

Verkenning bijdrage numerieke modellering aan monitoring van zwerfafval in rivieren



Verkenning bijdrage numerieke modellering aan monitoring van zwerfafval in rivieren

Auteur(s)

Frans Buschman

Lora Buckman

Annelotte van der Linden

Verkenning bijdrage numerieke modellering aan monitoring van zwerfafval in rivieren

Opdrachtgever	RWS-WVL
Contactpersoon	Eric Copius Peereboom
Referenties	KPP Beheer Onderhoud en Ontwikkeling Waterkwaliteitsmodelschematisaties
Trefwoorden	Macroplastic, kennisleemtes, bron, emissie, transport, retentie

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	20-12-2022
Projectnummer	11208051-002
Document ID	11208051-002-ZKS-0004
Pagina's	40
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Frans Buschman	
	Lora Buckman	
	Annelotte van der Linden	

Samenvatting

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft Rijkswaterstaat Water Verkeer en Leefomgeving gevraagd om een uitvoerbare, betrouwbare, kostenefficiënte en gestandaardiseerde monitoringssystematiek te ontwikkelen voor zwerfafval liggend op oevers, drijvend op het wateroppervlak en zwevend in de waterkolom van rivieren. Acht beleids- en beheersvragen zijn geformuleerd die beantwoord moeten gaan worden met deze structurele monitoring. Deze verkenning geeft aan hoe numerieke modellen extra context kunnen geven aan de handmatig (en later automatisch) verzamelde meetgegevens van zwerfafval.

Als eerste stap zijn voor ieder van de beleids- en beheersvragen waarvoor modellering een nuttige bijdrage kan leveren verrijkte effectketens opgesteld. De verrijkte effectketens geven aan welke processen belangrijk zijn voor het beantwoorden van een vraag, of voldoende meetgegevens beschikbaar zijn en of modellen gereed staan om gebruikt te kunnen worden. Daarnaast geven we aan wat het kennisniveau is van ieder van de processen. Het proces advectie (transport van zwerfafval met de stroming mee) is goed bekend, maar voor de andere (gemiddeld) belangrijke processen is kennis over het algemeen beperkt. Op basis van de verrijkte effectketens geven we kennisleemten aan en geven we aan wat voor meetgegevens het dringendst nodig zijn.

Voor de lange termijn (2027) adviseren we (1) een grootschalig model en (2) een kleinschalig detailmodel bij monitoringlocaties of in een interessegebied. Het grootschalig model is een stroomgebiedsmodel met emissiemodellering en een diepte- en breedtegemiddeld transport model voor de Nederlandse Rijkswateren tot aan de zee. Met een 3D detailmodel kan voor interesselocaties, zoals bij monitoringslocaties, de verdeling in een dwarsdoorsnede bepaald worden gedurende een monitoringcampagne of kan in combinatie met metingen de kennis over uitwisseling tussen compartimenten verbeterd worden.

Voor de korte termijn (2023) stellen we voor om (1) een landsdekkend bron-naar-zee model op te zetten op basis van een landsdekkend hydrologisch model en (2) om voor de Nieuwe Maas een detailmodel op te zetten en resultaten te vergelijken met gegevens van een vangstelsel ter hoogte van de Erasmusbrug en gegevens van oevermetingen. Door combinatie van deze twee modellen wordt het resultaat nauwkeuriger: uitkomsten uit het detailmodel worden gebruikt om retentie in de rivier in te schatten voor het landsdekkende bron-naar-zee model, terwijl resultaten van het grootschalige model als randvoorwaarden voor het detailmodel kunnen worden ingezet.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Doel	7
1.3	Huidige beleids- en beheersvragen	7
1.4	Context	8
1.5	Afbakening	8
1.6	Aanpak	9
2	Samenvatting bestaande kennis, meetgegevens en modellen	10
2.1	Kennis	10
2.1.1	Samenstelling en risico	10
2.1.2	Van bron naar zee	10
2.1.3	Temporele verdeling	10
2.1.4	Definitie processen	11
2.2	Meetgegevens	12
2.2.1	Overzicht	12
2.2.2	Meest bruikbare gegevens voor modellering	14
2.3	Modellen	15
2.3.1	Algemeen	15
2.3.2	Enkele voorbeelden van modeltoepassing voor verspreiding van plastics	15
2.3.3	Software	17
3	Verrijkte effectketens per vraag	20
3.1	Inleiding	20
3.2	Toelichting methode verrijkte effectketen	20
3.3	Selectie vragen voor inzet numerieke modellering	21
3.4	Verrijkte effectketens per (deel)vraag	22
3.4.1	Verdeling zwerfafval over riviercompartimenten (vraag 2a)	22
3.4.2	Aanspoeling op rivieroever (vraag 2b)	23
3.4.3	Verspreiding zwerfafval in riviercompartimenten (vraag 3)	24
3.4.4	Vracht zwerfafval richting zee (vraag 6)	25
3.4.5	Bronnen zwerfafval in Rijkswateren (vraag 8)	26
3.5	Overeenkomst in effectketens per vraag	27
3.5.1	Kennisleemtes	27
3.5.2	Voorstellen voor kennisontwikkeling	29
4	Numerieke modelopties	31
4.1	Algemeen	31
4.2	Lange termijn (2027)	32

4.3	Korte termijn: landsdekkend bron-naar-zee model	32
4.3.1	Algemeen	32
4.3.2	Databehoefte	34
4.3.3	Kennisleemtes	35
4.3.4	Benodigde aanpassing software	35
4.3.5	Schematisaties	35
4.4	Korte termijn (2023): Nieuwe Maas model met 3-dimensionaal deeltjestransport	35
4.4.1	Algemeen	35
4.4.2	Databehoefte	36
4.4.3	Kennisleemtes	36
4.4.4	Benodigde aanpassing software	36
4.4.5	Schematisaties	36
4.5	Overzicht opties en kosteninschatting	36
4.6	Discussie	37
5	Literatuuroverzicht	38

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het is momenteel niet bekend hoeveel zwerfafval Nederland binnenkomt via rivieren, hoeveel erbij komt in de Nederlandse rivieren, hoeveel met de stroming in rivieren en estuaria wordt getransporteerd en welk gedeelte van dit zwerfafval uiteindelijk in zee terecht komt. Om deze balans beter te begrijpen is structurele monitoring nodig in de grote Nederlandse rivieren. Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS WV) werkt in opdracht van het ministerie van Infrastructuur & Waterstaat (I en W) aan een advies voor een structureel monitoringsprogramma voor plastic zwerfafval. Dit advies is eind 2023 gereed en adviseert over structurele monitoring vanaf 2024. Het doel van het ontwikkeltraject tot en met 2023 is om met onderzoeks- en pilotprojecten te komen tot een uitvoerbare, betrouwbare, kostenefficiënt en gestandaardiseerde monitoringssystematiek voor zwerfafval liggend op oevers, drijvend op het wateroppervlak en zwevend in de waterkolom van rivieren.

Momenteel ligt de focus op het verzamelen van monitoringsdata door middel van handmatige metingen, zoals netmetingen en brugtellingen. Nieuwe technologieën worden verkend om in de toekomst gestandaardiseerd toe te gaan passen. Numerieke modellen kunnen extra context geven aan de handmatig (en later automatisch) verzamelde meetgegevens van zwerfafval. Voorbeelden zijn dat met een numeriek model bron-aanpak maatregelen verkend kunnen worden, meetgegevens geëxtrapoleerd kunnen worden naar delen van de waterkolom waar geen gegevens zijn verzameld of trends in transport voorspeld kunnen worden. RWS WV heeft Deltares gevraagd om te verkennen hoe zulke modellen precies kunnen worden toegepast, welke modellen er al zijn en wat er nodig is aan kennis om deze modellen (verder) te ontwikkelen.

1.2 Doel

Het **doel van deze verkenning** is om inzicht te krijgen in:

- 1) hoe numerieke modellen kunnen bijdragen aan het beantwoorden van de 8 hoofdvragen.
- 2) welke kennis nodig is om deze modellen te ontwikkelen. Wanneer de relevante kennis niet beschikbaar is, wordt beknopt aangegeven hoe deze kan worden verkregen.

1.3 Huidige beleids- en beheersvragen

Voor het op te zetten monitoringsprogramma zwerfafval rivieren staan 8 hoofdvragen vanuit beleid en beheer centraal. De meetgegevens die worden verzameld, en de modelresultaten, moeten bijdragen aan het beantwoorden van deze 8 hoofdvragen en bijbehorende deelvragen:

1. Hoe ziet een monitoringsmethodiek voor plastic zwerfafval in rivieren er uit?
 - A. Op het wateroppervlak, op de rivieroevers en in de waterkolom?
 - B. Hoe kan data effectief worden opgeslagen en geanalyseerd?
2. Hoeveel plastic zwerfafval wordt getransporteerd *in* de rivieren?
 - A. Drijvend en in de waterkolom?
 - B. Hoeveel spoelt er aan op de rivieroevers?
3. Waar komt het plastic zwerfafval vooral voor? (Waar zijn hotspots?)
4. Wat is de samenstelling van plastic zwerfafval in rivieren?

5. Wat zijn andere inventarisatiestrategieën?
 - A. Wat zijn technologieën die huidige inventarisatiestrategieën (handmatig tellen, visueel waarnemen) kunnen verbeteren?
 - B. Kunnen andere databronnen worden gebruikt om inzicht te krijgen in zwerfafval? (bijvoorbeeld *Citizen Science*, data uit huidige MWTL monitoring, externe initiatieven)
6. Hoeveel zwerfafval wordt er getransporteerd naar zee?
7. Wat is de CROW beeldkwaliteit van plastic zwerfafval op oevers in beheer van RWS?
8. Wat zijn de bronnen van zwerfafval in de Rijkswateren?

Rijkswaterstaat heeft aangegeven dat de volgorde van deze vragen willekeurig is, en dat het duidelijk is dat vraag 8 over bronnen bepalend is voor veel van de andere vragen. Hierbij merken we op dat 'bron' hier gebruikt wordt als 'emissie naar het oppervlaktewater'. Bron wordt in de literatuur ook vaak gebruikt als 'afval dat in het milieu terecht komt'. Afval dat als bron in een stroomgebied terecht komt, zal pas na afspoeling een emissie naar het oppervlaktewater worden. Wanneer we bron in deze verkenning gebruiken, geven we context zodat duidelijk is welke van de twee betekenissen wordt bedoeld.

Bij vraag 3 kan het gaan om een grote hoeveelheid zwerfafval op de oever ten opzichte van omliggende oevers, of net zo een locatie waar de concentratie in het water (drijvend of in de waterkolom) hoog is ten opzichte van de omgeving. Daarnaast heeft Rijkswaterstaat aangegeven dat zij geïnteresseerd zijn in een inschatting van het effect van een (bron)maatregel.

1.4 Context

In het kader van het monitoringsprogramma zijn verschillende studies uitgevoerd gericht op Nederlandse rivieren. Van Emmerik en Vriend (2021) hebben een routekaart uitgewerkt. De routekaart maakt de samenhang tussen doelen, openstaande vragen en projecten expliciet. De routekaart maakt inzichtelijk hoe openstaande vragen en doelen in verband staan met het niveau van monitoring. Dit kan vervolgens gebruikt worden om concrete projecten te formuleren, prioriteren en evalueren.

Enkele projecten geformuleerd in de routekaart zijn reeds gestart. De Weerd en Verstegen (2022) hebben een overzicht gegeven van de potentie van nieuwe meettechnieken. Zij hebben technologische meettechnieken in kaart gebracht die potentie hebben om te kunnen worden ingezet voor zwerfafvalmonitoring langs en in de rivieren en mogelijk de handmatige monitoring vanaf bruggen en met netten in de toekomst kunnen vervangen.

1.5 Afbakening

In lijn met het ontwikkeltraject van het monitoringsprogramma zwerfafval rivieren is deze verkenning als volgt afgebakend:

- a) We beschouwen alleen rivieren en estuaria in het Nederlands hoofdwatersysteem. Meren, kanalen en de Noordzee blijven buiten beschouwing.
- b) De compartimenten uiterwaarden en waterbodems vallen buiten de scope, omdat het wateroppervlak en de waterkolom daaronder en de oever zijn geselecteerd voor het monitoringprogramma. De oever definiëren we hier als de strook land direct naast de rivier, terwijl de uiterwaard het gehele gebied van rivier tot winterdijk bestrijkt. De locatie van de oever kan variëren met de waterstand.
- c) We beschouwen de gehele diversiteit van zwerfafval vanaf een grootte van 5 mm, maar gaan niet specifiek in op de plastic halffabricaten pellets (vaak 1-5 mm groot).

- d) Uiteindelijk zullen modellen voor de verspreiding van zwerfafval zoveel mogelijk opgebouwd worden uit de bouwblokken die beschikbaar zijn binnen het waterkwaliteitsmodelinstrumentarium van Rijkswaterstaat. In deze verkenning is niet beschouwd hoe de modellering van zwerfafval het beste kan worden opgebouwd.

1.6 Aanpak

Voor deze verkenning zijn verschillende stappen doorlopen:

1. Als eerste hebben we de meest relevante bestaande kennis, meetgegevens en modellen samengevat (hoofdstuk 2).
2. Om doel 1 (zie hoofdstuk 1.2) te bereiken hebben we de mogelijkheden verkend om op basis van bestaande software en modellen extra context of verdieping te geven aan de meetgegevens (hoofdstuk 2 en 4).
3. Voor elk van de 8 vragen (hoofdstuk 1.3) is aangegeven of modellen op basis van bestaande software van waarde kunnen zijn in de beantwoording. **Uitgangspunt** was hierbij de huidige handmatige monitoring die wordt uitgevoerd voor drijvend zwerfafval, zwerfafval zwevend in de waterkolom en zwerfafval op rivieroeveren (hoofdstuk 3).
4. Om doel 2 te bereiken hebben we voor de hoofdvragen waarbij modellering het meest toevoegt, een verrijkte effectketen opgezet (hoofdstuk 3).
 - A. Deze methodiek is ontwikkeld binnen het Kennis Primaire Processen Beheer Onderhoud en Ontwikkeling (KPP BOO) Waterkwaliteitsmodelschematisaties in het kader van *Good Modelling Practice* (Van Waveren et al., 1999).
 - B. In verrijkte effectketens staan de processen die leidend zijn voor een gekozen doelvariabele (bijvoorbeeld transport naar zee [kg/s]). Het belang van processen en ook de mate van beschikbare kennis over ieder proces is aangegeven. Op basis hiervan is geëvalueerd of een bestaand model al geschikt is, of dat een bepaalde ontwikkeling nodig is.
5. Voor de langere termijn (2027) zijn mogelijkheden opgesomd, gegevensbehoeften beschreven en benodigde modelontwikkeling samengevat. Daarnaast is voor belangrijke processen die niet goed bekend zijn, beknopt aangegeven hoe de kennis kan worden verkregen. In overleg met Rijkswaterstaat is gekozen om twee opties voor toepassing van een numeriek model uit te werken voor de korte termijn (2023, hoofdstuk 4).

