

MICRO

IN HET AQUATISCH MILIEU

2024
12

MICROPLASTICS IN HET AQUATISCHE MILIEU

RAPPORT

2024

12

ISBN 978.94.6479.067.2



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Svenja Mintenig, WUR
Bart Koelmans, WUR

KWALITEITSBORGING
Anja Derksen (AD eco advies)
Bert Bellert (Rijkswaterstaat)
Sander van der Weert (Hoogheemraadschap van Delfland)

VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2024-12
ISBN 978.94.6479.067.2

De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

TEN GELEIDE

MICROPLASTICS IN HET AQUATISCH MILIEU, KENNIS IN BEELD

Dit rapport geeft een overzicht van de meest recente wetenschappelijke kennis over microplastics en het effect daarvan op het zoetwatermilieu. Daarbij komen zaken aan de orde als emissiebronnen, emissieroutes, ecologische effecten van microplastics en maatregelen die de schadelijke gevolgen van microplastics op het watermilieu (kunnen) beperken.

Goed en effectief waterbeheer vraagt om meer kennis over de aard, de aanwezigheid en de gevolgen van microplastics in water. Nu microplastics overal ter wereld zijn aangetroffen en steeds duidelijker wordt welke schadelijke gevolgen ze hebben op de leefomgeving, neemt het belang van actuele en objectieve kennis over plasticdeeltjes in water alleen maar toe. Deze studie wil daarin voorzien.

Tegelijk geeft het rapport ook aan op welke gebieden nog vragen open staan, bijvoorbeeld op het terrein van het aandeel van de nog kleinere deeltjes, nanoplastics genoemd. Zo blijken - naast deeltjesgrootte - ook de vorm en het type plastic van invloed op het effect van microplastics. Veel van deze factoren vergen nader onderzoek, voordat de opgedane kennis over dergelijke parameters kan worden opgenomen in modellen en maatregelen. Dit rapport kan ook worden gelezen als een pleidooi voor het blijven volgen van de nieuwe wetenschappelijke inzichten en beleidsontwikkeling. Tegelijkertijd blijkt het van belang om de verspreiding van (micro)plastic zo veel mogelijk te voorkomen. Ook waterschappen kunnen hierin een rol spelen, bijvoorbeeld door de actieve aanpak van zwerfvuil.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

Dit rapport geeft een overzicht van de meest recente wetenschappelijke kennis over microplastics en het effect daarvan op het zoetwatermilieu. Daarbij komen zaken aan de orde als emissiebronnen, emissieroutes, ecologische effecten van microplastics en maatregelen die de schadelijke gevolgen van microplastics op het watermilieu (kunnen) beperken.

Microplastics, plastic deeltjes van 1 μm tot 5 mm grootte, worden wereldwijd aangetroffen in alle ecosystemen. Elke vorm van analyse is bewerkelijk en wordt lastiger naarmate de plastic deeltjes kleiner zijn. Hetgeen leidt tot beperkingen in wat we weten over de aanwezigheid van microplastic types en groottes in het milieu. Hoewel dit geldt voor het hele spectrum van microplastics, is dit vooral waar voor plastic deeltjes die kleiner zijn dan 10 μm .

Plastic, en ook rubbers, worden veel gebruikt en kunnen in het milieu terecht komen tijdens productie-, gebruiks- of recyclingprocessen. De meest relevante bronnen zijn slecht beheerd plastic afval, bandenslijtage en verlies van plastic van landbouwgrond.

Het begrijpen van het transport van microplastics in het milieu is een uitdaging, omdat hun gedrag wordt beïnvloed door vele factoren waaronder deeltjesgrootte, vorm, porositeit en polymeertype. Modellen kunnen helpen de verspreiding van plastics in het milieu beter te begrijpen, maar de belangrijkste sturende parameters moeten nog worden bepaald.

Microplastics zijn wereldwijd aangetroffen in verschillende watersystemen, zowel in de waterfase als in sedimenten, waarbij de gerapporteerde concentraties aanzienlijk variëren. Deze variaties kunnen het gevolg zijn van ruimtelijke verschillen of verschillen in bemonsterings- en analysemethoden. Niettemin is een gemeenschappelijke observatie in bijna alle onderzoeken dat de microplasticconcentraties toenemen naarmate de deeltjesgroottes afnemen.

Laboratoriumstudies hebben aangetoond dat er, boven bepaalde kritische concentraties, schadelijke effecten van microplastics op water- en bodemorganismen kunnen ontstaan. De ernst van deze effecten hangt af van de eigenschappen en concentraties van microplastics en de duur van de blootstelling. De weinige risicobeoordelingen die zijn uitgevoerd geven allemaal aan dat op locaties met de hoogst gemeten blootstellingsconcentraties in oppervlaktewater, sedimenten of bodems, de effectdrempels worden overschreden. Dit betekent dat er een concreet ecologisch risico bestaat op deze 'hotspot' locaties. Deze inzichten leiden tot verschillende nationale en internationale maatregelen die worden overwogen of al zijn geïmplementeerd om de uitstoot van microplastics in het milieu te verminderen of te voorkomen.

Ondanks de aanzienlijke toename van onderzoek naar microplastics in de afgelopen jaren, zijn er verschillende onderwerpen waarover de (wetenschappelijke) kennis nog beperkt is. Het betreft onder andere een gestandaardiseerde bemonsteringsstrategie en analyse-methode. Diffuse bronnen van microplastics en vooral nanoplastics zijn nog niet goed in beeld gebracht. Veel van de sturende processen die leiden tot fragmentatie, verspreiding en effecten van microplastics worden nog onvoldoende begrepen. Tenslotte is het onduidelijk wat de kosten en effectiviteit van maatregelen zijn om de uitstoot aan microplastic naar het milieu te verminderen.

Over het algemeen gelden de kennisleemtes voor alle soorten microplastics, maar ze worden vooral kritisch voor microplastics die kleiner zijn dan 10 µm en nanoplastics. Voor deze deeltjes wordt verwacht dat de concentraties én risico's hoger zullen zijn dan voor grotere deeltjes.

DE STOWA IN HET KORT

HOE WE WERKEN

STOWA is het kennis- en innovatiecentrum voor regionale waterbeheerders in Nederland; de waterschappen en provincies. We helpen ze met het verkrijgen van nieuwe kennis en inzichten die nodig zijn om de opgaven van de regionale waterbeheerders beter te kunnen uitvoeren. Dat doen we door kennisvragen te formuleren en te selecteren in programmacommissies. We zetten ons onderzoek uit bij een keur aan experts, adviesbureaus, instituten en universiteiten, die we begeleiden tijdens hun werk. We zorgen voor de beschikbaarstelling en verspreiding van de kennis, inzichten en antwoorden aan de gezamenlijke waterbeheerders. We stimuleren de uitwisseling van kennis en ervaringen, via bijeenkomsten, werkgroepen, excursies, conferenties en communities of practice. We werken samen met onder andere ministeries, Rijkswaterstaat, gemeenten, drinkwaterbedrijven.

WAT WE ONDERZOEKEN

Inhoudelijk richt Stowa zich op alle onderdelen van waterbeheer, van waterkering en stedelijk waterbeheer tot waterzuivering en watersystemen. Belangrijke thema's daarbij zijn klimaatadaptatie, waterveiligheid, waterkwaliteit en ecologie, energietransitie en circulaire economie.

De kennisvragen die Stowa beantwoordt liggen meestal op technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied. Onze kennis is altijd gericht op de praktijk van regionale waterbeheerders. Dat is waar we voor staan, als Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

WIE WE ZIJN

STOWA is als kennisorganisatie onafhankelijk, onpartijdig en transparant. De afnemers van onze kennis moeten erop kunnen vertrouwen dat de inhoud van onze rapporten objectief en representatief is. Alleen zo kan onze kennis worden ingezet voor beter waterbeheer en innovaties die antwoord geven op de uitdagingen van vandaag en morgen. Het is aan regionale waterbeheerders zelf te bepalen hoe ze de kennis van Stowa in de praktijk gebruiken. STOWA kan daarbij een rol spelen als adviseur, maar is geen uitvoerder of regisseur.

STOWA is een stichting die de richtlijnen volgt voor organisaties zonder winstoogmerk (RJ-640). In ons jaarverslag is daarom naast de cijfermatige jaarrekening onder meer ook een directieverslag over de stichting, haar activiteiten en kentallen opgenomen.

MICROPLASTICS IN HET AQUATISCHE MILIEU

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
2	GERELATEERDE PUBLICATIES EN PROJECTEN	2
3	DEFINITIE VAN MICROPLASTICS	3
	3.1 Oorsprong	3
	3.2 Chemische eigenschappen van microplastics	3
	3.3 Fysische eigenschappen van microplastics	4
4	EMISSIEBRONNEN EN EMISSIEROUTES	6
5	GEDRAG EN VERSPREIDING NAAR EN IN HET AQUATISCHE MILIEU	8
6	BEMONSTERING EN ANALYSE VAN MICROPLASTICS	10
	6.1 Kwaliteitscriteria	10
	6.2 Bemonstering van microplastic	11
	6.3 Analyse van microplastic	11
7	AANWEZIGHEID VAN MICROPLASTICS IN HET AQUATISCHE MILIEU	13
	7.1 Microplastics in oppervlaktewater	13
	7.2 Microplastics in afvalwater	14
	7.3 Microplastics in grondwater	14
	7.4 Microplastics in leiding- en flessenwater	15

8	EFFECTEN EN RISICO'S VAN MICROPLASTICS	16
	8.1 Opname en effecten van microplastics	16
	8.2 Risico's van microplastics	17
9	EMISSIEREDUCERENDE MAATREGELEN	20
10	KENNISLEEMTES	22
11	CONCLUSIES	23
12	LITERATUUR	24
BIJLAGE	MICRO- EN NANOPLASTIC ONDERZOEK AAN NEDERLANDSE INSTITUTEN EN UNIVERSITEITEN	30

1

INLEIDING

Plastic wordt veel gebruikt vanwege zijn hoge functionaliteit, betaalbaarheid en lage gewicht. In het milieu is plastic biologisch niet of nauwelijks afbreekbaar, maar ondergaat veroudering en fragmentatie, waarbij het uiteenvalt tot steeds kleinere deeltjes. Plastic deeltjes die kleiner zijn dan 5 mm worden microplastics genoemd.

Microplastics zijn wereldwijd aangetroffen in vrijwel alle milieucompartmenten waaronder lucht, water en bodem maar ook in planten, dieren en de mens. Wat microplastics tot een complex te begrijpen probleem maakt, is hun diversiteit. De deeltjes omvatten een breed scala aan verschillende polymeren, groottes en vormen. Om de impact op het milieu te begrijpen, is het belangrijk om te weten welke soorten microplastics er zijn en waar ze vandaan komen. Zodra microplastics eenmaal in het aquatisch milieu terecht komen kunnen ze namelijk interacties aangaan met levende organismen en mogelijk schadelijke effecten veroorzaken op ecosystemen. Momenteel wordt er uitgebreid onderzoek gedaan naar de risico's van microplastics voor zowel het milieu als ook de menselijke gezondheid (WHO 2022). Hoewel de volledige omvang van deze risico's nog niet duidelijk is, zijn er verschillende initiatieven met het doel de hoeveelheid (micro)plastic in het milieu te verminderen of de emissies naar de natuur te minimaliseren.

In dit rapport bieden we een overzicht van de meest recente wetenschappelijke kennis en inzichten over het thema microplastics. Hoofdstuk 3 bevat de meest gebruikte definitie van microplastics en illustreert vervolgens hoe divers hun fysisch-chemische eigenschappen kunnen zijn. Daarna gaan we in op de verschillende emissiebronnen en -routes (Hoofdstuk 4), en bespreken we het gedrag van microplastics in het aquatische milieu (Hoofdstuk 5). Hoofdstuk 6 behandelt de methoden voor de bemonstering en analyse van microplastics, en in Hoofdstuk 7 beschrijven we de beschikbare kennis over hun aanwezigheid in het aquatische milieu. In hoofdstuk 8 worden de bekende risico's en effecten samengevat, terwijl hoofdstuk 9 zich richt op emissiereducerende maatregelen. Hoofdstuk 10 identificeert de wetenschappelijke kennislacunes, en tot slot bevat hoofdstuk 11 de conclusies van dit rapport.

2

GERELATEERDE PUBLICATIES EN PROJECTEN

In het kader van de Kennisimpuls Waterkwaliteit – project Ketenverkenner zijn eerder vijf Deltafacts over het onderwerp microplastics verschenen:

- Deltafact: Microplastics, 8 februari 2020.
- Deltafact: Verdiepende analyse van microplastics bronnen, emissies en een verkenning van mogelijke emissiebeperkende maatregelen, 8 december 2021.
- Deltafact: Eco- en humane toxicologie van microplastics, deel A, Literatuuronderzoek naar de mogelijke effecten van microplastics op de humane gezondheid, 17 maart 2022.
- Deltafact: Eco- en humane toxicologie van microplastics deel B, Ecotoxicologische effecten van microplastics op het aquatische milieu, 7 mei 2022.
- Deltafact: End-of-pipe maatregelen verwijdering microplastics, 21 maart 2022.

