Deltares

Verkenning nutriëntenhuishouding Waddenzee

Verkenning nutriëntenhuishouding Waddenzee

Auteur(s)
Luuk van der Heijden
Francesca Di Paola
Lauriane Vilmin
Xiaochen Liu

Verkenning nutriëntenhuishouding Waddenzee

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Jurre de Vries
Referenties	
Trefwoorden	Waddenzee; model; tracers; waterkwaliteit; nutriënten; eutrofiering

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	27-03-2025
Projectnummer	11210370-011
Document ID	11210370-011-ZKS-0001
Pagina's	63
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)		
	Luuk van der Heijden Francesca Di Paola Lauriane Vilmin Xiaochen Liu	

Samenvatting

De waterkwaliteit van de Waddenzee voldoet niet aan de Kader Richtlijn Water normen (KRW-normen) voor eutrofiering, waarbij een vermindering van nutriëntenaanvoer naar de Waddenzee wordt voorgesteld om zo deze norm te halen. RWS-Noord Nederland verzoekt om de bijdrage vanuit Noord-Nederland aan de eutrofiering van de Waddenzee in beeld te brengen zodat een mogelijk maatregelenpakket opgezet kan worden.

Deze studie verkent de nutriëntenhuishouding van de Waddenzee via een modelinstrumentarium. Dit modelinstrumentarium biedt de handvaten om beter in beeld te krijgen wat de handelingsperspectieven, en gevolgen daarvan, zijn voor reducties van afvoerwater op de Waddenzee. De modellering, gebaseerd op de beschikbare 3D hydrodynamische- en waterkwaliteits-modelschematisaties voor de Noordzee, geven een eerste beeld van de verspreiding van nutriënten (als conservatieve tracer) en de relatie tussen nutriënten en primaire productie. Door de opsplitsing van herkomstlocaties van nutriënten (waterschappen, IJsselmeer, rivieren) is het mogelijk om een eerste benadering te krijgen van welke locaties relevant zijn om een afname van nutriënten te bewerkstelligen en daarmee de nutriëntenhuishouding in de Waddenzee te verbeteren. Met beide modelopzetten (tracermodel en het primaire productiemodel) kunnen in de toekomst scenario’s worden doorgerekend: bijvoorbeeld van aanpassingen aan het spuiregime vanuit het IJsselmeer of van maatregelen in Noord Nederland.

De modelstudie onderzoekt de belangrijkste bronnen van stikstof en fosfor in de Waddenzee en hun ruimtelijke- en tijd-gerelateerde verdeling. Lokale bronnen zoals de gemalen/polders Miedema, Nieuw Statenzijl, en Helsdeur beïnvloeden specifiek hun nabijgelegen kombergingen. Grotere bronnen zoals de Cleveringsluizen, het IJsselmeer, en de Duitse Eems rivier hebben een bredere impact op meerdere kombergingen. Ook rivieren buiten de Waddenzee, zoals de Rijn en Maas, dragen bij aan de nutriëntenhuishouding door middel van kuststromingen.

Naast de verspreiding van nutriënten werd er ook een relatie waargenomen tussen nutriëntendistributie en fytoplanktonproductie, waarbij hogere nutriëntenconcentraties overeenkomen met hogere concentraties van fytoplankton. Dit inzicht kan helpen bij het ontwikkelen van gerichter beleid voor het terugdringen van nutriëntenconcentraties op die plekken waar het tot doel heeft het ondersteunen van zeegrasherstel.

Klimaatverandering en de daaraan gerelateerde veranderingen in het spuiregime (zowel hoeveelheid water als tijdsperiode waarin gespuid wordt) van het IJsselmeer hebben eveneens invloed op de verwachte verschuivingen in waterafvoer van het IJsselmeer, die de saliniteit en nutriëntenbelasting in verschillende gebieden van de Waddenzee kunnen veranderen.

Om beter inzicht te krijgen naar aanwezigheid (in aantal en massa) van benthische organismen en hun bepalende factoren zou deze studie uitgebreid moeten worden met modelstudies en data-analyses van andere bepalende factoren, denk bijvoorbeeld aan zoet-zout transities (saliniteitsgradiënten) of menselijk beheer en activiteiten. Dit kan waardevolle inzichten opleveren door modelscenario’s te vertalen naar toekomstige geschiktheid van voorkomen voor organismes.

Inhoud

	Samenvatting	**4**
1	**Introductie**	**7**
1.1	Kader en relevantie	7
1.1.1	Huidige stand van kennis	7
1.2	Doel en afkadering	9
2	**Modelbeschrijving en data benodigdheden**	**11**
2.1	DCSM-model: tracersom	11
2.1.1	Nederlandse Waddenzee bronnen	12
2.1.1.1	Relatief grote bronnen	12
2.1.1.2	Afvoerwater door waterschappen	13
2.1.2	Groepering overige bronnen	13
2.2	Beschrijving resultaten vorm	14
2.2.1	Voorbeeld figuren massabalans	14
2.2.2	Voorbeeld figuren ruimtelijke patronen van tracerconcentraties (nutriënten)	17
3	**Tracermodel resultaten**	**19**
3.1	Modelresultaten totaal stikstof tracer	19
3.1.1	Per kombergingsgebied	19
3.1.2	Per tracer	20
3.1.3	Jaarlijkse fluctuatie	23
3.2	Modelresultaten totaal fosfor tracer	25
3.2.1	Per kombergingsgebied	25
3.2.2	Per tracer	26
3.2.3	Jaarlijkse fluctuatie	28
4	**Waterkwaliteitsmodelresultaten**	**30**
4.1	Nutriënten	30
4.1.1	KRW-limieten	32
4.2	Chlorofyl-A en primaire productie	33
5	**Discussie**	**35**
5.1	Betekenis voor nutriënten huishouding	35
5.1.1	KRW-limieten	35
5.2	Testen van mogelijk maatregelenpakket	35
5.3	Gevolgen en samenhang met klimaatverandering	36
5.4	Aanbevelingen	36
6	**Referenties**	**38**
A	**Appendix A**	**40**

B	**Appendix B**	**42**
C	**Appendix C**	**46**
D	**Appendix D**	**51**
E	**Appendix E**	**59**
F	**Appendix F**	**60**

1 Introductie

1.1 Kader en relevantie

De achtergrond van de vraag vanuit Rijkswaterstaat Noord-Nederland (RWS-NN) is dat de waterkwaliteit van de Waddenzee nu niet voldoet aan de Kader Richtlijn Water normen (KRW-normen) voor nutriënten en eutrofiering (Informatiehuis Water, 2024a-2024d). De drempelwaarde voor opgelost anorganisch stikstof (Dissolved Inorganic Nitrogen; DIN) in de Waddenzee en Waddenzee vastelandskust is vastgesteld op 0,46 mg N/L voor de winterperiode (december-februari). In beide gebieden wordt deze waarde overschreden, beide hebben een concentratie van ~0,75 mg N/L, wat als gevolg heeft dat de biologische toestand van de Waddenzee, met name eutrofiering en algen bloei, als matig wordt beschouwd. Voor opgelost anorganisch fosfor zijn geen normen vastgesteld voor de Waddenzee en Waddenzee vastelandskust. Een oplossing voor het tegengaan van deze overschrijding zou een verminderde nutriëntenaanvoer naar de Waddenzee zijn. RWS-NN wil graag weten wat de bijdrage vanuit Noord-Nederland is aan de nutriëntenconcentraties, en dus eutrofiering, van de Waddenzee om te zien welk handelingsperspectief er is.

1.1.1 Huidige stand van kennis

In eerdere projecten (voor OSPAR in opdracht van Lisette Enserink[1] en voor INTERREG in opdracht van Gerrit Niebeek[2]) heeft Deltares al modelberekeningen gedaan van de effecten van nutriënten op chlorofylconcentraties.

In het INTERREG project is gezocht naar drempelwaarden voor nutriënten en chlorofyl in de Waddenzee, gebaseerd op een gedeeld ecosysteembegrip in Nederland en Duitsland. Zowel het Deltares-model als het Duitse model lieten maar een heel beperkte reductie in chlorofylconcentraties in de Waddenzee zien in reactie op reductie van stikstofvrachten. Maar beide modellen onderschatten fosfaatconcentraties in de Waddenzee doordat ze de nalevering van fosfaat uit de bodem in de zomer niet meenemen in het model. Hierdoor wordt de invloed van stikstof in de modellen onderschat en de rol van fosfaat overschat.
In de OSPAR studie is aangetoond dat de lozingspunten in Noord-Nederland (*NL_North*; zie bijlage voor wat dit betreft) een relatief grote bijdrage leveren aan de totale nutriëntenvrachten naar in de westelijke- en oostelijke Nederlandse Waddenzee (Figuur 1). In de westelijke Waddenzee is deze bijdrage van de noordelijke lozingspunten 33% voor totaal fosfor en 43% voor totaal stikstof. Voor de oostelijke Waddenzee is deze bijdrage van de noordelijke lozingspunten 37% voor totaal fosfor en 31% voor totaal stikstof.

Een studie van van Beusekom et al. (2017) toonde aan dat er een relatie is tussen de fytoplanktonproductie (uitgedrukt in chlorofyl) en de totale stikstofvracht richting de Waddenzee (Figuur 2). Deze fytoplankton, zowel aanwezig in de waterkolom als in epifyten vorm op de bladeren, kunnen bijdragen aan een verslechterd lichtklimaat voor zeegras (van Katwijk et al., 2024).

In het lopende EU-project NAPSEA[3] worden modelsimulaties voor de Waddenzee uitgevoerd om te zien wat de invloed is van maatregelen in het stroomgebied van de Waddenzee (Rijn

[1] Modelling of nutrient load scenarios and transboundary nutrient transport, A model study for OSPAR regions II, III and IV (Prins et al., 2023). https://kennisbank.deltares.nl/Details/fullCatalogue/1000021481
[2] INTERREG project: samenwerking met Duitse partners om te komen tot coherente normen voor eutrofiëring in de Duitse en Nederlandse Waddenzee en Eem estuarium (Röhnet al., 2023; https://www.nlwkn.niedersachsen.de/fsk/fsk_forschungsprojekte/wasserqualitat-waterkwaliteit-226205.html)
[3] www.napsea.eu

en Elbe rivier) op de nutriëntenconcentraties en ecologie van de Waddenzee. Hierbij wordt vooral gekeken naar het effect van maatregelen en klimaatverandering in het stroomgebied en naar de doorvertaling van nutriëntenconcentraties in de Waddenzee naar ecologische indicatoren anders dan chlorofyl, zoals bijvoorbeeld zeegras. Hierbij wordt naast de Rijn en Elbe ook in detail naar het stroomgebied van de Hunze en Aa gekeken (case studie in NAPSEA).