Met andere woorden, deze verkenning beschrijft concrete opties, waarmee modellering op korte termijn een bijdrage kan leveren aan beantwoording van een selectie van de 8 hoofd beleids- en beheersvragen. Voor de langere termijn verschaft deze verkenning inzicht in de kennisleemten voor modellering en geeft het beknopt activiteiten weer om de belangrijkste kennisleemten op te vullen.

2 Samenvatting bestaande kennis, meetgegevens en modellen

2.1 Kennis

2.1.1 Samenstelling en risico

Veel zwerfafval bestaat geheel of voor een deel uit plastic. Plastic is een licht en goedkoop materiaal, waarmee eenvoudig allerlei vormen gemaakt kunnen worden. Bovendien slijten plastic voorwerpen niet of nauwelijks. Vanwege deze redenen wordt jaarlijks steeds meer plastic gebruikt. Een gedeelte hiervan komt in het water terecht als plastic zwerfafval. In het water vormt het zwerfafval een bedreiging voor de aquatische ecologie en biodiversiteit. Vooral wanneer het zwerfafval degradeert en fragmenteert tot kleinere deeltjes (nano- en microplastics, beide kleiner dan 5 mm) kan het naast een milieurisico ook humane gezondheidsrisico's vormen. Deze kleine plastic deeltjes kunnen bijvoorbeeld via drinkwater in het menselijk lichaam terecht komen, waar zij mogelijk een gezondheidsrisico vormen (Vethaak en Legler, 2021).

Rivieren zijn belangrijke aanvoerroutes van zwerfafval naar zee. Het plastic zwerfafval (hier gedefinieerd als een stuk afval met een lengte groter dan of gelijk aan 5 mm, ook wel macroplastic genoemd) wordt met de stroming en onder invloed van de wind getransporteerd en kan achter blijven of tijdelijk verblijven op de oever, de bodem of bijvoorbeeld in een waterbouwkundige constructie (bijvoorbeeld een krib of een dam).

2.1.2 Van bron naar zee

Wanneer zwerfafval afspoelt naar een rivier (wij noemen dit emissie in deze verkenning), kan het getransporteerd worden naar zee. Van Emmerik en Schwarz (2020) geven een overzicht van de kennis over transport en de verspreiding over compartimenten weer. Meijer et al. (2021) geven aan dat slechts een klein deel (2%) van de plastics die op het land of in het water in een stroomgebied terecht komen naar zee wordt getransporteerd. Van de bron op land kan een stuk zwerfafval via verschillende compartimenten in het watersysteem worden afgevoerd naar de zee. In ieder van deze compartimenten kan het stuk plastic achterblijven (Van Emmerik et al., 2022). Hierbij dient vermeld te worden dat dit is geschat op basis van een wereldwijd model dat is gekalibreerd op basis van beschikbare metingen van de emissie naar zee. Het aantal studies waarbij de emissie is gebaseerd op zowel de flux nabij het oppervlak als de flux in de waterkolom is beperkt. Op de schaal van 3 Europese rivieren, hebben Roebroek et al. (2022) een statistische analyse uitgevoerd om na te gaan hoe het kleine transport naar zee verklaard kan worden. Ze laten zien dat er grote onzekerheden bestaan in dit soort globale modellen, vooral door onzekerheid in parameterwaarden van het model en door onzekerheid van omrekening van waargenomen aantal naar massa.

2.1.3 Temporele verdeling

De variatie van het zwerfafvaltransport in de tijd in een rivier kennen we nog niet goed. Om goed het effect van een toename in afvoer op de concentratie van zwerfafval in de rivier te kunnen bepalen, zijn hoogfrequente (bijvoorbeeld dagelijkse) metingen nodig. Er zijn aanwijzingen dat het transport toeneemt met afvoer (Van Emmerik en Schwarz, 2020; Van Emmerik en de Lange, 2022), maar de relatie tussen concentratie en afvoer is nog grotendeels onbekend.

2.1.4 Definitie processen

Voor veel van de gestelde beleids- en beheersvragen is transport van plastic zwerfafval in de rivier en het estuarium van belang. De belangrijkste processen voor het transport zijn advectie, stijgen (of zakken, i.e. bezinking) van het zwerfafval, menging door turbulentie waardoor het zwerfafval blijft zweven, invangen in vegetatie, resuspensie en depositie (Buschman et al., 2019). Alleen voor zwerfafval dat drijft, is transport door wind van direct belang. Wind kan ook indirect transport van zwerfafval beïnvloeden vanwege het effect van de wind op de stroming (vertikale snelheidsprofiel of horizontale circulaties). We definiëren hier de processen, gebruikmakend van de definities gegeven in Buschman et al. (2018). Bij het transport van plastic zwerfafval in de waterkolom van rivieren en estuaria zijn de volgende processen bepalend:

1. *Advectie*: Transport van plastic zwerfafval met de stroming mee.
2. *Bezinking*: Het bezinken en weer bovendrijven van een stuk plastic zwerfafval door dichtheid verschillen met het water. Proces is afhankelijk van de grootte, dichtheid en vorm van het stuk plastic zwerfafval.
3. *Sedimentatie*: Bezinken van een stuk plastic of sedimentdeeltje op de bodem vanuit de waterkolom; is afhankelijk van de grootte, dichtheid en vorm van de deeltjes of vlokken (aggregaten).
4. *Resuspensie*: het opnieuw in suspensie komen in de waterkolom van plastics en sedimentdeeltjes door stroming en golven.
5. *Invang en aanspoeling*: Plastic blijft achter op de oevers, achter obstakels en in vegetatie en hoopt daar (tijdelijk) op. De hoeveelheid plastics die op de oever aanspoelt en daar achterblijft als het waterpeil weer zakt is afhankelijk van de bodem ruwheid. Bij de invang in vegetatie speelt de bedekkingsgraad een rol.
6. *Remobilisatie*: Door golfwerking of stroming wordt een stuk zwerfafval losgemaakt van de oever en opgenomen in de waterkolom van de rivier. Tijdens een hoogwater en overstroming van uiterwaarden ken remobilisatie tot een aanzienlijke flux leiden (Climo et al., 2022). Onder remobilisatie valt ook het loskomen van plastic zwerfafval ingevangen in vegetatie.
7. *Retentie*: Netto resultaat van bovenstaande processen, sedimentatie versus resuspensie, en invang/aanspoeling versus remobilisatie.
8. *Verwijdering*: Invang en verwijdering van zwerfafval uit waterkolom met vangsystemen en verwijdering van zwerfafval van oevers tijdens opruimacties en oevermonitoring.

Processen die effect hebben op de dichtheid en andere eigenschappen van het plastic zwerfafval en daarmee op de sedimentatie en resuspensie zijn:

9. *Biofouling*: Vorming van een laag biologisch materiaal op plastic deeltjes waardoor de eigenschappen (dichtheid, grootte, valsnelheid) kunnen veranderen.
10. *Veroudering*: Onder invloed van UV-licht en het uitlogen van additieven wordt plastic brozer; Biofouling is een vorm van veroudering. Veroudering is een van de degradatie processen.
11. *Degradatie*: Verandering van het oppervlakte van een plastic deeltje onder invloed van afbraakprocessen door micro-organismen, UV-licht en fysische krachten (zoals door golfslag en door botsing met stenen of de bodem).
12. *Fragmentatie*: Het uiteenvallen van een plastic deeltje in kleinere deeltjes door mechanische afbraak. Fragmentatie van een stuk plastic zwerfafval resulteert mogelijk in meerdere microplastics.

Processen die de uitwisseling tussen de mobiele en immobiele waterbodemplagen bepalen zijn:

13. *Omwoeling*: Omwoelen van de bodem door bodemleven (benthos) of door bodemtransport als gevolg van verplaatsing van duinen en ribbels. Zwerfafval kan hierdoor dieper in de bodem terecht komen in de immobiele laag, waardoor resuspensie niet (snel) meer zal optreden.

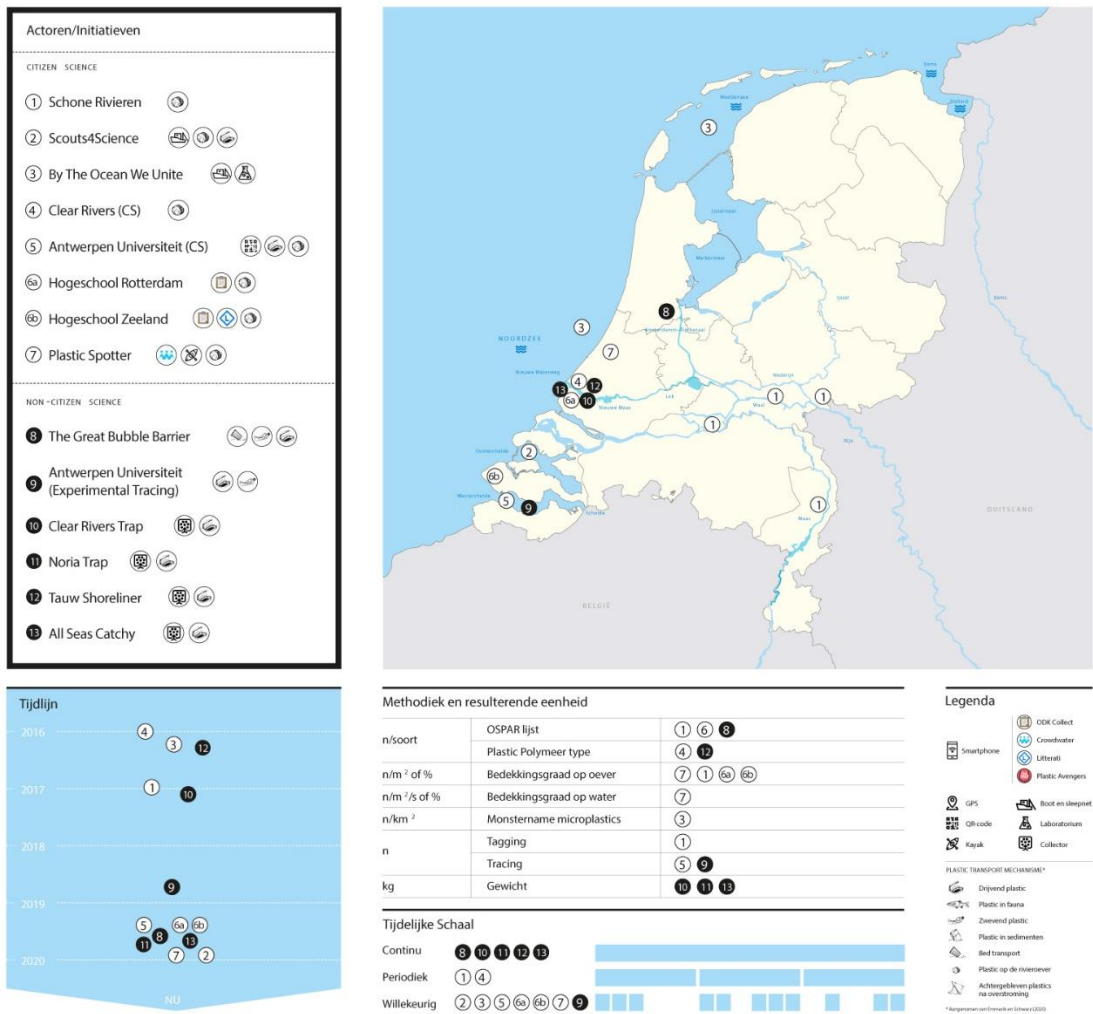
14. *Verstoring*: Omwoelen door menselijke activiteit, zoals baggeren en storten.

De bovenstaande processen spelen allemaal een rol bij het transport van zwerfafval en de verdeling van zwerfafval over rivier- en estuaria compartimenten. De processen 9-12 kunnen de fysische eigenschappen van zwerfafval in het water (zoals dichtheid, aantal en grootte) beïnvloeden. De verandering wordt groter hoe langer zwerfafval in het water verblijft. Door fragmentatie kan zwerfafval uiteenvallen in microplastics. Het belang van de processen wordt uitgewerkt in de verrijkte effectketens (hoofdstuk 3).

2.2 Meetgegevens

2.2.1 Overzicht

Binnen de Nederlandse stroomgebieden zijn er verschillende initiatieven op het gebied van zwerfafval monitoring. Recent hebben De Vries en Van 't Hoff (2020) een overzicht gemaakt van de verschillende actoren en initiatieven die zwerfafval hebben gemonitord in het water (Figuur 2-1). Wij maken gebruik van dit overzicht van meetgegevens tot en met 2020, en voegen daarna enkele initiatieven toe van na 2020.



Figuur 2-1 Overzicht van de verschillende zwerfafval meetgegevens in Nederlands stroomgebieden tot en met 2020. Actoren en initiatieven zijn geïnclassificeerd op basis van de ruimtelijke (in de originele poster ook in de dwarsdoorsnede en op schaalniveau) en tijdelijke schaal, methodiek en resulterende eenheid van de data zwerfafval gegevens. Bron: De Vries & Van 't Hoff (2020)

Aanvullend op dit overzicht tot en met 2020, zijn langs de Rijn en Maas in 2021 op 7 locaties oppervlaktemetingen uitgevoerd aan de hand brugtellingen. Hiermee is de hoeveelheid drijvend zwerfafval aan het wateroppervlak bepaald (van Emmerik en de Lange, 2022). Naast de periodieke oppervlaktemetingen uit 2021 zijn er in de Rijn en Maas ook incidentele netmetingen in de waterkolom (inclusief bij de bodem) uitgevoerd (van der Wal et al., 2015, Oswald et al. 2020, Collas et al. 2021).

In de Rijnmaasmonding heeft Allseas incidenteel ruim 30 netmetingen uitgevoerd in 2018. Deze netmetingen van de Nieuwe Maas zijn uitgewerkt in Blondel en Buschman (2022). Naast continuering van de vangsystemen van Clear Rivers, Tauw en Allseas in havens van de Rijnmaasmonding en The Great Bubble Barrier op de overgang van de Amsterdamse grachten naar het IJ (Figuur 2-1), heeft Allseas Catchy2 geïnstalleerd onder de Erasmusbrug in mei 2022. In tegenstelling tot veel andere vangsystemen, ligt dit vangststelsel in de stroming en is wind van minder groot belang voor welk deel van het zwerfafval ingevangen wordt. Ongeveer maandelijks wordt Catchy2 geleegd en soms wordt de vangst gesorteerd.

