

PROGRAMMA **NAAR EEN
RIJKE WADDENZEE**



**Opkomende stoffen in de
Waddenzee**

Een verkennend modelonderzoek



Inhoudsopgave

OPKOMENDE STOFFEN IN DE WADDENZEE	4
Samenvatting	6
Dankzegging	6
1. INLEIDING	7
Algemeen	7
Dit project	7
Keuze voor modelstoffen	9
2. WERKWIJZE	10
Aanpak	10
Algemeen en keuze van het modelinstrument	10
Onderzoeksgebied	10
Opwerken van de datasets	11
Spuilocaties, gebiedsranden, meetlocaties	12
Diepte en droogvalduur	12
Waterbeweging	12
Aannames	15
Enkele technische data	15
3. ZOUTGEHALTES EN DE MODELAFREGELING	16
4. VERVERSINGSKARAKTERISTIEKEN	17
5. VERSPREIDING VAN DICLOFENAC EN CARBAMAZEPINE	21
Gebruikte data	21
Resultaat: verspreiding van diclofenac en carbamazepine in de Waddenzee	23
6. MOGELIJKE EFFECTEN OP HET ECOSYSTEEM	25
Algemeen	25
Literatuuronderzoek	25
Cumulatieve effecten	26

7.	HET GEBRUIKTE ECOWASP-MODEL _____	29
	Troebelheid	30
	Uitkomsten	31
8.	DISCUSSIE EN NAWOORD: VOORZICHTIGHEID GEBODEN _____	34
	Algemeen	34
	Tot slot enkele aanbevelingen.	35
9.	REFERENTIES _____	36

Opkomende stoffen in de Waddenzee



Datum: 24 juni 2020

Auteurs:

Brinkman AG

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de verdeling van twee medicijnen in de Waddenzee: diclofenac en carbamazepine, als voorbeeld van wat “opkomende” stoffen wordt genoemd: een verzameling van vele duizenden natuurvreemde stoffen die de mens op de een of andere manier in het oppervlaktewater brengt. Het rapport brengt ook een eerste verkenning van de effecten van deze stoffen op het ecosysteem in kaart.

Het eerste deel is gebaseerd op berekende toevoeren van beide stoffen. Deze toevoeren volgen in de eerste plaats uit de brede Europese studie (“Solutions”) naar de stromen van deze en honderden andere milieuvreemde stoffen, plus uit een verdere opwerking en precisering van die stofstromen in het Nederlandse oppervlaktewater door Deltares. De uitkomsten daarvan werden ter beschikking gesteld voor dit verkennend modelonderzoek.

Vervolgens is met een eenvoudig model de verspreiding van beide stoffen in de Waddenzee berekend, waarbij de waterbewegingen gebaseerd zijn op gemeten zoutgehaltes. Geconcludeerd kan worden dat de berekende verspreiding van diclofenac en carbamazepine de werkelijke verspreiding redelijk lijkt te benaderen (namelijk ruim binnen een factor 10). Gezien alle onzekerheden die kleven aan de invoerdata en het verspreidingsmodel is een grotere nauwkeurigheid ook niet te verwachten.

Eveneens is geanalyseerd hoe snel water in verschillende delen van de Waddenzee ververscht wordt, als maat voor de snelheid waarmee verontreinigende stoffen het gebied verlaten. Dit blijkt soms erg lang te kunnen duren: meer dan 30 dagen in relatieve uithoeken als de Dollard of het gebied bij Kornwerderzand. Maar ook bij locaties dicht bij de Noordzee zijn verversingstijden berekend die verrassend lang zijn (meer dan 20 dagen).

In het laatste deel van de rapportage is een poging gedaan om de effecten van een veelvoud aan milieuvreemde stoffen op het ecosysteem in kaart te brengen met een modelberekening. Het is bedoeld om te laten zien hoe die gecumuleerde effecten inzichtelijk gemaakt kunnen worden, meer dan dat een werkelijk kwantitatieve indicatie van de effecten ervan op het ecosysteem gegeven is. De resultaten van deze berekeningen naar cumulatieve effecten van een fictief aantal milieuvreemde stoffen moeten daarom met de grootst mogelijke voorzichtigheid worden bekeken: de gebruikte effecten per eenheid vreemde stof is niet meer dan een veronderstelling. Ook behoeft de modelafregeling nog verbetering; dit is bij de discussie nader toegelicht.

Wat deze inleidende studie wel aangeeft is dat de effecten van de onderzochte stoffen *apart* minimaal is, en niet meetbaar noch zichtbaar met een modelberekening, maar dat het cumulatieve effecten van de vele stoffen tezamen wel een negatief effect op het ecosysteem van de Waddenzee zou kunnen hebben. Onderzoek naar, en modellering van, mogelijke cumulatieve effecten vraagt echter om meer ecotoxicologische expertise dan hier is gebruikt.

Dankzegging

Allereerst gaat dank uit naar Jos van Gils (Deltares) voor het beschikbaar stellen van carbamazepine- en diclofenac-data in de toevoeren naar de Waddenzee en Noordzeekustzone. Daarnaast naar medewerkers van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, het Wetterskip Fryslân, en de waterschappen Noorderzijlvest en Hunze en Aa's voor het aanleveren van zoetwaterspuidata. In beperkte mate is gebruik gemaakt van eerdere projectdata. Tot slot: de eerdere concepttekst is van commentaar en suggesties voorzien door Hein Sas en Ingrid van Beek.

1. Inleiding

Algemeen

Dit rapport beschrijft de verspreiding van twee medicijnen in de Waddenzee, als voorbeeld van wat “opkomende” stoffen wordt genoemd: een verzameling van vele duizenden natuurvreemde stoffen die de mens op de een of andere manier in het oppervlaktewater brengt. Dit kunnen (onder meer) medicijnen zijn, pesticiden, hulpstoffen, reststoffen van industriële processen maar ook bijvoorbeeld verzorgingsproducten. Ze worden door Leerdam et al (2018) gedefinieerd als “nieuw aangetroffen verontreinigingen, waar nog geen wettelijke norm voor bestaat”. Vaak hebben deze stoffen een PNEC-waarde: de concentratie die de grens aangeeft waaronder geen nadelige effecten aan een ecosysteem worden gemeten (Greenfacts, 2019). Het gaat in totaal om enige duizenden stoffen, van zeer verschillende aard, functie en manieren van lozing op het oppervlaktewater (Van Gils et al, 2020).

Blootstelling aan een chemische stof kan gevaarlijk zijn, de lengte van blootstelling is hierin belangrijk. Acute blootstelling is een kort contact met een chemische stof en chronische blootstelling is continu of herhaald contact met een giftige stof gedurende een lange periode.

Per jaar worden ongeveer 140 ton medicijnresten geloosd in het oppervlaktewater, waarvan 95% in het rioolwater terecht komt via het menselijk lichaam. Medicijnresten kunnen een negatief effect hebben op organismen in het oppervlaktewater en op de bereiding van drinkwater, pijnstillers kunnen weefselschade bij vissen veroorzaken, anticonceptiemiddelen kunnen geslachtsverandering bij vissen tot gevolg hebben en antidepressiva beïnvloeden mogelijk het gedrag van kleine waterkreeftjes en vissen. Antibiotica-ophoping in organismen kan tot resistentie aanleiding geven, zie ook RIVM (2020).

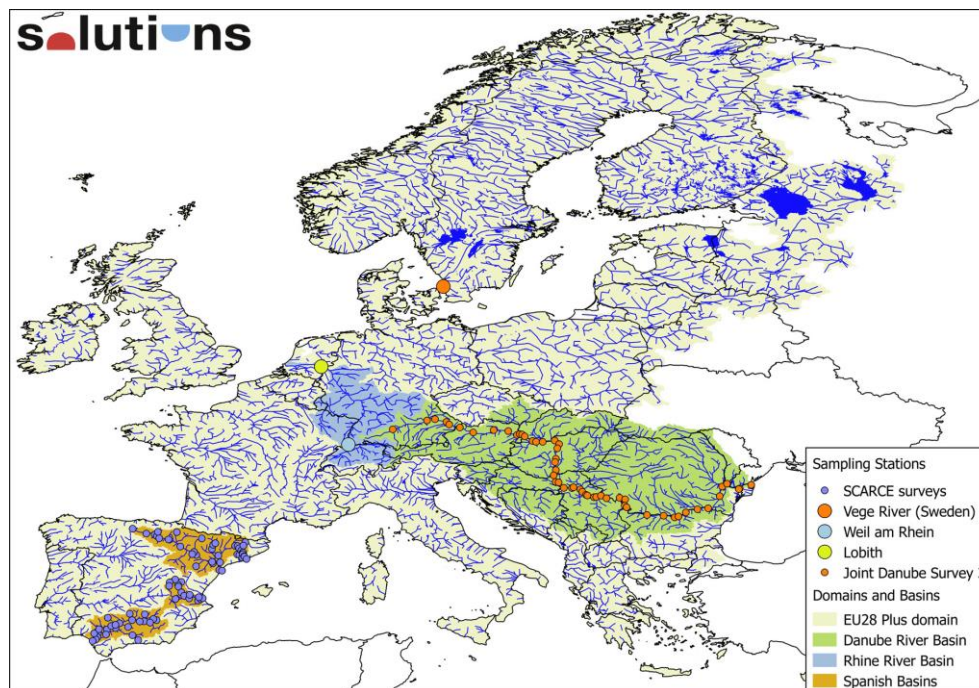
Er wordt verwacht dat de lozing van dergelijke stoffen in de toekomst toeneemt, (onder meer) een gevolg van de vergrijzing van de samenleving, en daarmee het risico op toenemende effecten op het ecosysteem en/of de mens. Zie ook Moermond et al (2019) over het nut van normstelling.

Dit project

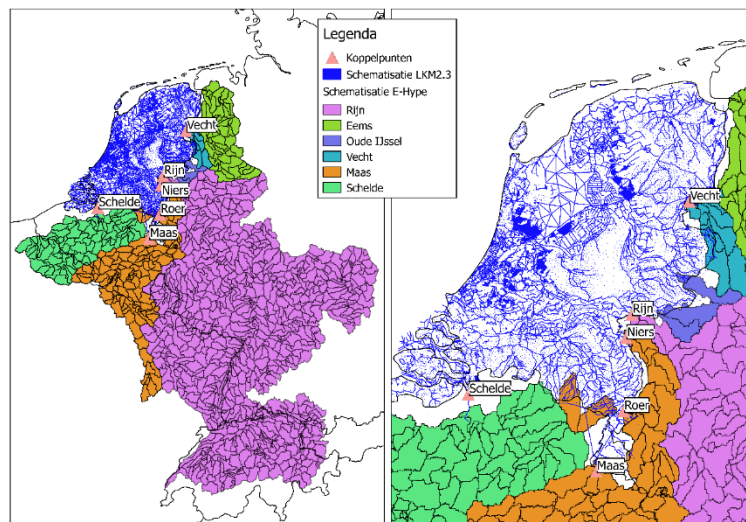
Het project is mogelijk geworden omdat in EU-verband (het project “Solutions”) recentelijk onderzoek is gedaan naar het voorkomen van een groot aantal door mensen geproduceerde stoffen in het oppervlaktewater in Europa. Zie Posthuma et al (2019), Solutions (2020) en Van Gils et al (2020). In Figuur 1 is weergegeven welk gebied het project omvat. Bij het project zijn alleen zoetwatergebieden betrokken.

Het Programma naar een Rijke Waddenzee is zich ervan bewust dat het voorkomen van dergelijke stoffen ook in het zoute water een rol kan spelen en mogelijk effecten kan hebben op het ecosysteem, en is daarom gestart met dit verkennende Waddenzee-onderzoek. Hierbij speelt ook dat, als een vervolg op het Europese Solutionsproject, Deltares een verfijning heeft uitgewerkt voor de Nederlandse situatie. Nederland is een buitenbeen binnen Europa omdat in tegenstelling tot wat gangbaar is, water niet per se van hoog naar laag stroomt. Dat houdt in dat, om een verspreiding binnen Nederland in kaart te brengen, ook allerlei pompgegevens moeten worden gebruikt. De verfijning die Deltares (Van Gils, 2018) heeft bereikt is in Figuur 2 weergegeven. Een aantal toevoeren naar de Waddenzee is hierbij in kaart gebracht, en gegevens over deze toevoeren zijn gebruikt voor het huidige project.

Niet alleen de verspreiding van beide medicijnen in het waddengebied is berekend, maar ook is een schatting gemaakt van de verdunningssnelheid van Waddenzeewater, en is een eerste aanzet gegeven om iets te zeggen over de mogelijke effecten op het ecosysteem. Dit laatste is niet meer dan een ruwe benadering waarbij ook bedacht wordt dat het mogelijk zo is dat elke van deze “opkomende” stoffen apart nauwelijks effecten laten zien, maar dat het grote



Figuur 1 Het Solutions-project (fig.1 uit Van Gils et al, 2020). Het gebied dat het project omvat en waarvoor stofstromen zijn berekend is lichtgekleurd weergegeven ("EU28 -plus domein") Een aantal gebieden is donkerder aangegeven: voor deze gebieden is in het betreffende artikel een stofstroomanalyse beschreven.



Figuur 2 Verspreidingsroutes binnen het stroomgebied van Rijn Maas en Schelde en de verfijning binnen Nederland. Naar: Van Gils, 2018.

aantallen verschillende stoffen betreft waardoor het niet ondenkbaar is dat alle samen wel degelijk invloed hebben op het functioneren van het ecosysteem: het cumulatieve effect moet niet uit het oog worden verloren. Zie bijvoorbeeld Ferrari et al (2003^{a,b}) waarin gesteld wordt dat het cumulatieve effect en/of de accumulatie van toxische stoffen bij onderzoek nog wel eens genegeerd wordt.

Keuze voor modelstoffen

Uit het grote aantal stoffen dat in het Solutions-project, en ook in de verfijning door Deltares, voorkomt is een tweetal stoffen gekozen om in dit onderzoek te bekijken: diclofenac (een pijnstillert) en carbamazepine (een anti-epilepticum). De keuze voor deze twee stoffen is deels een pragmatische: op het moment van de keuze waren van deze twee de meest uitgebreide data beschikbaar. Daarnaast geldt ook dat diclofenac als werkzame stof in verschillende pijnstillers vrij verkrijgbaar is en veel gebruikt wordt, en dat carbamazepine mogelijk een interessante indicator stof is om effectmetingen mee te doen (A. van Wezel, pers. comm.).

2. Werkwijze

Aanpak

Er liggen drie vragen voor: hoe is de verdeling van beide doelstoffen over de Waddenzee, hoe snel wordt gespuid zoet water in de Waddenzee getransporteerd naar de Noordzee (dus: geef een idee van de verversingssnelheid), en, als laatste, geef een idee hoe effecten op het ecosysteem in kaart (zouden) kunnen worden gebracht.

Om deze vragen te beantwoorden is in de eerste plaats een modelinstrument nodig waarmee de waterverdeling over het gebied berekend kan worden, én waarmee een aantal ecosysteemprocessen kan worden doorgerekend. In de tweede plaats moeten alle toevoeren bekend zijn (hoeveel zoet water wordt waar gespuid in de Waddenzee, het liefst per dag), en hoeveel diclofenac en carbamazepine bevat dat water. Ten derde moeten -voor het ecosysteemmodel- ook allerlei nutriënt- en temperatuurdata beschikbaar zijn. Tenslotte, om de rekenresultaten te testen moet zoveel mogelijk vergelijkingsmateriaal beschikbaar zijn.

Hierbij wordt zoveel mogelijk van bestaande modellen, kennis en data uitgegaan.