Figuur 1. Relatieve bijdrage van de rivierbronnen aan het jaargemiddelde totale stikstof (links) en fosfor (rechts) concentratie in de Waddenzee deelgebieden. De taart-diagrammen tonen de bijdrage van iedere rivierbron met uitsluiting van de Atlantische Oceaan. Figuur afkomstig uit Prins et al. (2023). Bronnen zijn gegroepeerd per taart-deel (kleur): NL_North bevat alle lozingen aan de kust van Groningen, Friesland en noordelijk deel van Noord-Holland. NL_South bevat de lozingen vanuit de Rijn, Maas en het Noordzeekanaal. Voor overige bronbeschrijvingen zie Figuur 4.

Figuur 2. Correlatie tussen zomerchlorofyl en TN-input van 1977 – 2014 voor de lang termijn stations in de zuidelijke Waddenzee (Marsdiep Noord, Vliestroom, Doove Balg West en Dantziggat). In de grafieken zijn benaderende achtergrondwaarden aangegeven. De twee lijnen omlijsten de datapunten van het Marsdiep Noord-station en dienen als referentie voor de andere zuidelijke Waddenzee-stations. Figuren afkomstig van van Beusekom et al., (2017).

1.2 Doel en afkadering

Het doel van dit onderzoek is het verkennen van de nutriëntenhuishouding van de Waddenzee via een modelinstrumentarium. Hiermee kan in kaart gebracht worden wat de verdeling in ruimte in tijd is van nutriënten (potentiële productie), fytoplankton hoeveelheden (standing stock) en primaire productie (processnelheid). Dit modelinstrumentarium biedt de handvaten om beter in beeld te krijgen wat de handelingsperspectieven en gevolgen daarvan zijn voor reducties van afvoerwater op de Waddenzee (Figuur 3). Deze reducties kunnen zowel gericht zijn op de concentraties van nutriënten in het water als op de hoeveelheid water die wordt geloosd.

De werkzaamheden binnen dit deelproject voor 2024 zijn:

- Kennisdeling met RWS-NN: in een bijeenkomst met mensen van RWS-NN heeft Deltares een presentatie over wat er al bekend is over bronnen van nutriënten en de invloed daarvan op algengroei in de Waddenzee. Hier werden de relevante resultaten van het INTERREG-project, de studie naar relatief belang van bronnen voor OSPAR en tussenresultaten en plannen voor NAPSEA gepresenteerd.
- Om een eerste beeld te krijgen van de verspreiding van nutriënten (als conservatieve tracer) is een tracersom, die al eerder gebruikt is in studies als OSPAR en INTERREG, verfijnd met een meer gedetailleerde beschrijving van nutriënt lozingen in de Waddenzee. Deze gedetailleerde beschrijving doelt op het opsplitsen van herkomstlocaties van nutriënten (waterschappen, IJsselmeer) die in het vorige model nog gegroepeerd waren.
- Het vervolg van deze tracersom was het toevoegen van de relevante waterkwaliteitsprocessen, dit gaf een beter beeld van de invloed van nutriënten op de

primaire productie in de Waddenzee. Binnen welke sub-gebieden van de Waddenzee is de primaire productie gelimiteerd door licht, en waar is deze gelimiteerd door nutriënten?

- Op basis van de resultaten van bovenstaande modelstudies is een voorstel gedaan voor een maatregelenpakket om het eutrofiëringsprobleem in de Waddenzee aan te pakken. Met beide modelopzetten (tracermodel en het primaire productiemodel) voor de Waddenzee kunnen ook toekomst scenario's worden berekend: bijvoorbeeld aanpassingen aan het spuiregime vanuit het IJsselmeer of van maatregelen in Noord Nederland.

De modellering is gebaseerd op de beschikbare 3D hydrodynamische- en waterkwaliteits-modelschematisaties.

Figuur 3. Schematische weergave van de werkzaamheden en samenhang daarvan voor dit project (en mogelijk verder).

2 Modelbeschrijving en data benodigdheden

De modellering is gebaseerd op de beschikbare 3D hydrodynamische- en waterkwaliteits-modelschematisaties[2] (Zijl et al., 2023). Een groot gedeelte van de benodigde data is daarmee op voorhand aanwezig (o.a. bathymetrie, meteorologie, kunstwerken).

De modelsommen richten zich of op tracerbenadering (beschrijving in 2.1) of op waterkwaliteitsprocessen. Voor wat betreft het DCSM-waterkwaliteitsmodel is gebruik gemaakt van uitkomsten van de OSPAR schematisatie (Prins et al., 2023) welke in dit project focussen op de periode 2014-2016 om aan te sluiten bij de gemodelleerde tijdsperiode van tracersommen. Voor de beschrijving van resultaat vormen is in 2.2 een uitleg met voorbeeld figuren en tabellen gegeven voor zowel de tracersom (2.2.1 en 2.2.2) als de waterkwaliteitssom (2.2.2).

2.1 DCSM-model: tracersom

Het DCSM-model[4] (Zijl et al., 2023) bevat lozingen over de hele Europese kust (Figuur 4) welke informatie bevatten op het gebied van waterlozing, nutriënten, zuurstof en meer (organisch materiaal). Langs alle kusten en in de zuidelijke Noordzee nemen de celgroottes van dit model af en zijn deze ongeveer 0,5 nm x 0,5 nm of 840 m x 930 m in de buurt van de Nederlandse wateren.

Voor de modellering van de tracers zijn concentraties van waterkwaliteitsparameters voor de lozingspunten (Figuur 4), o.a. organisch materiaal, organisch stikstof, organisch fosfor, nitraat, ammonium en orthofosfaat, over de periode 2011 t/m 2018 gebruikt (Prins et al., 2023). De concentraties en lozingen zijn afkomstig van de Intersessional Correspondence Group on Eutrophication Modelling (ICG-EMO) database (Lenhart et al, 2022; van Leeuwen et al., 2023). Deze database bevat dagelijkse waardes voor stroming en nutriënten voor 368 rivieren die uitmonden op het Europese Continentaal Plat, na optimalisatie naar dagelijkse waarden van oorspronkelijk verkregen observatiegegevens (Lenhart et al., 2010; ICG-EMO, 2021). In de studie van Prins et al. (2023) zijn deze waardes opnieuw geschaald zodat totale rivier vrachten consistent zijn met de OSPAR Riverine Inputs and Direct Discharges (RID) database. Deze parameters worden omgezet naar conservatieve tracers welke totaal stikstof en totaal fosfor representeren. Omdat het om een stikstof en fosfor tracer gaat wordt deze uitgedrukt in mg/L en niet als mg N/L of mg P/L. Deze tracer representeert de conservatieve hoeveelheid stikstof of fosfor in het systeem, waarbij er geen processen meegaan die deze hoeveelheid doen afnemen of toenemen.

[4] https://www.deltares.nl/expertise/publicaties/3d-dcsm-fm-a-sixth-generation-model-for-the-nw-european-shelf-2022-release

Figuur 4. Kaart die aggregatie van individuele rivierbronnen in de ICG-EMO database in 24 groepen weergeeft. De grijze lijnen toont de grenzen van de 'assessment areas' in de OSPAR studie.

2.1.1 Nederlandse Waddenzee bronnen

In het eerdere model (Prins et al., 2023) waren voor de tracersom alle bronnen die lozen op de Nederlandse Waddenzee samengevoegd in een tracernaam '*NL_North*' (zie ook Figuur 4). Echter zijn deze voor het huidige model opgesplitst zodat de individuele bijdrage van deze lozingspunten getraceerd kan worden (Figuur 5).

Figuur 5. Overzicht van lozingspunten op de Nederlandse Waddenzee zoals ze nu in het DCSM-model zitten met o.a. een opsplitsing van NL-North in verschillende individuele bronnen.

2.1.1.1 Relatief grote bronnen

De uitstroom van het IJsselmeer is in het model opgedeeld in een westelijke instroom (Den Oever; *Lake_IJssel_West*) en oostelijke instroom (Kornwerderzand; *Lake_IJssel_East*)

(Figuur 5). Daarnaast komt ook de Eems uit in de oostelijke Waddenzee (*Ems*). Meer over de lange termijn trend van debieten vanuit deze bronnen is te vinden in de sectie zoetwaterafvoeren in de Digitale Systeemrapportage Wadden (Stolte et al., 2023).

2.1.1.2 Afvoerwater door waterschappen

Noorderzijlvest (NZV) - waterafvoer naar de Waddenzee:
Vanuit het beheergebied van NZV wordt water naar de Waddenzee afgevoerd op vier locaties (Figuur 5). Gespuid wordt bij de Cleveringsluizen te Lauwersoog. Deze uitlaat is een groot afvoerpunt van water uit het Lauwersmeer naar de Waddenzee. Gepompt wordt er via het Damsterdiep (gemaal de Driedelfzijlen; *DeDrieDelfzijl*) en in verhouding geringere hoeveelheden bij (gemaal) Noordpolderzijl (*Noordpolderzijl*) en bij Spijk (gemaal Spijksterpompen; *Spijksterpompen*). De Cleveringsluizen als 'hoofdkraan' voor het Lauwersmeer naar de Waddenzee worden beheerd door NZV.

Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier - waterafvoer naar de Waddenzee
Water naar de Waddenzee wordt gespuid bij Den Helder (Gemaal Helsdeur en spuisluis Oostoever). De gemalen op het eiland Texel, namelijk Prins Hendrik, de Schans, Dijkmanshuizen, Zandkes, Krassekeet en Eijerland, zitten ook in het model.

