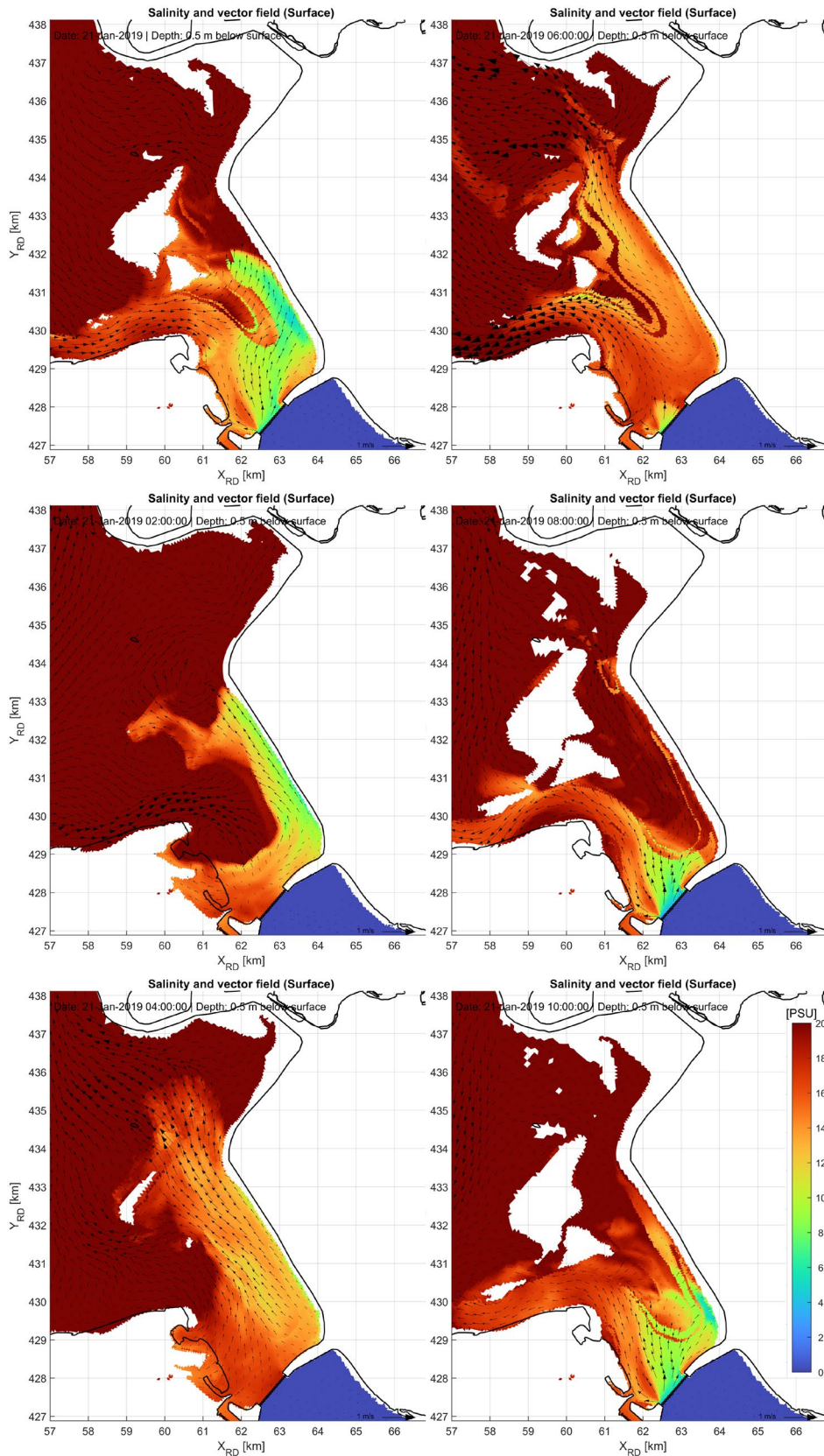
Figuur A-5: Berekende gemiddelde afvoer door de Haringvlietsluizen en bijbehorende doorstroomoppervlak voor simulaties uit (Kaaij, 2024b).



