



Kennisimpuls
WATERKWALITEIT

End-of-pipe maatregelen verwijdering microplastics

Witteveen + Bos

Project Ketenverkenner – onderdeel microplastics
Opdrachtgever Kennisimpuls Waterkwaliteit, project Ketenverkenner

Document Eindrapport
Status Definitief_02
Datum 8 november 2021
Referentie 126212/21-014.095

Projectcode 126212
Projectleider dr.ir. A.F. van Nieuwenhuijzen
Projectdirecteur ing. M. van Houten

Auteur(s) M.M.Q.W. de Jong MSc, mw. J.J.P.A. Mulders MSc PhD

Gecontroleerd door mw. J.J.P.A. Mulders MSc PhD
Goedgekeurd door dr.ir. A.F. van Nieuwenhuijzen

Paraaf

Adres Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V.
Leeuwenbrug 8
Postbus 233
7400 AE Deventer
+31 (0)570 69 79 11
www.witteveenbos.com
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

INHOUDSOPGAVE

1	INTRODUCTIE	5
1.1	Het project	5
1.1.1	Ketenverkenning naar microplastic	5
1.1.2	Doelstelling	6
1.2	Achtergrond	6
1.3	Dit rapport	6
1.3.1	Puntbronnen / end-of-pipe	7
1.4	Leeswijzer	7
2	INTRODUCTIE VAN MICROPLASTICS IN WATER	8
2.1	Bronnen en emissieroutes	8
2.2	Deeltjesgrootte	8
2.3	Deeltjesvorm	9
2.4	Dichtheid microplastics	10
2.5	Oppervlakte-eigenschappen	11
2.6	Elektrostatische lading	11
3	METHODE EN AANPAK	12
3.1	Identificatie longlist technieken	12
3.1.1	Deskstudie	12
3.1.2	Expertsessies	13
3.2	Selectie van longlist naar shortlist	13
3.3	Validatie factsheets	14
3.4	Factsheets en vergelijking	14
4	VERWIJDERINGSTECHNIEKEN MICROPLASTICS	16
4.1	Voorbehandeling en voorbezinking rwzi	16
4.2	Biologische zuivering rwzi	16
4.3	Coagulatie en flocculatie	16
4.4	Fysisch-chemische technieken longlist	17

4.5	Shortlist end-of-pipe-technieken	19
4.5.1	Filtratie en zeven	19
4.5.2	Flotatie	21
4.6	Oppervlaktewaterstromen	21
4.7	Onderlinge vergelijking technieken	22
5	ANALYSE VAN TECHNIEKEN	23
5.1	Conventionele rwzi	23
5.2	End-of-pipestromen	23
5.2.1	Multimediafiltratie	23
5.2.2	Diskfiltratie	24
5.2.3	Membraanfiltratie: Microfiltratie / Ultrafiltratie	25
5.2.4	Fijnzeven	25
5.2.5	Dissolved air flotation (DAF)	26
5.3	Oppervlaktewater	26
5.3.1	Bubble barrier	26
5.3.2	Plasticvanger	26
5.4	Vergelijking technieken met multi-criteria-analyse	27
6	CONCLUSIE EN HANDELINGSOPTIES	29
6.1	De conventionele processen op de rwzi hebben belangrijke bijdrage	29
6.2	Effectieve maatregelen voor verwijdering van microplastics op rwzi-effluent	30
6.3	Oppervlaktewater	31
7	REFERENTIES	32
	Laatste pagina	34
	Bijlage(n)	Aantal pagina's
I	Longlist	5
II	Verslag Interne werksessie	21
III	Verslag Werksessie KWR	34
IV	Verslag expertwerksessies	26
V	Factsheets technieken verwijdering microplastics	18

1

INTRODUCTIE

1.1 Het project

In de Kennisimpuls Waterkwaliteit (KIWK, 2021) werken Rijk, provincies, waterschappen, drinkwaterbedrijven en kennisinstituten aan meer inzicht in de kwaliteit van het grond- en oppervlaktewater en de factoren die deze kwaliteit beïnvloeden. Daarmee kunnen waterbeheerders en andere partijen de juiste maatregelen nemen om de waterkwaliteit te verbeteren en de biodiversiteit te vergroten. In het programma brengen partijen bestaande en nieuwe kennis bijeen, en maken ze die kennis (beter) toepasbaar voor de praktijk. Deze kwaliteit wordt onder meer bepaald door (micro)plastics. In het Kennisimpuls waterkwaliteit thema Ketenverkenner brengen RIVM, Deltares, KWR en WUR vraag-gestuurd bestaande en nieuwe kennis over dit onderwerp bijeen. In de Ketenverkenner wordt grip op de bronnen en routes ontwikkeld van dit type verontreiniging, en de risico's voor het watermilieu. De hierbij opgedane kennis draagt bij aan het oplossen van kennisleemtes die kritiek zijn bij de beleidvorming omtrent onder andere microplastics.

1.1.1 Ketenverkenning naar microplastic

Plastics, en in het bijzonder microplastics, staan sinds een aantal jaar enorm in de belangstelling. Anticiperend hierop zijn er zowel nationaal als internationaal een groot aantal initiatieven ontplooid, die tot doel hebben om de hoeveelheid (micro)plastics in het milieu terug te dringen. Dit zijn initiatieven die op verschillende aangrijpingspunten in de keten van de microplastics ingrijpen, zoals bij de bron, de transitieroutes en de end-of-pipe-oplossingen. Er zijn dus ook een aantal initiatieven ontwikkeld met als doel om de concentraties van (micro)plastics in het milieu terug te dringen aan het eind van de keten, namelijk wanneer de (micro)plastics al in het milieu zijn beland of op het punt staan het milieu te bereiken bij lozingen van waterstromen op het oppervlaktewater zoals bijvoorbeeld verwijdering op de rioolwaterzuiveringsinrichting (rwzi).