Wetterskip Fryslân (WF) - waterafvoer naar de Waddenzee
Water naar de Waddenzee wordt gespuid bij Harlingen (Tjerk Hiddes sluizen; *Harlingen*), bij Roptazijl (*Ropta*) en Zwarte Haan (*Miedema*).

Gemiddeld 65% van het afgevoerde water uit de Friese Boezem verlaat het systeem via Dokkumer Nieuwezijlen en de Friese Sluis bij Zoutkamp richting het Lauwersmeer, 25% op IJsselmeer en 10% op de Waddenzee te Harlingen.

Hunze & Aa - waterafvoer naar de Waddenzee
Hunze & Aa watert af op het Eems - Dollard estuarium, welke in open verbinding staat met de Waddenzee. Er wordt uitgeslagen / gespuid bij Delfzijl (Eemskanaal en Gemaal Duurswold), Termunterzijl (Gemaal Rozema), Fiemel (Gemaal Fiemel) en bij de sluis van Nieuwe Statenzijl.

2.1.2 Groepering overige bronnen

Voor de groepering van de overige bronnen in het DCSM model zoals gebruikt voor OSPAR is gekozen voor de groepering zoals aangegeven in Figuur 6. Hierin is onderscheidt gemaakt tussen:

- de rivieren die via het kanaal de Noordzee binnen komen (*Atlantic Rivers*)
- de rivieren die "direct" in de Noordzee lozen (*North Sea*)
- de rivieren die in het zuiden van Nederland lozen (*NL-South*):
  - Maas, Rijn en Noordzeekanaal
- de rivieren en lozingen op de Weser en Elbe rivier in Duitsland (*Weser and Elbe*)
- de rivier de Eems (*Ems*)
- de lozingen afkomstig vanuit de Oostzee (*Baltic Straits*)

Figuur 6. Tracer namen voor de bronnen verder van de Waddenzee afgelegen. Let op dat de opgesplitste bronnen van Figuur 5 hier zijn gegroepeerd in 'Waddensea grouped'.

2.2 Beschrijving resultaten vorm

De resultaten van de tracersommen worden per nutriënt beschreven, dus eerst de resultaten voor stikstof (3.1) en daarna voor fosfor (3.2). Voor de tracer sommen worden de volgende figuren en tabellen gebruikt om de uitkomsten van het model te beschrijven:

- Massabalans
    - Tijdseries van massa (voorbeeld in Figuur 8)
    - Staaf diagram (voorbeeld in Figuur 9)
    - Taart diagram per assessment area
    - Tabel met percentages

- Ruimtelijke patronen
    - Concentratie plots
    - Percentage bijdrage van elke bron

2.2.1 Voorbeeld figuren massabalans

Voor de massabalans wordt gebruik gemaakt van verschillende kombergingsgebieden (Figuur 7).

Figuur 7. De verschillende assessment gebieden in het model die overeenkomen met kombergingsgebieden.

Per kombergingsgebied wordt gekeken naar een massabalans van de conservatieve tracer (in dit geval totaal stikstof) over de tijd (Figuur 8). Hier zien we de totale massa en bijdrage per tracergroep variëren over de tijd voor een kleiner gebied (in dit geval Marsdiep). Dit soort figuren leveren informatie over de massa verdeling over tijd, en welke bronnen meer of minder leveren in bepaalde seizoenen.

Figuur 8. Voorbeeld figuur van de massa totale stikstof voor het jaar 2014 (in gram) opgesplitst in de verschillende tracer bijdrages (zie kleurencode in legenda). NO3 = atmosferische depositie.

Het voorbeeld staafdiagram, zoals weergegeven in Figuur 9, geeft in een oogopslag de gemiddelde tracerconcentratie (jaar- of winter gemiddeld) weer voor de verschillende kombergingsgebieden. Daarbij toont het ook de bijdrage van verschillende bronnen aan deze

gemiddelde concentratie. Hetzelfde is mogelijk via de taartdiagram in Figuur 10, waarbij de ruimtelijke verdeling van gemiddelde concentraties en relatieve bijdrages per bron ook zichtbaar is. Via een tabel, zoals Tabel 1, worden de relatieve bijdrages uitgedrukt in exacte cijfers.

Figuur 9. Voorbeeld figuur van de totale stikstof tracer concentratie (in mg/L) over de verschillende kombergingsgebieden en bijdrages per bron (zie kleurencode in legenda). NO3 = atmosferische depositie.

Figuur 10. Voorbeeld figuur van een taart diagram met de gemiddelde concentratie (jaargemiddelde) van de totale stikstof tracer (weergegeven als grote van de cirkel) en de relatieve bijdrage van de verschillende tracers aan deze gemiddelde concentratie (zie kleurencode in legenda) per kombergingsgebied (aangegeven met rode contourlijnen en in het label van de taart). Bijdrages kleiner dan 5% zijn gegroepeerd in de cluster "Other rivers". NO3 = atmosferische depositie.

Tabel 1. De relatieve bijdrage (in %) van de verschillende tracers aan de kombergingsgebieden. Mars = Marsdiep; Eijer = Eijerlandse Gat; Vlie = Vlie; Born = Borndiep; Pink = Pinkegat; Zout = Zoutkamperlaag; Eila = Eilanderbalg; Lauw = Lauwer; Schi = Schild; Eems = Eems-Dollard; DE = Duitsland; NL = Nederland. Bijdrages kleiner dan 5% zijn gegroepeerd in de cluster "Overige rivieren/bronnen".

Bron	Mars	Eijer	Vlie	Born	Pink	Zout	Eila	Lauw	Schi	Eems
Cleveringsluizen	-	-	-	-	6.4	24.6	19.8	14.9	9.8	-
Ems (DE)	-	-	-	-	-	-	-	13.1	21.0	64.2
Ijsselmeer West	35.1	16.7	15.3	13.3	10.6	8.0	7.7	6.8	6.1	-
Ijsselmeer Oost	28.0	19.5	31.2	31.9	23.9	16.9	15.7	13.3	11.5	-
Miedema	-	-	-	5.0	-	-	-	-	-	-
NL-Zuid	14.7	26.4	20.0	17.7	20.3	17.1	18.1	16.7	16.5	6.0
Overige rivieren/bronnen	11.1	2.2	9.7	8.7	11.2	9.3	12.1	9.7	10.2	24.3
Atlantische rivieren input	11.1	21.4	17.0	15.5	18.3	15.5	16.3	15.2	15.0	5.5
Noordzee rivieren input	-	5.8	-	-	-	-	-	-	-	-
Atmosferische depositie	-	7.8	6.8	8.0	9.4	8.7	10.3	10.3	9.8	-

2.2.2 Voorbeeld figuren ruimtelijke patronen van tracerconcentraties (nutriënten)

Om de ruimtelijke patronen van de tracerconcentraties (welke nutriënten representeren) in de Waddenzee en Noordzee weer te geven wordt zowel de concentratie van tracers (bijv. totale tracer concentratie van stikstof in Figuur 11) als ook een percentuele bijdrage van een individuele bron (bijv. de tracer Kornwerderzand) aan de totale tracerconcentratie (Figuur 12) weergegeven.

De kleurenschaal van de totale tracer concentratie wordt vaak afgekapt op een bepaalde waarde om de meest extreme waardes minder dominant te laten zijn. Ook voor de relatieve bijdrage van tracer concentraties wordt een maximum gezet op 50%.

Figuur 11. Voorbeeld figuur van een gemiddelde gemodelleerde oppervlakte laag voor de totale stikstof tracer concentratie (in mg/L; of gT/m^3) in de periode 2014-2016.

Figuur 12. Voorbeeld figuur van de relatieve bijdrage (in %) van de fosfor tracer (afkomstig uit IJsselmeer oost) aan de jaarlijkse gemiddelde totale fosfor concentratie (periode 2014-2016).

3 Tracermodel resultaten

3.1 Modelresultaten totaal stikstof tracer

De tracer modellering van totaal stikstof (TN-tracer) toont hoe de verschillende rivier pluimen en waterschap lozingen de Waddenzee beïnvloedt (Figuur 13). De concentratie van de TN-tracer is met name hoog in de Eems monding en langs de Nederlandse vasteland kust voor de periode 2014-2016.

Figuur 13. Gemiddelde totale stikstof tracer concentratie voor de periode 2014-2016 (in mg/L).

3.1.1 Per kombergingsgebied

Gefocust op de kombergingsgebieden blijkt dat de westelijke gebieden (dat zijn kombergingsgebieden Marsdiep, Eijerlandse Gat, Vlie, Borndiep en Pinkegat; Figuur 7) met name worden beïnvloed door het IJsselmeer (~30-60% van de totale TN-tracer concentratie is afkomstig van het IJsselmeer) (Figuur 14, Tabel 2 en Appendix A, Tabel 4). In minder mate is invloed weergegeven vanuit de zuidelijke rivieren van zowel Nederland (~15-20% afkomstig van Rijn, Maas en Noordzeekanaal) en materiaal wat door het Kanaal naar de Wadden reiken (~10-20% afkomstig van Atlantische rivieren; bijv. Seine) . Ook de TN-tracers aanwezig in het initiële modeldomein spelen een rol (~5-10%). De gebieden ondervinden minimale input van bronnen afkomstig uit de Noordzee rivieren (< 5%) en lokale bronnen. Voor wat betreft lokale bronnen ontvangen enkel Pinkegat (vanuit Cleveringsluizen: ~5%) en Borndiep (vanuit Miedema: ~4%) een redelijke hoeveelheid TN-tracers (zie ook Figuur 15 en Appendix A, Tabel 4).

Voor de kombergingsgebieden in het midden van de Nederlandse Waddenzee, namelijk Zoutkamperlaag en Eilanderbalg, wordt met name sterke lokale invloed getoond. Zo is ~15-20% van de totale TN-tracer concentratie in deze gebieden afkomstig van Cleveringsluizen (Figuur 14, Tabel 2 en Appendix A, Tabel 4). Overige bronnen die relevant zijn voor deze twee gebieden zijn regionale bronnen (afkomstig uit IJsselmeer; ~20%) en zuidelijke rivieren (afkomstig uit de Rijn, Maas, Noordzeekanaal en Atlantische rivieren; ~30%).