Daarnaast zijn ook in 2021 en 2022 bruikbare oevermonitoring meetgegevens beschikbaar vanuit *citizen science* initiatieven, zoals Schone Rivieren, Scouts4Science en Plastic Spotter. Rijkswaterstaat monitort vanaf 2022 op 40 locaties langs de grote rivieren, waar Schone rivieren al een tijdserie heeft opgebouwd. Deze projecten hebben de afgelopen jaren periodieke oevermetingen (elke 3-6 maanden) uitgevoerd. Daarnaast monitort Rijkswaterstaat visueel de vervuiling van oevers, en wordt gewerkt aan een methode om dit op basis van beeldkwaliteit te doen. De klassen kunnen niet direct gerelateerd worden aan een hoeveelheid items per oevertraject, maar bieden wel een hoge ruimtelijke dekking.

In tegenstelling tot de gebruikelijke monitoringperiode van 3-6 maanden, geeft Grosfeld (2022) resultaten van 21 keer monitoren in 3 maanden. Hij heeft iedere keer de locatie van een individueel stuk zwerfafval ingemeten, waaruit bleek dat de aanspoeling op de oever vrij constant was. Na 2 overstromingen van de oever was vrijwel al (>99%) het gemarkeerde zwerfafval niet meer aanwezig op de oorspronkelijke locatie.

Een studie in Duitsland heeft voor de Elbe, Weser and Eems rivieren in 4 compartimenten gemonitord (Schöneich-Argent et al., 2020). Zij vonden op oevers, in de oppervlaktelaag en in de waterkolom een grote temporele variatie. Omdat zij dichtbij zee hebben gemonitord, was er getij variatie. Ze kozen om tijdens eb te monitoren, en toonden dat extrapolatie in de tijd op met aantal methoden een substantieel verschillend resultaat gaf. Alleen in de bodemonsters vonden ze minder ruimtelijke en temporele variatie, waardoor zij stelden dat deze methode mogelijk het meest representatief is in een rivier of estuarium met getij.

Ook vanuit het buitenland zijn er monitoringgegevens beschikbaar. Plastic Pirates voert regulier (*citizen science*) metingen uit op oevers langs rivieren en kleine wateren. Deze metingen worden sinds 2016 uitgevoerd in Duitsland (Kiessling et al., 2019) en zijn sinds 2022 uitgebreid naar heel Europa.

2.2.2 Meest bruikbare gegevens voor modellering

Afgezien van het precieze doel waarvoor een numeriek model wordt ingezet, zijn voor de kalibratie en validatie structurele en regelmatige monitoringsgegevens van belang. Voor de modelrandvoorwaarden van de emissies zijn metingen nodig (tijdseries, dus een structurele en regelmatige meting), en ook voor de verificatie van modelresultaten (liefst met tijdseries, maar kan ook met een incidentele campagne eventueel). Een aantal monitoringsinitiatieven hebben een regelmatig interval. Met deze gegevens kan een flux bepaald worden. Welke gegevens precies nodig zijn om een model te kalibreren en te verifiëren, kan pas worden uitgewerkt als het specifieke doel voor de inzet een model gesteld is.

Tabel 2.1 geeft een overzicht van de over het algemeen meest bruikbare huidige meetgegevens van zwerfafval nabij de rivier voor kalibratie en validatie van modellen. In het overzicht is de bron naar land en water, het betreffende riviercompartiment, de periode/interval waarover gemeten is en de eenheid weergegeven. Er is gekeken naar beschikbare informatie voor de volgende compartimenten in de rivier (net als voor de routekaart en volgens Van Emmerik en Schwarz, 2020):

- Rivieroever
- Wateroppervlak
- Waterkolom
- Sediment/waterbodem

Tabel 2.1 Meest bruikbare huidige meetgegevens van zwerfafval in rivieren en estuaria in Nederland voor modellering.

Monitoring	Compartiment	Periode (interval)	Eenheid (typisch)
Schone rivieren op ~200 plots (en ook Scouts4Science en Plastic Spotter, Plastic Pirates)	Oever	~5 jaar (3-6 maanden)	Aantal per plot (+ kg sinds 2021)
Rijkswaterstaat op 40 locaties langs grote rivieren	Oever	1 jaar (3 maanden)	Aantal per plot + kg
Brugtellingen Rijn en Maas: 7 locaties (van Emmerik en de Lange, 2022)	Wateroppervlak	1 jaar: 2021 (Maandelijks)	Aantal + kg per uur
Netmetingen Rijn en Maas (van der Wal et al., 2015, Oswald et al. 2020, Collas et al. 2021) en Nieuwe Maas (Blondel en Buschman, 2022)	Waterkolom (incl. bij bodem)	Incidenteel	Aantal + kg per minuut
Vangsystemen in havens (van Tauw, Clear rivers, Noria en Allseas)	Wateroppervlak (soms ook in waterkolom)	Incidenteel (maand voor Catchy, per leging Shoreline)	Aantal + kg per periode
Vangsystemen in hoofdgeul: Catchy2 van Allseas bij Erasmusbrug	Wateroppervlak (wateroppervlak +kolom)	Een jaar (maand)	kg per maand [soms gesorteerd]

2.3 Modellen

2.3.1 Algemeen

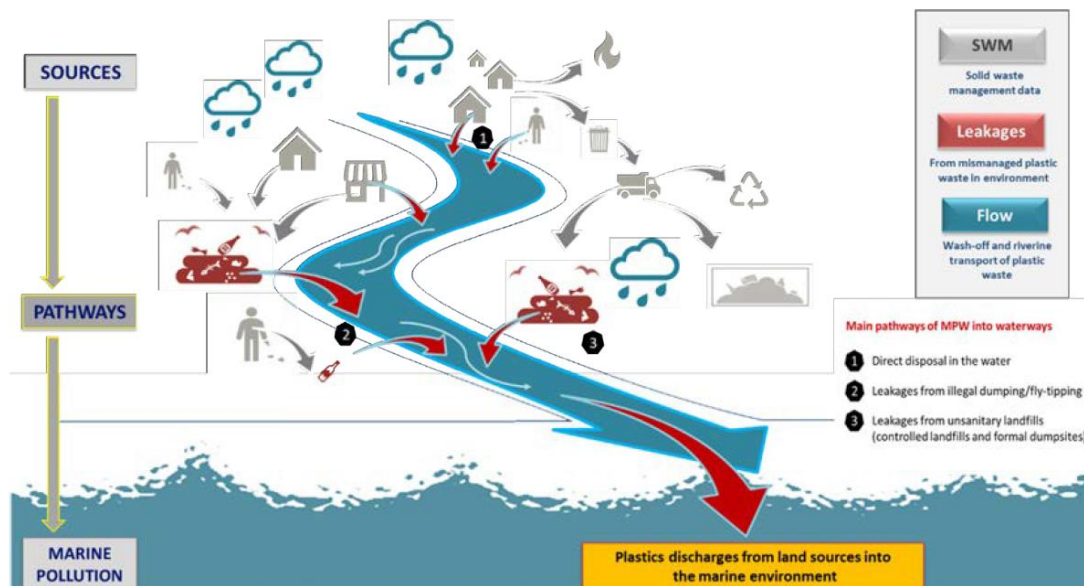
Grofweg is een numeriek model een set rekenregels (opgenomen in software) die worden doorgerekend voor een weergave van een gebied (schematisatie) op een rooster. De randvoorwaarde op de randen van het gebied, maar ook bijvoorbeeld de wind, bepalen grotendeels de dynamiek in de tijd. Voor waterkwaliteitstoepassingen in Nederland onderhouden Rijkswaterstaat en Deltares een set schematisaties¹, welke samen het waterkwaliteitsmodelinstrumentarium worden genoemd.

Numerieke modellen kunnen een verklaring geven van een trend in metingen, in ruimte en tijd. Als een model goed is opgebouwd, dan kan het ook worden ingezet om te voorspellen welke maatregelen het meest effect sorteren. Modellen zijn een vereenvoudiging van de werkelijkheid, en zullen dus gevalideerd moeten worden met meetgegevens. Goede modellen geven de mogelijkheid om een volledig overzicht te krijgen van de belangrijkste processen en fluxen, iets wat met metingen in het algemeen niet mogelijk is. De interactie tussen meetgegevens en modelresultaten kan ook worden gebruikt om richting te geven aan de meetstrategie (wat moet je waar en op welke momenten meten).

2.3.2 Enkele voorbeelden van modeltoepassing voor verspreiding van plastics

Voor de Indonesische eilanden is een modelaanpak toegepast waarbij gegevens over afval zijn verzameld, waaruit met hydrologische modellering (WLOW) de afspoeling is bepaald naar het land en het water (Figuur 2-2, Worldbank, 2021). Vanuit deze bronnen kan het zwerfafval worden meegenomen door afspoeling of stroming (WFLOW) en kan het de rivieren bereiken. Zij vonden dat 201-553 kton zwerfafval per jaar wordt afgevoerd vanaf Indonesië naar zee.

¹ [Zuidwestelijke Delta - Informatiepunt Leefomgeving \(iplo.nl\)](https://www.iplo.nl/)



Figuur 2-2 Conceptuele weergave van de model aanpak in Worldbank (2021). Van iedere afvalbron lekt een deel door afspoeling naar het milieu en kan met het water worden meegenomen naar de rivier en uiteindelijk mogelijk de zee.

Voor de Rijn heeft Zillien (2018) in het kader van een stageproject een *Inventarisatie bronnen van plastic in het stroomgebied van de Rijn* uitgevoerd. Het ging vooral om microplastics, maar ook om zwerfafval. Zij heeft D-water quality (toen Delft3D-WAQ) gebruikt in combinatie met een SOBEK-model en ze heeft verschillende soorten plastic onderscheiden.

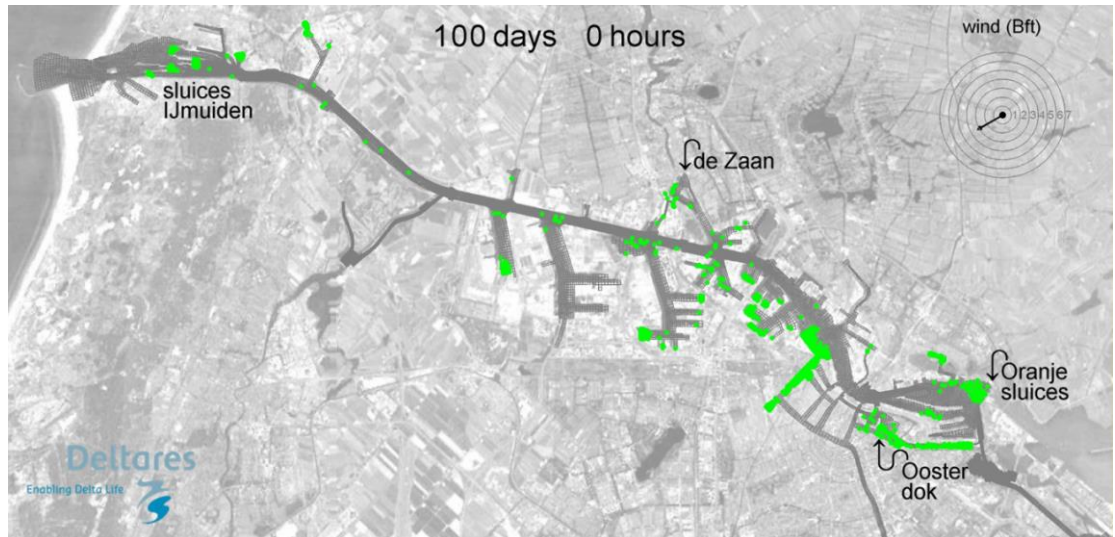
Op kleinere schaal zijn verschillende deeltjesmodellen toegepast (bijvoorbeeld voor de Nieuwe Maas, zie Buschman et al., 2019). Voor de Schelde hebben Everaert et al. (2022) in het kader van het PLUXIN project laten zien met deeltjesmodellering dat plastic zwerfafval met het getij heen en weer beweegt, en vaak stranden op de oever of in het intergetijdegebied. Van deeltjes die worden losgelaten bovenstrooms bereikt maar een klein deel (minder dan 1%) bij de Belgisch-Nederlandse grens. Het estuarium is dus een groot reservoir voor plastic. Het merendeel (> 99%) van de plastic deeltjes die voorkomen stroomopwaarts van de Nederlands-Belgische grens passeert de Scheldemonding niet, en bereikt de Noordzee niet.

In het project *CleanSea* is deeltjesmodellering toegepast met D-particle tracking (toen Delft3D-PART) om de verspreiding van plastic in de Noordzee te bepalen (van der Meulen en Vethaak, 2015; Stuparu et al., 2015). In die studie is onder meer het effect van wind onderzocht op het transport van drijvend plastic. Een vergelijking met waarnemingen bleek niet mogelijk, omdat er veel te weinig waarnemingen waren.

Voor de *Guanabara Bay (Brazilië)* is een operationeel model opgezet om schoonmaakboten aan te sturen. Op basis van D-particle tracking (toen Delft3D-PART) worden voorspellingen geleverd waar de volgende dag de meeste plastics zich zullen ophopen. Er wordt, onder andere, gekeken naar het effect van wind op de verspreiding van (drijvend) plastic. Dit model is ontwikkeld voor de Olympische Spelen van Rio de Janeiro (Deltares, 2015).

In opdracht van Allseas is een studie uitgevoerd in 2019 met een detailmodel van de Nieuwe Maas (Buschman et al. 2019). Deze studie laat onder andere zien hoe plastic zwerfafval is verdeeld in de waterkolom. Ook worden twee verschillende aanpakken van plastictransportmodellering toegelicht, en wordt ingegaan op de verschillen van deze twee aanpakken en wordt aangegeven voor welke toepassing ieder van de aanpakken het meest geschikt is.

Een resultaat van een waterbewegingsmodel en drijvende macroplastics laat zien dat het grote effect van de wind zien in het Noordzeekanaal (Figuur 2-3). De wind blaast het drijvende plastic in de havenbekkens, waar het later in de simulatie niet zo makkelijk meer uitkomt.



Figuur 2-3 Resultaat na 100 dagen van een numeriek stromingsmodel met daarbij een deeltjesmodel in het Noordzeekanaal. De wind heeft de plasticdeeltjes de havens in geblazen.

De modelstudies die zijn opgesomd hebben gemeen dat het gebrek aan referentiemateriaal een validatie van het model heeft bemoeilijkt. Daarom is het bijvoorbeeld niet mogelijk om te beoordelen of meetgegevens met het model te verklaren zijn of dat bepaalde processen in het model onvoldoende zijn weergegeven.

