

Het belang van zoetwaterspui voor de Waddenzee natuur

Eindrapport



waddenacademie

Het belang van zoetwaterspui voor de Waddenzee natuur

Eindrapport



waddenacademie

September 2025

Katja Philippart & Piet Hoekstra (Waddenacademie)
Met bijdragen van Theo Gerkema (NIOZ)
& Jim de Fouw (ECOLOGICAL RESEARCH AND CONSULTANCY)

Colofon

Auteurs

Katja Philippart & Piet Hoekstra (Waddenacademie)
Met bijdragen van Theo Gerkema (NIOZ)
& Jim de Fouw (ECOLOGICAL RESEARCH AND CONSULTANCY)

Grafisch ontwerp

BW H ontwerpers

Foto omslag

Rijkswaterstaat

ISBN

9789 4902 89 836

Rapport 2025-02

Gepubliceerd door Waddenacademie
© Waddenacademie september 2025

Contactpersoon

Katja Philippart
Portefeuillehouder Ecologie
T 058 233 90 30
secretariaat@waddenacademie.nl
www.waddenacademie.nl

Citatie

Philippart, K. & Hoekstra, P., 2025. Het belang van zoetwaterspui voor de Waddenzee natuur. Eindrapport. Rapport 2025-02, Waddenacademie, Leeuwarden

De basisfinanciering van de Waddenacademie
is afkomstig van het Waddenfonds.

Dit rapport is tot stand gekomen op verzoek van en met medefinanciering door de Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW) en het Investeringskader Waddengebied (IKW).

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
2	Zoetwaterspui naar de Waddenzee	5
3	Relaties tussen zoetwaterspui en zoutgehalten in de Waddenzee	7
3.1	Databronnen	7
3.2	Zoetwaterspui en zoutgehalten	8
	Verdelingen zoutgehalten Waddenzee	8
	Invloed van spui op zoutgehalten	8
	Verschillen tussen seizoenen	10
	Verschillen tussen zoetwaterspui bij Den Oever & Kornwerderzand	13
4	Relaties tussen spui, zoutgehalten en natuurwaarden in de Waddenzee	14
4.1	Draagkracht	14
4.2	Biodiversiteit	15
	Omgaan met (wisselende) zoutgehalten	15
	Bodemdieren	15
	Vissen	17
4.3	Functies	18
	Paaien	18
	Vismigratie	18
5	Voormalige Zuiderzee als voorbeeld van een grootschalige zoetzoutovergang	20
5.1	Zoutgehalten	20
5.2	Biodiversiteit	21
6	Discussie	22
6.1	Spui & zoutgehalten	22
6.2	Spui, zoutgehalten & natuurwaarden	23
6.3	Scenario's voor beheer zoetwaterspui	24
6.4	Opties voor een grootschalige zoetzoutovergang	26
7	Conclusies	28
8	Dankwoord	31
9	Literatuurlijst	32

1 Inleiding

Zoet water is van levensbelang. Niet alleen voor het doorspoelen van polders, het vasthouden van zoet water voor irrigatie, het winnen van drinkwater en het voeden van zoete natuur maar ook voor kustgebieden waaronder estuaria waarin dit zoete water uiteindelijk terechtkomt. In tijden van wateroverlast wordt het zoete water zo snel mogelijk naar zee afgevoerd. In tijden van zoetwaterschaarste geeft de verdringingsreeks aan welke belangen op land voorrang krijgen wat betreft het water dat beschikbaar is. De afstroom naar zee is dus geheel en al door het waterbeheer van het land bepaald, zonder rekening te houden met de eventuele gevolgen voor de natuurwaarden van onze kustwateren zoals de Waddenzee, een gebied van mondiale betekenis. Om te weten of dit al dan niet terecht is, is het van belang om de relaties tussen zoetwaterspui, zoutgehalten en (al dan niet juridisch beschermende) natuurwaarden in ruimte en tijd te kennen. Deze informatie kan vervolgens gebruikt worden om een besluit te nemen over de hoeveelheid zoet water die waar en wanneer naar de kustzone wordt geleid.

De zoutgehalten van de Waddenzee worden voornamelijk bepaald door de aanvoer van zoet water via spui, de netto neerslag (= bruto neerslag – verdamping) en de uitwisseling met de Noordzee. Vanaf 2010 is de afvoer van zoet water via de spuisluisen van de Afsluitdijk als belangrijkste bron van zoetwaterspui gemiddeld met 20% verminderd, onder andere omdat er meer dagen per jaar zijn waarop er niet wordt gespuid (Kok & Vollenbroek, 2024). Veranderingen in de zoetwaterspui vanuit het IJsselmeer werken niet alleen door in de zoutgehalten van het westelijk deel van de Waddenzee, maar ook in het oostelijk deel tot aan het wantij onder Schiermonnikoog (Gerkema, 2025). Het is niet goed bekend wat deze ontwikkeling betekent voor de natuurwaarden en ecosysteemdiensten van de Nederlandse Waddenzee.

Bij bestudering van de zoetwaterbehoefte van kustgebieden met een toevoer van zoet water (zoals de Waddenzee) is het belangrijk om hun oorsprong niet te vergeten. Veel van deze gebieden waren estuaria (rivieren die in zee uitstromen) waar zoet en zout water vrij mengden. In veel van deze gebieden (waaronder de Waddenzee) is de uitwisseling inmiddels beperkt door de menselijke sturing van de zoetwatertoevoer via dammen en sluisen (van Aken, 2008). Inzicht in een oorspronkelijk situatie kan helpen om de huidige zoetwaterbehoefte van de Waddenzee in de volle breedte te beschouwen.

Zo was de westelijke Waddenzee voor 1932 een onderdeel van de voormalige Zuiderzee, een getij-gedreven brakwatergebied van 3500 km² dat

gevoerd werd met ca. 12 miljard m³ zoet water per jaar uit de IJssel (Havinga 1953). De soorten die er leefden waren aangepast aan de toenmalige gradiënt van zoet naar zout water (Rossius et al., 2023). Na de afsluiting veranderde het zuidelijk deel binnen enkele jaren in een zoetwatermeer. De meeste oorspronkelijke brakwatersoorten werden vervangen door zoetwatersoorten, met een algemene terugloop in de biodiversiteit tot gevolg (Rossius et al., 2023).

Met name door de afvoer van zoet water vanuit het IJsselmeer naar de Waddenzee via spuisluisen heeft de westelijke Waddenzee nog steeds gradiënten in zoutgehalten, maar de overgang is minder stabiel en vindt plaats in een veel kleiner gebied (Jaksic et al., 2024). Verder is het de vraag in hoeverre de huidige en mogelijk toekomstige zoetwaterspui belangrijk is voor de toevoer van voedingsstoffen (Jung et al., 2017), voor de biodiversiteit zoals die van bodemdieren (Rossius et al., 2023) en voor de functies die de Waddenzee vervult zoals die voor trekvis die hun weg van de zoute Noordzee naar het zoete binnenwater moeten zien te vinden (Tulp et al., 2022).

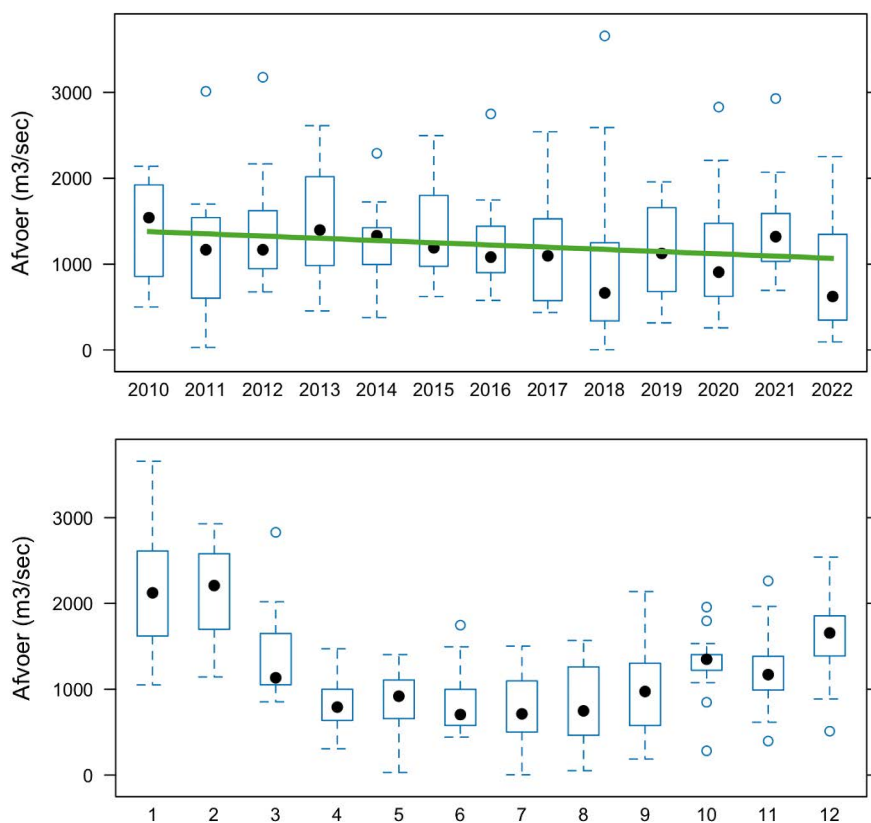
Om grip te krijgen op de zoetwaterbehoefte van de natuur van de Waddenzee is een inventarisatie uitgevoerd naar de invloed van zoetwaterspui op de verdeling in zoutgehalten, en naar de invloed van zoetwaterspui en zoutgehalten op soorten en functies van de huidige Waddenzee. Beschikbare data over de voormalige Zuiderzee zijn hierbij meegenomen als historische informatie over kenmerken (zoals oppervlak, lengte zoutgradiënt, en estuariëne soorten) van een grootschalige zoetzoutovergang.

2 Zoetwaterspui naar de Waddenzee

De totale **zoetwaterspui** naar de Waddenzee bedroeg in de periode 2010-2022 gemiddeld **16.585 miljoen m³ per jaar** (Kok & Vollenbroek, 2024). De grootste bronnen voor de toevoer van zoet water via **spuisluizen** naar de Waddenzee waren die in de Afsluitdijk bij Kornwerderzand (47%) en Den Oever (44%) die samen ongeveer **15.000 miljoen m³ per jaar** spuiden. Een andere relatief grote spuisluis was die van het Lauwersmeer (9% van de totale zoetwaterspui naar de Waddenzee), gevolgd door kleinere lozingen zoals bij Harlingen (1%) (Kok & Vollenbroek, 2024). In de periode 2010-2022 is de totale hoeveelheid spui van het IJsselmeer naar de Waddenzee **gemiddeld met 20% afgenomen** (Figuur 1). Oorzaken van deze trend zijn een combinatie van **klimaatverandering** (drogere zomers) en een verandering in **spuibeleid** (vooral na 2018). Hierbij werd meer water vastgehouden om verzilting tegen te gaan en meer IJsselmeerwater naar Friesland geleid (Kok & Vollenbroek, 2024). Op dit moment worden er bij **Den Oever extra spuisluizen en een gemaal** gebouwd. Het gemaal krijgt een maximale capaciteit van 300 m³ per seconde, bijna 800 miljoen m³ per maand (Witteveen

& Bos, 2022). Hierdoor kan bij het verwachte grotere aanbod van zoet water in de winter voldoende worden afgevoerd.

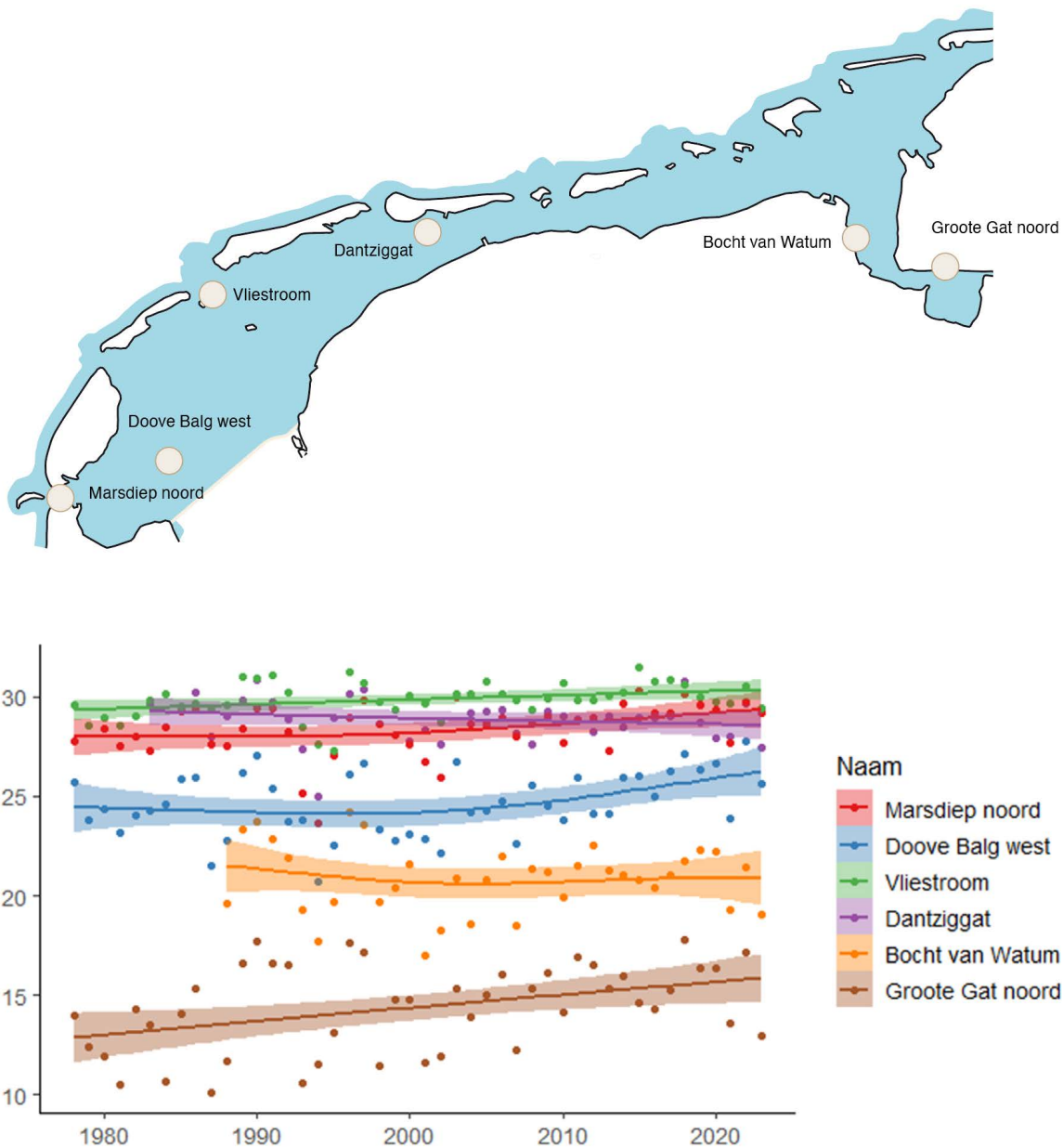
Neerslag is ook een belangrijke bron van zoet water voor de Waddenzee. Bij een toevoer vanuit deze bron van **150 mm per jaar** (800 mm neerslag – 650 mm verdamping) en een oppervlak van 2700 km² (inclusief het Eems estuarium) gaat het om **405 miljoen m³ per jaar** (Kok & Vollenbroek, 2024). De KNMI2023 klimaatscenario's geven aan dat richting 2100 de **winterneerslag** verder zal **toenemen**, en de **zomerneerslag** waarschijnlijk zal **afnemen** (Hoekstra, 2024). Dit kan als consequentie hebben dat er in de wintermaanden steeds meer neerslag op het wateroppervlak van de Waddenzee valt en steeds meer zoet water via de spuisluizen wordt afgevoerd, en in de zomer steeds minder. Bij een **langdurige droogte en een langdurige spuislop** tijdens warme zomers wordt het water van de Waddenzee (in combinatie met een **toenemende verdamping** door de hogere temperaturen) tijdelijk net zo zout of mogelijk zelfs **zouter dan het zeewater van de Noordzee**.