De oostelijke kombergingsgebieden Lauwers en Schild hebben geen duidelijke dominante bron maar hier is tussen de 15-17% van de totale TN-tracer concentratie afkomstig vanuit het IJsselmeer, rond de 10% vanuit de Cleveringsluizen, tussen de 11-18% vanuit de Eems rivier

(Duitsland), ~14% vanuit de zuidelijke Nederlandse rivieren (Rijn, Maas en NZK) en ~13% vanuit de Atlantische rivieren (Figuur 14, Tabel 2 en Appendix A, Tabel 4).

Het kombergingsgebied de Eems-Dollard wordt gedomineerde door de relatieve bijdrage van Eems rivier aan de totale TN-tracer concentratie (~60%; Figuur 14, Tabel 2 en Appendix A, Tabel 4). Ook op de totale TN-tracer concentratie is relatief hoog t.o.v. de andere gebieden (factor 2–2,5 groter), zowel voor het jaarlijks gemiddelde (~1,7 mg/L TN-tracer; Figuur 32 in Appendix B) als voor het winter gemiddelde (~1,8 mg/L TN-tracer; Figuur 33 in Appendix B).

Atmosferische depositie beïnvloed de stikstof concentratie van alle gebieden met een relatieve bijdrage van tussen de 4 en 10% (Figuur 14, Tabel 2 en Appendix A, Tabel 4).

Figuur 14. Taart diagram met de jaargemiddelde concentratie totaal stikstof tracer (TN-tracer; weergegeven als grote van de cirkel) en de relatieve bijdrage van de verschillende tracers aan deze gemiddelde concentratie (zie kleurencode in legenda) per kombergingsgebied (aangegeven met rode contourlijnen en in het label van de taart). Bijdrages kleiner dan 5% zijn gegroepeerd in de cluster "Other rivers". Label codes en relatieve bijdrage (in %) staan beschreven in Appendix A, Tabel 4. NO3 = atmosferische depositie.

Tabel 2. De relatieve bijdrage (in %) van de verschillende totale stikstof tracers (TN-tracer) aan de kombergingsgebieden. Mars = Marsdiep; Eijer = Eijerlandse Gat; Vlie = Vlie; Born = Borndiep; Pink = Pinkegat; Zout = Zoutkamperlaag; Eila = Eilanderbalg; Lauw = Lauwer; Schi = Schild; Eems = Eems-Dollard. Bijdrages kleiner dan 5% zijn gegroepeerd in de cluster "Overige rivieren/bronnen". Volledige overzicht van relatieve bijdrage in Appendix A, Tabel 4.

Bron	Mars	Eijer	Vlie	Born	Pink	Zout	Eila	Lauw	Schi	Eems
Cleveringsluizen	-	-	-	-	5.3	21.1	16.9	12.9	8.5	-
Ems (DE)	-	-	-	-	-	-	-	11.3	18.2	60.8
Ijsselmeer West	31.7	13.7	13.0	11.4	8.8	6.9	6.6	5.9	5.3	-
Ijsselmeer Oost	25.3	16.0	26.5	27.5	20.0	14.5	13.4	11.5	10.0	-
NL-Zuid	13.2	21.7	17.0	15.2	17.0	14.7	15.5	14.5	14.2	5.7
Overige rivieren/bronnen	12.9	6.6	12.6	15.9	14.1	12.1	14.6	12.3	12.7	28.3
Buiten model domein	-	5.3	-	-	-	-	-	-	-	-
Atlantische rivieren input	10.0	17.6	14.5	13.3	15.3	13.3	13.9	13.1	13.0	5.2
Initiele model veld	6.9	12.6	10.5	9.8	11.5	9.9	10.4	9.7	9.6	-
Atmosferische depositie	-	6.4	5.8	6.9	7.9	7.5	8.8	8.9	8.5	-

3.1.2 Per tracer

De verspreidingspatronen van de relatieve bijdrage TN-tracers aan de totale stikstof concentratie in de Waddenzee variëren van lokaal naar regionaal, nationaal en internationaal (Figuur 15).

De relatief grotere regionale bijdrages zijn afkomstig van Den Oever (IJsselmeer West) en Kornwerderzand (IJsselmeer Oost) (Figuur 15), al heeft ook de Duitse rivier de Eems een relatief regionale bijdrage (Figuur 15). De verspreiding van deze bronnen rijkt tot ver in en buiten de Waddenzee. Daarentegen geven de lozingspunten Cleveringsluizen, Helsdeur, Miedema, Nieuw Statenzijl, Oostoever en Ropta met name een relatief kleine lokale bijdrages, en daarbij horende minimale verspreiding (Figuur 15 en Figuur 36 in Appendix C).

Van buiten de Waddenzee zijn met name de zuidelijke Nederlandse rivieren en de Atlantische rivieren een belangrijke bron van TN-tracer (stikstof). Verspreidingspatronen van beide groeperingen van rivieren tonen een patroon waarbij de TN-tracers langs de Nederlandse kust naar het Noordoosten afbuigen en daarbij de Waddenzee deels betreden. De atmosferische depositie heeft een redelijk gelijkmatig verspreid patroon van bijdrage aan het totaal.

Figuur 15. Verschillende Waddenzee kaarten met relatieve bijdrage (in %) van de meest relevante TN-tracers aan de jaarlijkse gemiddelde TN-tracer concentratie voor de periode 2014-2016. Figuren voor overige TN-tracers zijn weergegeven in Appendix C, Figuur 36. TN_NL_Lake_IJssel_East = TN-tracer afkomstig van Kornwerderzand; TN_NL_Lake_IJssel_West = TN-tracer afkomstig van Den Oever; TN_NL_South = TN-tracer afkomstig van de Rijn, Maas en het Noordzeekanaal; TN_NL_Cleveringsluizen = TN-tracer afkomstig van Cleveringsluizen; TN_DE_Ems = TN-tracer afkomstig van de Eems rivier; NO3 = atmosferische depositie; TN_North_Sea = TN-tracer afkomstig van een selectie van rivieren uitmondend in de Noordzee; TN_Atlantic = TN-tracer afkomstig van Atlantische rivieren.

3.1.3 Jaarlijkse fluctuatie

De totale stikstof tracer massa in de verschillende kombergingsgebieden vertoont twee type patronen over tijd. Het eerste patroon is een door rivierdynamiek beïnvloed afvoer gedomineerd patroon waarbij de totale massa sterk fluctueert over het jaar, dit is bijvoorbeeld zichtbaar voor het Marsdiep (Figuur 16), voor de Eems-Dollard (Figuur 17) en voor het Vlie (Figuur 41 in Appendix D). Een tweede patroon is een springtij gedreven patroon zichtbaar in de fluctuaties van totale massa stikstof binnen het gebied, bijvoorbeeld voor het Pinkegat (Figuur 18) en de overige kombergingsgebieden (Figuur 40, Figuur 42-Figuur 45 in Appendix D). Deze wordt met name beïnvloed door de Noordzee dynamiek.

Figuur 16. De totale massa van totaal stikstof tracer (TN-tracer; in gram) voor het kombergingsgebied Marsdiep over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer (zie kleurencode in legenda).

Figuur 17. De totale massa van totaal stikstof tracer (TN-tracer; in gram) voor het kombergingsgebied Eems-Dollard over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer (zie kleurencode in legenda).

Figuur 18. De totale massa van totaal stikstof tracer (TN-tracer; in gram) voor het kombergingsgebied Pinkegat over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer (zie kleurencode in legenda).

3.2 Modelresultaten totaal fosfor tracer

De tracer modellering resultaten van totaal fosfor (TP-tracer) toont hoe de verschillende rivierpluimen en waterschapslozingen de verschillende delen van de Waddenzee beïnvloedt (Figuur 19). Ook voor de TP-tracerconcentratie, net als voor de TN-tracer, geldt dat deze met name hoog in de Eemsmonding en langs de Nederlandse vasteland kust voorkomt.

Figuur 19. Jaarlijks gemiddelde totaal fosfor tracerconcentratie voor de periode 2014-2016 (in mg/L).

3.2.1 Per kombergingsgebied

Zoals ook voor de stikstoftracer worden de westelijke gebieden (Marsdiep, Eijerlandse Gat, Vlie, Borndiep en Pinkegat) met name beïnvloed door de totaal fosfor tracers (TP-tracers) afkomstig van het IJsselmeer (~35-65% van de totale concentratie) (Figuur 20, Tabel 3 en Appendix A, Tabel 5). In mindere mate worden deze gebieden beïnvloed door de zuidelijke rivieren van zowel Nederland (~15-30% afkomstig uit de Rijn, Maas en het Noordzeekanaal) als wat door het Kanaal naar de Wadden stroomt (~10-20% afkomstig van Atlantische rivieren zoals de Seine). Net als voor stikstof ondervinden deze gebieden minimale TP-tracer bijdrage van bronnen afkomstig uit de Noordzee rivieren (<6%). Ook lokale bronnen dragen relatief weinig bij aan de TP-tracer concentratie in deze gebieden, enkel de gebieden Borndiep (< 5% afkomstig van gemaal Miedema) en Pinkegat (~7% afkomstig van Cleveringsluizen) ontvangen een redelijke hoeveelheid fosfor nutriënten (zie ook Figuur 21). Voor de kombergingsgebieden in het midden van de Nederlandse Waddenzee, namelijk Zoutkamperlaag en Eilanderbalg, geldt een vergelijkbaar patroon als bij stikstof, met name sterke lokale invloed afkomstig van Cleveringsluizen (~20-25% van de totale concentratie in deze gebieden) (Figuur 20, Tabel 3 en Appendix A, Tabel 5). Overige bronnen die relevant zijn voor deze twee gebieden zijn de regionale bronnen uit het IJsselmeer (~25% afkomstig van Den Oever en Kornwerderzand) en de zuidelijke rivieren (Rijn, Maas, Noordzeekanaal en Atlantische rivieren; ~35-40%).

Ook voor TP-tracer (fosfor) hebben de oostelijke gebieden Lauwers en Schild geen duidelijke dominante bron. Van de totale fosfor-concentratie in deze gebieden is ~20% afkomstig van het IJsselmeer, tussen de 10 en 16% van de Cleveringsluizen, tussen de 14 en 23% van de Eems rivier (Duitsland), ~18% van de zuidelijke Nederlandse rivieren (Rijn, Maas en Noordzeekanaal) en rond de 16%van de Atlantische rivieren (Figuur 20, Tabel 3 en Appendix A, Tabel 5).