2.3.3 Software

D-Emissions geeft een ruimtelijke en temporele verdeling van emissies van een stof in een stroomgebied. Op basis van woondichtheid kan bijvoorbeeld een hoeveelheid zwerfafval worden geschat per segment op het land. Wanneer dit gekoppeld wordt aan een hydrologisch model, kan berekend worden hoeveel zwerfafval wordt meegenomen en in het water terecht komt. De belangrijkste grondbeginselen voor **D-Emissions** (gekoppeld aan een hydrologische model) zijn:

- Het resultaat is een massabalans en concentratie per segment (rekencel). Dit is vooral nuttig op grotere schaal, bijvoorbeeld een stroomgebied van een rivier.
- De rekeninspanning is gekoppeld aan het aantal segmenten. Omdat dit een grovere ruimtelijke resolutie heeft dan bij andere technieken (D-particle tracking) zijn de berekeningen sneller.
- Het is redelijk goed mogelijk om gedetailleerde en complexe processen tussen stoffen te modelleren, zoals de interactie met zwevende stof.

WFLOW is gedistribueerd hydrologisch model gebaseerd op de topografie die is geprojecteerd op een rooster. Op basis van bodem-, landgebruik- en klimaatgegevens worden de hydrologisch fluxen berekend op iedere gegeven tijdstap. De afvoer wordt bepaald met de kinematische golf aanpak en geeft daarmee een nauwkeurige rivierafvoer. De afvoer kan gekoppeld worden aan onder andere D-water quality en D-Emissions. WFLOW maakt gebruik van de helling van het terrein. Omdat Nederland vlak is, wordt de waterafvoer voor Nederlandse situatie vaak op een andere manier bepaald, zoals een Sobek of D-HYDRO model van Nederland.

SOBEK 2 & 3

Het Landelijk Sobek Model (LSM) is de meest voor de hand liggende keuze voor Nederland om de hydrologie mee te bepalen, en te combineren met een D-Emissions model. Het LSM is gevalideerd voor heel Nederland, inclusief pompen en malen en ander waterbeheer typisch voor Nederland. Het LSM kan gekoppeld worden aan het Landelijk Waterkwaliteits Model, waarmee bronnen van land bepaald kunnen worden. Helaas is LSM momenteel alleen beschikbaar in Sobek 2, waardoor het niet gekoppeld kan worden met D-Emissions. Een upgrade naar Sobek 3 is voorzien, maar zal mogelijk pas afgerond en gevalideerd zijn na 2023.

D-HYDRO is de opvolger van SOBEK, SIMONA (WAQUA, TRIWAQ) en Delft3D 4 om wind, golven, waterkwaliteit en stroming te berekenen. Het rekenrooster is flexibeler dan bij de voorgangers, doordat naast vierhoeken ook driehoeken gebruikt kunnen worden. Het is speciaal ontwikkeld voor kustgebieden, het stedelijke gebied, estuaria en rivieren. D-HYDRO maakt het mogelijk om simulaties te maken van overstromingen, stormvloed, orkanen, golven, sediment transport en morfologie, waterkwaliteit en ecologie. Bovendien kan het de wisselwerking tussen deze processen modelleren.

Op basis van een berekend stroombeeld (met D-HYDRO of voorlopers) zijn er twee benaderingen mogelijk om het transport van plastic zwerfafval te bepalen:

1. Plastics benaderen als losse deeltjes die door de stroming worden meegenomen en die allerlei processen ondergaan. De deeltjesaanpak van **D-particle tracking** is daarvan een voorbeeld. Een deeltje (in het model) staat feitelijk voor een verzameling deeltjes (of een type zwerfafval), niet voor alle stuks zwerfafval afzonderlijk.
2. Plastics benaderen als een (al dan niet) opgeloste stof die processen ondergaat. Dit is de aanpak van **D-water quality** (eerder Delft3D-WAQ), waarbij per rekencel een concentratie wordt bepaald (in tegenstelling tot D-particle tracking, waarmee aantallen worden berekend).

De belangrijkste grondbeginselen voor **D-water quality** zijn:

- Het resultaat is een massabalans en concentratie per segment (rekencel).
 - Dit is een voordeel op grotere tijd en ruimteschalen ten opzichte van deeltjes modelleren, omdat het aantal deeltjes dat je op een grote schaal nodig hebt te groot kan worden.
 - Bronnen moeten worden gegeven als tijdseries.
- De rekeninspanning is gekoppeld aan het aantal segmenten.
- Resultaten worden altijd bepaald op het rekenrooster van de hydrodynamica (ruimtelijke resolutie wordt daardoor bepaald)
- Het is mogelijk om gedetailleerde en complexe processen tussen stoffen te modelleren, zoals de interactie met zwevende stof.

De belangrijkste grondbeginselen voor **D-particle tracking** zijn:

- Het resultaat is de paden van “rekendeeltjes”. De concentraties worden afgeleid uit de massa van de rekendeeltjes per segment (rekencel) in het uitvoerrooster.
- De emissies moeten worden aangeleverd door de gebruiker.
- De rekeninspanning is gekoppeld aan het aantal rekendeeltjes.
- Resultaten zijn in principe onafhankelijk van het rooster (ruimtelijke resolutie kan fijner zijn dan het hydrodynamische rooster)
- De software is eerder voor zwerfafval toegepast in combinatie met 3D stroming die is berekend voor een gestructureerd rooster (cellen zijn vierhoeken). Momenteel bestaat een koppeling met D-HYDRO voor dieptegemiddelde modellen.
 - Er is een concreet plan om de koppeling met 3D D-HYDRO modellen te realiseren in 2023.
 - Onze voorkeur is om de voordelen van D-HYDRO en daarmee ook de meest recente schematisaties te gebruiken. Het 3D Rijnmaasmonding model is bijvoorbeeld in staat om de 3D stroming in takken te berekenen.
- Alleen relatief eenvoudige processen worden gemodelleerd, maar je kunt wel geschiedenis meenemen (veroudering).
- Processen waarin drijfvermogen van materiaal een rol speelt (op basis dichtheden en andere deeltjeseigenschappen) zijn gemakkelijk(er) te implementeren dan in D-water quality.

Een uitgebreidere vergelijking tussen D-water quality en D-particle tracking (voorloper PART) is gemaakt in Buschman et al. (2019).

3 Verrijkte effectketens per vraag

3.1 Inleiding

Voor deze verkenning zijn verrijkte effectketens opgesteld voor de (deel)vragen waarvoor modellen van waarde kunnen zijn in de beantwoording. Aan de hand van de opgestelde effectketens is bepaald welke modelschematisaties geschikt zijn om de vraag te adresseren. In dit hoofdstuk worden de opgestelde effectketens per hoofdvraag weergegeven en toegelicht.

3.2 Toelichting methode verrijkte effectketen

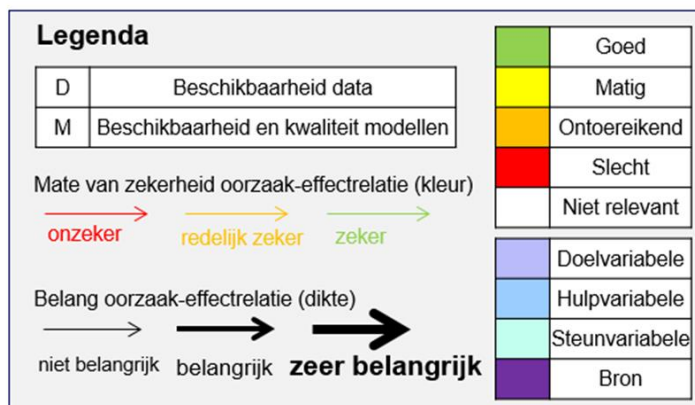
Bij het ontwikkelen van modellen binnen het KPP project BOO Waterkwaliteitsmodelschematisaties worden verrijkte effectketens gebruikt om de processen en variabelen die van belang zijn voor de modellering in beeld te brengen. Het doel van een verrijkte effectketen is:

- De relatie van een doelvariabele, bijvoorbeeld 'concentratie zwerfafval in de waterkolom', met de meest cruciale ondersteunende variabelen (hierna genoemd steunvariabele), bronnen naar het oppervlaktewater en processen incl. relevante hulpvariabelen op geordende wijze weergeven. De vraag (in dit voorbeeld zou dit kunnen zijn 'hoeveel zwerfafval is aanwezig in de waterkolom?') bepaalt wat de doelvariabele is.
- Expliciet maken wat de huidige kennis en datakwaliteit is.

In werkelijkheid zullen er meer relaties bestaan tussen de doelvariabele(n) en aanvullende steun- en hulpvariabelen. De werkelijkheid wordt in een effectketen dus gereduceerd tot de meest essentiële relaties, net zoals in een numeriek model.

De processen die van belang zijn in de effectketen worden weergegeven als pijlen in de keten. De mate van zekerheid en belang van het proces worden ook aangegeven in de ketens (kleur en dikte van pijl). Belangrijke variabelen die van invloed zijn op de processen zijn ook opgenomen in de effectketens en worden hulpvariabelen genoemd. Per variabele of parameter wordt de databeschikbaarheid en mate van 'modelonzekerheid' van de variabelen en/of parameters weergegeven. Parameters die van belangrijke invloed zijn op de processen in de effectketen zijn ook opgenomen en worden hulpvariabelen genoemd. Zie Figuur 3-1 voor een toelichting op de gebruikte termen en kleurcodering. Paarse velden zijn emissies naar het water.

Het belang, de zekerheid, de gegevens- en modelbeschikbaarheid zijn bepaald op basis van expert judgement van de auteurs. Eerder is de verrijking in kleuren en pijldikte voorgelegd en besproken in een grotere groep van experts en belanghebbenden (Buschman et al., 2018 en studies die niet over plastics gaan). Dat verhoogt de objectiviteit van het aangegeven belang, de zekerheid en de beschikbaarheid van modellen en gegevens. Voor deze verkenning is dat niet gebeurd vanwege beperkte (doorloop)tijd. De verrijking kan gezien worden als het oordeel van drie experts op basis van hun kennis over het zwerfafval in het water. In elk geval geven de effectketens de complexe werkelijkheid op een geordende wijze weer.



Figuur 3-1 Weergave van de databeschikbaarheid en kwaliteit (D) en modelkwaliteit en beschikbaarheid (M) met een kleurcodering van rood (=slecht) tot groen (=goed) rechts bovenin. De oorzaak-effectrelaties (processen) worden weergegeven met pijlen. De kleur van de pijlen geeft de mate van zekerheid weer en de dikte het belang van de relatie. De achtergrondkleur van een variabele geeft aan of het een doel-, steun-, hulpvariabele of bron is. De hulpvariabele geeft een conditie weer die invloed heeft op een proces.

3.3 Selectie vragen voor inzet numerieke modellering

Numerieke modellering kan nuttig zijn voor de volgende (deel)vragen:

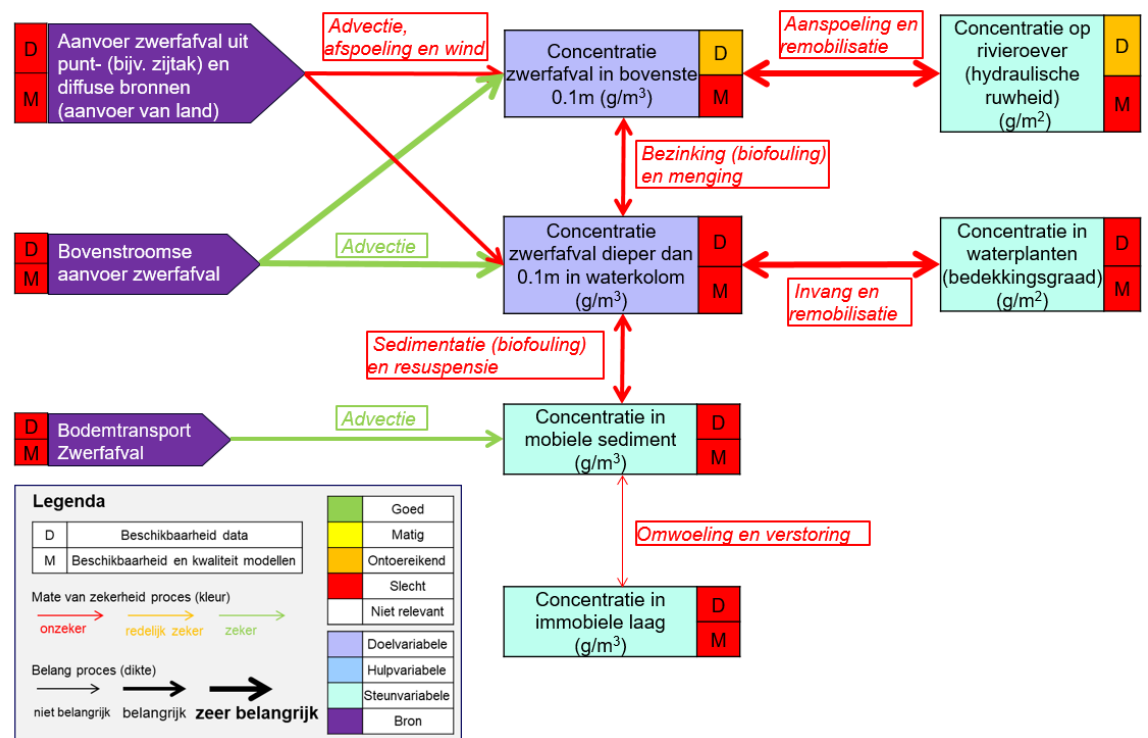
- Deelvraag 2a (“Hoeveel plastic zwerfafval wordt getransporteerd in de rivieren, drijvend en in de waterkolom?”): met behulp van modellering kunnen bijvoorbeeld puntmetingen (met name netmetingen) geëxtrapoleerd worden in de tijd en ruimte om zo een inschatting te kunnen maken voor de gehele dwarsdoorsnede van een rivier. Dit kan meer zicht bieden op de concentratie zwerfafval in de verschillende compartimenten; op oevers, aan het wateroppervlak en in de waterkolom van rivieren. Deze modelaanpak kan ook onderdeel zijn van een methodiek om de (getijgemiddelde) flux nabij het wateroppervlak of in de waterkolom in een dwarsdoorsnede te bepalen (vraag 1a).
- Deelvraag 2b (“Hoeveel spoelt er aan op de rivieroever?”): de uitwisseling tussen oevers en de waterkolom zijn nog niet goed bekend. Numerieke modellen zouden hier mogelijke nieuwe proceskennis kunnen opleveren, bijvoorbeeld door een detailmodel op te zetten en te vergelijken met metingen (Grosfeld, 2022).
- Vraag 3 (“Waar komt het plastic zwerfafval vooral voor? (Waar zijn hotspots?)”): om de verspreiding van zwerfafval op oevers, aan het wateroppervlak en in de waterkolom te bepalen kunnen numerieke modellen een goede bijdrage leveren. Met behulp van numerieke modellen kunnen zones met hoge zwerfafval fluxen of met veel depositie berekend worden.
- Vraag 6 (“Hoeveel zwerfafval wordt er getransporteerd naar zee?”): door alle bronnen naar het stroomgebied in te schatten voor een emissiemodel en deze te vergelijken met kolom- en oppervlaktemetingen (bijvoorbeeld bij vangsystemen) en oevermonitoring gegevens kan berekend worden hoeveel zwerfafval uiteindelijk naar zee wordt getransporteerd.
- Vraag 8 (“Wat zijn de bronnen van zwerfafval in de Rijkswateren?”): is vergelijkbaar met vraag 6. Door alle bronnen naar het stroomgebied in te schatten en deze te vergelijken met beschikbare metingen kunnen eventuele ontbrekende bronnen in kaart worden gebracht.

