

## Invloed afvoerregimes IJsselmeer op saliniteit Waddenzee

Modelstudie en voorzichtige doorvertaling naar ecologische effecten



# Invloed afvoerregimes IJsselmeer op saliniteit Waddenzee

Modelstudie en voorzichtige doorvertaling naar ecologische effecten

## Auteur(s)

Luka Jaksic  
Jelle Rienstra  
Carlijn Meijers  
Anouk Blauw

## Invloed afvoerregimes IJsselmeer op saliniteit Waddenzee

Modelstudie en voorzichtige doorvertaling naar ecologische effecten

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	de heer F. Brils
<b>Referenties</b>	Referenties
<b>Trefwoorden</b>	Klimaatverandering, IJsselmeer, Waddenzee, ecologie, saliniteit

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	2.7
<b>Datum</b>	13-06-2024
<b>Projectnummer</b>	11209267-007
<b>Document ID</b>	-
<b>Pagina's</b>	84
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Luka Jaksic	
	Jelle Rienstra	
	Carlijn Meijers	
	Anouk Blauw	

# Samenvatting

Klimaatverandering gaat naar verwachting leiden tot grotere weersextremen met drogere zomers en nattere winters. Om in de toekomst te kunnen blijven voldoen aan waterveiligheidsnormen en drinkwaterbehoeften zal het afvoerregime van IJsselmeerwater op de Waddenzee mogelijk veranderen. Veranderingen in de zoetwatertoevoer vanuit het IJsselmeer kunnen gevolgen hebben voor de ecologie van de Waddenzee door veranderingen in saliniteit(fluctuaties) en nutriëntenbeschikbaarheid.

Deze studie verkent de effecten van veranderingen in afvoerregimes vanuit het IJsselmeer op de saliniteit in de Waddenzee en daarmee samenhangende ecologische effecten. Dit is gedaan in opdracht van Rijkswaterstaat binnen het SITO-PS programma “Beheer en Onderhoud Waddenzee” van het jaar 2023. De bandbreedte van mogelijke saliniteitsveranderingen in de Waddenzee is onderzocht met behulp van een aantal extreme modelscenario's in een stromingsmodel van de Waddenzee. De scenario's verkennen effecten van aanpassingen aan de afvoerlocatie, -hoeveelheid, en de -verdeling over het getij of over de seizoenen. Een voorzichtige eerste ecologische doorvertaling is gemaakt door de saliniteitseffecten per ecotoop te kwantificeren en te vergelijken met beschikbare kennis uit de literatuur over directe ecologische effecten van saliniteit. Andere ecologische effecten van aangepaste afvoerregimes, zoals die op de nutriëntenbeschikbaarheid zijn nog niet meegenomen.

De modelresultaten laten zien dat de locatie waar het zoete IJsselmeerwater naar de Waddenzee wordt afgevoerd, een sterk effect heeft op de saliniteitsverdeling in de Waddenzee. Aanpassingen aan de afvoerverdeling tussen Den Oever en Kornwerderzand beïnvloeden hierdoor welke gebieden zoet water ontvangen en hoe lang dit in de Waddenzee blijft. Afvoerveranderingen bij Den Oever beïnvloeden met name de saliniteit op het Balgzand aan de vastelandskust van het Marsdiep. Dit water kent een relatief korte verversingstijd, waardoor het zoete water uit het IJsselmeer relatief snel uit de Waddenzee verdwijnt. Afvoerveranderingen bij Kornwerderzand beïnvloeden met name de saliniteit langs een groot deel van de Friese vastelandskust in het Vlie en Borndiep, waar de verversingstijd juist relatief lang is en het IJsselmeerwater dus langer in de Waddenzee blijft. Deze gebieden bestaan voornamelijk uit litorale, laag-dynamische ecotopen. De saliniteit wordt minder beïnvloed in gebieden met een sterkere wateruitwisseling, zoals geulen, of in gebieden die onder normale windcondities weinig zoet water ontvangen. Hoewel deze bevindingen afhankelijk zijn van de (sterk variërende) windcondities, zijn ze naar verwachting representatief voor de langjarig gemiddelde saliniteitsverdeling.

Vanuit de literatuur is bekend dat negatieve ecologische effecten van saliniteit op benthische mariene organismen voornamelijk veroorzaakt worden door lage saliniteit (lager dan 15 PSU) of sterke fluctuaties in saliniteit. Dergelijke condities komen in de huidige situatie ook al voor in de laag-dynamische ecotopen langs de Friese kust en het Balgzand. Door veranderingen in de afvoer vanuit het IJsselmeer zal het voorkomen van langdurig lage saliniteit en de mate van fluctuatie in saliniteit veranderen, waardoor de huidige ecologische effecten hiervan kunnen worden versterkt of verzwakt. Het voorkomen van benthische organismen wordt overigens niet uitsluitend door saliniteit bepaald maar ook door verschillende andere factoren, zoals onder andere nutriëntenbeschikbaarheid, voedselbeschikbaarheid, competitie, bodemsamenstelling en stroming.

Op basis van de modelresultaten wordt geconcludeerd dat structurele veranderingen in de (seizoensgebonden) afvoerhoeveelheid en/of -locatie relevanter zijn voor het ecologisch functioneren van de Waddenzee ten opzichte van veranderingen in de verdeling van de

zoetwateraanvoer over een getijdeperiode. Veranderingen in de verdeling van de zoetwateraanvoer over een getijdeperiode hebben een verwaarloosbaar effect op de seizoensgemiddelde saliniteit en slechts een lokaal effect op de saliniteitsfluctuatie nabij de afvoerlocatie. Dat betekent dat het gepulseerd inbrengen van zoetwater in de Waddenzee door te spuien niet de belangrijkste oorzaak is voor saliniteitsfluctuaties in de Waddenzee. Anderzijds laten de modelresultaten zien dat structurele veranderingen in de afvoerhoeveelheid en/ of -locatie wel sterk bijdragen aan een toename (of afname) in saliniteitsfluctuaties op de tijdschaal van enkele getijdecycli. Zulke structurele veranderingen in de afvoerhoeveelheid of -locatie leiden ook tot aanzienlijke veranderingen in de seizoensgemiddelde saliniteit in sommige ecotopen (tot 5-8 PSU). Bij toename van afvoeren in de winter neemt de saliniteit lokaal af en nemen de korte termijn fluctuaties in saliniteit toe, wat lokaal negatieve ecologische effecten kan hebben. Bij afname van de afvoeren in de zomer treedt het omgekeerde effect op. Bij het verder vergroten van het verschil tussen de winter- en zomerafvoeren, kan dit de stress voor sommige organismen vergroten door een toename in de seizoensfluctuatie.

Op basis van deze studie kunnen we concluderen dat aanpassingen aan de afvoerregimes vanuit het IJsselmeer een sterk effect kunnen hebben op de saliniteitsverdeling en -fluctuaties in de Waddenzee. Met name in slibrijke gebieden langs de Friese kust en het Balgzand kan dit ecologische gevolgen hebben. Hoe groot de gevolgen van saliniteitsveranderingen voor het ecosysteem zijn, is nog onduidelijk.

In deze studie is alleen nog gekeken naar directe ecologische effecten van lage saliniteit en fluctuaties in saliniteit. Om een betere inschatting te maken van de te verwachten ecologische effecten in de Waddenzee zou ook naar andere effecten moeten worden gekeken, zoals effecten van nutriëntenaanvoer vanuit zoet water en de rol van zoet water als lokstroom voor vissen naar het IJsselmeer. Er is ook nog weinig bekend over de ecologische effecten van saliniteit en fluctuaties daarin, specifiek in de Waddenzee. Een nadere statistische analyse van de correlatie tussen ruimtelijke patronen van benthische organismen met saliniteit en andere mogelijke verklarende variabelen (inclusief modeldata) zou hier meer inzicht in kunnen geven. Ter validatie en systeembegrip is er behoefte aan meerjarige metingen van saliniteit en nutriënten in de gebieden die het sterkst worden beïnvloed door zoet water vanuit het IJsselmeer: bij het Balgzand en langs de Friese en Groningse kust.

# Inhoud

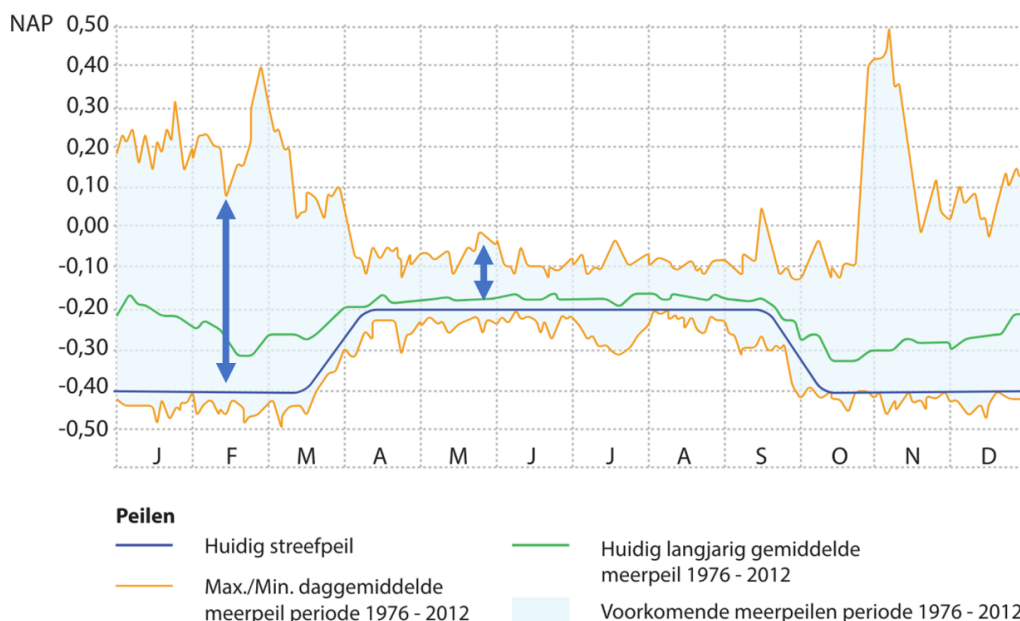
<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1 Aanleiding en achtergrond	7
1.2 Doel & aanpak	8
1.3 Leeswijzer	8
<b>2 Literatuurstudie saliniteit in de Waddenzee</b>	<b>10</b>
2.1 Zoetwateraanvoer Waddenzee	10
2.2 Saliniteit en verspreiding IJsselmeerwater in de Waddenzee	12
2.3 Saliniteit in een historisch perspectief	14
<b>3 Literatuurstudie ecologische effecten saliniteit</b>	<b>18</b>
3.1 De Waddenzee: effecten op een complex ecosysteem	18
3.2 Effecten saliniteit op ecologie in estuaria	21
3.3 Effecten saliniteit op ecologie Waddenzee	24
<b>4 Beschrijving modelscenario's en analyse</b>	<b>25</b>
4.1 Waddenzeemodel	25
4.2 Afvoerscenario's	27
4.3 Analyse modelresultaten	33
<b>5 Resultaten: scenario effecten op zoutgehalte</b>	<b>35</b>
5.1 Zoutverdeling in de 'huidige condities'	35
5.2 Effecten per scenario	42
<b>6 Discussie &amp; eerste ecologische doorvertaling</b>	<b>52</b>
6.1 Invloed afvoerregimes IJsselmeer op saliniteit Waddenzee	52
6.2 Voorzichtige ecologische doorvertaling	55
<b>7 Conclusies &amp; aanbevelingen</b>	<b>60</b>
7.1 Conclusies	60
7.2 Aanbevelingen voor nader onderzoek	61
<b>Bibliografie</b>	<b>62</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding en achtergrond

De Waddenzee is een ecosysteem met een hoge mate van biodiversiteit, die essentieel is voor het behoud van regionale en mondiale soortenrijkdom. Mede hierdoor is het gebied aangewezen als Natura2000 gebied en heeft het een beschermde status gekregen op de UNESCO werelderfgoedlijst. Veranderingen in de zoetwatertoevoer vanuit het IJsselmeer kunnen gevolgen hebben voor de ecologie van de Waddenzee door veranderingen in de beschikbaarheid van nutriënten uit het gespuid IJsselmeerwater en veranderingen in saliniteit.

Klimaatverandering gaat naar verwachting leiden tot grotere weersextremen met drogere zomers en nattere winters (KNMI, 2023). Om in de toekomst te kunnen blijven voldoen aan waterveiligheidsnormen en drinkwaterbehoeften zal het afvoerregime van IJsselmeerwater op de Waddenzee mogelijk veranderen. Het huidige beleid richt zich voornamelijk op het aanhouden van een (flexibel) streefpeil in het IJsselmeer om het achterland van voldoende zoetwater te voorzien tijdens droge zomers en om de waterveiligheid te waarborgen tijdens natte winterperiodes. Om dit streefpeil te realiseren wordt momenteel in de zomer minder gespuid op de Waddenzee dan in de winter (zie Figuur 1-1). Door klimaatverandering zou dit beleid in de toekomst kunnen leiden tot lagere zoetwaterafvoeren op de Waddenzee in de zomer en hogere afvoeren in de winter. Ook de verdeling van de zoetwateraanvoer over een getijdeperiode kan veranderen, bijvoorbeeld als er in de toekomst gepompt zou moeten worden om het water af te voeren. De potentiële gevolgen van zulke afvoer veranderingen op de ecologie in de Waddenzee zijn momenteel nog niet bekend.



Figuur 1-1 Jaarlijkse variatie IJsselmeerpeil op basis meetgegevens 1976-2022. Blauwe horizontale lijn toont het streefpeil, dat in de relatief droge zomerperiode hoger is om het achterland van zoetwater te voorzien. De groene en oranje lijnen tonen het gemiddelde en het minimale/maximale meerpeil per maand, respectievelijk. Een groot verschil tussen het streefpeil en het gemiddelde of maximum peil (blauwe verticale peilen) betekent dat er op dat moment vaak veel gespuid moest worden op de Waddenzee. Aangepaste figuur uit Rijkswaterstaat (2018).

## 1.2 Doel & aanpak

Deze studie verkent de effecten van veranderingen in afvoerregimes vanuit het IJsselmeer op de saliniteit in de Waddenzee en de daarmee samenhangende ecologische effecten. Deze verkenning is uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat binnen het SITO-programma “Beheer en Onderhoud Waddenzee”.

Het doel van de studie is om in te schatten in hoeverre veranderingen in afvoerregimes vanuit het IJsselmeer ook ecologische effecten kunnen hebben op de Waddenzee. In dat geval zou er bij het aanpassen van het peilbeheer en spuiregimes van het IJsselmeer ook rekening moeten worden gehouden met de ecologische effecten in de Waddenzee. In deze studie wordt alleen nog gekeken naar directe ecologische effecten van saliniteit. Andere ecologische effecten van afvoerregimes vanuit het IJsselmeer, zoals via beschikbaarheid van nutriënten en als lokstroom voor vissen, vallen nog buiten de scope van deze studie.

De bandbreedte van mogelijke saliniteitsveranderingen in de Waddenzee is onderzocht met behulp van een aantal extreme modelscenario's in een stromingsmodel van de Waddenzee. Met deze scenario's is verkend wat het effect is van aanpassingen aan de afvoerlocatie, -hoeveelheid, en de -verdeling over het getij of over de seizoenen op de ruimtelijke en temporele verdeling van saliniteit in de Waddenzee. De scenario's zijn niet bedoeld om een realistische weergave van toekomstige ontwikkelingen te geven, maar als gevoeligheidsanalyse om de bandbreedte van effecten te verkennen.

Een voorzichtige eerste ecologische doorvertaling is gemaakt door de bandbreedte van mogelijke saliniteitsveranderingen per ecotoop te kwantificeren en te vergelijken met beschikbare kennis uit de literatuur over directe ecologische effecten van saliniteit. De aanpak is geschematiseerd weergegeven in Figuur 1-2. Ter verkenning van de directe ecologische effecten zijn voor elk scenario verschillende saliniteitsindicatoren berekend. Deze indicatoren zijn per ecotoop bepaald om inzicht te krijgen in welke leefgebieden het sterkst beïnvloed worden door de afvoerveranderingen ('3' in Figuur 1-2). Hierbij is gebruik gemaakt van de zoute ecotopenkaart<sup>1</sup> van de Waddenzee van 2017 (Paree, 2020).

Er is onvoldoende informatie beschikbaar om op soortniveau uitspraken te doen over ecologische effecten van veranderingen van saliniteit. Deze zijn ook sterk afhankelijk van andere directe en indirecte ecologische effecten van aanpassingen aan afvoerregimes vanuit het IJsselmeer, zoals de beschikbaarheid van nutriënten en complexe interacties binnen het voedselweb.

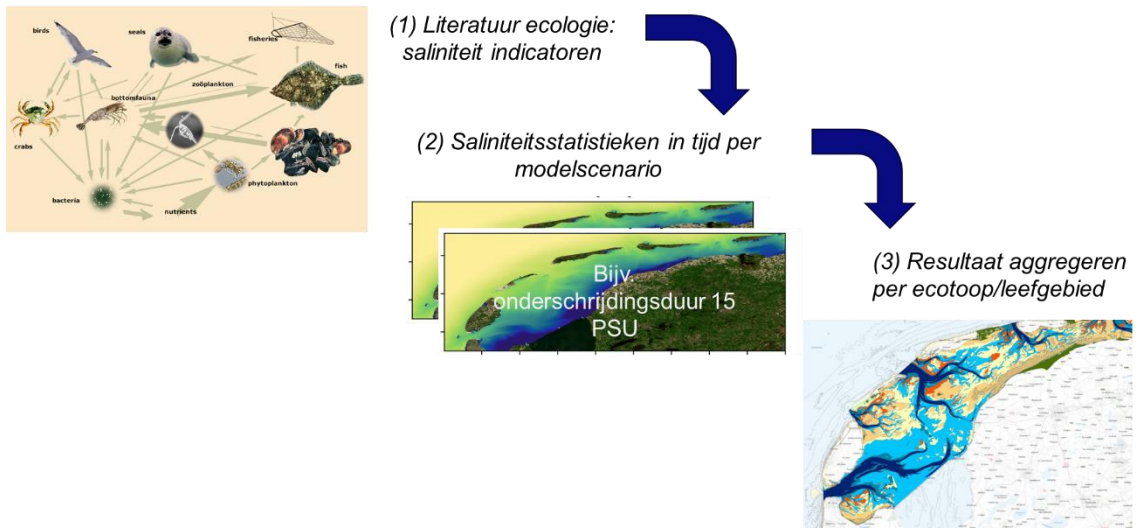
## 1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 0 geeft een overzicht van wat al bekend is uit de literatuur over de saliniteitsverdeling in de Waddenzee en de processen die hierop van invloed zijn. Hoofdstuk 3 beschrijft wat bekend is over de gevolgen van saliniteit op de ecologie en welke indicatoren in de literatuur gebruikt worden om directe effecten van saliniteit en fluctuaties daarin te kwantificeren. Hoofdstuk 4 beschrijft welke afvoerscenario's zijn gemodelleerd en hoe de analyse van de modelresultaten is uitgevoerd. De modelresultaten worden gepresenteerd in hoofdstuk 5 en bediscussieerd in hoofdstuk 6. Hier wordt ook een voorzichtige ecologische doorvertaling gemaakt. De conclusies en aanbevelingen van deze studie staan in Hoofdstuk 7.

---

<sup>1</sup> Een ecotoop is het kleinste, ecologisch onderscheidbare gebied in de classificering van gebieden. Binnen de hiërarchische indeling van het Zoute Ecotopen Stelsel voor Nederlandse wateren (ZES.1; Bouma et al., 2005) wordt het zoutgehalte gekenmerkt als het belangrijkste kenmerk voor het onderscheiden van ecotopen. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen zout, brak en zoet water en tussen hoge en lage variaties in zoutgehalte. De grenzen zijn verder bepaald op basis van verschillen in soortensamenstelling tussen de verschillende zoutgehaltes en variaties in Nederlandse wateren.





*Figuur 1-2 Aanpak van deze studie. Saliniteit indicatoren op basis van literatuur (1) worden gebruikt om statistieken te berekenen voor verschillende afvoerscenario's (2). Voor elk afvoerscenario wordt het effect per ecotoop berekend (3) om inzicht te geven in de mogelijke directe gevolgen voor de ecologie.*

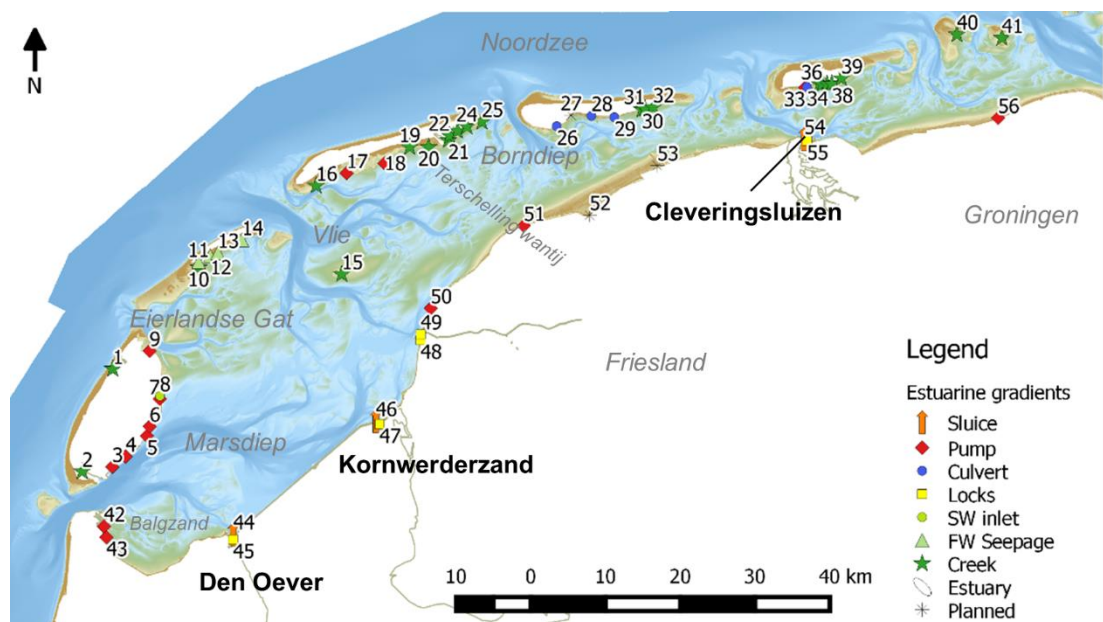
## 2 Literatuurstudie saliniteit in de Waddenzee

Dit hoofdstuk beschrijft de saliniteitsverdeling in de Nederlandse Waddenzee op basis van literatuur. Paragraaf 2.1 beschrijft eerst hoeveel zoetwater de Waddenzee instroomt en op welke plekken. Paragraaf 2.2 laat zien hoe het IJsselmeerwater zich vervolgens in de Waddenzee verspreidt, welke processen hierin sturend zijn en hoe dit de saliniteit beïnvloedt. Tot slot, gaat paragraaf 2.3 in op de historische en mogelijke toekomstige ontwikkeling van de saliniteit in de Waddenzee.

### 2.1 Zoetwateraanvoer Waddenzee

#### 2.1.1 Waar zoetwater de Waddenzee instroomt

Er zijn tientallen afwateringen op de Waddenzee, waaronder gemalen, krekens en onderlaten (Figuur 2-1). Van de totale zoetwateraanvoer op de westelijke Waddenzee is het overgrote deel afkomstig uit het IJsselmeer (van Reen, 2005) (Figuur 2-2). Dit water wordt via spuisluizen bij Den Oever en Kornwerderzand op de Afsluitdijk gespuid onder vrij verval.

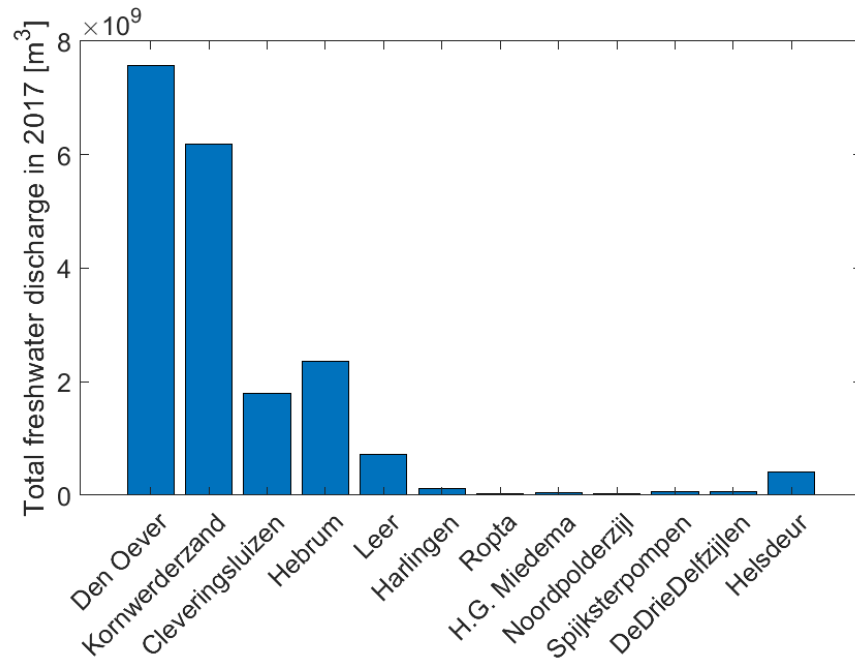


Figuur 2-1 Afwateringen op de Nederlandse Waddenzee. De grootste spuilocaties op de Afsluitdijk Den Oever en Kornwerderzand zijn aangegeven, evenals de Cleveringsluizen bij het Lauwersoog. Belangrijke gebiedsaanduidingen zijn aangegeven in grijs.

#### 2.1.2 Afvoervariatie in de ruimte en tijd

Hoewel de afvoerdeling tussen Den Oever en Kornwerderzand van jaar tot jaar varieert, werd in de afgelopen decennia typisch meer gespuid op Den Oever (~60%) dan op meer oostelijke spuilocatie Kornwerderzand (~40%). Op beide locaties is de afvoer aanzienlijk groter in de winter dan in de zomer (Figuur 2-3). Dit zorgt voor een seizoenfluctuatie in de zoetwateraanvoer. De hoeveelheid zoetwater die in een bepaalde periode wordt gespuid, hangt onder andere af van de toevoer van zoetwater, het streefpeil op het IJsselmeer en de weersomstandigheden die het spuien op de Waddenzee beïnvloeden. Doordat er uitsluitend rond laagwater onder vrij verval gespuid wordt, bestaat er ook een variatie van de

zoetwateraanvoer over een getijperiode. Het zoete water bereikt de Waddenzee hierdoor in 'zoetwaterpulsen'.



Figuur 2-2 Jaarlijkse zoetwaterafvoer [m³] in 2007 op verschillende afvoerlocaties in de Waddenzee. Spuilocaties zijn terug te vinden aan hand van de nummers in Figuur 2-1: Den Oever (44), Kornwerderzand (46), Cleveringsluizen (54), Harlingen (49), Ropta (50), H.G. Miedema (51), Noordpolderzijl (56) en Helsdeur (42). Herbrum, Leer, Spijksterpompen, en De Drie Delfszijlen wateren af op de Eems-Dolaard – die niet zichtbaar is in Figuur 2-1.

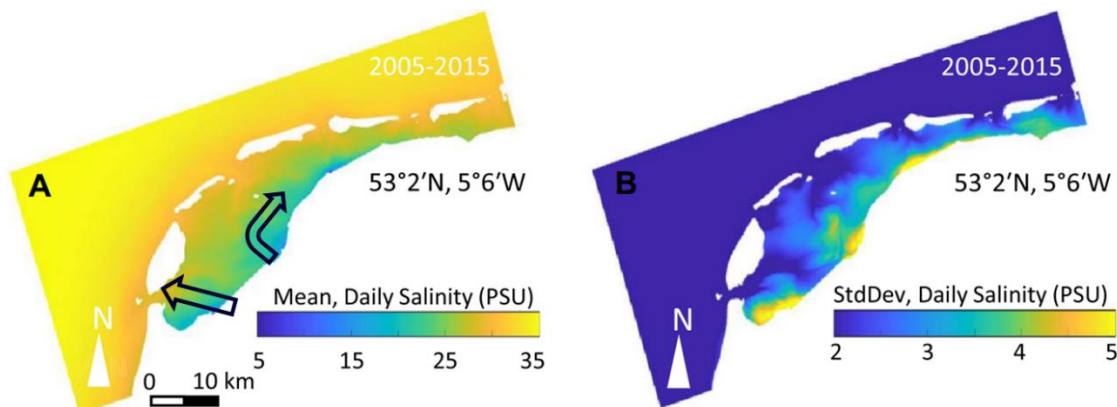


Figuur 2-3 Maandgemiddelde zoetwateraanvoer via spuilocaties Den Oever (boven) en Kornwerderzand (beneden). Rood geeft het gemiddelde weer voor de zomer (1 april - 30 september), blauw voor de winter (1 oktober - 31 maart). Bewerkt uit Stolte et al. (2023).

## 2.2 Saliniteit en verspreiding IJsselmeerwater in de Waddenzee

### 2.2.1 Saliniteitsverdeling en -fluctuatie

De langjarig gemiddelde saliniteitsverdeling in de Waddenzee wordt gekarakteriseerd door een relatief lage saliniteit en sterke fluctuaties nabij de spuilocaties en langs de vastelandskust. Dit is te zien in Figuur 2-4, waar de gemiddelde saliniteit en standaarddeviatie van de daggemiddelde saliniteit zijn getoond voor de periode 2005-2022, op basis van gevalideerde hindcast simulaties door Donatelli et al. (2022-b). Nabij de eilanden, in de zeegaten en in diepe geulen is de gemiddelde saliniteit hoger en heeft een lagere standaarddeviatie dan in de wateren langs de Friese kust en op het Balgzand (Figuur 2-4).



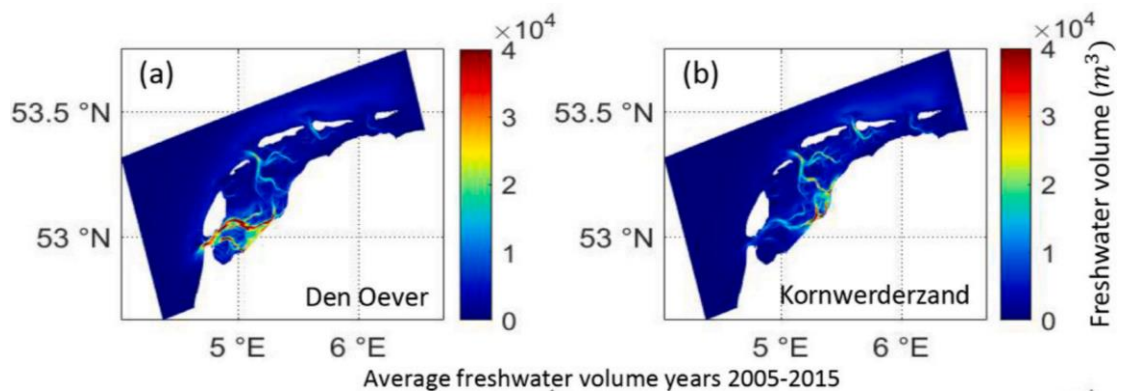
Figuur 2-4 Langjarig gemiddelde (2005-2015) saliniteit (links) en standaarddeviatie van de daggemiddelde saliniteit (rechts) op basis van modelberekening door Donatelli et al. (2022-b). Peilen geven weer hoe het IJsselmeerwater de Waddenzee verlaat door middel van resttransport. Het zoete water dat bij Den Oever gespuid wordt, verlaat de Waddenzee voornamelijk door het Marsdiep. Voor het zoete water dat bij Kornwerderzand gespuid wordt, is resttransport over het wantij van Terschelling de belangrijkste uitstroomroute.

De saliniteit fluctueert op verschillende tijdschalen onder invloed van het getij, de variatie in de zoetwateraanvoer (spuidebieten) en wind condities. Volgens Donatelli et al. (2022-b) is het M2-getij het belangrijkste proces dat de dagelijkse saliniteitsfluctuatie beïnvloedt. De seizoenfluctuatie wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de klimatologische en deels mensgedreven variatie in de zomer en winterafvoeren uit het IJsselmeer (van Aken, 2008). Op langere tijdschalen worden extreme zoutfluctuaties vooral veroorzaakt door wind condities en/of zoetwateraanvoeren die afwijken van de statistisch verwachte waarden (Donatelli, et al., 2022-b; Fajardo-Urbina, et al., 2023).

### 2.2.2 Hoe het gespuid IJsselmeerwater zich verspreid en de Waddenzee verlaat

Zodra het IJsselmeerwater de Waddenzee bereikt, verspreidt het zich onder invloed van het getij, de wind en barocline processen. De ruimtelijke verspreiding van zoetwater (in volume), het resttransport (in volume per tijdseenheid) en de saliniteit (in PSU) zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden, maar kunnen een vertekend beeld van elkaar geven wanneer ze met elkaar verwisseld worden.

Door ruimtelijke verschillen in diepte en menging bevatten gebieden met een lage saliniteit in de Waddenzee niet per se de grootste volumes zoet IJsselmeerwater (Duran-Matute, et al., 2016). Figuur 2-5 toont de gemiddelde verspreiding van IJsselmeerwater in de Waddenzee. In termen van gespuid volume, verblijft het meeste IJsselmeerwater in de geulen van de Waddenzee. Toch zijn deze geulen juist relatief zout ten opzichte van de rest van de Waddenzee (Figuur 2-4).



*Figuur 2-5 Langjarig gemiddelde (2005-2015) verspreiding van IJsselmeerwater ( $m^3$ ) dat gespuid wordt in Den Oever (a) en Kornwerderzand (b) op basis van modelberekeningen door Donatelli et al. (2022-a). Gemiddeld bevindt het meeste zoete water zich in de geulen van de Waddenzee (groen/geel/rode kleur).*

Hoewel de geulen gemiddeld veel zoet water bevatten, zijn het niet altijd de belangrijkste transportroutes waarlangs het IJsselmeerwater de Waddenzee verlaat (Duran-Matute, et al., 2016; Donatelli, et al., 2022-b). Het IJsselmeerwater dat uitstroomt bij Den Oever en Kornwerderzand verlaat de Waddenzee via verschillende routes. Het zoete water dat bij Den Oever gespuid wordt, verlaat de Waddenzee voornamelijk door het Marsdiep (Postma, 1950; Duran-Matute, et al., 2014). Voor het zoete water dat bij Den Oever gespuid wordt, is resttransport over het wantij van Terschelling de belangrijkste uitstroomroute, samen met het Marsdiep (Duran-Matute, et al., 2014; Donatelli, et al., 2022-a). Hoewel de hoofdgeul van het Vlie relatief veel zoetwater van Kornwerderzand huisvest (in volume; zie Figuur 2-5), stroomt het water daar in en uit met het getij maar verlaat het niet de Waddenzee. Het Marsdiep en het wantij van Terschelling fungeren in dat opzicht veel meer als uitstroomroutes voor het zoete IJsselmeerwater (Duran-Matute, et al., 2014; Donatelli, et al., 2022-a). Wind-gedreven resttransport over het wantij van Terschelling is van dezelfde orde grootte als de resttransporten door de zeegaten van de Waddenzee.

De transportroutes van het IJsselmeerwater zijn impliciet terug te zien in de gemiddelde saliniteit Figuur 2-4 (links). Zo strekt de zoetwaterpluim afkomstig uit Kornwerderzand zich uit tot ten oosten van het wantij van Terschelling, in de richting waarheen het zoete water de Waddenzee verlaat. De zoetwaterpluim afkomstig uit Den oever strekt zich uit tot het Marsdiep en verlaagt de gemiddelde saliniteit vooral in de ondiepe delen van de westelijke Waddenzee, zoals het Balgzand - gelegen tussen Wieringen en Den Helder.