De Eems-Dollard wordt, net als voor stikstof, gedomineerde door de relatieve bijdrage van de Eems rivier (~65%; Figuur 20, Tabel 3 en Appendix A, Tabel 5). Ook op de totale fosfor concentratie is relatief hoog t.o.v. de andere gebieden (factor 2–2,5 groter), zowel voor het jaarlijks gemiddelde (~1,6 mg/L TP-tracer; Figuur 34 in Appendix B) als voor het winter gemiddelde (~1,75 mg/L TP-tracer; Figuur 37 in Appendix B).

Figuur 20. Taart diagram met de jaargemiddelde concentratie totaal fosfor tracer (TP-tracer; weergegeven als grootte van de cirkel) en de relatieve bijdrage van de verschillende tracers aan deze gemiddelde concentratie (weergegeven met kleur) voor de periode 2014-2016. Bijdrages kleiner dan 5% zijn gegroepeerd in de cluster "Other rivers". Label codes en relatieve bijdrage (in %) staan beschreven in Appendix A, Tabel 5.

Tabel 3. De relatieve bijdrage (in %) van de verschillende totale fosfor (TP-tracer) tracers aan de assessment gebieden. Mars = Marsdiep; Eijer = Eijerlandse Gat; Vlie = Vlie; Born = Borndiep; Pink = Pinkegat; Zout = Zoutkamperlaag; Eila = Eilanderbalg; Lauw = Lauwer; Schi = Schild; Eems = Eems-Dollard. Bijdrages kleiner dan 5% zijn gegroepeerd in de cluster "Overige rivieren/bronnen". Volledige overzicht van relatieve bijdrage in Appendix A, Tabel 5.

Bron	Mars	Eijer	Vlie	Born	Pink	Zout	Eila	Lauw	Schi	Eems
Cleveringsluizen	-	-	-	-	6.8	26.2	21.5	16.2	10.6	-
Ems (DE)	-	-	-	-	-	-	-	14.2	22.7	66.6
Ijsselmeer West	36.1	17.5	16.0	14.0	11.3	8.5	8.3	7.4	6.6	-
Ijsselmeer Oost	28.8	20.5	32.5	33.8	25.5	18.0	17.0	14.4	12.5	-
Miedema	-	-	-	5.3	-	-	-	-	-	-
NL-Zuid	15.1	27.7	20.9	18.7	21.8	18.3	19.6	18.2	17.8	6.3
Overige rivieren/bronnen	8.5	5.8	12.8	11.7	15.0	12.5	15.9	13.1	13.6	21.4
Atlantische rivieren input	11.4	22.5	17.8	16.4	19.6	16.5	17.7	16.5	16.2	5.7
Noordzee rivieren input	-	6.1	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2.2 Per tracer

De verspreidingspatronen van de relatieve bijdrage van TP-tracers aan de totale concentratie tonen grote gelijkenissen met die van stikstof. Ook hier verschilt het per tracer of het een lokale en relatief kleine bijdrage heeft of een grotere bijdrage, o.a. regionaal, nationaal of internationaal (Figuur 21).

De relatief grotere bijdrages zijn afkomstig van het IJsselmeer West (Den Oever), IJsselmeer Oost (Kornwerderzand) en de Duitse rivier de Eems, welke net als TN-tracer een ruimtelijke verspreiding laten zien op regionaal niveau (Figuur 21). De relatief kleine lokale bijdrages zijn ook hier afkomstig van de lozingspunten Cleveringsluizen, Helsdeur, Miedema, Nieuw Statenzijl, Oostoever en Ropta (Figuur 21 en Figuur 37 in Appendix C).

Van buiten de Waddenzee zijn met name de zuidelijke Nederlandse rivieren en de Atlantische rivieren een belangrijke bron van fosfor. Ook voor fosfor is het

verspreidingspatroon van beide groeperingen een waarbij de tracers langs de Nederlandse kust naar het Noordoosten afbuigen en daarbij de Waddenzee in een zekere mate betreden.

Verschillen met stikstof tracer in de verspreiding van relatieve bijdrages aan het totaal zijn verwaarloosbaar, deels veroorzaakt door de conservatieve karakteristieken van het geheel. Een duidelijk verschil is de relatieve bijdrage van atmosferische depositie, deze depositie heeft voor TN-tracers een bijdrage van 4-10% aan de totale concentratie t.o.v. de verwaarloosbare bijdrages van atmosferische depositie voor fosfor tracers.

Figuur 21. Waddenzee kaart met relatieve bijdrage (in %) van de meest relevante rivier tracers aan de jaarlijkse gemiddelde (periode 2014-2016) totale fosfor (TP-tracer) concentratie. Figuren voor overige rivieren tracers in Appendix C, Figuur 37. TP_NL_Lake_IJssel_East = TP-tracer afkomstig van Kornwerderzand; TP_NL_Lake_IJssel_West = TP-tracer afkomstig van Den Oever; TP_NL_South = TP-tracer afkomstig van de Rijn, Maas en het Noordzeekanaal; TP_NL_Cleveringsluizen = TP-tracer afkomstig van Cleveringsluizen; TP_DE_Ems = TP-tracer afkomstig van de Eems rivier; TP_AtmDep = atmosferische depositie; TP_North_Sea = TP-tracer afkomstig van een selectie van rivieren uitmondend in de Noordzee; TP_Atlantic = TP-tracer afkomstig van Atlantische rivieren.

3.2.3 Jaarlijkse fluctuatie

De totale fosfor tracer massa in de verschillende gebieden vertoont, net als voor TN-tracer massa, twee over de tijd fluctuerende patronen. Een door rivier dynamiek afvoer gedomineerd patroon waarbij de totale massa sterkt fluctueert over het jaar voor Marsdiep (Figuur 22), Eems-Dollard (Figuur 24), het Vlie (Figuur 46 in Appendix D) en Borndiep (Figuur 51 in Appendix D), en een springtij gedreven patroon, gerelateerd aan de Noordzee dynamiek, in de fluctuaties van totale massa in het gebied, o.a. voor Pinkegat (Figuur 23; zie overige figuren in Appendix D).

Figuur 22. De totale massa van totaal fosfor (TP-tracer; in gram) voor het kombergingsgebied Marsdiep over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer (zie kleurencode in legenda).

Figuur 23. De totale massa van totaal fosfor (TP-tracer; in gram) voor het kombergingsgebied Pinkegat over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer (zie kleurencode in legenda).

Figuur 24. De totale massa van totaal fosfor (TP-tracer; in gram) voor het kombergingsgebied Eems-Dollard over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer (zie kleurencode in legenda).

4 Waterkwaliteitsmodelresultaten

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de ruimtelijke patronen (incl. metingen wanneer beschikbaar) van gemodelleerde waterkwaliteitsparameters over de periode 2014-2016 (gemiddeld):

- Wintergemiddelde anorganisch opgelost stikstof (Dissolved Inorganic Nitrogen; DIN)
- Wintergemiddelde totaal stikstof concentratie (TN)
- Wintergemiddelde anorganisch opgelost fosfor (Dissolved Inorganic Phosphorus; DIP)
- Wintergemiddelde totaal fosfor concentratie (TP)
- Groeiseizoen gemiddelde Chlorofyl-A (Chl-a) (maart-september)
- Groeiseizoen gemiddelde primaire productie (PP) (maart-september)

4.1 Nutriënten

De gemodelleerde anorganische stikstof (Figuur 25) en anorganische fosfor (Figuur 26) concentraties in de Waddenzee voor de jaren 2014-2016 laten vergelijkbare ruimtelijke patronen zien met tracers, respectievelijk totaal stikstof tracer (TN-tracer; Figuur 13) en totaal fosfor tracer (TP-tracer; Figuur 19). Voor de gemodelleerde totaal stikstofconcentratie (Figuur 27) geldt ook dat zeer vergelijkbare patronen, en waardes van de zelfde ordegrootte, worden gevonden t.o.v. de conservatieve TN-tracer (Figuur 13). Voor totaal fosfor zijn de patronen vergelijkbaar (Figuur 28) maar wijken de waardes wel sterk af van de conservatieve TP-tracer verspreiding (Figuur 19). Voor beide nutriënten geldt dat hogere concentraties worden gemodelleerd voor de kustwateren van Den Helder tot voorbij Harlingen en in de monding van de Eems rivier.

Figuur 25. Gemiddelde anorganisch stikstof (Dissolved Inorganic Nitrogen; DIN in gN/m^3) winter concentratie gemodelleerd voor de jaren 2014-2016 in de Waddenzee, cirkels zijn observaties gemiddeld over de zelfde periode.

Figuur 26. Gemiddelde anorganisch fosfaat (PO_4 in gP/m^3) winter concentratie gemodelleerd voor de jaren 2014-2016 in de Waddenzee, cirkels zijn observaties gemiddeld over de zelfde periode.

Figuur 27. Gemiddelde totaal stikstof (TotN in gN/m^3) winter concentratie gemodelleerd voor de jaren 2014-2016 in de Waddenzee.

Figuur 28. Gemiddelde totaal fosfor (TotP in gP/m^3) winter concentratie gemodelleerd voor de jaren 2014-2016 in de Waddenzee.

4.1.1 KRW-limieten

De gemiddelde gemodelleerde anorganische stikstof concentraties in de Waddenzee voor de jaren 2014-2016 overschrijden op meerdere plekken de streefwaardes genoemd in de KRW factsheets (Figuur 29-Figuur 30). De streefwaarde voor de Waddenzee, Waddenzee vastelandskust en Eems-Dollard (kustwater), vastgesteld op 0,46 mg N/L, wordt over vrijwel het hele gebied overschreden (Figuur 29). De Waddenzee vastelandskust (Appendix F; Figuur 56) overschrijdt op grote delen de waarde van 0,75 mg N/L. De Waddenzee (Appendix F; Figuur 57) zit voor het grootste deel tussen de drempelwaarde en 0,75 mg N/L en gedeeltelijk onder de drempelwaarde, rondom Vlieland en Terschelling. Rondom de Eems-Dollard is het model wat te grof in zijn resolutie om een exacte overschrijding vast te stellen maar zijn wel hoge waardes zichtbaar, mogelijk hoger dan 1,75 mg N/L (Figuur 30).