Voor beantwoording van de overige vragen zien we weinig meerwaarde van numerieke modellering. Voor vraag 4 is analyse van vangsten nodig (sorteren). Een model zou hoogstens kunnen bijdragen hoe de samenstelling van het zwerfafval ruimtelijk is verdeeld, maar momenteel weten we nog onvoldoende van het gedrag van de verschillende typen plastic zwerfafval in de rivier om hier met modellering zinnig aan bij te dragen. Vraag 5 gaat over alternatieven voor sorteren. Numerieke modellering kan bijdragen aan de interpretatie van de meetgegevens per type zwerfafval, maar niet aan de inventarisatie(methode) zelf. Net zo kan numeriek modelleren ook niet bijdragen aan het schatten van de hoeveelheid zwerfafval uit beelden (vraag 7).

3.4 Verrijkte effectketens per (deel)vraag

3.4.1 Verdeling zwerfafval over riviercompartimenten (vraag 2a)

Voor de beantwoording van zowel deelvraag 2a als indirect ook 1a is het van belang om zicht te krijgen op de advectie en uiteindelijke verspreiding van zwerfafval in de waterkolom. Met behulp van modellering kunnen bijvoorbeeld puntmetingen (met name netmetingen) geëxtrapoleerd worden in de tijd en ruimte om zo een inschatting te kunnen maken voor de gehele dwarsdoorsnede van een rivier. Dit kan meer zicht bieden op de concentratie zwerfafval in de verschillende compartimenten; op oevers, aan het wateroppervlak en in de waterkolom van rivieren. De doelvariabelen voor modellering zijn de “concentratie drijvend zwerfafval (in g/m^3 , in bovenste 0.1m)” en “concentratie zwevend zwerfafval in de waterkolom (in g/m^3 , dieper dan 0.1m)”. Figuur 3-2 toont de verrijkte effectketen en deze wordt daaronder toegelicht.



Figuur 3-2 Verrijkte effectketen modellering verdeling van zwerfafval over de verschillende riviercompartimenten, waterkolom en oevers. De doelvariabelen zijn de concentratie drijvend zwerfafval (in g/m^3 , in bovenste 0.1m) en concentratie zwevend zwerfafval in de waterkolom (in g/m^3 , dieper dan 0.1m).

Zwerfafval komt in de waterkolom terecht via diffuse bronnen en puntbronnen. Een voorbeeld van een puntbron is een riolafvalwaterzuivering en een voorbeeld van een diffuse bron is aanvoer vanaf land via wind of afspoeling.

Over deze bronnen zijn nauwelijks gegevens beschikbaar. De relatie tussen de aanvoer van zwerfafval uit diffuse bronnen en puntbronnen en zwerfafval in de waterkolom is van groot belang en onzeker.

Ook de bovenstroomse aanvoer van zwerfafval via advectie onder invloed van stroming en turbulentie en mogelijk scheepsgolven is van groot belang en de relatie tussen deze steunvariabele en de advectie van zwerfafval in de waterkolom is van grote zekerheid. Advectie wordt bepaald door de stroming. De stroomsnelheid bepaald met hydrodynamische modellen komt over het algemeen goed overeen met de werkelijkheid op de schaal van een rekencel. Daarom heeft het proces advectie een groen kleur.

Bezinking en menging hebben een belangrijke invloed op de verticale verspreiding van zwerfafval in de waterkolom en dus op de doelvariabele 'drijvend zwerfafval in de bovenste 0.1m van de waterkolom' en 'zwevend zwerfafval dieper in de waterkolom'.

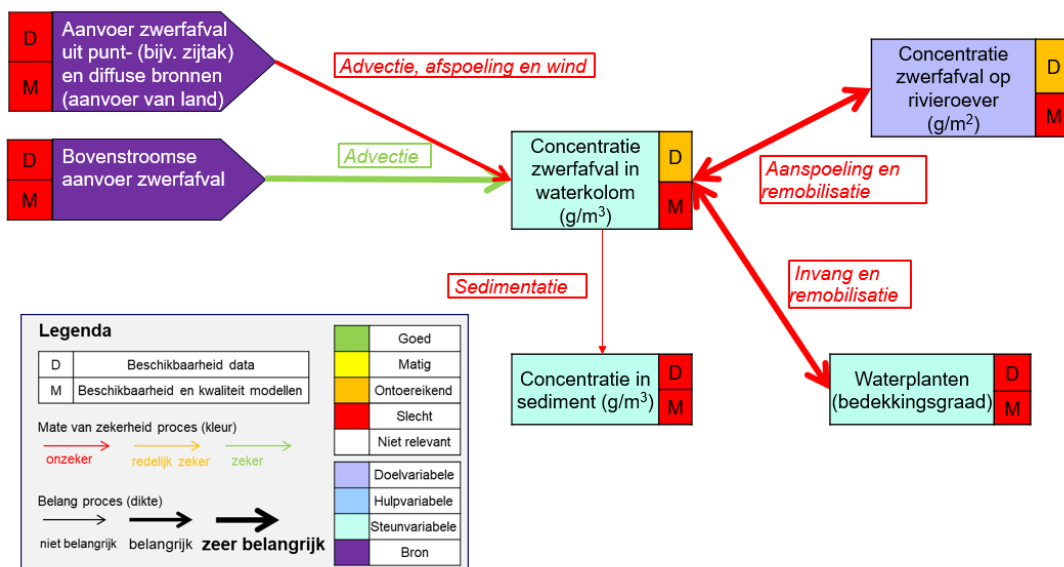
Over de invloed van stroming en turbulentie op bezinking is weinig kennis beschikbaar. De meeste beschikbare kennis is gebaseerd op proeven in stilstaand water (bijvoorbeeld Zaat, 2020). De interactie met zwerfafval is daarmee onzeker. De uitwisseling wordt gestuurd door bezinking en menging onder invloed van turbulentie. Fragmentatie/degradatie en biofouling spelen hierbij ook een rol als gevolg van verandering in de eigenschappen (dichtheid, grootte, valsnelheid). Biofouling is de vorming van een laag biologisch materiaal.

De relatie tussen zwerfafval in de mobiele bodem en zwerfafval in de waterkolom wordt gestuurd door sedimentatie en resuspensie. Beide processen zijn van gemiddeld belang maar de relatie tussen zwerfafval in de waterkolom en mobiele bodem zijn onzeker. Het horizontale bodemtransport is zeker en van gemiddeld belang voor concentratie zwerfafval in de mobiele bodem. De uitwisseling met andere compartimenten is daarentegen onzeker. Het zwerfafval in de mobiele bodem kan via omwoeling en verstoring in de immobiele bodem terecht komen, en kan door dezelfde processen ook weer beschikbaar komen voor resuspensie in de mobiele bodem. De uitwisseling tussen de mobiele en immobiele bodem is onzeker en van relatief klein belang.

Andere potentiële accumulatiezones zijn de rivieroever en onderwater vegetatie. Accumulatie op de rivieroever hangt af van de hydraulische ruwheid en wordt gestuurd door de processen aanspoeling en remobilisatie. Deze processen zijn van een gemiddeld belang, onzekere relatie Oevervegetatie is hier als steunvariabele opgenomen, omdat dit een gemiddeld belangrijke, onzekere relatie heeft met de sedimentatie en resuspensie van en naar de mobiele bodem. Ditzelfde geldt voor accumulatie van zwerfafval in waterplanten als gevolg van invang en remobilisatie.

3.4.2 Aanspoeling op rivieroever (vraag 2b)

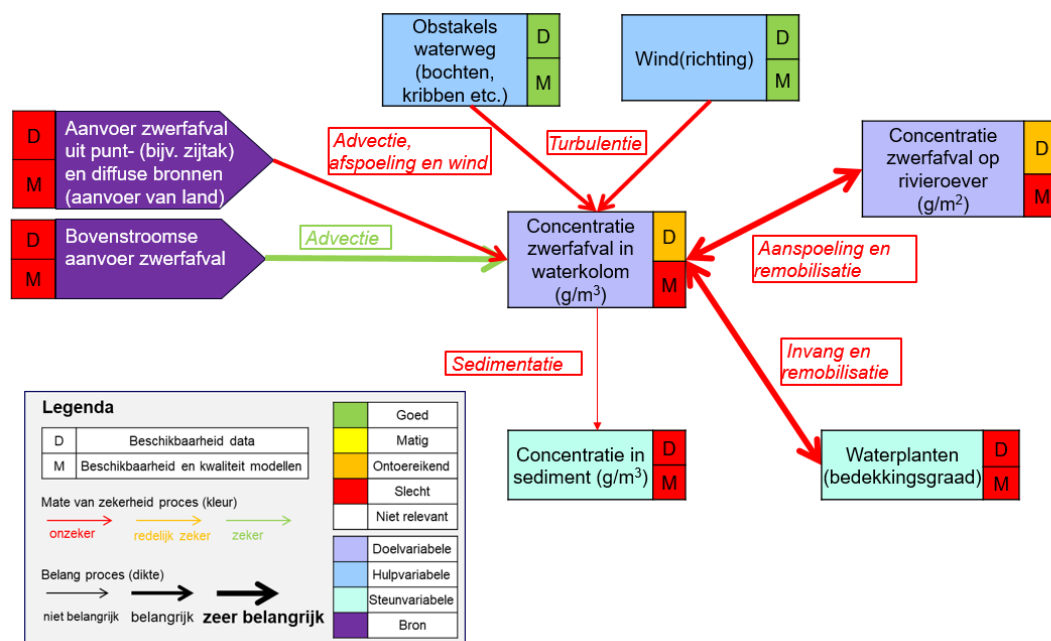
Voor deelvraag 2b, "Hoeveel plastic zwerfafval spoelt er aan op de rivieroever?" is de doelvariabele de "concentratie zwerfafval op de rivieroever (g/m^2)" (Figuur 3-3). Om dit te bepalen is het belangrijk om te weten hoeveel zwerfafval er in de waterkolom zit en hoeveel er uiteindelijk netto accumuleert op de oever. De "concentratie zwerfafval in de waterkolom" is dus een belangrijke steunvariabele. De concentratie in de waterkolom hangt af van de bronnen en de netto sedimentatie. Het belang en zekerheid van de oorzaak-effectrelaties die van invloed zijn op de concentratie in de waterkolom staan beschreven in paragraaf 3.4.1. Om herhaling te voorkomen zijn alleen de veranderingen ten opzichte van Figuur 3-2 toegelicht. Een extra bron die van belang is voor de accumulatie op de rivieroever is de afzetting tijdens overstroming van de uiterwaarden. Deze bron is van gemiddeld belang en onzeker.



Figuur 3-3 Verrijkte effectketen modellering aanspoeling van zwerfafval op rivieroever. De doelvariabele is de concentratie zwerfafval op de rivieroever (in g/m^2).

3.4.3 Verspreiding zwerfafval in riviercompartimenten (vraag 3)

In deze paragraaf worden alleen de veranderingen ten opzichte van de eerdere effectketens beschreven om herhaling te voorkomen. De verrijkte effectketen voor vraag 3 is vergelijkbaar met die voor deelvraag 2b. Bij deze vraag is het van belang om de verspreiding van het zwerfafval in beeld te krijgen om zo de hotspots te bepalen. Met hotspots worden hier zones met hoge zwerfafval fluxen of met veel depositie bedoeld. De doelvariabelen voor beantwoording van deze vraag zijn “concentratie zwerfafval op rivieroever (g/m^2)” en de “concentratie zwerfafval in de waterkolom (g/m^3)” (Figuur 3-4).

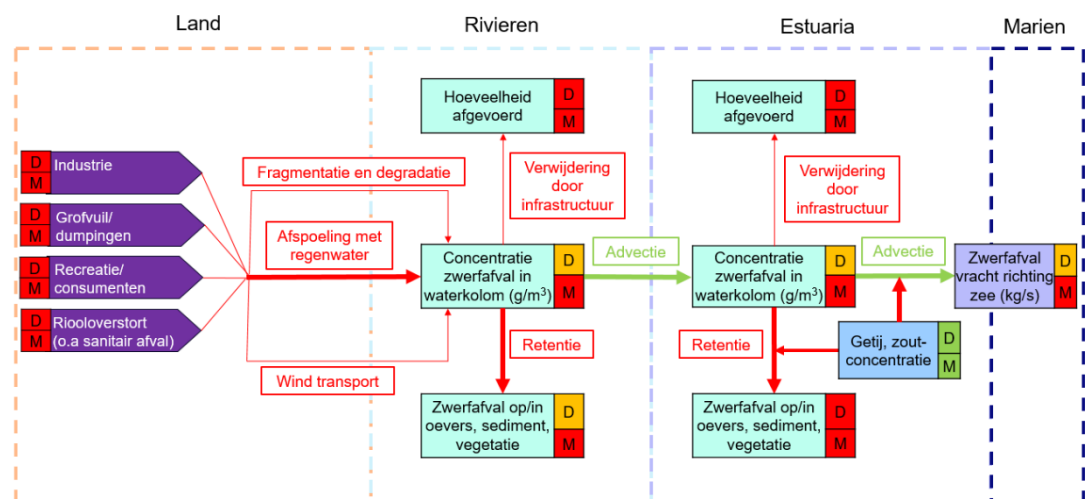


Figuur 3-4 Verrijkte effectketen modellering van verspreiding zwerfafval in waterkolom en op rivieroever. De doelvariabelen zijn de concentratie zwerfafval in waterkolom (in g/m^3) en concentratie zwerfafval rivieroever (in g/m^2).