### 2.2.3 Het belang van wind voor de verversing van het IJsselmeerwater

Waar IJsselmeerwater dat op de ene locatie gespuid is binnen een paar dagen alweer de Waddenzee uit is gestroomd, kan dat op een andere locatie of moment wel tientallen dagen duren (Hoekstra & Philippart, 2021). Verversingstijd ('flushing time') is een maat voor de snelheid waarmee het zoete water een gebied verlaat. In de context van de Waddenzee is verversingstijd gedefinieerd als de tijd die nodig is om het Waddenzeewater dat zoeter is geworden weer te verversen met zout water (van Reen, 2005). In Duran-Matute et al. (2014) is de verversingstijd als de verhouding tussen 1) het getijgemiddelde volume van zoet water in de Waddenzee en 2) de getijgemiddelde reststroming van datzelfde water de Waddenzee uit. Andere begrippen uit de literatuur die iets zeggen over de snelheid waarmee water in een systeem vernieuwd wordt, zijn de leeftijd ('age') en verblijftijd ('residence time') van water. De leeftijd van water beschrijft hoe lang geleden het zoete water op een bepaalde locatie in de

Waddenzee de spuilocatie heeft verlaten. De verblijftijd van water geeft weer hoe lang het duurt voordat het water op een bepaalde locatie een afgebakend gebied - zoals de Waddenzee - verlaat.

Het IJsselmeerwater dat bij Kornwerderzand wordt gespuid, heeft een langere verversingstijd dan het water dat bij Den Oever de Waddenzee instroomt (Postma, 1950; Duran-Matute, et al., 2014). De verversingstijd is door Zimmerman (1976) ingeschat op 8 dagen voor het water uit Den Oever en 16 dagen voor Kornwerderzand. Volgens berekeningen door Duran-Matute et al. (2014) is de verversing van het IJsselmeerwater 27.5 dagen voor Den Oever en 38.6 dagen voor Kornwerderzand. Dit geldt waarschijnlijk vooral in de afwezigheid van extreme zuid(westen) winden (Donatelli, et al., 2022-a).

De reststroming in de Waddenzee wordt sterk beïnvloed door windcondities (Duran-Matute, et al., 2016), waardoor de verversingstijd ook sterk varieert in de tijd. Hierbij zijn zowel kortdurende windcondities zoals stormen van belang (Donatelli, et al., 2022-a), als de seizoens- en meerjarige variaties in atmosferische condities (Fajardo-Urbina, et al., 2023). Een van de belangrijkste transportroutes van het IJsselmeerwater uit Kornwerderzand, over het wantij van Terschelling, wordt grotendeels door (zuid)westenwinden aangedreven (Duran-Matute, et al., 2014). Maar ook de reststroming door de zeegaten is sterk beïnvloed door wind (Duran-Matute, et al., 2016). Bij extreme (zuid)westenwinden kan de transport over het wantij van Terschelling zodanig toenemen dat het water in de Waddenzee 10-15 keer sneller ververs wordt (Duran-Matute, et al., 2014; Donatelli, et al., 2022-a). Bij zwakke (zuid)westenwinden neemt de verversingstijd van het IJsselmeerwater uit specifiek Den Oever af, omdat er weinig transport richting de oostelijke Waddenzee kan plaatsvinden en het meeste water uit Den Oever snel de Waddenzee kan verlaten via het Marsdiep (Donatelli, et al., 2022-a). Wind kan dus de verversingstijd beïnvloeden door veranderingen in resttransport door de zeegaten en/of over de wantijen van de Waddenzee.

#### 2.2.4 Anomalieën in de saliniteit

Extremes zoetwateraanvoeren en/of windcondities kunnen statistisch afwijkende saliniteitswaarden (anomalieën) in de Waddenzee veroorzaken (Donatelli, et al., 2022-b; Fajardo-Urbina, et al., 2023). Hieraan liggen veranderingen in de zoetwaterbeschikbaarheid, resttransporten en verversingstijd ten grondslag. Extreem lage saliniteitswaarden langs de Friese kust komen bijvoorbeeld voor bij hoge afvoeren en/of sterke zuidwestenwinden die resttransport veroorzaken in oostelijke richting. Extreem lage saliniteitswaarden op het Balgzand kunnen juist voorkomen bij zwakke zuidwestenwinden of sterke oostenwinden, waarbij het IJsselmeerwater dat bij Den Oever gespuid wordt, 'gevangen' blijft in het Marsdiep (Donatelli, et al., 2022-b).

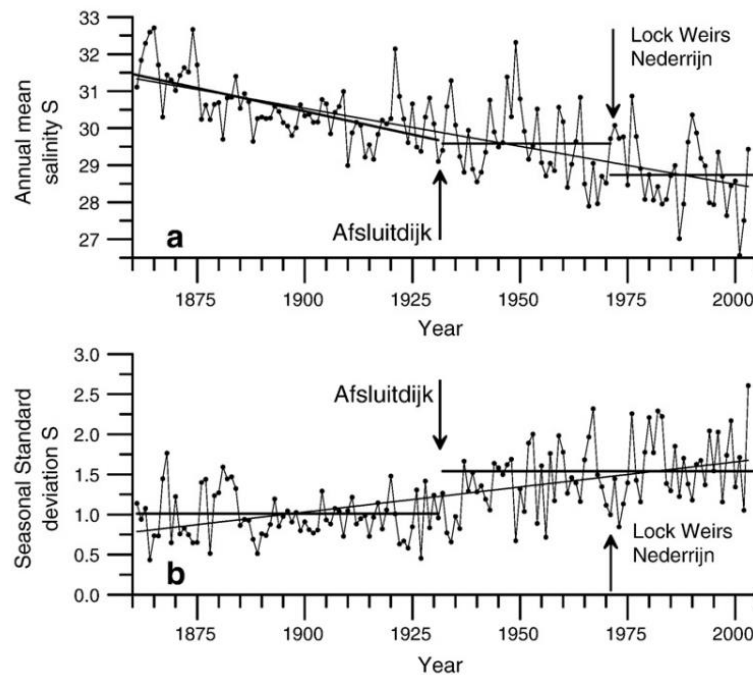
De sterkste anomalieën in saliniteit worden veroorzaakt in gebieden met een beperkte wateruitwisseling met de omgeving en dus een lange verversingstijd, zoals getijdeplaten (Donatelli, et al., 2022-b; Mitra, et al., 2023). De slibrijke gebieden voor de Friese kust zijn een voorbeeld van een gebied met een beperkte wateruitwisseling en lange verversingstijd. Hier herstelt de saliniteit zich moeilijker als deze eenmaal extreem hoog of laag is (Mitra, et al., 2023). In gebieden met een sterke wateruitwisseling met de omgeving (zoals geulen) herstelt de saliniteit zich sneller na extreme condities (Donatelli, et al., 2022-b).

## 2.3 Saliniteit in een historisch perspectief

### 2.3.1 Historische ontwikkeling

Metingen in het Marsdiep sinds het einde van de negentiende eeuw laten zien dat de saliniteit in de Waddenzee al langer dan 150 jaar onderhevig is aan veranderingen. De ontwikkeling van zoutgehalten en -fluctuaties in het Marsdiep sinds het einde van de negentiende tot het begin

van de twintigste eeuw zijn gerelateerd aan menselijke ingrepen in de IJssel, Rijn en voormalige Zuiderzee (van Aken, 2008). Saliniteitsmetingen laten zien dat het Marsdiep sinds 1860 zoeter is geworden, terwijl de tijdsfluctuaties in zoutgehalte zijn toegenomen (Figuur 2-6).

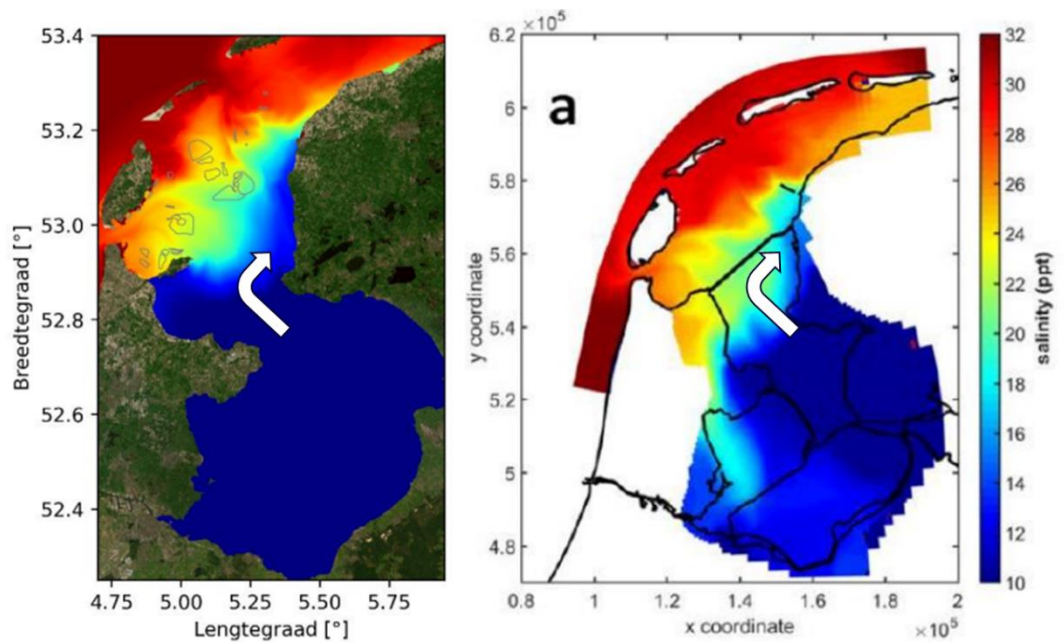


Figuur 2-6 Langetermijn ontwikkeling van de jaargemiddelde saliniteit in het Marsdiep (a) en de standaarddeviatie binnen dat jaar (b). Uit Van Aken (2008).

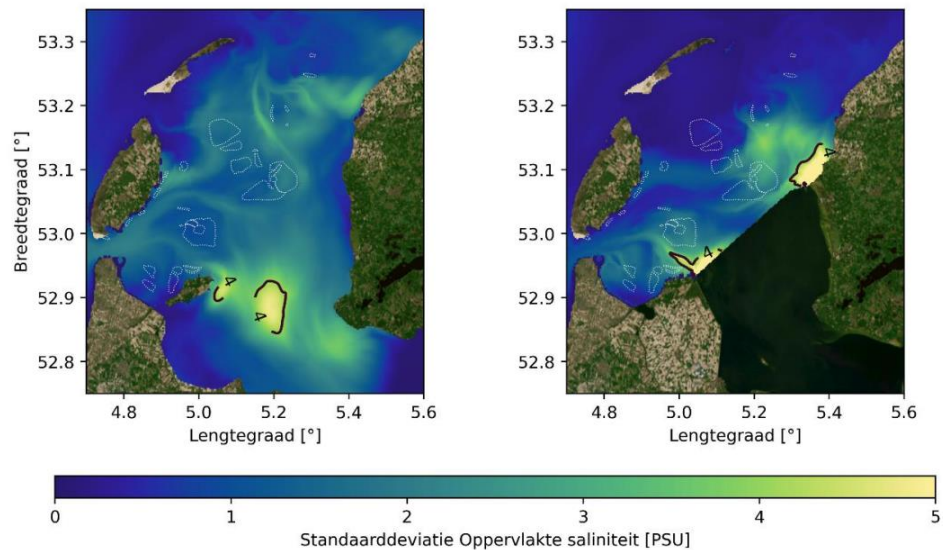
Een belangrijk voorbeeld van een menselijke ingreep die de saliniteit in de Waddenzee sterk beïnvloed heeft, is de bouw van de Afsluitdijk in 1933. Voor de bouw van de Afsluitdijk stroomde zoetwater via rivieren de voormalige Zuiderzee in, waarna het zich geleidelijk mengde met zouter water uit de Noord- en Waddenzee (van Reen, 2005; Smits, et al., 2023). Dit is te zien in Figuur 2-7, waar de historische saliniteit wordt getoond op basis van twee verschillende modelstudies (Smits, et al., 2023; Iwamoto, 2016).

Door de bouw van de Afsluitdijk is de voormalige Zuiderzee een zoetwatermeer geworden (het IJsselmeer) en is de locatie waar het zoete water de Waddenzee bereikt noordwaarts opgeschoven. Hierdoor is de overgang van zoet naar zout water minder geleidelijk is geworden (Van der Hoeven, 1982) en is het gebied met de sterkste saliniteitsfluctuatie ook noordwaarts opgeschoven, van de Zuiderzee naar de Waddenzee (zie Figuur 2-8) (Smits, et al., 2023).

Mogelijk is de verzoeting door de bouw van de Afsluitdijk sterker in de westelijke dan in de oostelijke Waddenzee (Smits, et al., 2023). Er wordt namelijk relatief veel via Den Oever gespuid, waardoor dit gebied in de westelijke Waddenzee tegenwoordig relatief veel zoetwater ontvangt en de saliniteit op het Balgzand is afgenomen (Van der Hoeven, 1982; van Reen, 2005). Dit staat in contrast met de tijd vóór de bouw van de Afsluitdijk, toen de zoetwaterpluim juist meer oostwaarts afboog en het Balgzand nog relatief zout was (zie Figuur 2-7).



Figuur 2-7 Saliniteit nabij het wateroppervlak, op basis van Smits et al. (2023) (links) en Iwamoto (2016) (rechts), beiden vóór de bouw van de Afsluitdijk.



Figuur 2-8 Standaarddeviatie saliniteit als proxy voor de seizoensvariatie: vòòr (links) en ná de bouw van de Afsluitdijk (rechts). Modelresultaten van Smits et al. (2023).

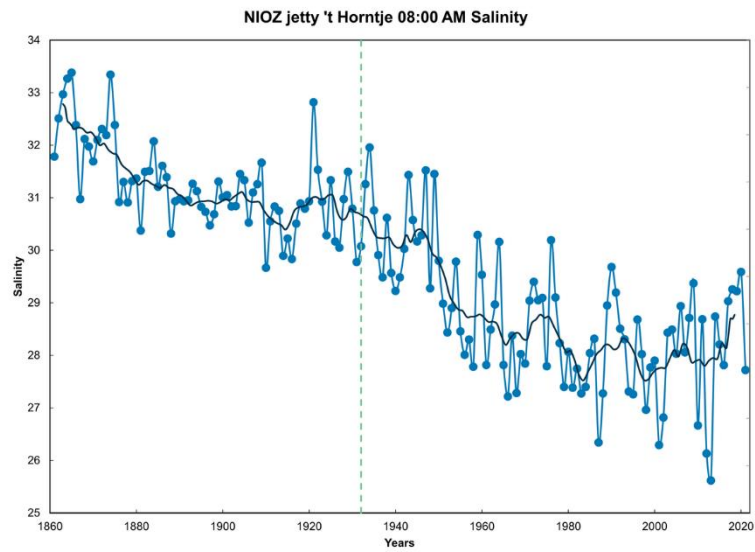
### 2.3.2 Toekomstige ontwikkeling

In het recente Wadden Sea Quality Status Report (Philippart, et al., 2024) wordt vastgesteld dat in de laatste decennia een verzilting optreedt in de Waddenzee. Dit wordt geconcludeerd op basis van metingen in het Marsdiep (Figuur 2-9), en wordt toegeschreven aan zoetwaterretentie in het IJsselmeer, toename van verdamping, en het omkeren van de reststroming door het Marsdiep van uit- naar instroming door klimaatverandering (Philippart, 2024; van der Molen, 2022).

In de toekomst zouden zeespiegelstijging, drogere zomers en nattere winters ook de saliniteit in de Waddenzee kunnen beïnvloeden. Uit Witteveen en Bos (2015) blijkt dat verzilting door zeespiegelstijging alleen optreedt als de bodem niet even hard meestijgt.



De sterkste verzilting zou dan optreden in het Marsdiepbekken in de winter. Een toename in het verschil tussen de zomer en winterafvoeren, zou verder kunnen leiden tot een sterkere seizoenfluctuatie in saliniteit en het periodiek wegvallen van de overgang van zoet naar zout water in de zomer (NIOZ, 2024).



Figuur 2-9 Langetermijn ontwikkeling van de jaargemiddelde saliniteit in het Marsdiep. Zelfde data als Figuur 2-6, maar met recentere jaren. Bron: Philippart et al. (2024)

## 3 Literatuurstudie ecologische effecten saliniteit

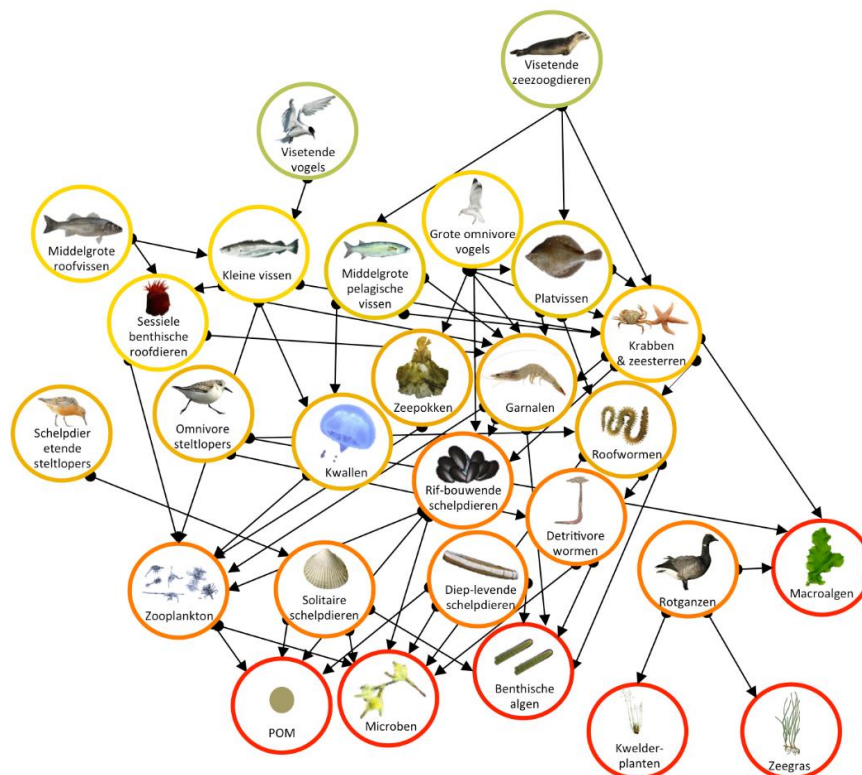
Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van een literatuurstudie en 2 interviews naar wat bekend is over mogelijke ecologische effecten van saliniteitsveranderingen: in het algemeen en specifiek in de Waddenzee. Op basis van deze resultaten worden indicatoren voor saliniteit voorgesteld om een voorzichtige doorvertaling te kunnen maken van veranderingen aan afvoerregimes vanuit het IJsselmeer naar ecologische effecten in de Waddenzee. Paragraaf 3.1 introduceert de complexiteit die hierbij komt kijken en illustreert op basis van beschikbare metingen welke soorten potentieel beïnvloed kunnen worden. Paragraaf 3.2 bespreekt de gevoeligheid van deze soorten voor saliniteitsveranderingen in estuariene gebieden wereldwijd. In Paragraaf 3.3 wordt onderzocht in hoeverre deze kennis ook van toepassing is op de Waddenzee. Hier worden tevens de saliniteitsindicatoren besproken die in deze studie zijn gebruikt om ecologische effecten te beoordelen.

### 3.1 De Waddenzee: effecten op een complex ecosysteem

#### 3.1.1 Effecten staan nooit op zichzelf

Saliniteit wordt gezien als een van de belangrijkste factoren voor de verspreiding van aquatische organismen en verschillen in soortensamenstellingen (Smyth, et al., 2016). Maar Daarnaast spelen ook andere factoren een rol, zoals: temperatuur, concentraties van nutriënten en contaminanten, stroming en de schuifspanning en de samenstelling van de bodem. Hoewel correlaties tussen soorten en specifieke parameters kunnen worden aangetoond, kan het voorkomen van specifieke soorten dus zelden direct gekoppeld worden aan een enkele omgevingsfactor. In de Waddenzee zijn nutriëntenconcentraties sterk gecorreleerd met saliniteit, doordat nutriëntenconcentraties in het IJsselmeer veel hoger zijn dan in het kustwater (Leote, et al., 2016). In deze literatuurstudie is alleen gekeken naar de directe ecologische effecten van saliniteit en niet naar indirecte effecten via bijvoorbeeld nutriënten.

De verscheidenheid aan habitats en de zout-zoet gradient in de Waddenzee heeft ertoe bijgedragen dat er een complex voedselweb is ontstaan, waarin verschillende soorten elkaar beïnvloeden door predatie, competitie en samenwerking. Gezien deze grote mate van afhankelijkheid tussen en binnen soortgroepen, kunnen effecten van stressoren zoals saliniteit op individuele soorten indirecte effecten hebben op andere soorten in het voedselweb. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 3-1, waarin een schematisch voorbeeld gegeven wordt van relaties tussen groepen organismen in het voedselweb van de Waddenzee. Door dergelijke afhankelijkheden kan een afname van een soort of soortgroep onder sommige omstandigheden leiden tot positieve effecten op een andere soort: bijvoorbeeld wanneer het een predator of een concurrerende soort betreft. Het omgekeerde komt ook voor: als een soort afneemt die als voedselbron dient voor andere soorten, dan hebben die andere soorten minder voedsel ter beschikking.



Figuur 3-1 Schematische weergave van de voedselrelaties in de Waddenzee (door Marjolijn Christianen; <http://penyu.nl/research/>). De verschillende componenten in de figuur representeren in de meeste gevallen een groot aantal soorten met een vergelijkbare functie binnen het ecosysteem.

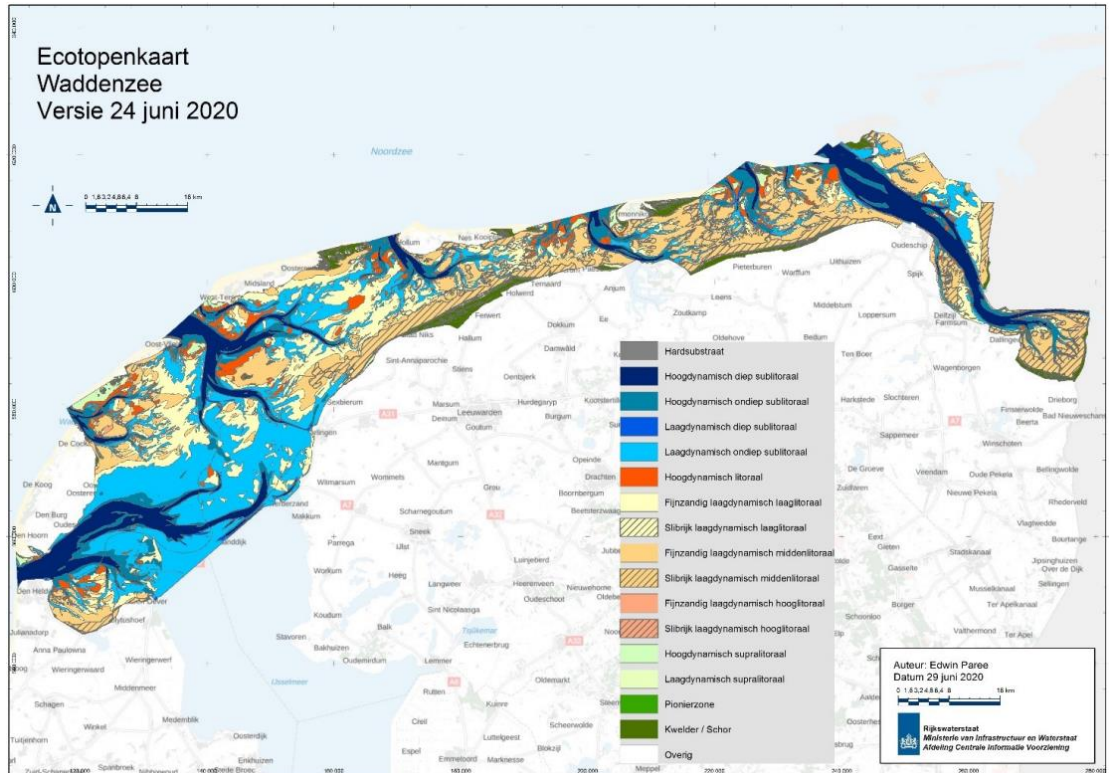
### 3.1.2 Ecotopen in de Waddenzee

De zoute ecotopenkaart van de Waddenzee van 2017 (Paree, et al., 2020) is ontwikkeld om inzicht te geven in de ruimtelijke variatie in habitattypen of “ecotopen”, en is gebaseerd op het Zoute Ecotopenstelsel (ZES.1) (Bouma, et al., 2005). Met een ecotopenkaart wordt op basis van abiotische parameters die relevant zijn voor organismen onderscheid gemaakt tussen landschappelijke eenheden. Door de biotische relevantie van deze abiotische parameters kunnen deze ecotopen in theorie gekoppeld worden aan beschikbare habitats voor verschillende (voornamelijk benthische) organismen. Binnen het Ecotopenstelsel zijn de saliniteit (gemiddelde en variatie), het substraat, de diepte en de mate van dynamiek genoemd als de belangrijkste abiotische omgevingsfactoren voor zoute en brakke wateren in Nederland (Bouma, et al., 2005).

Op basis van de grenswaarden die binnen het Ecotopenstelsel gehanteerd worden is het grootste deel van de Waddenzee zout en niet variabel. Het gebied rond de afsluitdijk is brak (onder de 18 PSU gemiddeld). Twee kleine gebieden rondom de zoetwaterafvoerlocaties Kornwerderzand en Den Oever zijn daarnaast ook zeer variabel in saliniteit (> 100% variabel).

Alleen de geulen in de Waddenzee behoren tot het hoogdynamisch sublitoraal ecotoop, de overige gebieden zijn voornamelijk laagdynamisch. Hoog- en laagdynamische gebieden worden gekenmerkt door respectievelijk een relatief hoge en lage stroomsnelheid en/of golfdynamiek. De kombergingsgebieden van het Eierlandse gat, het Vlie en het Bordiep, en de oostelijke Waddenzee bestaan voor een groot deel uit *litorale* (droogvallende) ecotopen, terwijl het Marsdiep relatief veel *sublitorale* gebieden kent die constant onder water staan. Het grootste deel van het litorale areaal is laagdynamisch en bestaat uit fijnzandig substraat, maar op het Balgzand (in het Marsdiep) en langs de Friese en Groninger kust worden ook slibrijke

gebieden aangetroffen. Voor een uitgebreide beschrijving van de ligging en condities van verschillende ecotopen in de Waddenzee, verwijzen we naar Paree, et al. (2020).



Figuur 3-2 De ecotopenkaart van de Waddenzee 2017 (Paree et al., 2020).

### 3.1.3 Belang van macrobenthos in het voedselweb

Informatie over het soortvoorkomen van macrobenthos is nuttig om inzicht te krijgen in de ecologische effecten van veranderingen in saliniteit in de Waddenzee. Macrobenthos heeft namelijk als groep onder aan de voedselketen een cruciale rol voor de energiebehoefte voor hogere trofische niveaus (Cadée & Hegeman, 1974; Christianen, et al., 2017). Een belangrijk deel van de totale productiviteit komt in deze groep terecht, omdat veel soorten afhankelijk zijn van de pelagische productiviteit (primair en secundair), zoals de kokkel (*Cerastoderma edule*), de mossel (*Mytilus edulis*) en de schelpkokerworm (*Lancine conchilega*) (Christianen, et al., 2017). Deze groep is ook relevant in het kader van de ruimtelijke analyse van de effecten van veranderingen in saliniteit, omdat de meeste soorten niet of weinig mobiel zijn en daarom extra gevoelig zijn voor veranderingen in lokale omstandigheden. Voor pelagische soorten daarentegen kan worden aangenomen dat ze gebieden met tijdelijk slechte condities kunnen vermijden door weg te zwemmen (nekton) of door (getij-)stromingen verplaatst worden over een groter gebied (plankton). Een uitzondering zijn diadrome vissoorten (d.w.z. migrerend tussen zoet en zout water); deze zijn voor het lokaliseren van riviermondingen afhankelijk van een waarneembare overgang tussen zoet en zout water.

De meeste langdurige onderzoeken naar het voorkomen van biota in de Waddenzee zijn ook gericht op het bemonsteren van benthische macrofauna. Voornamelijk in het intergetijdengebied zijn hier veel meetgegevens van verzameld. Voorbeelden zijn SIBES (Synoptic Intertidal Benthic Survey), het Waddenmozaïekproject en inventarisaties vanuit de Wettelijke Onderzoekstaken (WOT) voor de visserij (van Donk & Baptist, 2021). Een ander deel van de meetprogramma's heeft als voornaamste doel om ontwikkelingen op populatieniveau over de tijd te monitoren. Dit geldt met name voor soorten van hogere trofische niveaus met een status waarop ook beleid gevoerd wordt, zoals zeehonden, vissen en

vogelsoorten. Resultaten die hieruit voortkomen zijn niet geschikt om op ecotoopniveau te gebruiken, gezien de hoge mate van mobiliteit en de schaal en frequentie waarop deze soortgroepen worden gemonitord.

### 3.1.4 Soortvoorkomen per ecotoop

In het kader van de validatie van de ecotopenkaart van 2017 door van Donk en Baptist (2021) zijn data van SIBES en de resultaten van het Waddenmozaïek gebruikt om karakteristieke macrobenthische soorten per ecotoop vast te stellen op basis van biomassa en voorkomen. Het overzicht van de verwerkte SIBES/Waddenmozaïek data (Bijlage A) laat zien dat de samenstelling van macrobenthische organismen tussen sommige ecotopen in grote mate overeenkomt, maar dat er ook verschillen in soortensamenstelling tussen ecotopen zichtbaar zijn.

Uit de bevindingen van Van Donk en Baptist (2021) blijkt dat in ieder ecotoop tweekleppige schelpdieren (*Bivalva*) de biomassa domineren en borstelwormen (*Polychaeta*) het meest frequent worden waargenomen. Daarnaast worden, in mindere mate, enkele groepen vlokreeften (*Amphipoda*) tot de karakteristieke soorten gerekend in meerdere ecotopen.

De diversiteit van karakteristieke soorten is over het algemeen groter in de litorale gebieden dan in de sublitorale gebieden. Dit blijkt uit de verdeling van de biomassa en het voorkomen van soorten (van Donk & Baptist, 2021). Wat betreft de schelpdieren is de Amerikaanse zwaardschede (*Ensis leei*) verantwoordelijk voor het overgrote deel van de biomassa in de hoogdynamische sublitorale gebieden. In de laagdynamische sublitorale gebieden is deze soort ook talrijk, samen met de strandgaper (*Mya arenaria*). Daarnaast is ook in het hoogdynamisch fijnzandig litoraal en het laagdynamisch fijnzandig laaglitoraal de Amerikaanse zwaardschede verantwoordelijk voor een aanzienlijk deel van de biomassa. De kokkel (*Cerestoderma edule*) speelt in alle litorale gebieden een rol van betekenis. De strandgaper is vooral karakteristiek in het slibrijke deel van het litoraal. Van de borstelwormen worden in de hoogdynamische sublitorale gebieden slangpieten (*Capitella sp.*) het vaakst aangetroffen. In het laagdynamisch zacht substraat zijn bijna alle metingen afkomstig in het ondiepe deel, hier wordt vooral de wapenworm (*Scolopisis armiger*) gevonden. Deze soort wordt ook in het hoogdynamisch fijnzandig litoraal het meest aangetroffen. De zandpijp (*Pygospio elegans*) komt in alle ondiepe en litorale gebieden veel voor, maar is vooral dominant in de laagdynamisch fijnzandige litorale gebieden. In de fijnzandige litorale gebieden (zowel hoog- als laagdynamisch) is de zeepier (*Arenicola marina*) verantwoordelijk voor een significant deel van de biomassa. In het laagdynamisch slibrijke litoraal komt de rode draadworm (*Heteromastus filiformis*) in nagenoeg alle monsters terug. Het complete overzicht van de verwerkte data is terug te vinden in Bijlage A en in Tabel 1 en 2 uit van Donk en Baptist (2021). Grotere mobiele macrobenthische, zoals de grijze garnaal (*Crangon crangon*), de strandkrab (*Carcinus maenas*) en de gewone zeester (*Asteria rubens*) zijn overigens niet meegenomen in het overzicht van Van Donk en Baptist.

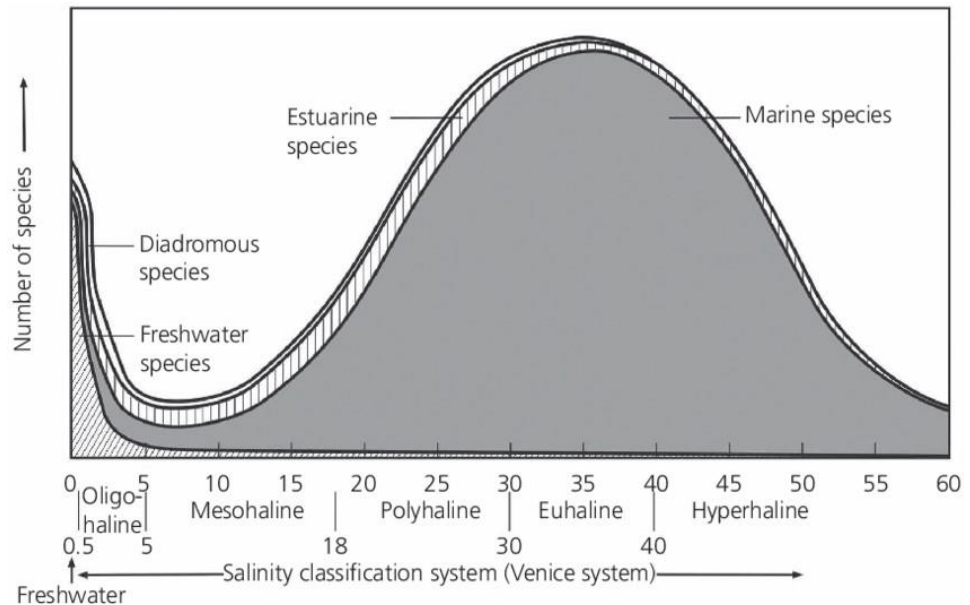
## 3.2 Effecten saliniteit op ecologie in estuaria

*Saliniteit is een belangrijke parameter voor de soortensamenstelling in een gebied. Organismen moeten een stabiel intern milieu handhaven en de saliniteit van het omgevingswater heeft hier een sterke invloed op. Het belang van saliniteit voor organismen wordt geïllustreerd in*

*Figuur 3-3 door de curve van Remane (Remane, 1934), of in dit geval een bijgewerkte versie voor estuaria (Whitfield, et al., 2012).*

Figuur 3-3 laat zien dat de meeste organismen zijn aangepast aan ofwel een zoet (saliniteit < 0.5 PSU) ofwel een zout (saliniteit > 30 PSU) milieu. Het aantal soorten in brakke wateren is lager. Slechts enkele soorten die hieraan aangepast zijn - zoals trekvis - kunnen komen voor binnen een groot bereik aan saliniteitswaarden. In estuariene gebieden draagt de grote bandbreedte aan saliniteitswaarden bij aan de ecologische diversiteit van deze gebieden,

omdat naast mariene soorten ook typische brak- en eventueel zoetwatersoorten zich kunnen huisvesten.

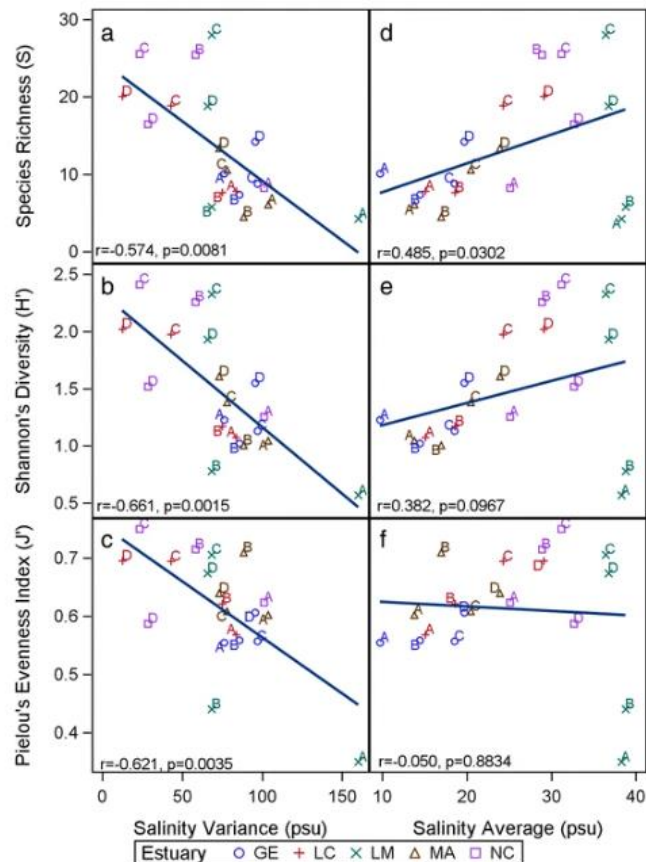


Figuur 3-3 Het relatieve voorkomen van soort aantallen bij verschillende saliniteitswaarden in estuaria. Een aanpassing op de curve van Remane (1934) door Whitfield et al. (2012). De Waddenzee omvat een brede bandbreedte aan saliniteitswaarden (0-30 PSU), maar bevat voornamelijk mariene soorten.