Figuur 29. Gebiedsindeling waarin de gemiddelde anorganisch stikstof (Dissolved Inorganic Nitrogen; DIN in gN/m^3) winter concentratie, gemodelleerd voor de jaren 2014-2016 in de Waddenzee, de KRW streefwaarde van 0,46 gN/m^3 overschrijdt. Daarnaast zijn de overschreden gebieden ingedeeld in drie groepen, met waardes van 0,46 t/m 0,75 gN/m^3, 0,75 t/m 2,5 gN/m^3 en hoger dan 2,5 gN/m^3.

Figuur 30. Gebiedsindeling waarin de gemiddelde anorganisch stikstof (Dissolved Inorganic Nitrogen; DIN in gN/m^3) winter concentratie, gemodelleerd voor de jaren 2014-2016 in de Eems-Dollard, de KRW streefwaarde van 1,33 gN/m^3 overschrijdt. Daarnaast zijn de overschreden gebieden ingedeeld in drie groepen, met waardes van 1,33 t/m 1,75 gN/m^3, 1,75 t/m 4,5 gN/m^3 en hoger dan 4,5 gN/m^3.

4.2 Chlorofyl-A en primaire productie

De chlorofyl-A concentratie, gemodelleerd (Figuur 31) en verkregen uit satelliet beelden (Figuur 32), en de primaire productie in de waterkolom (Figuur 33) voor de Waddenzee volgen een ruimtelijk patroon dat vergelijkbaar is met die van de verschillende nutriëntenconcentraties. Hogere chlorofyl-A-concentraties worden gemodelleerd en waargenomen nabij de opening van het IJsselmeer (west en oost), verder op de kust tot aan Harlingen en in de monding van de Eems rivier. De door satelliet verkregen chlorofyl-A-concentraties tonen ook dichter op de eilanden en meer op de platen nog hogere concentraties. Voor de chlorofyl-A concentraties boven de ondiepe delen is geen data beschikbaar om te vergelijken met of model of satellietbeelden, waardoor enige uitspraak over zekerheid en betrouwbaarheid lastig te maken is. Primaire productie vertoont vergelijkbare patronen met hogere waardes op de ondiepe delen nabij de kust, maar ook op enkele ondiepe delen verder in de Waddenzee.

Figuur 31. Gemiddelde chlorofyl-A concentratie gemodelleerd over de jaren 2014-2016 in de Waddenzee.

Figuur 32. Gemiddelde chlorofyl-A concentratie over de jaren 2015-2017 berekend aan de hand van satelliet beelden voor de Waddenzee. De satellietbeelden zijn gebaseerd op Sentinel 2 beelden met een resolutie van 300m of 1 km, afhankelijk van de locatie in de Waddenzee.

Figuur 33. Gemiddelde primaire productie (gC/m^2/dag) in het groeiseizoen gemodelleerd over de jaren 2014-2016 voor de Waddenzee.

5 Discussie

5.1 Betekenis voor nutriënten huishouding

De modelstudie geeft inzicht in de voornaamste bronnen van stikstof en fosfor in de Waddenzee en hoe deze zich ruimtelijk en over de tijd verhouden. De bronnen voor nutriënten in de Waddenzee variëren van lokaal tot aan ver over de grens reikend. Zo hebben bronnen als Miedema (voor Borndiep), Nieuw Statenzijl (voor Eems-Dollard) en Helsdeur (voor Marsdiep) een lokale invloed op het kombergingsgebied waaraan zij verbonden zijn. Voor bronnen als Cleveringsluizen, IJsselmeer (west en oost) en de Duitse Eems rivier geldt dat het verspreidingspatroon van de geloosde nutriënten verder reikt dan de dichtstbijzijnde komberging, vaak gaat het om 3 of meerdere kombergingsgebieden waarin zij een substantiële bijdrage leveren. Van buiten de Waddenzee zijn zowel de Nederlandse rivieren, de Rijn, Maas en het Noordzeekanaal, als de Atlantische rivieren van invloed op de nutriëntenhuishouding in de Waddenzee. Het verspreidingspatroon van de nutriënten afkomstig van deze bronnen is gerelateerd aan de herkenbare stroming langs de Nederlandse kust (Turrell et al., 1992; Queste et al., 2012), waarbij het ook de Waddenzee betreedt.

De verspreiding van nutriënten, zowel gemodelleerd met tracers als met waterkwaliteitsprocessen, lijkt een direct verband te hebben met de fytoplanktonhoeveelheden en -productie. De gebieden met hogere gemodelleerde winterconcentraties (DIN, PO_4, totaal N en totaal P), maar ook de jaargemiddelde concentraties TN-tracer en TP-tracer, corresponderen grotendeels met de gebieden waar ook hogere chlorofyl-A-concentraties en primaire productie worden gemodelleerd en/of waargenomen. Er lijkt dus een direct verband tussen lozingen van nutriënten en de groei van algen in de Waddenzee, een hypothese die verder onderzocht kan worden met gevoeligheidsanalyses (zie aanbevelingen). Enige nuance bij de correlatie tussen nutriëntenconcentraties en fytoplankton groei is dat de gemodelleerde fytoplanktonbiomassa (chlorofyl-A) op ondiepe platen, direct grenzend aan diepe geulen, mogelijk is overschat. Dit is het meest zichtbaar in de Eems-Dollard. Zo wordt in een studie van Brinkman & Jacobs (2023) een gemiddelde chlorofyl-A concentratie van 5-6 mg m^{-3} waargenomen in het Eems-Dollard estuarium.

5.1.1 KRW-limieten

De gemodelleerde anorganische stikstof concentraties laten, in vergelijking met KRW-limieten, een overschrijding zien over vrijwel de gehele Waddenzee en Eems-Dollard. De concentraties in de vastelandskust van de Waddenzee lijken ver van de limieten te zitten (boven de 0,75 mg N/L in veel gevallen) wat de urgentie van maatregelen benadrukt. Voor de Waddenzee lijken met enkele maatregelen al stappen gezet te kunnen worden, aangezien het gros van waardes tussen de drempelwaarde en 0,75 mg N/L zit.

5.2 Testen van mogelijk maatregelenpakket

De relatie tussen nutriëntenconcentratie en fytoplanktonhoeveelheden en -productie geven inzicht in het functioneren van het Waddenzee voedselweb. Te “hoge” waarden van deze parameters, welke op enkele plaatsen worden waargenomen, zijn schadelijk voor het voedselweb en ecosysteem, o.a. door hogere kans op zuurstofloosheid, meer aangroei van epifyten op zeegras, kans op schadelijke bloeien, etc. Met de kennis en inzichten opgedaan met o.a. deze studie is het mogelijk te onderzoeken waar kansen zijn om

nutriëntenconcentraties omlaag te brengen (in de Waddenzee), waar nutriëntenconcentraties op dit moment al relatief laag zijn en wat dat betekent voor de fytoplanktongroei (zie 5.1.1.). De studie levert een soort van ‘toolbox’ waarmee meer systematisch gezocht kan worden naar manieren om de te hoge waarden omlaag te brengen, bijv. kan hiermee onderzocht wat een reductie van de toestroom van nutriënten uit diverse aanvoerroutes doet voor de fytoplanktonhoeveelheden en -productie. Dit kan belangrijk zijn om bijvoorbeeld gebieden te zoeken die kansrijk zijn voor zeegrasherstel. De primaire productie wordt gezien als een van de drukfactoren die de aanwezigheid van (en aangroei van) zeegras tegengaat (van Katwijk et al., 2024). Door meer inzicht te krijgen in zogeheten “draaiknoppen”, is het mogelijk om gerichter beleid te maken.

5.3 Gevolgen en samenhang met klimaatverandering

Ook is het interessant om de gevolgen van klimaatverandering mee te nemen bij deze inzichten, bijvoorbeeld veranderingen in het spui-regime van het IJsselmeer (timing en hoeveelheid). Door zeespiegelstijging kan er een kleiner percentage van de tijd gespuid worden, het spuivenster wordt kleiner (Arcadis, 2022). Om tot een gelijk afvoervolume vanuit het IJsselmeer te komen, moeten de spuidebieten hoger zijn in de situatie met zeespiegelstijging en dat kan worden bereikt door de spuicapaciteit te vergroten en/of door de inzet van pompen. Aangezien klimaatverandering ook resulteert in een toename aan afvoer vanuit het IJsselmeer zullen de spuidebieten nog hoger worden.

Het IJsselmeer is op dit moment een van de grotere bronnen van nutriënten voor het westelijk deel van de Waddenzee. Een andere verdeling van het spuivolume voor Den Oever (IJsselmeer west) en Kornwerderzand (IJsselmeer oost), net als een toename in het volume, kan gevolgen hebben voor de vrachten stikstof en fosfor die de Waddenzee binnenkomen. Een verschuiving van de herkomst van IJsselmeerwater voor de Waddenzee van (nu) 55-45% uit Den Oever-Kornwerderzand naar (tegen 2050) 75-25% uit Den Oever-Kornwerderzand wordt verwacht (Arcadis, 2022). Dit kan gevolgen hebben voor de nutriënten die meekomen en de totale vrachten die de verschillende kombergingsgebieden ontvangen. Echter is het ook belangrijk om rekening te houden met dat nutriëntenconcentraties in het IJsselmeer op zichzelf afhankelijk zijn van bronnen die lozen op het IJsselmeer. Bij een verschuiving van mogelijke bronnen binnen het IJsselmeer (bijv. in hoeveelheid en timing) moeten deze ook meegenomen worden in deze analyse. Daarnaast is het ook belangrijk om de effecten op saliniteit van deze spui-volumes te analyseren om een idee te krijgen over ruimtelijke veranderingen in omgevingsfactoren van de Waddenzee (Jaksic et al., 2024). Deze modelstudie liet zien dat de locatie waar het zoete IJsselmeerwater naar de Waddenzee wordt afgevoerd een sterk effect heeft op de saliniteitsverdeling in de Waddenzee. De verschillende modelschematisaties samen leveren de ‘toolbox’ om de gevolgen van dit maatregelenpakket verder te onderzoeken.