Figuur 1. Jaarlijkse en maandelijkse gemiddelden (zwarte punten), variatie (blauwe blokken en punten) en trends (groene lijnen) in de zoetwaterspui (miljoen m³ per maand) via de spuisluizen van Den Oever en Kornwerderzand naar de Waddenzee tussen 2010-2022 (data via Kok & Vollenbroek, 2024). De langjarige variatie in zoetwaterspui is voor een groot deel (48%) te verklaren door de combinatie van een geleidelijke afname in de tijd (jaren) en een consistente seizoensdynamiek (hoge afvoer in dec-feb, lage afvoer in juni-aug).

De langjarige metingen van zoutgehalten van de Waddenzee zoals uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat laten zien dat het gemiddelde zoutgehalte in de Waddenzee het hoogst in of nabij de zeegaten (Marsdiep, Vliestroom en Dantziggat) is en het laagst bij de Eems-monding (Groote Gat Noord, Bocht van Watum) (Figuur 2). Bij de meetstations Bocht van Watum en Dantziggat lijkt een lichte afname in zoutgehalte te hebben plaatsgevon-

den, bij de overige vier van de zes meetstations lijkt het water in de periode 1978–2023 langzaam zouter te zijn geworden, met name bij de meetstations Doove Balg west en Groote Gat noord (Figuur 2). Hierbij dient opgemerkt te worden dat het om jaarlijks gemiddelde waarden gaat, waarbij lagere zoutgehalten in de winter (als gevolg van meer neerslag, meer spui en minder verdamping) de hogere waarden in de zomer zullen compenseren.



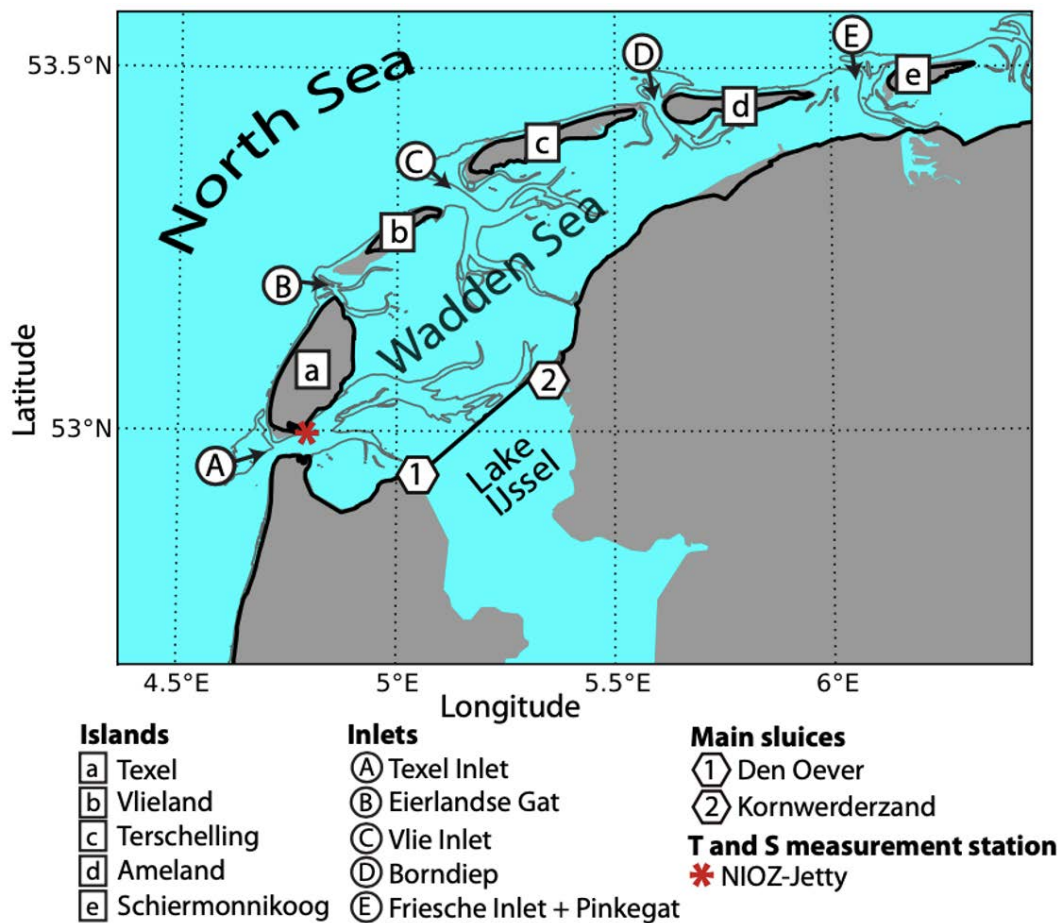
Figuur 2. Trends in gemiddelde zoutgehalten (PSU) in de Waddenzee en het Eems estuarium (onderste paneel) bij zes meetstations (bovenste paneel) zoals bepaald tijdens het MWTL monitoring programma uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat (waterinfo.rws.nl; Philippart et al., 2025; Bogaart et al., 2025).

3 Relaties tussen zoetwaterspui en zoutgehalten in de Waddenzee

3.1 Databronnen

Voor de berekeningen van de relaties tussen zoutgehalten en spui is gebruik gemaakt van beschikbare (1980–2018) uitkomsten van een **hydrodynamisch model (LOCO-EX project)**. Het studiegebied van dit model bestrijkt een totaal oppervlak van 2000 km², en omvat de Waddenzee tussen de zeegaten (van Marsdiep t/m Pinkegat), de Waddenzee-kusten van de eilanden (Texel t/m Ameland) en het

vasteland, de Afsluitdijk en het wantij van Schiermonnikoog (Figuur 3). In dit model worden de zoutgehalten onder meer uitgerekend op basis van **langjarige metingen van meteorologische condities** (waaronder windcondities) en van de **afvoer van zoet water via de spuisluizen** in dit gebied (Gerkema, 2025).



Figuur 3. Studiegebied voor variatie in zoutgehalten gedurende de periode 1980-2015 (Gerkema, 2025).

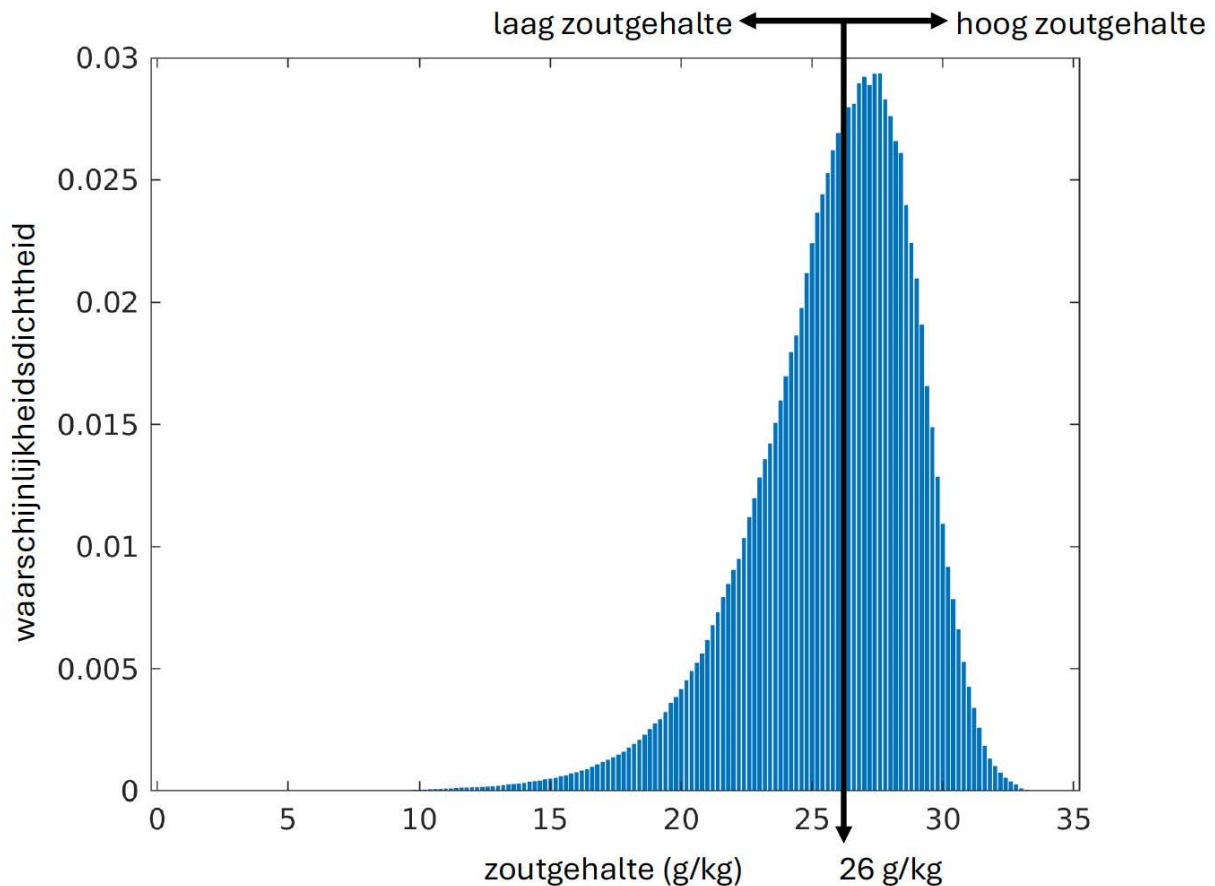
3.2 Zoetwaterspui en zoutgehalten

Verdelingen zoutgehalten Waddenzee

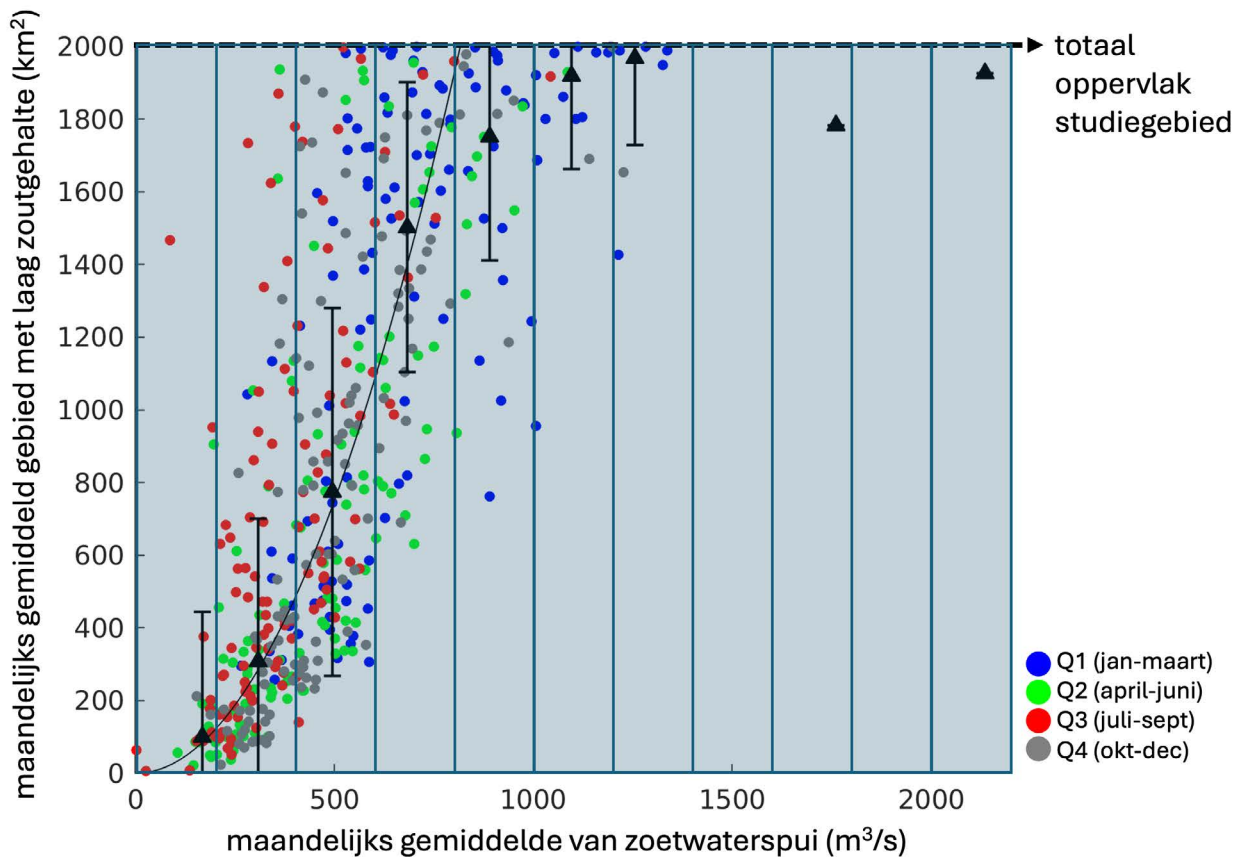
In deze periode (1980–2018) varieerden de zoutgehalten van de Waddenzee tussen de 10 en 33 g/kg, met een gemiddelde waarde van 25,9 g/kg en een mediane waarde (de waarde die precies in het midden van de getallen ligt) van 26,4 g/kg. Op basis van deze uitkomsten wordt **26 g/kg** (= 26 g/L) als **grens** gehanteerd tussen relatief lage en hoge zoutgehalten (Figuur 4).