Algemeen en keuze van het modelinstrument

Om de verspreiding van deze stoffen in de Waddenzee in kaart te brengen is gekozen voor de modelbenadering die ook in het ecosysteemmodel EcoWasp wordt toegepast (Brinkman, 1993; Brinkman & Smit, 1993). Dit ligt niet per se voor de hand: wat de waterdeling betreft is het een erg eenvoudig model waar veel complexere en betere waterverdelingsmodellen beschikbaar zijn: Delft3D (Deltares, 2020), GET/GOTM (Burchard & Bolding, 2003; Tiesen et al, 2012, Duran Mutate et al, 2014). Echter, deze laatste modellen vergen veel meer voorbereidings- en rekentijd, en voor het doel (een eerste studie) werd het EcoWasp-model toereikend geacht. Daarnaast is het wat de ecologische invulling betreft operationeel en wél redelijk uitgebreid.

De waterverdeling binnen het Waddenzeesysteem is, als een gemiddelde, afgeregeld op zoutgehaltes in het gebied. Bij die afregeling wordt met de variërende toevoer van zoetwater rekening gehouden. Vervolgens zijn de toevoergegevens van beide doelstoffen aan het geheel toegevoegd waardoor de gehalten aan elk van die stoffen in de Waddenzee berekend kunnen worden.

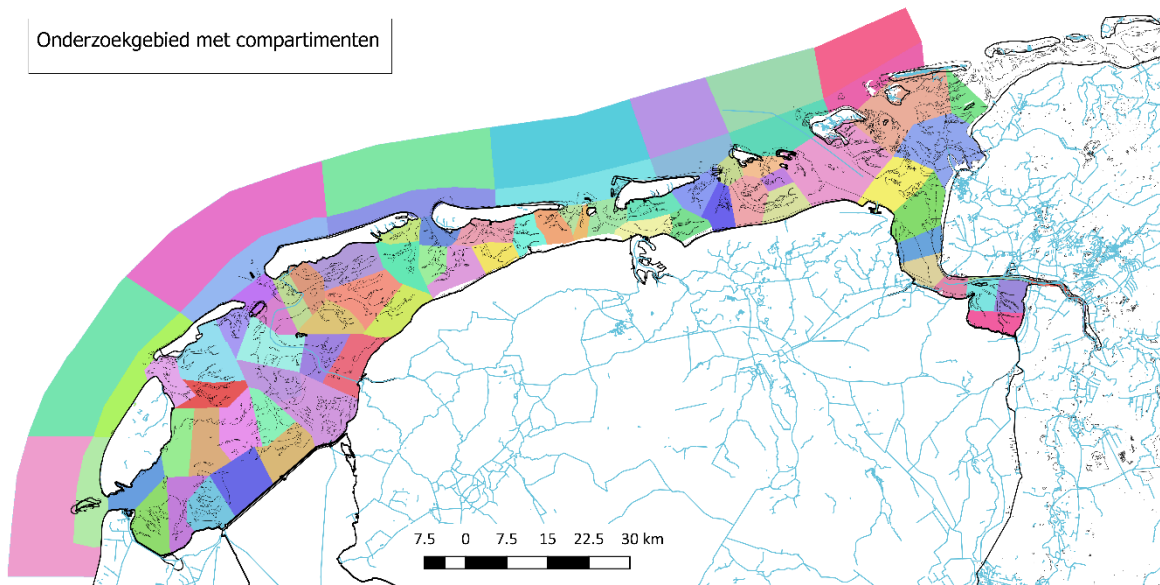
Voor de berekeningen aan ecologische effecten van diclofenac en carbamazepine is als basis uitgegaan van al eerder uitgevoerde modellering in de westelijke Nederlandse Waddenzee (Brinkman, 2015) en in het Eems-Dollardgebied (Brinkman & Tamis, 2018).

Onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied is weergegeven in Figuur 3, met de compartimenten waarin het onderverdeeld is. Dit is inclusief een deel van de Noordzeekustzone. Het model wordt ook wel een “bakjesmodel” genoemd; het waarom is uit deze figuur duidelijk. Dat de Noordzeekuststrook als onderdeel van het simulatiegebied is meegenomen is om te voorkomen dat de condities aan de rand van het eigenlijke Waddengebied volledig bepaald worden door de toestand op de Noordzee, terwijl de condities in deze kuststrook wel degelijk mede bepaald worden door wat er in de Waddenzee gebeurt. De grootte van deze bufferzone is gekozen na een ruwe berekening van het volume in die kustzone (oppervlak * gemiddelde diepte) dat elke keer bij laag water wordt ‘gevuld’ met Waddenzeewater.

De instroom van zoetwater, de waterstromen van het ene compartiment naar het andere plus de uitwisseling (dispersie) tussen de compartimenten zorgen voor het transport van opgeloste stoffen door het gebied.

Onderzoekgebied met compartimenten



Figuur 3 Indeling van de Waddenzee en Noordzeekustzone in een 80-tal compartimenten. Tussen de Noordzee-compartimenten en de verdere Noordzee vindt uitwisseling van water (en stoffen) plaats. Tussen de vakken onderling vindt ook uitwisseling plaats; toegevoerd zoet water verdeelt zich over de compartimenten.

Opwerken van de datasets

Voordat de berekeningen kunnen gebeuren moest eerst een (groot) aantal datasets worden opgewerkt. Voor al de toevoeren naar de Waddenzee, vanaf Den Helder tot aan de Eems, moeten geschikte gegevens beschikbaar zijn over de hoeveelheden water die elke dag/week/maand de Waddenzee in stromen, én over de hoeveelheden diclofenac en carbamazepine die dat water bevat. Omdat als tweede onderwerp ook mogelijke effecten op het ecosysteem gemodelleerd zijn, moeten ook de gehalten aan nutriënten bekend zijn.

Ten eerste de *watertoevoer*. Er zijn vier verschillende waterschappen die polder- en kanaalwater spuien op de Waddenzee: Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, Wetterskip Fryslân, en de waterschappen Noorderzijlvest en Hunze en Aa's. Daarnaast wordt er gespuid vanuit het IJsselmeer, wat Rijkswater is en waarbij het databeheer bij Rijkswaterstaat berust, en de Duitse toevoeren Eems en een aantal kanalen vanuit Ost-Friesland waarbij het beheer in handen is van het Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Tenslotte vindt uitwisseling plaats met de Noordzee als gevolg van de getijdestromingen.

Voor de waterdebieten –de hoeveelheid water die per tijdseenheid gespuid wordt– zijn door de genoemde instanties gegevens aangeleverd, dan wel –waar nodig– geschat op basis van neerslag- en verdampingsdata van het KNMI (KNMI, 2020); analoog aan Brinkman & Tamis (2018). Ook zijn gehalten aan nutriënten of geleverd door de verschillende instanties, of geschat aan de hand van vergelijkbare situaties. Het zou beter en eenvoudiger zijn geweest als alle nutriëntdata ook helemaal origineel zouden zijn geweest, maar omdat dit een verkenning is, is het iets minder noodzakelijk.

Ten tweede de gehalten aan diclofenac en carbamazepine. Deltares (Van Gils et al, 2019; Deltares, 2020^a) leverde gegevens over vrachten van de medicijnen voor vier kwartalen gedurende één jaar, inclusief de kwartaaldebieten die daarbij aan de orde waren. De data betreffen een deel van de spuilocaties zelf. Omdat niet van alle locaties data bekend zijn, zijn de lozingen van de overige locaties in een aantal restgetallen samengevat: voor Noord-Holland, Friesland en Groningen (Eems-Dollardgebied) elk een waarde. Omdat $\text{gehalte (g m}^{-3}\text{)} \times \text{debiet (m}^3 \text{dag}^{-1}\text{)} = \text{vracht (g dag}^{-1}\text{)}$, kon uit beide data ook eenvoudig berekend worden wat de gehalten aan de geneesmiddelen waren, voor elk van de vier kwartalen. De aangeleverde data gelden voor één jaar, maar aangenomen is dat die hoeveelheden voor alle

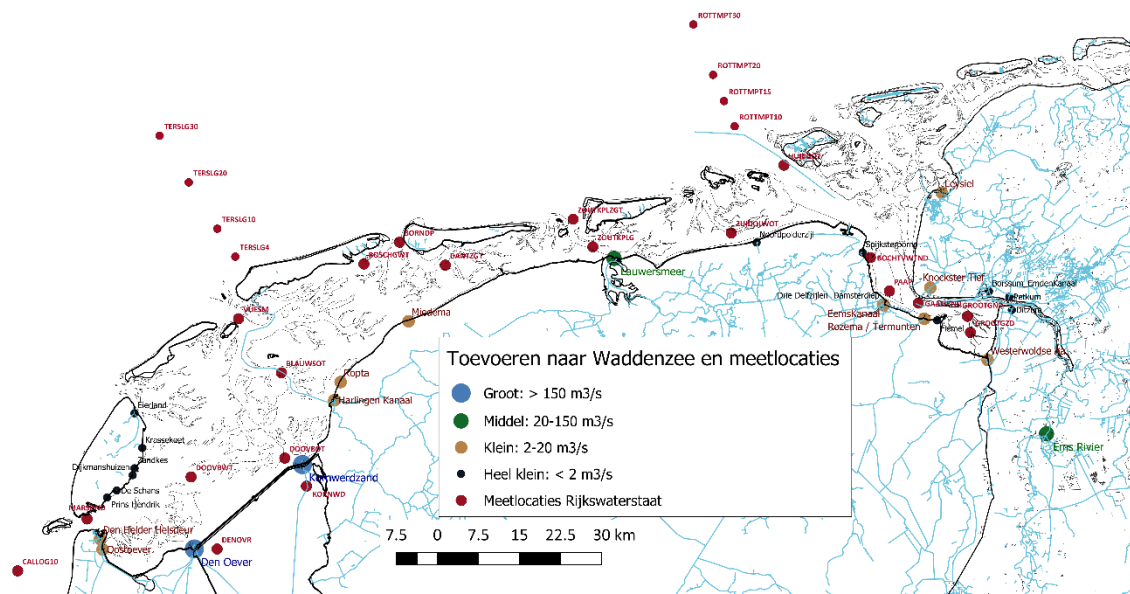
jaren waarvoor de berekening is uitgevoerd hetzelfde zijn geweest. Dat leverde – met debieten voor die andere jaren – steeds andere schattingen op voor de gehalten gedurende de kwartalen van de andere jaren.

Voor de gehalten diclofenac en carbamazepine zijn nauwelijks meetdata van toevoerlocaties beschikbaar die betrekking hebben op dit onderzoeksgebied; alleen voor het IJsselmeer bestaat een meetreeks. Die is verderop getoond.

Spuilocaties, gebiedsranden, meetlocaties

Figuur 4 zijn alle watertoevoeren getoond, én de meetlocaties van Rijkswaterstaat waarvoor zoutmetingen beschikbaar zijn. Van de toestromen zijn de gemiddelde groottes aangegeven. De verschillen daarin zijn groot: de spuilocaties vanuit het IJsselmeer spuien gemiddeld over het hele jaar samen meer dan $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, en sommige gemalen zoals in het noorden van Groningen minder dan $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

De buitenranden, die dus deel uitmaken van de Noordzeekustzone, horen ook bij het model. Daar vindt uitwisseling plaats met het omringende Noordzeewater.



Figuur 4 Toevoeren naar de Waddenzee en meetlocaties van Rijkswaterstaat in de Waddenzee en de Noordzeekustzone.

Diepte en droogvalduur

Een van de belangrijke karakteristieken van het gebied is de diepte, en vooral ook de droogvaltijd van de platen. Deze droogvalduur is voor deze studie berekend op basis van deze dieptedata ((Figuur 5, bron: RWS, Deltares) en getijdendata die beschikbaar zijn voor een aantal stations in de gehele Waddenzee, zie Figuur 6. Hierin is ook voor enkele locaties aangegeven welke droogvaltijden bij welke plaathoogtes horen. In Figuur 7 is weergegeven wat de aldus berekende droogvalduur van de wadplaten in het gebied is.

Waterbeweging

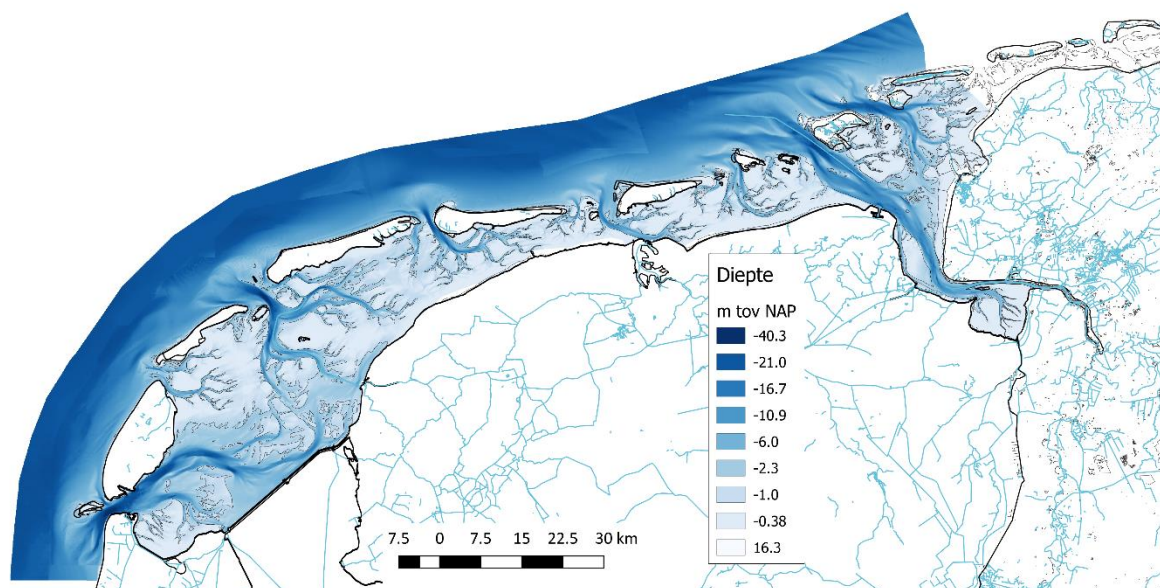
De waterbeweging en de uitwisseling tussen de compartimenten (de “bakjes”) onderling is vastgesteld aan de hand van een aantal literatuurgegevens en van gemeten zoutgehalten.

Er is al vaker gerekend aan de waterverdeling in de Waddenzee. Dat gebeurt normaliter met een fijnmazig model, niet met de 80 vakken die dit model kent, maar met een waarbij vele duizenden cellen worden onderscheiden. Op basis van wind- en getijdendata plus dieptegegevens worden dan de waterstromingen berekend.