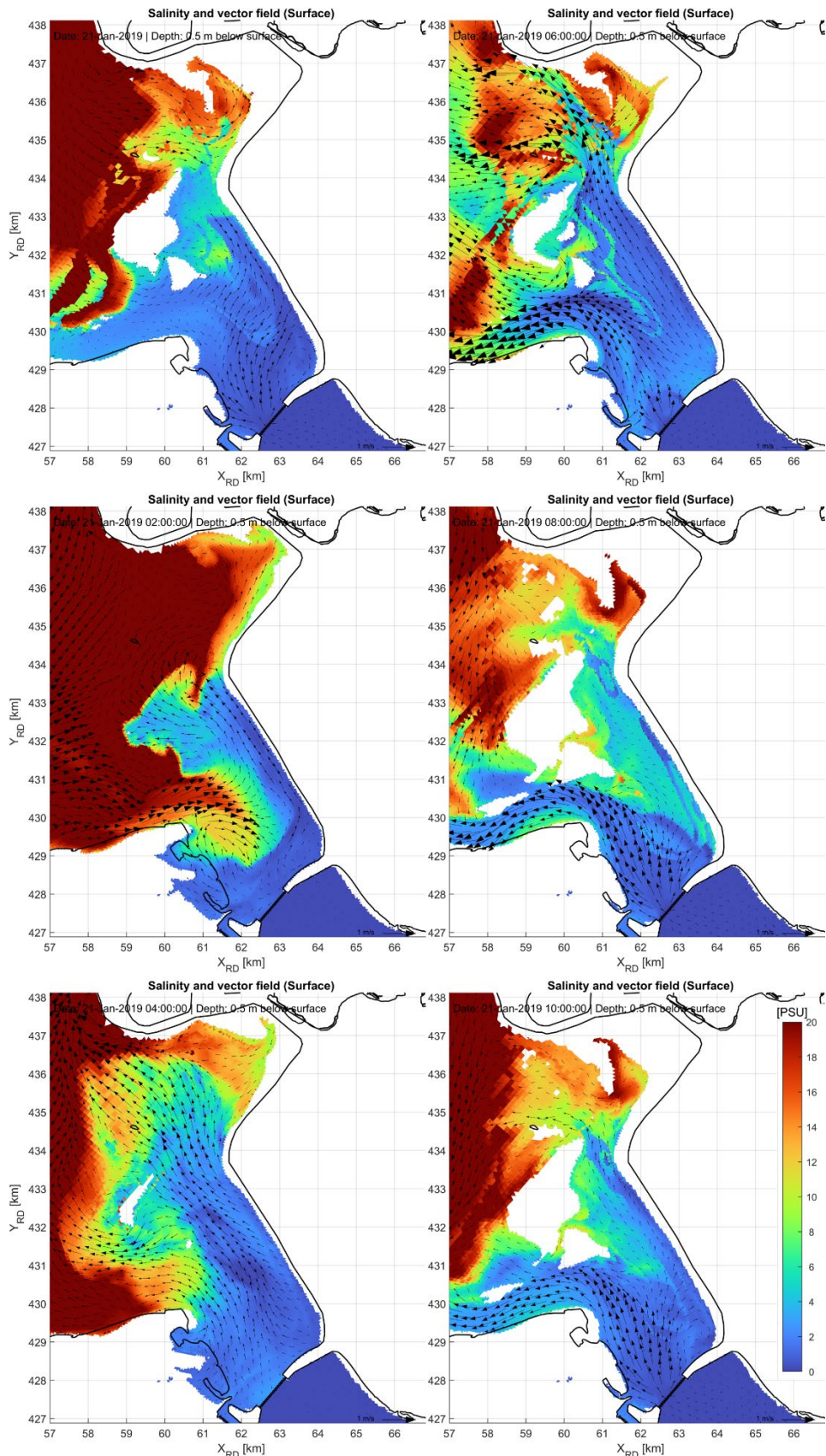
Figuur A-6: Berekende maximale afvoer door de Haringvlietsluizen en bijbehorende doorstroomoppervlak voor simulaties uit (Kaaij, 2024b).

B. Appendix: Verloop zoutgehalte over de getijperiode – zoom

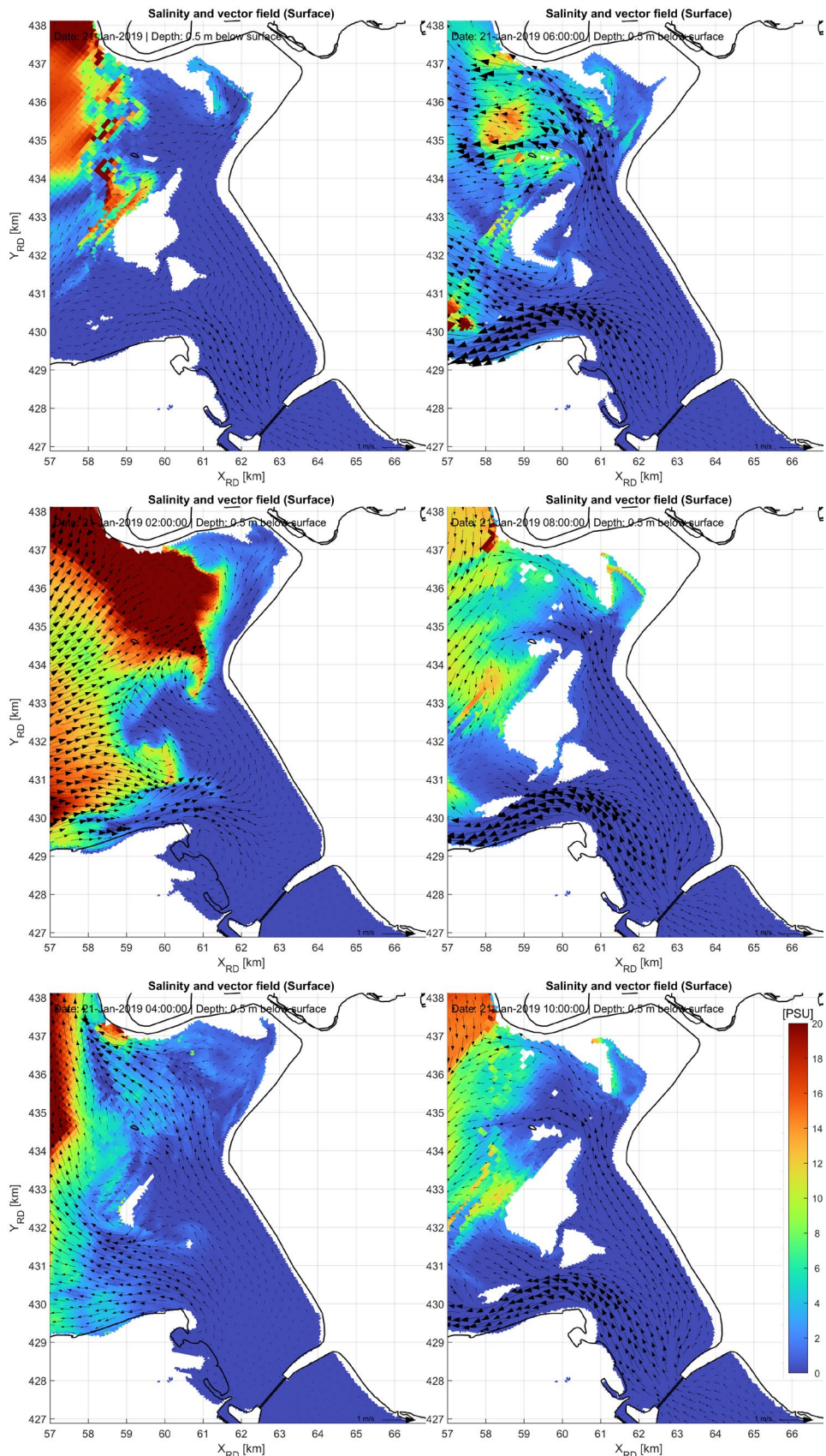
Figuur B-1 tot Figuur B-6 tonen het verloop van de zoetwatersverspreiding over de getijperiode voor de drie onderzochte spuicondities, waarbij in deze figuren ten opzichte van de figuren in de hoofdtekst nader wordt ingezoomd op het gebied nabij de sluizen. In de eerste drie figuren wordt gebruik gemaakt van een schaal van 0-20 PSU. In de laatste drie is voor de lagere saliniteiten nog meer detail zichtbaar door het gebruik van een schaal van 0-10 PSU.