Stroming en turbulentie hebben een grote invloed op de verspreiding van het zwerfafval in de waterkolom. Deze worden onder andere beïnvloed door obstakels in de waterweg. Uit eerdere modelstudies en monitoringsgegevens is ook gebleken dat wind(richting) hier een belangrijke rol in speelt. Het transport via wind heeft direct invloed op de verplaatsing van het zwerfafval en indirect via oppervlaktestroming. Het effect van deze twee hulpvariabelen (obstakels en wind) is van gemiddeld belang voor de processen turbulentie en stroming. En hoewel er veel gegevens beschikbaar zijn van deze variabelen en ze goed geïmplementeerd zijn in de huidige hydrodynamische model software, is over de interactie van deze variabelen met zwerfafval nog weinig bekend. De zekerheid van oorzaak-effectrelaties is dus klein.

3.4.4 Vracht zwerfafval richting zee (vraag 6)

Een van de overkoepelende hoofdvragen is, "Hoeveel zwerfafval wordt er getransporteerd naar zee?" (vraag 6), met als doelvariabele de "zwerfafval vracht richting zee (in kg/s)" (Figuur 3-5). Om de vracht richting zee te bepalen moet de hele weg die het zwerfafval aflegt, van bron naar land en water tot zee, in kaart worden gebracht en vergeleken worden met kolom- en oppervlaktetingen (bijvoorbeeld bij vangsystemen) en oevermonitoring gegevens. Hiervoor moet een groot gebied gemodelleerd worden. Deze verrijkte effectketen geeft de grote lijn aan van transport vanaf het land via rivieren en estuaria naar zee.



Figuur 3-5 Verrijkte effectketen modellering hoeveelheid zwerfafval dat naar zee getransporteerd wordt. De doelvariabele is de zwerfafval vracht richting zee (in kg/s).

De concentratie in zwerfafval in de waterkolom en de afwenteling naar benedenstrooms is, afhankelijk van bronnen en retentie in rivieren en estuaria. De bronnen vanaf land zijn ingedeeld in de, tot dusver bekend, belangrijkste 4 categorieën. Hierbij is de indeling door Schone Rivieren gehanteerd:

- Industrie
- Grofvuil/dumpingen (bv. illegale dumping van huisvuil)
- Recreatie/consumenten (bv. overlopende prullenbakken of bewust los achterlaten)
- Riooloverstort (bijv. sanitair afval zoals wattenstaafjes)

De bron naar het oppervlaktewater plezier- en beroepsvaart is niet apart opgenomen, hoewel dit een aanzienlijke bron voor plastics naar de vaarweg kan zijn. De omvang en relatieve bijdrage van deze bronnen aan de totale emissie naar het water is nog onbekend. De hoeveelheid zwerfafval uit deze bronnen naar het oppervlaktewater die uiteindelijk in de waterkolom terecht komt is afhankelijk van 3 transportprocessen:

- Fragmentatie en degradatie (kan leiden tot sneller transport richting het oppervlaktewater)
- Wind transport (bijvoorbeeld verwaaiing vanaf kades)
- Afspoeling met regenwater

Alle drie de processen zijn onzeker. Er zijn verschillende hulpvariabelen die invloed hebben op deze transportprocessen denk o.a. aan afstand tot het oppervlaktewater, begroeiing, de helling etc. Deze variabelen zijn niet opgenomen in de effectketen.

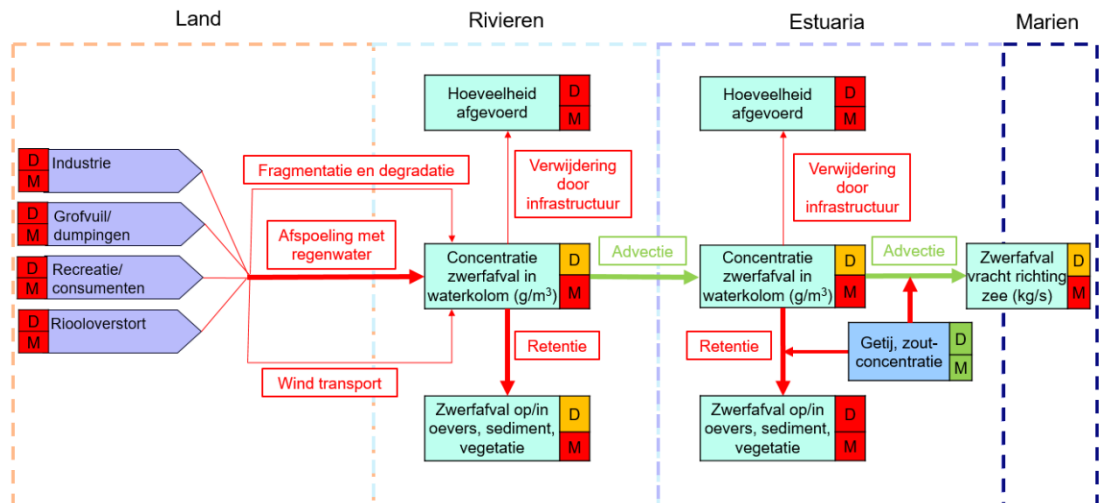
De retentie in rivieren en estuaria is afhankelijk van retentieprocessen zoals sedimentatie/resuspensie, invang/remobilisatie, aanspoeling/remobilisatie (zie eerdere effectketens) hier samengevat onder de noemer retentie, en eventuele verwijdering door infrastructuur. Een deel van het plastic op de oevers wordt opgeruimd en een deel van het zwerfafval in de waterkolom wordt met vangsystemen onderschept en afgevoerd. Deze uitgaande transporten zijn waarschijnlijk van relatief klein belang ten opzichte van de retentie in de rivieren en estuaria. De exacte hoeveelheid die wordt opgeruimd en wordt verwijderd door vangsystemen is nog onbekend.

In estuaria zijn de getij en zoutconcentratie van gemiddeld en groot belang voor respectievelijk de retentie en advectie. Over deze hulpvariabelen is voldoende informatie beschikbaar, maar de interactie met zwerfafval is nog onzeker. De grotere complexiteit door variatie in stroomrichting en verticale dichtheidsstratificatie in vergelijking met rivieren maakt dat het netto effect gemiddeld over het getij onzeker is. Vanwege de lange verblijftijd van zwerfafval in estuaria zou de retentie groter kunnen zijn dan in de rivier.

Zoals beschreven in paragraaf 2.2.2 zijn er vanuit monitoringinitiatieven kolom- en oppervlaktemetingen en oevermonitoring gegevens voor rivieren en estuaria beschikbaar. De ruimtelijke en tijdelijke dekking van deze metingen zijn echter schaars.

3.4.5 Bronnen zwerfafval in Rijkswateren (vraag 8)

In deze paragraaf worden alleen de veranderingen ten opzichte van de eerdere effectketens beschreven om herhaling te voorkomen. De verrijkte effectketen voor vraag 8, "*Wat zijn de bronnen van zwerfafval in de Rijkswateren?*" is vergelijkbaar met vraag 6. Door alle bronnen naar het stroomgebied in te schatten, te bepalen welk deel in het oppervlaktewater terecht komt en deze te vergelijken met beschikbare metingen kunnen eventuele ontbrekende bronnen in kaart worden gebracht. Hiervoor is net als voor vraag 6 het gehele stroomgebied van belang. In tegenstelling tot de effectketen voor vraag 6 (Figuur 3-5), zijn de bronnen vanaf land en water de doelvariabelen (Figuur 3-6).



Figuur 3-6 Verrijkte effectketen voor de inschatting van bronnen naar Rijkswateren.

3.5 Overeenkomst in effectketens per vraag

3.5.1 Kennisleemtes

Kennisleemtes kunnen gaan over gebrek aan kennis over de processen van belang voor het bepalen van het transport van zwerfafval, gebrek aan kennis over de fysische of chemische eigenschappen van zwerfafval of over het verband van de processen en eigenschappen met condities. In de opgestelde verrijkte effectketens zijn veel van de cruciale processen rood gekleurd. Ook zijn de beschikbare meetgegevens voor doelvariabelen of steunvariabelen in veel gevallen onvoldoende om de beleids- en beheersvragen te beantwoorden, terwijl gegevens over hulpvariabelen (bijvoorbeeld chlorideconcentratie) over het algemeen beschikbaar zijn. Gegevens over condities, waaronder ook regenval en stroomsnelheid, lijken in voldoende mate beschikbaar te zijn om de geselecteerde vragen te kunnen beantwoorden. Aan het opzetten van structurele monitoring van zwerfafval (Van Emmerik en Vriend, 2021) wordt momenteel gewerkt. Wij onderstrepen dat lange tijdseries (minimaal een jaar) nodig zijn van concentraties en fluxen om het netto effect van de verschillende processen te gaan begrijpen. Wij richten ons verder op kennisleemtes over de processen, en gaan niet in op verschillen tussen zwerfafval typen, terwijl die wel degelijk aanwezig zijn.

De processen die van belang zijn voor beantwoording van een vraag zijn afhankelijk van de ruimtelijke schaal relevant voor die vraag. Voor de grote schaal (stroomgebied) zijn afspoeling door regen, advectie en retentie in de rivier en estuarium leidend. Voor de verdeling van plastic zwerfafval in een dwarsdoorsnede is het relevant om de processen die samen retentie bepalen afzonderlijk te begrijpen: aanspoeling, invang en remobilisatie, en sedimentatie en resuspensie. Voor de kennisvragen onderscheiden we daarom twee schalen: stroomgebied en riviertak. Gezien de diversiteit van eigenschappen van zwerfafval (dichtheid, grootte en vorm) kan voor vrijwel iedere kennisvraag de deelvraag worden toegevoegd:

Op de **schaal van het stroomgebied** zijn kennisleemten over (gemiddeld) belangrijke processen:

- i. Hoe bouwt zwerfafval op een locatie (bron naar land en water) op met tijd, als het niet afspoelt?
 - a) Hoe hangt dit af van de locaties in een stroomgebied?
 - b) In hoeverre verschilt de opbouw voor de vier categorieën bronnen?
 - c) Hoe hangt de opbouw samen met het seizoen?
- ii. Hoe is afspoeling van opgebouwd zwerfafval afhankelijk van intensiteit en duur van regenval?
- iii. Hoe is de afspoeling afhankelijk van bodemeigenschappen, helling en bedekkingsgraad?
- iv. Welk gedeelte van zwerfafval opgebouwd op een locatie wordt via afspoeling naar het oppervlaktewater getransporteerd bij een karakteristieke bui?
 - a) Hoe hangt deze emissie samen met afstand van de bron naar het land en water tot het oppervlaktewater?
- v. Welke gedeelte van het zwerfafval blijft achter op oevers (inclusief constructies als kribben), in sediment en in vegetatie van een **riviertak**?
 - a) Hoe hangt deze retentie af van afvoerregime?
 - b) Hoe hangt retentie af van stijgend en dalend waterniveau?
- vi. Welke gedeelte van het zwerfafval blijft achter op oevers, in sediment (inclusief in havens) en in vegetatie van een **estuariumtak**?
 - a) Hoe hangt deze retentie af van de variatie in waterstand door getij en windopzet?
 - b) Hoe hangt deze retentie af van de variatie in stroomsnelheid door getij en rivierafvoer?
- vii. Hoe hangt het transport van zwerfafval naar zee samen met condities op zee?

Op de **schaal van een riviertak** zijn kennisleemten over (gemiddeld) belangrijke processen:

- viii. In hoeverre zijn emissies van punt- en diffuse bronnen naar een riviertak van belang voor de concentratie zwerfafval in de waterkolom en nabij het wateroppervlak?
 - a) Wat is de rol van wind voor deze emissies naar het oppervlaktewater?
 - b) En wat is de rol van afspoeling?
- ix. Wat is het effect van wind op de verdeling van zwerfafval nabij het wateroppervlak in de breedte van de rivier?
- x. Hoe is de uitwisseling tussen de laag nabij het wateroppervlak en de waterkolom?
 - a) Welke typen zwerfafval (bijvoorbeeld per categorie OSPAR-rivieren) komen in welke laag voor?
 - b) En als in beiden: welke deel van de tijd zijn ze in ieder van de compartimenten?
 - c) Hoe hangt dit samen met biofouling op het zwerfafval?
- xi. Wat is de uitwisseling tussen de laag nabij het wateroppervlakte en de rivieroever?
 - a) Hoe hangt aanspoeling af van condities?
 - b) Hoe hangt remobilisatie af van condities?
 - c) Hoe hangt het netto effect van aanspoeling en remobilisatie af met condities (waterstand, afvoer en wind)?
- xii. Wat is de rol van waterplanten in de invang en remobilisatie van zwerfafval in rivieren?
 - a) Bij welke condities en in welke seizoenen belandt netto zwerfafval in de waterplanten?
 - b) Bij welke condities en in welk seizoen komt welk gedeelte zwerfafval weer terug in de waterkolom?
- xiii. Hoe is de uitwisseling tussen zwerfafval in de waterkolom en de mobiele bodem?
 - a) Welk gedeelte van de verschillende typen zwerfafval sedimenteert naar de bodem?
 - b) En hoe hangt dit af van biofouling?
 - c) Vanaf welke kritieke bodemschuifspanning (stroomsnelheid) treedt resuspensie van ieder type zwerfafval op?

- a) Welk deel van het zwerfafval in de waterkolom blijft achter nadat een uiterwaarde is overstroomd?
 - b) Welk deel hiervan komt via wind of resuspensie weer terug in de waterkolom binnen een paar jaar?
- xiv. In hoeverre leiden de verschillen in rivierkarakteristieken tussen de Maas en de Rijn tot een verschil in zwerfafval transport?
- a) Wat is het effect van de snellere fluctuatie in afvoer en waterstand van de Maas in vergelijking met de Rijn op zwerfafval transport?
 - b) Is een netto verschil in uitwisseling te verwachten tussen oever en waterkolom?

De beantwoording van de kennisvragen verschilt (deels) per rivier. Om die reden hebben we de laatste kennisvraag toegevoegd. Voor een estuariumtak zijn de kennisleemten grotendeels hetzelfde als voor een riviertak. Het verschil is dat de condities ingewikkelder zijn door het getij en mogelijk speelt ook windopzet een rol. Getij zorgt voor een dynamiek in de waterstand en de waterbeweging, waardoor het uitdagend is om te bepalen wat het netto effect is over een dag (enkele getijcycli). Vaak worden vanwege de haalbaarheid metingen alleen uitgevoerd tijdens eb, waardoor niet bekend is wat het transport van zwerfafval tijdens vloed (landwaarts) is.