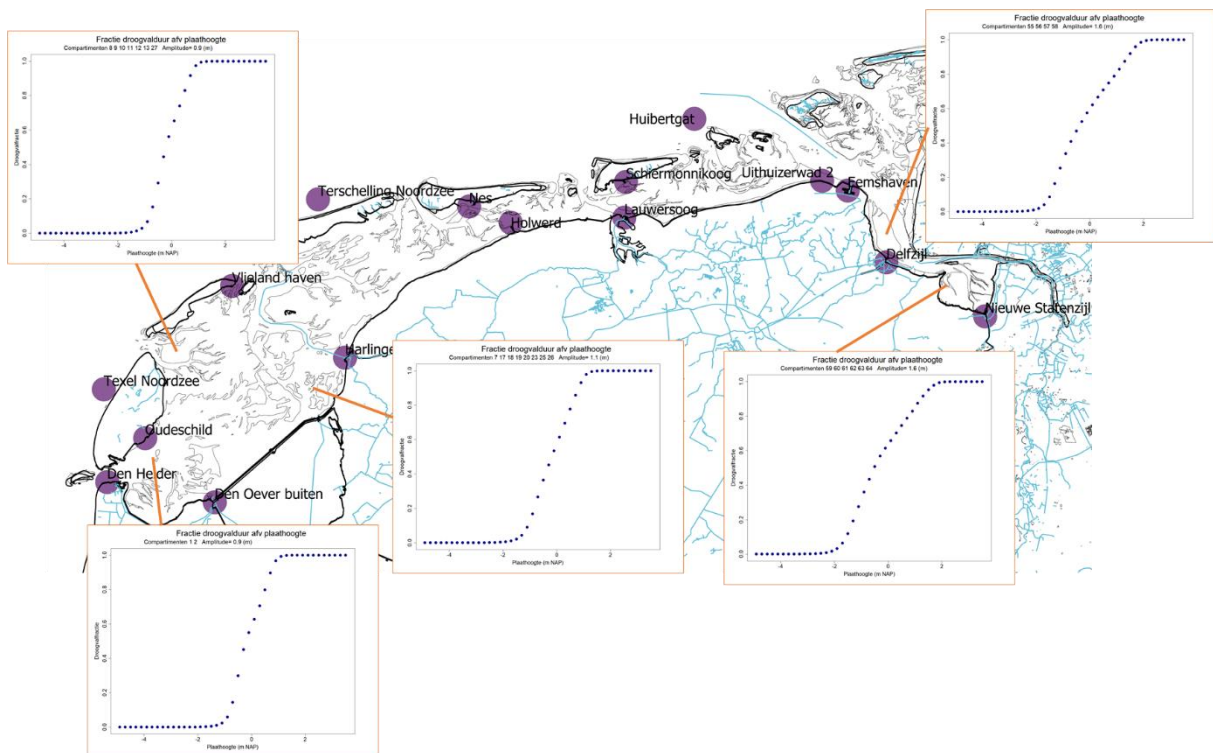
Een van de uitkomsten van Ridderinkhof (1990) was dat er in het westelijke deel van de Waddenzee een reststroom is waarbij er gemiddeld steeds water door het Vlie (tussen Vlieland en Terschelling) het gebied binnenkomt, en die door het Marsdiep (tussen Den Helder en Texel) het gebied weer verlaat. Ook gaf hij aan dat er een klein deel via het wantij van Terschelling oostwaarts stroomt. Meer recent is een studie door Duran Mutate et al (2014) uitgevoerd, waarbij om te beginnen de conclusie van Ridderinkhof op hoofdzaak bevestigd werd (al zijn de getallen wat anders). Daarnaast werd geconcludeerd dat zelfs een deel van het zoete water dat bij Den Oever op de Waddenzee gespuid wordt door het Vlie de Waddenzee verlaat. Het zoete water dat bij Kornwerderzand gespuid wordt blijft voor het allergrootste deel in het Vliebekken, en stroomt maar voor een klein deel via het Marsdiep naar de Noordzee. Het allergrootste deel verlaat de westelijke Waddenzee via het Vlie, én via het Terschellinger wantij. Dat laatste is er de oorzaak van dat de meetpunten onder Ameland soms aanzienlijk zoeter zijn dan verwacht (er wordt in dat deel van het gebied nauwelijks zoet water gespuid; het Miedema-gemaal is relatief klein). Eén belangrijke reden van die oostwaartse richting is dat zoetwaterspui vooral bij laag water plaats vindt, waarna de vloed het zoete water (gemiddeld) oostwaarts duwt; een andere is de (gemiddeld) overheersende zuidwestenwind.

Ook blijft het zoete water lang 'hangen' in de Waddenzee. Op basis van de getijdeslag (het verschil tussen hoog- en laagwater van ongeveer 1.6 m) en de gemiddelde waterdiepte van 3 à 4 m zou gedacht kunnen worden dat na enkele getijden al het Waddenzee-water ververs is. Dit is niet het geval: in 'uithoeken' van het gebied, zoals bij Kornwerderzand, kan het lang duren voordat het water ververs is. Dit komt mede doordat een aanzienlijk deel van het water dat bij eb de Waddenzee verlaat bij vloed gewoon weer terug het gebied instroomt. In sectie 4 is dit wat verder toegelicht.

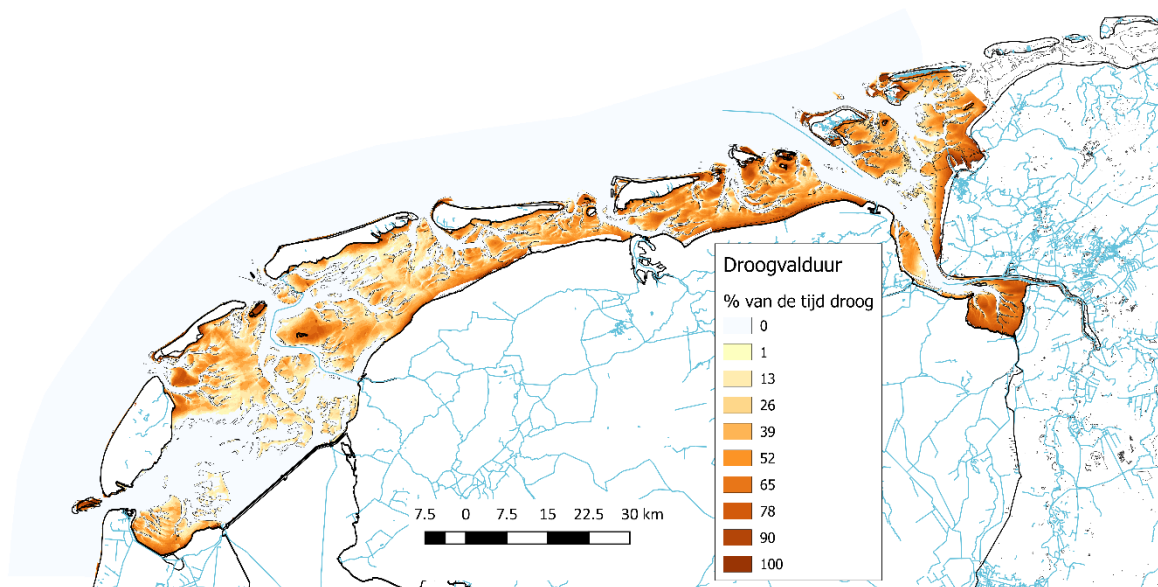
De uitwisseling met de Noordzee is bij dit alles van belang, zij het dat het verschil in zoutgehaltes tussen de Noordzee en de compartimenten in de kustzone niet zo groot is. Voor het zoutgehalte aan de zuidwestkant ("Callantsoog", zie Figuur 4) zijn geen recente gegevens beschikbaar, maar dit is berekend door oude gegevens te vergelijken met die bij Noordwijk (waarvoor wel complete datareeksen beschikbaar zijn). Zo kon ook voor de huidige situatie bij Callantsoog het zout- (en nutriënt-)gehalte geschat worden.



Figuur 5 Diepte van het onderzoeksgebied. Bron: RWS en (voor Eems-Dollard) Deltares (zie Brinkman & Tamis, 2018).



Figuur 6 Locaties waarvoor getijdendata beschikbaar zijn. Voor enkele delen van de Waddenzee is aangegeven welke droogvaltijden (gemiddeld over langere tijd) horen bij elke plaathoogte.



Figuur 7 Droogvalduur van de wadplaten. Bron van diepte: Waddenzee: RWS. Voor Eems-Dollard: mede Deltares (zie ook Brinkman & Tamis, 2018). Bron van getijdenkarakteristieken voor diverse locatie in de Waddenzee: RWS. Zie Figuur 6 voor locaties getijdenstations.

Aannames

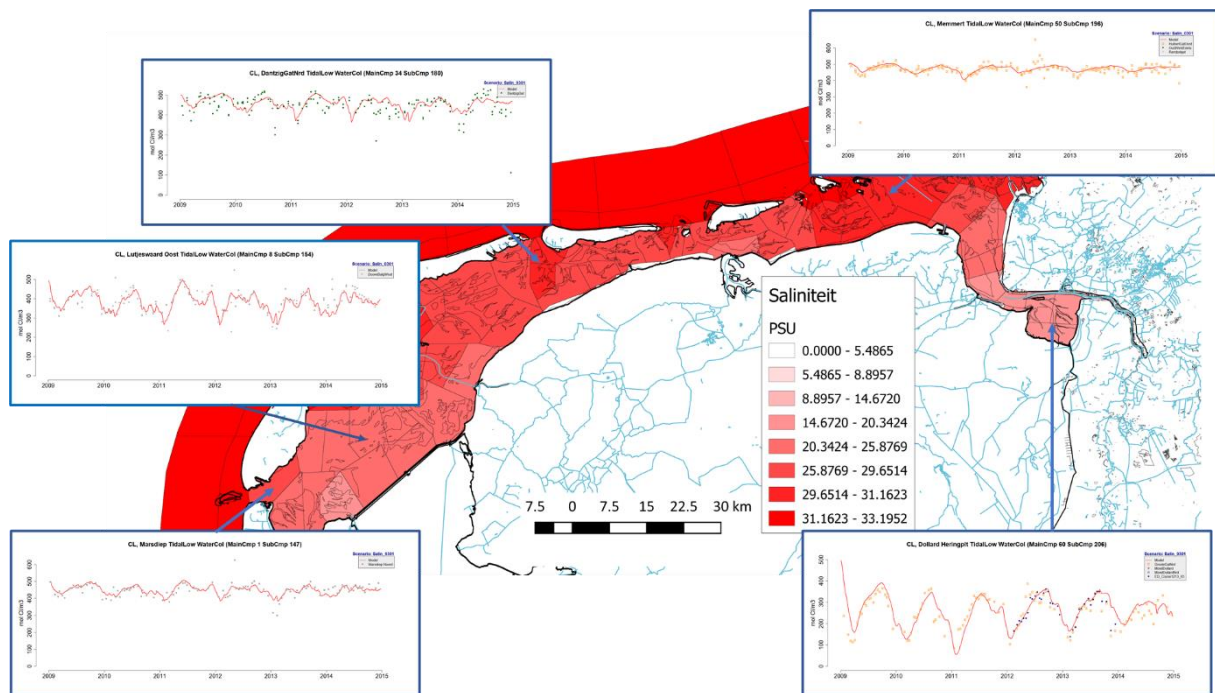
Een belangrijke aanname bij deze berekeningen is dat uitsluitend verspreiding van beide doelstoffen in de waterkolom plaatsvindt, en deze dus niet worden opgenomen door het sediment (adsorptie aan vast materiaal, waardoor een zekere opslag in het sediment kan), noch door organismen worden afgebroken of opgenomen.

Enkele technische data

De software waarin het computerprogramma geschreven is, is C, draaiend onder Linux. De voor- en nabewerking van gegevens is gedaan met R (R Core team, 2020). Voor de GIS-applicatie is gebruik gemaakt van QGIS (QGIS Development Team, 2020), waarbij van OpenStreetMap-kaarten gebruik is gemaakt die beschikbaar zijn onder de Open Database License: <http://opendatacommons.org/licenses/odbl/1.0/> (zie OSM, 2020).

3. Zoutgehaltes en de modelafregeling

De route die het gespuidte zoete water neemt door de Waddenzee naar de Noordzee moest voor elke spuilocatie apart opgegeven worden. Dit gaat met een onzekerheid gepaard, maar als de berekende zoutgehaltes in het hele gebied voldoende goed overeenkomen met meetwaarden van Rijkswaterstaat kan aangenomen worden dat die verdeling van water met voldoende nauwkeurigheid in kaart is gebracht. Zoals gezegd zijn hierbij enkele gegevens van fijnmazige stromingsmodellen zo goed mogelijk gebruikt. In Figuur 8 is weergegeven hoe de gemiddelde zoutverdeling er uitziet voor de Waddenzee en de kustzone (gemiddeld over 6 jaar), plus een vijftal grafieken met tijdreeksen voor deze periode plus de RWS-meetwaarden. Hieruit wordt geconcludeerd dat de beschrijving van de zoetwatersverspreiding over het gebied adequaat in het model is opgenomen.

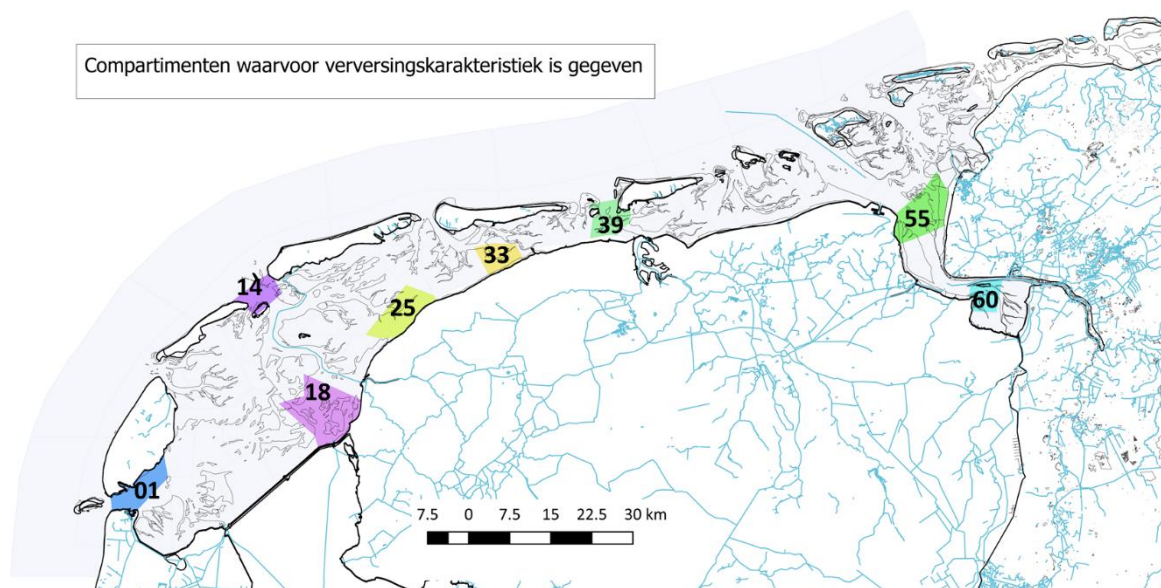


Figuur 8 Berekende zoutverdeling in de Waddenzee en Noordzeekustzone-compartmenten. Meetwaarden van Rijkswaterstaat (punten) en de berekeningen voor de jaren 2009-2015 (doorgetrokken lijnen) zijn voor enkele locaties aangegeven.

4. Verversingskarakteristieken

Om de verspreiding van milieuvreemde stoffen die met zoetwater in de Waddenzee terechtkomen goed te kunnen berekenen is het nodig om de verspreiding van het zoetwater zelf, en de manier waarop dat stapsgewijs wordt verdund door het heen en weer gaande getij, te bepalen. Daarvoor is het model afgeregeld op de manier die is uitgelegd in hoofdstuk 3 (mèt nogmaals de aantekening dat dit “bakjesmodel” een benadering is van wat zich in het systeem afspeelt).