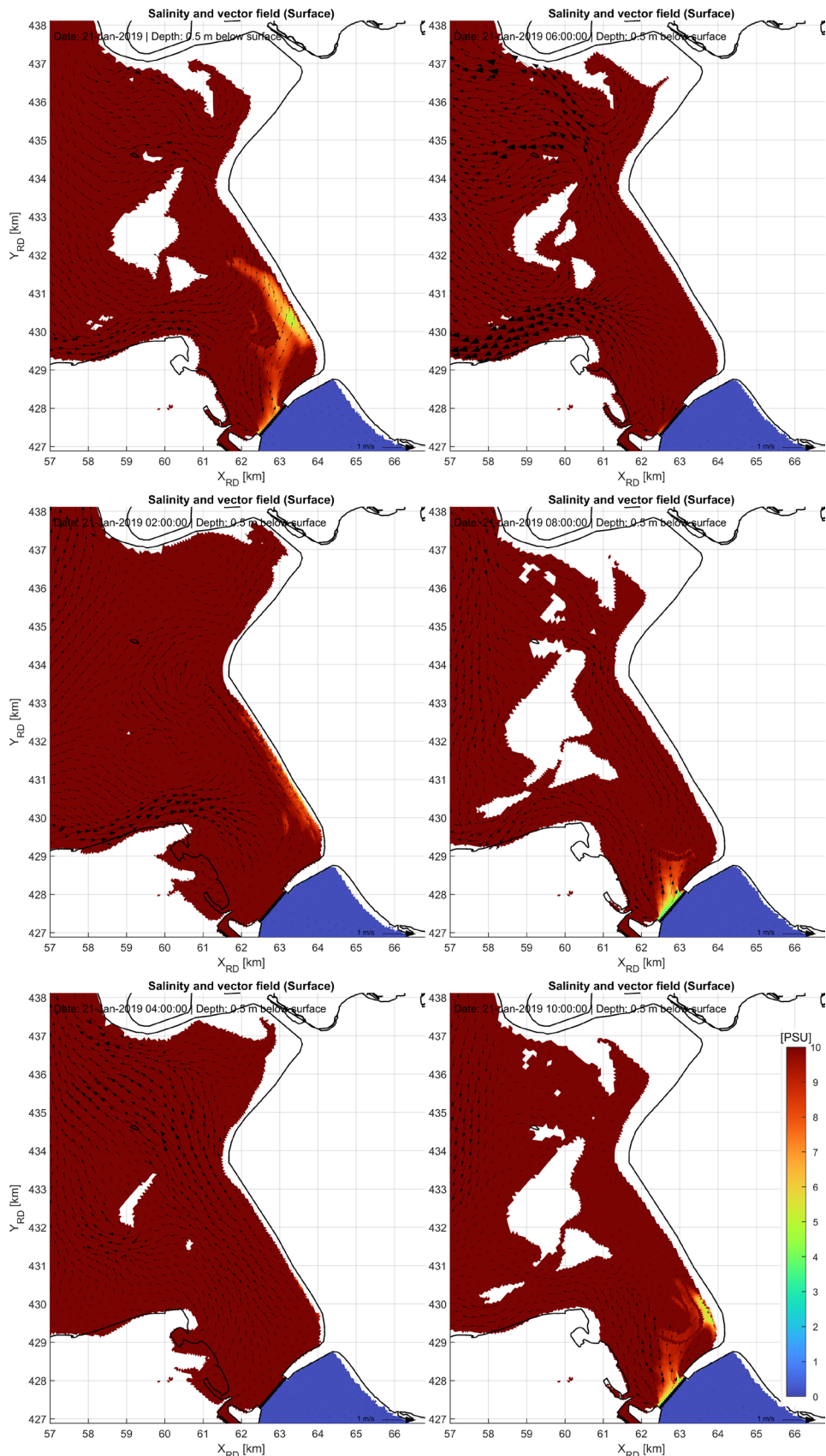
Figuur B-1: Saliniteit 0.5 m onder het wateroppervlak voor het scenario met minimale afvoer voor de periode 21 januari 2019 van 00:00 tot en met 10:00. De vectoren geven de snelheid weer van de stroming -0.5 m onder het wateroppervlak. De panelen hebben een 2 uur interval. Zoomversie vergeleken met Figuur 9 en een andere schaal voor de saliniteit (van 0 tot 20 PSU).