Daarnaast heeft de mate van variatie van de saliniteit in de tijd grote invloed op de ecologie in dynamische of estuariene gebieden. Van Diggelen en Montagna (2016) laten zien dat de variantie van saliniteit in estuaria (als indicator voor de variatie in de tijd) sterk negatief gecorreleerd is met diversiteit (Figuur 3-4). Ook in het ZES.1 Ecotopenstelsel is de mate van variatie (naast de gemiddelde saliniteitswaarde) opgenomen in de classificatie voor saliniteit in Nederlandse kustwateren. Een hoge mate van variatie kan ervoor zorgen dat organismen met regelmaat worden blootgesteld aan (kritische) saliniteitswaarden die hun overlevingskansen of voortplanting beïnvloeden. Dit betekent niet dat hoge mate van fluctuaties in alle gevallen ongewenst zijn: de verscheidenheid aan habitats die doorgaans aangetroffen wordt in estuaria draagt bij aan de totale diversiteit van het gebied (Dankers, et al., 1994). Sommige specialistische (pioniers)soorten kunnen zich juist goed vestigen in gebieden met een hoge mate van variatie in saliniteit.

De effecten van saliniteit op het voorkomen van specifieke soorten organismen zijn niet eenvoudig te kwantificeren. Er is slechts een beperkt aantal studies uitgevoerd naar de tolerantie van organismen, zoals de karakteristieke soorten die benoemd werden in paragraaf 3.1.4 voor verschillende saliniteitswaarden en variatie in saliniteit. Bovendien zijn uitkomsten die hieruit naar voren komen, vaak niet direct met elkaar te vergelijken, met name vanwege verschillen in werkwijze. Zo hanteren experimentele studies verschillende maten (saliniteitswaarde) en tijdsduur van blootstelling, zijn er verschillen in de (lethale of sublethale) effecten die beschouwd worden, en kunnen er verschillen in tolerantie zijn tussen verschillende levensfasen (Peteiro, et al., 2016) welke niet altijd expliciet worden beschreven. Daarnaast speelt de origine van de organismen een belangrijke rol, zo is bijvoorbeeld voor de mosselsoorten van de familie *Mytilidae* (Knöbel, et al., 2021) en voor de gewone zeester (*Asteria rubens*; (Saranchova, 2001) aangetoond dat individuen afkomstig uit een zoeter milieu toleranter zijn voor lage saliniteitswaarden dan organismen afkomstig uit een milieu met hogere saliniteitswaarden. Dit geeft aan dat er ook binnen soorten verschillen kunnen optreden in

tolerantie voor lage saliniteitswaarden. Uitkomsten van kritische saliniteitswaarden uit experimenteel onderzoek komen daarnaast ook regelmatig niet overeen met waarnemingen in het veld (Kefford, et al., 2004). Een mogelijke oorzaak hiervoor is de rol van andere biotische en abiotische factoren, naast saliniteit, die van invloed zijn voor het voorkomen van soorten.



Figuur 3-4 Variatie in saliniteit (kolom links) is significant negatief gecorreleerd met drie diversiteitindices (Species Richness, Shannon Diversity en Pielou Evenness Index; y-as van boven naar beneden) voor vijf onderzochte estuaria in de Golf van Mexico (Zuidoost Verenigde Staten). De gemiddelde saliniteit laat alleen met soortenrijkdom een positief significante correlatie zien ( $p < 0.05$ ). Figuur uit van Diggelen en Montagna (2016).

Ondanks de onzekerheid in absolute grenswaarden voor soorten, kan er op basis van de literatuur wel worden aangenomen dat er verschillen zijn in tolerantie voor lage saliniteit. Zo is de rode draadworm (*Heteromastus filiformis*) beter bestand tegen lage saliniteitswaarden dan de zeepier (*Arenicola marina*) (Ysebaert, et al., 2002) en kan bijvoorbeeld aangenomen worden dat de kokkel (*Cerastoma edule*; o.b.v. Peteiro, et al. (2016) en Verdelhos, et al. (2015)) minder tolerant is voor lage saliniteit dan de mossel (*Mytilus edulis*; o.b.v. Riisgård, et al., (2013), Troost, et al. (2022) en Westerbom, et al. (2002).

Voor veel tweekleppige schelpdieren uit een marien milieu wordt met name 15 PSU regelmatig als kritische waarde genoemd voor vermindering in fysiologische reacties en verhoogde mortaliteit (Rato, et al., 2022; Woodin, et al., 2020). De kans op het voorkomen van mosselen (*M. edulis*) in de Waddenzee is klein bij een gemiddelde saliniteit lager dan 15 PSU (van den Ende, van der Meer en Troost, persoonlijke communicatie, 7 november 2023), bij kokkels (*C. edule*) wordt in vitro instantaan oxidatieve stress en binnen 4 dagen mortaliteit waargenomen (Peteiro, et al., 2016) en groei en voortplanting van de Japanse oester (*Crassostrea gigas*) in de Duitse Waddenzee neemt af bij blootstelling aan deze waarde (Diederich, 2006).

Er is op zowel soortniveau als ecosysteemniveau weinig kwantitatief onderzoek gedaan naar de effecten van de variatie in saliniteit, hoewel dit mogelijk zeer relevant is.

Variatie is een vrij breed begrip en kan op meerdere manieren gedefinieerd worden. De mate van variatie is sterk afhankelijk van de tijdsduur waarover deze bepaald wordt. De frequentie van en tijdsduur tussen metingen is van invloed voor de uitkomsten evenals de interpretatie hiervan. Zo kan de variatie op basis van dagelijkse meetwaarden van saliniteit (zoals gedefinieerd in het ZES.1 stelsel) een goed beeld geven van de fluctuatie op korte tijdschaal, maar geeft deze parameter weinig inzicht in seizoenspatronen. Verschillen tussen gemiddelden in winter en zomer bieden hierin meer inzicht.

### 3.3 Effecten saliniteit op ecologie Waddenzee

#### 3.3.1 Inzichten uit literatuur en interviews

De effecten van saliniteit op de ecologie van de Waddenzee zijn niet eenduidig. Volgens Philippart & Epping (2009) zouden veranderingen in de toevoer van zoetwater kunnen leiden tot veranderingen in soortsmenstellingen in de Waddenzee. In van Donk & Baptist (2021) komt echter geen eenduidige grenswaarde voor soortvoorkomen naar voren, voor zowel het gemiddelde als de variatie in saliniteit. Voor beide indicatoren is namelijk geen duidelijke grens aan te wijzen waarbij de soortsmenstellingen onder en boven deze waarde significant van elkaar verschillen. Dit werd geconcludeerd op basis van een validatie van het ZES.1 Ecotopenstelsel waarbij de klassengrenzen van de verschillende abiotische indicatoren, waaronder ook saliniteit, gevalideerd zijn aan de hand van data afkomstig van SIBES en Waddenmozaiek.

De ecologische effecten van variatie in saliniteit in de Waddenzee zijn voor zover ons bekend niet onderzocht. Interviews met experts geven echter aan dat het waarschijnlijk is dat variatie in saliniteit een belangrijke invloed heeft op organismen in de Waddenzee en dat zoetwaterafvoeren van het IJsselmeer naar de Waddenzee hierin een belangrijke rol vervullen (Baptist, persoonlijke communicatie, 19 oktober 2023; van den Ende, van der Meer en Troost, persoonlijke communicatie, 7 november 2023). Dit geldt zowel voor variatie over relatief korte tijdschalen van enkele getijdencycli, waarin organismen in de directe invloedssfeer van afvoerlocaties aan grote verschillen in saliniteit kunnen worden blootgesteld (Baptist, persoonlijke communicatie, 19 oktober 2023) als over seizoenen, waarin door verschillen in afvoerdebieten langdurige verschillen in (seizoensgemiddelde) saliniteit kunnen optreden. Dit kan gevolgen hebben voor habitatgeschiktheid van organismen (van den Ende, van der Meer & Troost, persoonlijke communicatie, 7 november 2023).

#### 3.3.2 Keuze indicatoren saliniteit voor ecologische effecten

Uit de literatuurstudie komt naar voren dat bij saliniteitswaarden onder 15 PSU bij meerdere tweekleppige schelpdiersoorten verschillende directe negatieve (fitness-verlagende) effecten optreden. Daarnaast is de verwachting dat fluctuaties in saliniteit op zowel korte als lange termijn van invloed zullen zijn op het voorkomen van benthische organismen.

Om deze reden is ervoor gekozen om de modelresultaten van saliniteit bij verschillende afvoerregimes uit te drukken in de volgende indicatoren voor potentiële ecologische effecten:

- de duur dat een saliniteitswaarde van 15 PSU overschreden wordt
- het verschil in seizoensgemiddelde saliniteit tussen zomer en winter
- het verschil tussen maximale en minimale saliniteit binnen een korte periode van enkele getijdencycli



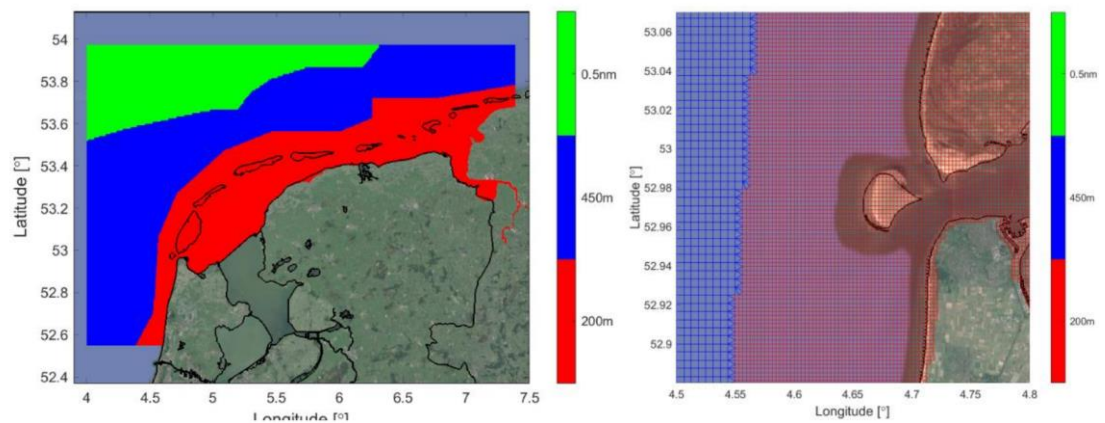
## 4 Beschrijving modelscenario's en analyse

Dit hoofdstuk beschrijft het numerieke model (Paragraaf 4.1) en de modelscenario's die gebruikt zijn om inzicht te krijgen in de effecten van afvoeranderingen op de zoutverdeling in de Waddenzee (Paragraaf 4.2). Verder is beschreven hoe de modelresultaten zijn geanalyseerd door voor elk modelscenario saliniteitsindicatoren te berekenen per ecotoop (Paragraaf 4.3).

### 4.1 Waddenzeemodel

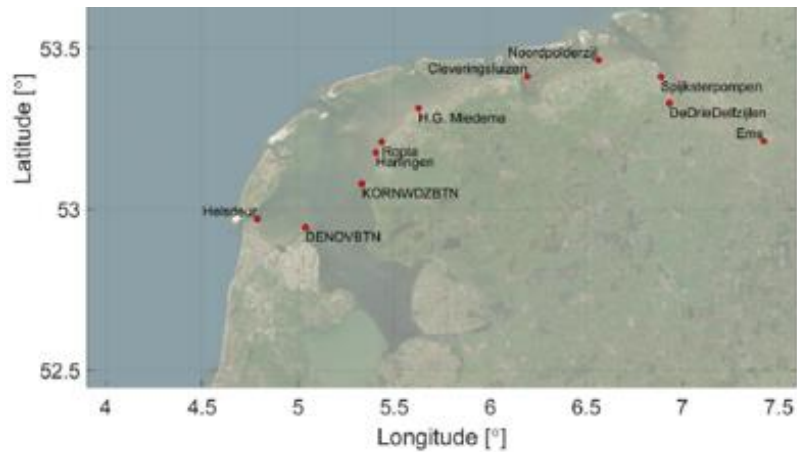
#### 4.1.1 Modelopzet

De modelstudie is uitgevoerd met behulp van het gevalideerde 3D Dutch Wadden Sea Model, een Delft3D-FM model van de Waddenzee met een horizontale resolutie van 200 meter (Figuur 4-1) en 10 sigma-lagen in de verticaal. Het model met randvoorwaarden van het jaar 2017 is gevalideerd op waterstanden en saliniteitswaarden op diverse locaties binnen en buiten de Waddenzee. Voor een volledige omschrijving van de modelopzet en -validatie wordt verwezen naar Zijl et al. (2023).



Figuur 4-1 Modeldomein en -resolutie van het Dutch Wadden Sea Model (DWSM), een Delft3D-FM model van de Waddenzee met een maximale resolutie van 200 meter.

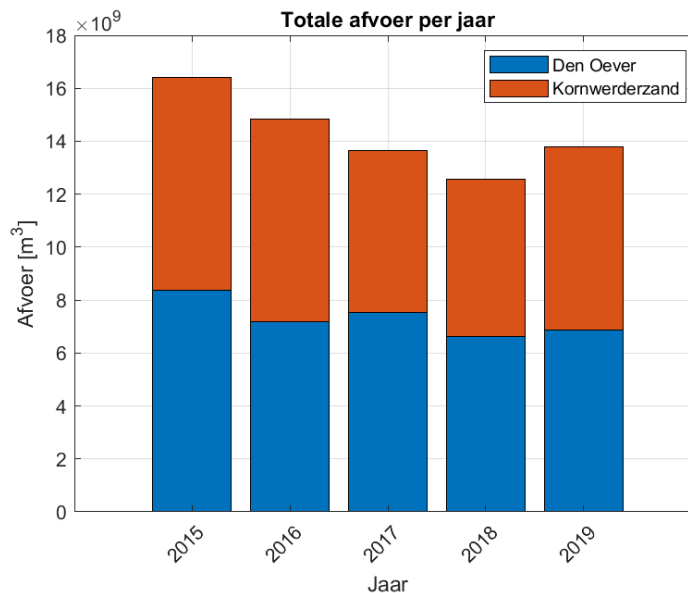
Het Waddenzeemodel bevat lozingen van zoetwater op verschillende locaties langs de Noord-Hollandse, Friese en Groningse kust (zie Figuur 4-2). De afvoeren in het model zijn gebaseerd op tijdseries van Rijkswaterstaat meetdata. De afvoeren in Den Oever en Kornwerderzand zijn met afstand het grootst en hebben daardoor ook de grootste impact op de saliniteit en hydrodynamica in de Waddenzee. De saliniteit van alle zoetwaterafvoeren is in het Waddenzeemodel ingesteld op 0.2 PSU. De watertemperatuur is gebaseerd op metingen van oppervlaktetemperatuur in de omgeving.



Figuur 4-2 De locaties van zoetwaterafvoer in het Waddenzeemodel (Zijl, et al., 2023).

#### 4.1.2 Representativiteit van IJsselmeerafvoer in 2017

Tijdseries van de zoetwaterafvoer in Den Oever en Kornwerderzand zijn beschikbaar van 2015 tot 2019 en tonen aanzienlijke verschillen van jaar tot jaar. Omdat het model is gevalideerd voor 2017 wordt dit jaar als referentie modelscenario gebruikt. Een vergelijking van alle beschikbare jaren laat zien dat 2017 een redelijk representatief jaar is wat betreft de totale afvoer en de verdeling van de afvoer over het jaar (Figuur 4-3 en Bijlage B). De totale afvoer in 2017 (13,6 miljard m<sup>3</sup>) is 5% lager dan het langjarig gemiddelde (14,4 miljard m<sup>3</sup>). De totale afvoeren in 2016 en 2019 liggen dicht bij het langjarig gemiddelde, maar voor deze jaren wijken de verdeling over het jaar (2016) of de verhouding Kornwerderzand – Den Oever (2019) sterker af van de representatieve situatie (zie Bijlage B voor tijdseries van alle beschikbare jaren).



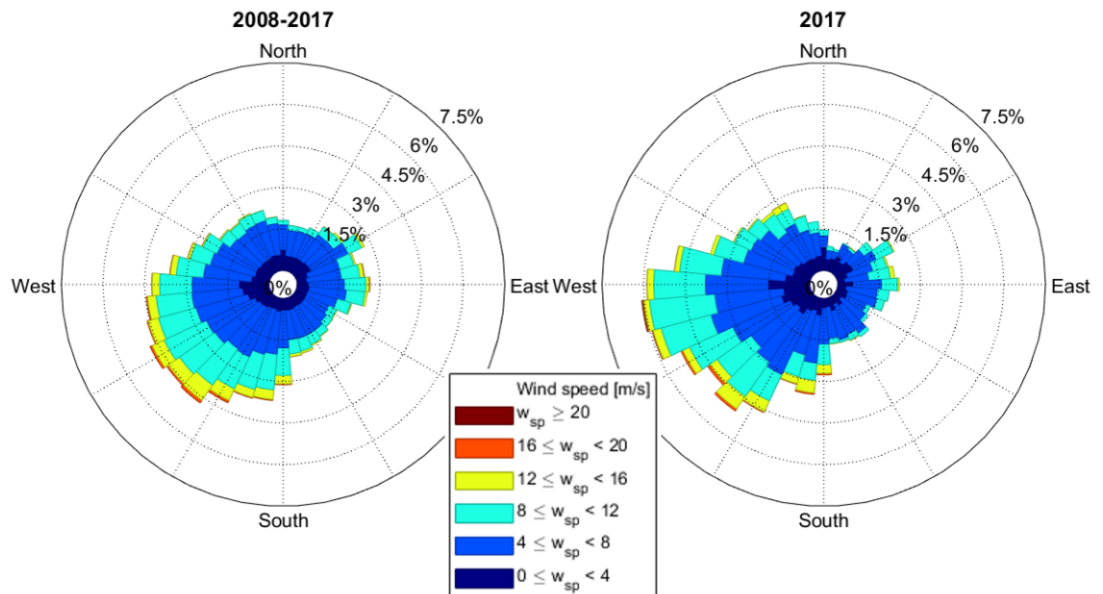
Figuur 4-3 Zoetwaterafvoer bij Den Oever en Kornwerderzand per jaar voor de beschikbare jaren in het model.

#### 4.1.3 Representativiteit van windcondities in 2017

De windcondities in 2017 zijn over het algemeen representatief voor de optredende windcondities zoals zichtbaar in de 10-jarige statistiek (Vroom et al., 2020; Figuur 4-4). Vooral de sterke winden zijn voor 2017 goed overeenkomstig met de windcondities in de tien voorgaande jaren. De wind was in 2017 wel vaker uit het westen gericht dan in de 10-jarige statistiek; het betreft hierbij vooral een zwakke tot matige wind uit het westen (4 – 8 m/s).

Zwakke tot matige winden uit het noorden en noordoosten kwamen in 2017 minder vaak voor dan in de tien voorgaande jaren.

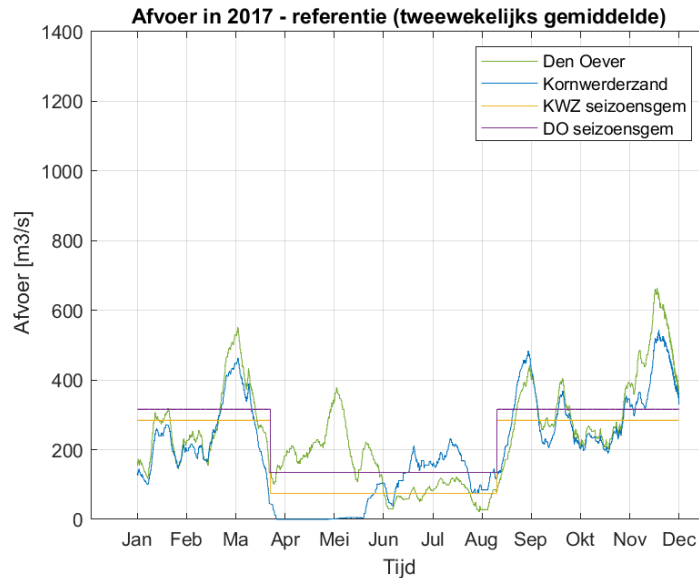
Over de invloed van wind op de saliniteitsverdeling in de Waddenzee is bekend dat bij sterkere zuidwestenwind meer oostwaarts transport van zoet water optreedt over het Terschellinger wantij langs de Friese kust (Duren-Matute, 2014; Donatelli et al., 2022-1, Donatelli et al., 2022-2). Om de invloed van wind op de zoutverspreiding in dit model te testen is een extra referentiesom zonder wind gedraaid (zie paragraaf 5.1.2).



Figuur 4-4 Windrozen zoals gemeten bij KNMI station Hoorn, Terschelling voor een periode van 10 jaar (2008-2017, links) en voor het jaar van de referentiesom (2017, rechts). Figuur afkomstig uit Vroom et al, 2020.

## 4.2 Afvoerscenario's

De komende deelparagrafen beschrijven welke afvoerscenario's zijn doorgerekend. Hiervoor zijn de tijdseries van de zoetwaterafvoer in Kornwerderzand en Den Oever van het jaar 2017 aangepast (Figuur 4-5). De overige modelinstellingen zijn gelijk gehouden. Hierdoor zijn de effecten van de verschillende afvoerregimes goed met elkaar te vergelijken. Voor ieder scenario is het model eerst een jaar ingespeeld. Vervolgens zijn alle scenario's gedraaid voor nog een volledig jaar, om de seizoensgebonden variatie in kaart te brengen en inzicht te krijgen in effecten van veranderingen in het afvoerregime op langere tijdschaal.

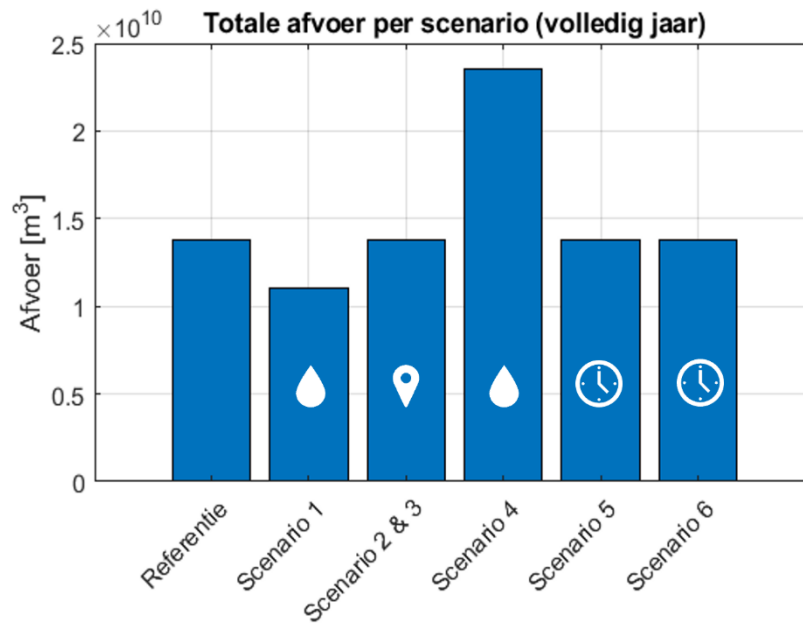


Figuur 4-5 Tijdsree waterafvoer in Den Oever (groene lijn) en Kornwerderzand (blauwe lijn) in 2017. Deze afvoeren worden gebruikt als referentie. In geel en paars zijn de seizoensgemiddelden voor respectievelijk Kornwerderzand en Den Oever aangegeven.

De invloed van drie variabelen: de afvoerlocatie, afvoervolumes en de lengte van het spuienster, wordt onderzocht aan de hand van zes hypothetische scenario's. Een overzicht van de scenario's staat in Tabel 4-1 en Figuur 4-6. Deze scenario's zijn opgesteld met als doel de bandbreedte van mogelijke saliniteitsveranderingen in de Waddenzee te verkennen. Ze zijn niet bedoeld als realistische toekomstscenario's.

Tabel 4-1 Beschrijving van de zes scenario's.

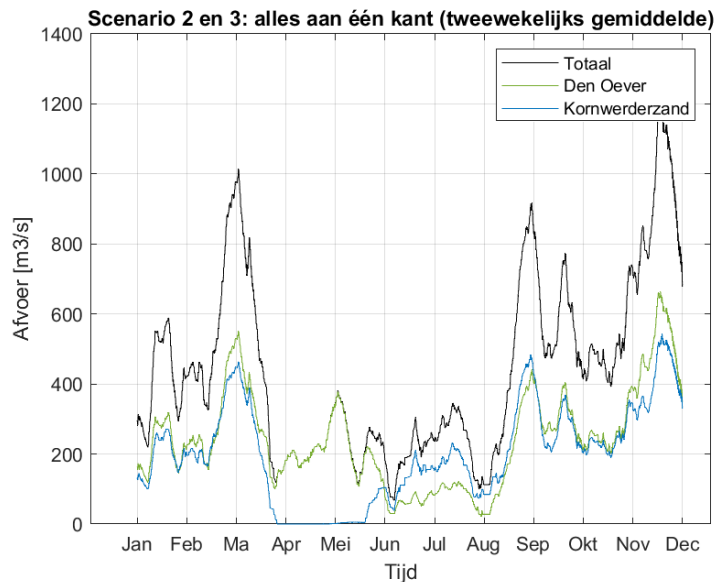
Scenario	Variabele	Beschrijving
1	Afvoervolume	Stoppen met spuien in de zomer (1 april – 1 augustus), normaal spuidebiet in de winter
2	Afvoerlocatie	Volledige afvoerdebit over Den Oever
3	Afvoerlocatie	Volledige afvoerdebit over Kornwerderzand
4	Afvoervolume	Twee keer zo veel water afvoeren in de winter (1 augustus – 1 april), twee keer zo weinig in de zomer (1 april – 1 augustus)
5	Lengte spuienster	Evenveel water afvoeren binnen een korter spuienster
6	Lengte spuienster	Continue afvoer (met een gemiddelde seizoenswaarde voor zomer en winter) verspreid over 4 locaties langs de afsluitdijk. Het totale volume blijft gelijk.



Figuur 4-6 Totale afvoer over het volledige jaar (voor Kornwerderzand en Den Oever bij elkaar opgeteld) voor alle scenario's.

#### 4.2.1 Afvoerlocatie

De invloed van de afvoerlocatie wordt onderzocht aan de hand van twee scenario's. In scenario 2 wordt het volledige debiet afgevoerd via Den Oever. Hiervoor worden de afvoeren in Den Oever en Kornwerderzand uit de referentie bij elkaar opgeteld (Figuur 4-7). De totale afvoer blijft dus gelijk, zoals te zien is in Figuur 4-7. In scenario 3 wordt dit volledige debiet afgevoerd bij Kornwerderzand.



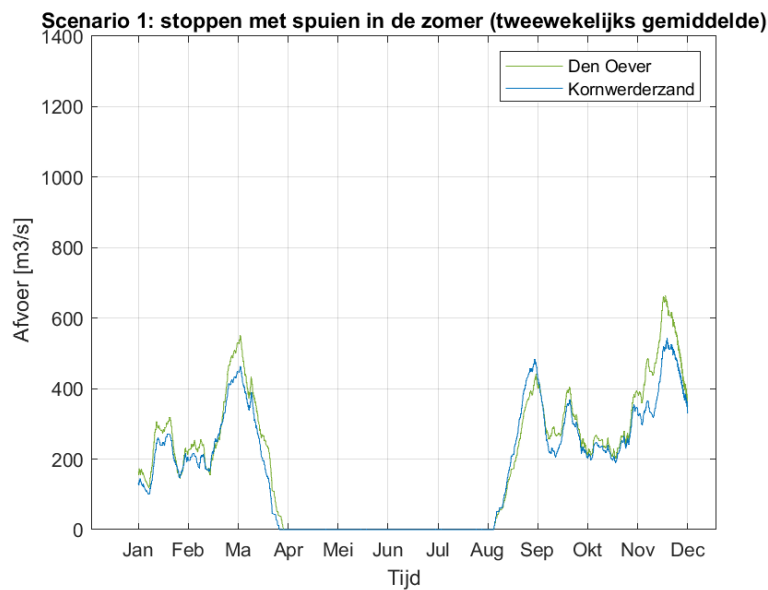
Figuur 4-7 Tijdserie van de totale waterafvoer (zwart) die bij scenario 2 en 3 op één locatie gespuid wordt. Om deze tijdserie te verkrijgen zijn de afvoeren van Den Oever (groene lijn) en Kornwerderzand (blauwe lijn) uit de referentiesimulatie bij elkaar opgeteld.

#### 4.2.2 Afvoervolumes

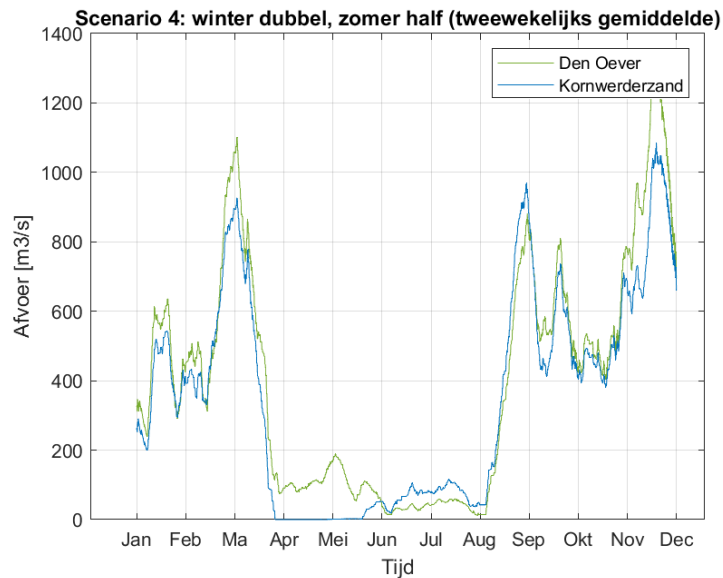
Om het effect van het gespuide volume in kaart te brengen zijn twee scenario's opgesteld. In het eerste scenario wordt minder gespuid dan in de huidige situatie door te stoppen met spuien in de zomer (Scenario 1 in Tabel 4-1). In het andere scenario wordt op jaarbasis meer gespuid dan in de huidige situatie door in de winter twee keer zoveel en in de zomer twee keer zo weinig te spuien (Scenario 4 in Tabel 4-1).

Het eerste scenario is bedoeld om een inschatting te geven van het effect indien door drogere zomers in de zomer significant minder gespuid kan worden. Hiervoor is de waterafvoer in de winter gelijk gehouden aan het referentiescenario. In de zomermaanden (1 april – 1 augustus) is het spuidebiet voor zowel Den Oever als Kornwerderzand gelijk gesteld aan nul (Figuur 4-8). De totale afvoer voor dit scenario is hierdoor iets lager dan voor de referentie ( $1.1 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$ ).

Uit de KNMI klimaatscenario's blijkt dat voor de toekomst rekening gehouden moet worden met nattere winters en drogere zomers (KNMI, 2023). Dit leidt tot meer spuien in de winter en minder in de zomer. Scenario 4 geeft een indicatie van de effecten wanneer deze seizoensgebonden variatie toeneemt. Hiervoor zijn alle afvoeren in de wintermaanden verdubbeld en de afvoeren in de zomermaanden gehalveerd. De tijdserie die hieruit volgt is weergegeven in Figuur 4-9. Deze bewerking is alleen toegepast op de momenten dat het spuidebiet in de referentietijdreeks groter is dan nul. De frequentie en duur van het spuien verandert dus niet, enkel de grootte van de afvoer op de momenten waarop gespuid wordt. Het verdubbelen van de toch al hoge afvoeren in de winter leidt ertoe dat de totale afvoer voor dit scenario hoger is dan voor de referentie ( $2.35 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$ ).



Figuur 4-8 Over twee weken-gemiddelde waterafvoer in Den Oever (groen) en Kornwerderzand (blauw) voor scenario 1: Stoppen met spuien in de zomer.

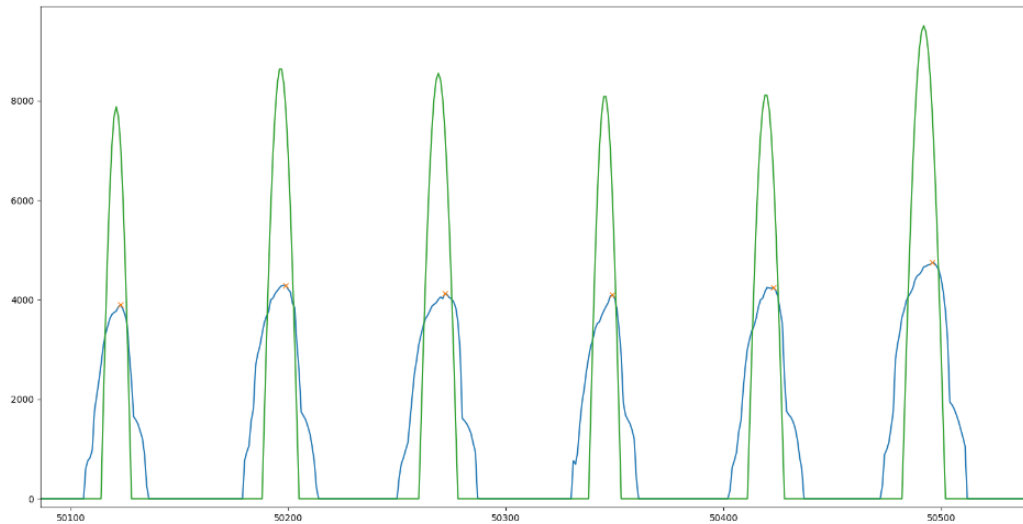


Figuur 4-9 Over twee weken-gemiddelde waterafvoer in Den Oever (groen) en Kornwerderzand (blauw) voor scenario 4: twee keer zo veel spuien in de winter, twee keer zo weinig in de zomer.

### 4.2.3 Lengte spuivenster

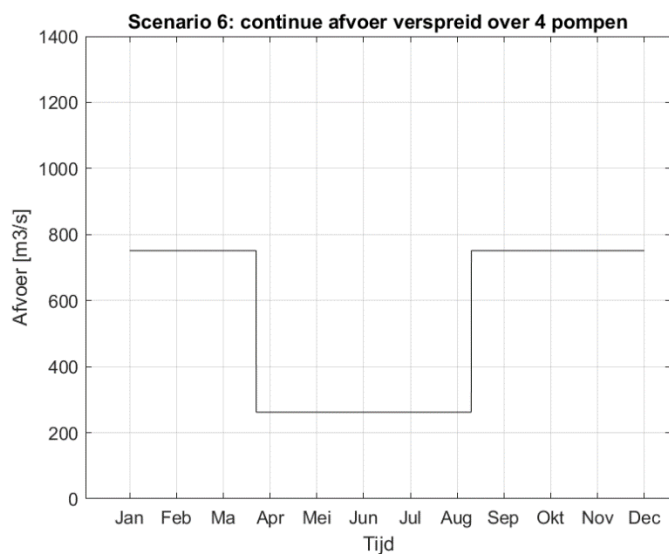
Tot slot zijn er twee scenario's opgesteld om het effect te onderzoeken van de verdeling van de zoetwaterafvoer over een getijperiode. Op dit moment is het enkel mogelijk om te spuien onder vrij verval, dat wil zeggen, wanneer de waterstand op de Waddenzee lager is dan de waterstand op het IJsselmeer. De periode waarin dit mogelijk is wordt het 'spuivenster' genoemd. Hierdoor wordt de zoetwaterafvoer naar de Waddenzee in een paar uur per getijcyclus geconcentreerd. In scenario 5 en 6 wordt daarom in beeld gebracht wat de invloed is van de afvoervariatie binnen een getijperiode. Hierbij worden twee extremen beschouwd: een toename in afvoervariatie in scenario 5 (hetgeen zou kunnen optreden bij een korter spuivenster) en een afname van deze variatie in scenario 6 (bijvoorbeeld wanneer continu sprake zou zijn van pompen van IJsselmeerwater naar de Waddenzee). Net zoals de voorgaande scenario's zijn dit fictieve scenario's om een beeld te krijgen van de reactie van het systeem: ze geven geen realistische situaties weer.