De huidige publicatie beoogt deze Deltafacts samen te vatten en te actualiseren.

Bovendien zijn verschillende rapporten verschenen over microplastics in Nederland en lopen er diverse programma's gericht op (micro)plastics onderzoek (zie Bijlage)

3

DEFINITIE VAN MICROPLASTICS

De meest gangbare definitie is dat microplastics vaste synthetische deeltjes zijn, met een grootte tussen 1 µm en 5 mm. Nog kleinere deeltjes worden ook wel nanoplastics genoemd (Frias and Nash 2019). Naast grootte kunnen microplastics ook worden ingedeeld op basis van hun oorsprong (primair, secundair), hun chemische eigenschappen (polymeertype en additieven) en hun fysische eigenschappen (grootte en vorm). Deze eigenschappen worden hieronder toegelicht omdat ze belangrijk zijn voor het gedrag van microplastics in het aquatische milieu, voor de ecotoxicologische effecten en de uiteindelijke risico's.

3.1 OORSPRONG

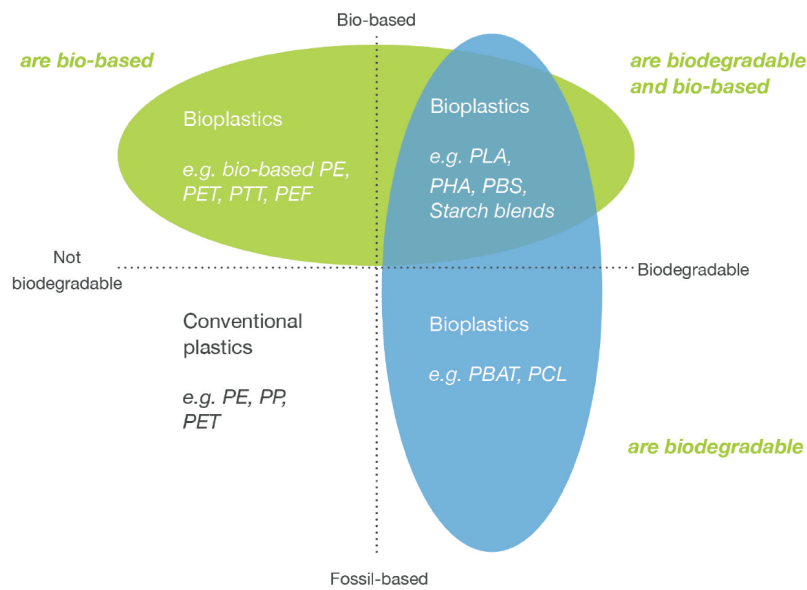
Microplastics worden op basis van hun oorsprong grofweg in twee groepen verdeeld: (1) primair of (2) secundair. Primaire microplastics worden door de producenten doelbewust gemaakt en aan verschillende producten toegevoegd, bijvoorbeeld verf of verzorgingsproducten. Secundaire microplastics ontstaan, onbedoeld, door degradatie en fragmentatie van grotere plastics. Dit fragmentatieproces kan plaatsvinden tijdens het productieproces, tijdens dagelijks gebruik of in het milieu. Dit is een voortdurend proces, wat verklaart waarom de meeste studies meer secundaire dan primaire microplastics in het milieu rapporteren.

3.2 CHEMISCHE EIGENSCHAPPEN VAN MICROPLASTICS

Polymeertype. Plastic producten worden vervaardigd uit verschillende soorten synthetische polymeren. Binnen Europa (EU27, Noorwegen, Zwitserland en het VK) zijn de meest gangbare polymeren: polyethyleen (PE; 29%), polypropyleen (PP; 20%), polyvinylchloride (PVC; 10%), polyurethaan (PU; 8%), polyethyleentereftalaat (PET; 8%) en polystyreen (PS; 6%) (PlasticsEurope 2022). Conventionele polymeren zijn meestal op basis van petroleum gemaakt. Daarnaast worden ook steeds meer 'bioplastics' geproduceerd. Dit kan een verwarrende term zijn, omdat er onderscheidt moet worden gemaakt tussen 'biobased plastics' die (gedeeltelijk) gemaakt zijn van natuurlijke grondstoffen, en 'biologisch afbreekbare plastics' die kunnen worden afgebroken door micro-organismen (Figuur 1). De biologische afbreekbaarheid wordt dus niet bepaald door het uitgangsmateriaal, maar wordt bepaald door de chemische polymeer structuur en door omstandigheden zoals temperatuur en vochtigheid. Of en wanneer plastics in het milieu biologisch afbreken is echter nog niet bekend. Bovendien zijn er nog twee speciale gevallen te noemen, namelijk deeltjes veroorzaakt door coatings en door bandenslijtage (Hartmann et al. 2019). Coatings beschermen diverse oppervlakken en bevatten vaak ook polymeren, waardoor deeltjes van verf of epoxyharsen als microplastics worden beschouwd. Dit geldt ook voor autobanden, die tot 40-60% synthetische polymeren bevatten en bij slijtage tijdens het rijden kleine deeltjes afgeven (Knight et al. 2020). Over het algemeen bevatten banden van vrachtwagens meestal natuurlijk rubber, en banden van personenauto's styreen-butadieën rubber (SBR).

Afhankelijk van het type polymeer verschillen de chemische eigenschappen zoals dichtheid en afbreekbaarheid, wat ook invloed heeft op de fysische eigenschappen.

FIGUUR 1 HET BEGRIIP 'BIOPLASTICS' IS EEN OVERKOEPELENDE TERM VOOR 'BIOBASED PLASTICS' EN 'BIOLOGISCH AFBREEKBARE PLASTICS'.
BRON: EUROPEANBIOPLASTICS (2022)



Plastic-geassocieerde chemicaliën. Chemische stoffen die aan plastics worden toegevoegd (additieven), of chemicaliën die in het milieu worden opgenomen door microplastics, worden plastic-geassocieerde chemicaliën genoemd. Additieven kunnen tijdens de productie worden toegevoegd om het polymeer te stabiliseren, bijvoorbeeld tegen hitte en UV- straling, of om de juiste eigenschappen te creëren, door bijvoorbeeld pigmenten of weekmakers toe te voegen (UNEP 2023). Net zoals sediment of algen, kunnen microplastics ook chemische stoffen uit het milieu opnemen door middel van ad- of absorptieprocessen. Een eerdere Deltafact dat zich richt op de humane gezondheid, geeft ook enkele voorbeelden van plastic-geassocieerde chemicaliën (Deltafact 2022a). Microplastics kunnen als vectoren ('dragers') voor deze chemische stoffen optreden, waarbij de chemicaliën over grotere afstanden worden getransporteerd of na voedselinname in een organisme kunnen vrijkomen. Berekeningen geven echter aan dat deze transport- of opnameroutes via plastic deeltjes meestal veel geringer zijn dan via andere dragers, zoals sediment, zwevend slib of water zelf (Koelmans et al. 2022a).

3.3 FYSISCHE EIGENSCHAPPEN VAN MICROPLASTICS

Deeltjesgrootte. Plastic fragmenteert in steeds kleinere deeltjes waardoor (micro)plastics in diverse groottes in de natuur worden aangetroffen. De analyse van monsters uit verschillende milieus (zoetwater, zoutwater, sediment, lucht) laat zien dat de concentraties toenemen met afnemende grootte van de microplastic deeltjes (Kooi and Koelmans 2019). Met afnemende grootte wordt het meten steeds uitdagender. Maar het is echter te verwachten dat dergelijk kleine deeltjes reeds in het milieu aanwezig zijn en in de loop van de tijd zullen toenemen door voortdurende fragmentatie. Onderzoekers rapporteren meestal ofwel het aantal deeltjes of de massaconcentraties. Informatie over de grootte is echter essentieel om deze met elkaar in verband te brengen

Vorm van de deeltjes. Naast een gevarieerde grootteverdeling kunnen microplastics ook diverse vormen aannemen. Deze vormen worden vaak in categorieën rapporteert, maar deze indelingen zijn echter niet eenduidig en worden niet consequent gebruikt in studies. (Koelmans et al. 2019, Redondo-Hasselerharm et al. 2023). Binnen de regelgeving voor het implementeren van maatregelen kunnen dergelijke categorieën nuttig zijn (Hartmann et al. 2019).

Maar om het transport of de biologische beschikbaarheid van microplastics te onderzoeken, is het nuttiger om de vorm te beschrijven op basis van lengte, breedte en hoogte van een deeltje, of de verhouding tussen deze aspecten op een continue schaal (Kooi and Koelmans 2019). Deze informatie wordt niet altijd vastgesteld en/of gerapporteerd, maar door dit te doen zou ons begrip van microplastics kunnen verbeteren.

4

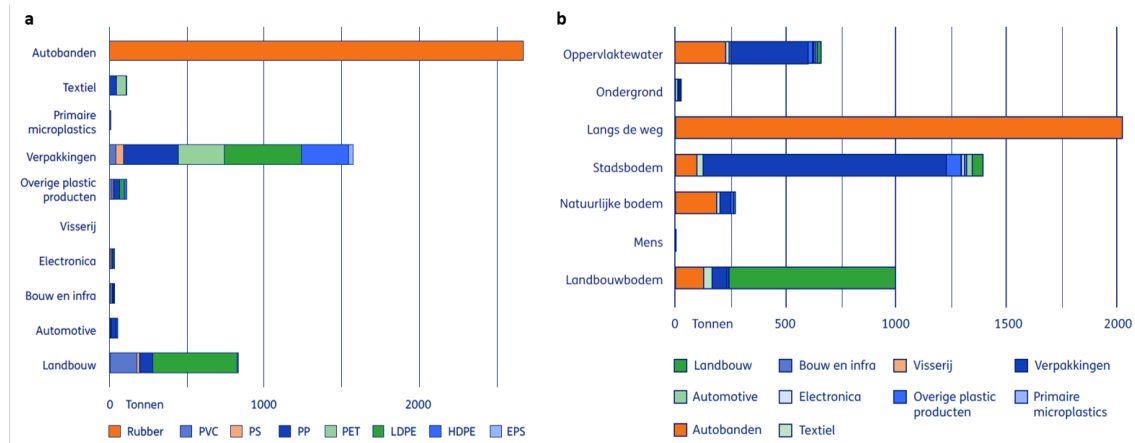
EMISSIEBRONNEN EN EMISSIEROUTES

Individuele polymeertypen kunnen een breed toepassingsgebied hebben (Figuur 2, PlasticsEurope (2022)). Dit maakt het moeilijk om polymeren die in het milieu worden gevonden rechtstreeks te koppelen aan een concrete emissiebron. Voor grote plastic voorwerpen met een herkenbare, redelijk intacte vorm kan dit nog mogelijk zijn. Maar voor microplastics is dit vaak niet meer haalbaar. In plaats daarvan worden emissies geschat op basis van Material Flow Analysis (MFA) modellen, die gebaseerd zijn op productie-, gebruik- en afvaldata (Kawecki et al. 2021, Urbanus et al. 2022). Microplastic emissies kunnen afkomstig zijn van puntbronnen of diffuse bronnen. Plastic wordt overal gebruikt in ons dagelijks leven, wat ook leidt tot aanzienlijke hoeveelheden microplastic deeltjes in huishoudelijk en industrieel afvalwater. Verschillende onderzoeken hebben aangetoond dat rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) grote delen van microplastics uit de waterstroom kunnen verwijderen (Mintenig et al. 2017, Tang and Hadibarata 2021). Maar vanwege de grote volumes water die dagelijks door een RWZI gaan en omdat deze op een punt in oppervlaktewaters worden geloosd, worden ze beschouwd als belangrijke route van microplastics naar het oppervlaktewater (van Egmond et al. 2021). Naast huishoudelijk afvalwater ontvangen RWZI's vrijwel altijd ook een deel industrieel afvalwater. Daarnaast beschikken sommige industriële bedrijven over hun eigen afvalwaterzuiveringsinstallatie (AWZI). Vooral bij industrieën die plastic produceren of plastic verpakkingen gebruiken, kunnen microplastics in het afvalwater worden aangetroffen. De exacte hoeveelheid microplastics die door deze industriële bronnen wordt geloosd, is echter nog nauwelijks onderzocht. Diffuse emissiebronnen hebben geen specifiek lozingspunt naar het watersysteem en zijn daarom moeilijker te karakteriseren. Voorbeelden zijn (micro)plastics die via oppervlakkige afstroming, regenval of met de wind worden meegevoerd en in een rivier terechtkomen, of die door afbraak van grotere plastic voorwerpen ontstaan.