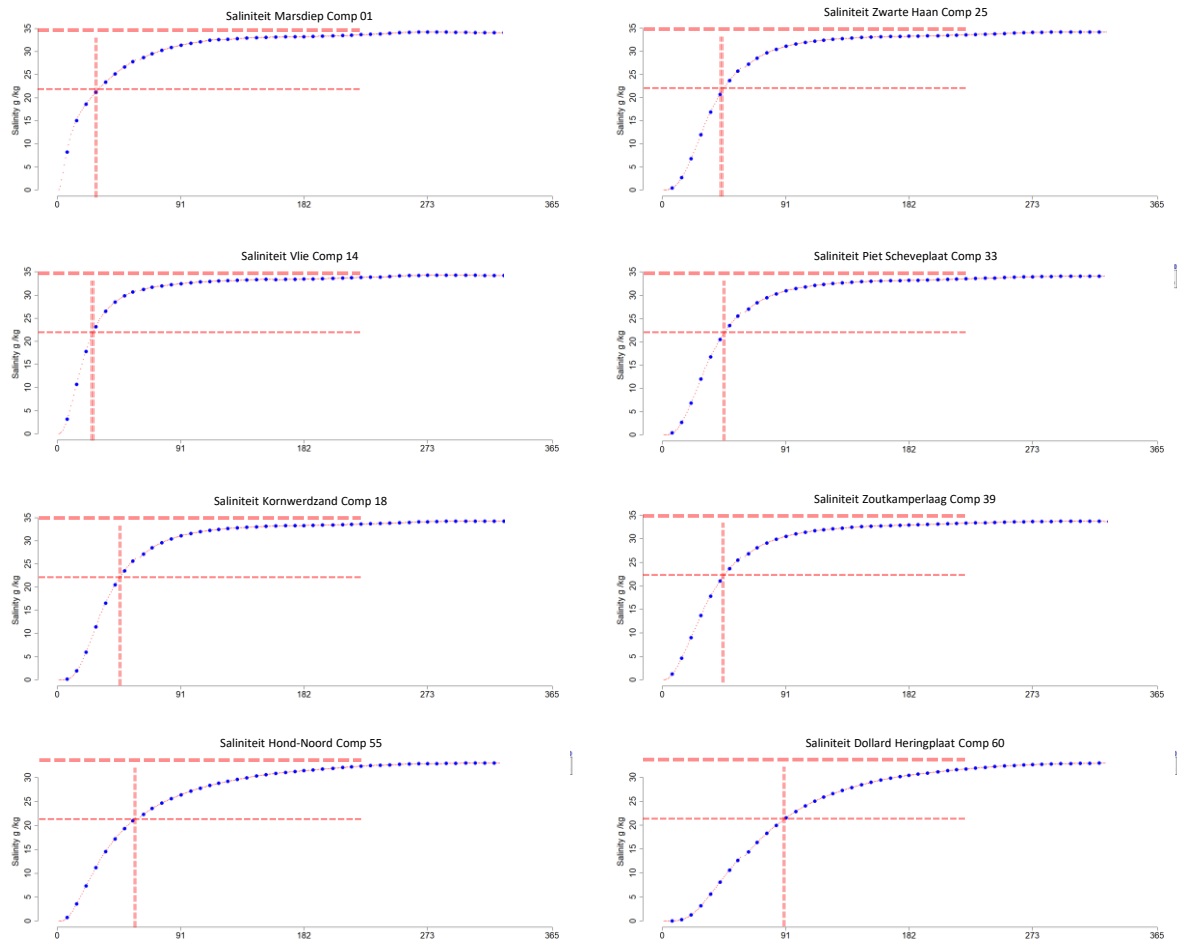
Om een gevoel te krijgen voor de verdunningseffecten is met het model een verversingscurve berekend voor diverse locaties in de Waddenzee (zie Figuur 9 voor de locaties en figuur 10 voor de verversingscurves). Hiervoor is aangenomen dat op tijdstip 0 de Waddenzee plus de Noordzeecompartimenten die bij het simulatiegebied horen (dus het hele gebied in Figuur 3) volledig gevuld is met zoetwater, er geen toevoer van zoetwater is en vervolgens te berekenen hoe de saliniteit zich in de tijd ontwikkelt. De eindwaarde is de saliniteit van het Noordzeewater, die bij benadering 34-35 (PSU) bedraagt. Als standaard voor de verversingstijd is de periode genomen waarin ongeveer 63% van de eindwaarde bereikt wordt. Het getal 0.63 is een karakteristiek die uit de klassieke verblijftijdenbenadering komt; het is het moment waarop het gehalte $(1-1/e)$ *eindwaarde is. Met het natuurlijke getal $e = 2.72$ komt dit uit op 0.63. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 10 en Tabel 1.



Figuur 9 Ligging van de compartimenten met hun nummers waarvan verversingskarakteristieken gegeven zijn. Op tijdstip $t=0$ is voor het gehele lichtgekleurde gebied een zoutgehalte=0 verondersteld.

De aldus gesimuleerde verversingstijden zijn verrassend lang. Zelfs voor locaties niet ver van de Noordzeeranden (Marsdiep, Vlie) duurt het toch nog tot enkele weken voordat de uiteindelijke toestand bereikt wordt. Op het eerste gezicht zou men verwachten dat het getij voor een snelle verversing (en daarmee verdunning van vanuit het zoetwater aangevoerde stoffen) zorgt. Dat is niet het geval en dat komt doordat een groot deel van het water dat met eb de Waddenzee (via bijvoorbeeld het Marsdiep) verlaat met vloed weer terug de Waddenzee instroomt. De berekende tijdsduur hangt wel sterk af van wat als buitengrens van het gebied wordt genomen: in dit geval is dat ruwweg 20 km buiten de eigenlijke Waddenzee (zie sectie 2 voor een uitleg waarom dit zo gekozen is).

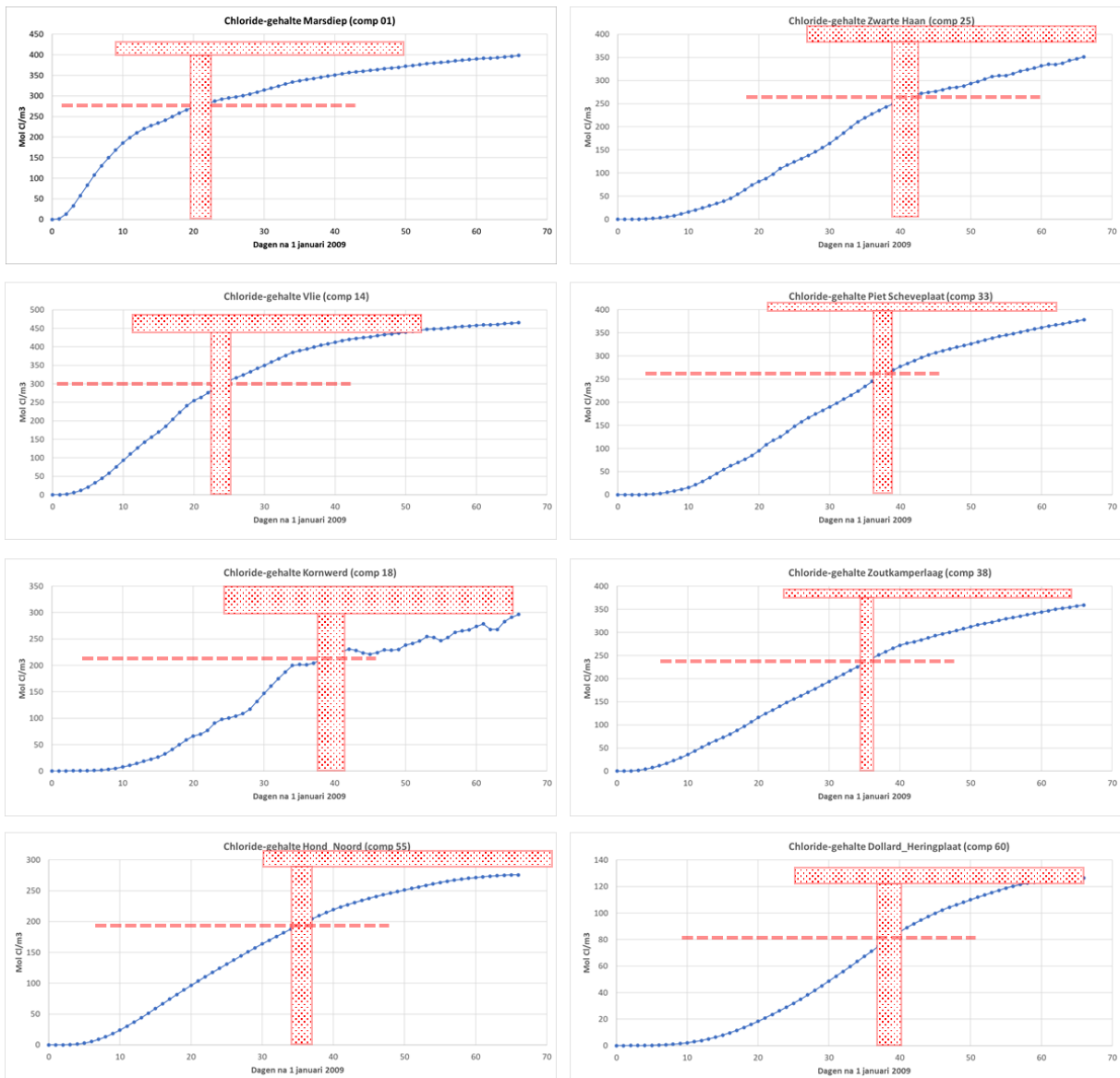
Zo'n lange verversingstijd is niet uniek voor dit deel van de Waddenzee: ook in het Sylt-Rømø-waddegebied werd gevonden dat de netto-uitwisseling tussen wad en Noordzee véél kleiner was dan wat in beginsel mogelijk is op basis van de hoeveelheid water die elk getijde het gebied verlaat (Backhaus et al, 1998).



Figuur 10 Hoe snel bereikt de saliniteit, vanaf 0, zijn 'eind'waarde? Met blauwe stippellijn het berekende zoutgehalte (in mol Cl m⁻³) op acht locaties in de Waddenzee, beginnend met 0 op 1 januari 2009. De dikke horizontale stippellijn geeft de eindwaarde aan (wat de saliniteit van de Noordzee is), de dunnere horizontale stippellijn de 0.63-waarde daarvan, en de verticale balk het tijdstip waarop die 63%-waarde bereikt is. Deze acht locaties zijn gekozen omdat ze verspreid over de hele Waddenzee liggen en zodoende een representatief beeld geven van het gebied.*

Deze exercities zijn ook uitgevoerd voor een situatie waarin de zoetwatertoevoer aanwezig blijft (Figuur 11). Hierbij is de moeilijkheid aanwezig dat het niet zonder meer duidelijk is wat de eindwaarde van de saliniteit is. Overigens is de verwachting dat de resultaten niet erg zullen afwijken van de waarden die hiervoor gevonden zijn: de waterstromingen in de Waddenzee worden immers maar amper beïnvloed door de zoetwatertoevoeren omdat de extra debieten klein zijn ten opzichte van de getijdenstromingen.

Het lijkt erop dat bij die compartimenten waar bij de eerste exercitie heel lange verversingstijden worden berekend, deze bij de tweede exercitie bij een aantal compartimenten wat minder lang zijn. Met name in de Dollard is dat anders; daar speelt mogelijk de relatief grote bijdrage van de zoetwatertoevoer toch een rol. Desalniettemin blijft de conclusie dat de verversingstijden, zoals die hier berekend zijn, lang zijn; een verontreiniging in het systeem wordt maar langzaam door verdunning verwijderd.



Figuur 11 Hoe snel bereikt het zoutgehalte, vanaf 0, zijn 'eind'waarde? Exercitie waarbij evenals bij Figuur 10 op het begintijdstip alle zoutgehalten=0 zijn gesteld, maar nu is de toevoer van zoetwater niet gestopt. Met blauwe stippellijn het berekende zoutgehalte (in mol Cl m⁻³) op acht locaties in de Waddenzee, beginnend met 0 op 1 januari 2009. De horizontale balk geeft de eindwaarde aan (bij benadering), de horizontale streepjeslijn de 0.63-waarde daarvan, en de verticale balk het tijdstip waarop die 63%-waarde bereikt is. Vergeleken met Figuur 10 is er een onzekerheid wat betreft de eindwaarde: die hangt af van de zoetwatertoevoer zelf. Daarom zijn de balken en stippellijn minder precies dan bij die vorige exercitie.*

Saliniteit (g l⁻¹) is ongeveer 1.8 het chloridegehalte (in g l⁻¹) en 0.064* dat in mol chloride m⁻³.*

Tabel 1 Resultaat verversingsberekening: dagnummer waarop 63% van de eindwaarde bereikt is. De eindwaarde voor Figuur 10 is ongeveer 34-35 g l⁻¹, voor Figuur 11 hangt deze mede af van de zoetwatertoevoer zelf. Omdat die fluctueert is de uitkomst minder precies.

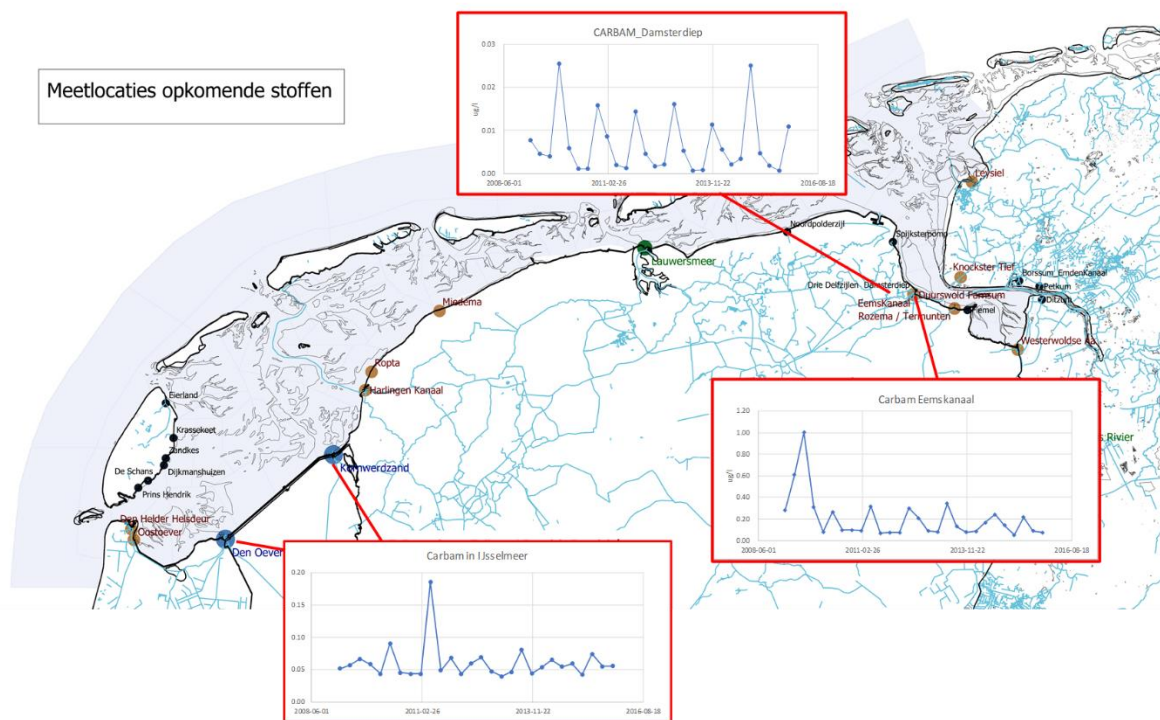
Compartimentnaam	Comp nummer	63%-dagnr Figuur 10	63%-dagnr Figuur 11
Marsdiep	01	25	22
Vlie	14	25	24
Kornwerderzand	18	48	40
Zwarte Haan	25	42	41
Piet Scheveplaat	33	45	37
Zoutkamperlaag	39	45	36
Hond-Noord	55	58	36
Dollard Heringplaat	60	91	40

5. Verspreiding van diclofenac en carbamazepine

Met de modelinstelling die voor het zoutgehalte een goed verspreidingsbeeld voor het zoete water heeft opgeleverd, is vervolgens de verspreiding van beide doelstoffen berekend.