Invloed van spui op zoutgehalten

Uitgaande van deze grens tussen een laag en een hoog zoutgehalte, is het maandelijkse gemiddelde oppervlakte met een relatief laag zoutgehalte (minder dan 26 g/kg) afgezet tegen de maandlijks gemiddelde gezamenlijke afvoer van de sluisen in Den Oever en Kornwerderzand (Figuur 5).



Figuur 4. Modelresultaten van kansverdeling van het voorkomen van maandgemiddelde zoutgehalten (in g/kg) voor de Waddenzee tussen 1980 en 2015. De horizontale zwarte lijn geeft de scheiding aan tussen een laag en een hoog zoutgehalte van het water (26 g/kg) op basis van de mediaan van 26,4 g/kg en het gemiddelde van 25,9 g/kg van deze verdeling (Gerkema, 2025).



Figuur 5. Modelresultaten van de relatie tussen het oppervlak (km^2) met relatief lage zoutgehalten ($< 26 \text{ g/kg}$) en het maandgemiddelde van de totale afvoer van zoet water via Den Oever en Kornwerderzand (m^3/sec) voor het studiegebied in de Waddenzee (2000 km^2) tussen 1980 en 2015. De blauwe rechthoeken geven regelmatige intervallen in maandelijkse afvoer aan (0-200, 200-400, 400-600, etc.). De zwarte driehoekjes geven de mediane afvoer en het mediane oppervlak met een laag zoutgehalte berekend per interval weer. De horizontale strepen bij de driehoekjes geven de spreiding (standaarddeviatie) rond de mediane waarde van het oppervlak met een laag zoutgehalte weer (Gerkema, 2025).

Hieruit blijkt dat bij een lage afvoer ($250\text{-}500 \text{ m}^3/\text{sec}$) een **verdubbeling in zoetwaterafvoer** wel leidt tot een toename maar **niet tot een verdubbeling van het oppervlak met een laag zoutgehalte** ($< 26 \text{ g/kg}$). Waarschijnlijk komt dit omdat zoet water bij een grotere afvoer steeds verder doordringt tot in de diepere geulen, waarin het zoete water sneller verdunt (per km^2) en door de sterkere getijstroomingen steeds sneller naar zee wordt afgevoerd. Bij een hoge afvoer ($750\text{-}1000 \text{ m}^3/\text{sec}$) heeft een

verdere toename in zoetwaterafvoer veel minder effect op het zoutgehalte binnen het studiegebied. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de geografische begrenzing van het studiegebied in het model waarbij er nooit meer dan 2000 km^2 met een laag zoutgehalte kan zijn (Figuur 5). Bij een zeer hoge afvoer zal ook een deel van de Nederlandse kustzone (aan de zeezijde van de eilanden) minder zout worden maar dit is dan niet zichtbaar in de modeluitkomsten.

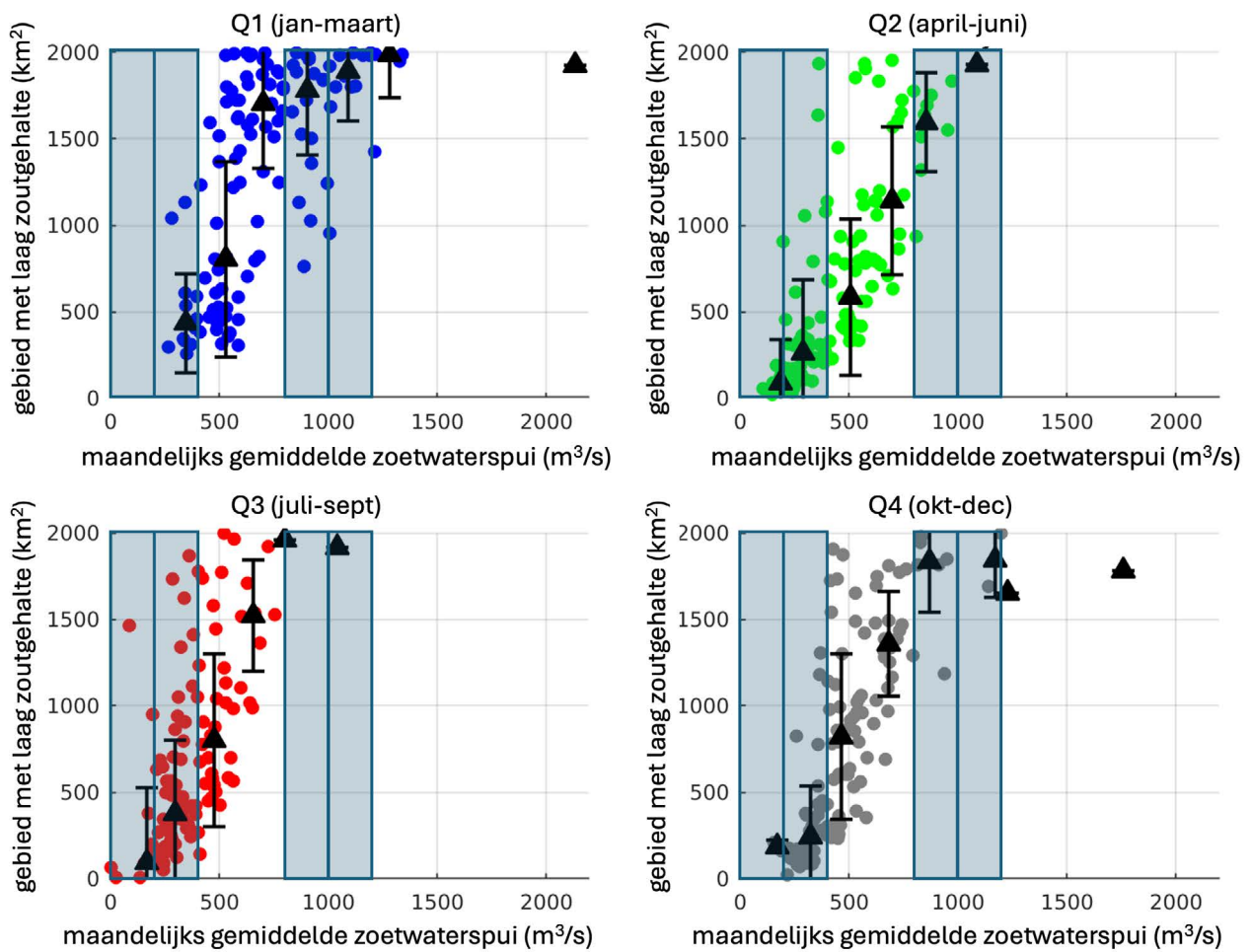
Verschillen tussen seizoenen

De sterkte van de menging tussen zoet en zout wordt mede bepaald door de wind, waaronder directe afvoer onder invloed van de wind (zoet water drijvend op zout water is daar zeer gevoelig voor) en het effect van sterkere menging in Waddenzee

zelf door wind, golven en extra stroming. In tijden met veel wind (winter) wordt het zoete water sneller naar zee afgevoerd terwijl in rustigere tijden (zomer) het zoete water langer in de Waddenzee blijft. Dit is ook terug te zien in de relaties tussen spui en zoutgehalten per kwartaal (Figuren 5 & 6, Tabel 1).

Tabel 1. Mediane waarde en standaarddeviatie van oppervlak (km^2) met een laag zoutgehalte ($< 26 \text{ g/kg}$) bij verschillende maandelijkse gemiddelden van de totale afvoer van zoet water via Den Oever en Kornwerderzand (m^3/sec) voor het studiegebied in de Waddenzee in vier kwartalen (jan-maart, april-juni, juli-sept en okt-dec) tussen 1980 en 2015 (Gerkema, 2025).

Zoetwaterafvoer (m^3/sec)	Q1 (jan-maart) ($\text{km}^2 < 26\text{g/kg}$)	Q2 (april-juni) ($\text{km}^2 < 26\text{g/kg}$)	Q3 (juli-sept) ($\text{km}^2 < 26\text{g/kg}$)	Q4 (okt-dec) ($\text{km}^2 < 26\text{g/kg}$)
0-200	0	87 ± 250	96 ± 433	186 ± 36
200-400	433 ± 287	260 ± 423	376 ± 426	245 ± 292
400-600	804 ± 565	583 ± 451	801 ± 502	822 ± 479
600-800	1705 ± 376	1142 ± 429	1521 ± 320	1359 ± 302
800-1000	1782 ± 377	1596 ± 288	1959	1832 ± 292
1000-1200	1890 ± 290	1929	1917	1845 ± 219



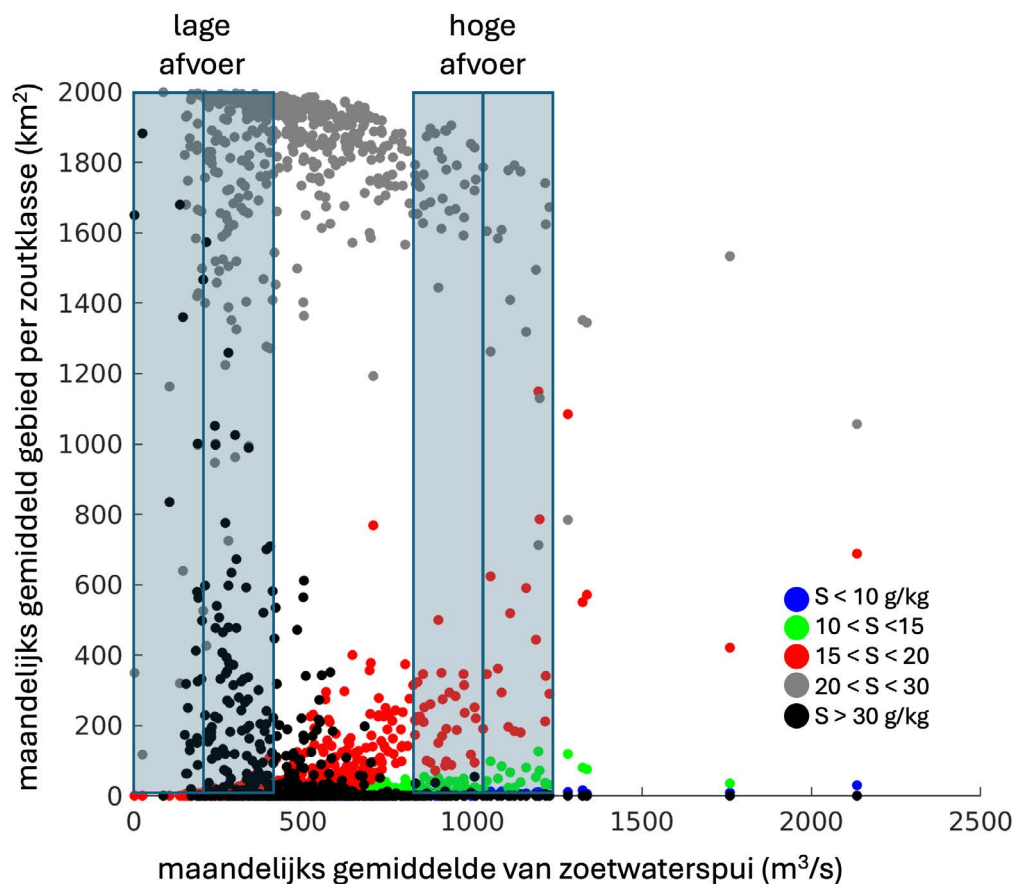
Figuur 6. Modelresultaten van de relatie tussen het oppervlak (km²) met relatief lage zoutgehalten (< 26 g/kg) en het maandgemiddelde van de totale afvoer van zoet water via Den Oever en Kornwerderzand (m³/sec) voor het studiegebied in de Waddenzee in vier kwartalen (jan-maart, april-juni, juli-sept en okt-dec) tussen 1980 en 2015. De blauwe rechthoeken geven regelmatige intervallen in lage (0-200 en 200-400 m³/sec) en hoge (800-1000 en 1000-1200 m³/sec) maandelijkse afvoer aan. De zwarte driehoekjes geven de mediane afvoer en het mediane oppervlak met een laag zoutgehalte berekend per interval weer. De horizontale strepen bij de driehoekjes geven de spreiding (standaarddeviatie) rond de mediane waarde van het oppervlak met een laag zoutgehalte weer (Gerkema, 2025).

In het vierde (okt-dec), eerste (jan-maart) en tweede (april-juni) kwartaal varieerde de maandgemiddelde zoetwaterafvoer tussen ongeveer **100 en meer dan 2000 m³/sec** (Figuur 6). In maanden met lage afvoer (minder 400 m³/sec) bleef het mediane oppervlak met een laag zoutgehalte (< 26 g/kg) minder dan 450 km², terwijl tijdens een hoge afvoer (800-1200 m³/sec) een groot deel van het oppervlak van het studiegebied (1600-2000 km²) een laag zoutgehalte had.

In het derde kwartaal (juli-sept) waren er ook maanden waarbij niet of nauwelijks werd gespuid, het oppervlak met een laag zoutgehalte in zee was hierbij beperkt (Figuur 6). Bij een hoge afvoer (800-1200 m³/sec) in dit derde kwartaal had het hele studiegebied een zoutgehalte lager dan 26 g/kg.

Ten tijde van de beschrijving van natuurwaarden

in Zuiderzee werd de toenmalige zoetzout-gradiënt opgedeeld in vijf **zoutklassen**, zijnde 0-10, 10-15, 15-20, 20-30 en meer dan 30 g/kg (Redeke, 1922). Bij hantering van deze indeling voor de huidige zoutgehalten in de Waddenzee, blijkt dat bij lage afvoer (0-400 m³/sec) het zoutgehalte grotendeels valt in de klasse van 20-30 g/kg waarbij ook een deel van het oppervlak een zoutgehalte van meer dan 30 g/kg heeft (Figuur 7). Bij een **hoge afvoer (800-1200 m³/sec)** valt nog steeds het **overgrote deel in de zoutklasse 20-30 g/kg**, maar zijn er ook gebieden waar de zoutgehalten binnen de 15-20 g/kg klasse vallen, en zelfs (zij het in zeer beperkte mate) in de klasse van 10-15 g/kg (Figuur 7). Deze lage zoutgehalten zullen waarschijnlijk alleen in de directe nabijheid van de spuisluizen te vinden zijn.