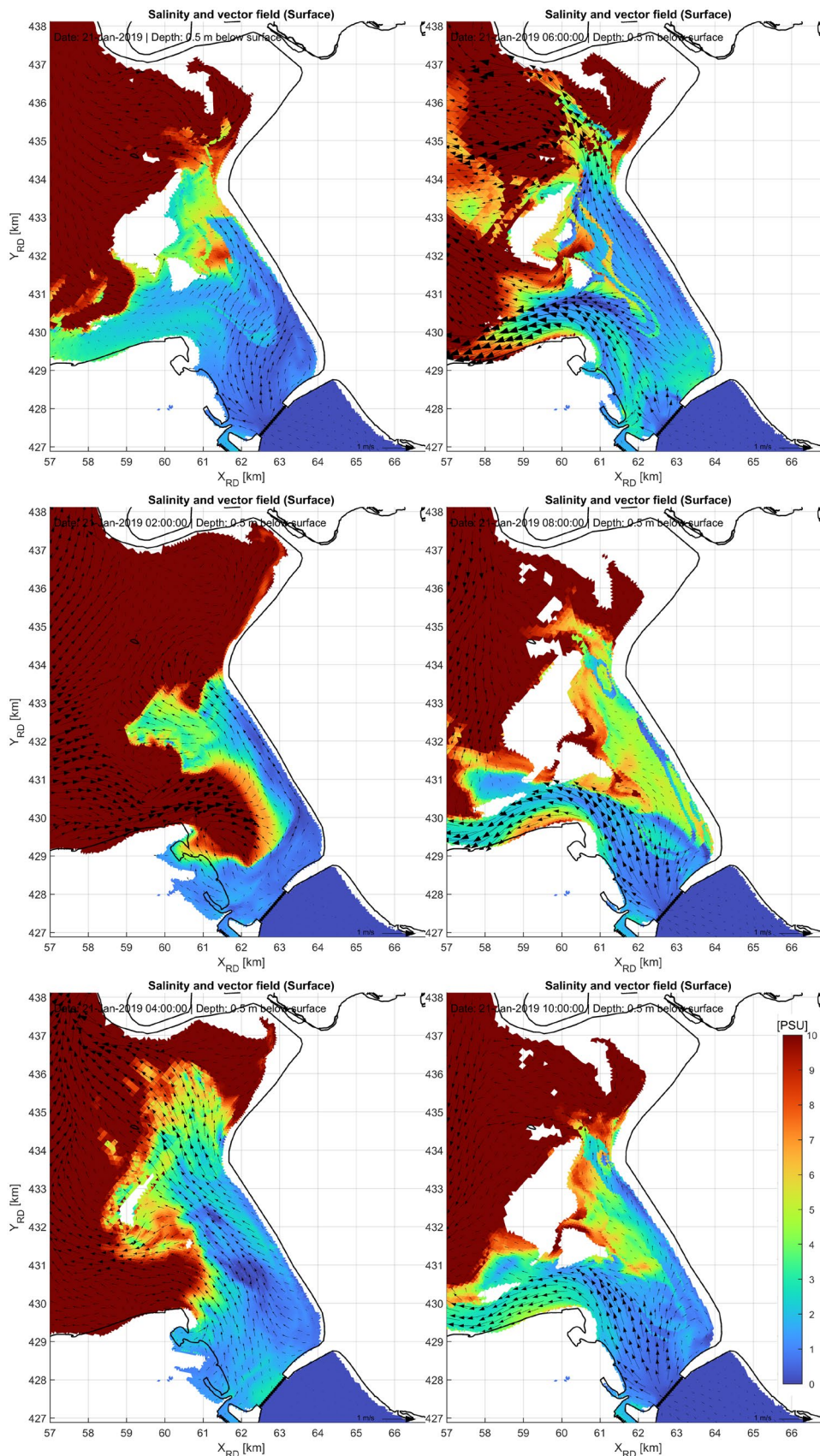
Figuur B-2: Saliniteit 0.5 m onder oppervlak voor maximum debiet van 1300 m³/s voor de periode 21 januari 2019 van 00:00 tot en met 10:00. De vectoren geven de snelheid weer. De panelen hebben een 2 uur interval. Zoomversie vergeleken met Figuur 11 en een andere schaal voor de saliniteit (0 tot 20 PSU).