5.4 Aanbevelingen

Met deze verkenning van de nutriëntenhuishouding van de Waddenzee, via een modelinstrumentarium, kan gericht gezocht worden naar een maatregelenpakket om het eutrofiëringsprobleem in de Waddenzee aan te pakken. Een verbetering van de waterkwaliteit is nodig om dit probleem tegen te gaan. Deze studie biedt de achtergrondinformatie en tools (het model is gereed) voor RWS om een maatregelenpakket op het gebied van nutriëntlozingen op te stellen (Program of Measures; PoM) en de gekozen scenario’s door te rekenen. Hierbij is belangrijk dat er niet alleen gekeken worden naar effecten op nutriënten en chlorofyl-A maar ook naar effecten op bijv. saliniteit (zoet-zout gradiënt; Jaksic et al., 2024), macrobenthos (KRW indicator) en bodemsamenstelling (sediment transport). Gevoeligheidsanalyses kunnen aantonen hoe de algen groei in de Waddenzee verband houdt met, en reageert op, nutriënten(reducties).

In een vervolgstudie zou het model uitgebreid kunnen worden om zo de verschillende effecten van bepalende factoren/indicatoren voor een goede waterkwaliteit en gezond ecosysteem mee te nemen in de scenario berekeningen. In een latere fase, wanneer hier meer duidelijkheid over is, kan een doorvertaling naar het voorkomen van benthische organismen en de bepalende factoren worden gedaan. voor veel benthische organismen in de Waddenzee worden saliniteit, nutriëntenbeschikbaarheid, voedselbeschikbaarheid, competitie, bodemsamenstelling en stroming gezien als bepalende factoren voor hun voorkomen. Een doorvertaling van modelscenario's en uitkomsten naar geschiktheid voor deze organismen in de toekomst zal inzichten op leveren over bijv. de verschuiving van ruimtelijke geschiktheid voor zeegras. Voor een dergelijke studie is het nodig om de huidige modelstudies op elkaar aan te laten sluiten. Voor een doorvertaling van de modelresultaten naar het effect van maatregelen op habitats/ecotopen zou de inzet van D-EcoImpact overwogen kunnen worden.

6 Referenties

Arcadis, (2022). Saliniteitseffecten gebruik Nieuwe spuimiddelen Afsluitdijk. Achtergrondrapport bij de natuuranalyse Levvel & Rijkswaterstaat. Referentie: D10053559:76 - Datum: 7 april 2022. Saliniteitseffecten

Brinkman, A.G., & Jacobs, P. (2023). Gross pelagic primary production in the Ems-Dollard estuary. Journal of Sea Research, volume 192, 102363. https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102362

van Beusekom, J. E. E., Bot, P., Carstensen, J., Grage, A., Kolbe, K., Lenhart, H. J., Pätsch, J., Petenati, T., & Rick, J. (2017). Eutrophication. In S. Kloepper, M. J. Baptist, A. Bostelmann, J. A. Busch, C. Buschbaum, L. Gutow, G. Janssen, K. Jensen, H. P. Jørgensen, F. Jong, G. Lüerßen, K. Schwarzer, R. Strempel, & D. Thieltges (Eds.), Wadden Sea quality status report. Common Wadden Sea Secretariat, 20 pp.

ICG-EMO (2021). European Daily riverine flow and nutrient database. doi: 10.25850/nioz/7b.b.vc

Informatiehuis Water (2024a). KRW-factsheet behorende bij de stroomgebiedbeheerplannen 2022-2027: Waterlichaam Waddenzee vastelandskust. Tussentijdse versie, bijgewerkt tot en met 4 september 2024, en behoeve van het opstellen van de stroomgebiedbeheerplannen na 2027 en de daaraan gerelateerde waterplannen.

Informatiehuis Water (2024b). KRW-factsheet behorende bij de stroomgebiedbeheerplannen 2022-2027: Waterlichaam Waddenzee. Tussentijdse versie, bijgewerkt tot en met 4 september 2024, en behoeve van het opstellen van de stroomgebiedbeheerplannen na 2027 en de daaraan gerelateerde waterplannen.

Informatiehuis Water (2024c). KRW-factsheet behorende bij de stroomgebiedbeheerplannen 2022-2027: Waterlichaam Eems-Dollard (kustwater). Tussentijdse versie, bijgewerkt tot en met 4 september 2024, en behoeve van het opstellen van de stroomgebiedbeheerplannen na 2027 en de daaraan gerelateerde waterplannen.

Informatiehuis Water (2024d). KRW-factsheet behorende bij de stroomgebiedbeheerplannen 2022-2027: Waterlichaam Eems-Dollard. Tussentijdse versie, bijgewerkt tot en met 4 september 2024, en behoeve van het opstellen van de stroomgebiedbeheerplannen na 2027 en de daaraan gerelateerde waterplannen.

Jaksic, L., Rienstra, J., Meijers, C., & Blauw, A. (2024). Invloed afvoerregimes IJsselmeer op saliniteit Waddenzee Modelstudie en voorzichtige doorvertaling naar ecologische effecten. Rapport Deltares 11209267-007, 13-06-2024. Invloed afvoerregimes IJsselmeer op saliniteit Waddenzee

van Katwijk, M. M., van Beusekom, J. E. E., Folmer, E. O., Kolbe, K., de Jong, D. J., & Dolch, T. (2024). Seagrass recovery trajectories and recovery potential in relation to nutrient reduction. Journal of Applied Ecology, 61, 1784–1804. https://doi.org/10.1111/1365-2664.14704

Lenhart, H.-J., Mills, D. K., Baretta-Bekker, H., van Leeuwen, S. M., van der Molen, J., Baretta, J. W., et al. (2010). Predicting the consequences of nutrient reduction on the

eutrophication status of the north Sea. J. Mar. Syst. 81, 148–170. doi: 10.1016/j.jmarsys.2009.12.014

Lenhart, H., A. Blauw, X. Desmit, L. Fernand, R. Friedland, B. Heyden, O. Kerimoglu, G. Lacroix, A. van der Linden, J. van der Molen, M. Plus, T. Prins, I. Ruvalcaba Baroni, T. Silva, C. Stegert, D. Thewes, T. Troost, L. Vilmin & S. van Leeuwen (2022). ICG-EMO report on model comparison for historical scenarios as basis to derive new threshold values. London, OSPAR, Publication Number: 895/2022, 66 pp.

Prins, T., Blauw, A., Vilmin, L., van der Heijden, L., Heye, S., and Buckman, L. (2023). Modelling of nutrient load scenarios and transboundary nutrient transport. A model study for OSPAR regions II, III and IV. Report for Rijkswaterstaat. Report ID: 11209731-000-ZKS-0003. https://kennisbank.deltares.nl/Details/fullCatalogue/300079208

Queste, B. & Fernand, L. & Jickells, T. & Heywood, K. (2012). Spatial extent and historical context of North Sea oxygen depletion in August 2010. Biogeochemistry. 113. 10.1007/s10533-012-9729-9.

Stolte, W., Vroom, J., Santinelli, G., Veenstra, J., Van Oeveren, C., Van Zelst, V. and Dijkstra, J. (2023). Digitale Systeemrapportage van de Waddenzee, versie 1.0. https://systeemrapportage.nl/wadden/

Turrell, W.R., Henderson, E.W., Slesser, G., Payne, R., & Adams, R.D. (1992). Seasonal changes in the circulation of the northern North Sea, Continental Shelf Research, Volume 12, Issues 2–3, Pages 257-286, https://doi.org/10.1016/0278-4343(92)90032-F.

van Leeuwen S.M., Lenhart H.-J., Prins T.C., Blauw A., Desmit X., Fernand L., Friedland R., Kerimoglu O, Lacroix G, van der Linden A, Lefebvre A, van der Molen J, Plus M, Ruvalcaba Baroni I, Silva T, Stegert C, Troost TA and Vilmin L (2023) Deriving pre-eutrophic conditions from an ensemble model approach for the NorthWest European seas. Front. Mar. Sci. 10:1129951. doi: 10.3389/fmars.2023.1129951

Zijl, F., T.D. Zijlker, S.C. Laan and J. Groenenboom (2023). 3D DCSM-FM: a sixth-generation model for the NW European Shelf : 2022 release. Delft, Deltares, Report 11208054-004-ZKS-0003, 68 pp

A Appendix A

Tabel 4. Totaal overzicht van relatieve bijdrages van TN-tracers voor alle gebieden met codenaam (gebruikt door het hele document) en bron beschrijving.