Mitrano and Wohleben (2020) rangschikken de mogelijke relevantie van microplastic bronnen als volgt: verkeerd beheerd plastic afval > mechanische stress (bijv. slijtage van banden, textiel) > verlies van landbouwvelden > primaire microplastics voor milieutoepassingen (bijv. meststoffen) > primaire microplastics toegevoegd in consumentenproducten (bijv. cosmetica) > ongelukken en transportverliezen. Voor Nederland heeft TNO recentelijk een MFA model ontwikkeld om vast te stellen welke sectoren de grootste bijdragen leveren aan microplastics in het milieu, waar deze terechtkomen en hoe ze verminderd kunnen worden (Urbanus et al. 2022). Het MFA model toont aan dat, gebaseerd op de microplastics massa, rubberbanden de grootste emissiebron zijn (Figuur 2, Urbanus et al. (2022)). Dit komt door de aanzienlijke slijtage tijdens gebruik, wat resulteert in 10-20% massa verlies gedurende de levensduur van een band. Ook de landbouw en de verpakkingindustrie zijn significante emissiebronnen van microplastics die direct kunnen worden gevormd of als gevolg van fragmentatie ontstaan (Figuur 2a). De directe emissie van microplastics naar rivieren is waarschijnlijk lager dan die naar de bodem (Figuur 2b), maar milieucompartimenten zijn met elkaar verbonden. Door atmosferische depositie of oppervlakkige afstroming van het omliggende land kunnen microplastics naar rivieren transporteren, of ze kunnen via het rioolstelsel naar RWZI's worden geleid waar ze potentieel kunnen worden verwijderd.

FIGUUR 2 JAARLIJKSE (A) MICROPLASTICS VORMING PER POLYMEERTYPE, EN PER SECTOR, EN (B) MICROPLASTICS EMISSIES PER SECTOR NAAR VERSCHILLENDE MILIEUCOMPARTIMENTEN (BRON: URBANUS ET AL. (2022))

Emissiebronnen die belangrijk zijn voor mensen zijn onder andere microplastics afkomstig van verpakkingsmaterialen (Sobhani et al. 2020) of van kleding, vloerbedekking en gordijnen in huis (Nizamali et al. 2023). Blootstellingsroutes zijn inademen, inslikken en contact met de huid, maar er is weinig bekend over hun relatieve belang (WHO 2022).



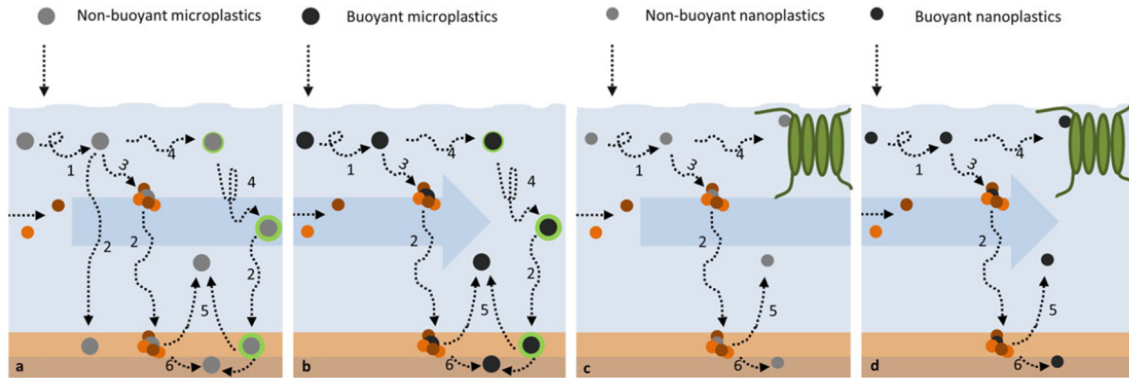
5

GEDRAG EN VERSPREIDING NAAR EN IN HET AQUATISCHE MILIEU

Veel modellen richten zich uitsluitend op microplastics in land, water of lucht, ondanks dat deze compartimenten in werkelijkheid met elkaar verbonden zijn. Ze kunnen zich bijvoorbeeld voornamelijk concentreren op het transport in oppervlaktewater, wat mogelijk leidt tot een onderschatting van de rol van de lucht- en bodemcompartimenten. Multimedia-modellen proberen dit hiaat op te vullen door de verspreiding van micro- en nanoplastics tussen de verschillende milieuc compartimenten te simuleren (Quik et al. 2023). Een voorbeeld hiervan is het recent ontwikkelde ‘SimpleBox4Plastic’-model van het RIVM.

Eenmaal in een rivier kunnen (micro)plastics worden meegevoerd naar de zee en de zeebodem. De rivier dient echter niet alleen als transportmiddel voor plastic deeltjes maar er vindt ook aanzienlijke interactie plaats met de waterbodem en de oever waar ze kunnen vast komen te zitten (Mennekes and Nowack 2023, Talbot and Chang 2022). Deze processen vertonen vaak gelijkenissen met die van andere, natuurlijke deeltjes (Koelmans et al. 2022b). Zoals genoemd hebben microplastics een breed scala aan groottes, vormen, porositeit en dichtheiden. Elk van deze factoren beïnvloedt het gedrag van een plastic deeltje in het milieu en daarmee de transportsnelheid of verblijftijd in een watersysteem. Processen zoals aggregatie met zwevend slib, fragmentatie, en de vorming van biofilms (een laag van bacteriën en algen op de plastics) beïnvloeden het transport van deze deeltjes. Het begrijpen van de mechanismen achter deze processen kan bijvoorbeeld helpen verklaren waarom niet-drijvende polymeren worden aangetroffen in oppervlaktewater, en vice versa, en waarom drijvende polymeren soms worden gevonden in het sediment (Figuur 3). Experimentele studies zijn nodig om deze processen te onderzoeken en de belangrijkste parameters die deze processen sturen vast te stellen. Vervolgens kunnen deze parameters worden toegevoegd aan modelstudies. Deze modelstudies kunnen een belangrijke rol spelen bij het aanvullen van monitoringsgegevens (Uzun et al. 2022). Afhankelijk van het gewenste detailniveau kunnen gedetailleerde ruimtelijk-temporele modellen of nationale emissie- of transportmodellen worden gebruikt. Zo kunnen modellen helpen om meer inzichten te bieden in de aanwezigheid van plastic, of om het succes te kunnen beoordelen van maatregelen om plastic te verminderen, of een effectieve meetstrategie op te stellen omdat zij kunnen aangeven bij welke locaties zeer lage of zeer hoge concentratie te verwachten zijn (Kooi 2022, Kooi et al. 2018, Koutnik et al. 2021).

FIGUUR 3 SCHEMA VAN DE BELANGRIJKSTE PROCESSEN DIE EEN ROL SPELEN BIJ HET TRANSPORT VAN (A) NIET-DRIJVENDE MICROPLASTICS, (B) DRIJVENDE MICROPLASTICS, (C) NIET-DRIJVENDE NANOPLASTICS EN (D) DRIJVENDE NANOPLASTICS IN EEN RIVIER. PROCESSEN OMVATTEN (1) TURBULENT TRANSPORT, (2) BEZINKING, (3) AGGREGATIE, (4) BIOFILM FORMING/ AANHECHTING AAN ALG, (5) RESUSPENSIE EN (6) BEGRAVING. AGGREGATEN KUNNEN WORDEN GEVORMD MET SEDIMENT, ALGEN, ORGANISCH MATERIAAL OF OPGELOSTE MATERIAAL. NIET AFGEBEELD ZIJN INTERACTIES MET ORGANISMEN (BIJV. ZOÖPLANKTON, MOSSELEN) WAARDOOR PLASTICDEELTJES OOK KUNNEN WORDEN VERPLAATST OF VERANDERT (BRON: KOOI ET AL. (2018))



6

BEMONSTERING EN ANALYSE VAN MICROPLASTICS

Tot op heden is er geen gestandaardiseerde methode ontwikkeld om microplastics in het milieu te bepalen. In plaats daarvan zijn er verschillende soorten methoden beschikbaar om microplastics te kunnen bemonsteren, te extraheren en te analyseren. Geen enkele methode is geschikt voor alle situaties, gezien de brede variatie in de grootte van microplastics, de complexiteit van milieumatrices en de diversiteit in bestaande vragen en probleemstellingen. Elke methode heeft zowel voordelen als beperkingen (Ivleva 2021, Miller et al. 2021, Primpke et al. 2020). Om te kunnen kiezen zijn bijvoorbeeld de volgende overwegingen van belang:

- Moet de methode geschikt zijn voor een grove indicatie, met de nadruk bijvoorbeeld op enkele veelvoorkomende polymeertypes, of moet de methode juist zeer gedetailleerd zijn en alle soorten plastics detecteren?
- Is er interesse in de totale massa, of moeten de resultaten specifiek zijn voor de aantallen deeltjes, de verschillende polymeren en/of de microplastics groottes en vormen?
- Wat is de kleinste microplastics grootte die van belang is?
- Moet de bemonstering tijd-geïntegreerd of op een precies moment ('snapshot') worden uitgevoerd?
- Moet de methode geschikt zijn om gemeten concentraties te toetsen/beoordelen in relatie tot doelen of normen?
- Moet de methode gebruikt kunnen worden om trends en effecten van maatregelen vast te stellen en te evalueren?

Dergelijke vragen bepalen welke van de volgende methoden moeten worden gekozen. Ze bepalen ook de benodigde menselijke en financiële inspanningen.

6.1 KWALITEITSCRITERIA

Om betrouwbare resultaten te verkrijgen, zijn er tal van uitdagingen bij het bemonsteren, extraheren en analyseren van microplastics (Brander et al. 2020, Koelmans et al. 2019). Deze uitdagingen voor kwaliteitsborging en kwaliteitscontrole zijn als criteria samengevat voor watermonsters (Koelmans et al. 2019) en voor sedimentmonsters (Redondo-Hasselerharm et al. 2023) en kunnen worden onderverdeeld in de categorieën: bemonstering, monsterbehandeling, vermindering van verontreiniging, en identificatie van de polymeren. Alleen als al deze criteria worden toegepast, zijn de resultaten betrouwbaar voor verdere toepassingen, zoals bijvoorbeeld risicobeoordeling.

6.2 BEMONSTERING VAN MICROPLASTIC

Om de aanwezigheid van microplastics in een aquatisch systeem te beoordelen, is het noodzakelijk om monsters te nemen in de waterkolom, de waterbodem en op de oevers. Deze zeer diverse matrices en omstandigheden vereisen verschillende bemonsteringsmethoden. Het ingewikkelde aspect is dat microplastics, in tegenstelling tot andere verontreinigingen, niet homogeen in het milieu voorkomen en aanzienlijke variaties in concentratie kunnen vertonen. Om deze variabiliteit van microplastics te ondervangen, moet het monstervolume dus voldoende groot zijn (Koelmans et al. 2019).

Voor watermonsters wordt dit vaak bereikt door een groot volume water te filtreren. Dit kan relatief eenvoudig worden gedaan voor grotere microplastics en zelfs macroplastics (van Hoytema et al. 2023) door netten met filteropeningen van enkele honderden micrometers in een rivier te plaatsen. Voor kleinere microplastics is dit echter lastiger en tijdrovender vanwege het risico op verstopping van het filter. Een ander nadeel van filtratie is dat de gegevens mogelijk vertekend zijn doordat deeltjes groter dan de filterporiën toch kunnen ontsnappen en kleinere deeltjes in de ‘filterkoek’ kunnen achterblijven (Lorenz et al. 2019). Hoewel grijpmonsters met emmers of flessen niet met dit probleem te maken hebben, zijn ze geen echte alternatieven omdat ze niet kunnen voldoen aan de vereiste monsterhoeveelheden. Daarnaast werkt Rijkswaterstaat aan een tijd-geïntegreerde bemonsteringsmethode waarbij een onbemande sedimentkist in het milieu wordt geplaatst, en water uit een bepaalde diepte door de kist wordt gepompt. De kist heeft barrières om zowel deeltjes met een hogere, als een lagere dichtheid dan het doorstromende water op te vangen (RWS 2023a).

Microplastic hoeveelheden in het sediment kunnen aanzienlijke ruimtelijke variabiliteit vertonen. Wanneer het doel is om deze variabiliteit te beoordelen, is het raadzaam om meerdere monsters binnen een beperkt gebied te verzamelen en ze individueel te analyseren. Daarentegen kunnen gemengde monsters een praktischere benadering zijn bij het uitvoeren van trendanalyses of lopende monitoring. Hiervoor introduceerden Bäuerlein et al. (2023) een statistisch instrument dat is ontworpen om de homogeniteit van individuele monsters te kunnen beoordelen en om het meest kosteneffectieve aantal monsters vast te stellen die nodig zijn om vergelijkbare resultaten te behalen bij toekomstige monitoring. Terwijl de bemonstering op oevers vrij eenvoudig kan worden uitgevoerd met een sedimentcorer of spaden, zijn sedimentcorer of Van Veen grijpers nuttig voor de rivierbodem.