Voor scenario 5 is de lengte van het spuivenster gehalveerd, zoals te zien is in Figuur 4-10. Voor ieder spuivenster is de hoogte van de piekafvoer dusdanig aangepast dat de totale afvoer gedurende het spuivenster gelijk blijft. De totale afvoer voor het hele jaar is dus praktisch gelijk aan de referentie ( $1.4 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$ ). Vanwege afrondingsverschillen zit er een klein verschil ( $\sim 1\%$ ) tussen de totale afvoer van scenario 5 en de referentie.



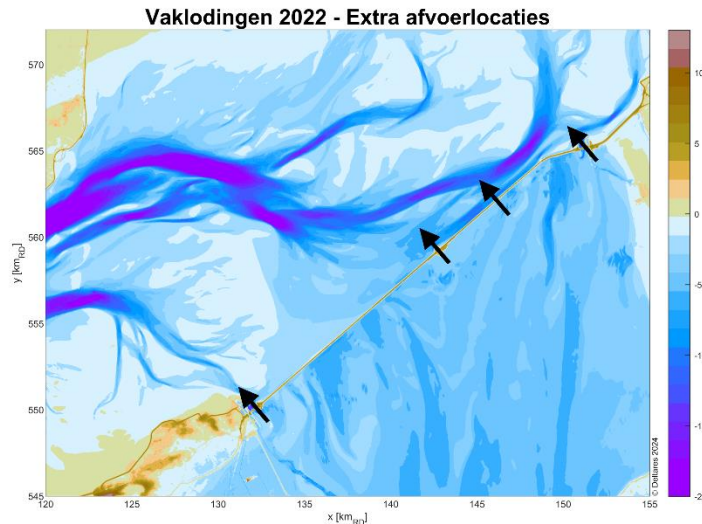
Figuur 4-10 Voorbeeld van de aangepaste tijdseries (ingezoomd). De blauwe lijn geeft de originele tijdserie en de groene lijn de nieuwe tijdserie waarbij het spuivenster is verkort. De afvoer gedurende het kortere spuivenster is gelijk aan de originele afvoer.

In scenario 6 wordt het effect van een constant afvoerdebiet beschouwd. Hierbij is gekozen om te differentiëren tussen de zomer- en wintermaanden. Beide seizoenen hebben een constante gemiddelde afvoer, die zo is gekozen dat de totale afvoer over het jaar gelijk blijft aan de referentie ( $1.4 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$ ). Ook de verhouding tussen de zomer- en winterafvoer is hetzelfde als in de referentie. Naast Kornwerderzand en Den Oever zijn nog twee extra afvoerlocaties toegevoegd langs de Afsluitdijk. De totale afvoer wordt evenredig over de vier afvoerlocaties verdeeld (Den Oever, Kornwerderzand en de twee extra locaties). De locaties van deze extra afvoerpunten is te zien in Figuur 4-12.



Figuur 4-11 Constante afvoer met verschillende waarden voor zomer (april – augustus) en winter. De totale afvoer is gelijk aan de totale afvoer voor 2017 in de referentie.





Figuur 4-12 Locaties van de twee extra afvoerlocaties langs de afsluitdijk die worden gebruikt in scenario 6. De afvoerlocaties worden weergegeven met zwarte pijlen.

## 4.3 Analyse modelresultaten

### 4.3.1 Indicatoren saliniteit

Op basis van de ecologische literatuurstudie (Paragraaf 3.3.2) is ervoor gekozen om voor elk modelscenario saliniteitsstatistieken te berekenen die indicatief zijn voor mogelijke ecologische effecten. De volgende statistieken zijn bepaald voor ieder scenario:

- Duur (dagen) dat de saliniteitswaarde van 15 PSU onderschreden wordt
- Seizoensvariatie, uitgedrukt als verschil tussen wintergemiddelde en zomergemiddelde saliniteit
- Korte termijn variatie, uitgedrukt als het verschil tussen maximale en minimale saliniteit binnen een periode van 8 getijdencycli.

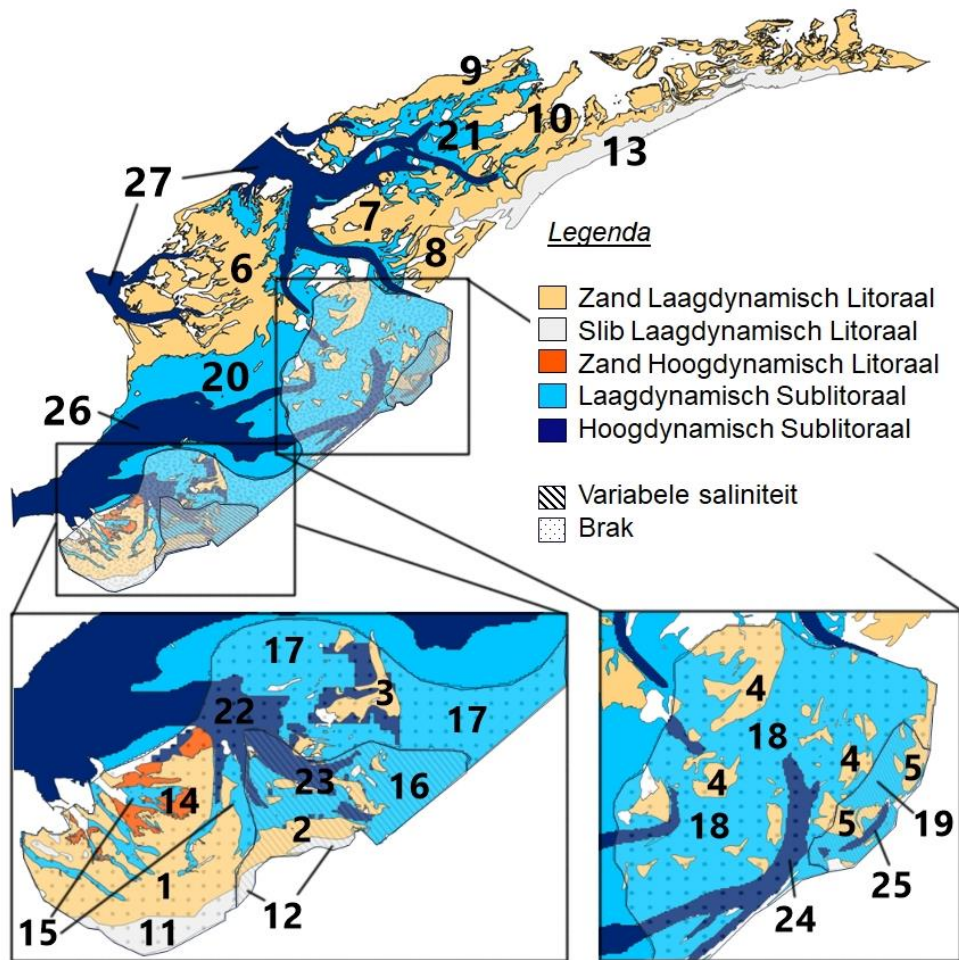
Om deze statistieken van saliniteit te berekenen, is gewerkt met ruimtelijk variërende fourier-output die elke 8 getijdencycli wordt weggeschreven door het Delft3D-FM model. De aanpak is toegelicht in Bijlage C.1. Voor details over het berekenen van fourier uitvoer wordt verwezen naar Deltares (2024).

Daarnaast is ten behoeve van systeembegrip gekeken naar de verspreiding van tracers die in het referentiescenario zijn losgelaten in de afvoerlocaties Den Oever en Kornwerderzand. Hiermee kan in kaart worden gebracht hoe zoet water van de individuele spuilocaties zich verspreidt door de Waddenzee. Met deze tracerconcentraties kan ook een 'tracerleeftijd' worden bepaald. Met behulp van de tracerleeftijd is te duiden hoe lang het duurt voordat water vanuit de spuilocaties een bepaald punt bereikt. Voor een meer uitgebreide uitleg over tracers en tracerleeftijd, zie Hoofdstuk 6.2 en bijlage C2 van de D-Water Quality FM User manual; (Deltares, 2024).

### 4.3.2 Geaggregeerde ecotopenkaart

Om inzicht te krijgen in welke leefgebieden het sterkst beïnvloed worden, is de onderschrijdingsduur voor signaalwaarden voor zoutgehalte en zoutvariatie berekend voor verschillende ecotopen. Onze 'geaggregeerde' ecotopenkaart is het resultaat van het samenvoegen van vergelijkbare ecotopen van Paree et al. (2020) (Figuur 4-13).

In Bijlage C.2 wordt de keuze voor het aggregeren van de ecotopenkaart toegelicht en wordt de aanpak beschreven.



Figuur 4-13 De geaggregeerde ecotopenkaart die is gebruikt voor deze studie.

## 5 Resultaten: scenario effecten op zoutgehalte

Dit hoofdstuk beschrijft de effecten van de gebruikte hypothetische afvoerscenario's op de zoutverdeling in de Waddenzee. In paragraaf 5.1 wordt de zoutverdeling in de huidige condities besproken, op basis van de modelsimulaties voor het referentiejaar 2017. In paragraaf 5.2, worden de resultaten voor de verschillende scenario's beschreven en vergeleken met die voor de referentiesom. In dit hoofdstuk worden alleen de veranderingen in saliniteit beschreven. De ecologische doorvertaling van deze resultaten volgt in de discussie. Alle figuren geven de saliniteitsverdeling op de bodem omdat in deze studie de focus ligt op benthische macrofauna. Door de invloed van stratificatie zal de saliniteit op de bodem iets hoger zijn dan aan de oppervlakte. Echter is deze invloed beperkt doordat in de ondiepe Waddenzee veel menging plaatsvindt door getij en golfwerking.

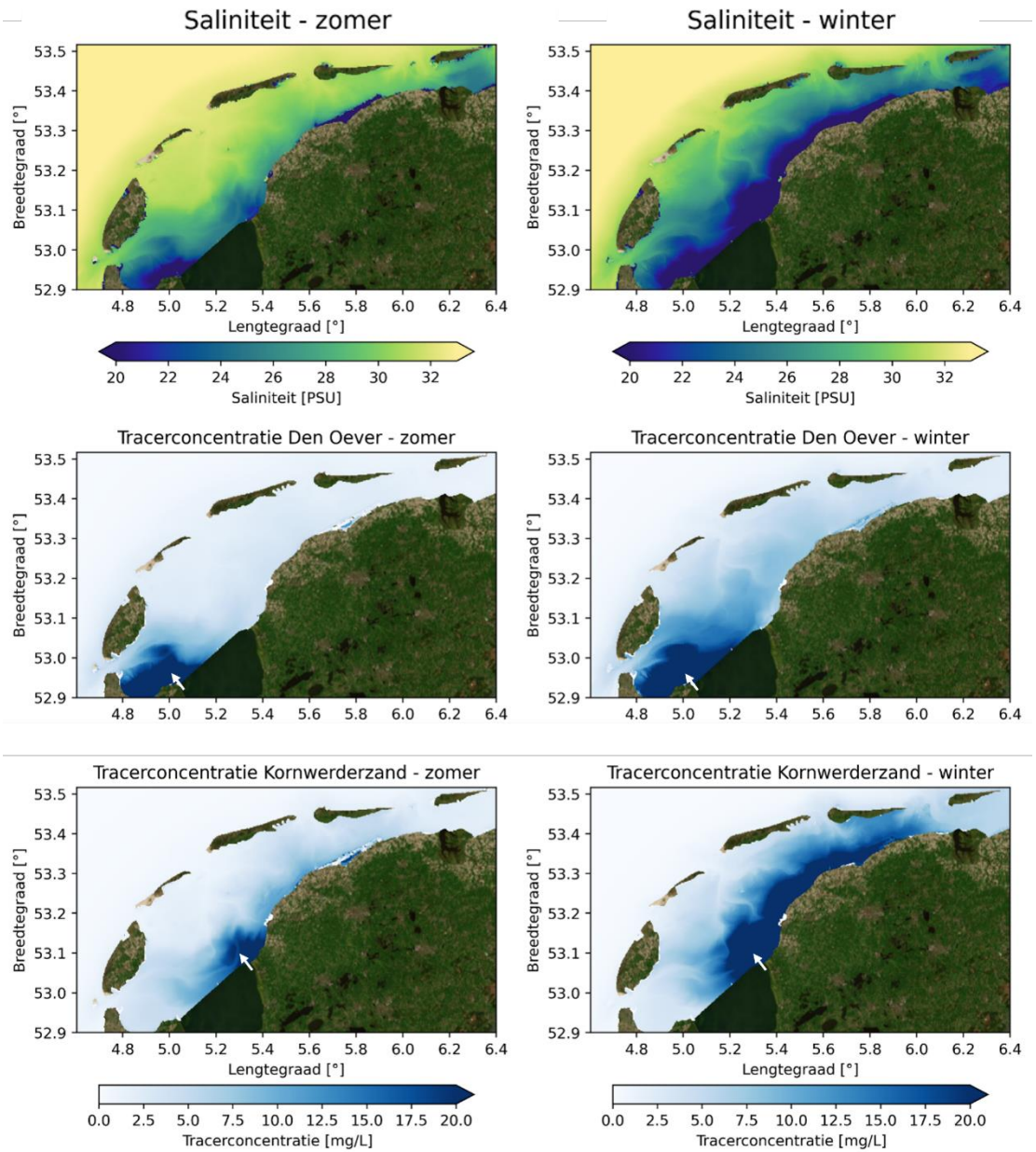
### 5.1 Zoutverdeling in de 'huidige condities'

#### 5.1.1 Ruimtelijke verdeling

De gemodelleerde zoutverdeling (Figuur 5-1, zie bijlage E voor de jaargemiddelde saliniteit) komt goed overeen met de langjarig gemiddelde (2005-2015) hindcast resultaten van Donatelli et al. (2022), zoals beschreven in Hoofdstuk 0. Lage saliniteitswaarden zijn te vinden in de directe omgeving van de spuisluisen rondom Kornwerderzand en Den Oever. Daarnaast is het zoetere water vooral langs ondiepe kustgebieden geconcentreerd. Dit zijn tevens de gebieden met de langste verversingstijd en lage wateruitwisseling, waardoor het zoete water hier langer blijft hangen (Donatelli et al., 2022-1). De saliniteit in geulen en hoogdynamische gebieden met een kortere verversingstijd is hoger dan op de platen.

Door tracers te volgen die respectievelijk bij Kornwerderzand en Den Oever worden losgelaten in het model kan de verspreiding van de twee spuilocaties in kaart worden gebracht. Hieruit blijkt dat de invloedssfeer van de spuilocaties bij Den Oever en Kornwerderzand sterk verschilt (Figuur 5-1). Tracers uit Den Oever blijven voornamelijk geconcentreerd in de westelijke Waddenzee, in het gebied rondom Balgzand. Vanuit Kornwerderzand is juist sprake van een oostelijke beweging, waarbij het zoete water zich langs de kust verspreidt en een relatief groot deel van de Friese kust beïnvloedt, tot aan het Friesche Zeegat.

Tracers die worden losgelaten vanuit Den Oever bereiken de Noordzee binnen ongeveer 20 dagen (Figuur 5-2). Net buiten het Marsdiep (voor de zuidkust van Texel en de noordkust van Noord-Holland) is de tracerleeftijd slechts 20 dagen. Tracers vanuit Kornwerderzand hebben na 40 dagen de Noordzeekust van de eilanden nog altijd niet bereikt. In de oostelijke Waddenzee is de tracerleeftijd vanuit Kornwerderzand ongeveer 20 dagen. Zoet water vanuit Den Oever verlaat de Waddenzee dus sneller dan water dat vanuit Kornwerderzand wordt gespuid.

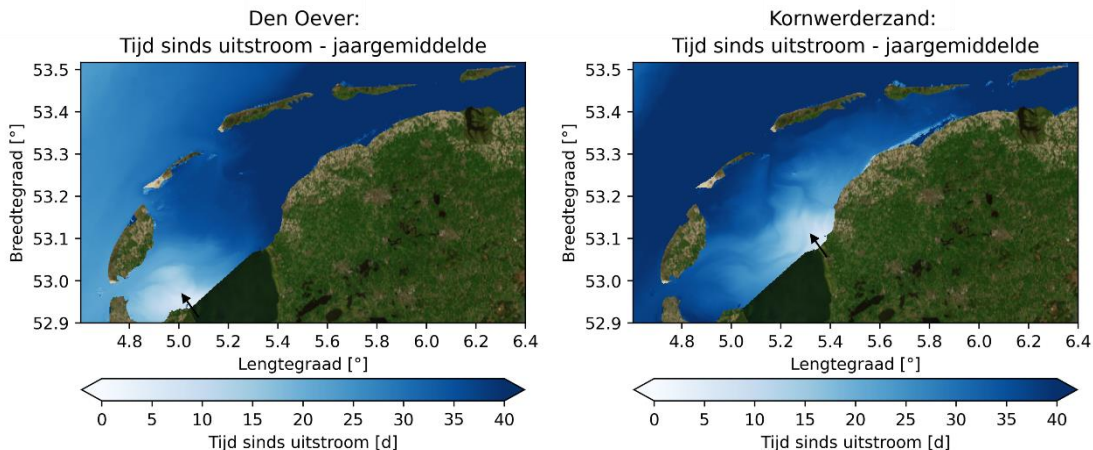


Figuur 5-1 Ruimtelijke verdeling van saliniteit en verspreiding van tracers.

Boven: saliniteit in de Waddenzee in de zomer (links) en in de winter (rechts).

Midden: verspreiding van de tracers vanuit Den Oever in de zomer (links) en in de winter (rechts).

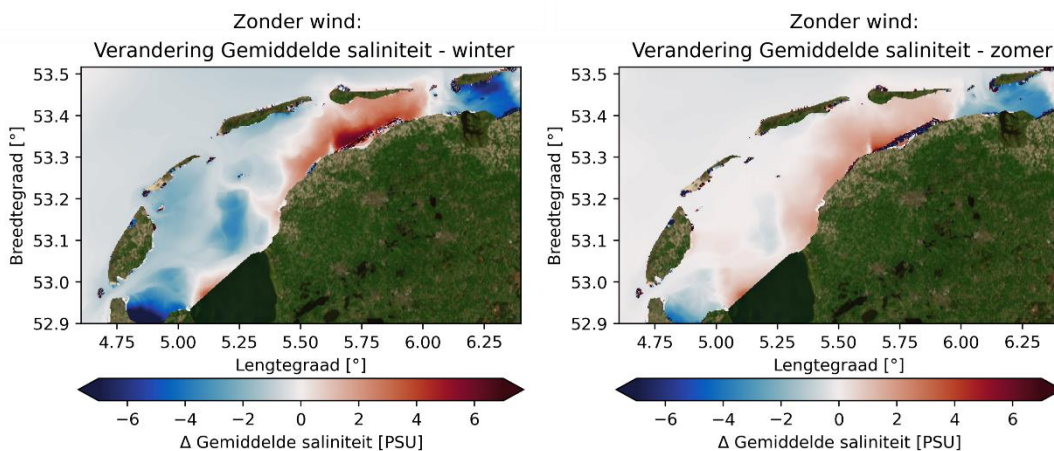
Onder: verspreiding van de tracers vanuit Kornwerderzand in de zomer (links) en in de winter (rechts).



Figuur 5-2 Leeftijd (tijd sinds uitstroom) van tracers losgelaten in Den Oever (links) en Kornwerderzand (rechts) in dagen.

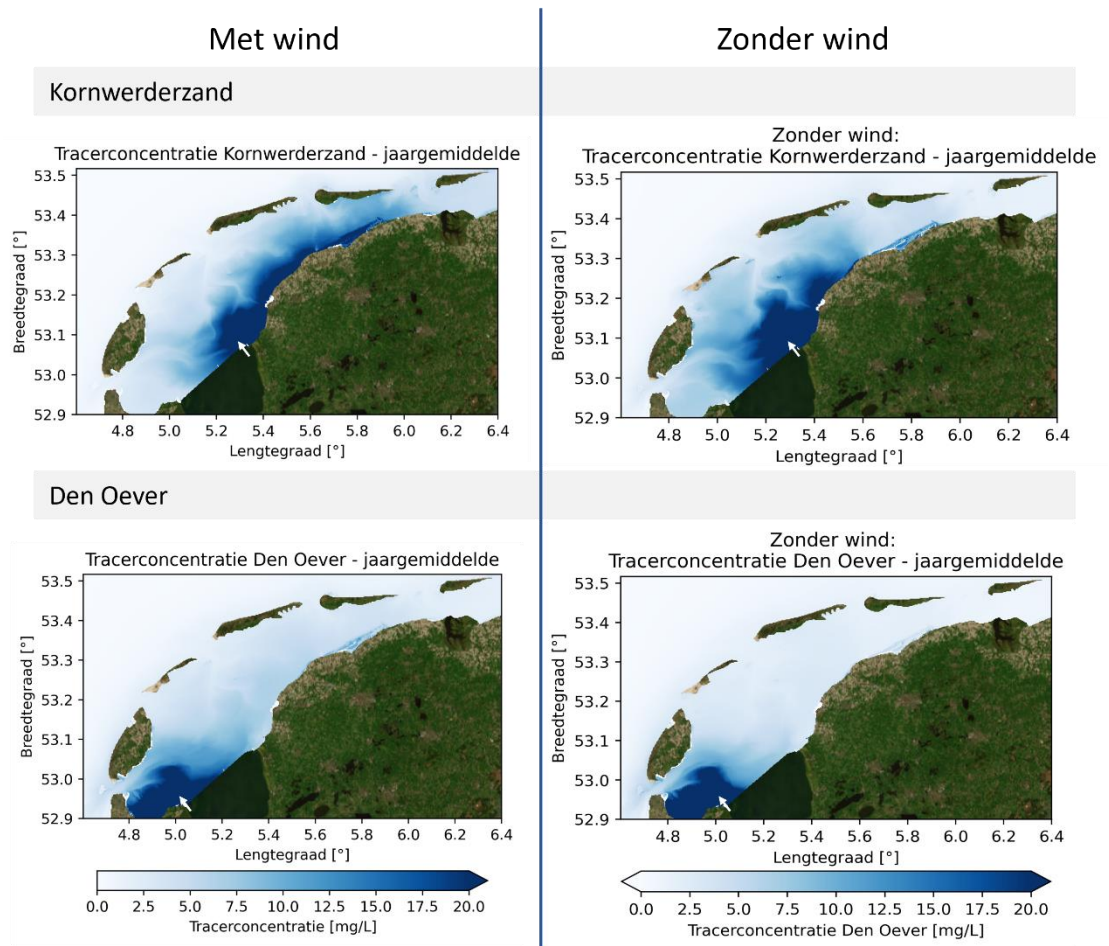
### 5.1.2 Intermezzo: Invloed van wind op ruimtelijke verdeling

Dit intermezzo verkent hoe de ruimtelijke verdeling in Sectie 5.1.1 beïnvloed wordt door de wind. Uit een vergelijking van de modelresultaten met en zonder wind blijkt dat grote delen van de Waddenzee (en Noordzee) enkele PSU zoeter zijn zonder wind (Figuur 5-3). De oostelijke Waddenzee is zonder wind juist zouter, omdat dit gebied voor de aanvoer van zoetwater afhankelijk is van wind-gedreven transport over het Terschellinger wantij. De modale wind komt namelijk overwegend uit het zuidwesten. Deze zuidwestenwind maakt oostwaarts transport over de wantijen en langs de Friese kust mogelijk. De ruimtelijke patronen zijn vergelijkbaar in de zomer en winter, al is het effect sterker in de winter omdat in deze periode over het algemeen sterkere winden optreden en meer gespuid wordt.



Figuur 5-3 Invloed van wind op de ruimtelijke verdeling van saliniteit in de Waddenzee (rood=zouter zonder wind).

Een vergelijking van verspreiding van tracers met en zonder wind in het model laat zien dat het zoete water vanuit Kornwerderzand zonder wind minder ver oostelijk beweegt en zich juist verder bij de kust vandaan verspreidt over de westelijke Waddenzee. Zoet water vanuit Den Oever is zonder wind nog sterker 'gevangen' in de regio van het Balgzand en verspreidt zich nauwelijks over de rest van de Waddenzee (Figuur 5-4).



Figuur 5-4 Invloed van wind op de verspreiding van tracers vanuit Kornwerderzand (boven) en Den Oever (onder).

### 5.1.3 Tijdsvariatie

Naast de ruimtelijke variatie verandert de saliniteit ook sterk in de tijd. In deze paragraaf wordt de tijdsvariatie op deze verschillende tijdschalen beschouwd. In de Waddenzee is er zowel sprake van een seizoensgebonden variatie in saliniteit als ook een variatie over kortere tijdschaal, van enkele getijdycli. Ten slotte wordt onderzocht hoe lang en op welke locaties de saliniteit lager is dan de signaalwaarde van 15 PSU.

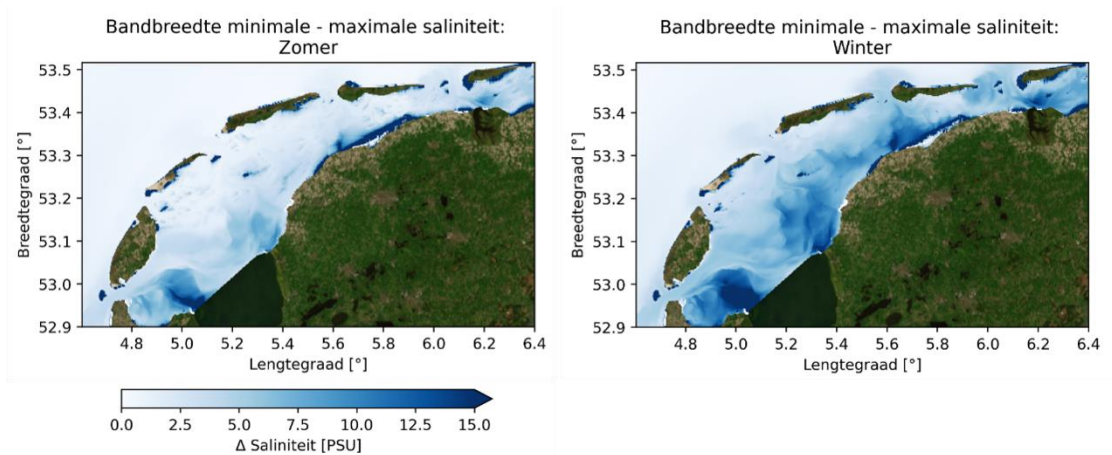
#### 5.1.3.1 Seizoensvariatie

Er zit een sterke seizoensgebonden variatie in de saliniteit van de Waddenzee en de verspreiding van de tracers vanuit de spuilocaties. In Figuur 5-1 is te zien dat de Waddenzee in de zomer een stuk zouter is dan in de winter. Dit komt waarschijnlijk doordat in de winter de spuidebieten aanzienlijk hoger zijn, mogelijk in combinatie met een hogere verdamping in de zomer. Ook de verspreiding van de tracers vanuit Den Oever en Kornwerderzand verschilt per seizoen. In de winter, wanneer de spuidebieten hoger zijn (en zuidwestenwinden sterker), is de ruimtelijke verspreiding van het zoete water groter. Dit geldt zowel voor tracers vanuit Den Oever als voor Kornwerderzand.

#### 5.1.3.2 Vierdaagse variatie

De vierdaagse variatie in saliniteit wordt gebruikt om een indicatie te geven van de fluctuaties die op relatief korte tijdschaal kunnen plaatsvinden (Figuur 5-5). De vierdaagse variatie wordt gegeven door het verschil tussen de maximale en minimale saliniteit binnen een periode van 8 getijdycli en geeft een bandbreedte voor de variatie in saliniteit binnen deze periode.

De gemiddelde vierdaagse variatie is groter in de winter wanneer er meer gespuid wordt dan in de zomer (Figuur 5-5). Ook is de variatie het grootst dichtbij de spuilocaties. Vooral in de omgeving van Den Oever kan het verschil tussen de minimale en maximale saliniteit binnen een periode van 4 dagen oplopen tot 15 PSU. Deze grote verschillen in saliniteit binnen een kort tijdsbestek kunnen mogelijk tot stress leiden voor de aanwezige organismen waardoor sommige organismen hier mogelijk niet kunnen voorkomen.

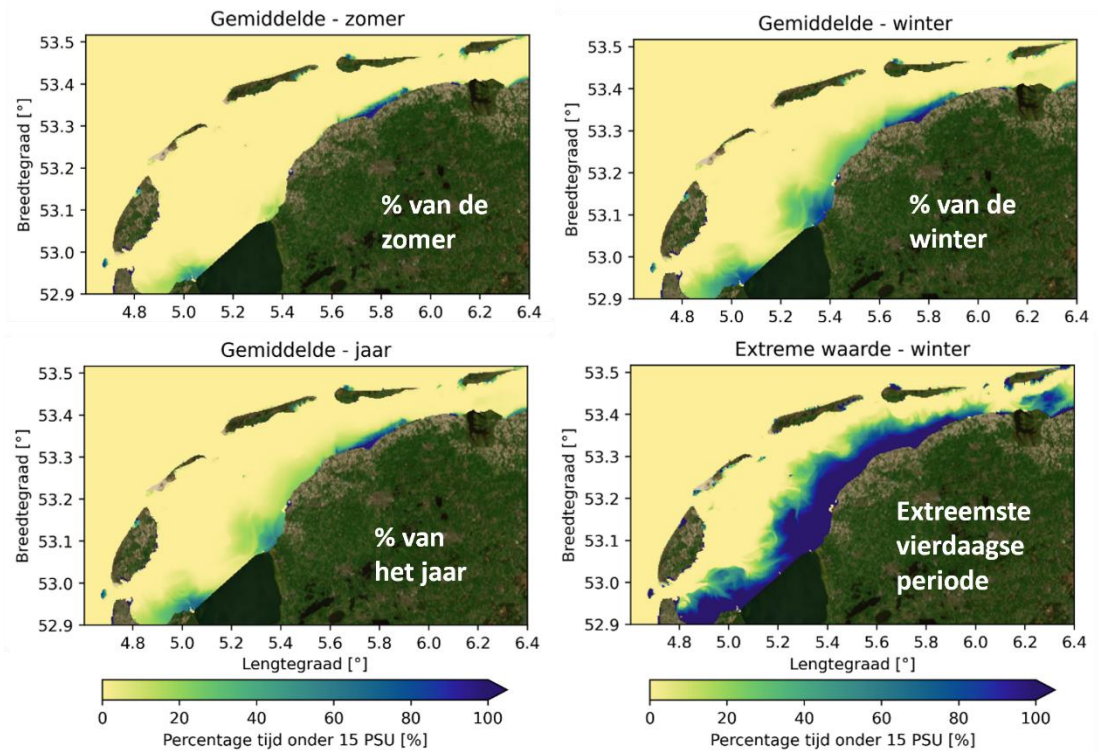


*Figuur 5-5 Verschil tussen de maximale en minimale saliniteit per fourier-periode (8 getijdycli; ~4 dagen). Deze bandbreedte is gemiddeld over alle fourier-periodes in de zomer (boven links) en in de winter (boven rechts).*

### 5.1.3.3 Onderschrijdingsduur

De gemiddelde onderschrijdingsduur voor de signaalwaarde van 15 PSU is te zien in het paneel linksonder in Figuur 5-6. Zoals beschreven in Paragraaf 3.3.2, is de onderschrijdingsduur van deze signaalwaarde gekozen als indicator voor zoetwaterstress in deze studie.

Saliniteitswaarden van 15 PSU of lager komen vooral voor rondom de spuilocaties en langs de Friese kust (Figuur 5-6). In de winter wanneer er meer gespuid wordt (rechtsboven), is dit gebied groter dan in de zomer (linksboven). In de winterperiode valt de saliniteit op het Balgzand en langs een groot deel van de Friese kust zelfs voor 20-80% van de tijd onder de 15 PSU (Figuur 5-6 rechtsboven). In het aanlandige deel van de Waddenzee kan deze saliniteitswaarde soms zelfs gedurende vier opeenvolgende dagen onderschreden worden. Dit blijkt uit de vierdaagse periode met de langste onderschrijdingsduur; deze is 100% in een groot gebied langs de vastelandskust (Figuur 5-6 rechtsonder).

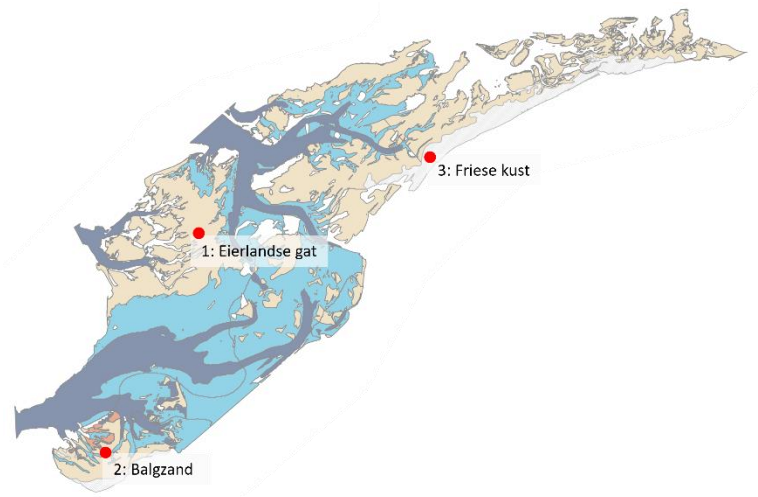


*Figuur 5-6 Periode waarin de saliniteit lager is dan 15 PSU, uitgedrukt in percentage tijd van een 4-daagse periode. Boven: gemiddelde onderschrijdingsduur in de zomer (links) en winter (rechts). Onder: de gemiddelde onderschrijdingsduur in een jaar (links) en de periode met de hoogste onderschrijdingsduur (extreme waarde; rechts).*

#### 5.1.4 Tijdsreeksen per locatie

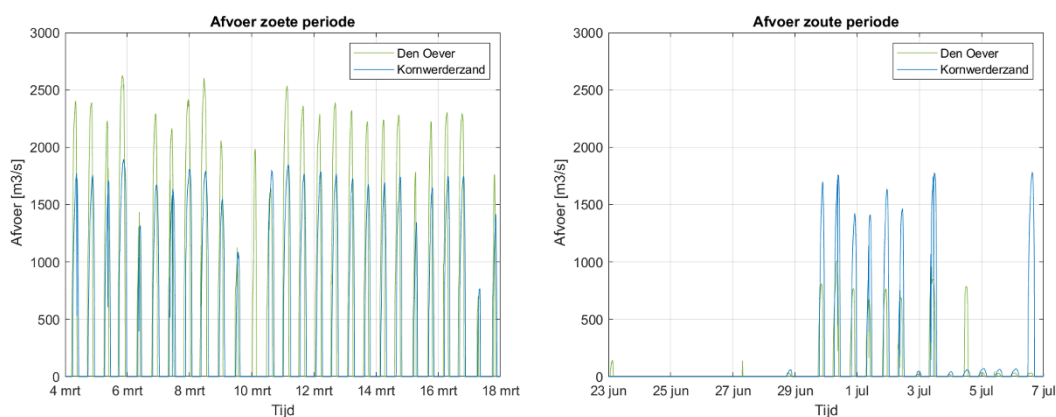
De variatie in saliniteit op kortere tijdschaal wordt nader bestudeerd door in te zoomen op drie representatieve locaties. Op basis van de geaggregeerde ecotopenkaart zoals beschreven in 4.3.2 zijn drie locaties gekozen, die zijn aangegeven in Figuur 5-7. Er is een locatie gekozen waar de invloed van de zoetwaterspui relatief gering is (locatie 1: het Eierlandse gat), een locatie die sterk onder invloed staat van de afvoer in Den Oever (locatie 2: Balgzand) en een locatie onder invloed van de afvoer in Kornwerderzand (locatie 3 langs de Friese kust). Zoals uit Figuur 5-1 blijkt, verspreidt het zoete water vanuit Kornwerderzand zich over een langgerekte strook langs de Friese kust. De derde locatie is gekozen in de slibrijke ecotoop langs de Friese kust die volgens de modelresultaten en de ecotopenkaart door Kornwerderzand wordt beïnvloed maar zich niet in de directe nabijheid van de spuisluizen bevindt.





Figuur 5-7 Locaties van de drie observatiepunten waarvoor de tijdserie van saliniteit bestudeerd is.

Om de effecten van de zoetwaterspui in beeld te kunnen brengen wordt ingezoomd op twee springtij-doottij periodes. Gedurende de eerste periode, van 4 tot 18 maart is de zoetwaterafvoer relatief hoog (Figuur 5-8) en wordt voor het IJsselmeer het winterpeil aangehouden. De tweede periode loopt van 23 juni tot 7 juli, en wordt gekarakteriseerd door lage afvoeren, zoals het rechter paneel in Figuur 5-8 laat zien. Tijdens beide condities is de windrichting west tot zuid en varieert de wind tussen de 5 en 10 m/s (3 tot 5 Beaufort).