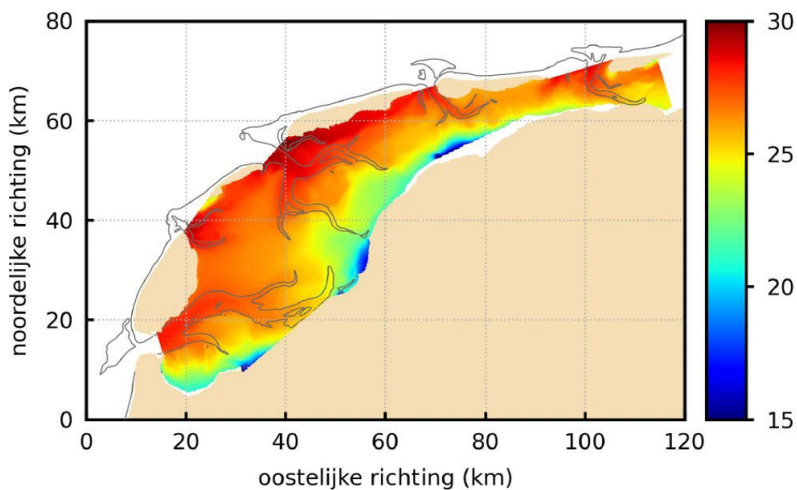
Figuur 7. Modelresultaten van de relatie tussen het oppervlak (km²) met specifieke zoutgehalten (S; minder dan 10, 10-15, 15-20, 20-30 en meer dan 30 g/kg) en het maandgemiddelde van de totale spui van zoet water via Den Oever en Kornwerderzand (m³/sec) voor het studiegebied in de Waddenzee tussen 1980 en 2015. De blauwe rechthoeken geven regelmatige intervallen in lage (0-200 en 200-400 m³/sec) en in hoge (800-1000 en 1000-1200 m³/sec) gemiddelde maandelijkse zoetwaterspui aan (Gerkema, 2025).

Verschillen tussen zoetwaterspui bij Den Oever & Kornwerderzand

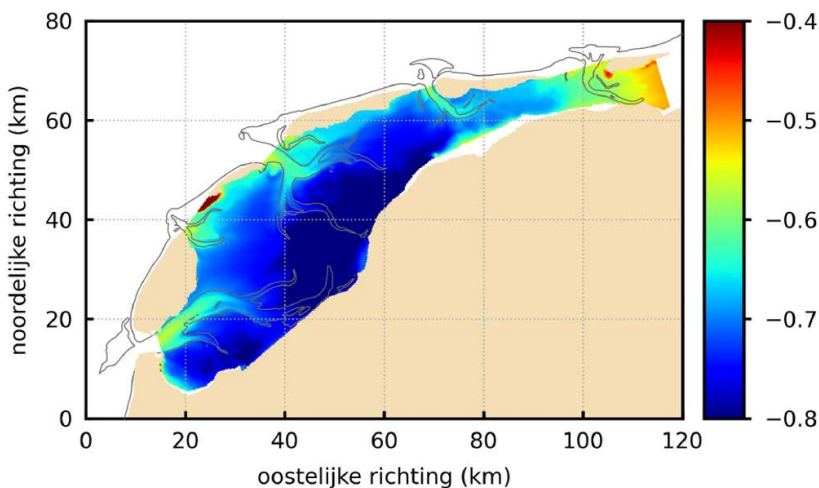
Het zoete water dat via **Kornwerderzand** wordt gespuid heeft een **grotere invloed op het zoutgehalte** in de Waddenzee dan een vergelijkbare hoeveelheid via Den Oever. Het gespuide water bij Den Oever beweegt zich vooral westwaarts (richting Marsdiep) terwijl het sluiswater van **Kornwerderzand** zich vooral noordoostwaarts lang de kust verspreidt, tot aan het wantij bij Ameland (Figuur 8). Bovendien blijft het gespuide water vanuit de spuisluisen bij Kornwerderzand langer in de Waddenzee ‘hangen’ dan het water gespuid via de sluisen van

Den Oever (Figuur 9). Dit betekent dat om de Waddenzee minder zout te maken het effectiever is om via Kornwerderzand dan via Den Oever te spuien.

Voor estuaria als een **beschermde habitat** (‘H1130’) binnen de Europese Natura2000 Habitatrichtlijn worden twee zoutklassen gehanteerd, namelijk ‘brak’ met een zoutgehalte van 5 tot 15 g/l (= 5-15 g/kg) en ‘marien’ met een zoutgehalte van 15 tot 35 g/l (Feringa, 2016). Op basis van de gemiddelde zoutgehalten tussen 1980 en 2015 zijn er volgens deze indeling **geen ‘brakke’ gebieden** in de huidige Nederlandse Waddenzee (met uitzondering van het Eems-Dollard estuarium) aanwezig (Figuur 8).



Figuur 8. Gemiddelde zoutgehalten in de Waddenzee gebaseerd op maandgemiddelde waarden tussen 1980 en 2015. De zoutgehalten zijn het hoogst in de rode gebieden, dus bij de zeegaten en in de diepere geulen, en het laagst in de blauwe gebieden, dus nabij de spuisluisen van het IJsselmeer (Den Oever, Kornwerderzand) en het Lauwersmeer (Gerkema, 2025).



Figuur 9. Correlatie tussen de gemiddelde totale zoetwaterspui via Den Oever en Kornwerderzand (m³/sec) en het lokale zoutgehalten in de Waddenzee tussen 1980 en 2015. De correlatie is het hoogst in de donkerblauwe gebieden (ten noordoosten van Kornwerderzand), waarbij de afvoer van zoet water de sterkste invloed op de lokale zoutgehalten heeft (Gerkema, 2025).

4 Relaties tussen spui, zoutgehalten en natuurwaarden in de Waddenzee

4.1 Draagkracht

Het zoete water dat de Waddenzee instroomt bevat nutriënten, waaronder stikstof (N) en fosfor (P), die tijdens het groeiseizoen de primaire productie van de microalgen in het water (fytoplankton) en de bodem (microfytobenthos) kunnen versterken (Philippart et al., 2000). In de periode 1994–2012 vond de aanvoer van nutriënten naar de westelijke Waddenzee voor het grootste deel vanuit het

IJsselmeer (58% voor P, 67% voor N) plaats (Jung et al., 2019). Dit betekent dat het IJsselmeer toen de belangrijkste bron voor nutriënten was, maar ook dat veranderingen in nutriënten concentraties in de Noordzeekustzone (bijvoorbeeld als gevolg van een reductie van zoetwaterafvoer van de Rijn en de Maas) zullen doorwerken in de aanvoer naar de Waddenzee.

Tabel 2. Aanvoer van voedingsstoffen fosfor (mmol P m⁻² day⁻¹) en stikstof (mmol N m⁻² day⁻¹) naar de westelijke Waddenzee in opeenvolgende tijdvakken tussen 1976 en 2012 (Jung et al., 2019). De onderstreepte waarden geven de belangrijkste bronnen van P en N per tijdvak aan.

Nutriënt	Bron	1976–1977	1978–1987	1988–1993	1994–2012
P	IJsselmeer	0,15	<u>0,24</u>	<u>0,16</u>	<u>0,15</u>
	Noordzee	<u>0,40</u>	0,21	0,12	0,11
	Overige	0	0	0	0
	Som	0,55	0,45	0,28	0,26
N	IJsselmeer	6,00	<u>9,55</u>	<u>8,12</u>	<u>7,94</u>
	Noordzee	<u>8,47</u>	3,90	2,58	1,97
	Overige	4,12	0,19	0,19	1,97
	Som	18,59	13,64	10,89	11,88

Recent modelonderzoek naar de gevolgen van een **afname van zoet water** voor het ecosysteem van de **Middellandse Zee** liet zien dat een terugloop (-41%) in de aanvoer van zoet water een algemene **afname in de primaire productie** (-10%) en een afname (-6%) in **commerciële diersoorten** (zoals vissen en schelpdieren) tot gevolg kan hebben (Macias et al., 2025). Aan de kust kon dit verlies oplopen tot 35%, met een lokale ontregeling van kustecosystemen en ecosysteemdiensten tot gevolg (Macias et al., 2025).

In de Waddenzee leven veel bodemdieren, waaronder de meeste schelpdieren en sommige wormen, van microscopisch kleine algen. Deze algen komen voor in het water (fytoplankton) of op de wadbodem (microfytobenthos) (Christianen et al., 2017).

Een deel van de **microscopisch kleine algen** in het water is afkomstig uit **zoetwaterbronnen** en vormt een voedselbron voor schelpdieren, soms wel 50% van het totale dieet jaarrond (Jung et al., 2019). Dit betekent dat bij een reductie van zoet water naar de Waddenzee ook een reductie van deze voedselbron voor bodemdieren plaatsvindt.

Veranderingen in de toevoer van zoet water kunnen dus indirect (**toevoer van nutriënten**) en direct (**toevoer van zoetwateralgen**) van invloed zijn op de **draagkracht** van de Waddenzee voor bodemdieren (Herman et al., 1999; Kemp et al., 2005; Jung et al., 2019). Omdat bodemdieren onder meer een belangrijke voedselbron zijn voor vissen en vogels, zou dit ook kunnen doorwerken naar de rest van het voedselweb (Philippart et al., 2007).

4.2 Biodiversiteit

Omgaan met (wisselende) zoutgehalten

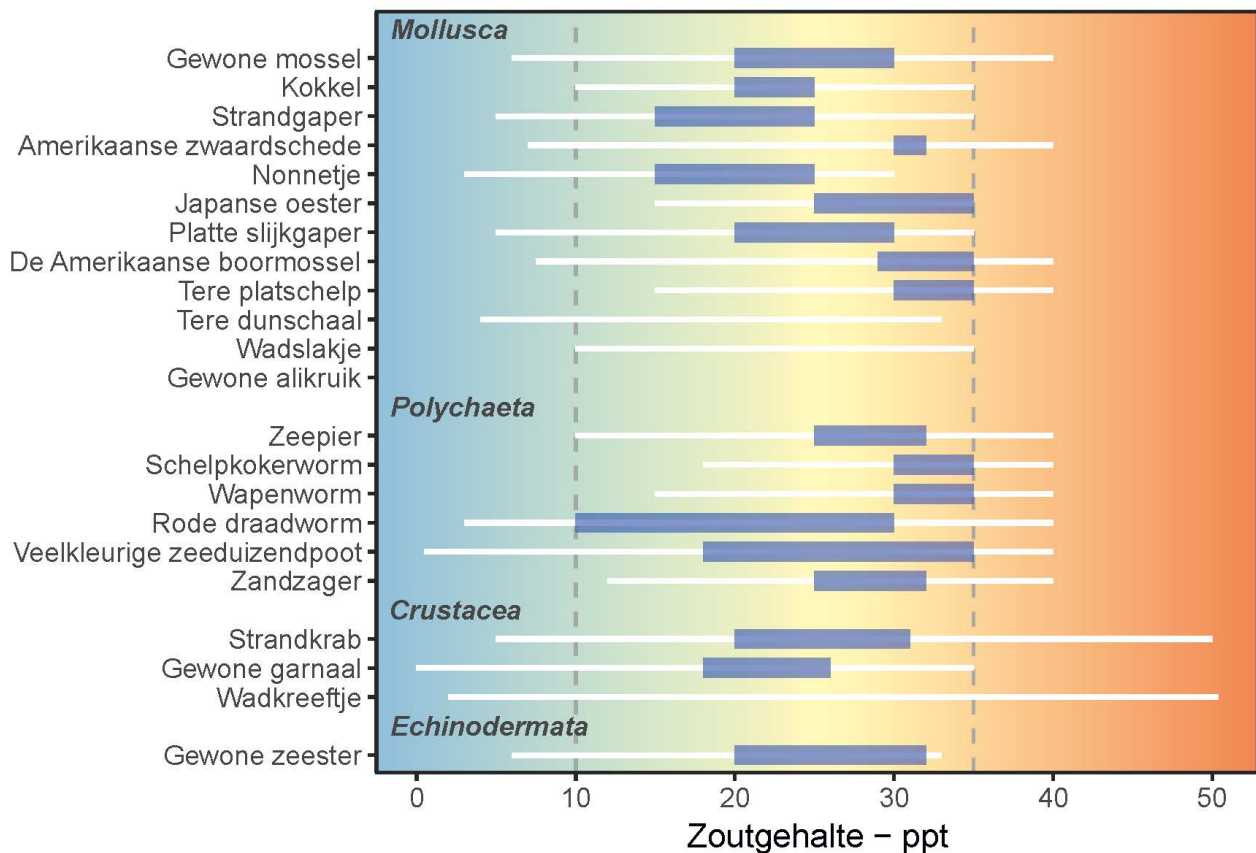
Wat betreft de relatie tussen zoutgehalten en soorten zijn zowel de voorkeur voor een specifiek zoutgehalte als de tolerantie voor variatie in zoutgehalten in de omgeving van belang. Omdat kustgebieden gekenmerkt worden door **fluctuaties in zoutgehalten** moeten de lokale planten en dieren die er leven hiermee om kunnen gaan om te overleven. In principe kan dit op twee manieren, namelijk door bij variatie in zoutgehalten in de omgeving hun interne zoutgehalte mee te laten variëren ('**osmoconformers**') of dit juist constant te houden ('**osmoregulatoren**'). De 'osmoconformers' (bijvoorbeeld bodemdieren en zeegras) zijn vooral te vinden in relatief stabiele zoutomgevingen, terwijl de 'osmoregulatoren' (bijvoorbeeld vissen en zeezoogdieren) een veel bredere tolerantie voor snelle en grote veranderingen in zoutgehalten van de omgeving hebben.

Er zijn eerder overzichten gemaakt van soorten die in Nederland in estuaria in het algemeen (Kranenbarg & Backx, 2001; de Leeuw & Backx, 2001) en soorten die bij zeer lage zoutgehalten in het bijzonder (de Boer & Wolff, 1996) kunnen voorkomen. Op basis van de resultaten van Gerke-*ma* (2025) is het echter onwaarschijnlijk dat soorten die afhankelijk zijn van zeer lage en stabiele zoutgehaltenes (<10-15 ppt) zich onder de huidige of realistisch haalbare spuiregimes kunnen vestigen. De verwachte veranderingen in zoutgehalte zijn daarvoor te beperkt, en grote arealen met echt lage zoutwaarden zullen naar verwachting niet ontstaan. Om die reden richt deze studie zich niet op typische estuariëne soorten, maar op soorten die onder de huidige en verwachte omstandigheden relevant zijn voor de ecologische waarden van de Waddenzee, en een relatie (of correlatie) hebben met de huidige range in zoutgehaltenes.