Bij het plannen van een bemonstering voor microplastics mag men niet vergeten dat extractie en analyse zeer arbeidsintensief zijn. Het kiezen van de juiste locaties is daarom van cruciaal belang om optimaal gebruik te maken van een beperkt aantal monsters (Miller et al. 2021).

6.3 ANALYSE VAN MICROPLASTIC

In veel onderzoeken worden microplastics uitsluitend visueel, met behulp van een binoculair of microscoop, geanalyseerd. Deze methode is echter zeer gevoelig voor fouten, vooral voor de kleinere deeltjes en zou dus beter kunnen worden vermeden bij het onderzoeken van microplastics kleiner dan enkele honderd μm . Over het algemeen zijn er twee manieren om de individuele polymeertypes van kleinere microplastics te identificeren. Ten eerste zijn er spectroscopische technieken, zoals Fourier-Transform-Infrarood micro-spectroscopie (μFTIR) of Raman micro-spectroscopie (μRaman), en ten tweede zijn er de thermische analysemethoden, zoals Pyrolyse of thermogravimetrische analyse (TGA) gekoppeld aan gaschromatografie- massaspectrometrie (GC-MS). Elk van deze technieken kent voor- en nadelen (Ivleva 2021, Mariano et al. 2021).

Het is de onderzoeksvraag die bepaalt welke methode het beste kan worden gebruikt: Met spectroscopische technieken kunnen de polymeertypen van individuele microplastics worden geïdentificeerd. Daarnaast bieden ze ook informatie over de grootte en vorm van elk deeltje. Deze methoden hebben echter beperkingen wat betreft de grootte van de deeltjes: μ Raman is effectief tot $>1 \mu\text{m}$, en μ FTIR tot $>10\text{-}20 \mu\text{m}$. μ Raman wordt beschouwd als een alternatieve of aanvullende analytische techniek naast μ FTIR, wat tot nu toe de meest gebruikte techniek is. De looptijd van een μ Raman analyse is afhankelijk van het aantal te analyseren deeltjes, waardoor het over het algemeen meer tijd in beslag neemt dan een μ FTIR analyse, en waardoor vaak alleen kleinere volumes kunnen worden geanalyseerd (Maurizi et al. 2023b). Beide methodes vereisen een zeer bewerkelijke monstervoorbewerking, omdat de microplastic identificatie anders te veel wordt verstoord door de monstrematrix.

Met thermische analyses wordt het totale polymeergehalte in een monster bepaald. Deze methodes zijn niet beperkt door de grootte van microplastics. Zij geven echter geen informatie over de karakteristieken van individuele microplastic deeltjes. Tenzij er goed gedefinieerde filtratiestappen zijn opgenomen in de monstervoorbewerking is het dus onmogelijk om te zeggen of de massaresultaten worden veroorzaakt door één groot deeltje of door talloze kleinere deeltjes. Voor toepassingen waar alleen de massa nodig is, bijvoorbeeld emissies naar zee, hoeft dit geen probleem te zijn. Voor risicobeoordeling of modellering van transport is echter wel informatie over de verzameling van de eigenschappen (zoals grootte en volume van) van individuele microplastic deeltjes nodig. Thermische analyses kunnen wel worden gebruikt om slijtagedeeltjes van banden te detecteren (Dröge and Tromp 2019, RWS 2023b) wat kan niet worden bereikt met spectroscopische technieken.

Tot op heden is er geen geharmoniseerde methode voor de analyse van microplastics bepaald en toegepast. Ook is er geen consensus over welke eenheden (deeltjes of massa) het beste gerapporteerd moeten worden. De meest nauwkeurige gegevens kunnen worden gegenereerd wanneer verschillende methodologieën worden gecombineerd (Mariano et al. 2021), en zoveel mogelijk karakteristieken van de deeltjes worden gerapporteerd, zoals polymeertype, grootte, vorm, volume en oppervlak (Koelmans et al. 2019, Koelmans et al. 2022b, Kooi and Koelmans 2019, Mintenig et al. 2020). Niettemin blijven de analyses arbeidsintensief en kostbaar en worden deze karakteristieken zelden allemaal gerapporteerd.

Idealiter zou er een gestandaardiseerd meetprotocol moeten zijn dat een beperkt aantal methoden omvat die elkaar aanvullen om microplastics zo uitgebreid mogelijk te kunnen detecteren en beschrijven. Deze methoden zouden verschillende niveaus van detail kunnen bereiken en kunnen worden toegepast afhankelijk van de specifieke hoofddoelen¹. Door het gebrek aan harmonisatie zijn er wel correctie- en standaardisatiemethoden ontwikkeld om datasets beter met elkaar te kunnen vergelijken (Koelmans et al. 2020). Deze worden bijvoorbeeld toegepast in de beoordeling van de risico's van microplastics voor mens en milieu.

1 Zo'n geharmoniseerd meetprotocol is zeer gewenst door waterbeheerders, waaronder waterschappen en Rijkswaterstaat. Een meetstrategie om microplastics in drinkwater te meten wordt zelfs verplicht gesteld vanuit de EU (EU-richtlijn 2020/2184) vanaf januari 2024. Ondanks deze verplichting zijn er tot nu toe geen nadere specificaties gegeven over de te gebruiken meettechnieken en de rapportage van deeltjes of massa, of over de grootte die gedetecteerd moet worden.

7

AANWEZIGHEID VAN MICROPLASTICS IN HET AQUATISCHE MILIEU

7.1 MICROPLASTICS IN OPPERVLAKTEWATER

Microplastics zijn wereldwijd aangetroffen in zoetwatersystemen van bijna elke grootte en type waaronder rivieren, kanalen en meren. De gerapporteerde concentratieniveaus variëren aanzienlijk, van 0,01 tot $3,9 \times 10^6$ microplastic deeltjes per m^3 (Kurniawan et al. 2023). In Nederlandse rivieren zijn vergelijkbare hoeveelheden gedetecteerd. Maar ook hier variëren de gerapporteerde deeltjesconcentraties in oppervlaktewater van $1,3 \times 10^4$ tot 4×10^5 microplastics per m^3 (Bäuerlein et al. 2022), van 67 tot $1,2 \times 10^4$ microplastics per m^3 (Mintenig et al. 2020) en van 1×10^3 tot $5,3 \times 10^3$ microplastics per kilogram drooggewicht zwevende stof (Leslie et al. 2017), en in sediment van $2,9 \times 10^3$ tot $1,7 \times 10^4$ microplastics per kilogram drooggewicht sediment (Pan et al. 2021). Voor monitoring bepaald Rijkswaterstaat de massa's van 8 polymeren in de Rijn en in de Maas middels thermal extraction desorption (TED) GC-MS. De som van deze polymeren lag tussen de 1,0 en 2,4 g per kilogram drooggewicht zwevend stof (RWS 2023c).

Een deel van de verschillen in de gemeten concentraties kan worden toegeschreven aan verschillen in de methodologieën die in de studies zijn toegepast, de naleving van kwaliteitscriteria, en de specifieke grootte van microplastics die zijn onderzocht en gerapporteerd (hoofdstuk 6). Bijna alle onderzoeken komen echter tot dezelfde conclusie; namelijk dat de concentratie van microplastics toeneemt naarmate de grootte afneemt. Om dit te illustreren rapporteren studies concentraties vaak in grootteklassen. Maar ook deze zijn verschillend en zijn hierdoor moeilijk te vergelijken. In plaats daarvan stellen Kooi and Koelmans (2019) voor om de eigenschappen van microplastics, waaronder hun lengte, te presenteren aan de hand van cumulatieve frequentieverdelingen.: De aanpak werd onderbouwd op basis van hoogwaardige μ FTIR-gegevens uit Nederlandse en Duitse zoetwater- en mariene gebieden (Kooi et al. (2021)). Alle gebieden vertonen de hoogste concentraties voor de kleine microplastics. De frequentieverdelingen zijn in de meeste matrices (biota, effluenten, oppervlaktewater en marien sediment) redelijk vergelijkbaar. Alleen bij zoetwatersedimenten zijn er meer kleinere microplastics en bij marine oppervlaktewateren meer grotere microplastics. Dergelijke verdelingen zijn inmiddels ook beschikbaar voor microplastic in de lucht en in de bodem (Nizamali et al. 2023, Redondo-Hasselerharm et al. 2024).

In Nederlandse rivieren zijn meer dan 20 verschillende polymeertypes gevonden. Gebaseerd op μ FTIR-data rapporteren Mintenig et al. (2020) vooral PE, PP en ethyleenpropyleendieënmonomeer rubber (EPDM), Bäuerlein et al. (2022) vooral PET, rubbers en PE in oppervlaktewater, terwijl in sediment vooral acrylaat werd gevonden (Pan et al. 2021). Gebaseerd op de totaal aangetroffen massa werd vooral PE (76-86%) gedetecteerd maar ook SBR (7-11%), wat waarschijnlijk afkomstig is van autobandenslijtage (RWS 2023c). Deze gegevens zijn belangrijk omdat black carbon in autobanden IR-technieken belemmert in het identificeren van het SBR aandeel.

Over nanoplastics in het milieu weten we nog heel weinig omdat slechts een aantal eerste metingen hun aanwezigheid in verschillende milieumatrices hebben aangetoond (Materić et al. 2022a, Materić et al. 2022b, Maurizi et al. 2023a, Ter Halle et al. 2017, Wahl et al. 2021).

7.2 MICROPLASTICS IN AFVALWATER

Het wijdverbreide gebruik van plastic in ons dagelijks leven leidt tot aanzienlijke hoeveelheden microplasticdeeltjes in huishoudelijk en industrieel afvalwater. Afhankelijk van de grootte van de plastic deeltjes en de zuiveringsstappen kunnen tot 99,9% van de microplastics in afvalwater worden vastgehouden door een RWZI (Tang and Hadibarata 2021, van Egmond et al. 2021). Het moet echter worden opgemerkt dat de meeste studies hooguit zoeken naar microplastics tot 20 µm grootte. Er is weinig bekend over de verwijdering van microplastics kleiner dan 20 µm, maar geavanceerde filtratietechnologieën hebben het potentieel om deze te kunnen verwijderen (Mintenig et al. 2017, van Egmond et al. 2021). Omdat de kleinste microplastics het meest voorkomen, is het belangrijk om hier beter inzicht in te krijgen. Dit blijft echter een uitdaging vanwege de arbeidsintensieve analyses en de complexe matrix van afvalwater.

Op basis van de beschikbare studies zijn geen noemenswaardige verschillen in polymersamenstelling tussen ruw en gezuiverd afvalwater gedetecteerd (Simon et al. 2018). De polymersamenstelling blijkt ook vergelijkbaar te zijn met wat al aanwezig is in rivierwater (Mintenig et al. 2020). Microplastics die binnen RWZI's worden verwijderd blijven achter in het zuiveringsslib. In Nederland wordt vrijwel al het zuiveringsslib verbrand. Maar in andere Europese landen wordt zuiveringsslib nog steeds op het land uitgereden, waardoor microplastics alsnog in de bodem terecht kunnen komen.

7.3 MICROPLASTICS IN GRONDWATER

Er is relatief weinig bekend over microplastics in grondwater, omdat er tot nu toe weinig studies zijn uitgevoerd die de aanwezigheid van microplastics in grondwater bepalen (Sangkham et al. 2023). Ook transport en gedrag van microplastics in grondwatersystemen zijn weinig bestudeerd. In de literatuur zijn concentraties van 0,1 tot 6832 microplasticdeeltjes per liter gerapporteerd, wat dus een aanzienlijke variatie betekent. Bijna alle studies zijn gepubliceerd na 2019 en zijn niet systematisch gescreend en beoordeeld op belangrijke criteria voor kwaliteitsborging en kwaliteitscontrole (Koelmans et al. 2019). Maar het is opvallend dat sommige studies methoden gebruiken die ver weg zijn van de aanbevolen benaderingen. Zo waren de monsters vaak te klein (0,1 tot 10 liter i.p.v. de aanbevolen > 500 liter), waren de analytische methoden onvoldoende (puur visuele analyse i.p.v. een uitgebreid polymeer identificatie), en werden negatieve controles niet uitgevoerd of gerapporteerd (Koelmans et al. 2019). Dit moet dus in gedachten worden gehouden bij het interpreteren van de gemelde aantallen microplastics. Maar er is één recente studie die gemiddeld 2,5 microplastics per liter in Deens grondwater rapporteert, waarbij wel alle criteria in overweging zijn genomen (Maurizi et al. 2023a). Naar de aanwezigheid van microplastics in rivierwater en gedurende het hele waterzuiveringsproces kijkend, laten Bäuerlein et al. (2022) zien dat natuurlijke zuiveringsstappen, zoals duininfiltratie en sedimentatie, microplastics effectief kunnen verwijderen.