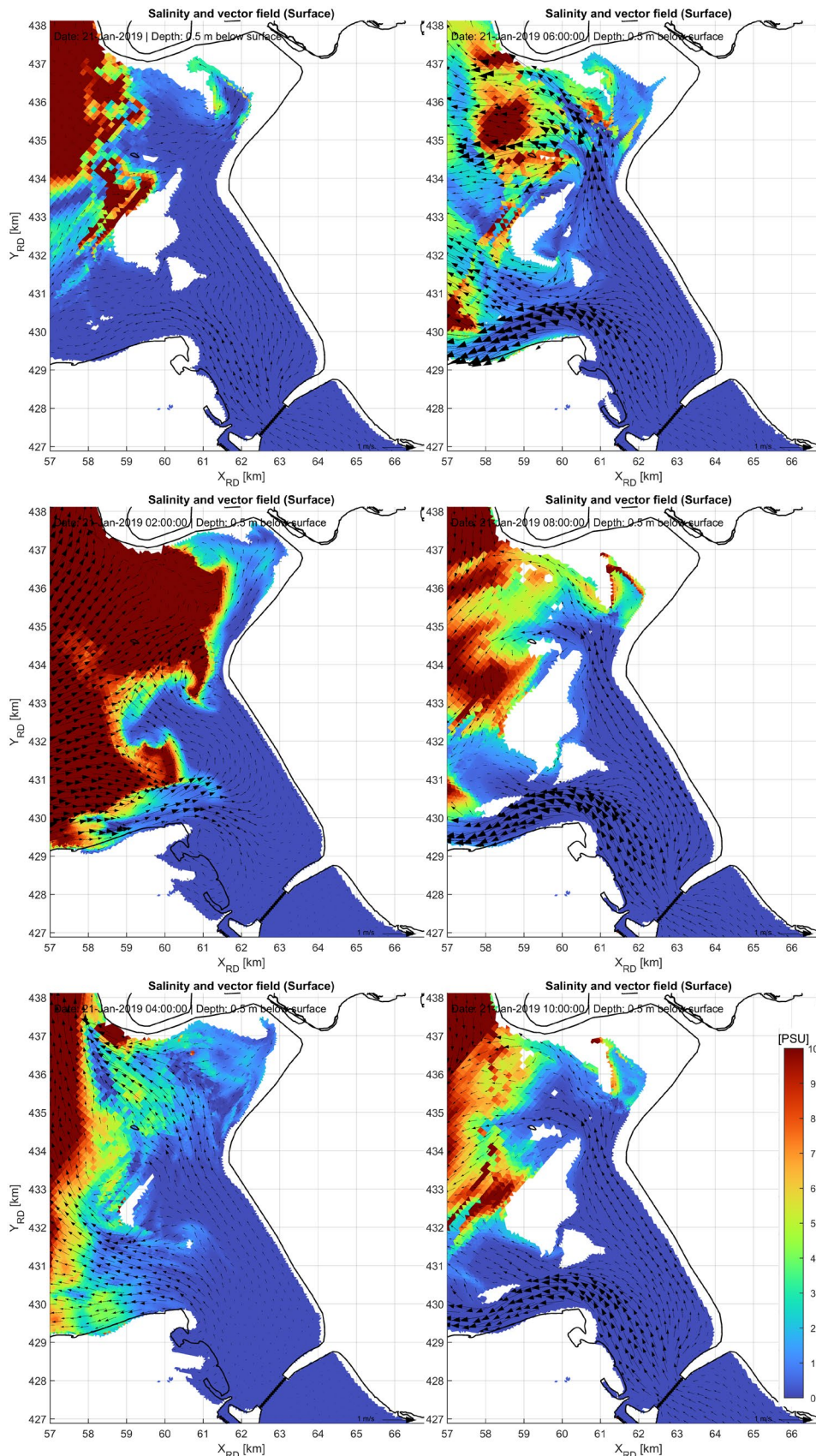
Figuur B-3: Saliniteit -0.5 m onder het wateroppervlak voor maximum debiet van 3300 m³/s voor de periode 21 januari 2019 van 00:00 tot en met 10:00. De vectoren geven de snelheid weer. De panelen hebben een 2 uur interval. Zoomversie vergeleken met Figuur 13 en een andere schaal voor de saliniteit (van 0 tot 20 PSU).



Figuur B-4: Saliniteit 0.5 m onder het wateroppervlak voor het scenario met minimale afvoer voor de periode 21 januari 2019 van 00:00 tot en met 10:00. De vectoren geven de snelheid weer van de stroming -0.5 m onder het wateroppervlak. De panelen hebben een 2 uur interval. Zoomversie vergeleken met Figuur 9 en een andere schaal voor de saliniteit (van 0 tot 10 PSU).