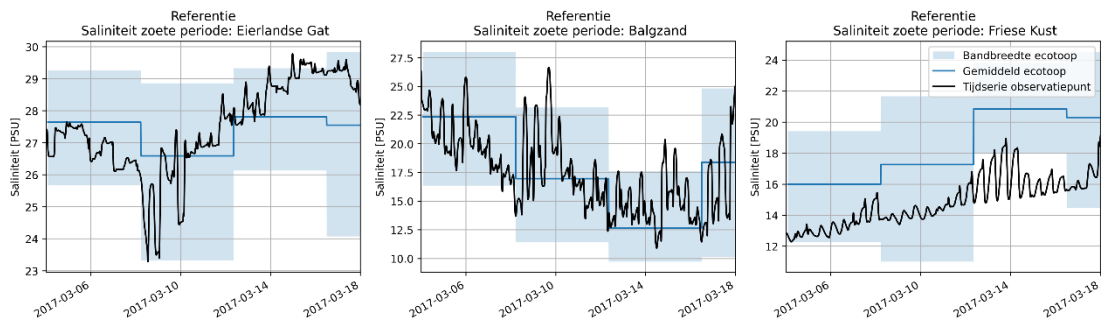


Figuur 5-8 Zoetwaterafvoer in Den Oever en Kornwerderzand gedurende de springtij-doottij cycli die zijn gebruikt. Links: de zoete periode (4 - 18 maart) met relatief hoge dagelijkse afvoeren. Rechts: de zoute periode (23 juni – 7 juli) waarin veel minder gespuid wordt.

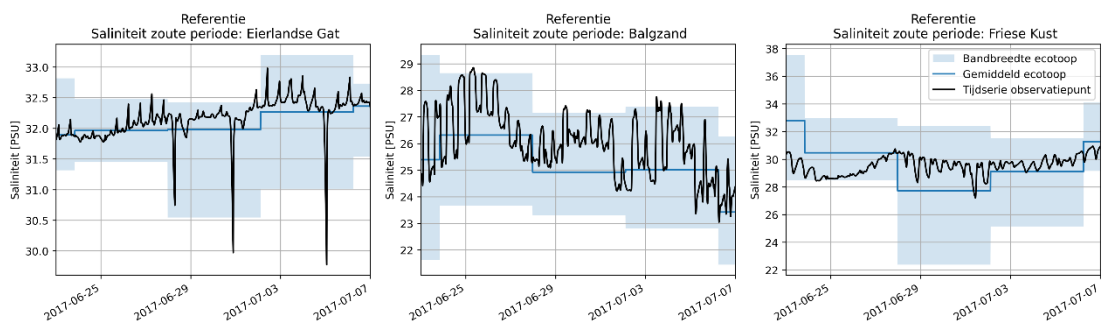
Uit de tijdseries van de drie locaties blijkt dat er grote dagelijkse verschillen in saliniteit zijn (Figuur 5-9 en Figuur 5-10). Deze dagelijkse verschillen zijn groter in de periode waarin de zoetwaterafvoer hoger is, maar komen ook voor in de 'zoute' periode. Met name bij Balgzand is deze dagelijkse variatie groot, in de orde van grootte van 3 PSU over een getijcyclus. Op de locaties van het Eierlandse gat en de Friese kust is de saliniteit in de zoute periode relatief constant. Bovendien kan de mate van dagelijkse variatie sterk verschillen, ook binnen een periode van enkele dagen.

Over het algemeen volgt de saliniteit van de locatie dezelfde trend als het gemiddelde voor de ecotoop waarin de locatie zich bevindt. Met name bij de Friese kust valt de saliniteit op de locatie af en toe buiten de bandbreedte van de ecotoop.

Mogelijk komt dit door de lengte van dit ecotoop, waardoor de gemiddelden van het ecotoop niet meer representatief zijn voor individuele punten.



**Figuur 5-9 Saliniteit op de drie locaties gedurende de zoete periode (4 - 18 maart).** Zwarte lijn: tijdsree saliniteit met 10 minuten resolutie. Blauwe lijn: gemiddelde saliniteit 4-daagse fourier-periode voor de ecotoop waarin het punt zich bevindt. De blauwe blokken geven de bandbreedte tussen de minimale en maximale saliniteit in de betreffende ecotoop. Omdat de waarden van de minimale en maximale saliniteit over de ecotoop gemiddeld zijn, is het mogelijk dat de saliniteit op de locatie buiten de bandbreedte valt.

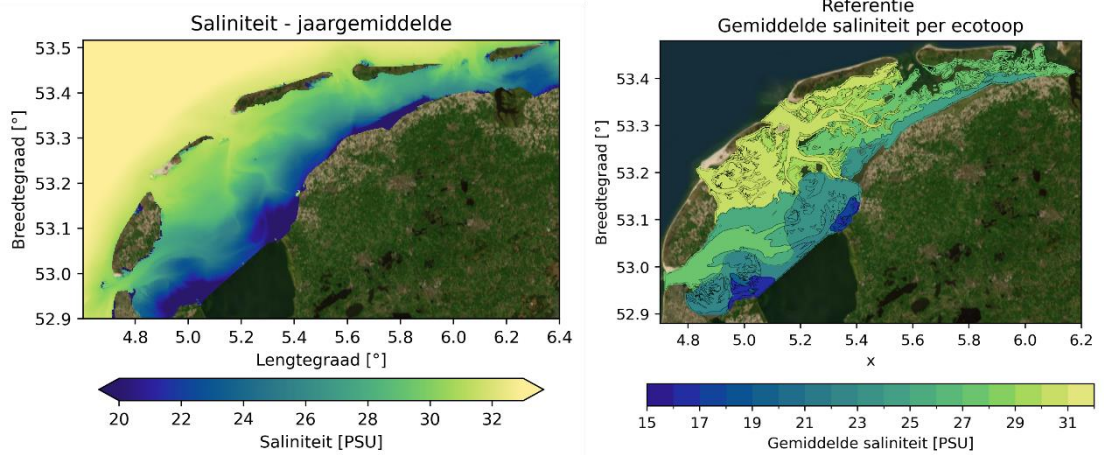


**Figuur 5-10 Saliniteit op de drie locaties gedurende de zoute periode (23 juni – 7 juli).** Zwarte lijn: tijdsree saliniteit met 10 minuten resolutie. Blauwe lijn: gemiddelde saliniteit 4-daagse fourier-periode voor de ecotoop waarin het punt zich bevindt. De blauwe blokken geven de bandbreedte tussen de minimale en maximale saliniteit in de betreffende ecotoop.

Ook valt op dat de bandbreedte van saliniteit aan de Friese kust in de zoute periode een maximale waarde van 38 PSU heeft (Figuur 5-10). Dit is een onrealistisch hoge waarde en komt waarschijnlijk door een numerieke fout in een ondiepe gridcel.

## 5.2 Effecten per scenario

Om de scenario's met de referentie te vergelijken, wordt gebruikgemaakt van de geaggregeerde ecotopenkaart zoals beschreven in 4.3.2. Op deze wijze kunnen de resultaten per ecotoop worden beschouwd en kan de link naar ecologische effecten worden gelegd. Hiervoor wordt de ruimtelijke uitvoer van de modelsommen gebruikt om één gemiddelde waarde per ecotoop te krijgen. Ter illustratie toont Figuur 5-11 hoe de gemiddelde saliniteitswaarden per gridcel wordt weergegeven als gemiddelde per ecotoop.



*Figuur 5-11 Omzetting saliniteitskaart naar ecotopenkaart. Links: verdeling van de jaargemiddelde saliniteit in de Waddenzee voor de referentie (2017). Rechts: ruimtelijke saliniteitswaarden weergegeven als gemiddelde saliniteit per ecootop.*

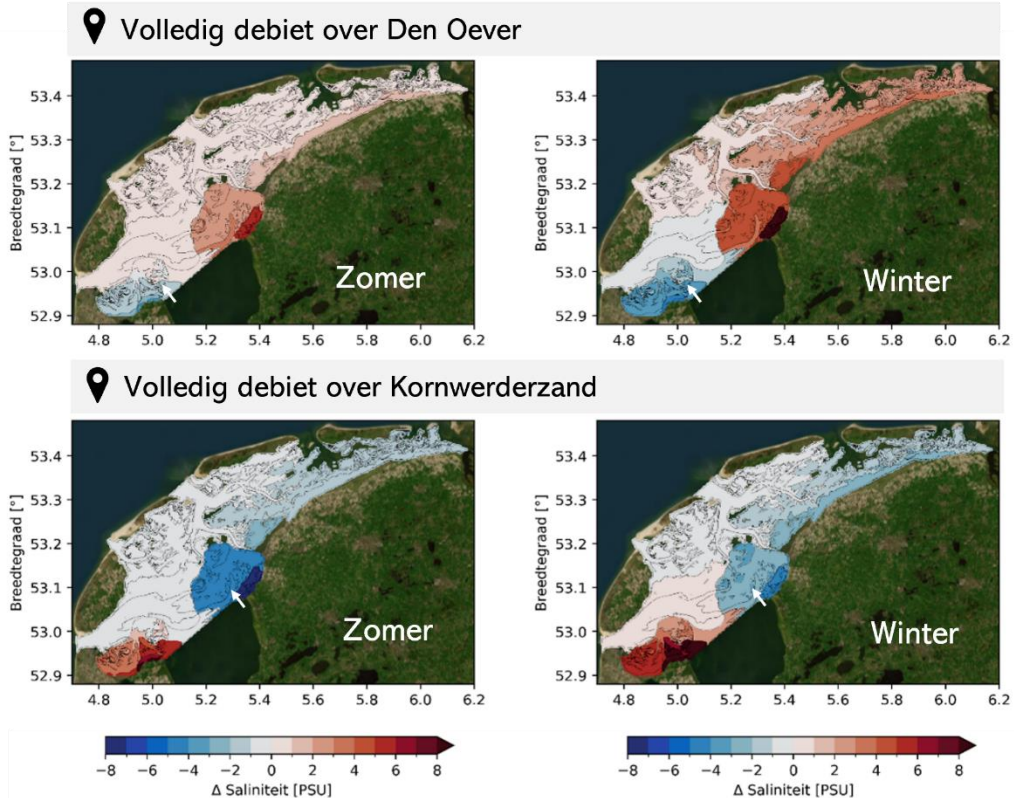
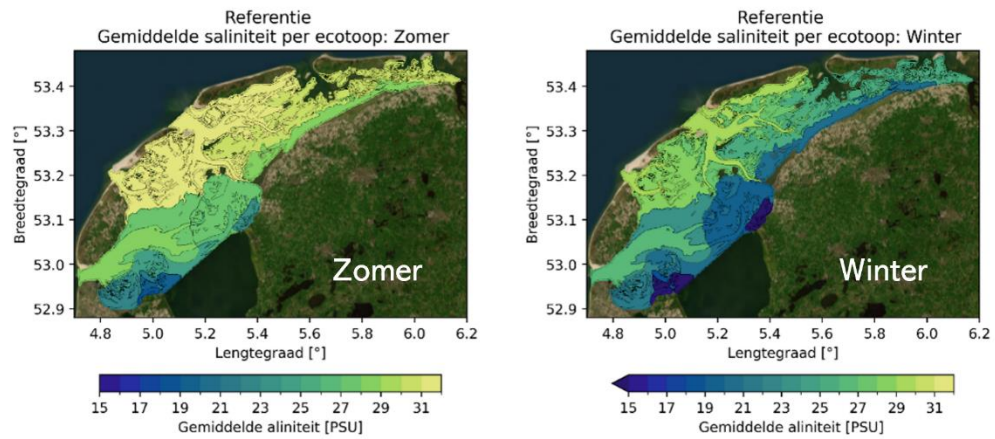
### 5.2.1 Ruimtelijke verdeling seizoensgemiddelde saliniteit

Alle scenario's worden vergeleken met de referentie om de verandering in saliniteit in kaart te kunnen brengen. De gemiddelde saliniteit en de saliniteit per ecootop voor alle scenario's zijn te vinden in bijlagen E en F.

#### Effect afvoerlocatie (scenarios 2 en 3)

Wanneer het volledige debiet over Den Oever wordt afgevoerd, is te zien dat de westelijke Waddenzee zoeter wordt (Figuur 5-12). De rest van de Waddenzee wordt in dit scenario zouter, waarbij het effect het sterkst is bij de gebieden die normaal worden beïnvloed door de sluisen in Kornwerderzand.

Wanneer alles over Kornwerderzand wordt gespuid is het omgekeerde effect zichtbaar. Ondanks dat de totale afvoer gelijk blijft met de referentie wordt in dit scenario een groot deel van de Waddenzee zoeter, onder invloed van de toegenomen afvoer bij Kornwerderzand. Het gebied rondom Den Oever en het Balgzand ontvangt nauwelijks zoet water vanuit Kornwerderzand (zoals ook bleek uit de verspreiding van de tracers, zie Figuur 5-1) en wordt zouter, met lokaal sterke toenames tot 8 PSU. Deze effecten zijn sterker in de winter wanneer de spuibolumes hoger zijn.

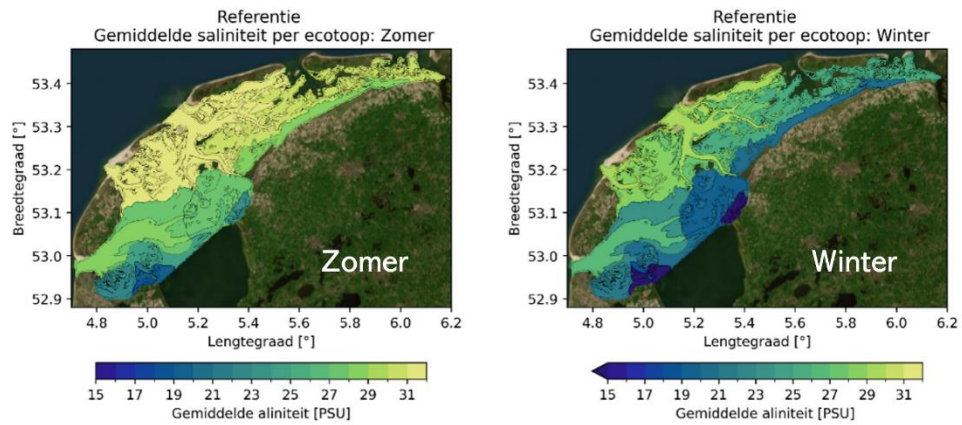


Figuur 5-12 Effect van de spuilocatie op de seizoensgemiddelde saliniteit.

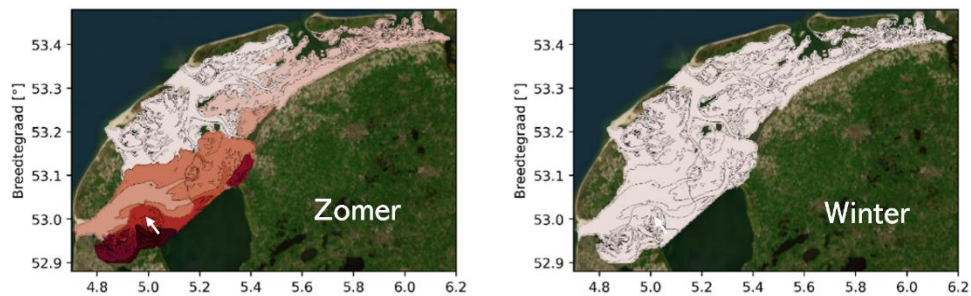
#### Effect afvoervolume (scenarios 1 en 4)

Bij het stoppen met spuien in de zomer is de totale zoetwaterafvoer lager dan de referentie. Als gevolg hiervan wordt de Waddenzee in dit scenario zouter in de zomer (Figuur 5-13). Dit effect is het sterkst in de gebieden rondom Kornwerderzand en Den Oever waar de saliniteitsverschillen lokaal tot 8 PSU op kunnen lopen. In de winter is het effect van dit scenario verwaarloosbaar.

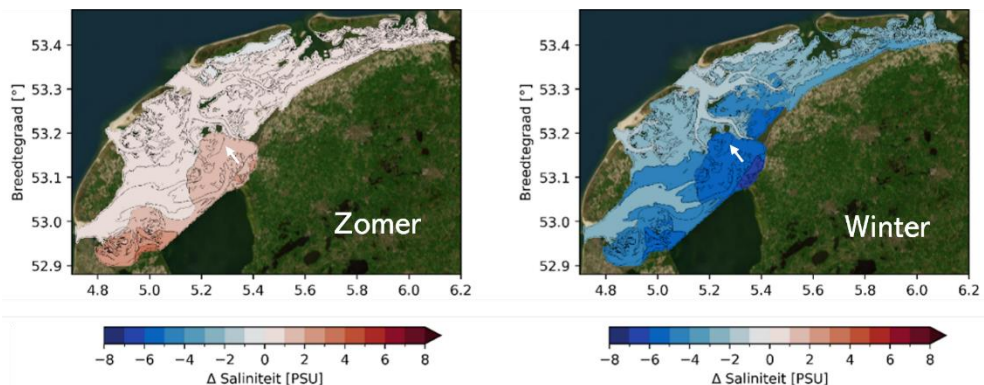
Wanneer in de winter twee keer zoveel, en in de zomer twee keer zo weinig zoet water wordt afgevoerd is de totale zoetwaterafvoer flink vergroot. Dit uit zich in een licht zoutere Waddenzee in de zomermaanden en een veel (tot 6 PSU) zoetere Waddenzee in de winter. De verschillen in saliniteit tussen de zomer en winter nemen hiermee toe. Dit effect is relatief uniform verspreid over de gehele Waddenzee.



### Stoppen met spuien in de zomer



### Winter dubbele afvoer; zomer halve afvoer



Figuur 5-13 Effect van het spuivolume op de seizoensgemiddelde saliniteit.

### Effect lengte spuienster (scenario's 5 en 6)

Veranderingen in de verdeling van de zoetwateraanvoer over een getijdeperiode hebben een verwaarloosbaar effect op de seizoensgemiddelde saliniteit. Dit blijkt uit zowel uit de simulatie waarbij de afvoervariatie over het getij toeneemt (korter spuienster, met hogere piekafvoeren), als de simulatie waarbij de afvoervariatie over het getij afneemt (constante afvoer). Deze resultaten zijn te vinden in Bijlage F.

## 5.2.2 Tijdsvariatie

### 5.2.2.1 Seizoensvariatie

Het verder vergroten van het verschil tussen de (hoge) winter- en (lage) zomerafvoeren vergroot de seizoensvariatie in de Waddenzee. Dit resulteert in een toename van de seizoensfluctuatie tot 8 PSU, zowel bij een verdubbeling van de winterafvoeren en halvering van de zomerafvoeren, als bij het stopzetten van de zoetwateraanvoer in de zomer (Figuur

5-13). De scenario's die het effect van de spuilocatie en lengte van het spuienster beschrijven hebben geen significant effect op de seizoensvariatie.

#### 5.2.2.2 Vierdaagse variatie

Voor sommige soorten zijn de ecologische effecten niet te zien wanneer alleen naar de seizoensgebonden zoutvariatie gekeken wordt, maar moet gekeken worden naar fluctuaties op kleinere tijdschaal (van enkele getijdencycli). Daarom wordt hier de gemiddelde vierdaagse variatie (het verschil tussen de maximale en minimale saliniteit binnen een 4-daagse periode) beschouwd, getoond in Figuur 5-14. De vierdaagse variaties per seizoen staan in Bijlage G.

##### Effect afvoerlocatie

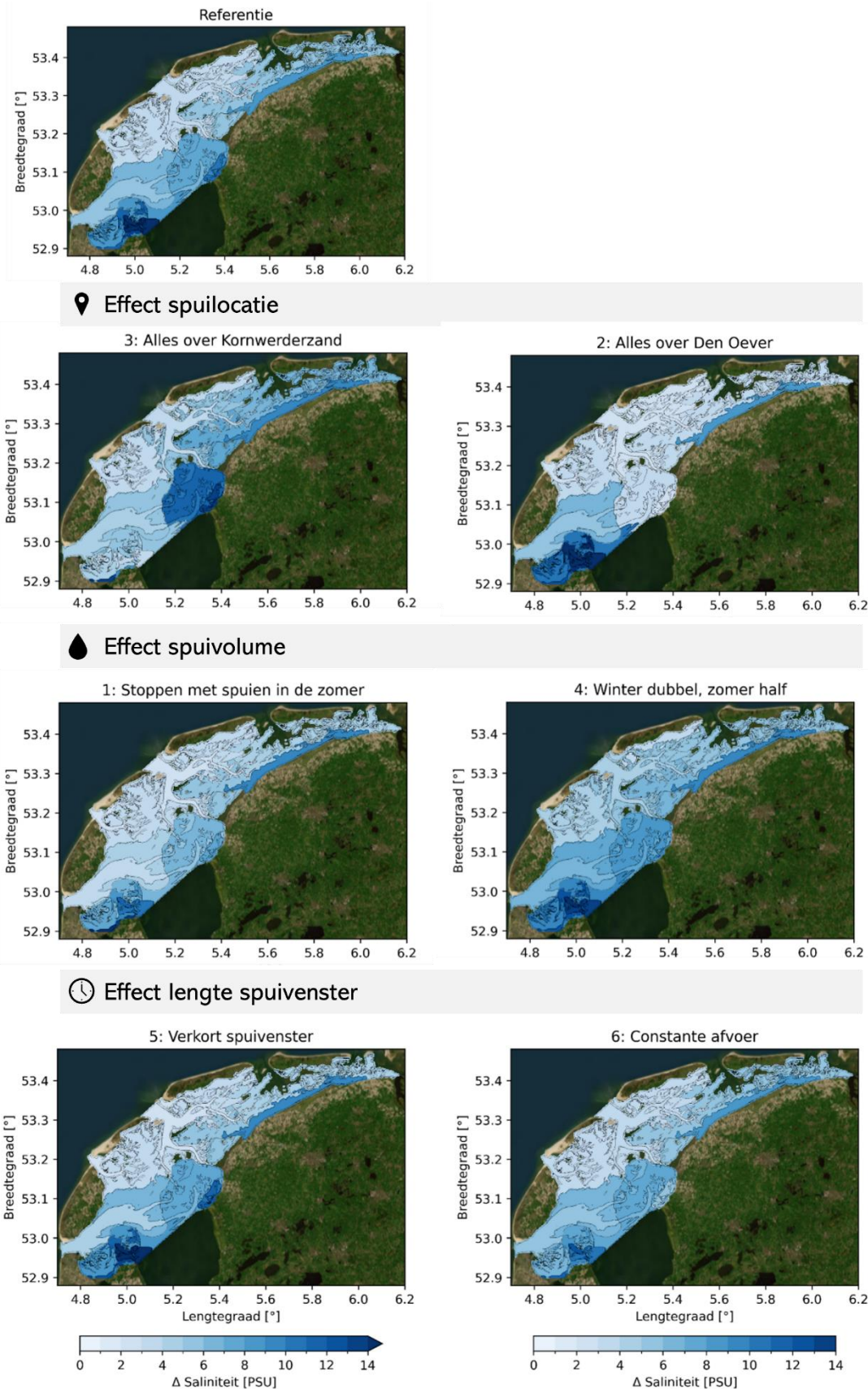
In de scenario's waarbij de volledige afvoer over één locatie wordt gespuid neemt de variatie korte termijn variatie van de saliniteit op de locatie van de afvoer sterk toe (vanwege een lokale toename in spuidebieten) en is deze in de rest van de Waddenzee opvallend laag. Dit suggereert dat de variatie in saliniteit in de Waddenzee voor een relatief groot deel toe te schrijven is aan de afvoer vanuit het IJsselmeer. Met de keuze van de spuilocatie kan hierop een sterke invloed worden uitgeoefend, zonder dat de totale afvoerdebieten veranderen.

##### Effect afvoervolumes

De resultaten laten zien dat hogere spuivolumes direct leiden tot grotere fluctuaties in saliniteit op de tijdschaal van enkele getijdencycli. Andersom verlaagt een lagere afvoer ook de saliniteitsfluctuaties. De vierdaagse variatie is bijvoorbeeld het laagst voor het scenario waar in de zomer gestopt wordt met spuien en de totale spuivolumes dus afnemen.

##### Effect lengte spuienster

Wanneer de zoetwaterafvoer continu constant is (scenario 6: constante afvoer, rechtsonder in Figuur 5-14) neemt de variatie licht af, vooral in de directe omgeving van de spuilocaties. Andersom leidt een verkort spuienster (met hogere 'pieken' in de zoetwaterafvoer) niet tot een hogere vierdaagse variatie ten opzichte van de referentie.



Figuur 5-14 Verskil tussen de maximale en minimale saliniteit per periode van 8 getijcycli (~4 dagen) per ecotoop voor alle scenario's. Deze bandbreedte is bepaald per periode en daarna gemiddeld over het jaar.

### 5.2.2.3 Onderschrijdingsduur

Om het effect van de scenario's op de duur van zoetwaterstress te onderzoeken, is per scenario bepaald hoeveel dagen per jaar korter of langer de signaalwaarde van 15 PSU onderschreden wordt (Figuur 5-15). Dit hoeft niet om aaneengesloten dagen te gaan, enkel om de som van de totale tijd waarin de saliniteit in een gebied lager is dan 15 PSU.

#### Effect afvoerlocatie

Het verschil tussen de invloedssfeer van de verschillende spuilocaties is duidelijk zichtbaar in Figuur 5-15. Wanneer de volledige afvoer over Kornwerderzand gaat neemt de onderschrijdingsduur van 15 PSU toe voor een groot deel van de Friese kust.

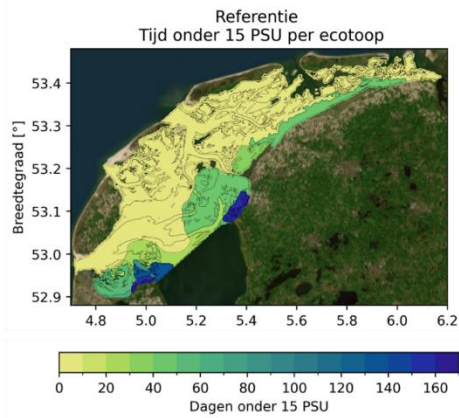
#### Effect afvoervolume

Bij scenario 4 (twee keer zoveel spuien in de winter, twee keer zo weinig in de zomer; waarmee de totale afvoer toeneemt) neemt het aantal dagen onder 15 PSU sterk toe, vooral in de buurt van de spuilocaties en langs de Friese kust. Opvallend is hierbij dat het verschil in de hoogdynamische ecotopen (bijvoorbeeld het zeegat Marsdiep) veel kleiner is dan in de laagdynamische gebieden met een langere verversingstijd. Stoppen met spuien in de zomer leidt tot een zeer kleine afname van dagen onder de 15 PSU. Deze relatief zoete periodes worden dus vooral veroorzaakt door de grote spuivolumes in de winter.

#### Effect lengte spuienster

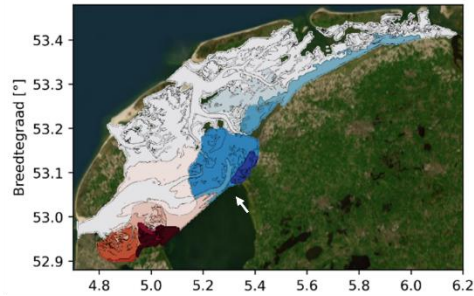
Het effect van het spuienster op de onderschrijdingsduur is beperkt. Bij scenario 6 is een lokale verandering te zien in de directe nabijheid van de Afsluitdijk vanwege het verspreiden van de afvoer over meerdere locaties. Dit zorgt voor een lagere afvoer bij Den Oever (met minder dagen onder de 15 PSU) en een lichte verhoging langs de rest van de Afsluitdijk en westelijke Waddenzee.



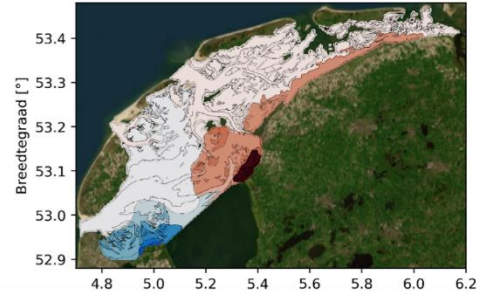


### Effect spuilocatie

3: Alles over Kornwerderzand

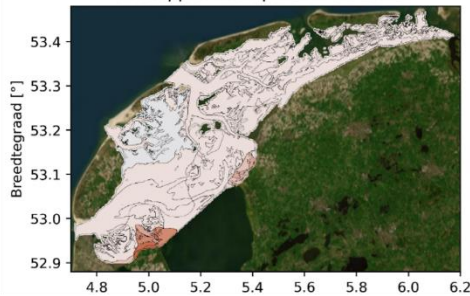


2: Alles over Den Oever

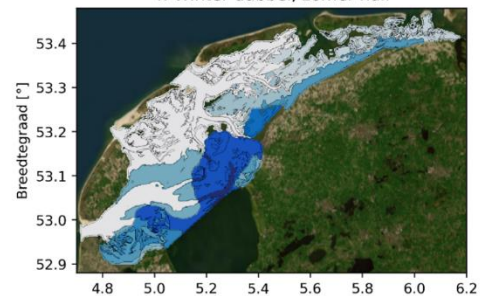


### Effect spuivolume

1: Stoppen met spuien in de zomer

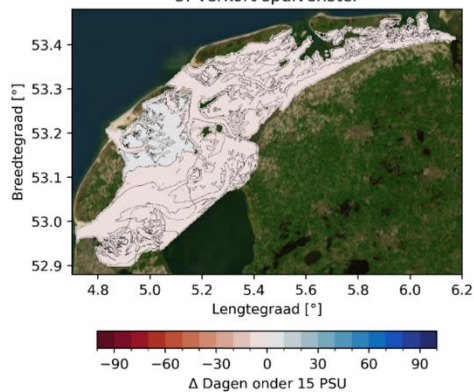


4: Winter dubbel, zomer half

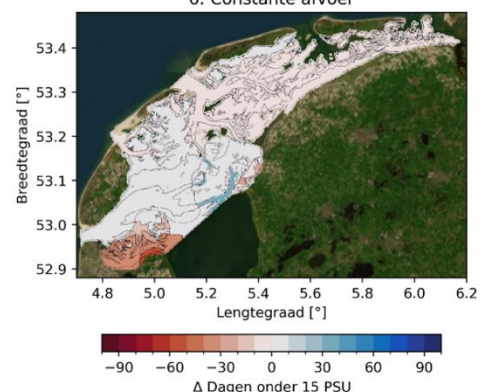


### Effect lengte spuienster

5: Verkort spuienster



6: Constante afvoer



Figuur 5-15 Verandering in periode waarin de saliniteit lager is dan 15 PSU voor alle scenario's, uitgedrukt dagen per jaar. Hiervoor is de totale overschrijdingstijd uit alle fourier-periodes in het jaar bij elkaar opgeteld. Let op: deze figuren laten de totale overschrijdingstijd zien. Dit zijn niet noodzakelijkerwijs aaneengesloten dagen.

### 5.2.3 Tijdseries per locatie

Het effect van de scenario's op de saliniteitsfluctuatie op kortere tijdschaal wordt nader bestudeerd door in te zoomen op drie representatieve locaties in de Waddenzee. Figuur 5-16 toont de saliniteit voor alle scenario's voor een zoete winter- en zoute zomerperiode. Dit zijn dezelfde locaties en periodes die voor de referentie som in Paragraaf 5.1.4 onderzocht zijn.

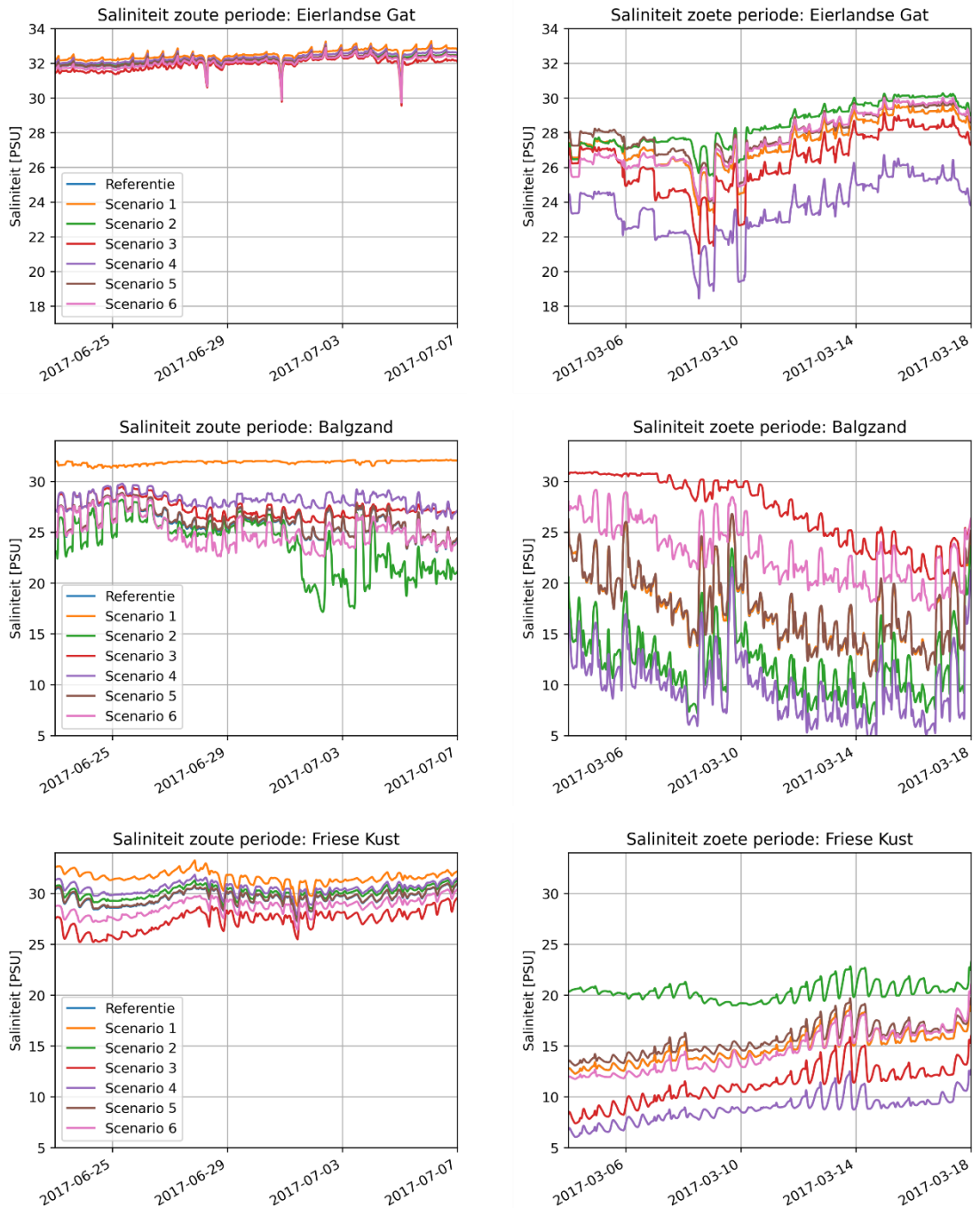
In het algemeen kan worden gezien dat een hogere zoetwaterafvoer leidt tot een lagere saliniteit en hogere fluctuatie over het getij (Figuur 5-16), wel zijn er verschillen tussen de meetpunten.

Voor het Eierlandse gat zijn de verschillen tussen de scenario's het kleinst. Deze locatie wordt het minst sterk beïnvloed door de verschillende afvoerregimes, met name in de zoute periode. In de zoete periode is te zien dat scenario 4, waarbij in de winter twee keer zo veel wordt gespuid, hier wel zorgt voor een verzoeting van ca 3 PSU vergeleken met de referentie. Ook scenario 3, waarbij de volledige afvoer over Kornwerderzand gaat, zorgt voor een verzoeting hier, terwijl scenario 2 (afvoer over Den Oever) deze locatie juist zouter maakt.