7.4 MICROPLASTICS IN LEIDING- EN FLESSENWATER

Diverse studies in verschillende landen hebben de aanwezigheid van microplastics in leidingwater en flessenwater aangetoond (WHO 2022). In totaal zijn er tussen de 0 en 1000 microplasticdeeltjes per liter in leidingwater, en tussen de 0 en 10000 microplasticdeeltjes per liter in flessenwater gemeld (Kirstein et al. 2021). Het is niet verrassend dat voornamelijk PET-deeltjes werden gevonden in flessenwater, en dat de aanwezigheid van dergelijke deeltjes kan worden gerelateerd aan frictie en erosie van fles en dop (Kirstein et al. 2021, Nizamali et al. 2023). Zoals bij andere typen water zijn er enorme verschillen in gerapporteerde concentraties, maar ook in de toepassing van kwaliteitscriteria (Koelmans et al. 2019)

Vergelijkbaar met de RWZI's geldt ook voor drinkwaterzuiveringsinstallaties (DWZI's) dat ze grote hoeveelheden (80-99%) van de microplastics uit oppervlaktewater kunnen verwijderen (Bauerlein et al. 2022, Pivokonsky et al. 2018). In drinkwater van een Deense DWZI die wordt gevoed door grondwater hebben Maurizi et al. (2023a) met μ Raman microplastics geanalyseerd tot 1 μ m grootte. Ze vonden dat 43% van de microplasticdeeltjes en 75% van de microplasticmassa werden verwijderd door de DWZI. Dit bevestigt wat vaak wordt genoemd, maar moeilijk te beoordelen is met andere meetmethoden die beperkt zijn door grotere deeltjesgroottes (bijv. μ FTIR): grotere microplastics worden beter vastgehouden (80% verwijdering van microplastics > 10 μ m, daarom de hogere massaretentie). Daarentegen werden microplastics tussen 1 tot 5 μ m aanzienlijk minder goed vastgehouden dan grotere deeltjes (41% verwijdering).

De analyse van schone drinkwatermonsters is vrij eenvoudig omdat ze geen monsterzuivering vereisen. Zo 'verstoren' aanzienlijk minder niet-synthetische deeltjes de analyse van microplastics, hetgeen de toepassing van μ Raman mogelijk maakt. Verschillende studies konden zo aantonen dat in (flessen) drinkwater de hoogste aantallen microplastics een grootte tussen 1-10 μ m hebben (Maurizi et al. 2023a, Pivokonsky et al. 2018, Schymanski et al. 2018) en dat eerdere onderzoeken met μ FTIR, concentraties in drinkwater mogelijk hebben onderschat (Maurizi et al. 2023b). Het is moeilijker te beoordelen, maar het over het hoofd zien van zulke kleine plastics komt waarschijnlijk ook voor in andere matrices en mag niet worden vergeten bij het beoordelen van hun effecten. Het analyseren van nanoplastics blijft nog uitdagender, maar Maurizi et al. (2023a) konden met μ Raman ook de aanwezigheid van nanoplastic in drinkwater kwalitatief bevestigen.

8

EFFECTEN EN RISICO'S VAN MICROPLASTICS

8.1 OPNAME EN EFFECTEN VAN MICROPLASTICS

Vanwege de grote diversiteit van microplastics zijn de mechanismen voor opname, bioaccumulatie en schadelijke effecten, en de selectie van eenheden om deze effecten te kwantificeren, divers en complex (Koelmans et al. 2022b). Dit onderstreept de noodzaak van systematisch onderzoek om deze mechanismen te ontrafelen.

Opname

De opname door inslikken van microplastics is bevestigd door laboratorium- en veldstudies voor een breed scala aan soorten. Deze inname is afhankelijk van factoren zoals deeltjesgrootte, soortspecifieke kenmerken en omgevingsfactoren. Biofilms kunnen de eigenschappen van microplastics veranderen en de opname van deeltjes bevorderen of remmen op basis van hun grootte en aggregatie (Amariei et al. 2022). Eenmaal ingenomen kunnen microplastics verschillende paden binnen organismen volgen, waardoor hun spijsverteringsstelsel wordt aangetast, en de deeltjes mogelijk in de bloedbaan terechtkomen. Een recente studie heeft polymeren gevonden in de menselijke bloedsomloop (Leslie et al. 2022). Spijsverteringsprocessen kunnen de eigenschappen van microplastics veranderen en in sommige gevallen zelfs leiden tot fragmentatie in kleinere deeltjes (Dawson et al. 2018).

Effecten

In het laboratorium zijn schadelijke effecten van microplastics op water- en bodemorganismen aangetoond. Ze kunnen ook de soortendiversiteit en de biomassa op populatieniveau verminderen (Redondo-Hasselerharm et al. 2020). Op individueel niveau hebben microplastics invloed op verschillende aspecten, waaronder overleving, voortplanting, groei, voeding, ontwikkeling, mobiliteit en fotosynthetische efficiëntie (Blackburn and Green 2022, Franzellitti et al. 2019, Koelmans et al. 2022b). Effecten op fysiologisch niveau omvatten verhoogd zuurstofverbruik, ontsteking, verminderde lysosomale stabiliteit, antioxidantcapaciteit, DNA-schade, neurotoxiciteit, oxidatieve schade, darmfloradisbalans, veranderingen in genetische expressie, ionenuitwisseling en enzymatische activiteit. De mechanismen achter deze effecten blijven grotendeels onbekend. Maar ze houden vaak verband met fysieke schade veroorzaakt door microplastics of verminderde voeding als gevolg van hun aanwezigheid (Koelmans et al. 2022b, Thornton Hampton et al. 2022). Andere factoren zoals oppervlakte-eigenschappen of het lekken van giftige chemicaliën uit microplastics kunnen ook bijdragen. De ernst van deze effecten hangt af van de microplastic eigenschappen, concentraties en blootstellingsduur.

In twee recente reviews is de bewijskracht voor deze ecologische effecten en mechanismen beoordeeld. Voedselverdunding, interne en externe fysieke schade en oxidatieve stress zijn daarbij als belangrijke mechanismen geïdentificeerd (de Ruijter et al. 2020, Thornton Hampton et al. 2022). Uit een recent onderzoek is gebleken dat de inname van microplastics ook tot positieve effecten kan leiden vanwege de aanwezigheid van een voedzame biofilm op de deeltjes (Amariei et al. 2022). Microplastics bevinden zich samen met natuurlijke deeltjes in het milieu. Hierdoor treden effecten van microplastics vaak op naast die van natuurlijke deeltjes (Koelmans et al. 2022b, Ogonowski et al. 2023). Uit vergelijkingen blijkt dat

microplastics bij vergelijkbare concentraties nadeligere effecten veroorzaken als natuurlijke deeltjes (de Ruijter et al. 2024, Ogonowski et al. 2023). Er is echter meer onderzoek nodig om hun interactie met andere soorten microdeeltjes, zoals roet, zwarte koolstofdeeltjes en zwevende stoffen in rivieren, te begrijpen. Nanoplasticdeeltjes vormen extra uitdagingen vanwege hun complexe kenmerken, die niet goed worden begrepen voor milieurealistische omstandigheden.

8.2 RISICO'S VAN MICROPLASTICS

Beoordeling van ecologische risico's van microplastic deeltjes

Het antwoord op de vraag: 'Hoe erg is verontreiniging van het milieu met microplastics?' wordt in belangrijke mate bepaald door 'hoe erg wij het vinden'. Een groot onderdeel daarvan wordt bepaald door de risico-perceptie bij het publiek, beheerders en beleidsmakers (SAPEA 2019). Daar kunnen (natuur)wetenschappers weinig over zeggen, maar het is wel onderdeel van de sociale wetenschappen. Er bestaat wel een natuurwetenschappelijke methode om het 'technische' ecologische risico, of het risico voor de mens, te kwantificeren. Deze natuurwetenschappelijke methode behandelen we in deze paragraaf.

Net zoals voor meer traditionele verontreinigingen zoals zware metalen en organische microverontreinigingen, geldt voor microplastic deeltjes dat het risico kan worden ingeschat door de blootstelling te vergelijken met effectdrempels (Koelmans et al. 2017). Blootstelling wordt gekwantificeerd door middel van concentratiemetingen in water, sediment of bodem, terwijl effect drempels worden verkregen uit dosis-effect relaties die in het laboratorium worden gemeten. Een probleem hierbij is dat deze gegevens vaak met verschillende methoden worden verkregen, waardoor ze onvergelijkbaar zijn. Een blootstelling aan 100 deeltjes/L waarbij die deeltjes tussen 20 en 5000 μm groot zijn, en uit diverse polymeren bestaan, kan niet vergeleken worden met een effect drempel die gemeten is voor 100 μm grote microplastics. Dat zijn immers eigenlijk heel verschillende stressoren ('appels en peren'). De enige oplossing die op dit moment beschikbaar is, is een rekenkundige methode om die verschillen te corrigeren. Hierbij worden alle gegeven omgerekend naar een equivalent zoals dat zou gelden voor een standaard microplastics mengsel van 1 tot 5000 μm (Koelmans et al. 2020). We leggen hier kort het principe uit aan de hand van een voorbeeld. Stel dat het mechanisme waardoor mensen misselijk worden het eten van te veel appels is. In dat geval is het totale volume van die gegeten appels een plausibele maat voor de relevante dosis waarop effecten optreden. We nemen ter wille van de eenvoud van het voorbeeld aan dat andere effecten of stressoren er op korte termijn niet toe doen. In dit geval kan verondersteld worden dat hetzelfde effect zal optreden als er een gelijk volume aan peren wordt gegeten. De effect drempels van appels en peren kunnen dus in elkaar worden omgerekend op basis van het volume. In dit voorbeeld is het geconsumeerde volume de 'effect metric', en voedselverduunnig ('food dilution') het mechanisme dat leidt tot nadelige effecten. Toevallig is dit voorbeeld niet; in de literatuur is precies dit mechanisme aangemerkt als het meest plausibele mechanisme voor effecten van microplastics op kleine organismen zoals zoöplankton, met ingeslikt deeltjesvolume als de relevante maat voor de blootstelling (de Ruijter et al. 2020, Thornton Hampton et al. 2022).

Het effect en risico's van stoffen die in de microplastics aanwezig zijn

Aan microplastic deeltjes zijn vaak chemicaliën gebonden, zowel toegevoegd door de fabrikant als opgenomen (i.e., geabsorbeerd) uit de omgeving. Er bestaan daardoor zorgen dat het transport en het vervolgens inslikken van microplastic deeltjes kan leiden tot extra bioaccumulatie, blootstelling aan - en risico's door die chemicaliën, vergeleken met een scenario zonder plasticdeeltjes in ons leefmilieu. Dit zogenaamde 'microplastic vector effect' is niet

onbelangrijk, omdat al die met plastic geassocieerde chemicaliën (PGC) op achtergrondniveau in alle milieumedia kunnen voorkomen. Of dit effect zich daadwerkelijk voordoet hangt echter af van de relatieve blootstelling via microplastic vergeleken met andere blootstellingsroutes, en of de concentratiegradiënt van die chemicaliën desorptie (vrijkomen) vanuit de plasticdeeltjes bevordert.

Verskillende reviews concluderen dat het bewijs voor het optreden van het vector effect beperkt is, vaak door misinterpretaties wanneer resultaten van plastic vector studies in een milieurelevant blootstellingsscenario worden vertaald. Bijvoorbeeld; veel studies bekijken PGC-transport van microplastics naar organismen alsof het plastic vervuild is en de organismen helemaal schoon. Dit komt echter niet overeen met de situatie in het milieu, waar de concentratiegradiënten vaak klein zijn. Ook is op basis van berekeningen aangetoond dat zelfs als er transport is van chemische stoffen vanuit ingeslikt microplastics naar organismen, dit betrekkelijk gering blijft ten opzichte van het transport via andere blootstellingsroutes, zoals bijvoorbeeld voedsel of, voor aquatische organismen, water. Er is echter ook een situatie bekend waarbij wel kon worden aangetoond dat negatieve effecten op zalm, op populatie niveau, alleen verklaard konden worden door blootstelling aan een schadelijke stof afkomstig van autobandenslijtage (Tian et al. 2021). Opgemerkt moet worden dat de autobandenslijtage de bron was en dat de blootstelling optrad vanuit het verontreinigde water, maar niet vanuit door zalm ingeslikte deeltjes.