Gebruikte data

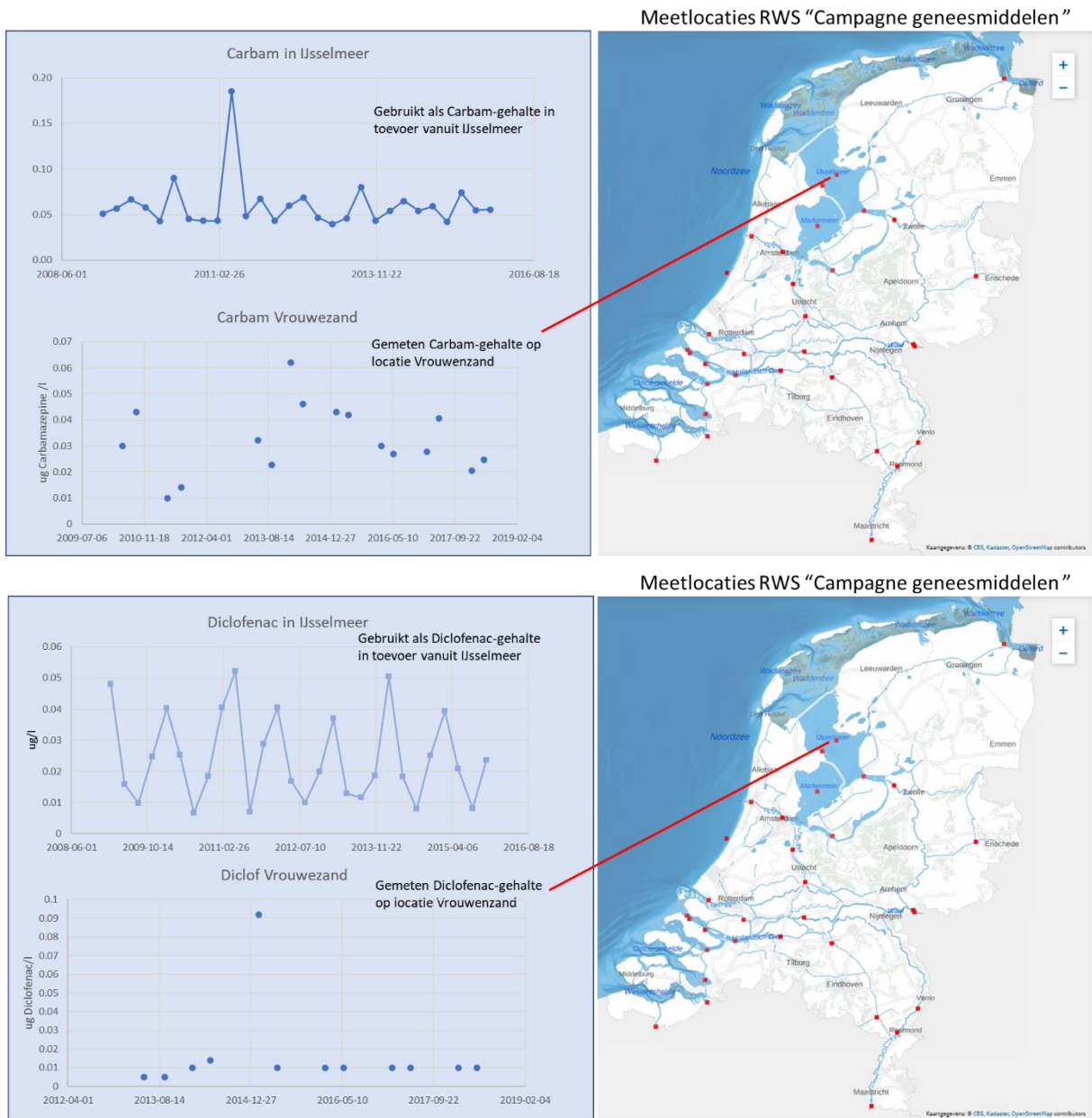
Eerst de toevoerreeksen. In Figuur 12 is een drietal waarden weergegeven van de gebruikt tijdreeksen voor carbamazepine, en in Figuur 14 voor diclofenac. Deze zijn alle gebaseerd op de door Deltares aangeleverde seizoensdata. Die betroffen weliswaar één jaar, maar het is aangenomen dat de vrachten voor de overige jaren hetzelfde zijn. Omdat de debieten steeds wél anders zijn, zijn de concentraties dat ook. Dit geldt voor beide doelstoffen.



Figuur 12 Carbamazepine: gebruikte gehalten in enkele toevoerwateren. Voor de Eems waren geen data bekend, maar zijn de toevoeren geschat op ongeveer 2/3 van die van het Groningse Eemskanaal.

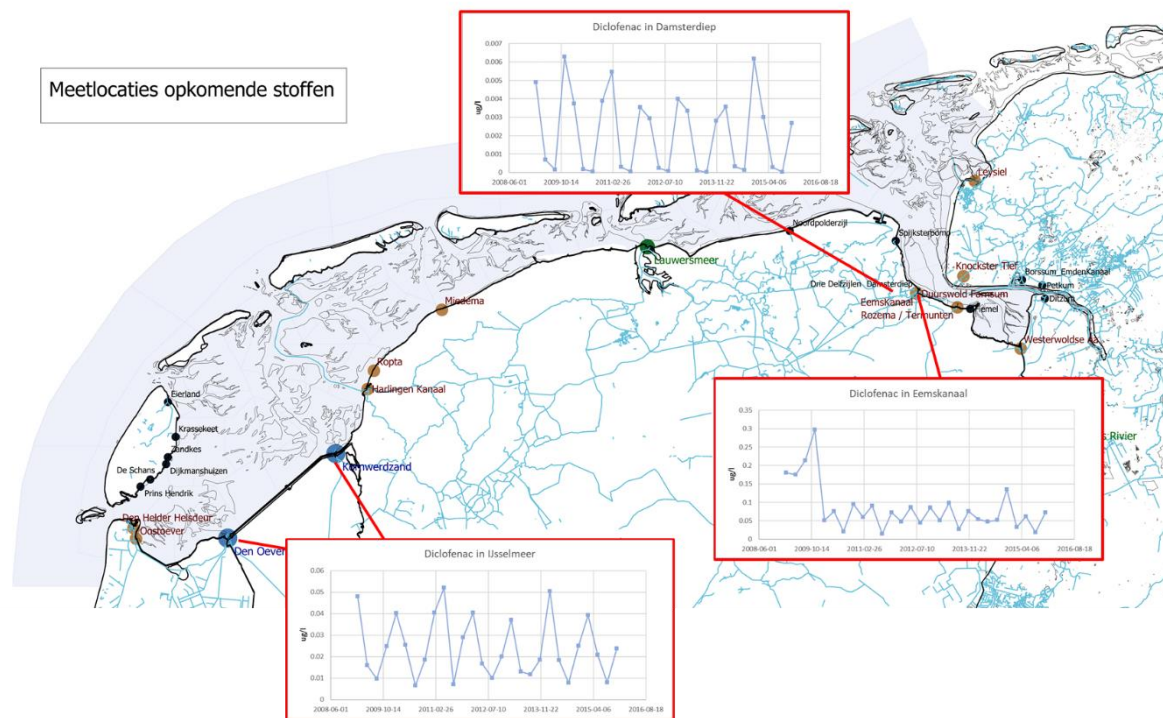
Voor de Ems-rivier zijn, als schatting, gehalten van ongeveer 2/3 van die van het Eemskanaal aangehouden, voor beide doelstoffen. Dit heeft als achtergrond dat het Eemskanaal gekoppeld is aan de stad Groningen plus nog enkele plaatsen, en de Ems met onder meer Emden, Leer en Papenburg een kleiner achterland heeft wat bevolkingsaantal betreft.

Door Van Gils et al (2019) is voor meerdere stoffen een validatie gegeven van het landelijke waterkwaliteitsmodel dat gebruikt is om de verspreiding van die stoffen over Nederland te berekenen. Zij stellen dat een verschil tussen meting en berekening dat kleiner is dan één orde-grootte al als een goed resultaat kan worden gezien, gezien de grote



Figuur 13 Meetlocaties van Rijkswaterstaat in het kader van hun campagne "Geneesmiddelen". Voor de locaties Vrouwenzand, midden in het IJsselmeer, zijn meetdata bekend (de onderste van beide grafieken), en de gebruikte gehalten bij de berekeningen (de bovenste grafiek). De tijdsassen in beide grafieken zijn verschillend. Boven: carbamazepine, onder: diclofenac

onzekerheden die kleven aan de verschillende stappen in het rekenproces (van excretie via rioolwaterzuiveringsinstallaties naar oppervlaktewater). Direct relevant voor de huidige berekeningen is dat de Deltares-data met meetwaarden vergeleken kunnen worden voor het IJsselmeer, zie Figuur 13. De RWS-metwaarden zijn van de orde $0.01 - 0.05 \mu\text{g carbamazepine l}^{-1}$, de gebruikte (berekende) waarden zijn wat groter, rond de $0.05 \mu\text{g l}^{-1}$. Er is één uitschieter die veroorzaakt wordt doordat in dat kwartaal weinig afvoer is, waardoor de berekende gehalten vanzelf hoog worden. Voor diclofenac zijn de meetdata rond de $0.01 \mu\text{g l}^{-1}$; de (omgewerkte) Deltares-data liggen tussen de 0.01 en $0.05 \mu\text{g l}^{-1}$, dus wat hoger dan de meetwaarden.



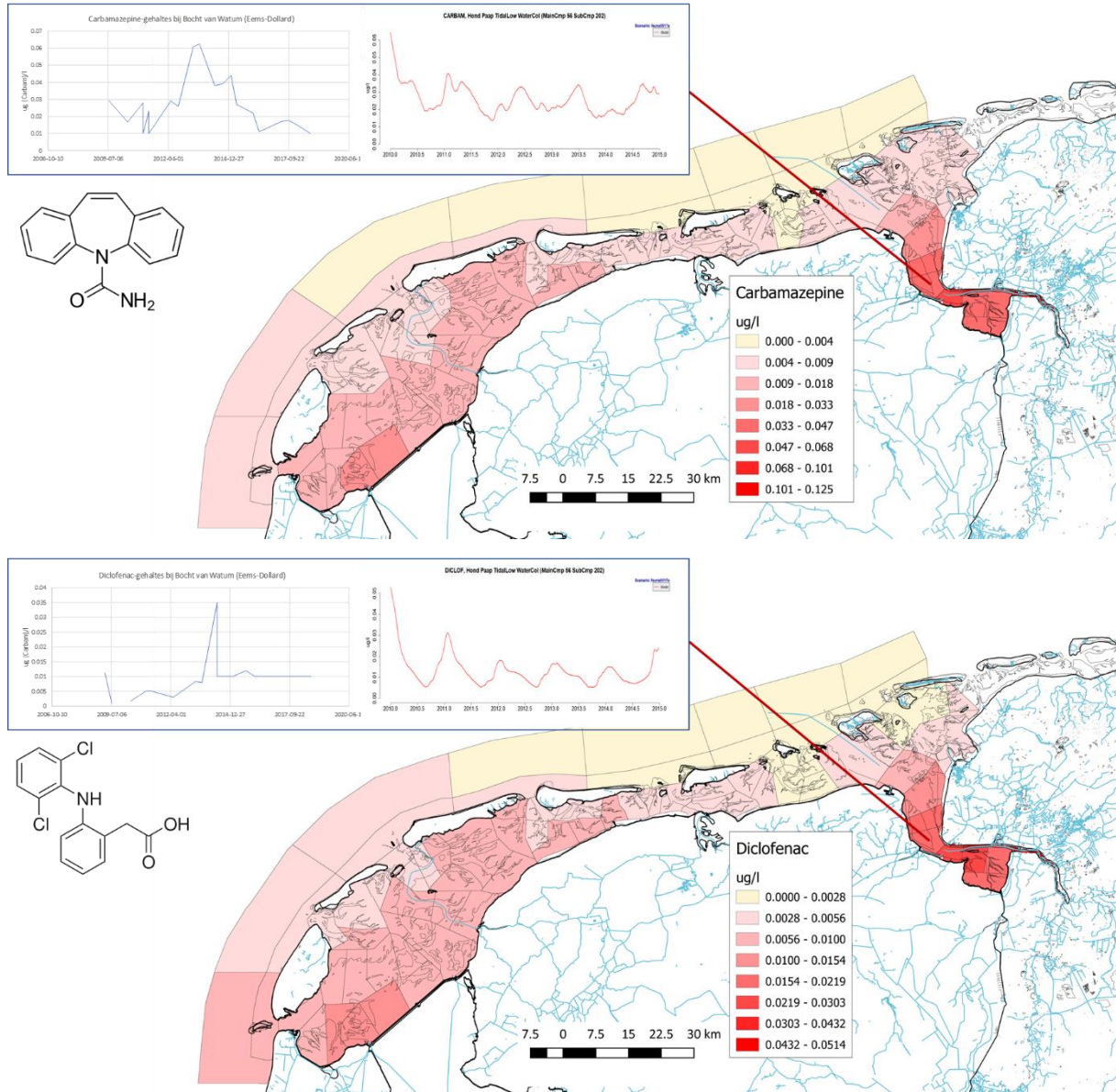
Figuur 14 Diclofenac: gebruikte gehalten in enkele toevoerwateren. Voor de Eems waren geen data bekend, maar zijn de toevoeren geschat op ongeveer 2/3 van die van het Groningse Eemskanaal.

Wat de Noordzee-kant betreft: gehalten voor diclofenac en carbamazepine zijn ter hoogte van Callantsoog (aan de rand van het onderzoekgebied (Figuur 3), ten zuiden van Den Helder) geschat op basis van zoutgehalten die met het ZUNO-DD-model berekende zijn (Van der Kaaij et al, 2017), gecombineerd met afvoerdata door de Nieuwe Waterweg en het Haringvliet (debeten en concentraties van de doelstoffen).

Resultaat: verspreiding van diclofenac en carbamazepine in de Waddenzee

Met het afgeregelde model en de beschikbare data over de gehalten van beide doelstoffen in de verschillende toevoeren naar de Waddenzee is de verspreiding van beide stoffen over de Waddenzee berekend. Het resultaat is in Figuur 15 weergegeven, met als inzet de enige meetwaarden die voor het gebied beschikbaar zijn: namelijk die voor de Bocht van Watum, die vlak voor de Groningse kust ligt, vanaf Delfzijl richting noorden. De gemeten gehalten voor diclofenac liggen ruwweg rond de $0.01 \mu\text{g l}^{-1}$, en de berekende waarden zijn iets hoger: tussen de 0.01 en $0.02 \mu\text{g l}^{-1}$. Voor carbamazepine zijn de berekende en gemeten waarden redelijk met elkaar in overeenstemming: beide rond $0.03 \mu\text{g l}^{-1}$. Gezien de beperktheid van meetwaarden, en het besef dat de toevoerwaarden zelf óók uit modelstudies stammen, is de overeenkomst tussen meting en berekeningen dus goed te noemen.

Hiermee is een volgende stap te zetten: wat zijn mogelijke gevolgen voor het ecosysteem? Hiervoor is eerst een kort overzicht nodig van wat er bekend is (en niet) aan effecten van beide stoffen op ecosysteemprocessen.



Figuur 15 Berekende verspreiding van carbamazepine (boven) en diclofenac (onder) over de Waddenzee. Gemiddeld over een aantal jaren. Als inzet het berekende verloop met de tijd (de rode grafiek) en (de blauwe grafiek) meetwaarden van Rijkswaterstaat. Let wel: de tijdassen zijn verschillend; evenals de y-assen van meetdata en van berekende waarden.

6. Mogelijke effecten op het ecosysteem

Algemeen

In dit en het volgende hoofdstuk is geïllustreerd hoe het model kan worden toegepast om de mogelijke effecten van milieuvreemde stoffen op het Waddenzee ecosysteem te berekenen. Uitgangspunt was de mogelijke effecten van diclofenac en carbamazepine op mosselen te onderzoeken, om de volgende redenen: door de wijze waarop mosselen voedingsstoffen uit het water filteren, zullen ze ook blootgesteld worden aan in het water opgeloste stoffen. Daarnaast voeden mosselen zich met primaire consumenten, zoals algen, waardoor stoffen die worden opgenomen door mosselen accumuleren in de voedselketen in secundaire en hogere consumenten. Mosselen hebben ook belangrijke functies in de Waddenzee, zo vormen mosselbanken harde structuren die het sediment op de bodem fixeren en leefomgeving bieden aan veel andere soorten. Tot slot is de chemische waterkwaliteit ook van belang voor de voedselveiligheid van mosselen die worden gekweekt in de Waddenzee.