Op dezelfde schaal zijn aanvullend op de kennisleemten voor de riviertak kennisleemten voor een **estuariumtak** over (gemiddeld) belangrijke processen:

- xv. Welk gedeelte van het zwerfafval in de waterkolom wordt tegen gehouden door het zoute water met hogere dichtheid dat vaak landwaarts stroomt nabij de bodem (estuariene circulatie)?
- a) Treedt rond de locatie waar zoet en zout water elkaar ontmoeten extra sedimentatie van zwerfafval (de zwaardere typen, zoals PS en PET) op in vergelijking met een volledig zoet gedeelte van de rivier?
 - b) Neemt de concentratie zwerfafval in de laag nabij het wateroppervlak toe doordat meer typen zwerfafval gaan drijven in een estuarium?
 - c) Hoe verschilt dit met de stroomsnelheid van de zoute waterlaag?
- xvi. Welke gedeelte van het zwerfafval blijft achter op (stenige) oevers langs de rivier en in havens?
- a) Hoe hangt aanspoeling af van de variatie door het getij?
 - b) Hoe hangt remobilisatie af van de variatie door het getij?
 - c) Hoe hangt deze retentie af van de variatie in stroomsnelheid door getij en rivierafvoer?

3.5.2 Voorstellen voor kennisontwikkeling

De kennisvragen zijn talrijk en er lopen verschillende onderzoeken. Hoeveel achterblijft in de bodem van een uiterwaarde na een overstroming is te onderzoeken door een bekend volume vers afgezet materiaal te filteren en het aantal en massa van zwerfafval te bepalen. Ditzelfde meetprincipe kan worden uitgevoerd voor gebaggerd materiaal uit de vaargeul: het aandeel plastics is een maat voor hoeveel er in de (mobiele) bodem achterblijft. Een dergelijke proef uitvoeren in een estuarium kan inzicht geven of daar de sedimentatie hoger is dan in de rivier.

Eerder zijn een flink aantal studies uitgevoerd met veldwerk om de uitwisseling vanuit het water met andere compartimenten te bepalen, bijvoorbeeld in het kader van stage of afstuderen van studenten. Deze studies laten zien hoe ingewikkeld het transport van zwerfafval in de realiteit is. Omdat het niet mogelijk is om een enkel proces of het effect van een verandering in één variabele te isoleren, is het niet eenvoudig proceskennis op te doen. Daarom stellen we voor om aanvullend op deze veldstudies, meer experimenten in stroomgoten uit te gaan voeren.

Om de uitwisseling van zwerfafval tussen de waterkolom en de laag nabij het wateroppervlak beter te begrijpen (kennisvraag 10) zijn fundamentele proeven nodig. Eerste proeven hebben laten zien dat de oppervlaktespanning mogelijk belangrijk is, en dat hierdoor een groter deel van het zwerfafval aan het oppervlak blijft hangen. Eerder is i.s.m. Anton de Fockert een plan uitgewerkt voor dergelijke proeven.

Een andere mogelijkheid is om op een zandige oever met een helling karakteristiek voor strandjes tussen kribben verschillende typen zwerfafval neer te leggen. Welk deel wordt gemobiliseerd bij (1) stijging van de waterstand, (2) oplopende stroomsnelheid langs en eventueel over de oever en (3) golven die worden gegenereerd door schepen (niet belangrijk gevonden in de effectketen, maar mogelijk is dit op sommige locaties langs de rivier wel van belang). Ondanks de uitdaging van schaling van werkelijkheid naar experiment, kunnen uit een dergelijk experiment nuttige inzichten worden gedaan. Er zijn veel meer schaalexperimenten uit te denken, waarmee proceskennis wordt ontwikkeld die nodig is om de 8 gestelde hoofdvragen te beantwoorden. Een voordeel van schaalexperimenten is dat deze herhaald kunnen worden voor verschillende typen zwerfafval. Door herhaling voor een selectie van zwerfafval die rekening houdt met de veelvoorkomende eigenschappen (dichtheid, grootte en vorm, waaronder ook of een volume ingesloten kan zijn in het zwerfafval) ontstaat generiek inzicht en wordt ook bekend hoe het resultaat voor die proef varieert met de verschillende typen zwerfafval.

4 Numerieke modelopties

4.1 Algemeen

De monitoring van plastic zwerfafval in Nederland kan op verschillende manieren worden verrijkt met numerieke modellen. Uit de verrijkte effectketens kan worden afgeleid welk detailniveau nodig is om bij te kunnen dragen aan de beantwoording van de vraag. Voor het beantwoorden van de vragen 6 (“Hoeveel zwerfafval wordt er getransporteerd naar zee?”) en 8 (“Wat zijn de bronnen van zwerfafval in de Rijkswateren?”) is een groot schaalniveau nodig met daarin alle domeinen van bron tot zee. De ruimtelijke schaal die hierbij past is een stroomgebied. Voor deze vragen is de inschatting van alle bronnen en emissies naar het oppervlaktewater van belang. Hiervoor kan emissiemodellering op stroomgebiedsschaal worden gebruikt, in combinatie met een transportmodel voor langs de rivier en het estuarium. De concentratie en het transport van (verschillende typen) zwerfafval nabij het wateroppervlak en in de waterkolom kan worden vergeleken met meetgegevens die representatief zijn voor een dwarsdoorsnede. Indien nodig, kunnen de bronnen worden verfijnd. Vervolgens geeft het model houvast voor het beantwoorden van beleids- en beheervragen 6 en 8. Daarbij kan het transport van zwerfafval in een riviertak als invoer gebruikt worden voor een model op kleinere schaal.

Voor vragen 2 (“Hoeveel plastic zwerfafval wordt getransporteerd *in* de rivieren?”) en 3 (“Waar komt het plastic zwerfafval vooral voor?”) is het van belang om inzicht te krijgen in de uitwisseling van zwerfafval tussen de compartimenten in een doorsnede en langs de rivier en het estuarium. Voor een riviertak of een estuariumtak wordt transport van zwerfafval berekend op basis van een 3D hydrodynamisch model waarin deeltjes (het zwerfafval) worden gevolgd. Door verschillende typen zwerfafval te simuleren leren we hoe ieder type is verdeeld in de dwarsdoorsnede. Door de variatie van condities in een estuarium moet de tijdstap maximaal 1 uur zijn. Voor een tak is het haalbaar om met deze tijdstap een periode van weken tot maanden door te rekenen, te vergelijken met metingen in die periode, en daarmee in combinatie met de metingen de vragen 1a (dit betreft het uitwerken van een methode om uit metingen in combinatie met een model de totale flux te bepalen), 2 en 3 te beantwoorden. Bovendien kan op basis van dit model voor een riviertak het gecombineerde proces retentie bepaald worden (door aggregatie van sedimentatie en resuspensie, invang en remobilisatie, en aanspoeling en remobilisatie) voor het grootschalig model.

Op de lange termijn (2027) zullen meer meetgegevens beschikbaar zijn en zal meer proceskennis zijn opgedaan dan in de huidige situatie of op de korte termijn (2023). Door de huidige software en schematisaties te verbeteren en relevante nieuwe proceskennis toe te voegen, kunnen de modellen en daarmee de beantwoording van de geselecteerde hoofdvragen verder ontwikkeld worden. Hierna geven we enkele opties aan voor modeltoepassing op de lange termijn, waarmee bestaande meetgegevens kunnen worden verrijkt en de geselecteerde vragen kunnen worden beantwoord. Vanuit het idee dat iedere modelontwikkeling bijdraagt aan wat voor de lange termijn gewenst is, geven we eerst de opties voor de lange termijn en daarna twee opties voor de korte termijn (2023) aan.

4.2 Lange termijn (2027)

Een vooruitblik van 5 jaar geeft vele verschillende opties voor numerieke modellering ter ondersteuning van de monitoring. We beschrijven kort enkele van deze opties:

- Een stroomgebiedsmodel voor zwerfafval transport voor de stroomgebieden van zowel de Rijn als de Maas.
 - Een emissiemodel is opgezet en maakt gebruik van de meetgegevens van de bronnen in het stroomgebied per type zwerfafval. Het emissiemodel maakt gebruik van een hydrologisch model.
 - Het transport in het oppervlaktewater is gebaseerd op een D-Hydro model (1D: diepte- en breedtegemiddeld), zodat gebruik gemaakt kan worden van de voordelen van de nieuwe generatie hydrodynamische software. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een hydrologisch model. Voor het transport van zwerfafval langs de rivier en het estuarium naar zee kan voor Nederland het beste een model gebruikt worden met het hele oppervlaktewater netwerk, omdat Nederland zo vlak is.
 - Dit stromingsmodel is gekoppeld aan D-water quality, zodat landsdekkend gerekend kan worden. De procesbibliotheek van D-Water quality is uitgebreid zodat beter gedifferentieerd kan worden in het gedrag van de verschillende typen zwerfafval.
- Een detailmodel met deeltjesmodellering voor een geselecteerd gedeelte van een rivier.
 - Op basis van de software 3D D-Hydro met D-particle tracking. De koppeling tussen beide is getest, ook voor 3D.
 - De verbeterde proceskennis van over aanspoeling en remobilisatie en over invang en remobilisatie zijn verwerkt in D-particle tracking.
 - Het model voor de geselecteerde riviertak kan de uitwisseling tussen compartimenten goed inschatten.
 - De compartimenten zijn dan uitgebreid met uiterwaarden en de waterbodem: met het model kan een inschatting worden gekregen hoeveel achterblijft afhankelijke van de stroomsnelheid, waterstand en de duur van de overstroming.
- Een detailmodel met deeltjesmodellering voor een geselecteerd gedeelte van een estuarium. Dit model is in opzet hetzelfde als het geselecteerde gedeelte van de rivier.

4.3 Korte termijn: landsdekkend bron-naar-zee model

4.3.1 Algemeen

Het plan om op korte termijn, met bestaande modellen, een landsdekkend bron-naar-zee model te ontwikkelen voor een recent jaar (bijvoorbeeld 2020 of 2021) bestaat uit de volgende stappen:

1) Inschatting van bronnen van zwerfafval op het land of in het water in Nederland. Ondanks dat hier weinig tot geen informatie voor beschikbaar is, kunnen we gebiedsdekkend de bronnen voor de vier categorieën (recreatie, dumping, sanitair en industrie) inschatten op basis van beschikbare meetgegevens en door gebruik te maken van toolkits². Daarbij gebruiken we alleen toolkits die eerder met succes zijn toegepast voor vlakke gebieden, waarmee veel tools afvallen die zijn ontwikkeld voor hellend terrein.

- De categorie recreatie zal de grootste bijdrage zijn, conform de bevindingen (op de oever) van Boonstra en de Winter (2021).
- Specifiek voor de categorie sanitair is dat overstortlocaties grotendeels bekend zijn.

² <https://plasticpollution.leeds.ac.uk/toolkits/>

- Voor categorie industrie stellen we voor ook plastic halffabrikaten (pellets) als een type zwerfafval te modelleren, ondanks dat pellets meestal kleiner dan 5 mm zijn. De locaties waar deze worden overgeslagen en worden geproduceerd zullen gehanteerd worden als bron naar het land of het water.

2) Uit de landsdekkende tijdseries van bronnen bepalen we de afspoeling van land naar water door het Nationaal Hydrologisch Model (NHM: het hydrologische deel van het Nationaal Water Model) te koppelen aan D-Emissions. Hiermee wordt berekend waar emissies van de vier categorieën zwerfafval naar ieder onderdeel van het watersysteem optreden en hoe deze emissies variëren in de loop van de tijd.

a) De tijdstap van het NHM is normaal 10 dagen. Deze tijdstap is gekozen zodat voor lange perioden (jaar tot 10 jaar) de grondwaterstroming en afspoeling doorgerekend kunnen worden. Voor het doel van berekenen van plastic zwerfafval transport is een kortere tijdstap (bijvoorbeeld 1 dag) optimaal. Echter, dergelijke simulaties zijn niet beschikbaar. Ook met een tijdstap van 10 dagen is eerder gebleken dat een aanzienlijke variatie in de tijd optreden, zoals geobserveerd wordt.

b) D-Emissions houdt rekening met accumulatie van zwerfafval op het land in perioden zonder neerslag.

3) Transport vanaf de berekende bronnen in het water en vanaf de emissies naar het landelijk netwerk van rivieren en kanalen wordt bepaald met het Landelijk Sobek Model (LSM, Figuur 4-1) gekoppeld aan D-water quality.

c) Het LSM is beschikbaar en draait op de breedte- en dieptegemiddelde software Sobek 2.³ Het LSM bestaat uit ongeveer 30.000 rekeneenheden en heeft een tijdstap van 10 minuten, waarmee het ook geschikt is om de variatie in stroomsnelheid onder invloed van getij te berekenen.

d) Om transport vanaf bronnen in het water te bepalen wordt een connectie gemaakt tussen D-Emissions en LSM.

e) Met D-water quality worden naast advectie de volgende processen gebruikt om het zwerfafval transport te bepalen: sedimentatie, resuspensie en retentie.

f) Voor het transport vanuit het buitenland naar de Nederlandse Rijn en Maas wordt de concentratie plastic zwerfafval gebruikt die volgt uit het berekende transport met een recent globaal model (Meijer et al., 2021). De variatie in deze significante bijdrage is niet goed bekend en daarom wordt een constante concentratie gehanteerd, waardoor het transport lineair varieert met de afvoer.

³ Voorkeur zou hebben om het 1D D-Hydro model te gebruiken (onderdeel van het Nationaal Hydrologisch Model), maar dit is nog niet gereed in 2023.



Figuur 4-1 Het netwerk van het Landelijk Sobek Model voor Sobek 2 (oranje) en in de achtergrond de eenheden van het veel grovere Distributie Model (zwart),

4) Het berekende transport van de som van de vier verschillende categorieën wordt vergeleken met de beschikbare metingen (brugtellingen en netmetingen). Wanneer de berekende concentratie duidelijk afwijkt van de concentratie die afgeleid kan worden uit de meetgegevens (nabij het wateroppervlakte of in de waterkolom) of wanneer de samenstelling duidelijk verschilt, wordt stap 1 herhaald (verfijnd). In dat geval, worden stap 2 en 3 ook opnieuw uitgevoerd uitgaande van de geactualiseerde bronnen.

g) In eerdere toepassingen van deze methode was alleen een verfijning nodig.

h) Voor de vergelijking met meetgegevens gebruiken we beschikbare gegevensbestanden die zijn verzameld in het gekozen jaar.

5) In overleg met Rijkswaterstaat reduceren we een bron naar het oppervlaktewater, en voeren we een aanvullende simulatie uit door herhaling van bovenstaande stappen 2 en 3. Vergelijking van dit modelresultaat met het modelresultaat na stap 4 geeft aan hoe gevoelig of effectief de doorgerekende bronmaatregel kan zijn.