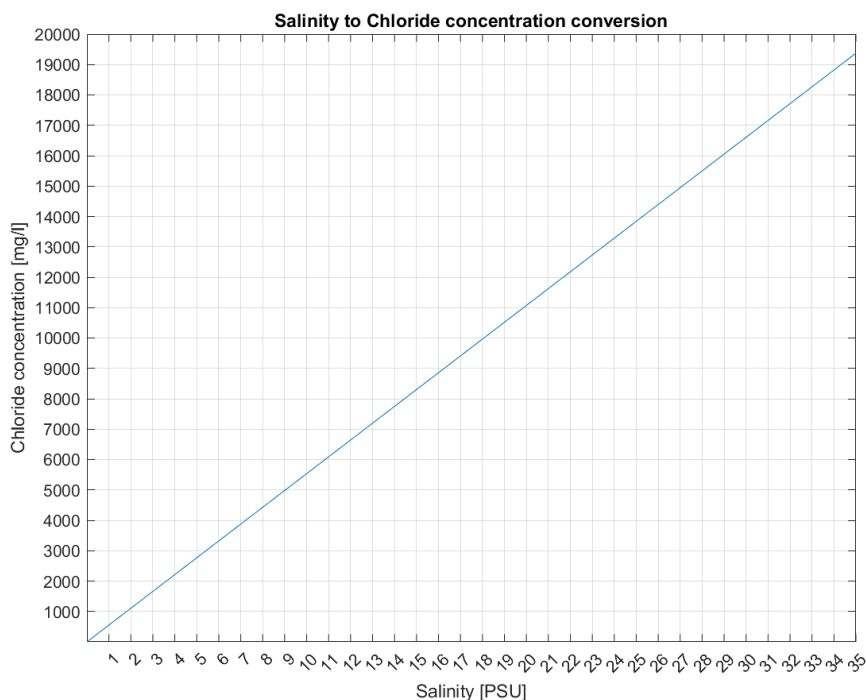


Figuur B-5: Saliniteit 0.5 m onder oppervlak voor maximum debiet van 1300 m³/s voor de periode 21 januari 2019 van 00:00 tot en met 10:00. De vectoren geven de snelheid weer. De panelen hebben een 2 uur interval. Zoomversie vergeleken met Figuur 11 en een andere schaal voor de saliniteit (0 tot 10 PSU).



Figuur B-6: Saliniteit -0.5 m onder het wateroppervlak voor maximum debiet van 3300 m³/s voor de periode 21 januari 2019 van 00:00 tot en met 10:00. De vectoren geven de snelheid weer. De panelen hebben een 2 uur interval. Zoomversie vergeleken met Figuur 13 en een andere schaal voor de saliniteit (van 0 tot 10 PSU).

C. Appendix: Relatie saliniteit - chlorideconcentratie



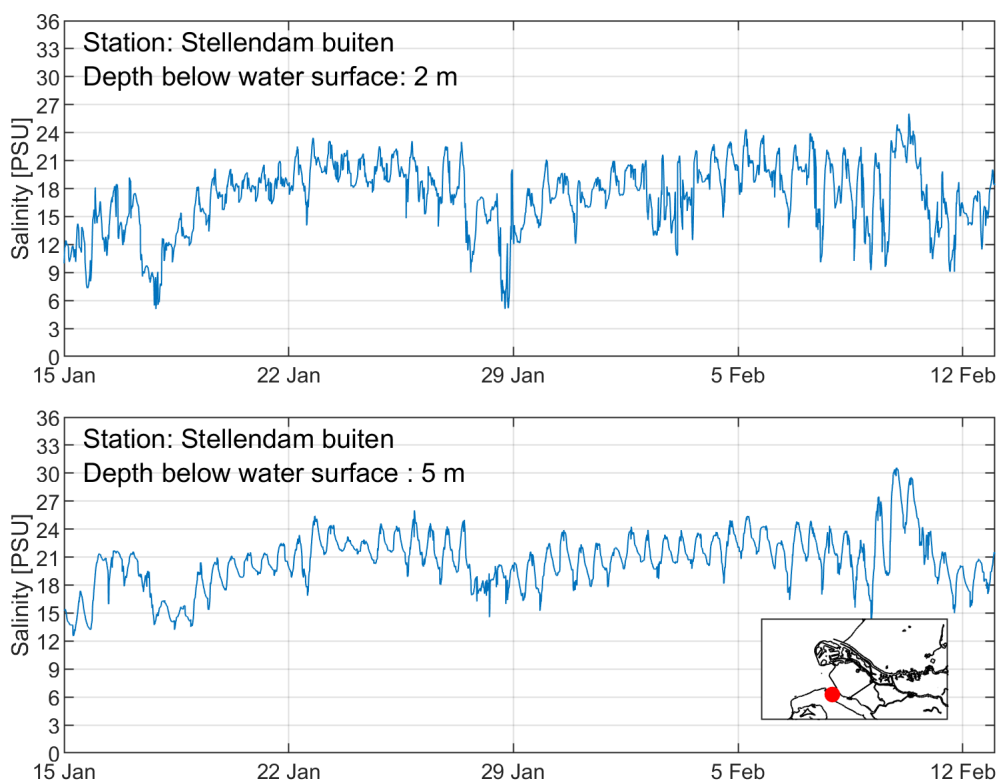
Figuur C-1: Conversie saliniteit – chlorideconcentratie voor water met zout vanuit zee.

Tabel 2: Conversie saliniteit – chlorideconcentratie voor water met zout vanuit zee