Het Balgzand wordt sterk beïnvloed door de verschillende afvoerscenario's, met name in de periode waarin de zoetwaterafvoer hoog is: daar is een verschil van 20 tot 25 PSU zichtbaar tussen het meest zoete en het meest zoute scenario. Dit gebied wordt duidelijk sterk beïnvloed door de spui bij Den Oever; voor scenario 3 (alles op Kornwerderzand) ligt de saliniteit significant hoger. Ook een constante afvoer (scenario 6) verhoogt de saliniteit in dit gebied, waarschijnlijk omdat een deel van de afvoer over Den Oever in dit scenario wordt verdeeld naar de andere (extra) afvoerlocaties op de Afsluitdijk. Bij scenario's 2 en 4, waarbij de afvoer in Den Oever wordt verhoogd, wordt het gebied flink verzoet, met periodes waarin de saliniteit tussen de 5 en 10 PSU schommelt in Figuur 5-16. Gedurende de zoute periode, is voor scenario 2 een sterke reactie te zien in de tweede helft van de periode, die gelijk valt met het opstarten van de afvoer. In de zomerperiode heeft scenario 1 (stoppen met spuien in de zomer) het grootste effect. In dit scenario is de saliniteit bij Balgzand redelijk constant rond 32 PSU, wat beduidend hoger is dan in de andere scenarios.

Ook de saliniteit langs de Friese kust is sterk afhankelijk van het afvoerregime en de afvoerlocatie. Gedurende de zoete periode loopt het verschil tussen het meest zoete en zoute scenario op tot 12.5 PSU, waarbij scenario 2 (alles over Den Oever) zorgt voor de hoogste saliniteit. Scenario's 3 en 4 (alles over Kornwerderzand en twee keer zo veel afvoeren in de winter) verlagen de saliniteit juist. In de zomer zorgt scenario 1 hier voor zoutere wateren, hoewel de saliniteit langs de Friese kust voor dit scenario minder constant is dan in het Balgzand.

Scenario 5, waarin het spuivenster wordt verkort heeft het minste effect op de saliniteit op deze drie locaties. Deze tijdserie valt in haast alle grafieken samen met de blauwe lijn van de referentie.



Figuur 5-16 Tijdsreefs saliniteit voor de drie locaties gedurende de zoute periode (23 juni – 7 juli, links) en de zoete periode (4 – 18 maart, rechts) voor alle scenario's. De blauwe lijn van de referentie valt weg onder de bruine lijn van Scenario 5.

Scenario 1: Stoppen met spuien in de zomer (variatie afvoervolume).

Scenario 2: Volledig debiet over Den Oever (variatie afvoerlocatie).

Scenario 3: Volledig debiet over Kornwerderzand (variatie afvoerlocatie).

Scenario 4: 2x zo veel in de winter, 2x zo weinig in de zomer (variatie afvoervolume).

Scenario 5: Kortere spuivenster (lengte spuivenster).

Scenario 6: Continue afvoer (lengte spuivenster).

## 6 Discussie & eerste ecologische doorvertaling

In dit hoofdstuk wordt bediscussieerd hoe afvoerregimes uit het IJsselmeer de saliniteit in de Waddenzee kunnen beïnvloeden op basis van modelresultaten (Paragraaf 6.1). Een eerste ecologische doorvertaling wordt gemaakt door de modelresultaten te vergelijken met beschikbare kennis uit de literatuur over directe ecologische effecten van saliniteit (Paragraaf 6.2).

### 6.1 Invloed afvoerregimes IJsselmeer op saliniteit Waddenzee

#### 6.1.1 Hoe representatief is de gemodelleerde saliniteitsverdeling?

De saliniteit in de Waddenzee varieert sterk in de tijd, doordat deze niet alleen door het periodieke getij wordt beïnvloed maar ook door de variabele beschikbaarheid van zoetwater en variabele windcondities.

##### *Zoetwateraanvoer*

De verdeling van de zoetwateraanvoer naar de Waddenzee over het jaar verschilt sterk van jaar tot jaar, en een 'representatieve' afvoerdeling bestaat daarom niet. Wel komen de jaar, zomer- en wintergemiddelde afvoeren in 2017 goed overeen met het meerjarig gemiddelde (Bijlage B). In de zomer van 2017 wordt twee maanden niet gespuid bij Kornwerderzand. Hierdoor zou het effect van stoppen met spuien in de zomer waarschijnlijk nóg groter zijn voor jaren waarbij wel nog gespuid wordt in de zomer. Het niet afvoeren van zoetwater in de zomer (voor langere periodes, >1 maand) is echter niet uitzonderlijk, zo blijkt uit afvoergegevens van 2015-2020, en zal naar alle waarschijnlijkheid steeds vaker voorkomen.

##### *Windforcering*

De windforcering in 2017 is over het algemeen representatief voor het langjarige gemiddelde (Vroom, et al., 2020), met een kleine onderschatting van zwakke tot matige winden uit het noorden en noordoosten en een kleine overschatting van zwakke tot matige winden uit het zuidwesten. Volgens Donatelli et al. (2022-b) zijn met name *extreme* zuidwestenwinden maatgevend voor windgedreven anomalieën in de saliniteit. Aangezien de extreme zuidwestenwinden in 2017 goed overeen met het langjarige gemiddelde (Figuur 4-4), is de verwachting dat de saliniteitsverdeling in 2017 voldoende representatief is om te gebruiken als referentiejaar. In een jaar met nog extremere zuidwestenwinden zou de afvoer bij Den Oever zich waarschijnlijk meer in oostelijke richting verspreiden. Dit zou ertoe leiden dat de effecten van afvoeranderingen bij Den Oever zich minder tot het Balgzand zouden beperken en ook meer oostwaarts merkbaar zouden zijn (Duran-Matute, et al., 2014; Donatelli, et al., 2022-a). Bij het ontbreken van sterke zuidwestenwinden blijven de afvoeren uit Den Oever nog meer hangen in het Marsdiep (Donatelli, et al., 2022-a). Dit wordt bevestigd door onze modelsimulaties zonder wind (Sectie 5.1.2). Bij het ontbreken van sterke zuidwestenwinden verspreid de afvoer bij Kornwerderzand zich minder in oostelijke richting en bereikt minder zoet water de Friese kust en meer zoetwater de Waddeneilanden. Hierdoor zouden afvoeranderingen een kleiner effect hebben langs de Friese kust en een groter effect op de platen voor de Waddeneilanden (Figuur 5-3).

##### *Verschillen met eerdere effectstudies*

Doordat de gebruikte inspeelperiode voor de modelsimulaties langer dan een jaar is, moeten de saliniteitsveranderingen in deze studie gezien worden als het effect van *structurele* veranderingen in het afvoerbeleid. Eerdere effectstudies van Witteveen en Bos (2015) en Arcadis (2022) gebruikten een kortere inspeelperiode van 15 dagen.

Deze inspeelperiode is ongeveer gelijk aan de leeftijd van het gespuide IJsselmeerwater in de Waddenzee (Figuur 5-2) en korter dan de verversingstijd volgens Duran-Matute et al. (2014). De saliniteitsveranderingen in deze eerdere effect studies moeten daarom gezien worden als het effect van *tijdelijke* veranderingen in het afvoerbeleid. Waarschijnlijk zijn mede hierdoor de saliniteitsveranderingen in Witteveen & Bos (2015) en Arcadis (2022) iets kleiner (tot 3-5 PSU) dan in deze studie (tot 5-8 PSU). Verder is in deze studies de invloed van wind op de stroming verwaarloosd.

#### **6.1.2 Bij welke ingrepen zijn de saliniteitsveranderingen het sterkst?**

De modelresultaten laten zien dat structurele veranderingen in de (seizoensgebonden) afvoerhoeveelheid en/of -locatie een sterker effect hebben op de saliniteit in de Waddenzee dan veranderingen in de zoetwateraanvoer over een getijdeperiode (Sectie 5.2).

Structurele veranderingen in de afvoerhoeveelheid of -locatie leiden ook tot aanzienlijke veranderingen in de seizoensgemiddelde saliniteit in sommige ecotopen (tot 5-8 PSU). Bij het verder vergroten van het verschil tussen de winter- en zomerafvoeren, kan dit ook leiden tot een toename in de seizoensfluctuatie. De modelresultaten laten zien dat structurele veranderingen in de afvoerhoeveelheid of -locatie ook sterk bijdragen aan een toename (of afname) in saliniteitsfluctuaties op de tijdschaal van enkele getijdecycli. Meer spuien op een locatie betekent over het algemeen lagere saliniteit en een sterkere fluctuatie. Deze relatie tussen afvoer of saliniteit en fluctuatie werd ook al vastgesteld door van Aken (2008) op basis van historische meetdata in het Marsdiep, maar in die studie kwam nog niet naar voren op welke tijdschalen de saliniteitsfluctuatie beïnvloed wordt bij afvoerveranderingen. Op basis van de tijdseries bij verschillende scenario's (Figuur 5-16) kunnen we concluderen dat afvoerveranderingen zelfs op de tijdschaal van enkele getijdecycli de saliniteitsfluctuatie in de Waddenzee kunnen beïnvloeden. Mogelijk komt dit door het grotere contrast tussen het relatief zoete Waddenzee water en zoutere Noordzeewater. Het getij reguleert namelijk de saliniteitsfluctuatie op de tijdschaal van een dag (Donatelli, et al., 2022-b) en voert twee keer per dag het relatief zoute Noordzeewater aan naar de Waddenzee.

Veranderingen in de verdeling van de zoetwateraanvoer over een getijdeperiode blijken een verwaarloosbaar effect op de seizoensgemiddelde saliniteit te hebben en slechts een lokaal effect op de saliniteitsfluctuatie nabij de afvoerlocatie. Het noordwaarts opschuiven van het gebied met de sterkste saliniteitsfluctuatie door de bouw van de Afsluitdijk, van de Zuiderzee naar de Waddenzee (Smits, et al., 2023), wordt dus niet veroorzaakt door het gepulseerd inbrengen van zoetwater in de Waddenzee door te spuien maar door grootschaligere veranderingen in de waterbeweging.

#### **6.1.3 Hoe omvangrijk zijn de gemodelleerde saliniteitsveranderingen?**

De maximaal waargenomen saliniteitsveranderingen of toenames in fluctuatie door afvoerveranderingen zijn in de orde van 5-8 PSU (Sectie 5.2). Het is moeilijk om vast te stellen hoe significant deze saliniteitsveranderingen zijn in een dynamisch systeem als de Waddenzee. Enerzijds, is 5-8 PSU in de zelfde orde grootte als de dagelijkse- of seizoenvariatie in saliniteit in de Waddenzee (0-14 PSU). Witteveen & Bos (2015) en Arcadis (2022) concluderen daarmee dat de veranderingen klein zijn ten opzichte van de natuurlijke variatie in het systeem. Aan de andere kant is 5-8 PSU even groot als de gemiddelde saliniteitsverandering in het Marsdiep over de afgelopen 100 jaar (Figuur 2-6).

#### **6.1.4 Welke gebieden worden het meest beïnvloed?**

De locatie waar het IJsselmeerwater op de Waddenzee afgevoerd wordt, beïnvloedt sterk welke gebieden blootgesteld worden aan een lage saliniteit en hoge fluctuatie. Dit blijkt uit de tracerconcentraties in de referentiesom (Figuur 5-1) en modelscenario's waarbij alles wordt afgevoerd op ofwel Den Oever ofwel Kornwerderzand (Sectie 5.2).

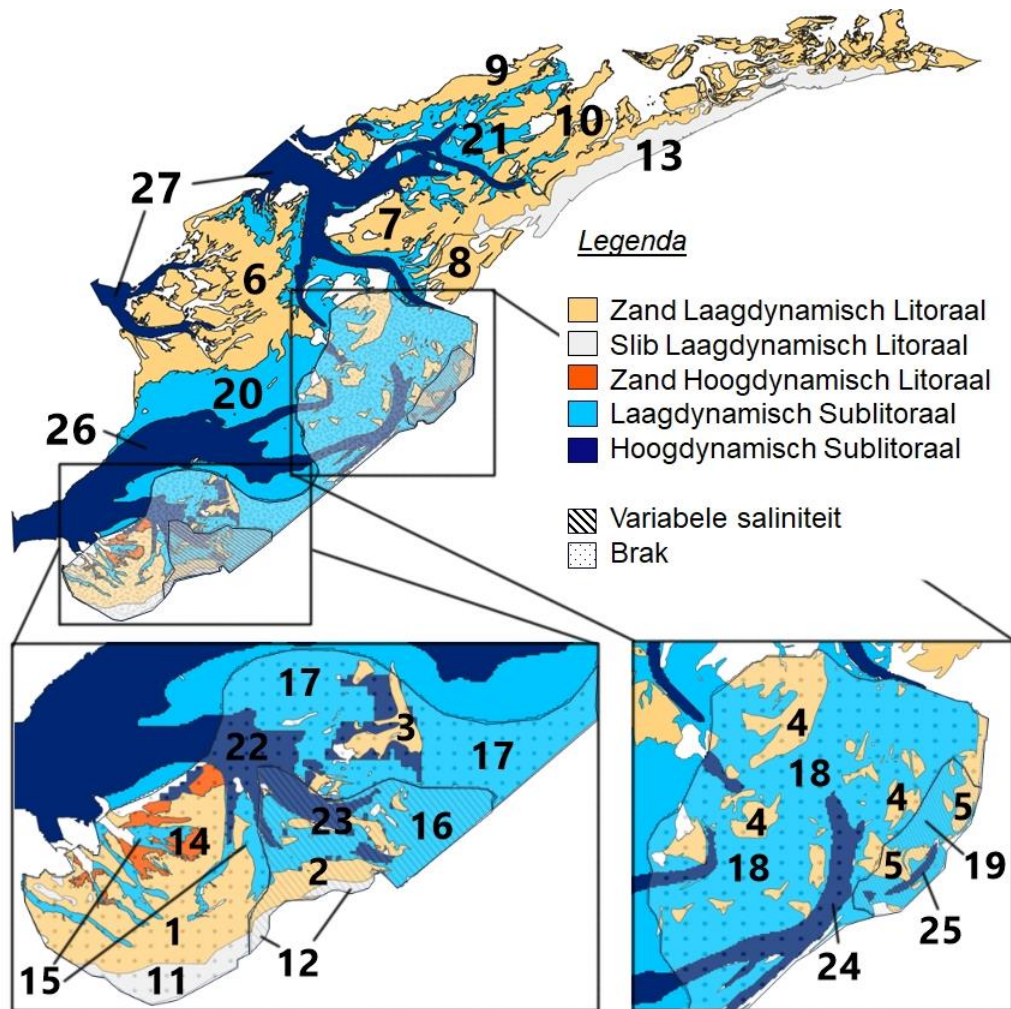
De afvoer bij Den Oever beïnvloedt met name de saliniteit op het Balgzand aan de vastelandskust van het Marsdiep. Afvoer veranderingen bij Kornwerderzand beïnvloeden met name de saliniteit langs een groot deel van de Friese vastelandskust in het Vlie en Borndiep. Hoewel dit niet gekwantificeerd is in deze studie, laten Duran-Matute et al. (2014) zien dat de locatie waar zoet water geloosd wordt ook de verversingstijd van het zoete water in de Waddenzee kan beïnvloeden. Het zoete water dat op Den Oever afgevoerd wordt zou korter in de Waddenzee verblijven dan de afvoeren bij Kornwerderzand (Postma, 1950; Zimmerman, 1976; Duran-Matute, et al., 2014). Dit wordt bevestigd in de modelresultaten van leeftijd van tracers in deze studie (paragraaf 5.1.1)

De invloed van het kiezen van een afvoerlocatie op de verversingstijd, saliniteitsverdeling en fluctuatie in de Waddenzee, biedt ruimte om afvoerregimes te optimaliseren op saliniteitseffecten in de Waddenzee. Bepaalde gebieden zouden ontzien kunnen worden van een hoge of lage saliniteit of fluctuatie daarin. Ook kan in droge periodes (wanneer er weinig gespuid wordt) een langere verversingstijd gunstig zijn, zodat zoet water langer wordt vastgehouden in de Waddenzee. In natte periodes kan een kortere verversingstijd in de Waddenzee juist gunstig zijn om zoet water snel af te voeren.

Indien in de toekomst op Den Oever relatief nog meer zoet water afgevoerd wordt dan in Kornwerderzand, zou dit kunnen leiden tot een nog lagere saliniteit en hogere fluctuatie op het Balgzand en een hogere saliniteit en lagere fluctuatie langs de Friese kust. Dit is in lijn met de trend die op het Balgzand wordt waargenomen sinds de bouw van de Afsluitdijk, die al eerder leidde tot een verlaging van saliniteit en sterkere fluctuaties in de westelijke Waddenzee. Ook zou de verversingstijd van het IJsselmeerwater in de Waddenzee kunnen afnemen als er meer op Den Oever en minder op Kornwerderzand afgevoerd wordt.

#### **6.1.5 Welke ecotopen worden het meest beïnvloed?**

Het zijn voornamelijk litorale, laag-dynamische ecotopen langs de vastelandskust waar de saliniteit wordt beïnvloed door veranderingen in de zoetwatertoevoer naar de Waddenzee. Deze slibrijke (of lichtzandige) gebieden liggen vooral op het Balgzand en langs de Friese en Groninger vastelandskust (Figuur 6-1). Deze gebieden hebben een beperkte wateruitwisseling (hoge verversingstijd) en zijn daardoor gevoelig voor verstoringen in saliniteit (Mitra, et al., 2023). Dit zijn dezelfde gebieden die volgens in Donatelli et al. (2022-b) gevoelig zijn voor verstoringen in de saliniteit onder invloed van extreme afvoeren en/of windcondities. De saliniteit wordt minder beïnvloed in gebieden met een sterkere wateruitwisseling, zoals geulen, of in gebieden die onder normale windcondities weinig zoet water ontvangen. Dit zijn met name hoogdynamische ecotopen (donkerblauw in Figuur 6-1). Dit zijn dezelfde gebieden waarin de saliniteit zich volgens in Donatelli et al. (2022-b) snel herstelt na verstoringen onder invloed van extreme afvoeren en/of windcondities.



Figuur 6-1 De geaggregeerde ecotopenkaart die is gebruikt voor deze studie. Zie bijlage C.2 voor de specifieke gebiedsaanduidingen die bij de hierboven getoonde getallen horen.

## 6.2 Voorzichtige ecologische doorvertaling

### 6.2.1 Verwachte ecologische effecten saliniteit onder huidige omstandigheden

Uit de literatuurstudie (Hoofdstuk 3) kwam naar voren dat negatieve ecologische effecten van saliniteit op benthische mariene organismen voornamelijk veroorzaakt worden door blootstelling aan lage saliniteit (lager dan 15 PSU) of sterke fluctuaties in saliniteit – zowel over korte tijdschalen als over seizoenen.

Een deel van de tweekleppige schelpdieren ondervindt naar verwachting directe negatieve effecten, zoals een vermindering in activiteit, voedselinname of voorplantingsmogelijkheden, bij blootstelling aan een saliniteit lager dan 15 PSU. Bij een aanhoudende of frequente onderschrijding van deze waarde wordt het voorkomen van minder tolerante soorten minder aannemelijk geacht, met mogelijke nadelige gevolgen voor de lokale biodiversiteit. In een groot deel van de Waddenzee, met name het noordelijke deel van het Marsdiep en de gebieden rond de eilanden komt de saliniteit niet of zelden onder de 15 PSU (Figuur 5-5). In de winter is echter, als gevolg van een toename in spuivolume, de saliniteit in een groot deel langs de vastelandskant lager dan 15 PSU voor ten minste vier achtereenvolgende dagen (Figuur 5-5). Dit gaat met name om de gebieden rond Den Oever en Kornwerderzand en de aanlandige, laagdynamische slibrijke en fijnzandige gebieden ten oosten van Kornwerderzand.

Bij een dergelijke periode van blootstelling aan saliniteit buiten tolerantiegrenzen kan voor verschillende soorten tweekleppige schelpdieren, waaronder de kokkel, sterfte optreden (Rato, et al., 2022; Verdelhos, et al., 2015).

De bandbreedte van de vierdaagse saliniteit geeft een indicatie van de variatie in zoutgehalte op kortere tijdschaal (8 getijdencycli). Binnen deze relatief korte tijdschaal is in gebieden rond de afvoerlocaties lokaal zeer grote variatie van gemiddeld meer dan 10 PSU zichtbaar, met name in de winter (Figuur 5-4). Een verandering van zoutgehalte van deze orde op relatief korte tijdschaal zou een lokaal effect kunnen hebben op het voorkomen van kwetsbare organismen. Met name in het gebied rond Den Oever, maar ook rond en ten oosten van Kornwerderzand kunnen hierdoor effecten optreden. Kwantitatieve informatie over de invloed van fluctuaties in saliniteit op specifieke organismen in de Waddenzee is nog niet voorhanden (zie hoofdstuk 3).

Er is een verschil in gemiddelde saliniteit tussen de zomer en de winter (Figuur 5-1). Een hoge mate van variatie in zoutgehalte tussen zomer en winter heeft met name effecten op meerjarig levende organismen die minder mobiel zijn, zoals de meeste benthische macrofaunasoorten. Bij een groot verschil in saliniteit tussen de zomer en de winter neemt de kans dat tolerantiegrenzen van organismen worden overschreden toe en is een groter aanpassingsvermogen vereist. Daarnaast is het wenselijk om ook in het zomerseizoen een zoutgradiënt te behouden, ten behoeve van migrerende vissoorten. Deze hebben een aanvoer van zoet water nodig om doorgangen naar paaigronden in zoet water te kunnen lokaliseren. Een lager zoutgehalte langs de kust in de zomer vergroot de kans dat ze hierin slagen en zorgt daarnaast voor een kleiner verschil in zoutgehalte tussen de winter en zomerperiode.

De saliniteit in de Waddenzee wordt in de huidige situatie al sterk beïnvloed door zoetwaterafvoeren vanaf de Afsluitdijk. Hierdoor worden ecotopen in een deel van de Waddenzee al regelmatig blootgesteld aan saliniteit lager dan 15 PSU en sterke variaties in saliniteit: met name in de gebieden rond de afvoerlocaties van Den Oever en Kornwerderzand, het Balgzand en langs de Friese vastelandskust. Het is aannemelijk dat de benthische organismen in deze ecotopen daar nu al door worden beïnvloed. Het grootste deel van het slibrijke laagdynamisch litoraal in de Waddenzee bevindt zich in dit gebied. Dit ecotoop wordt in de Waddenzee gekenmerkt door de strandgaper (*Mya arenaria*), een soort die tolerant is voor een breed bereik aan saliniteitswaarden (van Donk & Baptist, 2021; Sunila & Faley, 1989). Het Balgzand, de gebieden rond de Den Oever en Kornwerderzand en het gebied langs de Friese vastelandskust bestaat verder vooral uit laagdynamisch sublitoraal en laagdynamisch fijnzandig litoraal. Deze ecotopen vinden we echter ook in gebieden die niet of nauwelijks beïnvloed worden door zoetwaterafvoeren, waardoor het niet duidelijk is in hoeverre het voorkomen zoals beschreven door van Donk & Baptist (2021) bepaald is door huidige zoetwaterafvoeren.

### 6.2.2 Ecologische effecten saliniteit bij afvoerveranderingen

Bij een verandering in de afvoeren van zoetwater naar de Waddenzee kunnen veranderingen optreden in de onderschrijdingsduur van 15 PSU en de variatie in saliniteit op korte en langere termijn. Hierdoor zijn lokale veranderingen in soortsmenstellingen aannemelijk.

De onderschrijdingsduur van 15 PSU neemt toe wanneer de afvoervolumes in de winter groter worden, met name in de buurt van Kornwerderzand, en af wanneer in de zomer niet meer afgevoerd wordt, met name rond Den Oever (Figuur 5-14 – effect spuivolume). Dit betekent dat bij het vergroten van het totale afvoerdebiet de onderschrijdingsduur van 15 PSU toeneemt, met mogelijk negatieve gevolgen voor benthische macrofauna. Het verminderen van het totale afvoerdebiet leidt tot een afname van de onderschrijdingsduur. Het verkorten van het spuienster zorgt voor een zeer lichte afname van de onderschrijdingsduur van 15 PSU en ook



het hanteren van een constant afvoerregime heeft met name rond Den Oever een afname van de onderschrijdingsduur ten gevolg (Figuur 5-14 – effect spuivester). Op basis van de onderschrijdingsduur wordt voor deze beide scenario's (5 en 6) geen negatief ecologisch effect verwacht. De afvoerlocatie heeft een sterk effect op de onderschrijdingsduur van 15 PSU. Wanneer zoetwaterafvoer plaatsvindt bij Kornwerderzand neemt de onderschrijdingstijd en rond de afvoerlocatie en langs de Friese vastelandskust toe, wat ongunstig is voor veel tweekleppige schelpdieren en bij Den Oever en in het Balgzand neemt de onderschrijdingstijd juist af, wat mogelijk gunstig is voor lokale benthische populaties. Bij afvoeren vanaf Den Oever vind het tegenovergestelde plaats (Figuur 5-14).

De vierdaagse variatie wordt ook beïnvloed door de mate, tijd en locatie van zoetwaterafvoeren (zie 5.2.2.2 - Vierdaagse variatie ). Een toename van spuivolume leidt tot grotere fluctuaties, terwijl een afname van het spuivolume leidt tot kleinere verschillen in saliniteit. Dit betekent dat de benthische ecologie minder verstoord wordt bij een afname van het totale spuivolume. De lengte van het spuienster heeft slechts een beperkt effect op de vierdaagse variatie; bij een verkort spuienster neemt de variatie niet toe en bij een constante afvoer neemt deze zelfs af, met mogelijk zelfs positieve ecologische effecten tot gevolg. De locatie waarvandaan zoetwater wordt afgevoerd heeft ook op de vierdaagse variatie een sterk effect, en zorgt vooral voor een toename van de variatie rondom de afvoerlocatie, wat naar verwachting een negatieve invloed heeft op de biodiversiteit. Het tegenovergestelde geldt voor de locatie waarvandaan niet meer wordt afgevoerd: hier neemt de variatie af.

Het verschil tussen de zomer en winter neemt verder toe bij beide scenario's waarin het afvoervolume verandert. Een toename in het verschil in saliniteit is doorgaans niet wenselijk voor de aanwezige meerjarige organismen. Met name het scenario waar in de winter het afvoervolume toeneemt zorgt voor een duidelijke toename in deze variatie. Daarnaast neemt in beide gevallen de saliniteit in de zomer toe, waardoor de zoutgradiënt vermindert en het migratiegedrag van migrerende vissoorten mogelijk verder verstoord wordt. De scenario's voor de effecten van het spuienster en de locatie lieten geen verschillen zien in de seizoensvariatie.

De afvoerregimes onder verschillende scenario's zullen de benthische ecologie in de Waddenzee op verschillende manieren beïnvloeden. Het scenario met toename in afvoervolume heeft tot gevolg dat de onderschrijdingsduur en de variatie op korte en lange termijn toeneemt, waardoor de druk op het ecosysteem wordt verhoogt. Scenario met een afname in het afvoervolume in de zomer zorgen voor een afname in de onderschrijdingsduur en vierdaagse variatie, maar een toename in seizoensvariatie omdat alleen in de zomermaanden minder zoet water wordt afgevoerd. Bij een toename in de afvoervariatie over het getij, worden geen negatieve effecten verwacht. Bij een constante afvoer neemt de onderschrijdingsduur van 15 PSU en de vierdaagse variatie licht af, waardoor dit mogelijk een verbetering is ten opzichte van de huidige strategie. De locatie waarvandaan zoetwaterafvoer plaatsvindt is belangrijk voor het gebied dat hierdoor wordt beïnvloed. Veranderingen in zoetwaterafvoeren vanaf Den Oever hebben een effect op de ecologie in het gebied rond Den Oever en in het Balgzand, terwijl veranderingen in zoetwaterafvoeren vanaf Kornwerderzand het gebied rond Kornwerderzand en langs de Friese kust beïnvloeden. Dit geeft de mogelijkheid om strategische keuzes te maken in het al dan niet voorkomen van negatieve ecologische effecten van zoetwaterafvoer in deze gebieden.

### 6.2.3 Huidige soortsamenstelling: beïnvloed door saliniteit en andere factoren

Hoewel de gemodelleerde saliniteitsfluctuaties en de duur van zoet- of zoutwater stress in litorale, laag-dynamische ecotopen sterk wordt beïnvloed door aanpassingen in afvoerregimes, zijn de ecologische effecten in de Waddenzee moeilijk te voorspellen. Dit wordt hier geïllustreerd aan de hand van verspreiding van drie soorten met een verschillende mate van zouttolerantie.

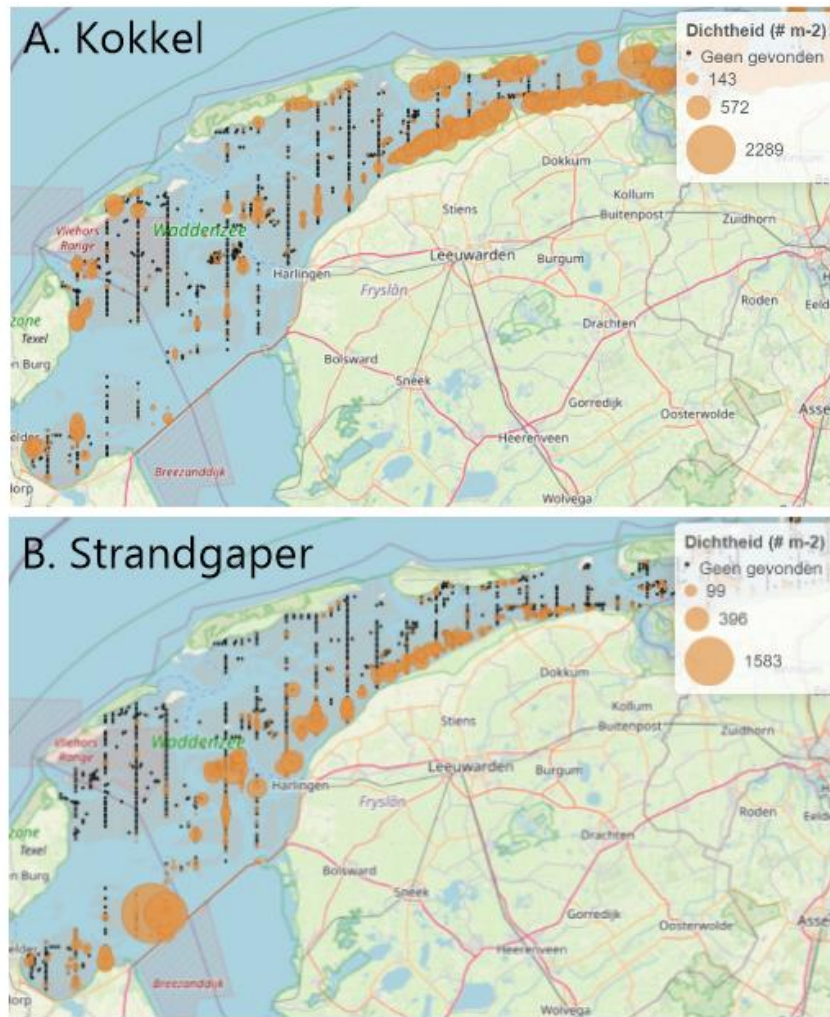
### 6.2.3.1 Effecten op een systeem dat al sterk beïnvloed is door saliniteit

Het is goed mogelijk dat de soortensamenstelling per ecotoop in de Waddenzee, zoals beschreven door van Donk en Baptist (2021), al beïnvloed is door de saliniteit. Huidige zoetwaterafvoeren hebben een sterk effect op de (variatie in) saliniteit in de Waddenzee. Deze effecten zijn het meest aanwezig in de ecotopen in de directe invloedssfeer van Den Oever en Kornwerderzand. Dit zijn de ecotopen met een variabel zoet of variabel brak zoutgehalte in de zoute ecotopenkaart van de Waddenzee uit 2017. De hoge mate van seizoensvariatie en vierdaagse variatie en de lange onderschrijdingstijd van 15 PSU maken deze gebieden minder geschikt voor veel soorten benthische macrofauna. Organismen die op deze locaties aangetroffen worden zijn soorten met een hoge mate van tolerantie voor lage saliniteitswaarden en hoge variatie in saliniteit, of hebben zich aan dergelijke omstandigheden kunnen aanpassen.

### 6.2.3.2 Effecten staan nooit op zichzelf

Het voorkomen van benthische organismen wordt niet uitsluitend door saliniteit bepaald maar door een verscheidenheid aan factoren, zoals onder andere nutriëntenbeschikbaarheid, voedselbeschikbaarheid, competitie, bodemsamenstelling, en stroming. Daarnaast kunnen indirecte effecten, zoals een toename of afname van het aantal predatoren of concurrenten een sterker effect hebben op het voorkomen van specifieke soorten. Zo profiteert de mossel (*Mytilus edulis*) mogelijk indirect van de zoetwaterinvloed rond de afsluitdijk doordat deze toleranter is dan de gewone zeester (*Asteria rubens*) (Troost, et al., 2022). Al met al is het niet mogelijk om soortvoorkomen te voorspellen aan de hand van één enkele indicator.

Dit wordt geïllustreerd in Figuur 6-2, waarin de verspreiding in dichtheid van de kokkel en de strandgaper in 2017 getoond wordt. De kokkel is relatief vatbaar voor saliniteit onder de 15 PSU. De strandgaper is juist relatief tolerant voor lagere saliniteitswaarden (Sunila & Faley, 1989). De verspreiding van beide soorten komt redelijk overeen met de verwachting op basis van deze onderschrijdingstijd. De minder tolerante kokkel komt weinig voor in de oostelijke Waddenzee en in de buurt van de Afsluitdijk, de gebieden waarin de condities wat saliniteit betreft ongunstig zijn. In het westelijk deel van de Waddenzee worden de meeste kokkels aangetroffen in de fijnzandig litorale gebieden van het Eierlandse gat, waar effecten van zoetwaterafvoeren nauwelijks merkbaar zijn. De strandgaper wordt juist wel aangetroffen in de gebieden nabij de afvoerlocaties en het slibrijke litorale gebied ten oosten van Kornwerderzand. Deze correlatie is slechts een mogelijke verklaring voor de verspreiding van beide soorten, voor een compleet beeld zouden ook andere factoren in beschouwing genomen moeten worden. Daarnaast is te zien dat saliniteit ook niet de enige verklarende factor kan zijn, omdat er ook kokkels voorkomen in het Balgzand en dit niet verklaart waarom de strandgaper weinig aangetroffen wordt in de gebieden waar de saliniteit niet onder de 15 PSU uitkomt.



*Figuur 6-2 Ruimtelijke verspreiding van de kokkel (A) en de strandgaper (B) in de litorale delen van de Waddenzee in 2017. Het formaat van de oranje cirkels geeft de relatieve dichtheid van beide soorten aan. De zwarte stippen zijn meetlocaties waar geen individuen zijn aangetroffen. (bron: [https://shiny.wur.nl/Schelpdiermonitor\\_Wadden/](https://shiny.wur.nl/Schelpdiermonitor_Wadden/)).*

Tot slot ligt de focus hier op benthische macrofauna, wat slechts een klein deel van het ecosysteem vertolkt. Andere relevante groepen organismen om rekening mee te houden zijn predatoren voor benthische macrofauna, zoals krabben, garnalen en jonge (plat)vis (van den Ende, van der Meer & Troost, persoonlijke communicatie, 7 november 2023). Ook de pelagische component van het voedselweb speelt een belangrijke rol in de Waddenzee, welke in dit rapport niet aan bod is gekomen. Twee aspecten die hierin met name relevant zijn in de context van zoetwaterafvoeren vanuit de Waddenzee en verder onderzocht zouden kunnen worden zijn de effecten van een toename aan nutriënten op de primaire productie van de Waddenzee en de invloed van zoet water als lokstroom voor vissen.

# 7 Conclusies & aanbevelingen

## 7.1 Conclusies

Door klimaatverandering wordt verwacht dat er in de winter meer neerslag valt en in de zomer minder. Daardoor moet er in de winter meer zoetwater worden afgevoerd vanuit het IJsselmeer naar de Waddenzee en juist minder in de zomer. Door zeespiegelstijging wordt verder verwacht dat er maar over een korter deel van de dag kan worden gespuid onder vrij verval, en mogelijk zal in de toekomst steeds meer zoetwater afgevoerd moeten worden door pompen. In deze studie is de gevoeligheid onderzocht van de saliniteit in de Waddenzee voor veranderingen in afvoerregimes van zoetwater vanuit het IJsselmeer. Hiervoor is met modelscenario's berekend wat het effect is van veranderingen van afvoerlocatie en van afvoervariatie over het getij en seizoenen.