Bodemdieren

De meeste van de huidige soorten bodemdieren in de Waddenzee hebben een **voorkeur voor zoutgehalten van 20 g/kg of meer** (Figuur 10, Tabel 3). Slechts enkele schelpdieren (strandgaper en nonnetje) en met name de rode draadworm hebben de voorkeur voor de wat lagere (10-15 g/kg) zoutgehalten. Andere soorten schelpdieren (zoals de Amerikaanse zwaardschede) en wormen (zoals de schelpkokerworm) verkiezen de relatief hoge (> 30 g/kg) zoutgehalten in de Waddenzee. De strandkrab en het wadkreeftje zijn het beste bestand tegen variaties in zoutgehalten (5-50 g/kg), terwijl de Japanse oester een veel smallere bandbreedte (15-30 g/kg) kent (Figuur 10, Tabel 3).

Vergelijking van de vijf soorten weekdieren die destijds in de Zuiderzee en tegenwoordig in de Waddenzee voorkomen (gewone mossel, kokkel, nonnetje, strandgaper en wadslakje) laat zien dat zoutgehalten waarbij ze in de Zuiderzee (7.0 ± 1.0 g/kg) voorkwamen veel lager waren dan nu in de Waddenzee (19.5 ± 5.7 g/kg) (Tabel 2). Dit verschil is in lijn met eerdere waarnemingen dat soorten in een **stabiele omgeving bij veel lagere zoutgehalten** (zoals destijds in de Zuiderzee; van Viersen & Breukelaar, 1994) kunnen voorkomen dan in een omgeving met meer variatie in zoutgehalten (de Boer & Wolff, 1996). Schelpdieren zoals strandgapers, mossels en kokkels zijn in het algemeen kleiner bij lage dan bij hogere zoutgehalten (de Boer & Wolff, 1996).



Figuur 10. Optimale zoutgehaltenes (blauwe balken) en zouttolerantie (witte lijnen) van bodemdieren in de Waddenzee. Verticale zwarte gestippelde lijn geeft een tweedeling in relatief laag en hoog zoutgehalte (minder of meer dan 26 g/kg) aan en blauwe gestippelde lijnen de klassen in specifieke zoutgehalten (lager dan 10, 10-15, 15-20, 20-30 en hoger dan 30 g/kg) (De Fouw, 2025).

Naast deze directe relaties tussen zoutgehalten en het voorkomen van bodemdieren kunnen bodemdieren ook **indirect** worden beïnvloedt door de toevoer van zoet water. Zo bleek het dieet van schelpdieren in de nabijheid van spuisluizen voor ongeveer de helft uit **zoetwateralgen** te bestaan (Jung et al., 2019) en zorgen de relatief lage zoutgehalten (< 26 g/kg) ten noorden van de Afsluitdijk ervoor dat de mosselen tegen de **vraat van zees-**

terren worden beschermd omdat zeesterren lage zoutgehaltenes mijden (Troost et al., 2022). Verder versterkt zoetwaterafvoer de **estuariëne circulatie** (een instroom van zout water uit zee bij de bodem als gevolg van een uitstroom van zoet water naar zee aan het wateroppervlak; Duran-Matute et al., 2014), waarmee ook organische stof (Postma, 1981) en vislarven (de Graaf et al., 2004) de Waddenzee binnenkomen vanuit de Noordzee.

Vissen

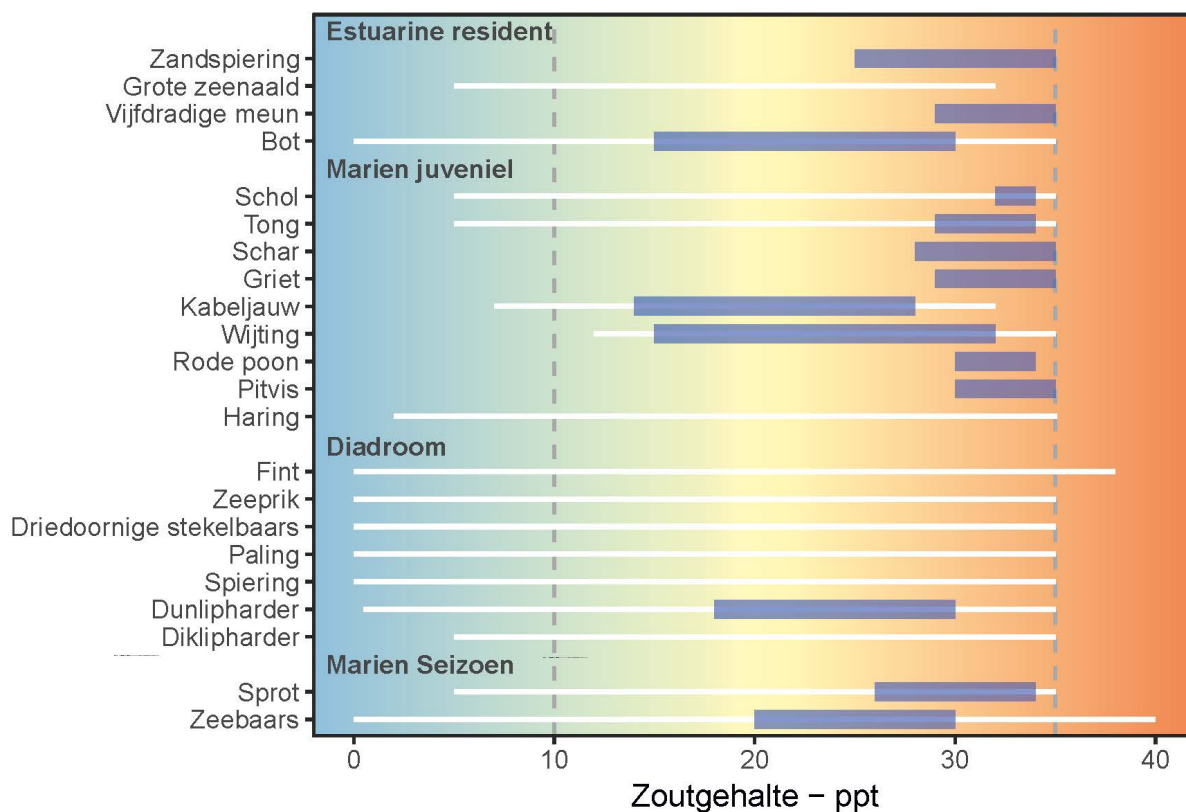
Veel van de huidige in de Waddenzee voorkomende soorten vissen hebben een **voorkeur voor hogere zoutgehalten**, terwijl andere soorten zoals als bot,

kabeljauw en wijting een voorkeur hebben voor lagere zoutgehalten (< 26 g/kg) (Figuur 11, Tabel 3). In het algemeen worden soorten trekvissen ('diadroom') gekenmerkt door een brede tolerantie (0-35 g/kg) voor variaties in zoutgehalten (Figuur 11, Tabel 3).

Tabel 3. Optima en voorkomen (Zuiderzee) of tolerantie (Waddenzee) van algemeen voorkomende soorten bodemdieren en vissen bij verschillende zoutgehalten.

AREAAL	OPTIMUM	RANGE	SOORT	CATEGORIE	GROEP
Zuiderzee	6	8	<u>Gewone mossel*</u>	Schelpdieren	Weekdieren
zoutgehalte	6	3	<u>Wadslakje*</u>	Schelpdieren	Weekdieren
lager dan 15 g/kg	7	13	<u>Kokkel*</u>	Schelpdieren	Weekdieren
	8	9	<u>Nonnetje*</u>	Schelpdieren	Weekdieren
	8	10	<u>Strandgaper*</u>	Schelpdieren	Weekdieren
	10	2	Basters drijfslak	Slakken	Weekdieren
	12	2	Zuiderzeeschijfslak	Slakken	Weekdieren
Waddenzee	5	36	<u>Spiering</u>	Rondvissen	Trekvissen
zoutgehalte	10	26	<u>Wadslakje*</u>	Slakken	Weekdieren
lager dan 26 g/kg	19	39	Driedoornige stekelbaars	Rondvissen	Trekvissen
	19	39	Fint	Rondvissen	Trekvissen
	19	39	Paling	Rondvissen	Trekvissen
	20	38	<u>Groot zee gras</u>	Zeegrassen	Vaatplanten
	20	33	<u>Nonnetje*</u>	Schelpdieren	Weekdieren
	20	38	<u>Rode draadworm</u>	Wormen	Borstelwormen
	20	31	<u>Strandgaper*</u>	Schelpdieren	Weekdieren
	21	26	Kabeljauw	Rondvissen	Kinderkamersoorten
	22	36	Gewone garnaal	Garnalen	Kreeftachtigen
	23	36	<u>Bot</u>	Platvissen	Kustvissen
	23	26	<u>Kokkel*</u>	Schelpdieren	Weekdieren
	24	35	Dunlipharder	Rondvissen	Seizoensgasten
	25	35	<u>Gewone mossel*</u>	Schelpdieren	Weekdieren
	25	31	Platte slijkgaper	Schelpdieren	Weekdieren
	25	41	Zeebaars	Rondvissen	Seizoensgasten
Waddenzee	26	46	Strandkrab	Krabben	Kreeftachtigen
zoutgehalte	26	28	Gewone zeester	Zeesterren	Stekelhuidigen
hoger dan 26 g/kg	27	40	<u>Veelkleurige zeeduizendpoot</u>	Wormen	Borstelwormen
	29	29	Zandzager	Wormen	Borstelwormen
	29	31	Zeepier	Wormen	Borstelwormen
	30	21	Japane oester	Schelpdieren	Weekdieren
	30	31	Sprot	Rondvissen	Seizoensgasten
	31	34	Amerikaanse zwaardschede	Schelpdieren	Weekdieren
	32	26	<u>Schar</u>	Platvissen	Kinderkamersoorten
	32	26	<u>Tong</u>	Platvissen	Kinderkamersoorten
	32	33	Amerikaanse boormossel	Schelpdieren	Weekdieren
	32	24	Wijting	Rondvissen	Kinderkamersoorten
	33	23	Schelpkokerworm	Wormen	Borstelwormen
	33	26	Tere platschelp	Schelpdieren	Weekdieren
	33	26	Wapenworm	Wormen	Borstelwormen
	33	31	<u>Schol</u>	Platvissen	Kinderkamersoorten

* soorten die zowel destijds bij lage zoutgehalten (<15 g/kg) in de voormalige Zuiderzee zijn gevonden (Rossius et al., 2023) als nu bij relatief lage zoutgehalten (< 26 g/kg) in de huidige Waddenzee voorkomen (De Fouw, 2025). Onderstreepte soorten zijn soorten die zijn aangewezen als 'typische soorten' voor estuaria als habitat (H1130) binnen de N2000 Habitatrichtlijn (Feringa, 2016).



Figuur 11. Optimale (blauwe balken) en zouttolerantie (witte lijnen) van vissen in de Waddenzee. Verticale zwarte gestippelde lijn geeft een tweedeling in relatief laag en hoog zoutgehalte (minder of meer dan 26 g/kg) aan en blauwe gestippelde lijnen de klassen in specifieke zoutgehalten (lager dan 10, 10-15, 15-20, 20-30 en hoger dan 30 g/kg) (De Fouw, 2025).

4.3 Functies

Paaien

Recent onderzoek laat zien dat de Waddenzee als **paai gebied voor haring en ansjovis** functioneert, en dat de paaimogelijkheden voor sprot beperkt en die voor spiering nihil zijn (Maathuis et al., 2025). In 1993/1994 werden eieren van ansjovis net ten noorden van de Afsluitdijk gevonden. In juni 1993 was dat vooral in de geulen Tesselstroom en Vlieter en in juni 1994 vooral bij Kornwerderzand (Boddeke & Vingerhoed, 1996). In 2021/2022 werd paaiende haring en ansjovis vooral in de buurt van de zeegaten en in het Eems estuarium aangetroffen (Maathuis et al., 2025). Het gebied ten noorden van de Afsluitdijk en het Eems estuarium staan beide onder invloed van zoetwaterafvoer (van respectievelijk het IJsselmeer en de Eems), waardoor zoetwateraanvoer mogelijk direct (zoutgehalte) en/of indirect (primaire productie) bijdraagt aan de geschiktheid van een paai gebied voor ansjovis (Boddeke & Vingerhoed, 1996).

Vismigratie

Voor de trekvissen die hun weg van zee naar het binnenwater moeten zien te vinden om daar te kunnen paaien (zoals de zalm) of om daar op te kunnen groeien (zoals de paling) is een **geleidelijke overgang van belang als bewegwijzering**. Vismigratie van zout naar zoet vindt jaarrond plaats (Figuur 12). Voor sommige soorten lijkt er sprake van een verschuiving in de trekperiode (Figuur 12).

Vismigratie valt ook samen met een periode van het jaar waarin de spui in het algemeen afneemt (van jan-maart naar april-juni). Hierdoor wordt het oppervlak met een relatief laag zoutgehalte (< 26 g/kg) steeds kleiner (Figuur 6). Gespuid zoet water bij Kornwerderzand blijft langer 'hangen' dan bij Den Oever (Figuur 9). Dat betekent dat de **'best geduide' routes voor vismigratie** in de Waddenzee lopen van het **zeegat Vlie** (tussen Vlieland en Terschelling) en het **zeegat Borndiep** (tussen Ter-

schelling en Ameland) naar de spui- en schutsluizen (en de Vismigratierivier vanaf 2027) bij **Kornwerderzand**.

De trekvisser die uit de zuidelijke Noordzee komen zullen eerst de zeegaten Marsdiep (tussen Den Helder en Texel) en Eijerlandse Gat (tussen Texel en Vlieland) passeren. De zoetzoutgradiënt bij deze zeegaten (met name het Marsdiep) wordt vooral bepaald door de afvoer van zoet water via de spuiscapaciteit bij Den Oever (zeker na ingebruikname van de extra spuicapaciteit).

Een aantal van de in de Waddenzee voorkomende trekvisser kennen een **speciale natuurbeschermingsstatus** (Figuur 12). Zo zijn er

Natura 2000-gebieden aangewezen voor vissoorten genoemd in bijlage II van de Habitatrichtlijn (fint, rivierprik en zeeprik), waaronder de Waddenzee. De Atlantische steur en de houting mogen in hun natuurlijke verspreidingsgebied niet opzettelijk worden gevangen, gedood of verstoord, hun rust- en voortplantingsplaatsen niet worden beschadigd of vernield (artikel 3.5 van de Wet natuurbescherming). Visserij op elft, fint en zalm is jaarrond gesloten, en die op rivierprik van 1 maart t/m 30 april en van 1 november t/m 31 januari (artikel 3.7). Voor elft, fint, houting, rivierprik, Atlantische steur, zalm en zeeprik moeten speciale beschermingszones aangewezen worden (artikel 2.1).