Literatuuronderzoek

Naar de effecten van diclofenac en carbamazepine op mosselen is door Yannick Kalteren in het kader van zijn afstudeerwerk aan de Hogeschool Van Hall Larenstein te Leeuwarden bij PRW een literatuuronderzoek verricht (Kalteren, 2020). Een belangrijke graadmeter is hierbij de PNEC-waarde van de stoffen: de "Predicted No-Effect Concentration". Zie ook Norman Network (2020). Yannick Kalteren vond, helaas, dat er weinig tot geen kwantitatieve

Tabel 2 carbamazepine: effecten van de stof op mosselen (in dit geval *Mytilus galloprovincialis*) (uit Kalteren (2020), onderzocht in experimenten).

Auteurs	Gebruikte concentraties	Dosis-effectrelaties op <i>Mytilus galloprovincialis</i>
Oliveira, et al. 2017	0,3, 3,0, 6,0 en 9,0 µg l ⁻¹	Chronische blootstelling heeft negatief effect op de conditie en geslachtsklieren van de mossel.

Tabel 3 diclofenac: effecten van de stof op mosselen (in dit geval *Mytilus galloprovincialis*) (uit Kalteren (2020), onderzocht in experimenten). Noot: GST = biomarker voor stress (*Glutathione S-transferases*) (Jaafar, et al. 2015); SFG = "Scope for growth": dit geeft aan hoeveel (relatief) energie er beschikbaar is voor een schelpdier om te groeien, naast de energie nodig voor onderhoud (basaal-metabolisme). De Fulton Conditiefactor (CF) wordt gevonden door het gewicht van een dier te delen door zijn lengte.

Auteurs	Gebruikte concentraties	Dosis-effect op <i>Mytilus galloprovincialis</i>	Kwantitatief effect op groei	Kwantitatief effect op reproductie
Ericson et al. 2010	100 en 10.000 µg l ⁻¹	Hoge concentraties hebben een effect op SFG, evenals effect op de sterkte en overvloed aan byssusdraden.	De SFG van de controlegroep is 225, die van D-100 µg l ⁻¹ is 50, en die van D-1000 µg l ⁻¹ is 160.	-
Schmidt et al. 2013	100 en 1000 µg l ⁻¹	Klein effect op de "Fulton condition factor" (CF). En significante afname GST-activiteit.	Groep C en SC (control) zitten allebei rond de 31CF, voor de µg l ⁻¹ zit de CF op 28, en voor 1000 µg l ⁻¹ zit de CF op 29.	-
Balbi et al. 2018	1 en 10 µg l ⁻¹	Blootstelling aan bevruchte eieren heeft een significant effect.	-	Bij 1 en 10 µg l ⁻¹ aan diclofenac bij 48 uur Post fertilization, resulterend in 30% embryo-misvormingen
Jaafar et al. 2015	200 en 1000 µg l ⁻¹	Geen effect waargenomen op GST	-	-

data bekend zijn over sterftcijfers per hoeveelheid van carbamazepine en diclofenac op mosselen (een belangrijke doelgroep in het te gebruiken ecosysteemmodel). Ook vond hij dat de gehalten van de meeste stoffen, ook in het zoete water, steeds onder deze PNEC-waarden liggen. Daarnaast geven Posthuma et al (2019) een overzicht van mogelijke effecten van milieuvreemde stoffen op aquatische organismen. Maar goed bruikbare data over de effecten van beide doelstoffen op mosselen c.q. schelpdieren in het algemeen zijn toch niet beschikbaar. Tabel 2 en Tabel 3 zijn, met enkele kleine toevoegingen en weglatingen, overgenomen uit Kalteren (2020).

Van al de gevonden onderzoeken lijkt die van Balbi et al (2018) het meest verontrustend, omdat hij vond dat al bij diclofenac-gehalten van $1 \mu\text{g l}^{-1}$ er effecten te zien waren op genen die betrokken zijn bij de schelpvorming in een vroeg stadium van de schelpontwikkeling (als larve, dus). Wat carbamazepine betreft: Oliveira et al (2017) zien geen direct effect, maar wel een chronisch effect op conditie en gonadosomatische indexen, waardoor zij verwachten dat de reproductie er negatief door beïnvloed kan worden.

In de volgende paragraaf wordt gekeken naar een mogelijk effect van milieuvreemde stoffen op algengroei dan wel op de reproductie van mosselen.

Cumulatieve effecten

Omdat de gehalten aan beide stoffen in de Waddenzee –volgens de berekeningen hier– de waarden van ruwweg $0.05 \mu\text{g l}^{-1}$ niet overschrijden lijkt er weinig aan de hand, en verdere berekeningen lijken dus overbodig. Dit is zelfs het geval als er rekening gehouden wordt met een fikse onzekerheid in de aangehaalde onderzoekresultaten.

Maar, zijn er over effecten van diclofenac en carbamazepine op ecosysteemprocessen weinig gegevens bekend: over gecombineerde effecten (van meerdere stoffen samen, dus) is al helemaal zo goed als niets bekend. Maar toch is dat iets waar rekening mee moet worden gehouden: we praten niet over twee stoffen, maar over duizenden (zie sectie 1). Die hebben zeker niet allemaal dezelfde effecten, maar als er maar 100 (uit die duizenden) zijn die vergelijkbaar grote effecten hebben, betreft het samen gehalten van vele $\mu\text{g l}^{-1}$.

Daarom zijn toch enkele (eerste) ecosysteemberekeningen uitgevoerd, waarbij aangenomen is dat de concentratie van de stoffen een factor 100 groter is dan uit de modelberekeningen blijkt, en dat bij $2 \mu\text{g l}^{-1}$ samen (dus een factor 100 meer dan $0.02 \mu\text{g l}^{-1}$) een verminderde mosselreproductie optreedt van 5%, dan wel een verminderde algengroei van 5%. Deze twee mogelijke effecten zijn als twee aparte scenario's in de modelberekeningen uitgevoerd: Scenario 1 berekent effecten van $2 \mu\text{g l}^{-1}$ milieuvreemde stoffen op algengroei; scenario 2 berekent effecten hiervan op reproductie.

De manier waarop die effecten ingevoerd zijn in het model is in beide scenario's hetzelfde.

Voor algengroei en reproductie is aangenomen dat de beperking het product is van de afzonderlijke beperkende factoren:

$$f_{groei} = groeipar_{basis} * \left(\frac{1}{1 + \frac{[carb]}{aa_{ca}}} \right) * \left(\frac{1}{1 + \frac{[diclof]}{aa_{di}}} \right) \quad (1)$$

Hier zijn

f_{groei} = algengroeisnelheidsparameter (d^{-1})

$groeipar_{basis}$ = basiswaarde voor f_{groei} (d^{-1})

[carb] c.q. [diclof] = het gehalte aan carbamazepine cq diclofenac ($\mu\text{g l}^{-1}$)

aa_{ca} c.q. aa_{di} = de parameter (g m^{-3}) die bepaalt bij welk gehalte aan carbamazepine c.q. diclofenac de halve waarde van de groeiparameter bereikt wordt.

En, analoog, voor schelpdier-reproductie, die binnen een gezette periode in de maanden april/mei plaatsvindt, geldt:

$$reproductie = reproduc_{basis} * \left(\frac{1}{1 + \frac{[carb]}{bb_{ca}}} \right) * \left(\frac{1}{1 + \frac{[diclof]}{bb_{di}}} \right) \quad (2)$$

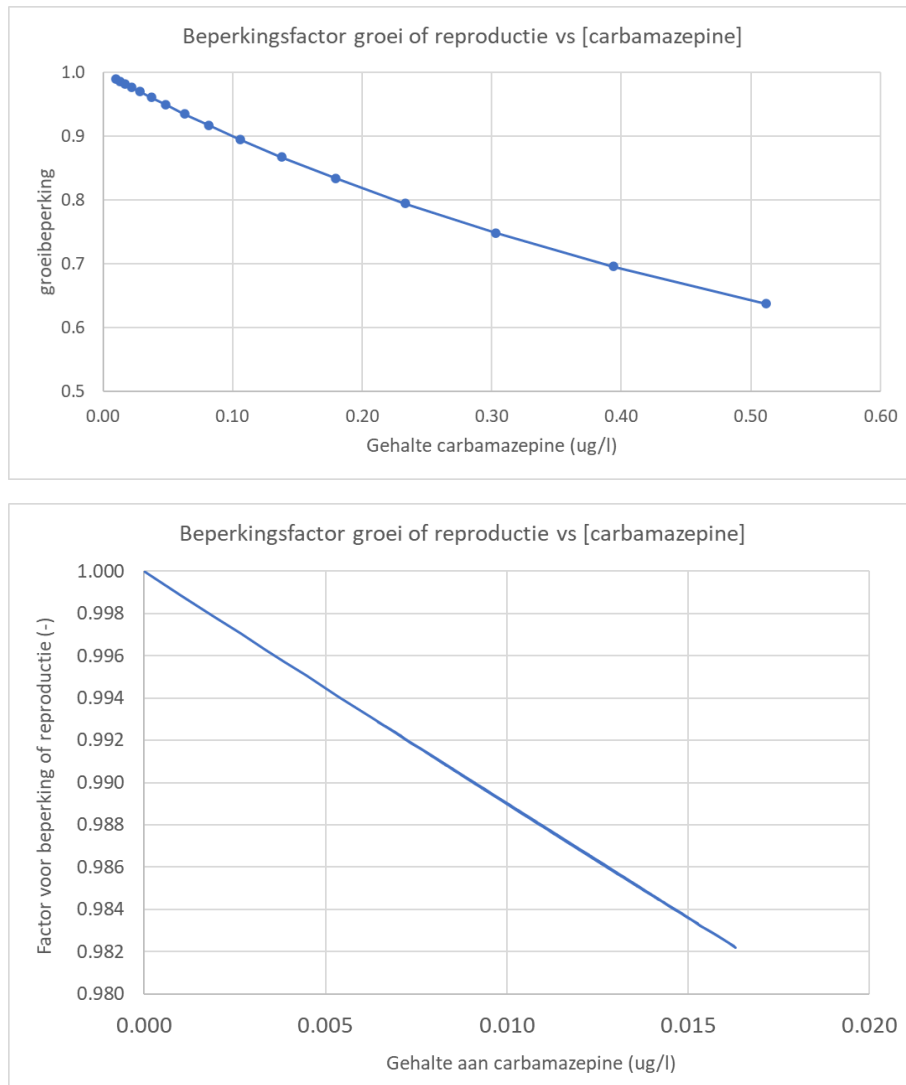
Hier zijn

reproductie = reproductiemassa per massa volwassen dieren ($g\ g^{-1}$)

$reproduc_{basis}$ = basiswaarde voor reproductie ($g\ g^{-1}$)

[carb] c.q. [diclof] = het gehalte aan carbamazepine c.q. diclofenac ($\mu g\ l^{-1}$)

bb_{ca} c.q. bb_{di} = de parameter ($g\ m^{-3}$) die bepaalt bij welk gehalte aan carbamazepine c.q. diclofenac de halve waarde van de reproductie bereikt wordt.



Figuur 16 Beperkingsfactor voor groei (“ f_{groei} ”) of reproductie (“reproductie”) als functie van het gehalte aan carbamazepine. Hierbij is een effect van carbamazepine geschat dat veel hoger is dan uit de literatuur volgt om een indruk te geven van wat er nodig is om een bepaald effect te hebben. Deze figuren illustreren vooral welke relatie er is gebruikt bij de effectberekeningen. Beide figuren betreffen dezelfde data; de onderste figuur beslaat de range van gehalten die in het systeem worden aangetroffen. Als de factor=1, is er geen beperking.

Hierbij zijn zowel aa als bb ingesteld op $0.5 \mu\text{g l}^{-1}$ voor diclofenac en $0.9 \mu\text{g l}^{-1}$ voor carbamazepine. De tweede komt in ongeveer dubbel zo hoge gehalten voor als de eerste, en hiermee worden beide invloeden ongeveer gelijk van grootte. Het effect van carbamazepine op algengroei is geschetst in Figuur 16.

Een beperking van 5% wordt hierbij bereikt bij $4.7 \mu\text{g m}^{-3}$ voor carbamazepine en bij $2.6 \mu\text{g m}^{-3}$ voor diclofenac. Deze effecten zijn dus ruim 100* zo groot als de effecten die globaal gezien uit de literatuur komen: alles is louter bedoeld om met behulp van modelberekeningen aan te geven wát er volgens de berekeningen zou kunnen gebeuren als het om een veelvoud gaat van het aantal stoffen met globaal eenzelfde werking.

Het effect van groeisnelheidsbeperking bij algen speelt het hele jaar door en werkt op álle algen; bij de reproductie is dat alleen voor filtreerders (mosselen) en alleen binnen de periode dat reproductie plaatsvindt.

Deze berekeningen zijn gedaan met het EcoWasp-ecosysteemmodel. Dit model is in de volgende paragraaf kort uitgelegd.

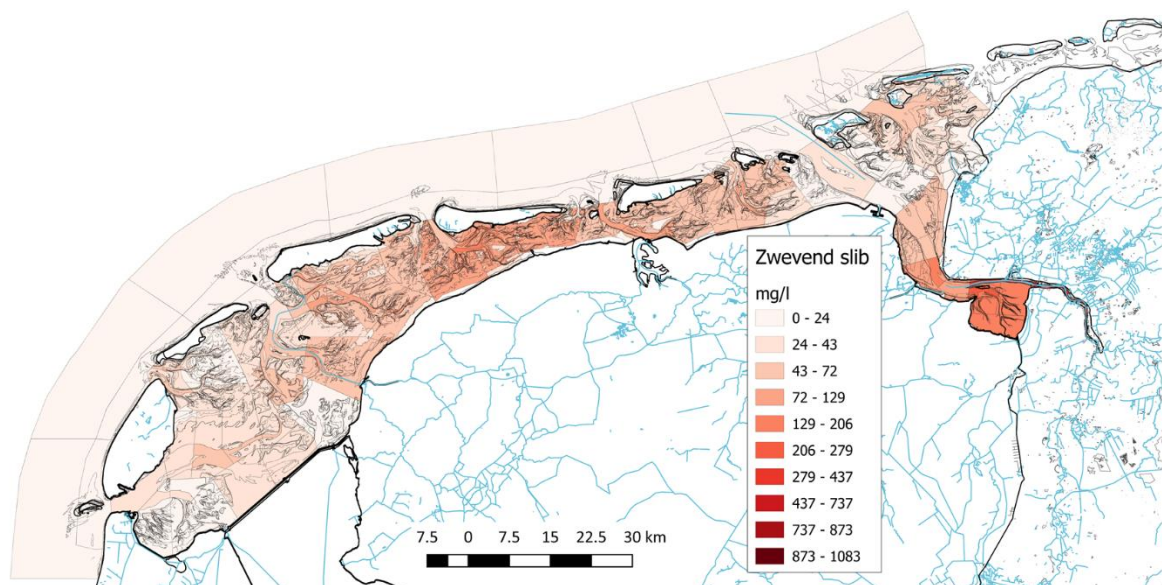
In een model als EcoWasp (en dat geldt voor eigenlijk alle dynamische ecosysteemmodellen) worden geen aparte soorten beschreven, maar vooral functionele groepen. Die hebben, zoals hier ook, soms verwarrende namen om toch maar kort aan te duiden waarover het gaat. Dus het gaat, naast nutriënten zoals fosfaat, silicaat en stikstofcomponenten, om algen (groot/klein, diatomeeën/niet-diatomeeën, algen in de waterkolom of aan de bodem), filtreerders (“schelpdieren”, hier “Mussels”), bodemgrazers (hier “Sediment browsers”, ofwel “Hydrobia” -wadslakjes), en detritus-eters (hier “Copepoden”). Alle organismen die doodgaan (tot detritus) worden vervolgens weer omgezet naar de oorspronkelijke bestanddelen (zoals nutriënten, koolzuur). De bodem dient ook als opslag voor dood organisch materiaal en nutriënten.