De afvoerlocatie (Kornwerderzand of Den Oever) bleek vooral effecten te hebben op de ruimtelijke verdeling van saliniteit in de Waddenzee. Water dat via Den Oever wordt afgevoerd wordt relatief snel afgevoerd uit de Waddenzee via het Marsdiep en heeft vooral invloed op de saliniteit rond het Balgzand. Water dat via Kornwerderzand wordt afgevoerd stroomt voornamelijk langs de Friese kust richting de oostelijke Waddenzee en beïnvloedt daar de saliniteit. In deze respectievelijke gebieden, hebben veranderingen in seizoenvariatie in afvoervolume een groot effect op de gemiddelde saliniteit en de verschillen in saliniteit tussen zomer en winter. Bij verhoging van de afvoer in de winter neemt de wintergemiddelde saliniteit af. Afname van de afvoeren in de zomer leiden tot een verhoging van de zomergemiddelde saliniteit. Door zulke veranderingen in winter- en zomerafvoeren, zoals verwacht worden onder klimaatverandering, nemen de verschillen in saliniteit tussen zomer en winter dus toe, lokaal tot 5 – 8 PSU. De korte termijn fluctuaties in saliniteit zijn sterk gecorreleerd met de gemiddelde saliniteit: bij meer afvoer vanuit het IJsselmeer wordt de saliniteit lokaal verlaagd en nemen de korte termijn fluctuaties in saliniteit toe. Omgekeerd leiden afnames in afvoervolume tot verhoging van de saliniteit en afname van korte termijn fluctuaties in saliniteit. Veranderingen in de afvoervariatie over het getij bleken nauwelijks invloed te hebben op de gemiddelde saliniteit en korte termijn fluctuaties in saliniteit in de Waddenzee.

Er is een voorzichtige doorvertaling gemaakt van de gevonden saliniteitsveranderingen op mogelijke ecologische effecten in de Waddenzee. Hierbij is alleen gekeken naar directe effecten van saliniteit op benthische gemeenschappen en niet naar andere ecologische effecten van aanvoer van zoetwater, zoals verhoging van nutriëntenconcentraties. Uit een literatuurstudie en interviews met experts kwam naar voren dat in het algemeen een lage saliniteit onder ongeveer 15 PSU negatieve gevolgen kan hebben voor verschillende benthische organismen die veel voorkomen in estuariene gebieden. De biodiversiteit is in het algemeen ook lager in brakke wateren (tussen ongeveer 5 en 15 PSU) dan in zoete of zoute wateren. Specifiek voor de Waddenzee is er uit data-analyse nog geen duidelijk verband naar voren gekomen tussen saliniteit en de samenstelling van benthische gemeenschappen. Wel lieten de modelberekeningen zien dat ook in de huidige situatie de saliniteit in de Waddenzee al vaak onder de 15 PSU komt.

Uit de literatuur en de interviews kwam ook naar voren dat fluctuaties in saliniteit negatief kunnen zijn voor de fitheid en overlevingskansen van verschillende organismen. Maar doordat de verschillende studies slecht vergelijkbaar zijn is er geen duidelijke kennisregel af te leiden om fluctuaties in saliniteit door te vertalen naar ecologische effecten op specifieke soorten of gemeenschappen. In de praktijk wordt het voorkomen van organismen nooit alleen bepaald door saliniteit maar ook door andere omgevingsfactoren zoals temperatuur, graasdruk, bodemsamenstelling, voedselbeschikbaarheid en competitie.

In deze studie hebben we een kwalitatieve ecologische doorvertaling gemaakt, waarin we aannemen dat een toename van de onderschrijdingsduur van 15 PSU en toename van saliniteitsfluctuaties op korte termijn (enkele dagen) en tussen seizoenen negatief kunnen zijn voor benthische gemeenschappen. Dit betekent dat, in de gebieden rond het Balgzand en langs de Friese kust die nu al onder invloed staan van lage saliniteit vanuit het IJsselmeer, die invloed sterker zal worden en dat de invloedsfeer zal uitbreiden bij toename van de afvoeren vanuit het IJsselmeer. Bij afname van de afvoer in de zomer zal de directe invloed van lage saliniteit op benthische gemeenschappen in die gebieden minder worden, waardoor die van samenstelling kunnen veranderen. De afname van afvoer in de zomer leidt ook tot grotere verschillen in saliniteit tussen zomer en winter, wat mogelijk negatieve ecologische effecten kan hebben. Bij het wegvallen van afvoeren uit het IJsselmeer in de zomer zou de zout-zoet gradiënt in de Waddenzee zelfs grotendeels verdwijnen. Deze gradiënt lijkt in de huidige situatie een belangrijke invloed te hebben op de ecologie van de Waddenzee: deels via directe effecten van saliniteit maar ook door andere effecten zoals de aanvoer van voedingsstoffen met zoet water.

## 7.2 Aanbevelingen voor nader onderzoek

In deze studie hebben we gebruik gemaakt van hypothetische scenario's van afvoeren vanuit het IJsselmeer om de gevoeligheid van saliniteit in de Waddenzee van afvoerlocatie en van afvoervariatie over het getij en de seizoenen te verkennen. Om een beter inzicht te krijgen in de effecten van mogelijke aanpassingen in afvoerregimes in een toekomst met klimaatverandering zouden realistischer modelscenario's moeten worden gesimuleerd. Hierbij kan dan rekening worden gehouden met aanpassingen in afvoerregimes die nu worden overwogen in combinatie met afvoeren vanuit het IJsselmeer die door klimaatmodellen worden voorspeld. Hierin zouden dan idealiter ook zeespiegelstijging en verandering in windklimaat en de effecten daarvan op stroming in de Waddenzee moeten worden meegenomen.

In deze studie hebben we een kwalitatieve ecologische doorvertaling gemaakt van veranderingen in saliniteit op benthische gemeenschappen, op basis van beschikbare kennis in de literatuur en van experts. Deze kennis is specifiek voor de Waddenzee nog vrij beperkt. Een nadere statistische analyse van de correlatie tussen ruimtelijke patronen van benthische organismen met saliniteit en andere mogelijke verklarende variabelen zou hier meer inzicht in kunnen geven. Hiervoor zouden modeldata van saliniteit kunnen worden gebruikt waar veldmetingen van voldoende ruimtelijke en temporele resolutie ontbreken. Ter validatie en voor de verhoging systeembegrip is er behoefte aan meerjarige metingen van saliniteit en nutriënten in de gebieden die het sterkst worden beïnvloed door zoet water vanuit het IJsselmeer: bij het Balgzand en langs de Friese kust.

In deze studie is alleen nog gekeken naar directe ecologische effecten van lage saliniteit en fluctuaties in saliniteit. Om een betere inschatting te maken van de te verwachten ecologische effecten in de Waddenzee zou ook naar andere effecten moeten worden gekeken, zoals effecten van nutriëntenaanvoer vanuit zoet water en de rol van zoet water als lokstroom voor vissen naar het IJsselmeer.

# Bibliografie

- Arcadis, 2022. *Saliniteitseffecten gebruik Nieuwe Spuimiddelen Afsluitdijk*, Amersfoort: sn
- Bouma, H. et al., 2005. Zoute wateren Ecotopenstelsel: Voor het in kaart brengen van het potentiële voorkomen van levensgemeenschappen in zoute en brakke rijkswateren.
- Cadée, G. C. & Hegeman, J., 1974. Primary production of the benthic microflora living on tidal flats in the dutch wadden sea.
- Christianen, M. J. A. et al., 2017. Benthic primary producers are key to sustain the Wadden Sea food web: stable carbon isotope analysis at landscape scale. *Ecology*, 98(6), pp. 1498-1512.
- Dankers, N., Dijkema, K. S., Reijnders, P. J. H. & Smit, C., 1994. Biodiversity of the Wadden Sea (Denmark, Germany, the Netherlands): Recent changes and future projections. *Biodiversity, temperate ecosystems and global change*.
- Deltares, 2024. *D-Water Quality, User Manual FM*, Delft: Deltares.
- Diederich, S., 2006. Invasion of Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) in the Wadden Sea : competitive advantage over native mussels.
- Donatelli, C., Duran-Matute, M., Gräwe, U. & Gerkema, T., 2022-a. Residual circulation and freshwater retention within an event-driven system of intertidal basins. *Journal of Sea Research*, Issue 186.
- Donatelli, C., Duran-Matute, M., Gräwe, U. & Gerkema, T., 2022-b. Statistical Detection of Spatio-Temporal Patterns in the Salinity Field Within an Inter-Tidal Basin. *Estuaries and Coasts*, Issue 45, pp. 2345-2361.
- Duran-Matute, M. et al., 2014. Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study. *Ocean Science*, Issue 10, pp. 611-632.
- Duran-Matute, M., Gerkema, T. & Sassi, M., 2016. Quantifying the residual volume transport through a multiple-inlet system in response to wind forcing: The case of the western Dutch Wadden Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Issue 121, pp. 8888-8903.
- Fajardo-Urbina, J. et al., 2023. Atmospherically Driven Seasonal and Interannual Variability in the Lagrangian Transport Time Scales of a Multiple-Inlet Coastal System. *JGR Oceans*, Issue 128.
- Hoekstra, P. & Philippart, C., 2021. Klimaatverandering en ecologie. *Position Paper Waddenacademie en Omgevingsberaad Waddengebied*, Issue 01, pp. 18-19.
- Iwantoro, A., 2016. *The Effect Of Afsluitdijk Construction To The Wadden Sea Salinity And Fine Sediment Dynamics*, Delft: Internship report Deltares. .
- Kefford, B. J., Papas, P. J., Metzeling, L. & Nuggeoda, D., 2004. Do laboratory salinity tolerances of freshwater animals correspond with their field salinity?. *Environmental Pollution*, 129(3), pp. 355-362.
- KNMI, 2023. *KNMI'23 Klimaatscenario's voor Nederland*, De Bilt: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Knöbel, L. et al., 2021. Salinity Driven Selection and Local Adaptation in Baltic Sea Mytilid Mussels. *Frontiers in Marine Science*, Volume 8.
- Leote, C., Mulder, L. L., Philippart, C. M. J. & Epping, E. H. G., 2016. Nutrients in the Western Wadden Sea: Freshwater Input Versus Internal Recycling. *Estuaries and Coasts*, 39(1), pp. 40-53.
- Mitra, A. et al., 2023. *Dutch Wadden Sea as an Event-driven System: A Numerical Perspective*. sl, NCK Book of Abstracts.
- NIOZ, 2024. [Online]  
Available at: <https://www.nioz.nl/en/news/salt-gradient-in-the-wadden-sea-under-pressure-due-to-changing-climate>  
[Geopend 23 2024].

- Paree, et al., 2020. Toelichting op de zoute ecotopenkaart Waddenzee 2017. *Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening*, pp. 1-57.
- Peteiro, L. G. et al., 2016. Responses to salinity stress in bivalves: Evidence of ontogenetic changes in energetic physiology on *Cerastoderma edule*. *Scientific Reports*, 8(1), p. 8329.
- Philippart, C. et al., 2024. *Wadden Sea Quality Status Report: Climate Change*, Wilhelmshaven, Germany: Common Wadden Sea Secretariat.
- Philippart, C. & Epping, E., 2009. Climate Change and Ecology. *Wadden Sea Ecosystem Quality Status Report 2009*, 25(4).
- Postma, H., 1950. The distribution of temperature and salinity in the Wadden Sea. *Tijdschrift van het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap*, pp. 34-42.
- Rato, A. et al., 2022. The Impact of Climate Change on Bivalve Farming: Combined Effect of Temperature and Salinity on Survival and Feeding Behavior of Clams *Ruditapes decussatus*. *Frontiers in Marine Science*, Volume 9.
- Remane, A., 1934. Die Brackwasserfauna: Mit besonderer Berücksichtigung der Ostsee. *Zoologischer Anzeiger*.
- Riisgård, H. U. et al., 2013. Effect of salinity on filtration rates of mussels *Mytilus edulis* with special emphasis on dwarfed mussels from the low-saline Central Baltic Sea. *Helgoland Marine Research*, 67(3), pp. 591-598.
- Rijkswaterstaat, 2018. *Peilbesluit IJsselmeergebied*, sl: sn
- Saranchova, O. L., 2001. Research into tolerance for the environment salinity in sea starfish *Asterias rubens* L. from populations of the White Sea and Barentz Sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 264(1), pp. 15-28.
- Smits, B., Jaksic, L. & Dijkstra, J., Ongepubliceerd. *Modellering van abiotiek voor en na afsluiting Zuiderzee: relevantie voor ongedoken Groot zeegras*, Delft: Deltares.
- Smits, B., Jaksic, L., Dijkstra, J. & Vroom, J., 2023. *Modellering van abiotiek voor en na afsluiting Zuiderzee: relevantie voor herstelkansen ondergedoken Groot zeegras*, Delft: Deltares.
- Smyth, K., Elliot, M., Solan, M. & Whiteley, N., 2016. Effects of changing salinity on the ecology of the marine environment. In: *Stressors in the Marine Environment: Physiological and ecological responses; societal implications*. sl:Oxford University Press.
- Stolte, W. et al., 2023. *Digitale Systeemrapportage van de Waddenzee, versie 1.0.* [Online] Available at: <https://systeemrapportage.nl/wadden/>
- Sunila, I. & Faley, C. A., 1989. from the soft-shell clam *Mya arenaria*. *Dis. Aquat. Org*, Volume 7, pp. 111-115.
- Troost, K., van der Meer, J. & van Stralen, M., 2022. The longevity of subtidal mussel beds in the Dutch Wadden Sea. *Journal of Sea Research*, Volume 181.
- van Aken, H. M., 2008. Variability of the salinity in the western Wadden Sea on tidal to centennial time scales. *Journal of Sea Research*, pp. 121-132.
- Van der Hoeven, P., 1982. *Watertemperatuur en Zoutgehaltewaarnemingen van het Rijksinstituut voor Visserij Onderzoek (RIVO): 1860-1981.* , sl: KNMI.
- van Diggelen, A. D. & Montagna, P. A., 2016. Is Salinity Variability a Benthic Disturbance in Estuaries?. *Estuaries and Coasts*, 39(4), pp. 967-980.
- van Donk, S. & Baptist, M., 2021. Validatie van het Zoute wateren EcotopenStelsel (ZES. 1) in de Waddenzee.
- van Reen, M., 2005. *Saliniteit op het Balgzand: Analyse van saliniteit in relatie met zoetwaterdebieten op de westelijke Waddenzee, inclusief historische beschouwing*, sl: Rijkswaterstaat.
- Verdelhos, T., Marques, J. & Anastácio, P., 2015. The impact of estuarine salinity changes on the bivalves *Scrobicularia plana* and *Cerastoderma edule*, illustrated by behavioral and mortality responses on a laboratory assay. *Ecological Indicators*, Volume 52.
- Vroom, J., van Weerdenburg, R., Smits, B. & Herman, P., 2020. *Modellering slibdynamiek voor de Waddenzee: kalibratie voor KRW slib*, Delft: Deltares.

- Westerbom, M., Kilpi, M. & Mustonen, O., 2002. Blue mussels, *Mytilus edulis*, at the edge of the range: population structure, growth and biomass along a salinity gradient in the north-eastern Baltic Sea. *Marine Biology*, Volume 140, pp. 991-999.
- Whitfield, A. K. et al., 2012. Paradigms in estuarine ecology – A review of the Remane diagram with a suggested revised model for estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 97, pp. 78-90.
- Witteveen + Bos, 2015. *Verdiepend effectonderzoek waterkwaliteit en morfologie Afsluitdijk*, sl: Rijkswaterstaat Midden-Nederland.
- Woodin, S. A. et al., 2020. Behavioral responses of three venerid bivalves to fluctuating salinity stress. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Volume 522.
- Ysebaert, T., Meire, P., Herman, P. M. J. & Verbeek, H., 2002. Macrobenthic species response surfaces along estuarine gradients: prediction by logistic regression. *Marine Ecology Progress Series*, Volume 225, pp. 79-95.
- Zijl, F., van Weerdenburg, R. & Laan, S., 2023. *DWSM: a sixth-generation 3D model of the Dutch Wadden Sea. 2022 release. 1208054-006-ZKS-0001*, Delft: Deltares.
- Zimmerman, J., 1976. Mixing and flushing of tidal embayments in the western Dutch Wadden Sea part I: Distribution of salinity and calculation of mixing time scales. *Neth. J. Sea Res.*, Issue 10, pp. 149-191.



# A Tabellen karakteristieke soorten

## A.1 Biomassa

Tabel 1 Overzicht van karakteristieke soorten per ecotoop in de Waddenzee gebruikmakend van de SIBES/Waddenmozaïek dataset. Alleen taxa die meer dan 5 procent van het totale gewicht uitmaken in een ecotoop zijn genoemd. Overgenomen uit van Donk en Baptist (2021).

Ecotoop (n=aantal monsterpunten)	Karakteristieke soorten (% totale biomassa)
Hoogdynamisch zacht substraat in het diepe sublitoraal (n=317)	Ensis leei (80), Lanice conchilega (14)
Hoogdynamisch zacht substraat in het ondiepe sublitoraal (n=195)	Ensis leei (84)
Laagdynamisch zacht substraat in het diepe sublitoraal (n=12)	Ensis leei (60), Mya arenaria (35)
Laagdynamisch zacht substraat in het ondiepe sublitoraal (n=781)	Mya arenaria (42), Ensis leei (35), Peringia ulvae (8)
Hoogdynamisch fijnzandig litoraal (n=293)	Ensis leei (41), Cerastoderma edule (24), Arenicola marina (10), Scoloplos armiger (9)
Laagdynamisch fijnzandig laag litoraal (n=1480)	Ensis leei (33), Arenicola marina (17), Cerastoderma edule (13), Mya arenaria (11), Lanice conchilega (8)
Laagdynamisch fijnzandig middelhoog litoraal (n=1632)	Cerastoderma edule (22), Arenicola marina (19), Mya arenaria (14), Hediste diversicolor (10), Heteromastus filiformis (6), Peringia ulvae (5)
Laagdynamisch fijnzandig hoog litoraal (n=13)	Peringia ulvae (35), Hediste diversicolor (17), Pygospio elegans (14), Mya arenaria (10), Arenicola marina (7), Oligochaeta (6), Limecola balthica (5)
Laagdynamisch slibrijk laag litoraal (n=90)	Mya arenaria (51), Cerastoderma edule (18), Heteromastus filiformis (8), Ensis leei (7)
Laagdynamisch slibrijk middelhoog litoraal (n=607)	Mya arenaria (31), Cerastoderma edule (18), Hediste diversicolor (11), Heteromastus filiformis (9), Limecola balthica (7), Peringia ulvae (7), Corophiidae (6)

## A.2 Voorkomen

Tabel 2 Overzicht karakteristieke soorten per ecotoop in de Waddenzee gebruikmakend van de SIBES/Waddenmozaïek dataset. Alleen taxa die in meer dan 25 procent van de monsters voorkomen per ecotoop zijn genoemd. Overgenomen uit van Donk en Baptist (2021).

Ecotoop (n=aantal monsterpunten)	Karakteristieke soorten (% voorkomen in de monsters)
Hoogdynamisch zacht substraat in het diepe sublitoraal (n=317)	Capitella sp. (52), Heteromastus filiformis (47), Bathyporeia sp. (47), Scoloplos armiger (38), Nephtys sp. (32), Magelona sp. (26)
Hoogdynamisch zacht substraat in het ondiepe sublitoraal (n=195)	Capitella sp. (56), Scoloplos armiger (56), Bathyporeia sp. (45), Pygospio elegans (40), Ensis leei (38), Heteromastus filiformis (34), Nephtys sp. (30), Spio sp. (29)
Laagdynamisch zacht substraat in het diepe sublitoraal (n=12)	Heteromastus filiformis (83), Oligochaeta (58), Capitella sp. (50), Ensis leei (50), Pygospio elegans (42), Cirratulidae (33), Spio sp. (33), Alitta succinea (25), Limecola balthica (25), Scoloplos armiger (25)

Laagdynamisch zacht substraat in het ondiepe sublitoraal (n=781)	Scoloplos armiger (62), Pygospio elegans (56), Heteromastus filiformis (55), Capitella sp. (54), Cirratulidae (42), Ensis leei (35), Spio sp. (29)
Hoogdynamisch fijnzandig litoraal (n=293)	Scoloplos armiger (80), Pygospio elegans (70), Urothoe sp. (45), Capitella sp. (41), Bathyporeia sp. (35), Heteromastus filiformis (29)
Laagdynamisch fijnzandig laag litoraal (n=1480)	Pygospio elegans (78), Scoloplos armiger (72), Heteromastus filiformis (54), Capitella sp. (52), Cirratulidae (40), Arenicola marina (34), Urothoe sp. (24), Ensis leei (28), Eteone sp. (26)
Laagdynamisch fijnzandig middelhoog litoraal (n=1632)	Pygospio elegans (87), Heteromastus filiformis (66), Scoloplos armiger (65), Eteone sp. (55), Cirratulidae (53), Limecola balthica (53), Hediste diversicolor (52), Arenicola marina (48), Capitella sp. (45), Oligochaeta (44), Urothoe sp. (42), Nereididae (30), Cerastoderma edule (30)
Laagdynamisch fijnzandig hoog litoraal (n=13)	Peringia ulvae (100), Pygospio elegans (100), Hediste diversicolor (92), Oligochaeta (92), Abra tenuis (85), Eteone sp. (69), Corophiidae (62), Limecola balthica (62), Capitella sp. (54), Arenicola marina (31), Bathyporeia sp. (31), Fabricia stellaris stellaris (31), Heteromastus filiformis (31), Nereididae (31)
Laagdynamisch slibrijk laag litoraal (n=90)	Heteromastus filiformis (94), Cirratulidae (53), Pygospio elegans (44), Hediste diversicolor (31), Oligochaeta (29), Limecola balthica (28), Mya arenaria (26)
Laagdynamisch slibrijk middelhoog litoraal (n=607)	Heteromastus filiformis (83), Pygospio elegans (69), Oligochaeta (62), Limecola balthica (59), Cirratulidae (57), Hediste diversicolor (56), Corophiidae (47), Peringia ulvae (38), Eteone sp. (36), Alitta succinea (28), Mya arenaria (26), Cerastoderma edule (26)

## B Beschikbare tijdseries afvoerregimes

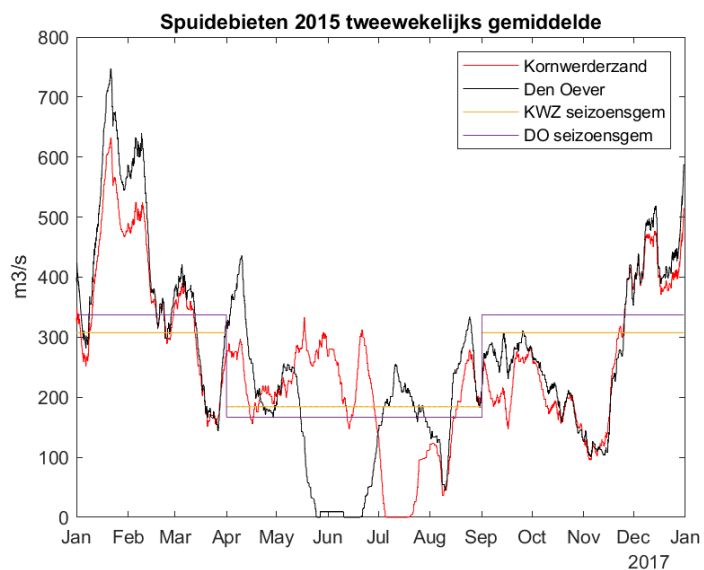


Figure B-1 Tijdserie van de tweewekelijks gemiddelde afvoer in Den Oever en Kornwerderzand in 2015 en seizoensgemiddelde waarden.

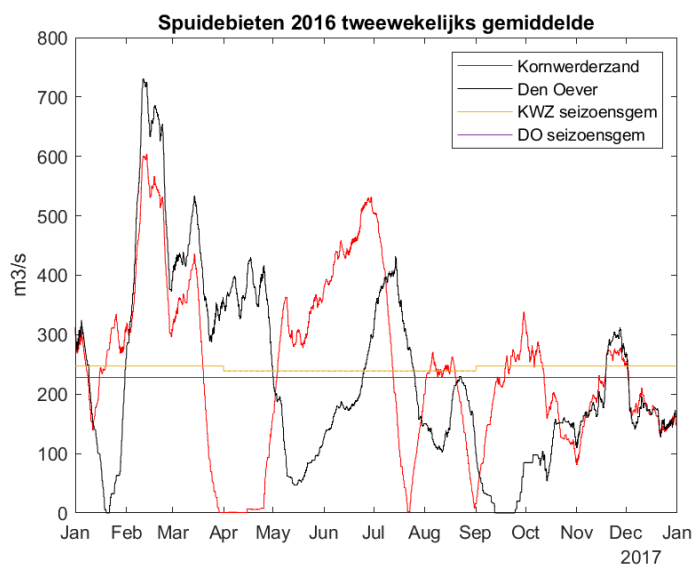


Figure B-2 Tijdserie van de tweewekelijks gemiddelde afvoer in Den Oever en Kornwerderzand in 2016 en seizoensgemiddelde waarden.

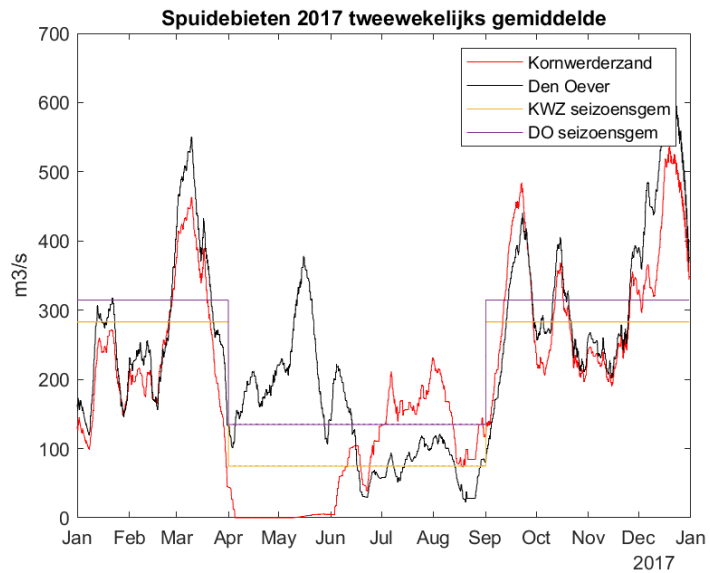


Figure B-3 Tijdsree van de tweewekelijks gemiddelde afvoer in Den Oever en Kornwerderzand in 2017 en seizoensgemiddelde waarden.

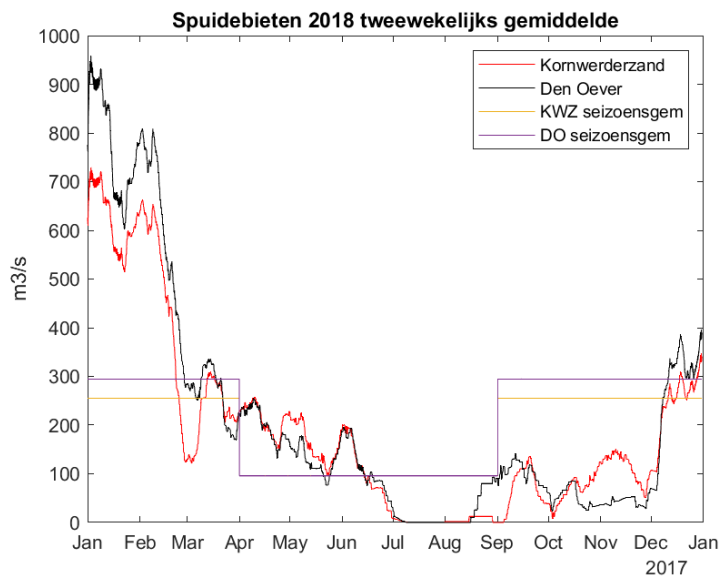


Figure B-4 Tijdsree van de tweewekelijks gemiddelde afvoer in Den Oever en Kornwerderzand in 2018 en seizoensgemiddelde waarden.

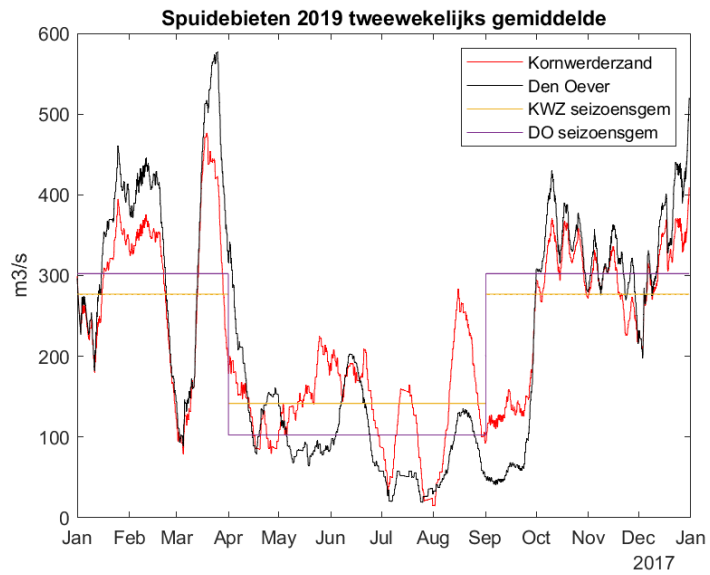


Figure B-5 Tijdsree van de tweewekelijks gemiddelde afvoer in Den Oever en Kornwerderzand in 2019 en seizoensgemiddelde waarden.

## C Analyse modelresultaten

### C.1 Fourier methode

Om relevante statistieken van de saliniteit te verkrijgen, is gewerkt met ruimtelijk variërende fourier-output die elke 8 getijdencycli werd weggeschreven door het Delft3D-FM model.

De onderschrijdingsduur in de fourier-uitvoer is gedefinieerd als de tijd waarin de saliniteit lager is dan een vooraf ingestelde signaalwaarde binnen deze periode van 8 getijdencycli. De onderschrijdingsduur per seizoen en jaar is vervolgens berekend door de tijd van alle periodes op te tellen. In de post-processing is deze omgerekend naar een percentage: zo wordt van iedere periode berekend welk deel van de tijd de saliniteit onder de signaalwaarde ligt. Hiermee kan een gemiddelde onderschrijdingsduur (in %) worden berekend. Voor de overige statistieken (min, max, gemiddelde) zijn de seizoen gemiddelde en jaargemiddelde statistieken zijn afgeleid door het gemiddelde te nemen van de uitvoer van de 8-getijdencycli-durende fourier periodes.

### C.2 Aanpak aggregeren ecotopenkaart

Om meer overzicht te creëren binnen de grote mate van zichtbare versplintering in de ecotopenkaart van de Waddenzee uit 2017 zijn vergelijkbare ecotopen samengevoegd. Er is gekozen om geen verder onderscheid te maken tussen diep, ondiep en zeer diep sublitoraal en laag, middelhoog en hoog litoraal (variabele diepte 2 in ZES.1 (Bouma et al., 2005)). Deze keuze is gemaakt ten behoeve van de interpretatie van de resultaten, gebaseerd op de lage positie in de hiërarchische indeling in het ZES.1 ecotopenstelsel, de hoge mate van connectiviteit en afwisseling tussen deze ecotopen in de ecotopenkaart Waddenzee 2017 en de hoge mate van overeenkomst in karakteristieke soorten op basis van Tabel 1 en Tabel 2 uit de validatie van van Donk en Baptist (2021), gebaseerd op data van SIBES/Waddenmozaïek. Ook staan binnen deze variabele de grenzen die aangehouden worden onder ZES.1 ter discussie (van Donk en Baptist 2021). De variabele substraat 2 heeft in het kader van het ZES.1 ecotopenstelsel een lagere positie dan de variabele diepte 2. Desondanks is deze variabele in de huidige context opgenomen. Hier zijn twee redenen voor. Enerzijds is er een relevante connectie met toekomstige plannen om slibmodellering te integreren in de studie van de effecten van zoetwaterafvoeren naar de Waddenzee. Anderzijds zijn de zandige en slibrijke redelijk los van elkaar en aaneengesloten gelegen binnen de Zoute ecotopenkaart van 2017.

Door de grote verschillen saliniteit en verandering in saliniteit in de ruimte, is er bij het selecteren van gebieden voor gekozen onderscheid te maken op basis van ligging ten opzichte van de afvoerlocaties. Zo kan voor beide afvoerlocaties afzonderlijk het effectgebied beschouwd worden, maar ook onderscheid gemaakt worden tussen bijvoorbeeld gebieden langs de afsluitdijk, in het Marsdiep en meer in oostelijke richting. Binnen ecotopen zijn zowel de biotische en abiotische factoren redelijk homogeen. Daarom kan door het ecotopenstelsel als uitgangspunt te gebruiken kan op deze manier een relatief overzichtelijk beeld geschetst worden van de saliniteitsveranderingen, met name op het gebied van variatie welke vervolgens gekoppeld kan worden aan de verwachte soortsamenvesting binnen een ecotoop.

Op basis van de nieuwe kaart die op deze wijze is ontstaan zijn gebieden relevante gebieden aangewezen. Deze selectie is gebaseerd op de mate van verwacht effect en oppervlakte van het gebied. Dit heeft tot gevolg dat gebieden in de buurt van de afvoerlocaties Den Oever en Kornwerderzand slechts een kleiner oppervlakte nodig hebben om als relevant beschouwd te worden. Sommige gebieden bestaan uit één aaneengesloten gebied van eenzelfde ecotoop,

terwijl andere gebieden uit meerdere kleine gebieden van hetzelfde ecotoop kunnen bestaan. Het gebied ten oosten van de Zwarte Haan, de geul tussen Ameland en Schiermonnikoog die tot aan het Friese vasteland reikt, is gebruikt als oostelijke grens. Op basis van modelresultaten bleek dat deze gebieden niet of nauwelijks worden beïnvloed door zoetwaterafvoeren vanaf de afsluitdijk, maar veranderingen in saliniteit in dit gebied voornamelijk onder invloed staan van afvoeren vanuit het Lauwersmeer.

Bij het samenstellen van de geaggregeerde ecotopenkaart zijn twee regels gehanteerd:

1. Wanneer twee aaneengesloten gebieden alleen verschillen in de variabele 'diepte 2' binnen het ZES.1 ecotopstelsel worden deze samengevoegd. Dit betekent dat 'diep sublitoraal' en 'ondiep sublitoraal' (in de Waddenzee wordt geen 'zeer diep sublitoraal' aangetroffen) worden samengevoegd tot 'sublitoraal' en dat 'laag litoraal', 'middelhoog litoraal' en 'hoog litoraal' worden samengevoegd tot 'litoraal'. Het areaal aan supralitoraal in het gebied dat doorgaans wordt beschouwd als de Waddenzee is zeer beperkt en niet relevant voor de soortgroepen waar binnen deze studie naar gekeken wordt. Deze gebieden zijn niet samengevoegd.
2. Wanneer een gebied van een ander ecotoop, kleiner dan 40000 m<sup>2</sup> (oppervlakte van één gridcel) wordt ingesloten door een ander ecotoop binnen, wordt geprobeerd deze samen te voegen met het grotere gebied.

De geaggregeerde ecotopenkaart onderscheidt de volgende gebieden:

- 1) Laagdynamisch fijnzandig litoraal in het Balgzand/ten westen van Den Oever (brak);
- 2) Laagdynamisch fijnzandig litoraal bij Den Oever (variabel);
- 3) Laagdynamisch fijnzandig litoraal bij Lutjeswaard/ten oosten van Den Oever (brak);
- 4) Laagdynamisch fijnzandig litoraal in de Zwanenbalg/nabij Kornwerderzand (brak);
- 5) Laagdynamisch fijnzandig litoraal bij Kornwerderzand (variabel);
- 6) Laagdynamisch fijnzandig litoraal Waardgronden/Eierlandse gat (zout);
- 7) Laagdynamisch fijnzandig litoraal in het Vlie/Grienderwaard (zout);
- 8) Laagdynamisch fijnzandig litoraal nabij Harlingen (brak);
- 9) Laagdynamisch fijnzandig litoraal ten zuiden van Terschelling (zout);
- 10) Laagdynamisch fijnzandig litoraal ten oosten van het Vlie, dit grote gebied omvat in grote lijnen het Borndiep, het Pinkegat en een het westen van Zoutkamperlaag (zout);
- 11) Laagdynamisch slibrijk litoraal in het Balgzand/ten westen van Den Oever (brak);
- 12) Laagdynamisch slibrijk litoraal bij Den Oever (variabel);
- 13) Laagdynamisch slibrijk litoraal langs de Friese kust (zout);
- 14) Hoogdynamisch fijnzandig litoraal in het Balgzand/ten westen van Den Oever (brak);
- 15) Laagdynamisch sublitoraal in het Balgzand/ten westen van Den Oever (brak);
- 16) Laagdynamisch sublitoraal bij Den Oever (variabel);
- 17) Laagdynamisch sublitoraal ten noorden en oosten van Den Oever (brak);
- 18) Laagdynamisch sublitoraal in de Zwanenbalg/nabij Kornwerderzand (brak);
- 19) Laagdynamisch sublitoraal bij Kornwerderzand (variabel);
- 20) Laagdynamisch sublitoraal in het Marsdiep (zout);
- 21) Laagdynamisch sublitoraal in het Vlie (zout);
- 22) Hoogdynamisch sublitoraal bij Balgzand/nabij Den Oever (brak);
- 23) Hoogdynamisch sublitoraal bij Den Oever (variabel);
- 24) Hoogdynamisch sublitoraal Zwanenbalg en Doovebalg/nabij Kornwerderzand (brak);
- 25) Hoogdynamisch sublitoraal bij Kornwerderzand (variabel);
- 26) Hoogdynamisch sublitoraal in de Texelstroom (zout);
- 27) Hoogdynamisch sublitoraal in het Eierlandse gat en de Vlie (zout).