Tot dusverre uitgevoerde risicobeoordelingen

Met allerlei omrekenstechnieken van het type zoals in de vorige paragraaf uitgelegd, zijn inmiddels een beperkt aantal risicobeoordelingen uitgevoerd. In 2020 is de nieuwe risicobeoordelingsmethode in de wetenschappelijke literatuur geïntroduceerd, en is een eerste beoordeling gedaan voor oppervlaktewateren wereldwijd. Dit onderzoek leverde een indicatie dat voor 1.5% van de toen bekende blootstellingsconcentraties wereldwijd risico's kunnen worden verwacht (Koelmans et al. 2020). In 2022 is dezelfde methode gebruikt door een internationale werkgroep in de context van regelgeving voor de Staat van California. Doel van dit onderzoek was om een beoordeling van de risico's in de kustwateren (San Francisco Bay) uit te voeren (Coffin et al. 2022b). Ruim driekwart van de monsters overschreed de limiet voor de meest conservatieve drempel voor voedselverdunding. Binnen de Central Bay overschreed 38% van de monsters een hogere drempel die gedefinieerd is als trigger voor monitoring van de afvoer, wat statistisch significant was bij het betrouwbaarheidsinterval van 95%.

In 2022 is ook een risicobeoordeling voor sedimenten wereldwijd uitgevoerd. De blootstellingsconcentraties lagen onder of in de onzekerheidsmarge van de HC₅-waarden. Deze waarde geeft aan waar 5 procent van alle soorten een negatief effect ondervindt. Dit betekent dat risico's van microplastics voor sedimentorganismen bij de huidige wereldwijde concentraties niet konden worden uitgesloten. In 2023 is met dezelfde methoden een risicobeoordeling uitgevoerd voor de Laurentian Great Lakes (VS). Vanwege de onzekerheden in de parameters die voor de correcties en omrekeningen worden gebruikt, onzekerheden in het monstervolume, en variabiliteit van hydrologische condities, werd de beoordeling probabilistisch uitgevoerd, zodat ook de onzekerheden in de beoordeling transparant konden worden gecommuniceerd (Koelmans et al. 2023). Op die manier neem je alle foutenbronnen en alle variabiliteit die een rol speelt bij de uitkomst van de risicobeoordeling mee. De waarschijnlijkheid dat in delen van de meren een risico als gevolg van voedselverdunding op zou treden bedroeg voor water- en sedimentorganismen tussen de 8 en 24%. Ook een recente risicobeoordeling voor bodems laat zien dat blootstellingsconcentraties voor een beperkt aantal bodems wereldwijd,

met hoge waarschijnlijkheid (tot 95%) het optreden van effecten kan veroorzaken (Redondo Hasselerharm et al. 2023). Al deze beoordelingen laten zien dat er momenteel al risico's bestaan dat de aanwezige concentraties aan microplastics in oppervlaktewater en (water) bodem negatieve effecten kunnen hebben op organismen.

Omdat de risicobeoordelingsmethode nieuw is en uniek voor de unieke eigenschappen van microplastic, kan deze niet worden vertaald naar beoordelingsmethoden die gangbaar en bekend zijn voor watersystemen in Nederland.

Risico's voor de mens

Vergeleken met de beoordeling van ecologische risico's, staat het beoordelen van risico's voor de mens nog in de kinderschoenen. De meest recente reviews en expert rapporten (Coffin et al. 2022a, Noventa et al. 2021, WHO 2022) geven aan dat de kwaliteit van data over blootstelling en effecten nog tekortschiet om betrouwbare risicobeoordelingen uit te voeren. Dit geldt bijvoorbeeld ook voor de vaak genoemde blootstelling aan '1 creditkaart per week' (de Wit and Bigaud 2019), die op onjuiste gegevens en berekeningsmethoden berust (Pletz 2022). De meest correcte berekening tot nu toe geeft aan dat die hoeveelheid pas wordt opgenomen na 4700 jaar (Mohamed Nor et al. 2021). Voor de mens zijn alleen de kleinste plastic deeltjes, kleiner dan enkele micrometers, biologisch beschikbaar (WHO 2022). Plastics kunnen worden opgenomen door inademen, inslikken of contact met de huid en ze zijn inmiddels aangetroffen in matrices zoals placenta, bloed en feces. Maar de gegevens over de effecten die de deeltjes kunnen veroorzaken lijken op dit moment nog weinig betrouwbaar (Coffin et al. 2022a, Gouin et al. 2022). Op dit moment lopen er een aantal grote projecten die binnen enkele jaren een duidelijker beeld zullen geven over de risico's van microplastic voor de mens, zoals het CUSP-cluster, het Brigid project en het MOMENTUM project.

9

EMISSIEREDUCERENDE MAATREGELEN

Om de emissies van microplastics naar het milieu te verminderen of te voorkomen, zijn verschillende maatregelen nodig. Zo bestaan er diverse nationale en internationale maatregelen om plasticvervuiling en microplastic emissies tegen te gaan. Sommige zijn al actief, terwijl andere nog in ontwikkeling zijn (Mitrano and Wohlleben 2020). Zulke maatregelen kunnen kostbaar en complex zijn. Het is cruciaal om hun effectiviteit te beoordelen voordat beslissingen worden genomen. Dit vereist echter meer inzicht in welke soorten microplastics het grootste risico vormen, wat de belangrijkste emissiebronnen zijn en hoe de plastics zich verspreiden. Een overzicht van initiatieven wordt hieronder weergegeven en kan in de volgende studies in meer detail worden gevonden: (Deltafact 2021, Deltafact 2022c, SAPEA 2019, Schuhen and Sturm 2020).

Door voortdurende fragmentatie is plastic afval dat niet goed wordt beheerd een van de belangrijkste bronnen voor secundaire microplastics. Verbeterde recyclingtechnieken bieden de grootste voordelen en worden beschouwd als potentieel het meest effectief (Urbanus et al. 2022). Een goede inzameling van (macro)plastic afval, idealiter als onderdeel van een circulaire economie, zou de uitstoot van microplastics aanzienlijk kunnen verminderen (Mitrano and Wohlleben 2020, SAPEA 2019). Dit geldt ook voor plasticafval dat al in het milieu aanwezig is (Urbanus et al. 2022). Schoonmaakacties, vooral in combinatie met het opzetten van educatieve campagnes, kunnen een grote impact hebben en zijn goed uitvoerbaar voor veel waterbeheerders. Op Europees niveau zijn diverse maatregelen getroffen zoals de EU-richtlijnen EU 94/62/EG gericht op het verminderen van het gebruik van plastic tassen, en EU 2019/904 die plastic producten voor eenmalig gebruik verbiedt. In sommige landen, waaronder Nederland, is statiegeld voor plastic flessen ingevoerd. In een eerdere publicatie werd geschat dat statiegeld in Nederland de hoeveelheid zwerfafval met ongeveer 30% zou kunnen verminderen (Deltafact 2021). Bij het vergelijken van het verzamelde zwerfafval in 2021 (vóór de invoering van statiegeld) en 2023, werd een reductie van 70% van flessen met statiegeld gevonden, maar ook een toename van bijna 20% van flessen zonder statiegeld (Zwerfinator 2023).

Het traceren van microplastics afkomstig van autobanden in het milieu blijft een uitdaging. Toch wijzen het vinden van SBR in zwevend stofmonsters (RWS 2023c) en gegevens over productie en gebruik erop dat autobanden aanzienlijk bijdragen aan de aanwezigheid van microplastics in het milieu. Het nemen van maatregelen en een verbetering van de kwaliteit van autobanden zou totale emissies aanzienlijk kunnen verminderen (Urbanus et al. 2022). Het implementeren van dergelijke verbeteringen kan echter complex zijn. Het bevorderen van een betere bandenspanningscontrole is daarentegen een relatief eenvoudige maatregel die tot verminderde emissies zou kunnen leiden (Deltafact 2021).

Wereldwijd bestaan ongeveer 70 procent van alle geproduceerde textielvezels uit synthetische materialen. Microplastic vezels komen vrij tijdens het dragen en wassen van kleding. Het RIVM publiceerde een samenvatting van mogelijke benaderingen en maatregelen binnen de gehele textielketen, waaronder productie, overheidsbeleid, fabrikanten van wasmachines, consumenten en RWZI's (Zwart and de Valk 2019). Inmiddels is het netwerk 'microplastics-vezels uit kleding' opgericht waarbinnen partijen uit deze gehele keten samenwerken om emissies te reduceren.

In april 2023 stemden de EU-lidstaten in om beperkingen op te leggen aan bewust gebruikte microplastics, zoals aangenomen onder de REACH-verordening. In elk product met een microplasticconcentratie $\geq 0,01$ gewichtsprocent moet het aandeel microplastic worden vervangen of verminderd. Voor sommige producten is dit niet eenvoudig. Er zijn ook critici van de algemene effectiviteit van microplasticspecifieke maatregelen, aangezien bewust gebruikte microplastics niet de grootste bron van emissies zijn (Mitrano and Wohlleben 2020). Toch wordt geschat dat gedurende een periode van 20 jaar zo'n half miljoen ton minder microplastics in het milieu terechtkomen, tegen een geschatte totale kostprijs van 10 miljard euro's (ECHA 2019).

End-of-pipe maatregelen en technologische verbeteringen worden meestal beschreven in de context van afvalwaterzuivering. RWZI's verwijderen al een aanzienlijke hoeveelheid grotere microplastics. Maar er bestaat een technisch potentieel om nog meer microplastics te verwijderen, voornamelijk via geavanceerde filtratietechnologieën (Deltafact 2022c, Schuhen and Sturm 2020, Tang and Hadibarata 2021, van Egmond et al. 2021). Op deze manier kunnen potentieel ook de zeer kleine microplastics worden verwijderd. Ook kunnen betere retentiebekkens worden gebouwd om overstromingen van hemelwater te voorkomen, waardoor de kans op het wegspoelen van microplastics wordt verminderd. Deze technologieën gaan gepaard met aanzienlijke kosten, zowel wat betreft de initiële investering als ook de lopende operationele kosten. Meer gegevens, vooral over microplastics kleiner dan 20 μm , zijn nodig om het nut en de bruikbaarheid van deze investeringen te kunnen beoordelen. Echter, het zijn niet alleen de microplastics die problemen veroorzaken. Er moet ook worden gekeken naar de prestaties van deze zuiveringsstappen voor bijvoorbeeld medicijnresten of microverontreinigingen, en hoe de beste verwijdering van dit mengsel van verontreinigingen kan worden bereikt.

De efficiëntie van de meeste van deze maatregelen moet nog worden bepaald. Investeringen in monitoringsprogramma's zijn nodig om meer gegevens over de concentraties en typen microplastics in oppervlaktewater, evenals over de bronnen van plasticvervuiling, te kunnen verzamelen. Dit is essentieel om verdere stappen aan te passen, en ook nodig om te beoordelen of nieuwe technologieën (bijv. de Bubble Barrier en The Ocean Clean Up) daadwerkelijk kunnen helpen bij het verminderen van de hoeveelheid microplastics die in het milieu terechtkomen, en of dit de hoge investeringen rechtvaardigt.

10

KENNISLEEMTES

Ondanks de aanzienlijke toename van onderzoek naar microplastics in de afgelopen jaren, zijn er verschillende onderwerpen waarover de (wetenschappelijke) kennis nog beperkt is.

- Het is belangrijk om over een gestandaardiseerd protocol voor de bemonstering en analyse van microplastics te kunnen beschikken, dat ook aangeeft welke en hoe de eigenschappen moeten worden gerapporteerd. Ook ontbreekt er een (nationale) strategie voor waar en wanneer microplastics moeten worden gemeten.
- Betere meetmethoden zijn vooral nodig om de aanwezigheid van microplastics < 10 µm en nanoplastics te kunnen beoordelen. Ze zijn van bijzonder belang vanwege de hogere risico's die ze waarschijnlijk met zich meebrengen. Daarom hangen mogelijke drempels en doelen hiervan af, en is kennis hierover is nuttig voor tal van beleidsvragen.
- Fragmentatie van macroplastic tot microplastic is een belangrijk proces. Over de fragmentatie snelheid en sturende processen is echter nog te weinig bekend.
- Er zijn te weinig effectstudies die voldoende betrouwbaar zijn om gebruikt te kunnen worden bij de risicobeoordeling. Er wordt veel gespeculeerd over gerapporteerde effecten en mechanismen zonder sterke experimentele onderbouwing.
- De effecten en risico's van micro- en nanoplastics in water en bodemsystemen, en voor de mens zijn nog weinig bestudeerd. Het is onduidelijk wat hierbij het belang van plastic-geassocieerde chemische stoffen (bijvoorbeeld additieven) is. Duidelijk is dat er vele stoffen met gevaarlijke stoffeigenschappen in plastic worden toegepast (UNEP 2023). De risico's voor de mens worden op dit moment in het Nederlandse MOMENTUM project, het Europese CUSP project-cluster, en het internationale BRIGID-project bestudeerd.
- Diffuse bronnen van microplastics en vooral nanoplastics zijn nog niet goed in beeld gebracht. Modellen zijn vaak niet gevalideerd en behoeven uitbreiding naar verschillende compartimenten, vooral naar de lucht en bodem. Ook scenario's voor de toekomstige belasting van het milieu met plastic afval zijn vereist.
- Het is onduidelijk wat de kosten en effectiviteit van maatregelen zijn om de uitstoot aan microplastic naar het milieu te verminderen.