SOORT	Natuurbescherming				1e kwartaal			2e kwartaal			3e kwartaal			4e kwartaal		
	Code	Vangst	Migratie	Habitat	Jan	Feb	Maart	April	Mei	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dec
Bot																
Diklipharder																
Elft	H1102		x	x												
Fint	H1103		x	x												
Haring																
Houting		x	x	x												
Paling																
Rivierprik	H1099		x	x												
Spiering																
Sprot																
Stekelbaars (3d)																
Steur		x	x	x												
Zalm	H1106		x	x												
Zeebaars																
Zeeforel																
Zeeprik	H1095		x	x												

Figuur 12. Het beschermingsregime van vissen in de Waddenzee en hun timing van de piek in migratie van zee naar zoet water. Groene kleur zijn algemene migratiedata in het Nederlandse Deltagebied (Winter et al., 2020), andere kleuren zijn specifieke data voor het Marsdiep waarbij oranje een lokale vervroeging en blauw een lokale vertraging van de migratie in de afgelopen 50 jaar aangeeft (van Walraven et al., 2017).

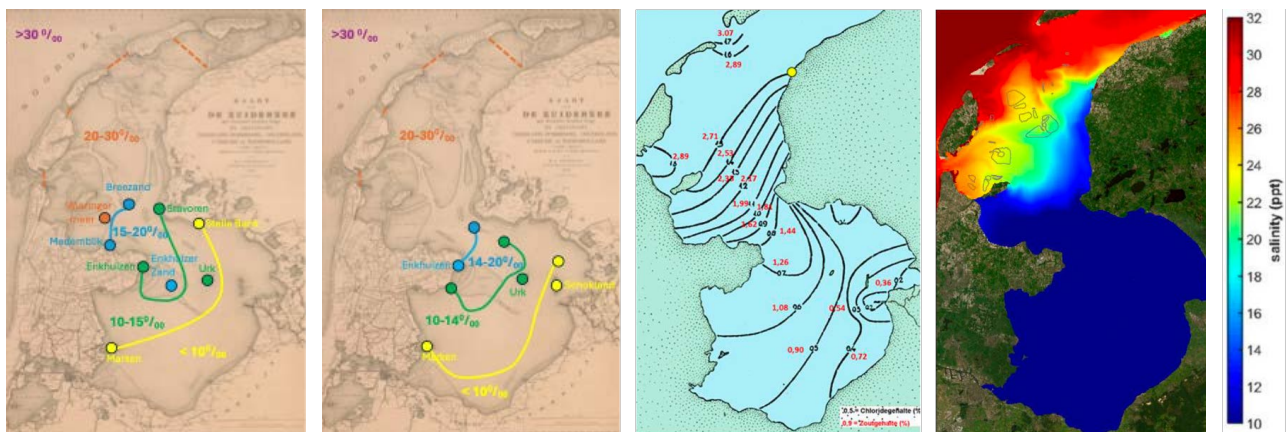
5 Voormalige Zuiderzee als voorbeeld van een grootschalige zoetzoutovergang

5.1 Zoutgehalten

Historische informatie van de **gradiënt in zoutgehalten** in de voormalige Zuiderzee laat een verloop van lage zoutgehalten (< 10 g/kg) in het zuiden naar hoge (meer dan 30 g/kg) in het noorden over een afstand van ongeveer 100 km zien (Figuur 13). Bij een kadering van de Zuiderzee tot en met het westelijk deel van de huidige Waddenzee was destijds ongeveer de helft (50%) van het gebied gekenmerkt door zoutgehalten lager dan 20 g/kg, en ongeveer een kwart (25%) door zoutgehalten lager dan 10 g/kg (Figuur 13). Een vergelijking tussen jaargemiddelde zoutgehalten en die tijdens de zomer laat zien dat het gebied weliswaar zouter werd tijdens de droge zomermaanden, maar dat er nog steeds gebieden waren met lage (< 10 g/kg) zoutgehalten (Figuur 13). Dit is in lijn

met eerdere constatering dat de verdeling van zoutgehalten in de Zuiderzee **min of meer stabiel** was binnen een jaar en tussen jaren (van Vierssen & Breukelaar, 1994).

De uitkomsten van een statistische analyse van zoutmetingen in het zuidelijk deel van de voormalige Zuiderzee in de maanden maart–november in de jaren 1920–1931 bevestigen dit beeld (Tabel 4). Het grootste deel van de verklaarde variatie (82%) kan worden toegeschreven aan de locatie van de meetstations (waarbij noordwestelijke locaties zouter waren dan de zuidoostelijke), het tijdstip waarop de metingen waren uitgevoerd (waarbij 1930 veel zouter was dan 1927, en maart veel zouter dan augustus) en de watertemperatuur (hogere zoutgehalten bij hogere temperaturen).



Figuur 13. Verdeling van zoutgehalten in de voormalige Zuiderzee, als referentie voor een natuurlijk Nederlands estuarium, met (van links naar rechts) als basis een beschrijving van Redeke (1922) voor de afsluiting, een kaart in Redeke (1922) voor de zomer van 1905, een reconstructie door Volker (1942) en een modeluitkomst van Smits et al. (2024). De ondergrond van de twee linker kaarten stamt uit 1841 en is opgehaald uit www.zuiderzeecollectie.nl.

Tabel 4. Uitkomsten van een statistische analyse van gemeten zoutgehalten in de Zuiderzee (235 metingen in de periode 1920-1931, gedigitaliseerd door Rossius et al., 2023), waarbij doorgerekend is in hoeverre die zoutgehalten gecorreleerd zijn met maanden, jaren, geografische positie van de meetstations (in NB en OL) en omgevingsfactoren (waterdiepte en watertemperatuur). Alle variabelen dragen significant bij en verklaren samen 82% van de variatie in zoutgehalten.

Factor	Variabele	Min	Max	Variatie
Tijd	Maanden	Augustus	Maart	4,4
	Jaren	1927	1930	5,4
Positie	Oosterlengte	Oost	West	10,1
	Noorderbreedte	Zuid	Noord	7,3
Omgeving	Diepte	Geen trend		3,1
	Temperatuur	Laag	Hoog	4,0

5.2 Biodiversiteit

De veranderingen in het ecosysteem voorafgaand, vlak na en enige tijd na de afsluiting van de Zuiderzee (in 1932), zijn vastgelegd in drie boeken, geschreven door de Zuiderzeecommissie en uitgegeven door de Nederlandse Dierkundige Vereniging (Redeke, 1922, 1936 en Beaufort, 1954). De boeken bevatten een schat aan gegevens over de ontwikkelingen binnen taxonomische groepen (waaronder schelpdieren en slakken) gebaseerd op veldmetingen (Rossius et al., 2023).

Voorafgaand aan de afsluiting was de **mossel** het meest algemene schelpdier in het relatief zoute noordelijke deel van de Zuiderzee (boven de lijn Enkhuizen-Stavoren), en de **strandgaper** vooral in het zuidwestelijke deel met dichtheden tot meer dan 3000 individuen per m² (Havinga, 1922). In 1932 werden soorten als de mossel, strandgaper, kokkel en het nonnetje tijdens bemonstering bij gemiddelde zoutgehalten tussen ca. 6 g/kg en 7 g/kg aangetroffen (Havinga, 1922).

Zoutwaterslakken waren het meest talrijk in het noordelijke deel van de voormalige Zuiderzee (boven de lijn Enkhuizen-Stavoren), waarvan de alikruik, het vliezig drijfhorentje en de scheefhoorn vooral in de toenmalige zeegrasvelden (voornamelijk ten noorden van de huidige Afsluitdijk) voorkwamen (Havinga, 1922). In 1932 werden de Zuiderzeeschijfslak, Basters drijfslak, wadslakje tijdens bemonstering bij gemiddelde zoutgehalten tussen ca. 6 g/kg en 12 g/kg aangetroffen (Rossius et al. 2023).

Een aantal soorten schelpdieren en slakken die destijds in de Zuiderzee vooral voorkwamen bij lagere zoutgehalten (< 15 g/kg) worden nu ook aangetroffen in de Waddenzee waarbij hun optimum zoutgehalte relatief laag (< 26 g/kg) is (Tabel 3). De Zuiderzeeschijfslak en de Basters drijfslak worden niet meer aangetroffen, waarschijnlijk als gevolg van het verdwijnen van de uitgestrekte zeegrasvelden rond de afsluiting maar mogelijk ook door veranderingen in het gemiddelde en de variatie in zoutgehalten (Tabel 3).

6 DISCUSSIE

6.1 Spui & zoutgehalten

De grote invloed van spui op de zoutgehalten van Waddenzee (zowel het westelijk als het oostelijk deel) vindt via de zoetwaterspui vanuit het IJsselmeer plaats. In de periode 2010-2022 was de totale hoeveelheid **spui** (miljoen m³ per maand) van het **IJsselmeer** naar de Waddenzee ongeveer **1200 miljoen m³** en **nam met 20% af** (Figuur 1). In die jaren was het gemiddelde zoutgehalte in het studiegebied ongeveer **26 g/kg** (Figuur 4). Zeer hoge maandelijkse zoetwaterafvoeren (> 1500 m³/sec) in die periode resulteerde niet in het ontstaan van gebieden met zeer lage zoutgehalten (< 10 g/kg) (Figuur 7). Dit betekent dat binnen de huidige omstandigheden een geleidelijke zoetzoutovergang zoals destijds in de Zuiderzee aanwezig was (Figuur 13) niet haalbaar is. Een **relatief hoge zoetwaterafvoer** (800-1200 m³/sec) leidt tot een oppervlak van ongeveer **200 km²** (10% van het totale oppervlak van het studiegebied) met een zoutgehalte van **15-20 g/kg** en tot een oppervlak van ongeveer **1800 km²** (80%) met een zoutgehalte van **20-30 g/kg** (Figuur 7).

De relatie tussen zoetwatertoevoer en de zoutgehalten van de Waddenzee wordt niet alleen bepaald door de hoeveelheid, het tijdstip, de waterkwaliteit en de locatie van het zoete water dat wordt afgevoerd, maar ook door de **huidige omstandigheden in de Waddenzee** (ofwel de mate waarin door lokale condities in de Waddenzee sprake is van meer of minder sterke menging van zoet en zout water door een combinatie van natuurlijke processen en antropogene interventies) als het zoete water daarin terecht komt (Figuur 14). Dit betekent dat de locaties en sterktes van zoetzoutovergangen in de Waddenzee niet alleen worden bepaald door hoeveel, wanneer en waar het zoete water wordt gespuid, maar ook door andere menselijke invloeden (zo heeft het uitdiepen van geulen zoals dat bij De Boontjes en Holwerd gebeurt invloed op de lokale bathymetrie en hydrodynamica).



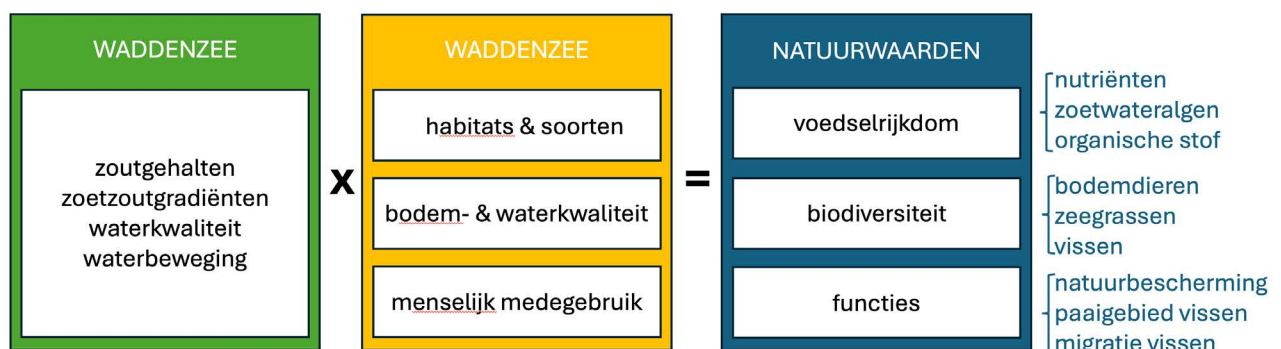
Figuur 14. Aspecten van zoetwatertoevoer en lokale omstandigheden die samen de invloed van de spui van zoet water op de Waddenzee (waaronder zoutgehalten) bepalen.

6.2 Spui, zoutgehalten & natuurwaarden

De aanvoer van zoet water heeft niet alleen invloed op de **biodiversiteit** van soorten die voor hun voorkomen, paai en bescherming afhankelijk zijn voor specifieke zoutgehalten (gemiddelden en variatie, Tabel 1) en voor hun **migratie** van zoetzout-gradiënten, maar ook op de **draagkracht** (via aanvoer van nutriënten en zoetwateralgen) (De Fouw 2025, De Boer & Wolff,). Dit raakt niet alleen direct verschillende onderdelen van het ecosysteem (zoals algen, bodemdieren en vissen), maar ook beschermde habitats en soorten (Figuur 15).

De relatie tussen zoetwatertoevoer en natuurwaarden van de Waddenzee wordt niet alleen

bepaald door **sturing op** zoutgehalten, zoetzout-gradiënten, waterkwaliteit en waterbeweging (estuariëne circulatie) als gevolg van die afvoer en lokale omstandigheden (Figuur 15), maar ook door de **reeds aanwezige** soorten en habitats, de kwaliteit van de bodem en het water en menselijk medegebruik (Figuur 15). Dit betekent dat de zoetwaterafvoer-gerelateerde natuurwaarden niet alleen worden bepaald door de afvoer van zoet water en de verdeling daarvan over de Waddenzee, maar ook door andere omstandigheden (zoals bathymetrie) en menselijke activiteiten (zoals visserij, aanleg van dammen en natuurbescherming in stroomgebieden van rivieren).



Figuur 15. Aspecten van zoetwatertoevoer en lokale omstandigheden die samen de invloed van spui-gerelateerde condities op de natuurwaarden van de Waddenzee bepalen.

6.3 Scenario's voor beheer zoetwaterspui

Voor de toevoer van zoet water naar de Waddenzee zijn er in theorie twee 'hoofdknoppen' om aan te draaien, namelijk de **hoeveelheid** die wordt gespuid en de **locatie** waar dat gebeurt (Figuur 16). Daarnaast zijn er nog een aantal andere **kleinere knoppen**, waaronder het **moment** (tijdstip van het jaar) waarop wordt gespuid, de spui bij de andere locaties (zoals die bij het **Lauwersmeer** en bij **Harlingen**) en de **overige menselijke activiteiten** in de verschillende kombergingen.