## D Verandering in saliniteit voor de verschillende scenario's

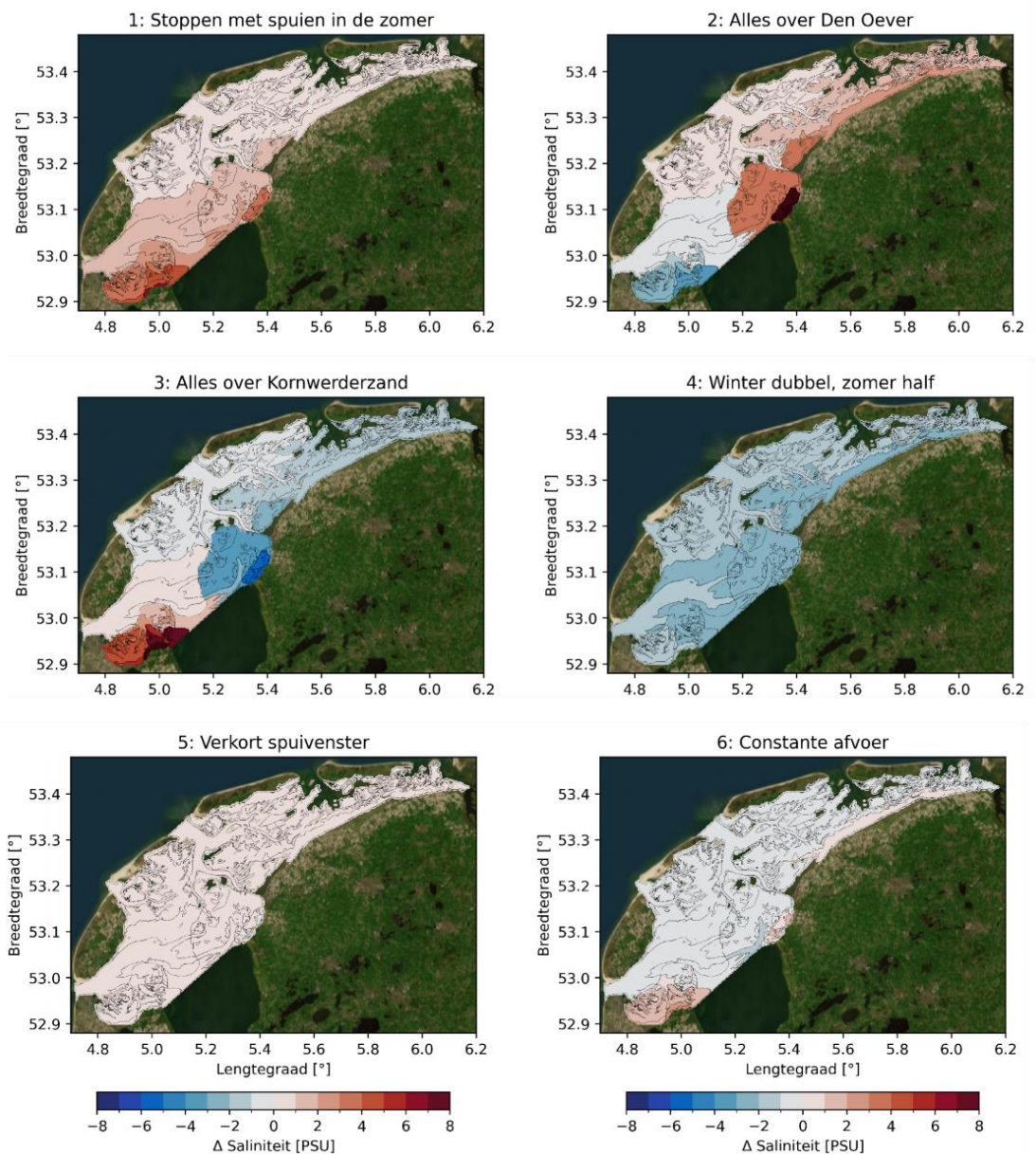


Figure D-1 Verandering in jaargemiddelde saliniteit per scenario.



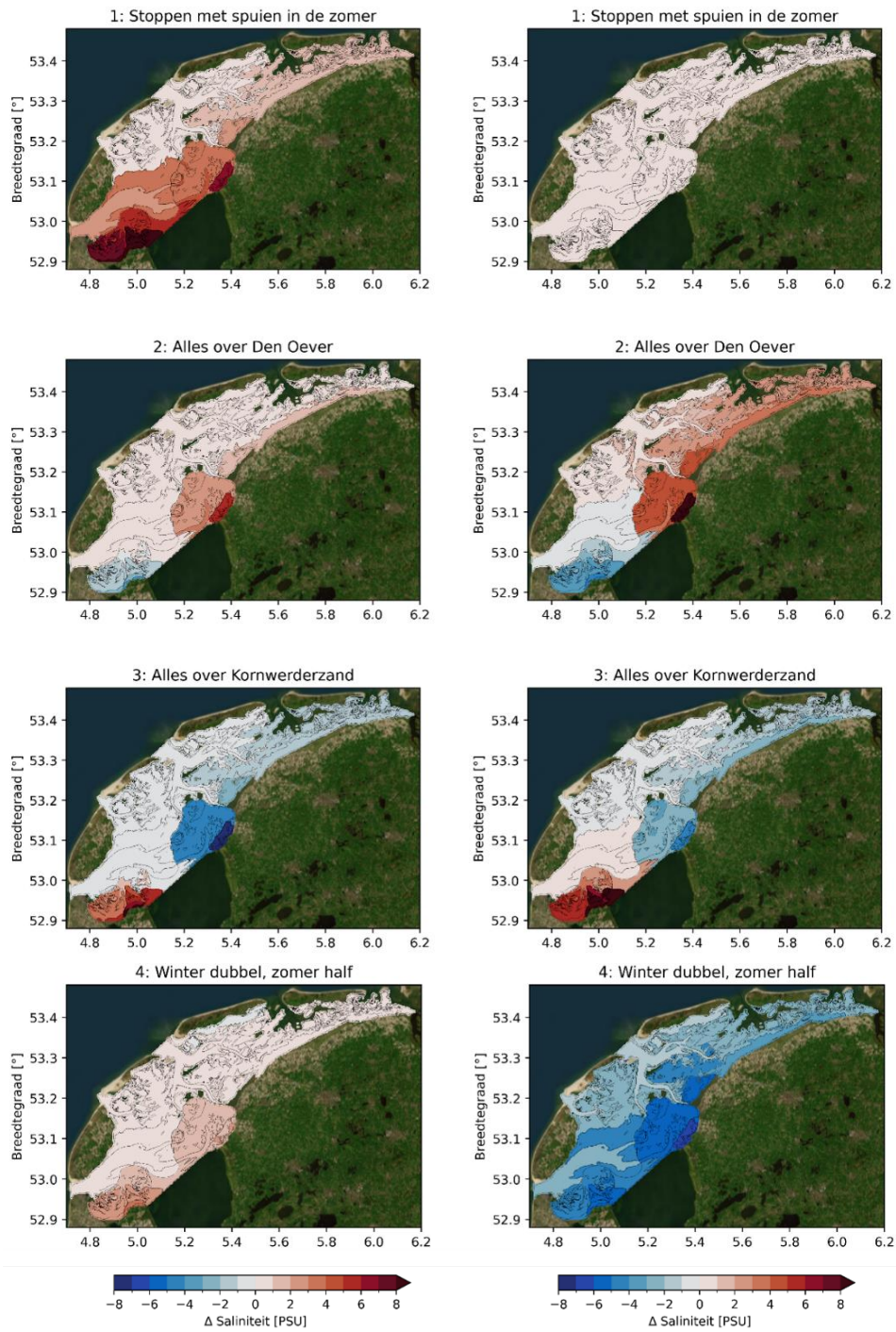


Figure D-2 Verandering in saliniteit per seizoen voor de scenario's 1, 2, 3 en 4. Links: veranderende saliniteit in de zomer, rechts in de winter. Veranderingen in scenario's 5 en 6 zijn identiek aan de jaargemiddelde verandering.

# E Gemiddelde saliniteit voor alle scenario's

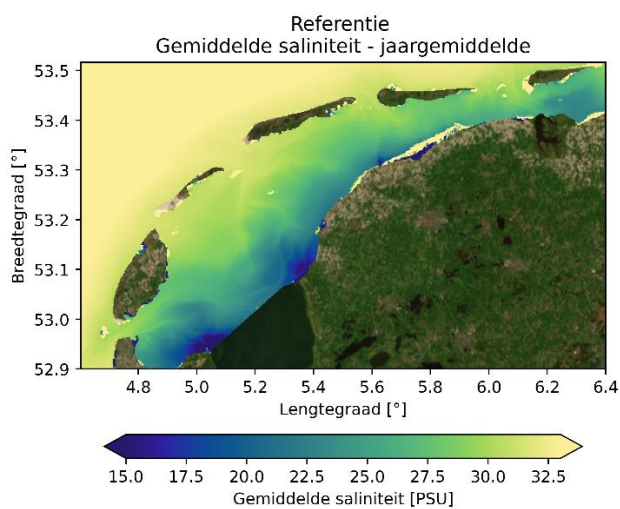


Figure E-1 Jaargemiddelde saliniteit – referentie.

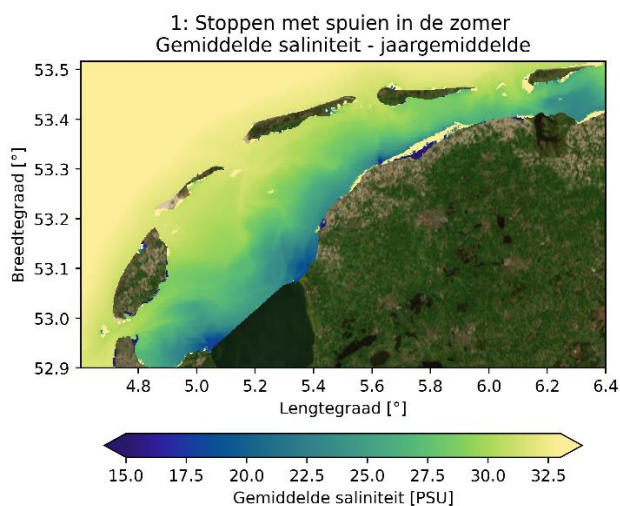


Figure E-2 Jaargemiddelde saliniteit scenario 1: stoppen met spuien in de zomer.

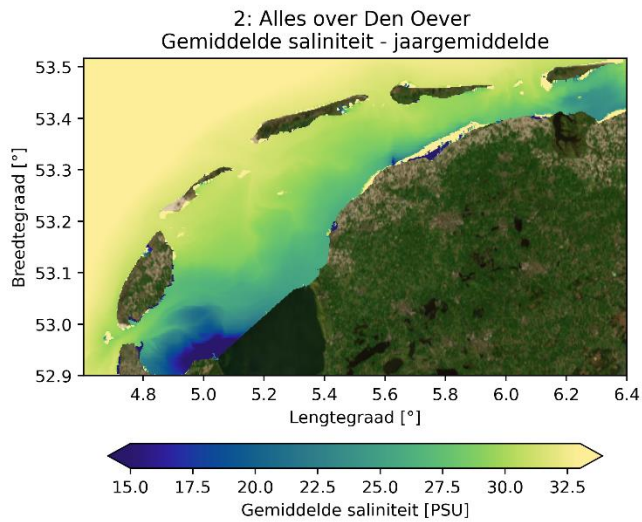


Figure E-3 Jaargemiddelde saliniteit scenario 3: volledige debiet afvoeren over Den Oever.

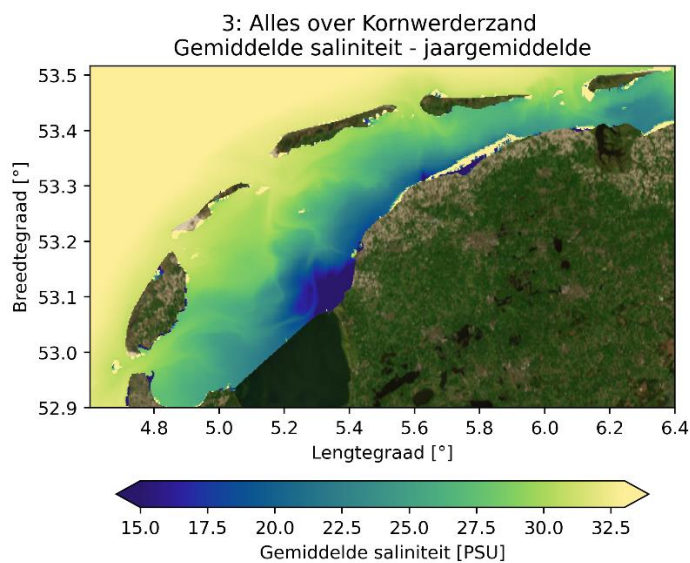


Figure E-4 Jaargemiddelde saliniteit scenario 4: volledige debiet afvoeren over Kornwerderzand.

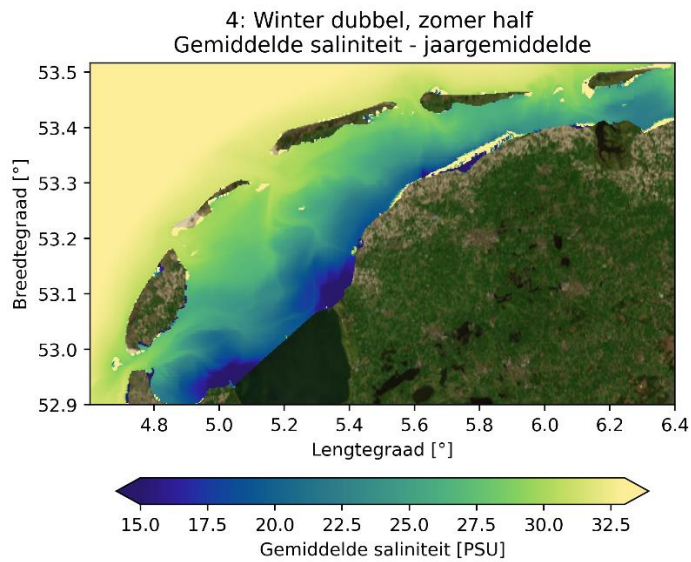


Figure E-5 Jaargemiddelde saliniteit scenario 5: afvoervolumes verdubbelen in de wintermaanden en halveren in de zomermaanden.

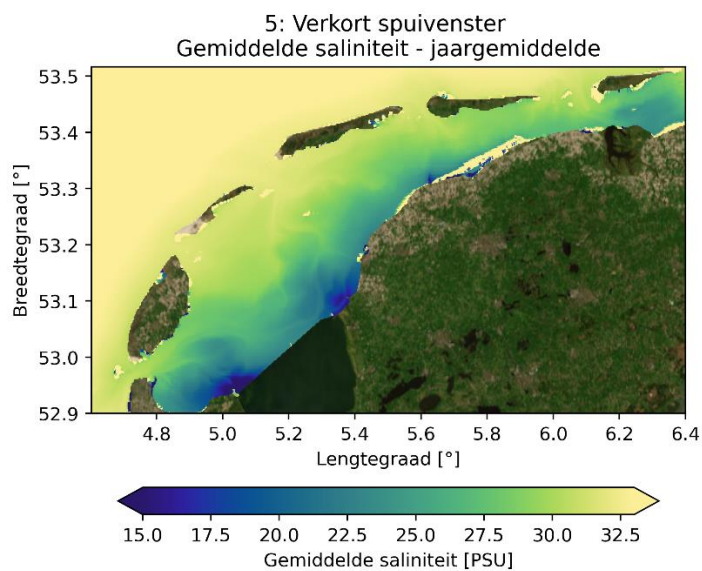


Figure E-6 Jaargemiddelde saliniteit scenario 6: zelfde afvoeren over een korter spuienster (minder uren per dag).

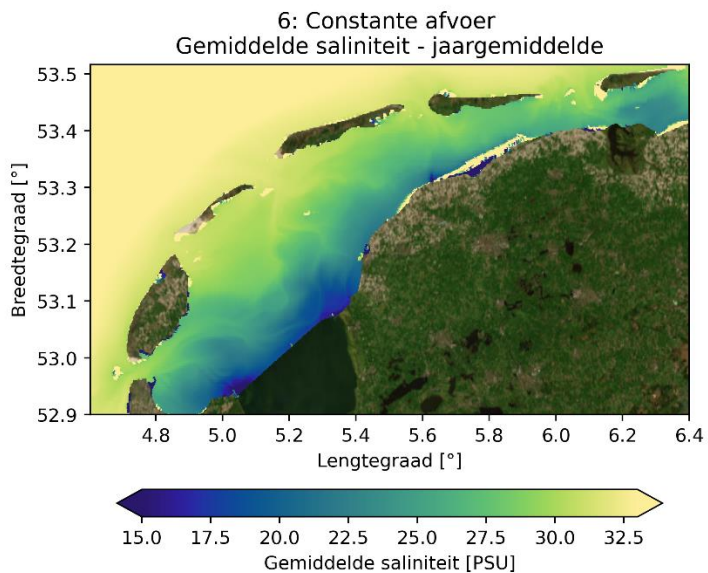


Figure E-7 Jaargemiddelde saliniteit scenario 6: constante afvoer over meerdere locaties op de Afsluitdijk.

# F Gemiddelde saliniteit per ecotoop voor alle scenario's

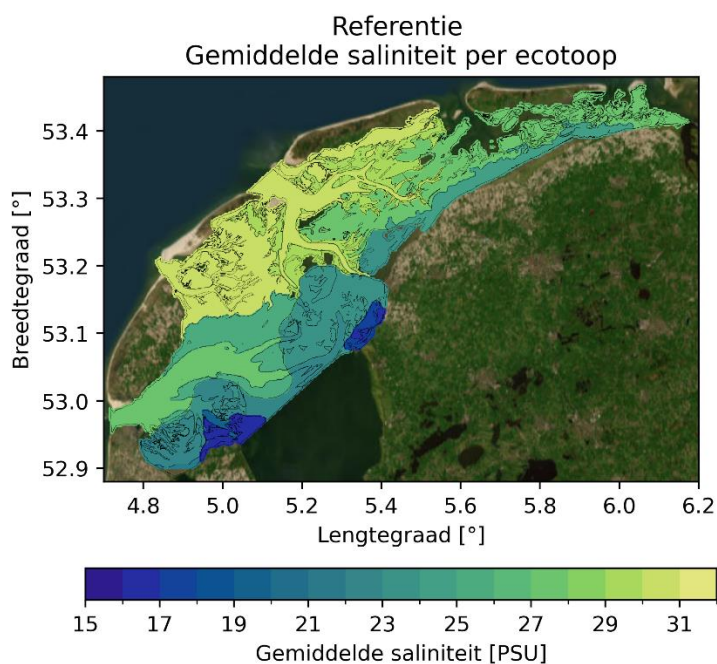


Figure F-1 Jaargemiddelde saliniteit per ecotoop: referentie.

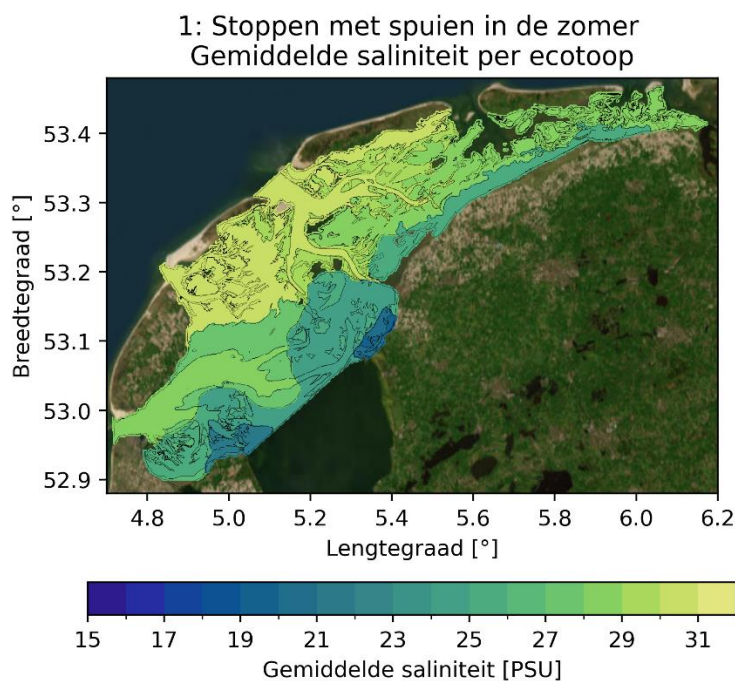


Figure F-2 Jaargemiddelde saliniteit per ecotoop scenario 1: stoppen met spuien in de zomer.

2: Alles over Den Oever  
Gemiddelde saliniteit per ecotoop

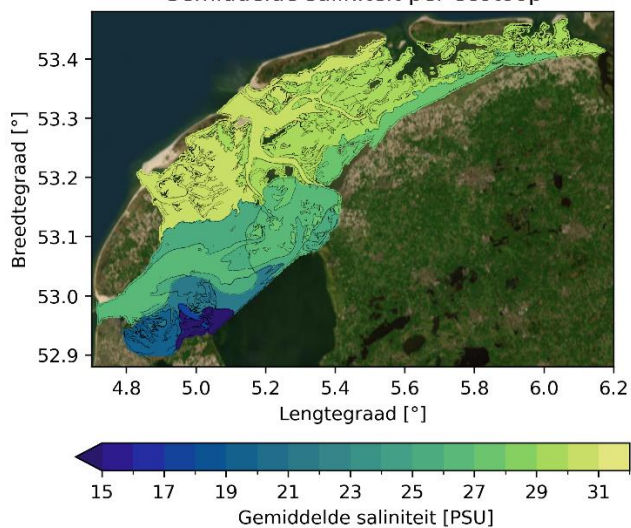


Figure F-3 Jaargemiddelde saliniteit per ecotoop scenario 2: volledige afvoer over Den Oever.

3: Alles over Kornwerderzand  
Gemiddelde saliniteit per ecotoop

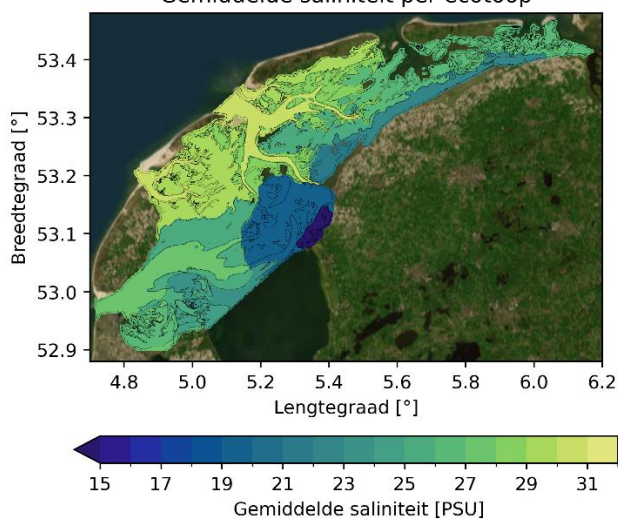


Figure F-4 Jaargemiddelde saliniteit per ecotoop scenario 3: volledige afvoer over Kornwerderzand.

4: Winter dubbel, zomer half  
Gemiddelde saliniteit per ecotoop

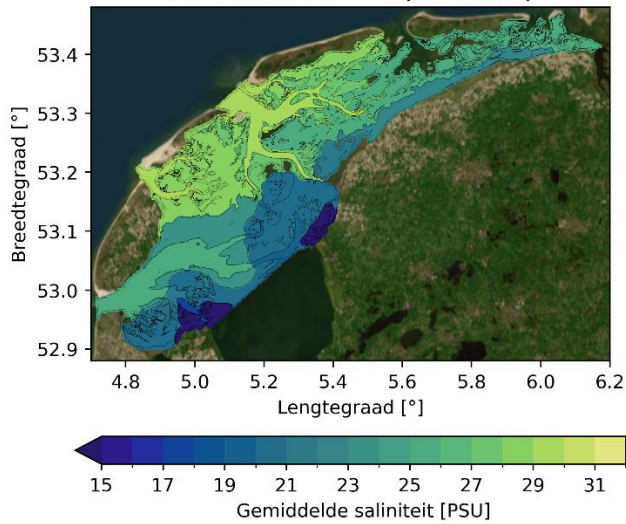


Figure F-5 Jaargemiddelde saliniteit per ecotoop scenario 5: afvoerdebieten verdubbelen in de wintermaanden en halveren in de zomermaanden.

5: Verkort spuiwenster  
Gemiddelde saliniteit per ecotoop

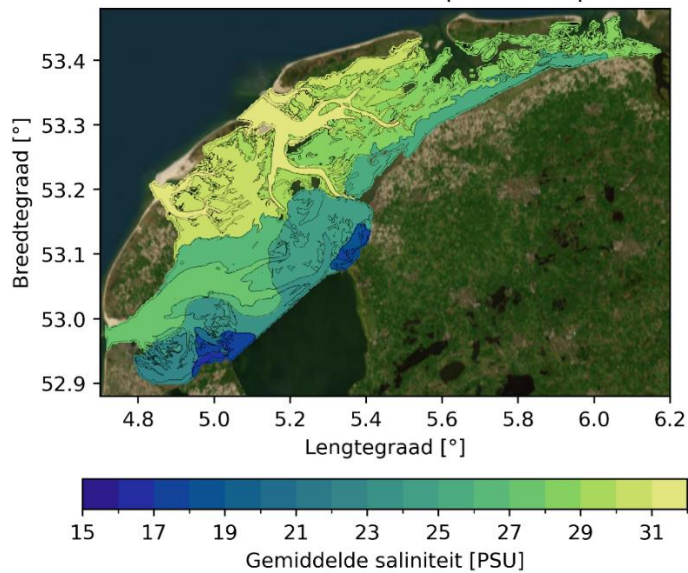


Figure F-6 Jaargemiddelde saliniteit per ecotoop scenario 5: korter spuiwenster.



6: Constante afvoer  
Gemiddelde saliniteit per ecotoop

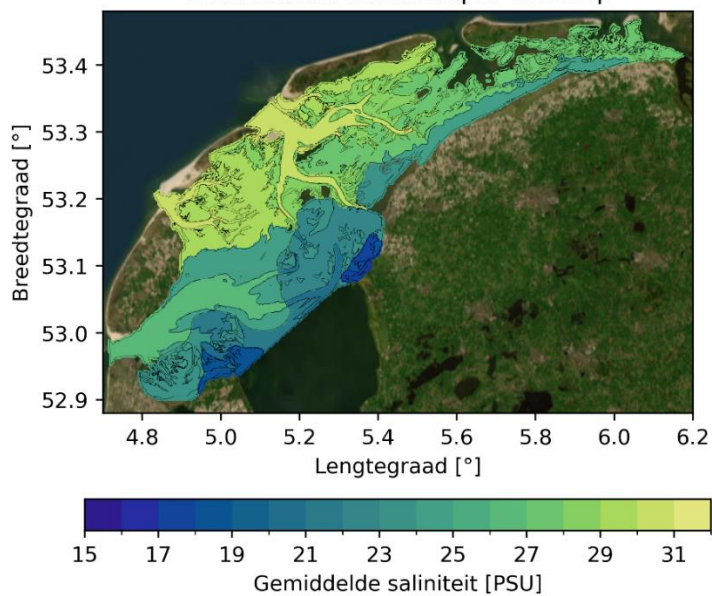


Figure F-7 Jaargemiddelde saliniteit per ecotoop scenario 6: constante afvoer verspreid over meerdere locaties langs de Afsluitdijk.

# G Vierdaagse saliniteitsvariatie per seizoen

## G.1 Winter

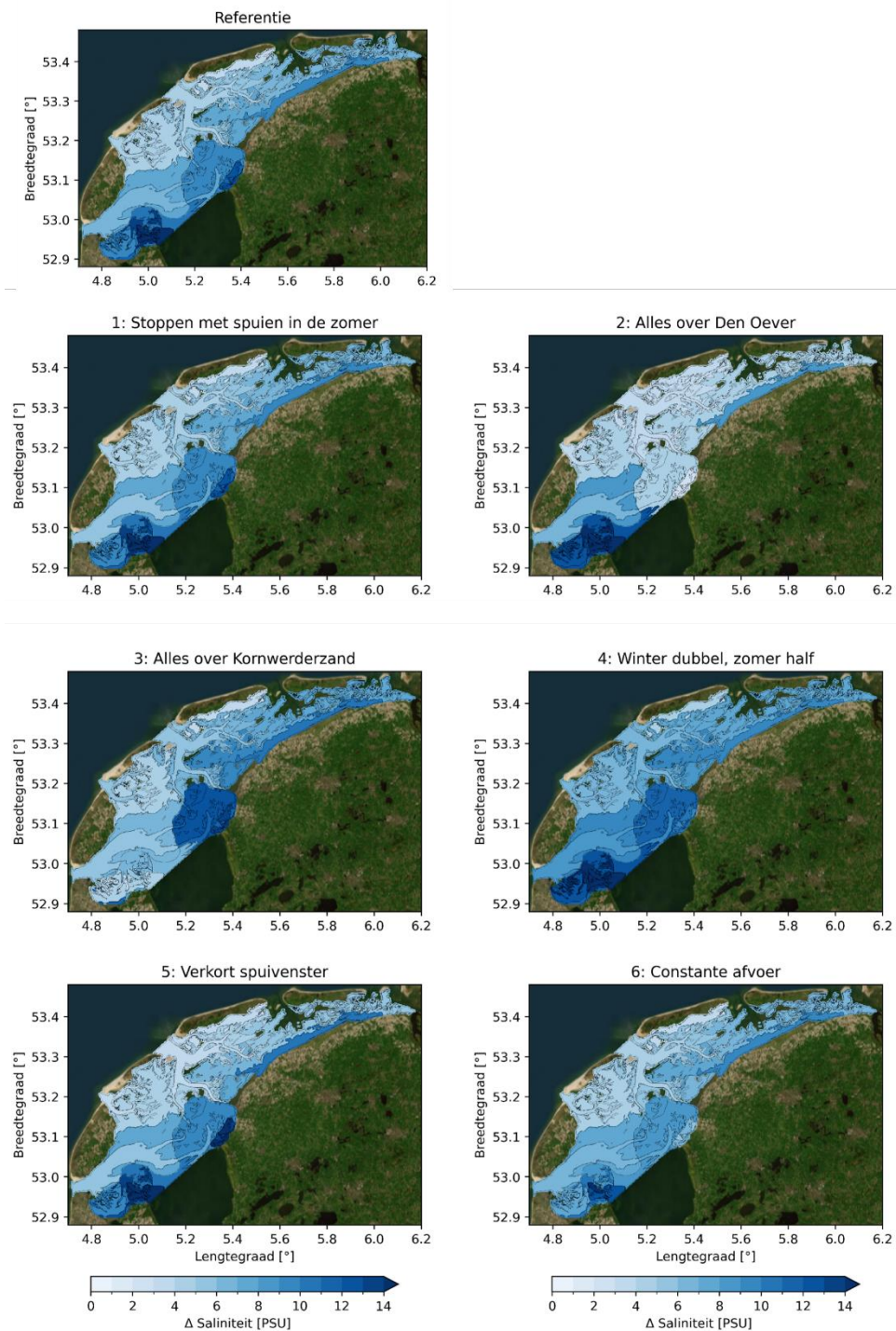


Figure G-1 Vierdaagse variatie in de winter: de gemiddelde bandbreedte tussen de maximale en minimale saliniteit van alle vierdaagse periodes in de wintermaanden.

## G.2 Zomer

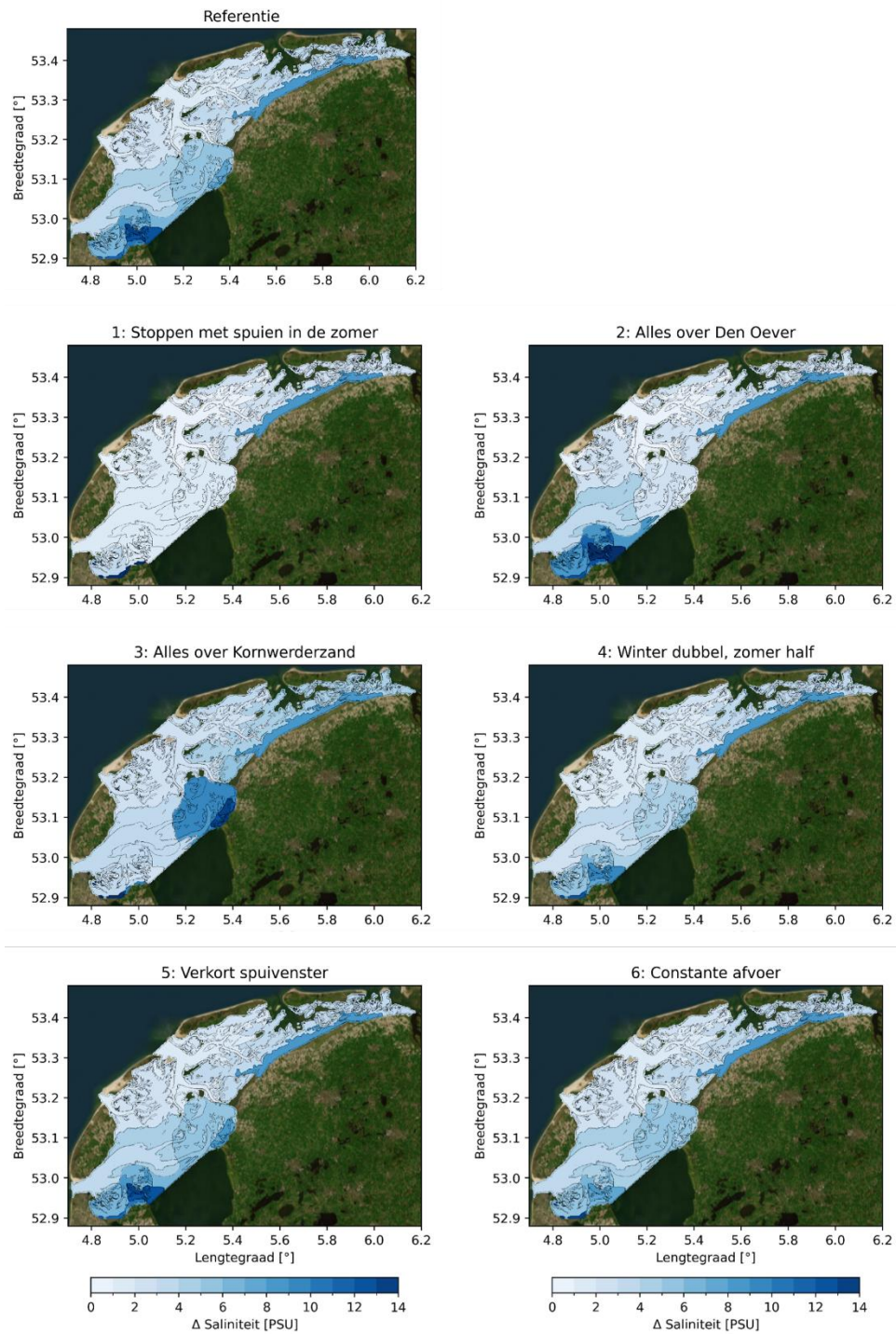


Figure G-2 Vierdaagse variatie in de zomer: de gemiddelde bandbreedte tussen de maximale en minimale saliniteit van alle vierdaagse periodes in de zomermaanden.

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](http://www.deltares.nl)