Over het algemeen gelden deze hiaten in de kennis voor alle soorten microplastics, maar ze worden vooral kritisch voor microplastics die kleiner zijn dan 10 µm en nanoplastics. Voor die kleine deeltjes zijn de uitdagingen het grootst. Omdat juist voor deze deeltjes verwacht wordt dat de concentraties bijzonder hoog zullen zijn, is het overbruggen van deze hiaten essentieel voor een goed geïnformeerd milieubeheer en milieubescherming.

11

CONCLUSIES

Microplastics, plastic deeltjes van 1 μm tot 5 mm grootte, worden wereldwijd aangetroffen in alle ecosystemen. Aangenomen wordt dat nog kleinere deeltjes, zogenaamde nanoplastics, ook aanwezig zijn, maar deze zijn tot nu toe door slechts enkele studies gedetecteerd. De identificatie van microplastics in het milieu wordt meestal gedaan met behulp van spectroscopische technieken (zoals μFTIR of μRaman) voor de identificatie en dimensionering van de plastic deeltjes, of thermische analyse (pyrolyse of TGA in combinatie met GC-MS) om de totale massa van de polymeren te bepalen. Elke vorm van analyse is bewerkelijk en wordt lastiger naarmate de plastic deeltjes kleiner zijn. Hetgeen leidt tot beperkingen in wat we weten over de aanwezigheid van microplastic types en groottes in het milieu. Hoewel dit geldt voor het hele spectrum van microplastics, is dit vooral waar voor plastic deeltjes die kleiner zijn dan 10 μm .

Plastic, en ook rubbers, worden veel gebruikt en kunnen in het milieu terechtkomen tijdens productie-, gebruiks- of recyclingprocessen. Gegevens hierover worden momenteel gebruikt om de uitstoot van microplastics naar het milieu in te schatten, waarbij slecht beheerd plastic afval, bandenslijtage en verlies van landbouwgrond als de meest relevante bronnen worden geïdentificeerd. Het begrijpen van het transport van microplastics in het milieu is een uitdaging, omdat deeltjesgrootte, vorm, porositeit en polymeertype hun gedrag kunnen beïnvloeden. Veel van deze factoren moeten nog worden onderzocht en de belangrijkste sturende parameters moeten nog worden bepaald, zodat deze kunnen worden opgenomen in (multimedia)modellen. Dergelijke modellen kunnen helpen de verspreiding van plastics in het milieu beter te begrijpen.

Microplastics zijn wereldwijd geïdentificeerd in verschillende aquatische systemen, zowel in water als in sedimenten, waarbij de gerapporteerde concentraties aanzienlijk variëren. Deze variaties kunnen het gevolg zijn van ruimtelijke verschillen of verschillen in bemonsterings- en analysemethoden. Niettemin is een gemeenschappelijke observatie in bijna alle onderzoeken dat de microplasticconcentraties toenemen naarmate de deeltjesgroottes afnemen.

Laboratoriumstudies hebben aangetoond dat er, boven bepaalde kritische concentraties, schadelijke effecten van microplastics op water- en bodemorganismen kunnen ontstaan. De ernst van deze effecten hangt af van de eigenschappen en concentraties van microplastics en de duur van de blootstelling. Tot nu toe zijn er nog maar weinig risicobeoordelingen uitgevoerd. Wel geven deze studies allemaal aan dat op locaties met de hoogst gemeten blootstellingsconcentraties in oppervlaktewater, sedimenten of bodems, de effectdrempels worden overschreden. Dit betekent dat er een concreet ecologisch risico bestaat op deze 'hotspot' locaties. Deze inzichten leiden tot verschillende nationale en internationale maatregelen die worden overwogen of al zijn geïmplementeerd om de uitstoot van microplastics in het milieu te verminderen of te voorkomen.

12

LITERATUUR

Amariei, G., Rosal, R., Fernández-Piñas, F. and Koelmans, A.A. (2022) Negative food dilution and positive biofilm carrier effects of microplastic ingestion by *D. magna* cause tipping points at the population level. *Environmental Pollution* 294, 118622.

Bäuerlein, P.S., Erich, M.W., van Loon, W.M.G.M., Mintenig, S.M. and Koelmans, A.A. (2023) A monitoring and data analysis method for microplastics in marine sediments. *Mar Environ Res* 183, 105804.

Bäuerlein, P.S., Hofman-Caris, R.C.H.M., Pieke, E.N. and ter Laak, T.L. (2022) Fate of microplastics in the drinking water production. *Water Research* 221, 118790.

Blackburn, K. and Green, D. (2022) The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. *Ambio* 51(3), 518-530.

Brander, S.M., Renick, V.C., Foley, M.M., Steele, C., Woo, M., Lusher, A., Carr, S., Helm, P., Box, C., Cherniak, S., Andrews, R.C. and Rochman, C.M. (2020) Sampling and Quality Assurance and Quality Control: A Guide for Scientists Investigating the Occurrence of Microplastics Across Matrices. *Applied Spectroscopy* 74(9), 1099-1125.

Coffin, S., Bouwmeester, H., Brander, S., Damdimopoulou, P., Gouin, T., Hermabessiere, L., Khan, E., Koelmans, A.A., Lemieux, C.L., Teerds, K., Wagner, M., Weisberg, S.B. and Wright, S. (2022a) Development and application of a health-based framework for informing regulatory action in relation to exposure of microplastic particles in California drinking water. *Microplastics and Nanoplastics* 2(1), 12.

Coffin, S., Weisberg, S.B., Rochman, C., Kooi, M. and Koelmans, A.A. (2022b) Risk characterization of microplastics in San Francisco Bay, California. *Microplastics and Nanoplastics* 2(1), 19.

Dawson, A.L., Kawaguchi, S., King, C.K., Townsend, K.A., King, R., Huston, W.M. and Bengtson Nash, S.M. (2018) Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nature Communications* 9(1), 1001.

de Ruijter, V.N., Redondo Hasselerharm, P.E., Gouin, T. and Koelmans, A.A. (2020) Quality criteria for microplastic effect studies in the context of risk assessment: A critical review. *Environ Sci Technol*.

de Ruijter, V.N., Xie, X. and Koelmans, A.A. (2024) Microplastics Versus Natural Mineral Particles. How to Create and Test Them While Maintaining Environmental Relevance. SSRN.

de Wit, W. and Bigaud, N. (2019) No plastic in nature: Assessing plastic ingestion from nature to people, WWF.

Deltafact (2020) Microplastics.

Deltafact (2021) Verdiepende analyse van microplastics bronnen, emissies en een verkenning van mogelijke emissiebeperkende maatregelen.

Deltafact (2022a) Eco- en humane toxicologie van microplastics, deel A. Literatuuronderzoek naar de mogelijke effecten van microplastics op de humane gezondheid.

Deltafact (2022b) Eco- en humane toxicologie van microplastics, deel B. Ecotoxicologische effecten van microplastics op het aquatische milieu.

Deltafact (2022c) End-of-pipe maatregelen verwijdering microplastics.

Dröge, R. and Tromp, P. (2019) Measurements of organic micropollutants, microplastics and associated substances from road transport, TNO.

ECHA (2019) ANNEX XV: Restriction Report – Microplastics. Agency, E.C. (ed), Helsinki.

EuropeanBioplastics (2022) Fact sheet - What are bioplastics?

Franzellitti, S., Canesi, L., Auguste, M., Wathsala, R.H.G.R. and Fabbri, E. (2019) Microplastic exposure and effects in aquatic organisms: A physiological perspective. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 68, 37-51.

Frias, J.P.G.L. and Nash, R. (2019) Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Mar Pollut Bull* 138, 145-147.

Gouin, T., Ellis-Hutchings, R., Thornton Hampton, L.M., Lemieux, C.L. and Wright, S.L. (2022) Screening and prioritization of nano- and microplastic particle toxicity studies for evaluating human health risks – development and application of a toxicity study assessment tool. *Microplastics and Nanoplastics* 2(1), 2.

Hartmann, N.B., Hüffer, T., Thompson, R.C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A.E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M.P., Hess, M.C., Ivleva, N.P., Lusher, A.L. and Wagner, M. (2019) Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. *Environ Sci Technol* 53(3), 1039-1047.

Ivleva, N.P. (2021) Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives. *Chemical Reviews* 121(19), 11886-11936.

Kawecki, D., Wu, Q., Gonçalves, J.S.V. and Nowack, B. (2021) Polymer-specific dynamic probabilistic material flow analysis of seven polymers in Europe from 1950 to 2016. *Resources, Conservation and Recycling* 173, 105733.

Kirstein, I.V., Gomiero, A. and Vollertsen, J. (2021) Microplastic pollution in drinking water. *Current Opinion in Toxicology* 28, 70-75.

Knight, L.J., Parker-Jurd, F.N.F., Al-Sid-Cheikh, M. and Thompson, R.C. (2020) Tyre wear particles: an abundant yet widely unreported microplastic? *Environmental Science and Pollution Research* 27(15), 18345-18354.

Koelmans, A.A., Besseling, E., Foekema, E., Kooi, M., Mintenig, S., Ossendorp, B.C., Redondo-Hasselerharm, P.E., Verschoor, A., van Wezel, A.P. and Scheffer, M. (2017) Risks of Plastic Debris: Unravelling Fact, Opinion, Perception, and Belief. *Environ Sci Technol* 51(20), 11513-11519.

Koelmans, A.A., Diepens, N.J. and Mohamed Nor, N.H. (2022a) Weight of evidence for the microplastic vector effect in the context of chemical risk assessment. *Microplastic in the Environment: Pattern and Process*, 155-197.

- Koelmans, A.A., Mohamed Nor, N.H., Hermsen, E., Kooi, M., Mintenig, S.M. and De France, J. (2019) Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Research* 155, 410-422.
- Koelmans, A.A., Redondo-Hasselerharm, P.E., Mohamed Nor, N.H. and Gouin, T. (2023) On the probability of ecological risks from microplastics in the Laurentian Great lakes. *Environmental Pollution* 325, 121445.
- Koelmans, A.A., Redondo-Hasselerharm, P.E., Nor, N.H.M., de Ruijter, V.N., Mintenig, S.M. and Kooi, M. (2022b) Risk assessment of microplastic particles. *Nature Reviews Materials* 7(2), 138-152.
- Koelmans, A.A., Redondo Hasselerharm, P.E., Mohamed Nor, N.H. and Kooi, M. (2020) Solving the non-alignment of methods and approaches used in microplastic research in order to consistently characterize risk. *Environ Sci Technol*.
- Kooi, M. (2022) Environmental microplastics - properties, exposure and risk, Wageningen University.
- Kooi, M., Besseling, E., Kroeze, C., van Wezel, A.P. and Koelmans, A.A. (2018) Freshwater Microplastics : Emerging Environmental Contaminants? Wagner, M. and Lambert, S. (eds), pp. 125-152, Springer International Publishing, Hdb Env Chem 58.
- Kooi, M. and Koelmans, A.A. (2019) Simplifying Microplastic via Continuous Probability Distributions for Size, Shape, and Density. *Environmental Science & Technology Letters*.
- Kooi, M., Primpke, S., Mintenig, S.M., Lorenz, C., Gerdts, G. and Koelmans, A.A. (2021) Characterizing the multidimensionality of microplastics across environmental compartments. *Water Research* 202, 117429.
- Koutnik, V.S., Leonard, J., Alkidim, S., DePrima, F.J., Ravi, S., Hoek, E.M.V. and Mohanty, S.K. (2021) Distribution of microplastics in soil and freshwater environments: Global analysis and framework for transport modeling. *Environmental Pollution* 274, 116552.
- Kurniawan, T.A., Haider, A., Ahmad, H.M., Mohyuddin, A., Umer Aslam, H.M., Nadeem, S., Javed, M., Othman, M.H.D., Goh, H.H. and Chew, K.W. (2023) Source, occurrence, distribution, fate, and implications of microplastic pollutants in freshwater on environment: A critical review and way forward. *Chemosphere* 325, 138367.
- Leslie, H.A., Brandsma, S.H., van Velzen, M.J.M. and Vethaak, A.D. (2017) Microplastics en route: Field measurements in the Dutch river delta and Amsterdam canals, wastewater treatment plants, North Sea sediments and biota. *Environment International* 101, 133-142.
- Leslie, H.A., van Velzen, M.J.M., Brandsma, S.H., Vethaak, A.D., Garcia-Vallejo, J.J. and Lamoree, M.H. (2022) Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International* 163, 107199.
- Lorenz, C., Roscher, L., Meyer, M.S., Hildebrandt, L., Prume, J., Löder, M.G.J., Primpke, S. and Gerdts, G. (2019) Spatial distribution of microplastics in sediments and surface waters of the southern North Sea. *Environmental Pollution* 252, 1719-1729.
- Mariano, S., Tacconi, S., Fidaleo, M., Rossi, M. and Dini, L. (2021) Micro and Nanoplastics Identification: Classic Methods and Innovative Detection Techniques. *Front Toxicol* 3, 636640.