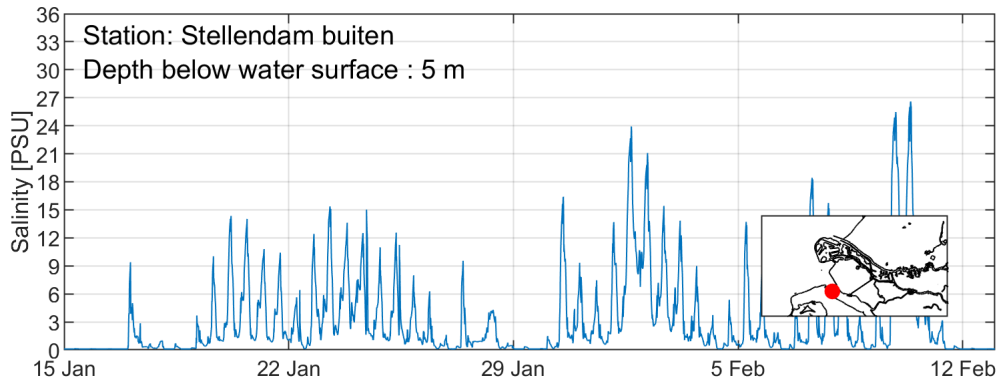
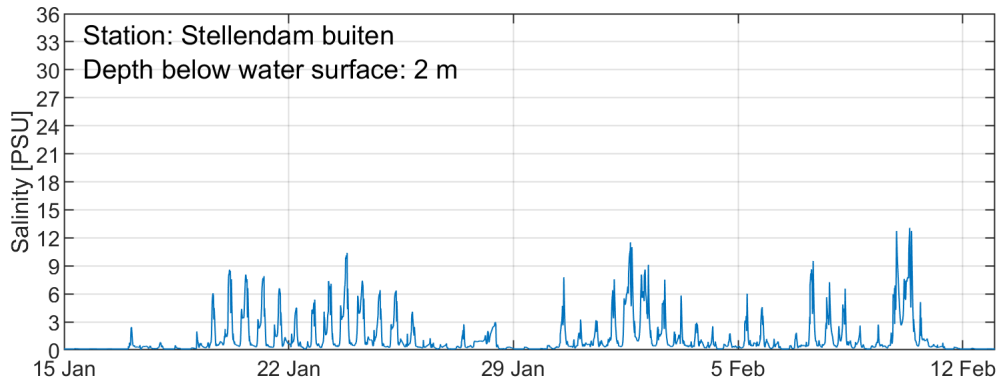
Salinity [PSU]	Chloride concentration [mg/l]
0	0
0,1	55
0,2	111
0,3	166
0,4	221
0,5	277
0,6	332
0,7	387
0,8	443
0,9	498
1	554
2	1107
3	1661
4	2214
5	2768
6	3321
7	3875
8	4428
9	4982
10	5535
11	6089
12	6643
13	7196
14	7750
15	8303
16	8857
17	9410
18	9964
19	10517
20	11071
21	11624
22	12178
23	12731
24	13285
25	13839
26	14392
27	14946
28	15499
29	16053
30	16606
31	17160
32	17713
33	18267
34	18820
35	19374

Chloride concentration [mg/l]	Salinity [PSU]
0	0
100	0,18
200	0,36
300	0,54
400	0,72
500	0,9
600	1,1
700	1,3
800	1,4
900	1,6
1000	1,8
2000	3,6
3000	5,4
4000	7,2
5000	9,0
6000	11
7000	13
8000	14
9000	16
10000	18
11000	20
12000	22
13000	23
14000	25
15000	27
16000	29
17000	31
18000	33
19000	34
20000	36

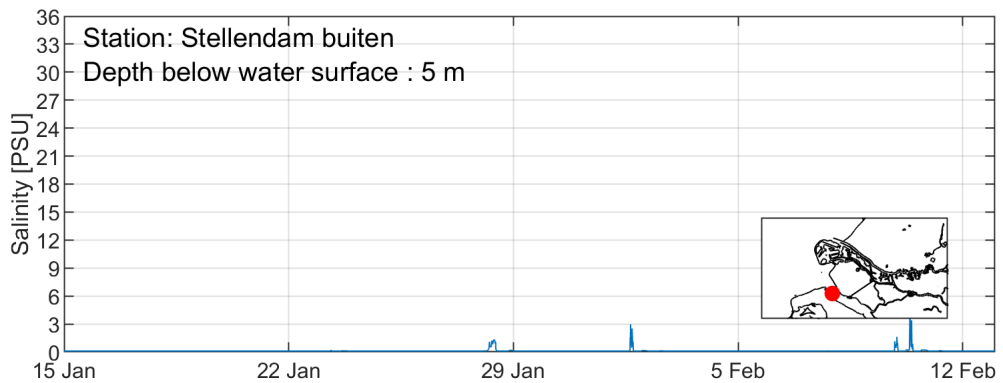
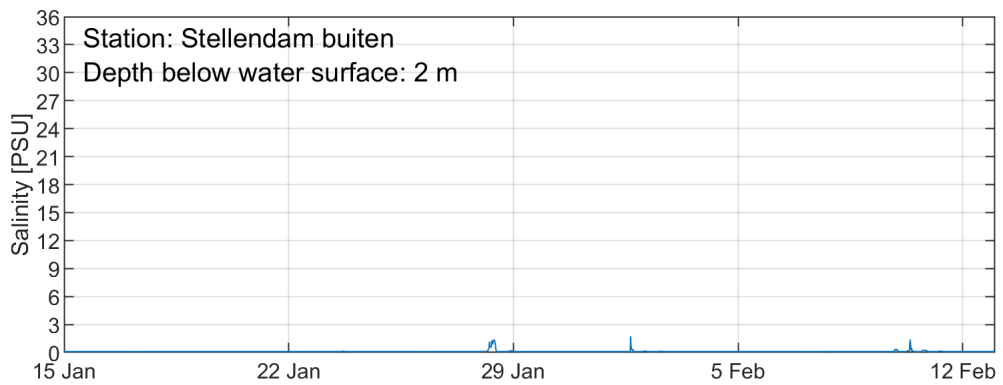
D. Appendix: Tijdsreeks saliniteit Stellendam-buiten



Figuur D-1: Saliniteit voor station Stellendam-buiten op een diepte van 2 m (bovenste paneel) en 5 m (onderste paneel) ten opzicht van het wateroppervlak, voor het scenario met minimale afvoer.