De **hoeveelheid zoet water** die wordt gespuid bepaalt, in combinatie met de locatie, hoeveel 'ver-

brakking' er in de Waddenzee optreedt. De modeluitkomsten laten zien dat een bepaalde afvoer (in Mm^3 per maand) via de spuisluizen van **Kornwerderzand** tot een **groter gebied met lagere zoutgehalten** leidt (scenario's A en C) dan eenzelfde afvoer via de spuisluizen van **Den Oever** (Figuur 16). De 'verbrakking' vindt bovendien in andere kombergingen plaats, voor Kornwerderzand gaat het met name om **Vlie** en **Borndiep** terwijl afvoer via **Den Oever** vooral tot 'verbrakking' van de komberging **Marsdiep** leidt (Duran-Matute et al., 2014).



Figuur 16. Scenario's voor de verdeling van zoet water (hoog vs. laag, afvoer via Den Oever vs. Kornwerderzand)

De keuze voor de **spuilocatie** hoeft overigens niet alleen af te hangen van de effectiviteit (km² zilt areaal per Mm³ zoetafvoer), maar kan ook gebaseerd zijn op welke kombergingen het meest waardevol zijn om een zoetzoutgradiënt te ontwikkelen, bijvoorbeeld op basis van de **huidige of potentiële natuurkwaliteit**.

Wat betreft de natuurwaarden op de **wadplaten** liggen westelijk van de Afsluitdijk met name kansen voor het **Balgzand**, zoals een verdere ontwikkeling van de aanwezige populaties van **klein zeegras en snavelruppia** (Van den Oever et al., 2023). Daarbij kan de baaivorm van het Balgzand met haar luwte mogelijk ook goede mogelijkheden bieden voor het ontwikkelen van aanvullende gradiënten (geëxposeerd-beschut; zandrijk-slibrijk; laag-hoog). Aan de oostkant van de Afsluitdijk zijn er tot voorbij **Harlingen** ook goede kansen voor het ontwikkelen van een redelijk stabiele zoetzoutgradiënt op de wadplaten. Daarbij zijn er nu nog extra sturingsmechanismen aanwezig via spuibeheer van de **Tsjerk Hiddessluizen** van Harlingen (die mogelijk nog verder kan worden versterkt als de zoetwaterspui in de toekomst niet meer via de haven wordt geleid) en de **R.J. Cleveringsluizen** bij Lauwersoog.

Wat betreft de natuurwaarden in **sublitorale gebieden** vraagt bescherming van de **mosselbanken** ten noorden van Afsluitdijk dankzij de zoetwaterspui in ieder geval om aandacht. Verder zal als gevolg van **spui bij Den Oever** eerder een zoetzoutgradiënt richting het zeegat Marsdiep ontstaan, terwijl dat bij spui via Kornwerderzand eerder richting de meer oostelijke zeegaten Vlie en Borndiep het geval zal zijn (Figuur 16). Dit kan

gevolgen hebben voor het beschermen en versterken van **vismigratie**, waarbij het afhangt van het zeegat dat als eerste door een trekvis gepasseerd wordt. Als trekvissen daar door het zoete water naar binnen worden gelokt, dan moeten ze wel de Afsluitdijk kunnen passeren, anders lopen ze in een ecologische val.

Voor **vismigratie** is ook de **timing van de spui** van belang (Figuur 12). Vismigratie van zout naar zoet vindt jaarrond plaats (Figuur 12), daarnaast trekken vissen gedurende het jaar ook van zoet naar zout (Winter et al., 2020). Een optimaal spuiprotocol vraagt om actuele kennis van de aanwezigheid van trekvissen omdat dit per locatie en in de tijd kan verschillen (Figuur 12) in combinatie met kennis van de te verwachten wateroverschotten en -tekorten op basis van het weer, de rivierafvoer en het gebruik.

Samengevat, als het doel is om het **areaal** met lage zoutgehalten zo groot mogelijk te maken dan kan het beste veel zoetwater via **Kornwerderzand** worden gespuid (Scenario A in Figuur 16). Bij voorkeur gedurende het gehele jaar een min of meer zelfde hoeveelheid om de habitat te optimaliseren voor soorten planten en dieren die een voorkeur hebben voor lage zoutgehalten. Bij minder aanbod kan vooral in bepaalde tijden van het jaar zoetwater worden gespuid om tenminste het paaien en de zoutzoetmigratie van vissen te faciliteren. Scenario B (hoge afvoer via Den Oever) kan echter toch veel gunstiger zijn dan scenario A (hoge afvoer via Kornwerderzand) als de actuele (of potentiële) natuurwaarden in de meest westelijke kombergingen hoger zijn dan die in de meer oostelijke kombergingen.

6.4 Opties voor een grootschalige zoetzoutovergang

De voormalige Zuiderzee was een getij-gedreven ondiep brakwatergebied van 3500 km² met een **stabile zoetzoutgradiënt** van ongeveer 100km lengte welke gevoed werd uit de IJssel met ca. 12.000 miljoen m³ zoet water per jaar (Havinga, 1953). De huidige Waddenzee (west en oost samen) is een relatief ondiep kustgebied met een oppervlak van ongeveer 2000 km², een **variabele zoetzoutgradiënt** (van zuid naar noord) van max. 30km lengte welke voornamelijk gevoed wordt door zoet water via **twee spuisluizen** in de Afsluitdijk met gemiddeld 15.000 miljoen m³ zoet water per jaar (Kok & Vollenbroek, 2023).

Dit betekent dat er nu jaarlijks ongeveer **dezelfde hoeveelheid zoet water** vanuit het oppervlaktewater beschikbaar is als destijds ten tijde van de grootschalige zoetzoutovergang in de Zuiderzee. Wel is er tegenwoordig sprake van een **kleiner en gemiddeld dieper gebied** (waardoor de verblijftijd van het zoete water korter zal zijn dan destijds het geval was), **twee in plaats van één aanvoerpunt** van zoet water, en een **veel grotere variatie** in de aanvoer van zoet water gedurende het jaar.

Onder de huidige omstandigheden (waaronder de min of meer evenredige verdeling van zoetwaterspui via Den Oever en Kornwerderzand) wat betreft zoetwaterafvoer is een **geleidelijke zoetzoutovergang** met een brede range (van 5 naar 35 g/kg) zoals destijds in de Zuiderzee aanwezig was (en als beschreven voor een estuarium in de Habitatrichtlijn) **niet haalbaar** voor de huidige Waddenzee vanwege het gebrek aan stabiele brakwatergebieden (<15 g/kg). Zonder vooralsnog rekening te houden met alle andere belangen, randvoorwaarden en mogelijke gevolgen voor bestaande natuurwaarden zijn er **twee (ingrijpende) opties** om hier toch bij in de buurt te komen:

1. Zoetwaterspui vooral via Kornwerderzand

Als het beschikbare zoete water grotendeels gespuid zou worden via de sluisen bij Kornwerderzand, zullen de zoutgehalten in een groot deel van de **westelijke en oostelijke Waddenzee** (tot aan het wantij van Ameland) lager worden dan nu het geval is. Dit komt omdat daar de verblijftijd van het zoete water bij Kornwerderzand langer is dan in het gebied dat grenst aan

de spuisluizen bij Den Oever. Hierbij kan enige **seizoensdynamiek** worden toegelaten (hogere zoutgehalten tijdens droge zomermaanden), zolang er maar gebieden blijven met **lage (< 10 g/kg) zoutgehalten**.

Als gekozen wordt voor deze optie dan zou in tijden van hoge afvoer extra gespuid kunnen worden via Den Oever (bijv. door inzet van de nieuwe pompen) om de saliniteitsschommelingen ten noordoosten van Kornwerderzand te beperken. De **stabiliteit** van deze zoetzoutgradiënt kan verder versterkt worden door geïntegreerd spui-beheer met de overige spuisluizen (zoals die bij Harlingen en Lauwersoog).

Hiermee zou mogelijk een overgangsgebied van ongeveer 1500 km² met een **min of meer stabiele zoetzoutgradiënt** van ongeveer 60km lengte (van zuidwest naar noordoost) kunnen worden gecreëerd.

Deze optie is ingrijpend omdat het **zoetwaterbeheer dan ook op de behoefte van de Waddenzee moet worden afgestemd** (zowel wat betreft hoeveelheden als de verdeling van de afvoer naar de Waddenzee via de spuisluizen bij Den Oever, Kornwerderzand, Harlingen en Lauwersoog).

2. Uitbreiding zoetzoutgradiënt met deel van IJsselmeer

Daarnaast zou een **deel van het huidige IJsselmeer** onderdeel van een zoetzoutgradiënt kunnen worden. Vanwege de verzilting lijkt het NO-deel het meest gunstig (Genseberger et al., 2020), maar dit is uiteraard niet zonder gevolgen voor andere functies van het IJsselmeer (zoals drinkwatervoorziening en huidige natuurwaarden). Het oppervlak van gebied waarin de chloridegehalten in dit deel van het IJsselmeer tussen de 250 en 400 mg/l liggen is ongeveer 200 km² (Genseberger et al., 2020). Bij omrekening van chloridegehalten naar zoutgehalten (zoutgehalte=1,8*Chloridgehalte) gaat het dan om een gebied met huidige zoutgehalten tussen 0,45 en 0,72 g/kg, dus minder dan 1 g/kg.

Om de natuurwaarden die horen bij een zoetzout gradiënt te kunnen versterken gaat het hierbij niet alleen om de **uitwisseling** van water, maar ook (juist) om de uitwisseling van andere stoffen (zoals nutriënten) en organismen (zoals algen en trekvisen). Tegelijkertijd zal de **zoutindringing** in de rest van het IJsselmeer beperkt moeten blijven vanwege de afhankelijkheid van gebruikers van deze zoetwaterbuffer. Hierbij valt de te denken aan een aansluiting bij de Vismigratierivier naar het zuiden, waardoor het licht brakke deel van de zoetzoutgradiënt (met zoutgehalten tussen 0 en 10 g/kg) afgegrensd wordt van het zoete water van het IJsselmeer.

Hiermee zou mogelijk een overgangsgebied van ongeveer 1700 km² met een **min of meer stabiele zoetzoutgradiënt** van ongeveer 80km lengte (van zuidwest naar noordoost) kunnen worden gecreëerd.

Deze optie is ingrijpend omdat niet alleen het **zoetwaterbeheer op de behoefte van de Waddenzee moet worden afgestemd** (zowel wat betreft hoeveelheden als de verdeling van de afvoer naar de Waddenzee via de spuisluisen bij Den Oever, Kornwerderzand, Harlingen en Lauwersoog), maar het ook om een extra **investering in infrastructuur in het IJsselmeer** vraagt om de het eerste deel van de zoetzoutgradiënt fysiek te scheiden van het zoete water in het IJsselmeer.

7 CONCLUSIES

7.1 Zoetwaterspui & zoutgehalten

- De gemiddelde zoetwaterspui naar de Waddenzee bedroeg in de periode 2010–2022 ruim 16 miljard m³ per jaar, waarbij de spuisluizen in de Afsluitdijk in die periode de belangrijkste bron van zoetwaterspui (90%) vormden.
- Overige zoetwaterspui, zoals die via de R.J. Cleveringsluizen bij het Lauwersmeer (9%) en de Tsjerk Hiddessluizen bij Harlingen (1%) waren vooral lokaal van belang.
- De invloed van de zoetwaterspui via Kornwerderzand (het meest oostelijke spuisluiscomplex van de Afsluitdijk) strekt zich oostelijk uit tot bij het wantij onder Ameland.
- Gemiddeld gesproken is in de periode 2010–2022 de zoetwaterspui vanuit het IJsselmeer met 20% afgenomen.
- Voor vier van de zes MWTL meetstations zijn de zoutgehalten in de Waddenzee toegenomen, mogelijk als een combinatie van afnemende zoetwatertoevoer en toenemende verdamping als gevolg van hogere temperaturen.
- Een toename in zoetwaterspui leidt tot een toename in het oppervlak van de Waddenzee met lage zoutgehalten (< 26 g/kg), maar deze relatie is niet lineair.
- Een bepaalde hoeveelheid zoetwaterspui in de zomer (m³/sec) leidt tot een groter oppervlak van de Waddenzee met lage zoutgehalten (< 26 g/kg) dan dezelfde hoeveelheid in de winter.
- Een bepaalde hoeveelheid zoetwaterspui via Kornwerderzand (m³/sec) leidt tot een groter oppervlak van de Waddenzee met lage zoutgehalten (< 26 g/kg) dan als dezelfde hoeveelheid via Den Oever wordt afgevoerd.
- Gezien de steeds groter wordende verschillen in neerslag gedurende de zomer en de winter en de verder oplopende temperaturen (KNMI2023 scenario's) mag verwacht worden dat de Waddenzee met name in de zomer steeds zouter zal worden, mogelijk zelfs (op momenten) zouter dan de Noordzee.

7.2 Zoetwaterspui en natuurwaarden

- In de periode 1994–2012 vond de **aanvoer van nutriënten** naar de westelijke Waddenzee voor het grootste deel via de **zoetwaterspui** vanuit het IJsselmeer (58% voor P, 67% voor N). Een verandering in zoetwaterspui heeft gevolgen voor de toevoer van voedingsstoffen en daarmee (via **algen groei**, met name in het groeiseizoen) voor de **draagkracht voor andere organismen** (zoals schelpdieren, vissen en vogels) in de Waddenzee.
- Omdat **kustgebieden** zoals de Waddenzee gekenmerkt worden door **fluctuaties in zoutgehalten** moeten de lokale organismen hiermee om kunnen gaan om te overleven. Dit kunnen ze doen door hun interne zoutgehalte mee te laten variëren met de omgeving ('**osmoconformers**', bijvoorbeeld bodemdieren en zeegras) of dit juist constant te houden ('**osmoregulatoren**', bijvoorbeeld vissen en zeezoogdieren).
- Iedere soort wordt gekenmerkt door een **eigen optimum in en tolerantie voor zoutgehalten**, waarbij deze waarden echter mede bepaald worden door **andere omgevingscondities** zoals bijvoorbeeld de stabiliteit in zoutgehalten of de watertemperatuur.
- Bij langdurige blootstelling aan **suboptimale zoutgehalten** treedt bij veel soorten fysiologische stress (met gevolgen voor groei, ontwikkeling en voortplanting), gedragsverandering en (uiteindelijk) sterfte op.
- De meeste soorten **trekvissen** hebben een stabiele zoetzoutgradiënt tijdens hun **migratie seizoen** nodig om hun weg van de Noordzee naar het binnenwater in het Waddengebied te vinden.
- Zeegrassen en kwelderplanten zijn gevoelig voor zoutgehalten en worden daardoor beïnvloed door veranderingen in zoetwaterspui (vooral tijdens hoogwater) en neerslag (vooral tijdens laagwater).
- Natuurlijke **kwelders** met een **geleidelijke zoet-zoutovergang** zijn bovendien belangrijk zijn als **kinderkamer** voor diverse vissoorten, waaronder paling, haring, grondels en driedoornige stekelbaars.
- De invloed van zoutgehalten op bodemdieren en vissen kan doorwerken op het **voedselaanbod voor vogels** en zeehonden, en daarmee op juridisch beschermde natuurwaarden van de Waddenzee.
- De afvoer van zoetwater via spuisluizen leidt tot **estuariëne circulatie**, waarbij het zoete water door de bovenlaag van de spuisluis naar de Noordzee stroomt en het zoute water in de onderlaag van de Noordzee naar de Waddenzee. Dit heeft dus een **aanzuigende werking** vanuit de Noordzee naar de Waddenzee van alle stoffen (zoals gesuspendeerd sediment) en organismen (bijvoorbeeld larven van schelpdieren en vissen) die zich in die onderlaag bevinden.
- Gezien de steeds verder **oplopende temperaturen** (KNMI2023 scenario's) mag verwacht worden dat met name koudbloedige dieren steeds **meer warmtestress** gaan ondervinden en daarmee **gevoeliger voor variaties in zoutgehalten** worden.