- Materić, D., Holzinger, R. and Niemann, H. (2022a) Nanoplastics and ultrafine microplastic in the Dutch Wadden Sea – The hidden plastics debris? *Science of the Total Environment* 846, 157371.
- Materić, D., Kjær, H.A., Vallelonga, P., Tison, J.-L., Röckmann, T. and Holzinger, R. (2022b) Nanoplastics measurements in Northern and Southern polar ice. *Environmental Research* 208, 112741.
- Maurizi, L., Iordachescu, L., Kirstein, I.V., Nielsen, A.H. and Vollertsen, J. (2023a) Do drinking water plants retain microplastics? An exploratory study using Raman micro-spectroscopy. *Heliyon* 9(6), e17113.
- Maurizi, L., Iordachescu, L., Kirstein, I.V., Nielsen, A.H. and Vollertsen, J. (2023b) It matters how we measure - Quantification of microplastics in drinking water by μ FTIR and μ Raman. *Heliyon* 9(9), e20119.
- Menekes, D. and Nowack, B. (2023) Predicting microplastic masses in river networks with high spatial resolution at country level. *Nature Water* 1(6), 523-533.
- Miller, E., Sedlak, M., Lin, D., Box, C., Holleman, C., Rochman, C.M. and Sutton, R. (2021) Recommended best practices for collecting, analyzing, and reporting microplastics in environmental media: Lessons learned from comprehensive monitoring of San Francisco Bay. *Journal of Hazardous Materials* 409, 124770.
- Mintenig, S.M., Int-Veen, I., Löder, M.G.J., Primpke, S. and Gerdt, G. (2017) Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water Research* 108, 365-372.
- Mintenig, S.M., Kooi, M., Erich, M.W., Primpke, S., Redondo-Hasselerharm, P.E., Dekker, S.C., Koelmans, A.A. and van Wezel, A.P. (2020) A systems approach to understand microplastic occurrence and variability in Dutch riverine surface waters. *Water Research*, 115723.
- Mitrano, D.M. and Wohlleben, W. (2020) Microplastic regulation should be more precise to incentivize both innovation and environmental safety. *Nature Communications* 11(1), 5324.
- Mohamed Nor, N.H., Kooi, M., Diepens, N.J. and Koelmans, A.A. (2021) Lifetime Accumulation of Microplastic in Children and Adults. *Environ Sci Technol* 55(8), 5084-5096.
- Nizamali, J., Mintenig, S.M. and Koelmans, A.A. (2023) Assessing microplastic characteristics in bottled drinking water and air deposition samples using laser direct infrared imaging. *Journal of Hazardous Materials* 441, 129942.
- Noventa, S., Boyles, M.S.P., Seifert, A., Belluco, S., Jiménez, A.S., Johnston, H.J., Tran, L., Fernandes, T.F., Mughini-Gras, L., Orsini, M., Corami, F., Castro, K., Mutinelli, F., Boldrin, M., Puentes, V., Sotoudeh, M., Mascarello, G., Tiozzo, B., McLean, P., Ronchi, F., Booth, A.M., Koelmans, A.A. and Losasso, C. (2021) Paradigms to assess the human health risks of nano- and microplastics. *Microplastics and Nanoplastics* 1(1), 9.
- Ogonowski, M., Wagner, M., Rogell, B., Haave, M. and Lusher, A. (2023) Microplastics could be marginally more hazardous than natural suspended solids – A meta-analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 264, 115406.
- Pan, C.-G., Mintenig, S.M., Redondo-Hasselerharm, P.E., Neijenhuis, P.H.M.W., Yu, K.-F., Wang, Y.-H. and Koelmans, A.A. (2021) Automated μ FTIR Imaging Demonstrates Taxon-Specific and Selective Uptake of Microplastic by Freshwater Invertebrates. *Environ Sci Technol* 55(14), 9916-9925.

Pivokonsky, M., Cermakova, L., Novotna, K., Peer, P., Cajthaml, T. and Janda, V. (2018) Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. *Science of the Total Environment* 643, 1644-1651.

PlasticsEurope (2022) *Plastics - the Facts 2022*.

Pletz, M. (2022) Ingested microplastics: Do humans eat one credit card per week? *Journal of Hazardous Materials Letters* 3, 100071.

Primpke, S., Christiansen, S.H., Cowger, W., De Frond, H., Deshpande, A., Fischer, M., Holland, E.B., Meyns, M., O'Donnell, B.A., Ossmann, B.E., Pittroff, M., Sarau, G., Scholz-Böttcher, B.M. and Wiggan, K.J. (2020) Critical Assessment of Analytical Methods for the Harmonized and Cost-Efficient Analysis of Microplastics. *Applied Spectroscopy* 74(9), 1012-1047.

Quik, J.T.K., Meesters, J.A.J. and Koelmans, A.A. (2023) A multimedia model to estimate the environmental fate of microplastic particles. *Science of the Total Environment* 882, 163437.

Redondo-Hasselerharm, P.E., Gort, G., Peeters, E.T.H.M. and Koelmans, A.A. (2020) Nano- and microplastics affect the composition of freshwater benthic communities in the long term. *Science Advances* 6(5), eaay4054.

Redondo-Hasselerharm, P.E., Rico, A., Huerta Lwanga, E., van Gestel, C.A.M. and Koelmans, A.A. (2024) Source-specific probabilistic risk assessment of microplastics in soils applying quality criteria and data alignment methods. *Journal of Hazardous Materials* 467, 133732.

Redondo-Hasselerharm, P.E., Rico, A. and Koelmans, A.A. (2023) Risk assessment of microplastics in freshwater sediments guided by strict quality criteria and data alignment methods. *Journal of Hazardous Materials* 441, 129814.

Redondo Hasselerharm, P.E., Rico, A. and Koelmans, A.A. (2023) Risk assessment of microplastics in soil ecosystems using quality criteria screening and data alignment methods, Dublin.

RWS (2023a) *Op weg naar microplastics monitoring in rivieren - Deel 1: Bemonstering*.

RWS (2023b) *Op weg naar microplastics monitoring in rivieren - Deel 2: Analyse van microplastics*.

RWS (2023c) *Op weg naar microplastics monitoring in rivieren - Deel 3: Pilotmetingen microplastics in oppervlaktewater, waterbodem en rivieroevers*.

Sangkham, S., Aminul Islam, M., Adhikari, S., Kumar, R., Sharma, P., Sakunkoo, P., Bhattacharya, P. and Tiwari, A. (2023) Evidence of microplastics in groundwater: A growing risk for human health. *Groundwater for Sustainable Development* 23, 100981.

SAPEA (2019) *Science Advice for Policy by European Academies - A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society*. Berlin: SAPEA.

Schuhen, K. and Sturm, M.T. (2020) *Handbook of Microplastics in the Environment*. Rocha-Santos, T., Costa, M. and Mouneyrac, C. (eds), pp. 1-33, Springer International Publishing, Cham.

Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. and Fürst, P. (2018) Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129(Supplement C), 154-162.

- Simon, M., van Alst, N. and Vollertsen, J. (2018) Quantification of microplastic mass and removal rates at wastewater treatment plants applying Focal Plane Array (FPA)-based Fourier Transform Infrared (FT-IR) imaging. *Water Research* 142, 1-9.
- Sobhani, Z., Lei, Y., Tang, Y., Wu, L., Zhang, X., Naidu, R., Megharaj, M. and Fang, C. (2020) Microplastics generated when opening plastic packaging. *Scientific Reports* 10(1), 4841.
- Talbot, R. and Chang, H. (2022) Microplastics in freshwater: A global review of factors affecting spatial and temporal variations. *Environmental Pollution* 292, 118393.
- Tang, K.H.D. and Hadibarata, T. (2021) Microplastics removal through water treatment plants: Its feasibility, efficiency, future prospects and enhancement by proper waste management. *Environmental Challenges* 5, 100264.
- Ter Halle, A., Jeanneau, L., Martignac, M., Jardé, E., Pedrono, B., Brach, L. and Gigault, J. (2017) Nanoplastic in the North Atlantic Subtropical Gyre. *Environ Sci Technol*.
- Thornton Hampton, L.M., Brander, S.M., Coffin, S., Cole, M., Hermabessiere, L., Koelmans, A.A. and Rochman, C.M. (2022) Characterizing microplastic hazards: which concentration metrics and particle characteristics are most informative for understanding toxicity in aquatic organisms? *Microplastics and Nanoplastics* 2(1), 20.
- Tian, Z., Zhao, H., Peter, K.T., Gonzalez, M., Wetzel, J., Wu, C., Hu, X., Prat, J., Mudrock, E., Hettinger, R., Cortina, A.E., Biswas, R.G., Kock, F.V.C., Soong, R., Jenne, A., Du, B., Hou, F., He, H., Lundeen, R., Gilbreath, A., Sutton, R., Scholz, N.L., Davis, J.W., Dodd, M.C., Simpson, A., McIntyre, J.K. and Kolodziej, E.P. (2021) A ubiquitous tire rubber – derived chemical induces acute mortality in coho salmon. *Science* 371(6525), 185-189.
- UNEP (2023) Chemicals in plastic - A technical report.
- Urbanus, J.H., Brunner, A.M., Boersma, A., Henke, S., Kooter, I., Lensen, S., Parker, L., Schwarz, A., Imhof, P., Dortmans, A. and Wijngaard, M. (2022) Microplastics zijn overal: reductie met 70% haalbaar. Autobanden, verpakkingen en landbouwfolie zijn in Nederland de grootste bronnen van microplastics, TNO.
- Uzun, P., Farazande, S. and Guven, B. (2022) Mathematical modeling of microplastic abundance, distribution, and transport in water environments: A review. *Chemosphere* 288, 132517.
- van Egmond, J.L., Brummelkamp, J. and de Kreuk, M. (2021) STOWA rapport: Verkenning van verwijderingsroutes microplastics in de RWZI
- van Hoytema, N., Versteegen, T., Schreuders, R., Kleppe, R. and van Emmerik, T. (2023) Meten aan zwerfafval in de waterkolom - Meetprotocol.
- Wahl, A., Le Juge, C., Davranche, M., El Hadri, H., Grassl, B., Reynaud, S. and Gigault, J. (2021) Nanoplastic occurrence in a soil amended with plastic debris. *Chemosphere* 262, 127784.
- WHO (2022) Dietary and inhalation exposure to nano- and microplastic particles and potential implications for human health, World Health Organization.
- Zwart, M.H. and de Valk, E.L. (2019) Microplasticvezels uit kleding - Achtergrondrapport mogelijke maatregelen, RIVM.
- Zwerfinator (2023) Onderzoek naar drankverpakkingen in het zwerfafval 2017-2023.

BIJLAGE

MICRO- EN NANOPLASTIC ONDERZOEK AAN NEDERLANDSE INSTITUTEN EN UNIVERSITEITEN

- RIVM: Kennisagenda Microplastic in het milieu, en verschillende rapporten, onder andere over maatregelen voor het verminderen van microplastics uit kleding en verf.
- Rijkswaterstaat: Monitoren van microplastics in (waterkolom van) rivieren.
- STOWA : Deltafacts, en onderzoek Verwijderingsroutes van microplastics in een RWZI.
- TNO: Verschillende rapporten, onder andere over mitigatiestrategieën om microplastic emissies te kunnen reduceren, en (reactie kamerbrief).
- ZonMw programma Microplastics & Health. Momenteel lopen de 7 daaropvolgende projecten, die worden uitgevoerd onder de thema's 1. Microplastics in het milieu (De Food for thought, MLIdent, (Micro)2corona), 2. Consumentengedrag (Microplastics and Citizens), 3. Interventies (FLES), en 4. Gestandaardiseerde onderzoeksmethoden (ATHENA, Py-Harmony), en de MOMENTUM en MOMENTUM 2.0 om gezondheids-effecten voor mensen te onderzoeken.
- Ook het CUSP-cluster en het Brigid project onderzoeken de risico's van microplastic voor de mens.

Vaak hebben universiteiten geen centrale webpagina waarop al het plasticgerelateerde werk wordt gepresenteerd. Desondanks hebben we een poging gedaan om zoveel mogelijk samen te vatten; het is echter waarschijnlijk dat deze lijst niet volledig is.

- WU: <https://www.microplasticlab.com/>, <https://www.kryss-waldschlager.com/>
- UU: <https://www.uu.nl/en/research/sustainability/uplastics3>
- VU: <https://vu.nl/en/research/more-about/polyrisk>, <https://vu.nl/en/research/more-about/microplastics-studies>
- Ook UvA, OU, RUG, UM met diverse onderzoekprogramma's over micro- en nanoplastics.