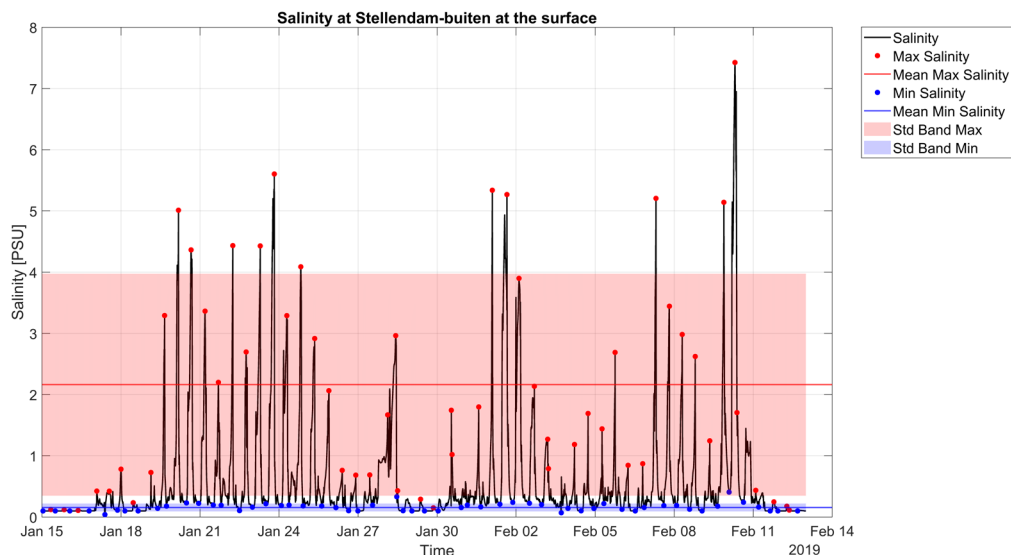


Figuur D-2: Saliniteit voor station Stellendam-buiten op een diepte van 2 m (bovenste paneel) en 5 m (onderste paneel) ten opzicht van het wateroppervlak, voor het scenario met een maximum debiet rond de 1300 m³/s.

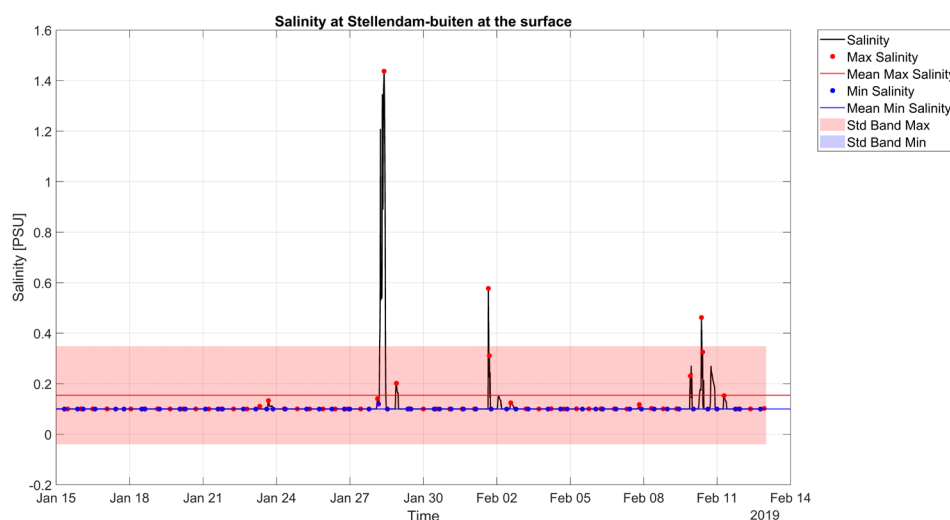


Figuur D-3: Saliniteit voor station Stellendam-buiten op een diepte van 2 m (bovenste paneel) en 5 m (onderste paneel) ten opzicht van het wateroppervlak, voor het scenario met een maximum debiet rond 3300 m³/s.

E. Appendix: Tijdsreeks Stellendam-buiten met maxima & minima



Figuur E-1: Saliniteit (zwarte lijn) aan het oppervlak op het station Stellendam-buiten voor de gehele analyse periode voor de piekafvoer van $1300 \text{ m}^3/\text{s}$. De rode cirkels zijn de maxima van elke spui periode, de blauwe cirkels de minima van elke spui periode. De rode lijn is het gemiddelde van de maxima, de blauwe lijn het gemiddelde van de minima. De rode band is de standaarddeviatie boven en onder het gemiddelde van de maxima, de blauwe band is de standaarddeviatie boven en onder het gemiddelde van de minima. Voor maxima: gemiddelde is 2.47 PSU en standaarddeviatie is 1.93 PSU . Voor minima: gemiddelde is 0.16 PSU en standaarddeviatie is 0.09 PSU .



Figuur E-2: Saliniteit (zwarte lijn) aan het oppervlak op het station Stellendam-buiten voor de gehele analyse periode voor de piekafvoer van $3300 \text{ m}^3/\text{s}$. De rode cirkels zijn de maxima van elke spui periode, de blauwe cirkels de minima van elke spui periode. De rode lijn is het gemiddelde van de maxima, de blauwe lijn het

gemiddelde van de minima. De ronde band is de standaarddeviatie boven en onder het gemiddelde van de maxima, de blauwe band is de standaarddeviatie boven en onder het gemiddelde van de minima. Voor maxima: gemiddelde is 0.165 PSU en standaarddeviatie is 0.224 PSU. Voor minima: gemiddelde is 0.10 PSU en standaarddeviatie is 0.003 PSU.

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