Met de omliggende gebieden (in dit geval de Noordzeekustzone) vindt uitwisseling plaats; die was bij de zoutverdeling al afgeregeld. Vanuit het zoete water vindt toevoer van nutriënten en ook (dood) organisch materiaal plaats.

Een belangrijk aspect van het EcoWasp-ecosysteemmodel is dat schelpdieren (“mussels”) in meerdere leeftijdsclassen zijn opgedeeld: van larven tot volwassen dieren: de dieren groeien dus van heel klein (enkele 10-tallen micrometers) tot volwassen exemplaren (ongeveer 5 cm). Eens per jaar (een gezette periode in het voorjaar/voorzomer) vindt reproductie plaats: een vast percentage van de biomassa aan volwassen dieren wordt omgezet in larven. Dit gaat met een aanzienlijke sterfte gepaard. De larven groeien op in de waterkolom, en als ze groot genoeg geworden zijn gaan ze naar de bodem. Ook die overgang gaat met een sterfte gepaard. Verder vindt gedurende het hele leven van de schelpdieren sterfte plaats die afhankelijk is van en verhoudingsgewijs afneemt met de grootte van de dieren. Hoe de groei en de sterfte is afgeregeld is in een aantal documenten weergegeven (Brinkman, 1993, 2015; Brinkman & Tamis, 2018).

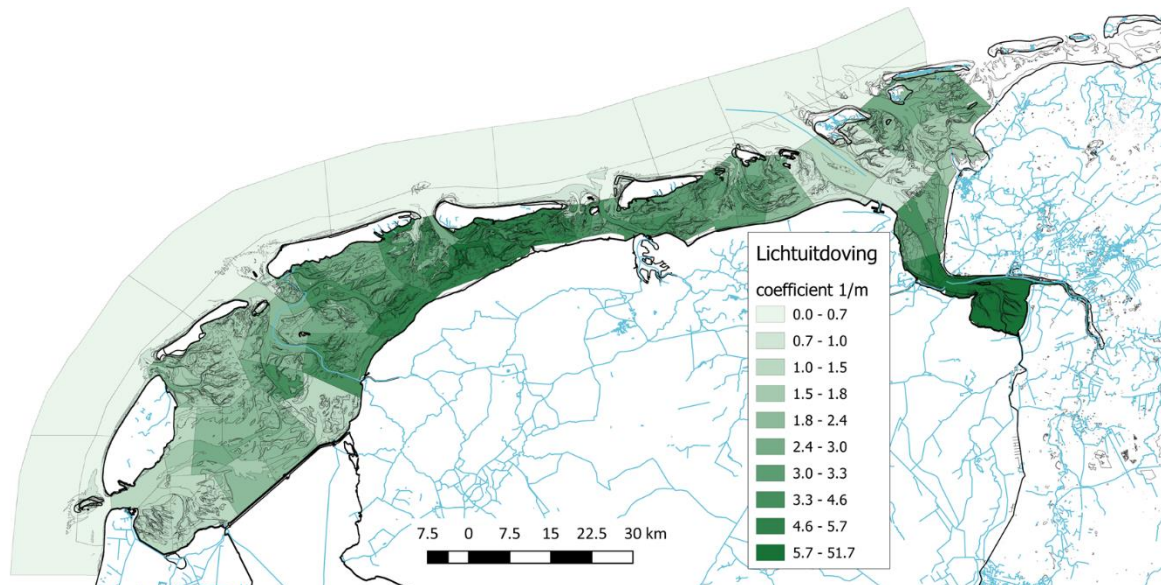
Troebelheid

Een belangrijke variabele om goed in te stellen is de troebelheid van het water. Daardoor wordt bepaald hoe licht in de waterkolom kan doordringen; dit heeft direct gevolgen voor de groei van algen in de waterkolom én op het sediment. De troebelheid wordt voor een belangrijk deel bepaald door opwervend bodemmateriaal, voornamelijk slib en detritus, maar ook zand en op het sediment groeiende algen. De opwerveling hangt af van de waterdiepte, de stroming



Figuur 18 Berekende gehalten aan zwevend stof boven in de waterkolom: som van algen, detritus, slib en zand. Gemiddeld over de jaren 2010-2014. Eenheid: mg l⁻¹.

en windeffecten, en ook van de samenstelling van de bodem. In de zandige Noordzeekustzone kan nu eenmaal minder gemakkelijk veel slib opwerpen dan in de slikkige delen van de Dollard, om maar twee uitersten te noemen. Om dit zo –goed mogelijk– af te regelen is gebruik gemaakt van de bestaande waarnemingen van Rijkswaterstaat (RWS, 2020), en enige data die uit andere projecten volgen (Brinkman, 2015; Brinkman & Tamis, 2018). Voor overige referenties naar ander onderzoek wordt ook naar deze beide rapporten verwezen. Strooming wordt constant verondersteld in de tijd; voor wind zijn dagelijks beschikbare data gebruikt (KNMI, 2020).



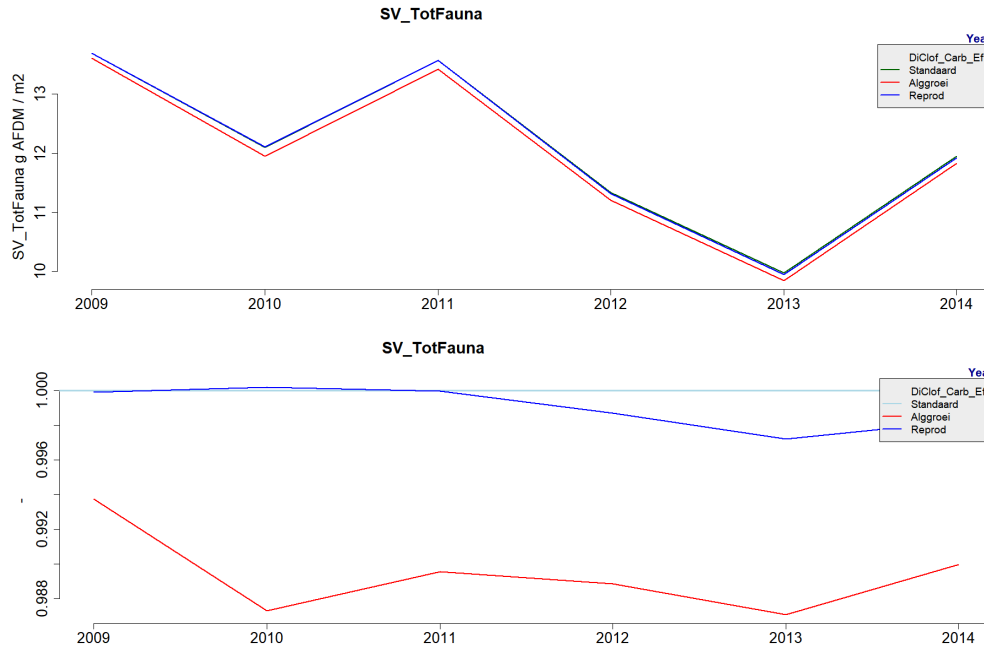
Figuur 19 Berekende lichtuitdovingscoëfficiënt boven in de waterkolom. Gemiddeld over de jaren 2010-2014. Eenheid: m^{-1} . Let op dat de schaal vertekend is omdat er enkele compartimenten (in de Dollard en in de Ems-rivier) zijn met een uitzonderlijke troebelheid.

In Figuur 18 en Figuur 19 is weergegeven wat de gemiddelde troebelheid is over de modelperiode (2009-2014), zoals deze berekend is. De eerste geeft het gehalte aan zwevend materiaal (slib, detritus, algen samen) boven in de waterkolom; de tweede de daaruit berekende lichtuitdoving (extinctiecoëfficiënt), ook weer boven in de waterkolom. Er worden ook verticale profielen berekend, waardoor op grotere diepte meer materiaal aanwezig is, en ook de lichtuitdoving sterker wordt. Daar is hier verder niet op ingegaan.

Uitkomsten

Daarna kan een standaardberekening worden uitgevoerd, dus zonder enige invloed van milieuvreemde stoffen. De hele berekening levert een groot aantal uitkomsten op die hier eigenlijk allemaal niét behandeld worden, op een paar na, want het gaat niet om de absolute uitkomsten maar om het verschil met de situatie dat er milieuvreemde stoffen aanwezig zijn. Ook moet nogmaals benadrukt worden dat het model nog beter afgeregeld kan worden dan nu het geval is; maar dat de tijd hiervoor gewoon ontbrak. De resultaten moeten dan ook vooral gezien worden als een methode om mogelijke effecten te berekenen en te presenteren, meer dan als een weergave van wat er daadwerkelijk verwacht kan worden. In Figuur 20 is weergegeven wat de berekende biomassadichtheid aan filtreerders is in het hele onderzochte systeem, en welke veranderingen er berekend zijn volgens beide scenario's (effect op algengroei, dan wel mosselreproductie). Dit is in kaartvorm nog eens weergegeven in Figuur 21.

Twee zaken springen eruit. Om met het eerdergenoemde aspect/voorbehoud van de modelafregeling te beginnen: in vorige sessies (Brinkman, 2015; Brinkman & Tamis, 2018) werd de meeste biomassa berekend in het sublitoraal omdat daar de voedselomstandigheden het best zijn: het gebied staat altijd onder water. Maar daarbij was niet meegenomen dat in dat sublitoraal de predatie op filtreerders door onder meer garnalen, krabben en zeesterren veel

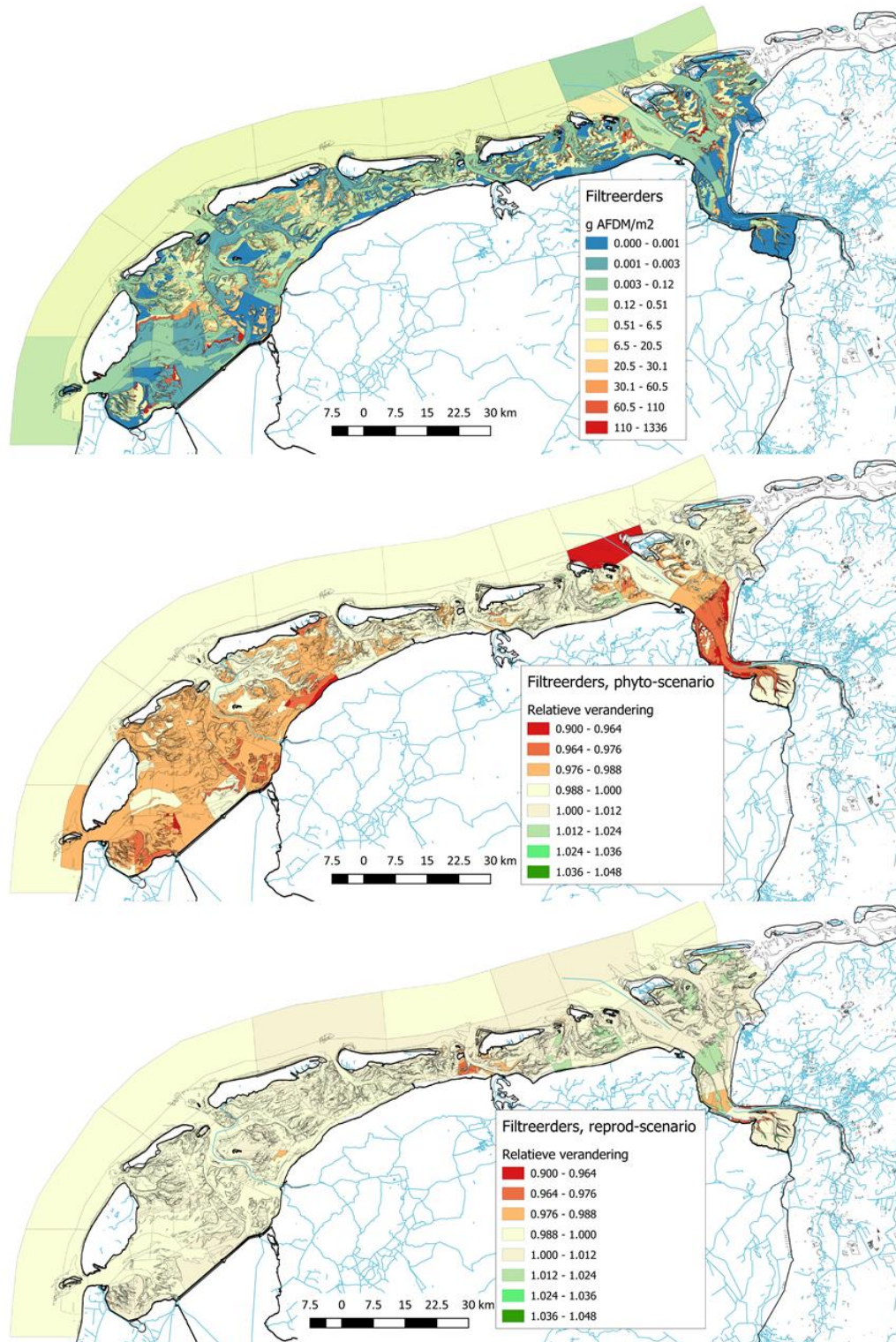


Figuur 20 Berekende biomassadichtheid (g drooggewicht/m²) filtreerders, standaard en volgens beide scenario's. Boven: absolute waarden, onder: relatieve veranderingen ten opzichte van de berekeningen zonder effecten van diclofenac en carbamazepine.

groter is dan op de laaggelegen getijdenplaten. In de diepere geulen maken ook nog eens de opwerveling van zand en andere fysische omstandigheden de omgeving minder geschikt voor filtreerders. Bij deze berekeningen is geprobeerd dit proces aan te passen, maar uit Figuur 21 moet geconcludeerd worden dat dit streven wat doorgeslagen is: in diepere delen zoals in de westelijke Waddenzee worden nu weinig mosselen berekend terwijl die daar wel degelijk voorkomen: de opgevoerde mortaliteit als gevolg van die biologische en fysische omstandigheden is in het sublitoraal is nu juist te sterk.

Een tweede aspect dat eruit springt is dat de berekende veranderingen als gevolg van een verondersteld cumulatief effect van milieuvreemde stoffen wel zichtbaar is in het gemodelleerde effect op fytoplankton (het fyto-scenario), maar niet in het effect op de reproductie van mosselen (het repro-scenario). Zie vooral Figuur 20, waar duidelijk is dat de relatieve verandering in het totale gehalte aan fauna bij het reproductie-scenario veel kleiner is dan bij het algengroei-scenario. In beide gevallen zijn is de modelleermethode toegepast die is uitgelegd in H6 en gerelateerd aan de gehalten van carbamazepine en diclofenac die hierboven zijn genoemd. In de middelste kaart in Figuur 21 is te zien dat de dichtheid van schelpdieren afneemt (tot 10%) als gevolg van het gemodelleerde effect op fytoplankton. In de onderste kaart is er nauwelijks een verandering te zien in de dichtheid van schelpdieren (plus of min 2,4%) door het veronderstelde effect op de reproductie.

Hier spelen enkele verschillen mee. Ten eerste is het zo dat de effecten op fytoplankton het gehele jaar door spelen, en die op de reproductie alleen op het moment van de reproductie. Ten tweede is het zo dat iets minder reproductie (het aantal larven dat geproduceerd wordt per biomassa volwassen schelpdier) mogelijk maar nauwelijks effect heeft op de populatiegrootte omdat dit ook betekent dat er iets minder voedselconcurrentie optreedt waardoor (volgens de modelberekeningen) de resterende larven -en later schelpjes- juist een iets lagere mortaliteit vertonen, gewoon omdat ze iets sneller groeien. Dit heft het oorspronkelijk negatieve effect wat op.