Codenaam	Bron	Marsdiep	Eijerlandse Gat	Vlie	Borndiep	Pinkegat	Zoutkamperlaag	Eilanderbalg	Lauwers	Schild	Eems-Dollard
NO3	Atmosferische depositie	4,0	6,4	5,8	6,9	7,9	7,5	8,8	8,9	8,5	4,3
TN_Atlantic	Atlantische rivieren	10,0	17,6	14,5	13,3	15,3	13,3	13,9	13,1	13,0	5,2
TN_BalticStraits	Baltische straat rivieren	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TN_DE_Ems	Eems rivier (DE)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,7	3,0	11,3	18,2	60,8
TN_DE_Weser_Elbe	Elbe & Weser rivier (DE)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TN_NL_Cleveringsluizen	Cleveringsluizen	0,0	0,0	0,0	0,5	5,3	21,1	16,9	12,9	8,5	2,4
TN_NL_DeDrieDelfzijl	De Drie Delfzijl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5
TN_NL_DeSchans	De Schans	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TN_NL_Dijkmanshuizen	Dijkmanshuizen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TN_NL_Duurswold	Duurswold	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	0,6	1,4
TN_NL_Eemskanaal	Eemskanaal	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6	0,9	2,2
TN_NL_Eierland	Eierland	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TN_NL_Fiemel	Fiemel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
TN_NL_Harlingen	Harlingen	0,3	0,2	0,8	0,8	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3	0,1
TN_NL_Helsdeur	Helsdeur	1,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,1
TN_NL_Krassekeet	Krassekeet	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TN_NL_Lake_Ijssel_East	Kornwerderzand (IJs. Oost)	25,3	16,0	26,5	27,5	20,0	14,5	13,4	11,5	10,0	3,5
TN_NL_Lake_Ijssel_West	Den Oever (IJs. West)	31,7	13,7	13,0	11,4	8,8	6,9	6,6	5,9	5,3	1,9
TN_NL_Miedema	Miedema	0,2	0,2	1,0	4,3	2,6	1,9	1,6	1,4	1,1	0,4
TN_NL_NieuwStatenzijl	Nieuw Statenzijl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6	1,0	3,6
TN_NL_Noordpolderzijl	Noordpolderzijl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	0,2	0,0
TN_NL_Oostoever	Oostoever	0,6	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
TN_NL_PrinsHendrik	Prins-Hendrik	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TN_NL_Ropta	Ropta	0,5	0,5	1,8	2,1	1,6	1,1	1,0	0,8	0,7	0,2
TN_NL_Rozema	Rozema	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,8
TN_NL_South	Zuidelijke rivieren NL (Rijn, Maas en Noordzeekanaal)	13,2	21,7	17,0	15,2	17,0	14,7	15,5	14,5	14,2	5,7
TN_NL_Spijksterpompen	Spijksterpompen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2
TN_NL_Zandkes	Zandkes	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TN_North_Sea	Overige Noordzee rivieren	2,7	4,8	3,8	3,4	3,8	3,3	3,4	3,2	3,1	1,2
TN_initial	Initiële veld	6,9	12,6	10,5	9,8	11,5	9,9	10,4	9,7	9,6	3,9
TN_offshore	Buiten modeldomein	2,9	5,3	4,4	4,1	4,8	4,1	4,2	3,9	3,9	1,5

Tabel 5. Totaal overzicht van relatieve bijdrages van alle TP-tracers voor alle gebieden met codenaam (gebruikt door het hele document) en bron beschrijving.

Codenaam	Bron	Marsdiep	Eijerlandse Gat	Vlie	Borndiep	Pinkegat	Zoutkamperlaag	Eilanderbalg	Lauwers	Schild	Eems-Dollard
TP_Atlantic	Atlantische rivieren	11,4	22,5	17,8	16,4	19,6	16,5	17,7	16,5	16,2	5,7
TP_AtmDep	Atmosferische depositie	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TP_BalticStraits	Baltische straat rivieren	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TP_DE_Ems	Eems rivier (DE)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,8	3,8	14,2	22,7	66,6
TP_DE_Weser_Elbe	Elbe & Weser rivier (DE)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TP_NL_Cleveringsluizen	Cleveringsluizen	0,0	0,0	0,0	0,6	6,8	26,2	21,5	16,2	10,6	2,6
TP_NL_DeDrieDelfzijl	De Drie Delfzijl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,5
TP_NL_DeSchans	De Schans	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TP_NL_Dijkmanshuizen	Dijkmanshuizen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TP_NL_Duurswold	Duurswold	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	0,7	1,6
TP_NL_Eemskanaal	Eemskanaal	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,7	1,1	2,4
TP_NL_Eierland	Eierland	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TP_NL_Fiemel	Fiemel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
TP_NL_Harlingen	Harlingen	0,3	0,3	1,0	1,0	0,7	0,5	0,5	0,4	0,3	0,1
TP_NL_Helsdeur	Helsdeur	1,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,1
TP_NL_Krassekeet	Krassekeet	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TP_NL_Lake_Ijssel_East	Kornwerderzand (IJs. Oost)	28,8	20,5	32,5	33,8	25,5	18,0	17,0	14,4	12,5	3,8
TP_NL_Lake_Ijssel_West	Den Oever (IJs. West)	36,1	17,5	16,0	14,0	11,3	8,5	8,3	7,4	6,6	2,1
TP_NL_Miedema	Miedema	0,2	0,3	1,2	5,3	3,3	2,3	2,0	1,7	1,4	0,4
TP_NL_NieuwStatenzijl	Nieuw Statenzijl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,8	1,2	4,0
TP_NL_Noordpolderzijl	Noordpolderzijl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	0,2	0,1
TP_NL_Oostoever	Oostoever	0,7	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
TP_NL_PrinsHendrik	Prins-Hendrik	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TP_NL_Ropta	Ropta	0,6	0,6	2,2	2,6	2,1	1,4	1,2	1,1	0,9	0,3
TP_NL_Rozema	Rozema	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,8
TP_NL_South	Zuidelijke rivieren NL (Rijn, Maas en Noordzeekanaal)	15,1	27,7	20,9	18,7	21,8	18,3	19,6	18,2	17,8	6,3
TP_NL_Spijksterpompen	Spijksterpompen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2
TP_NL_Zandkes	Zandkes	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TP_North_Sea	Overige Noordzee rivieren	3,1	6,1	4,7	4,2	4,9	4,1	4,3	4,0	3,9	1,3
TP_initial	Initiële veld	1,2	2,4	1,9	1,8	2,2	1,8	2,0	1,8	1,8	0,6
TP_offshore	Buiten modeldomein	0,5	1,0	0,8	0,7	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,2

B Appendix B

Figuur 34. De jaarlijks gemiddelde concentratie totale stikstof tracer (mg/L) over de verschillende assessment gebieden en de bijdrage van verschillende rivier tracer per concentratie voor de periode 2014-2016.

Figuur 35. De winter gemiddelde concentratie totale stikstof tracer (mg/L) over de verschillende assessment gebieden en de bijdrage van verschillende rivier tracer per concentratie voor de periode 2014-2016.

Figuur 36. De jaarlijks gemiddelde concentratie totale fosfor tracer (mg/L) over de verschillende assessment gebieden en de bijdrage van verschillende rivier tracer per concentratie voor de periode 2014-2016.

Figuur 37. De winter gemiddelde concentratie totale fosfor tracer (mg/L) over de verschillende assessment gebieden en de bijdrage van verschillende rivier tracer per concentratie voor de periode 2014-2016.

C Appendix C

Overige figuren van relatieve bijdrage aan de verspreiding van nutriënten (stikstof: Figuur 36; fosfor: Figuur 37). Voor alle bronnen, behalve de initiële en offshore bronnen, is een aangepaste kleurenschaal maximum gebruikt (10% i.p.v. 50%) om enige verspreidingspatronen van deze bronnen aan te kaarten.

Initieel en offshore

Baltische straat rivieren

Duitse Weser en Elbe rivier

De Drie Delftzijl

De Schans

Dijksmanhuizen

Duurswold

Eemskanaal

Eierland

Fiemel

Harlingen

Helsdeur

Krassekeet

Miedema

Nieuw Statenzijl

Noordpolderzijl

Oostoever

Prins-Hendrik

Ropta

Rozema

Figuur 38. Waddenzee kaart met relatieve bijdrage (in %) van de overige (minder "belangrijke" of relevante) rivier tracers aan de jaarlijkse gemiddelde (periode 2014-2016) totale stikstof concentratie.

Eierland

Fiemel

Harlingen

Helsdeur

Krassekeet

Miedema

Nieuw Statenzijl

Noordpolderzijl

Oostoever

Prins-Hendrik

Figuur 39. Waddenzee kaart met relatieve bijdrage (in %) van de overige (minder "belangrijke" of relevante) rivier tracers aan de jaarlijkse gemiddelde (periode 2014-2016) totale fosfor concentratie.

D Appendix D

Figuur 40. De totale massa van totaal stikstof tracer (TN-tracer; in gram) voor het Schild over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer.

Figuur 41. De totale massa van totaal stikstof tracer (TN-tracer; in gram) voor het Vlie over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer.

Figuur 42. De totale massa van totaal stikstof tracer (TN-tracer; in gram) voor het Zoutkamperlaag over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer.

Figuur 43. De totale massa van totaal stikstof tracer (TN-tracer; in gram) voor het Lauwers over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer.

Figuur 44. De totale massa van totaal stikstof tracer (TN-tracer; in gram) voor de Eilanderbalg over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer.

Figuur 45. De totale massa van totaal stikstof tracer (TN-tracer; in gram) voor het Eijerlandse Gat over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer.

Figuur 46. De totale massa van totaal stikstof tracer (TN-tracer; in gram) voor het Borndiep over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer.

Figuur 47. De totale massa van totaal fosfor tracer (TP-tracer; in gram) voor het Schild over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer.

Figuur 48. De totale massa van totaal fosfor tracer (TP-tracer; in gram) voor het Vlie over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer.

Figuur 49. De totale massa van totaal fosfor tracer (TP-tracer; in gram) voor het Zoutkamperlaag over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer.

Figuur 50. De totale massa van totaal fosfor tracer (TP-tracer; in gram) voor het Lauwers over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer.

Figuur 51. De totale massa van totaal fosfor tracer (TP-tracer; in gram) voor de Eilanderbalg over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer.

Figuur 52. De totale massa van totaal fosfor tracer (TP-tracer; in gram) voor het Eijerlandse Gat over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer.

Figuur 53. De totale massa van totaal fosfor tracer (TP-tracer; in gram) voor het Borndiep over de periode 2014-2016 en opgedeeld in bijdrage per tracer.

E Appendix E

Figuur 54. Gemiddelde totaal fosfor (TotP) winter concentratie gemodelleerd voor de jaren 2014-2016 in de Waddenzee. Kleurenschaal hetzelfde als de TP-tracer.

Figuur 55. De maandelijks gemiddelde temperatuur (in graden Celsius) en de maandelijks gemiddelde regenval (in mm) voor het KNMI station Groningen voor de periode 2014-2016.

F Appendix F

In deze appendix worden de deelgebieden voor de vier KRW waterlichamen beschreven in een kaart vorm (blauw gearceerd).

Figuur 56. Het deelgebied voor de KRW-doelen van de Waddenzee vastelandskust (blauw gearceerd).

Figuur 57. Het deelgebied voor de KRW-doelen van de Waddenzee (blauw gearceerd).

Figuur 58. Het deelgebied voor de KRW-doelen van het Eems-Dollard kustwater (blauw gearceerd).

Figuur 59. Het deelgebied voor de KRW-doelen van de Eems-Dollard (blauw gearceerd).

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