In een rapportage beschrijven we naast de ontwikkeling van het landsdekkende bron-naar-zee model ook de bronnen in Nederland, de emissies naar het oppervlaktewater en hoe deze samenhangen met regenval en afvoer (vraag 8). Op basis van de aanvullende simulatie krijgen we een indruk van het effect van een bronmaatregel. Ook geeft deze modellering antwoord op de vraag wat het transport van plastic zwerfafval is naar zee (vraag 6). Grof geeft het model ook aan waar langs de Nederlandse rivieren hoge concentraties kunnen optreden en waar relatief veel achterblijft van de verschillende broncategorieën op de oever of rivierbodem (vragen 2, 3 en 4). Omdat het LSM breedte- en dieptegemiddeld is, zijn de resultaten dwarsdoorsnede gemiddeld.

4.3.2 Databehoefte

Gegevens over bronnen van zwerfafval naar het milieu binnen Nederland zullen een betrouwbaarder beeld geven dan wanneer stap 1 uitgevoerd moet worden op basis van beschikbare tools voor laaglandssystemen.

Bij de vergelijking metingen (stap 4) kan afhankelijk van het gekozen jaar gebruik gemaakt worden van:

- Brugtellingen (van Emmerik en de Lange, 2022)
- Netmetingen
- Schone rivieren gegevens en Rijkswaterstaat gegevens van oevers met inschatting per type bron. De verhouding van het type zwerfafval (met verschillende bronnen) op de oever en in de waterkolom kan vergeleken worden voor metingen in de Waal (Oswald et al., 2020) met de gesimuleerde verhouding.

4.3.3 Kennisleemtes

Er zijn verschillende kennisleemtes (zie sectie 3.5.1). Deze aanpak geeft de ruimtelijke en temporele samenhang weer van zwerfafval transport in Nederland. De ervaring leert dat de modellering hierdoor vaak bijdraagt aan beantwoording van specifieke vragen, zoals vragen 6 en 8.

4.3.4 Benodigde aanpassing software

D-Emissions moet gekoppeld worden aan NHM en aan LSM. De koppeling aan het LSM Sobek 2 wordt gebaseerd op de bestaande koppeling van Sobek 3 met D-Emissions.

4.3.5 Schematisaties

NHM

LSM

4.4 Korte termijn (2023): Nieuwe Maas model met 3-dimensionaal deeltjestransport

4.4.1 Algemeen

Voor het extrapoleren van monitoring op een punt naar de hele diepte en breedte van rivieren en estuaria en om in te kunnen schatten hoe de plastic zwerfafval concentratie in de tijd verloopt tussen de metingen door is detailmodellering nodig. Met een 3D D-Hydro model gekoppeld aan D-particle tracking kan de concentratie plastic zwerfafval worden berekend op een bepaalde plaats (x,y,z) en tijd⁴. Wanneer vertrouwd wordt op de extrapolatie door een model, is het extra belangrijk dat alle relevante processen (van gemiddeld en groot belang) zijn meegenomen. Ook wanneer zij onzeker zijn, is het beter deze processen mee te nemen in plaats van ze niet mee te nemen. De ruimtelijke dimensies van het detailmodel worden gekozen zodat de rekentijd beheersbaar blijft (orde 10 km). De randvoorwaarden voor het detailmodel voor water en voor zwerfafval worden bepaald met een grootschalig model, zoals het landsdekkende bron-naar-zee model voor zwerfafval en een dieptegemiddeld model voor de hydrodynamica.

Alle belangrijke processen uit de effectketen worden meegenomen om het model zo goed mogelijk de werkelijkheid te laten weergeven. De tijdstap van het model hangt af van de gekozen ruimtelijke resolutie en zal orde 10 minuten zijn. De simulatieperiode hangt af van de momenten waarop metingen beschikbaar zijn om mee te vergelijken. De periode tussen 3 vangsten van Catchy2 onder de Erasmusbrug zou bijvoorbeeld gekozen kunnen worden.

⁴ Technisch is het nu mogelijk om een 2D dieptegemiddeld model te koppelen met D-particle tracking, maar dit wordt niet geadviseerd. Redenen zijn dat het effect van obstakels (kribben, ondieptes, kunstwerken) op de ruimtelijke variatie in de concentratie plastic zwerfafval niet goed kan worden bepaald. Bovendien wordt secundaire stroming niet goed weergegeven in een dieptegemiddeld model, terwijl dit wel een effect heeft op de ruimtelijke variatie in de concentratie plastic zwerfafval.

4.4.2 Databehoefte

Validatie van dergelijke detailmodellen zal alleen mogelijk zijn met deze speciale incidentele metingen, waarbij de ruimtelijke variatie goed in beeld wordt gebracht. Om deze reden zijn enkele hoogfrequente dataserieën nodig, waarmee het model gekalibreerd en gevalideerd kan worden. Momenteel zijn die niet beschikbaar. Wel kan worden vergeleken met de maandelijkse vangst van Catchy2 of andere vangsystemen in havens.

4.4.3 Kennisleemtes

Zie voor een selectie kennisvragen over estuaria sectie 3.5.1. Een kennisleemte specifiek voor deze detailmodellering is vanaf welke stroomsnelheid een stuk zwerfafval met een bepaalde dichtheid, grootte en vorm wordt opgenomen in de waterkolom. Wanneer deze kritische stroomsnelheid bekend is voor de normaal voorkomende typen zwerfafval, kan resuspensie beter worden ingeschat.

4.4.4 Benodigde aanpassing software

D-particle tracking is meermaals toegepast in combinatie met 3D hydrodynamische modellen in Delft3D 4. Zoals aangegeven wordt het waarschijnlijk in 2023 geschikt gemaakt voor toepassing met D-Hydro 3D. Dat heeft de voorkeur. Als terugvaloptie zien we de mogelijkheid om het instrumentarium te gebruiken als in het project in opdracht van Allseas: toen is Triwaq gebruikt (voorloper van D-Hydro).

4.4.5 Schematisaties

Het recent ontwikkelde RijnMaasmonding model berekent in de verschillende takken stroomsnelheid in 3D.

Terugvaloptie: Het OSR model: het dieptegemiddelde Havenmodel en het NSC-fijn (10 lagen).

4.5 Overzicht opties en kosteninschatting

We geven in Tabel 2 een overzicht van de lange en korte termijn opties en een kosteninschatting op basis van een eerste inschatting van benodigde tijd.

Tabel 2 Overzicht opties en kosteninschatting

Modeloptie	Antwoord op vraag	Meetgegevens	Kostenrange (k€)
Korte termijn: landsdekkend bron-naar-zee model	6 en 8	Brugtellingen en Schone rivieren	60-70
Korte termijn: Nieuwe Maas detailmodel	1A, 2A, 2B en 3 (en indirect aan 6 en 8)	Erasmusbrug Catchy 2, schone rivieren	20-30
Lange termijn: Stroomgebiedsmodel Maas	6 en 8	Aanvulling op huidig: meer tijdseries door automatische monitoring	Nader te bepalen
Lange termijn: Stroomgebiedsmodel Rijn	6 en 8	Aanvulling op huidig: meer tijdseries door automatische monitoring	Nader te bepalen
Lange termijn: detailmodellen van meer riviertakken	1A, 2A, 2B en 3 (en indirect aan 6 en 8)	Aanvulling op huidig: simultaan meetgegevens van vangsystemen, oevermetingen en netmetingen. Meer en langere tijdseries	

4.6 Discussie

Bij de selectie van opties voor de korte termijn is kosteneffectiviteit een belangrijk criterium geweest. Hoewel verschillende modelstudies van zwerfafval transport in Nederland in beeld zijn gebracht in deze verkenning, hebben we geen overzicht over alle modellen die geschikt zijn (of binnenkort kunnen gaan zijn) om de geselecteerde vragen te beantwoorden.

De twee geselecteerde opties voor de korte termijn hebben potentie om binnen een jaar te kunnen bijdragen aan beantwoording. Eind 2023 is ook het advies over structurele monitoring uitgebracht en is beter bekend wat voor (automatisch verkregen) meetgegevens beschikbaar zullen gaan zijn vanaf 2023. Aanbeveling is om eind 2023 de bijdrage van modellering te evalueren en de lange termijn behoefte voor numeriek modelleren verder uit te werken en vast te stellen. Op basis van dit doel en de meetgegevens die beschikbaar gaan komen vanaf 2024 kan in samenhang met het waterkwaliteitsmodelinstrumentarium een stappenplan voor verbetering van de numerieke modellen opgesteld worden.

5 Literatuuroverzicht

- Blondel, E. en F.A. Buschman (2022) Vertical and Horizontal Plastic Litter Distribution in a Bend of a Tidal River. *Front. Environ. Sci.* 10:861457. doi: 10.3389/fenvs.2022.861457
- Boonstra, M. en W. de Winter (2021), Afval hotspots in de Nederlandse rivierdelta, rapport Schone Rivieren.
- Buschman, F.A., M. van der Meulen, A. Markus, M. Weeber and F. Kleissen (2018) Roadmap voor de modellering van verspreiding microplastics in Rijkswateren, i.o.v. Rijkswaterstaat. Deltares kenmerk 11202218-003-ZKS-0002.
- Buschman, F.A., F.M. Kleissen, A.A. Markus, J. Mira Veiga, A.D. Vethaak and M.F.M. Yossef (2019) Towards guidelines for effective plastic removal from rivers: phase 1, commissioned by Allseas Engineering BV, Deltares reference 11203036-000-ZWS-0006.
- Climo, J. D., Oswald, S., Buschman, F. A., Hendriks, A. J., & Collas, F. P. (2022). Inland Navigation Contributes to the Remobilization of Land-Based Plastics Into Riverine Systems.
- Collas, F. S. Oswald en W. Verberk (2021), Plastic in de waterkolom van de Boven-Rijn, Waal en IJssel, rapport Radboud Universiteit, Nijmegen, Nederland.
- De Vries, S. en van 't Hoff, V. (2020). Classificatie van verschillende zwerfafvalmonitoringsinitiatieven in de Nederlandse stroomgebieden. PULSAQUA.
- de Weerd, Mark en Emiel Versteegen (2022) Voorstudie Monitoringstechnieken Zwerfafval grote rivieren, Referentie: BI2774-WM-RP-220421-1534WM, 21 april 2022
- Deltares (2015), Project Guanabara Limpa: Operational Modelling and Monitoring System of Floating Material and Water Quality in Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Deltares, brochure.
- Everaert, G.; Asselman, J.; Bouwens, J.; Catarino, A.I.; Janssen, C.R.; Shettigar, N.A.; Teunkens, B.; Toorman, E.; Van Damme, S.; Vercauteren, M.; Devriese, L. (2022). Plastic baseline (t0) measurement in the scope Flemish Integral Action Plan on Marine Litter (OVAM). Plastic t0 study 2020-2021. Flanders Marine Institute: Ostend. 112 pp. <https://dx.doi.org/10.48470/26>.
- González-Fernández, D., A. Cózar en G. Hanke, e.a. (2021) „Floating macrolitter leaked from Europe into the ocean.,” *Nat Sustain.* 4, 474–483. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00722-6>.
- Grosfeld, Jakob (2022), Macrolitter in Groyne Fields: short term variability & the influence of natural processes, MSc thesis TU Delft, May 2022.
- Kiessling, T., Knickmeier, K., Kruse, K., Brennecke, D., Nauendorf, A., Thiel, M., (2019), Plastic Pirates sample litter at rivers in Germany – riverside litter and litter sources estimated by schoolchildren. *Environ. Pollut.* 245, 545–557. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.025>.
- Meijer, L. J., van Emmerik, T., van der Ent, R., Schmidt, C., & Lebreton, L. (2021). More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Sci. Adv.* 7 <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5803>

- Oswald, S.B., Collas, F.P.L., Schoor, M.M., Buschman, F., Leuven, R.S.E.W. (2020) Abundance and composition of macro- and mesoplastic in the Waal river, the Netherlands. *Verslagen Dierecologie en Fysiologie 2020-5*, Radboud Universiteit, Nijmegen, Nederland, pp 44.
- Roebroek, C.T.J., C. Laufkotter, D. Gonzalez-Fernandez en T. van Emmerik (2022) The quest for the missing plastics: Large uncertainties in river plastic export into the sea
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119948>
- Schöneich-Argent, R. I., Dau, K., and Freund, H. (2020). Wasting the North Sea? –a Field-Based Assessment of Anthropogenic Macrolitter Loads and Emission Rates of Three German Tributaries. *Environ. Pollut.* 263, 114367. doi:10.1016/j.envpol.2020
- Stuparu, D., M. van der Meulen, F. Kleissen, D.A. Vethaak en G. El Serafy (2015) Developing a transport model for plastic distribution in the North Sea. 36th IAHR World Congress, The Hague.
- Van Emmerik, T., Schwarz, A. (2020) Plastic debris in rivers. *WIREs Water*, 2020;7:e1398.
<https://doi.org/10.1002/wat2.1398>.
- Van Emmerik, T., P. Vriend en C. Roebroek (2020) „An evaluation of the River-OSPAR method for quantifying macrolitter on Dutch riverbanks,” Wageningen.
- Van Emmerik, T. & S. de Lange (2021). Pilot monitoring drijvend zwerfafval en macroplastics in rivieren: Jaarmeting 2021. Wageningen University, Report. 51 pp., <https://doi.org/10.18174/566475>
- Van Emmerik, T. en P. Vriend (2021), „Routekaart Zwerfafvalmonitoring Nederlandse rivieren”.
- van Emmerik, T., Mellink, Y., Hauk, R., Waldschläger, K., & Schreyers, L. (2022). Rivers as plastic reservoirs. *Front. Water*, 3, 1-8.
- Van der Wal, M., M. van der Meulen, G. Tweehuijsen, M. Peterlin, A. Palatinus, M. Kovac Virsek, L. Coscia and A. Krzan, (2015) Identification and Assessment of Riverine Input of (Marine) Litter. Final Report for the European Commission DG Environment under Framework Contract No ENV.D.2/FRA/2012/0025.
- Van der Meulen, M.D A. en D. Vethaak, 2015. CleanSea, Deltares (brochure)
- Van Waveren, R. H., S. Groot, H. Scholten, and F. C. van Greer (1999), Good Modelling Practice Handbook
- Vethaak A.D., Legler J. (2021) Microplastics and human health. *Science* Feb 12;371(6530):672-674. doi: 10.1126/science.abe5041. PMID: 33574197
- World Bank (2021) Plastic Waste Discharges from Rivers and Coastlines in Indonesia. Marine Plastics Series, East Asia and Pacific Region. Washington DC.
- Zaat, L. (2020) Below the surface: A laboratorial research to the vertical distribution of buoyant plastics in rivers, MSc thesis TU Delft
- Zillien, Caterina (2018) Modelling plastic pollution in the Rhine catchment, Wageningen university internship report, Course code ETE-70824.

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