7.3 Beleid & beheer

- Voor de toevoer van zoet water naar de Waddenzee zijn er in theorie twee ‘hoofdknoppen’ om aan te draaien, namelijk de **hoeveelheid** en de **locatie** van de zoetwaterspui in de Afsluitdijk.
- Daarnaast zijn er nog een aantal andere **kleinere knoppen**, waaronder het **moment (tijdstip van het jaar)** waarop wordt gespuid, het **spuibehaar** op de overige locaties en andere **menselijke activiteiten** in de verschillende kombergingen.
- De keuze voor de **spuilocatie** kan gebaseerd worden op de **effectiviteit (km² zilt areaal per Mm³ zoetafvoer)**, maar ook op welke kombergingen het meest waardevol zijn om een zoetzoutgradiënt te ontwikkelen, bijvoorbeeld op basis van de **huidige of potentiële natuurkwaliteit**.
- Wat betreft de **effectiviteit** verdient spui via **Kornwerderzand** de voorkeur, omdat het zoete water hier de langste verblijftijd heeft en het gebied met lage zoutgehalten groter zal zijn dan als er wordt gespuid bij Den Oever.
- Wat betreft de **natuurkwaliteit** zal een **keus** moeten worden gemaakt tussen die in de kombergingen **Marsdiep** (voornamelijk gevoed door de spuisluizen bij Den Oever) en **Vlie & Born-diep** (voornamelijk gevoed door de spuisluizen bij Kornwerderzand). Deze keus hangt mede af van de mogelijkheid tot **aanvullende maatregelen** zoals bijvoorbeeld een reductie van de vangst en bijvangst van trekvis.
- De **huidige zoetwaterafvoer** via de Afsluitdijk (15 miljard m³ per jaar) naar Waddenzee is **vergelijkbaar** met die in **voormalige Zuiderzee** (12 miljard m³ per jaar).
- Onder de **huidige omstandigheden** (evenredige verdeling van zoetwaterspui via Den Oever en Kornwerderzand, sterk variabele afvoer) is een **stabiele zoetzoutgradiënt** met brakwatergebieden (<15 g/kg) in de Waddenzee echter **niet mogelijk**.
- Een **grootschalige en stabiele zoetzoutgradiënt** kan alleen worden gerealiseerd door (zeer) ingrijpende maatregelen, door bijvoorbeeld het zoete water alleen via Kornwerderzand te spuien en door de Vismigratierivier in het noordoostelijke deel van het IJsselmeer verder uit te breiden met brakwatergebied.
- Het vergroten van een areaal van een zoetzoutgradiënt (inclusief gebieden met een stabiel laag zoutgehalte) zou bij kunnen dragen aan het halen van de doelen van natuurbescherming (met name van vissen) waarbij mogelijk ook nog aanvullende beschermingsmaatregelen nodig zijn (waaronder beperking van visserij in de omgeving van de spuisluizen en vismigratiefaciliteiten). Dergelijke maatregelen kunnen bijdragen aan de invulling van de **Habitatrichtlijn** (estuaria) en van de **Europese Natuurherstelverordening** voor de Waddenzee.

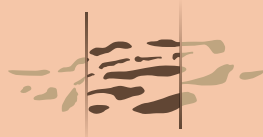
8 Dankwoord

We zijn diegenen die het rapport hebben becommentarieerd (Titian Oterdoom, Albert Reitsema, Bernd Kuijk, Sonja van der Graaf, Dirk-Jan Kok, Natalie Lorenz, Marieke de Lange, Wim Lammers, Jurre de Vries, Suzan van Lieshout, Ernst Lofvers, Robert Zijlstra en Albert Oost) zeer erkentelijk voor hun inhoudelijke bijdragen, en Thea Smit voor haar redactieslag.

Literatuurlijst

- van Aken, H.M., 2008. Variability of the salinity in the western Wadden Sea on tidal to centennial time scales. *Journal of Sea Research* 59, 121-132.
- de Beaufort, L.F., 1954. Veranderingen in de flora en fauna van de Zuiderzee (thans IJsselmeer) na de afsluiting in 1932. Nederlandse Dierkundige Vereniging, Den Helder.
- De Boer, K. & Wolff, W.J., 1996. Tussen zilt en zoet - Voorstudie naar de betekenis van estuariene gradiënten in het Waddengebied. RIKZ rapport
- Boddeke, R. & Vingerhoed, B., 1996. The anchovy returns to the Wadden Sea. *ICES Journal of Marine Science* 53, 1003-1007.
- Bogaart, P., Brandenburg, K., Petersma, F. & Philippart, K. (2025). Staat van de natuur van de Waddenzee; Bouwsteen Beleidskader Natuur Waddenzee, Fase 2. Technische uitwerking. Rapport Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) 2025-xx, Den Haag.
- Christianen, M.J., Middelburg, J.J., Holthuijsen, S.J., Jouta, J., Compton, T.J., van der Heide, T., Piersma, T., Sinninghe Damsté, J.S., van der Veer, H.W., Schouten, S. & Olf, H., 2017. Benthic primary producers are key to sustain the Wadden Sea food web: stable carbon isotope analysis at landscape scale. *Ecology* 98, 1498-1512.
- De Fouw, J., 2025. Belang van zoetwater voor de Waddenzee natuur – literatuurstudie. Waddenacademie rapport 2025-xx, Leeuwarden
- Duran-Matute, M., Gerkema, T., De Boer, G.J., Nauw, J.J., & Gräwe, U., 2014. Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study. *Ocean Science* 10, 611-632.
- Feringa, R., 2016. Profiel_habitattype_1130_2016. Den Haag.
- Genseberger, M., Fujisaki, A. & Eijsberg-Bak, C., 2020. D-HYDRO deelmodel IJsselmeer modelbouw, eerste modelresultaten waterstanden in 2DH en zoutverspreiding in 3D. Deltares rapport 11205258-008-ZWS-0005, Delft.
- Gerkema, T., 2025. Zoutgehalte in de Waddenzee in relatie tot de sluisafvoer. Waddenacademie rapport 2025-xx, Leeuwarden.
- de Graaf, M., Jager, Z., Vreugdenhil, C.B. & Elorche, M. (2004). Numerical simulations of tidally cued vertical migrations of flatfish larvae in the North Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 59, 295-305.
- Havinga, B., 1922. Mariene mollusken. IN: Redeke, H.C. (Red.) Flora en fauna van de Zuiderzee. Monografie van een brakwatergebied. Nederlandse Dierkundige Vereniging, pp. 373-390.
- Havinga, B., 1954. Hydrografie van het IJsselmeer. IN: Beaufort, L.F. de (Red) Veranderingen in de flora en fauna van de Zuiderzee (thans IJsselmeer) na de afsluiting in 1932. Nederlandse Dierkundige Vereniging, pp. 1-24.
- Herman, P.M.J., Middelburg, J.J., van de Koppel, J., & Heip, C.H.R., 1999. Ecology of estuarine macrobenthos. *Estuaries* 29, 195-240.
- Hoekstra, P., 2024. Klimaatverandering Waddengebied. Waddenacademie Factsheet 2024-01, Leeuwarden.
- Ibaibarriaga, L., Irigoien, X., Santos, M., Motos, L., Fives, J.M., Franco, C., Lago de Lanzós, A., Acevedo, S., Bernal, M., Bez, N. & Eltink, G., 2007. Egg and larval distributions of seven fish species in north-east Atlantic waters. *Fisheries Oceanography* 16, 284-293.
- Jaksic, L., Rienstra, J., Meijers, C. & Blauw, A., 2024. Invloed afvoerregimes IJsselmeer op ecologie Waddenzee; verkennende modelstudie met signaalwaarden saliniteit als ecologische indicatoren, Deltares rapport 11209267-007, Delft.
- Jung, A.S., Brinkman, A.G., Folmer, E.O., Herman, P.M.J., van der Veer, H.W. & Philippart, C.J.M., 2017. Long-term trends in nutrient budgets of the western Dutch Wadden Sea (1976-2012). *Journal of Sea Research* 127, 82-94.
- Jung, A.S., Van Der Veer, H.W., Van Der Meer, M.T., & Philippart, C.J.M., 2019. Seasonal variation in the diet of estuarine bivalves. *PLoS One* 14, e0217003.
- Kemp, W.M., Boynton, W.R., Adolf, J.E., Boesch, D.F., Boicourt, W.C., Brush, G., Cornwell, J.C., Fisher, T.R., Glibert, P.M., Hagy, J.D. and Harding, L.W., 2005. Eutrophication of Chesapeake Bay: historical trends and ecological interactions. *Marine Ecology Progress Series* 303, 1-29.
- Kok, A. & Vollenbroek, R., 2024. Waterbeschikbaarheid Noord-Nederland: Analyse voor de periode 2010-2022. Waddenacademie Rapport 2024-03, Leeuwarden.
- Kranenbarg, J. & J.J.G.M. Backx, 2001. Ruimtelijke en temporele aspecten bij ecologisch herstel van estuariëne gebieden. RIZA werkdocument 2001.210x.

- de Leeuw, C.C. & J.J.G.M. Backx, 2001. Naar een herstel van estuariene gradiënten in Nederland. RIKZ rapport nr. 2000.044, RIZA rapport nr. 2000.034.
- Macias, D., Bisselink, B., Carmona-Moreno, C. et al., 2025. The overlooked impacts of freshwater scarcity on oceans as evidenced by the Mediterranean Sea. *Nature Communications* 16, 998.
- Maathuis, M.A.M., Berg, F., Couperus, B., Poos, J.J. & Tulp, I., 2025. The function of the Wadden Sea in the life cycle of small pelagic fish. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 313, 109043.
- van den Oever, A., van Son, L.M. & Schepp, K. 2023. Zeegraskartering MWTL Waddenzee en Oosterschelde 2023. Rapport 23-372.2 deel A. Waardenburg Ecology, Culemborg.
- Philippart, C.J.M., Cadée, G.C., van Raaphorst, W. and Riegman, R., 2000. Long-term phytoplankton-nutrient interactions in a shallow coastal sea: Algal community structure, nutrient budgets, and denitrification potential. *Limnology and Oceanography* 45, 131-144.
- Philippart, C.J.M., Beukema, J.J., Cadée, G.C., Dekker, R., Goedhart, P.W., van Iperen, J.M., Leopold, M.F. & Herman, P.M.J., 2007. Impacts of nutrient reduction on coastal communities. *Ecosystems* 10, 96-119.
- Philippart, K., Bastmeijer, K., van Beukering, P., Hoekstra, P., van Londen, H., Bogaart, P., Brandenburg, K. & Petersma, F., 2025. Staat van de Waddenzee 2025. Waddenacademie rapport 2025-01, Leeuwarden.
- Postma, H., 1981. Exchange of materials between the North Sea and the Wadden Sea. *Marine Geology* 40, 199-213.
- Redeke, H.C. (ed.), 1922. Flora en fauna van de Zuiderzee. Monografie van een brakwatergebied. Nederlandse Dierkundige Vereniging, Den Helder.
- Redeke, H.C. (ed.), 1936. Flora en fauna van de Zuiderzee. Monografie van een brakwatergebied. Supplement. Zuiderzee-Commissie der Nederlandse Dierkundige Vereniging, Den Helder.
- Rossius, J.E., Kleinhans, M. & Philippart, K., 2023. Afsluitdijk decimeerde biodiversiteit Zuiderzee en IJsselmeer. *De Levende Natuur* 124, 111-116.
- Smits, B, Jaksic, L., Dijkstra, J. & Vroom, J., 2024. Modelleren van abiotiek voor en na afsluiting Zuiderzee: relevantie voor herstelkansen ondergedoken Groot zee gras. Deltares rapport 11209267-006-ZKS-0001, Delft.
- 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* 181, 102174.
- Tulp I., Bolle, L.J., Chen, C., Dänhardt, A., Haslob, H., Jepsen, N., van Leeuwen, A., Poiesz, S.S.H., Scholle, J., Vrooman, J., Vorberg, R., Walker, P., 2022. *Fish*. In: Wadden Sea Quality Status Report. Eds.: Kloemper S. et al., Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, Germany. Last updated 06.09.2022.
- van Vierssen W. & Breukelaar, A.W., 1994. The Zuiderzee: transformation of a brackishwater ecosystem. IN: Vierssen, W. van et al. (Eds), Lake Veluwe, a macrophyte-dominated system under eutrophication stress. Kluwer Academic Publishers, pp. 5-19.
- Volker, A., 1942. Het chloorgehalte van de Zuiderzee vóór de afsluiting. Intern rapport Dienst der Zuiderzeewerken, 's-Gravenhage.
- van Walraven, L., Dapper, R., Nauw, J.J., Tulp, I., Witte, J.I. & van der Veer, H.W., 2017. Long-term patterns in fish phenology in the western Dutch Wadden Sea in relation to climate change. *Journal of Sea Research* 127, 173-181.
- Winter, H.V., I.M. Mulder, A.B. Griffioen, J.C. van Rijssel, J.J. de Leeuw & I. Tulp, 2020. Herstel van vismigratie in het Haringvliet: kennisvragen, monitoring en wetenschappelijk onderzoek. Wageningen University & Research rapport C061/20, Wageningen.
- Witteveen & Bos, 2022. Versterking Afsluitdijk: Passende beoordeling aanleg en gebruik (rvo.nl).



waddenacademie