Figuur 21 Berekende dichtheid van filtreerders, en relatieve veranderingen volgens beide scenario's. Boven: dichtheid in g biomassa (droogmassa) per m² (=standaard). Midden: de verhouding filtreerder-biomassa volgens het fyto-scenario en dat volgens de standaard. Onder: de verhouding filtreerder-biomassa volgens het reproductiescenario en de standaard.

8. Discussie en nawoord: voorzichtigheid geboden

Algemeen

Het rapport bevat twee delen: de verspreiding van diclofenac en carbamazepine in de Nederlandse Waddenzee en Noordzeekustzone plus een schatting van de snelheid waarmee een verdunning optreedt, en een poging iets van effecten op het ecosysteem in kaart te brengen.

Het eerste deel is gebaseerd op berekende toevoeren van beide stoffen. Deze toevoeren volgden in de eerste plaats uit de brede Europese studie naar de stromen van deze en honderden andere milieuvreemde stoffen (het project Solutions), en daarnaast uit een verdere opwerking en precisering van die stofstromen in het Nederlandse oppervlaktewater door Deltares. De uitkomsten daarvan werden ter beschikking gesteld.

Vervolgens is met een eenvoudig model de verspreiding van beide stoffen in de Waddenzee berekend, waarbij de waterbewegingen afgeregeld zijn op gemeten zoutgehaltes. Toevoerdebielen (zoetwaterspuien) waren meestal beschikbaar; ontbrekende waterdebieten zijn geschat op basis van neerslag- en verdampingsdata van het KNMI. De belangrijkste aanname die hierbij gedaan is, is dat de verspreidingskarakteristieken voor de hele rekenperiode constant zijn en dus niet van het weer of andere omstandigheden afhangen. De berekende zoutgehaltes bleken wel steeds, op die locaties waarop ook Rijkswaterstaat-monitoringdata beschikbaar zijn, goed met de meetwaarden overeen te stemmen.

Ook is uitgerekend hoe snel water in de Waddenzee compartimenten zoals die in het model onderscheiden zijn, wordt vermengd met Noordzeewater. De grens tussen Noordzee en Waddenzee ligt daarbij op een kleine 20 km van het eigenlijke waddengebied. De snelheid waarmee zo'n verdunning optreedt blijkt laag te zijn; in sommige delen van de Waddenzee duurt het 20 tot meer dan 40 dagen, dus enkele weken tot meer dan een maand, voordat een stof zo goed als uitgespoeld is.

Voor de verspreidingsberekeningen van diclofenac en carbamazepine waren de tijdreeksen beschikbaar die Deltares aangeleverd heeft. Deze stammen alle uit massabalansberekeningen voor heel Nederland. De gegeven vrachten diclofenac en carbamazepine waren voor 1 jaar beschikbaar; deze zijn voor alle jaren waarvoor berekeningen zijn uitgevoerd gelijk gehouden. Voor de toevoer van deze stoffen uit de Ems-rivier waren geen data beschikbaar; hierbij zijn gehalten van ongeveer 2/3 van die van het Eemskanaal aangehouden. Aangenomen hierbij is dat diclofenac en carbamazepine niet in het sediment worden opgeslagen, noch door organismen worden afgebroken of opgenomen. Ter controle van de toevoeren was niet meer dan een set meetdata beschikbaar (voor het IJsselmeer); ter controle van de berekende verspreiding in de Waddenzee was ook maar een set beschikbaar, namelijk voor de Bocht van Watum in het Eems-Dollardgebied. Beide datasets toonden aan dat zowel de toevoerdata als de die van de verspreidingsberekeningen redelijk bij de meetdata in de buurt liggen, zeker als beseft wordt dat voor beide een ruime onzekerheidsmarge in acht moet worden genomen.

In het laatste deel van de rapportage is een mogelijkheid aangegeven hoe eventuele effecten van dergelijke milieuvreemde stoffen op het ecosysteem te kwantificeren zijn.

Voor het ecosysteemmodel (EcoWasp) dat hiervoor gebruikt is waren ook veel toevoerdata nodig; deze zijn voor een belangrijk deel afkomstig uit het monitoringprogramma van Rijkswaterstaat en de verschillende regionale instanties; maar voor een aantal toevoeren zijn de gehalten aan nutriënten en andere stoffen geschat door vergelijking met soortgelijke wateren.

Voor de effectstudie is allereerst gebruik gemaakt van wat er aan literatuurdata gevonden is. Daarnaast is aangenomen dat mogelijke effecten niet beide stoffen alleen betreffen maar de som van een groot aantal andere stoffen die ook geloosd worden. Er is een fictieve som van effecten aangenomen, waarbij die effecten de reproductie van schelpdieren betreffen, c.q. de groei van algen als voedsel voor schelpdieren. Vervolgens is berekend wat het gebruikte ecosysteemmodel zegt over mogelijke effecten op de schelpdierhoeveelheden.

De effecten van de onderzochte stoffen *apart* is minimaal, en niet meetbaar. En met de hier uitgevoerde modelberekening is dat evenmin het geval. Wordt uitgegaan van een som van minstens 100 van soortgelijke effecten, dan wordt een effect in de modelresultaten zichtbaar.

Echter, dit deel is meer een inkijk in hoe een dergelijk vraagstuk zou kunnen worden aangepakt dan een betrouwbare inschatting van ecosysteemeffecten: niet meer en niet minder dan een poging om te laten zien hoe gecumuleerde effecten van een groot aantal milieuvreemde stoffen zoals deze medicijnresten, plus vele andere, inzichtelijk gemaakt kunnen worden.

Kortom: vanwege de beperkte gegevens is het schetsen van een methode hierbij belangrijker geweest dan de daadwerkelijke kwantificering, en dus moeten de resultaten van de berekening naar cumulatieve effecten van een honderdvoudig aantal milieuvreemde stoffen moet echt met de grootst mogelijke voorzichtigheid worden bekeken. De gebruikte effecten per eenheid vreemde stof is niet meer dan een veronderstelling én ook is de modelafregeling op dit moment er een die nog verbetering behoeft. Het resultaat van deze set berekeningen is louter een oefening.

Tot slot enkele aanbevelingen.

De hele set berekeningen maakt duidelijk dat het belangrijk is om dit ecosysteemmodel (of welk ecosysteemmodel dan ook) goed af te regelen, zodat de berekende grootte en verspreiding van onder meer schelpdieren, fytoplankton, fyto-benthos en primaire productie een enigszins vertrouwd beeld oplevert. Dat is bij deze inleidende studie tot op zekere hoogte wel, en voor een aantal andere aspecten minder goed gelukt. Zo was in voorgaande studies een tekortkoming van het ecosysteemmodel dat schelpdieren vooral in de geulen tot ontwikkeling kwamen vanwege de betere voedselomstandigheden. Dit is hier gecompenseerd door rekening proberen te houden met de grotere predatiedruk op sublitorale schelpdierbestanden, maar deze correctie is hier doorgeslagen waardoor nu berekend wordt dat schelpdieren vrijwel alleen op de platen voorkomen.

Hier zijn nu veronderstelde effecten op de primaire productie doorgerekend en effecten op reproductie van schelpdieren. Maar in principe is elk mogelijk effect op deze wijze met een dergelijk model in kaart te brengen, gesteld dat goede oorzaak-gevolgrelaties bekend zijn. Nogmaals: een goede afregeling is hierbij belangrijk.

Gezien het doel van deze inleidende studie was de inleidende literatuurstudie van Yannick Kalteren voldoende voor de invulling van enige ecotoxicologie, maar dat is voor eventuele vervolgberekeningen beslist te weinig: bij eventuele vervolgprojecten dient gebruik gemaakt te worden van meer gedegen toxicologische kennis.

9. Referenties

Backhaus J, Hartke, D, Hübner U, Lohse H & Müller A. 1998. Hydrographie und Klima im Lister Tidebecken. In: Gätje C & Reise K. (eds) Ökosystem Wattenmeer. Austausch-, Transport- und Stoffumwandlungsprozesse. Springer, Berlin, Heidelberg: 570 S

Balbi T, Montagna M, Fabbri R, Carbone C, Franzellitt, S, Fabbri E, & Canesi L. (2018). Diclofenac affects early embryo development in the marine bivalve *Mytilus galloprovincialis*. *Sci. Total Environ.* 642:601-609.

Brinkman AG, 1993. Biological processes in the EcoWasp ecosystem model. IBN Research Report 93/6. 111 pp. <https://edepot.wur.nl/384807>.

Brinkman AG & Smit JPC. 1993. Porewater profiles in the EcoWasp ecosystem model. IBN Research Report 93/2. 62 pp. <https://edepot.wur.nl/384767>

Brinkman AG. 2015. Ecosysteemeffecten van lokaal veranderde slibgehalten in de westelijke Waddenzee. IMARES Rapport C157/15. <https://wur.on.worldcat.org/oclc/952566104>

Brinkman AG & Tamis J. 2018. A short overview of ecosystem models and data available for Wadden Sea and North Sea coastal zone simulations. Brinkman Adviesbureau BAB/Ecologische modellen. Report 2018/02, 82 pp. <https://wur.on.worldcat.org/oclc/1038004296>

Burchard H. & Bolding K. 2002. Scientific Documentation, European Commission, rep. EUR 20253 EN, 157 pp.

Deltares 2020. Delft3D <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>

Deltares 2020^a. Deltares onderzoeksagenda <https://www.deltares.nl/nl/over-ons/onderzoeksplan/#/>

Duran-Matute M, Gerkema MT, De Boer GJ, Nauw JJ & Gräwe U. 2014. Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study. *Ocean Sci.* 10: 611-632, 2014 www.ocean-sci.net/10/611/2014/doi:10.5194/os-10-611-2014

Ericson H, Thorsén G, & Kumblad L. 2010. *Physiological effects of diclofenac, ibuprofen and propranolol on Baltic Sea blue mussels*. *Aquatic Toxicology* 99(2): 223-231

Ferrari B, Paxe N, Lo Giudice R, Pollio A & Garrica J. 2003^a. Ecotoxicological impact of pharmaceuticals found in treated wastewaters: study of carbamazepine, clofibric acid, and diclofenac. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 55 (3) 359-370

Ferrari B, Paxe N, Lo Giudice R, Pollio A & Garrica J. 2003^b. Erratum to "Ecotoxicological impact of pharmaceuticals found in treated wastewaters: study of carbamazepine, clofibric acid, and diclofenac" *Ecotoxicology and Environmental Safety* 56 (2003) 450

Greenfacts 2019: Facts on Health and the Environment. <https://www.greenfacts.org/en/index.htm>

Leerdam RC, Janssen PJCN, Van der Aa NGFM & Versteegh KFM. 2018. Risicobeoordeling 42 opkomende stoffen in oppervlaktewaterbronnen voor drinkwaterbereiding. RIVM.

Jaafar SNT, Coelho AV & Sheehan D. 2015. *Redox proteomic analysis of mytilus edulis gills: effects of the pharmaceutical diclofenac on a non-target organism*. *Drug Testing and Analysis* 7: 957-966.

Kalteren Y. 2020. Opkomende Stoffen in de Waddenzee. Afstudeerverslag Hogeschool Van Hall-Larenstein.

KNMI. 2020. Koninklijk Meteorologisch Instituut. Overzichten van het weer. <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/daggegevens>

Moermond C, Montfort M & Smit E. Informatieblad "Nut en noodzaak van normen voor medicijnresten in oppervlaktewater". Rijksinstituut voor Volksgezond en Milieu & Min. Volksgezondheid, Welzijn en Sport.

Mooij WM, De Senerpont Domis LN & Hülsmann S. 2007. The impact of climate warming on water temperature, timing of hatching and young-of-the-year growth of fish in shallow lakes in the Netherlands. *J Sea Res* 60: 32-43

Microsoft (2020). <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365>.

Norman Network. 2020. <https://www.norman-network.net/>

Oliveira P, Almeida Â, Calisto V, Esteves VI, Schneider RJ, Wrona FJ, Soares AMVM, Figueira E & Freitas R. 2017.

Physiological and biochemical alterations induced in the mussel *Mytilus galloprovincialis* after short and long-term exposure to carbamazepine. *Water Res.* 117: 102-114.

OSM, 2020. Data made available under the Open Database License: <http://opendatacommons.org/licenses/odbl/1.0/>. Any rights in individual contents of the database are licensed under the Database Contents License: <http://opendatacommons.org/licenses/dbcl/1.0/>

Posthuma L, van Gils J, Zijp M, Van de Meent D & De Zwart D. 2019. Species sensitivity distributions for use in environmental protection, assessment, and management of aquatic ecosystems for 12 386 chemicals. *Environ Toxicol Chem.* 38 (4):905-917. DOI: 10.1002/etc.4373

QGIS Development Team (2020). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>"

R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Ridderinkhof H. 1990. Residual currents and mixing in the Wadden Sea. PhD-thesis Univ. Utrecht. 91 pp.

Rijkswaterstaat, 2020. Waterinfo. <https://waterinfo.rws.nl/#/nav/expert/>

RIVM 2020. <https://www.rivm.nl/antibioticaresistentie/nationale-aanpak-antibioticaresistentie>

Schmidt W, Rainville L.-C, McEneff G, Sheehan D, & Quinn B. (2013). *A proteomic evaluation of the effects of the pharmaceuticals diclofenac and gemfibrozil on marine mussels (Mytilus spp.): evidence for chronic sublethal effects on stress-response proteins.* *Drug Testing and Analysis* 6 (3) :210-219.

Solutions. 2020. <https://www.solutions-project.eu/results-products/>

Tiessen M, Nauw J & Ruurdij P. 2012. Numerical modeling of physical processes in the North Sea and WaddenSea with GETM/GOTM. Conference Paper <https://www.researchgate.net/publication/269071108>.

Van der Kaaij Th, Van KesselTh, Troost T, Herman P, Van Duren L & Villars N. 2017. Modelondersteuning MER winning suppletie- en ophoogzand Noordzee 2018 - 2027. Modelvalidatie. Deltares report 1230888-002

Van Gils J, 2018. Risico's van opkomende stoffen: demonstratie van model-instrumentarium aan de hand van concentratie- en risicokaarten. Deltares memo dd 18 december 2018.

Van Gils J, Roex E, Van den Meiracker R, Van der Linden A & Altena W. 2019. Modelling van nieuwe stoffen in oppervlaktewater: Modelaanpassing, validatie. Deltares Rapport 11202403-002-ZWS-0004

Van Gils J, Posthuma L, Cousins IT, Brack W, Altenburger R, Baveco H, Focks A, Greskowiak J, Kühne R, Kutsarova S, Lindim C, Markus A & Van de Meent D, Munthe J, Schueder R, Schüürmann G, Slobodnik J, De Zwart D & Van Wezel A. 2020. Computational material flow analysis for thousands of chemicals of emerging concern in European waters. *J Hazard Mat.* 397:122655 <https://en.europe.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-019-0248-3>, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122655>.

COLOFON

Programma naar een Rijke Waddenzee

Rijkskantoor Middelzeehuys
Zuidersingel 3
8911 AV Leeuwarden

Huis voor de Wadden
Ruiterskwartier 121A
8911 BS Leeuwarden

Postbus 20401, 2500 EK Den Haag

088 - 797 44 00
secretariaatprw@minezk.nl
www.rijkewaddenzee.nl
🐦 RijkeWaddenzee

Opdrachtgevers:

Programma naar een Rijke Waddenzee

Eindredactie:

Bert Brinkman / Brinkman Adviesbureau BAB
Vloedlijn 37
1791 HJ Den Burg
Texel

Opmaak:

GH+O en Programma naar een Rijke Waddenzee

Datum

24 mei 2020



PROGRAMMA **NAAR EEN
RIJKE WADDENZEE**

WWW.RIJKEWADDENZEE.NL

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