Afbeelding 1.1 Microplastics in rioolwater (www.aquatechtrade.com)



Er is tot nu weinig inzicht in met name de effectiviteit en toepasbaarheid van zogenaamde end-of-pipe maatregelen op de verwijdering van (micro)plastics op rwzi's of in oppervlaktewater. KIWK zoekt daarom ondersteuning binnen het project Ketenverkennen als trekker van het onderdeel effectiviteit en handelingsperspectief van end-of pipe maatregelen voor microplastics.

1.1.2 Doelstelling

Doel van het project is om informatie te verschaffen over beschikbare en innovatieve end-of-pipe maatregelen en daarnaast handelingsperspectief te bieden om macro- en microplastics (in de toekomst) uit het milieu te verwijderen.

1.2 Achtergrond

Microplasticdeeltjes (hier gedefinieerd als plastic deeltjes met een diameter <5 mm) zijn aangetroffen in oppervlaktewater, in organismen en in voedingsproducten (Andrady, 2017). Door de mogelijke negatieve effecten van microplastics op onze gezondheid op het milieu en ecologische systemen wordt in toenemende mate onderzoek naar microplastics gedaan en beleid ten aanzien van plastics opgesteld.

Microplastics worden voornamelijk gevormd door fragmentatie van macroplastics (met een diameter > 5 mm) in het milieu. Door blootstelling aan water, zonlicht of door fysieke verwerking kan plastic zwerfafval afbreken tot microplastics. Daarnaast worden microplastics in het milieu geïntroduceerd bij het wassen en verwerken van kunststof kleding, waarbij synthetische vezels vrij kunnen komen. Daarnaast zijn enkele bronnen van microplastics het gebruik van bepaalde cosmetische producten¹ en rubbergranulaat van bijvoorbeeld kunstgrasvelden (KIWK, 2021; RIVM, 2019). In paragraaf 2.1 zijn verschillende bronnen van microplastics toegelicht.

Risico's van blootstelling aan microplastics zijn vooralsnog op te delen in twee categorieën: fysieke en chemische toxiciteit. De fysieke toxiciteit te relateren valt aan de effecten door het deeltje zelf en de chemische toxiciteit voornamelijk het effect kent in de aanwezigheid van additieven of geadsorbeerde chemicaliën. Het is lastig om effecten op organismen in het milieu goed te voorspellen, omdat de samenstelling van microplastics in het milieu erg afwijkt van de lab-studies. Te bedenken valt aan verschil in vorm, materiaal en fysieke gesteldheid als verwerking of groei van biofilm. Deze en meer factoren hebben een effect op het gedrag én gevaar van een microplastic deeltje in het milieu (KIWK, 2021).

In dit project zijn de mogelijkheden tot verwijdering van microplastics uit oppervlaktewater of puntbronnen (lozingen vanuit rwzi's, eventueel overstorten en gemalen) verkend. Door aanpak bij de puntbronnen kan de verdere verspreiding van microplastics, en mogelijk nadelige effecten op de gezondheid van de mens en ecologische systemen voorkomen worden.

1.3 Dit rapport

Dit rapport beschrijft de identificatie, beoordeling en selectie van verscheidende technieken voor van de verwijdering van microplastics uit rwzi-effluent en oppervlaktewaterstromen. De informatieverzameling, analyse en beoordeling is tot stand gekomen door middel van literatuuronderzoek, expertwerksessies en met validatie door externe experts op het gebied van fysisch/chemische waterzuivering, microplastics en plastics in het oppervlaktewater.

¹ De toevoeging van microplastic 'pellets' aan cosmetische producten is uitgefaseerd. Echter, er bestaat nog wel de mogelijkheid op voorkomen van andere type microplastics in cosmetische producten.

De verkregen informatie en inzichten uit de literatuur en de verschillende expertsessies zijn vertaald naar een beoordelingsmatrix en uitgewerkt in een handelingskader waarin gedane bevindingen zijn beschreven. Het doel van dit kader is om perspectief te bieden over hoe macro- en microplastics (in de toekomst) kunnen worden verwijderd uit het aquatisch milieu.

1.3.1 Puntbronnen / end-of-pipe

Om te voorkomen dat microplastics zich (verder) voor het milieu verspreiden, kan worden geopteerd voor een puntbronaanpak. De volgende puntbronnen zijn in dit project geïdentificeerd:

- rwzi-effluent;
- rioolwateroverstorten;
- boezemgemalen.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is een korte introductie gegeven over microplastics en alle in dit project gehanteerde uitgangspunten. Daarna wordt in hoofdstuk 3 de methode en aanpak van de beoordeling van behandelings technieken toegelicht. Vervolgens beschrijft hoofdstuk 4 de resultaten en worden in hoofdstuk 5 deze resultaten verder bediscussieerd. Afsluitend is in hoofdstuk 6 een handelingskader opgesteld dat als richtlijn gebruikt kan worden in de afweging van de afweging van de afweging van microplastic-emissie naar het aquatisch milieu.

De bijlagen zijn bij dit rapport zijn gebundeld beschikbaar in een separaat document dat van stowa.nl te downloaden is.

2

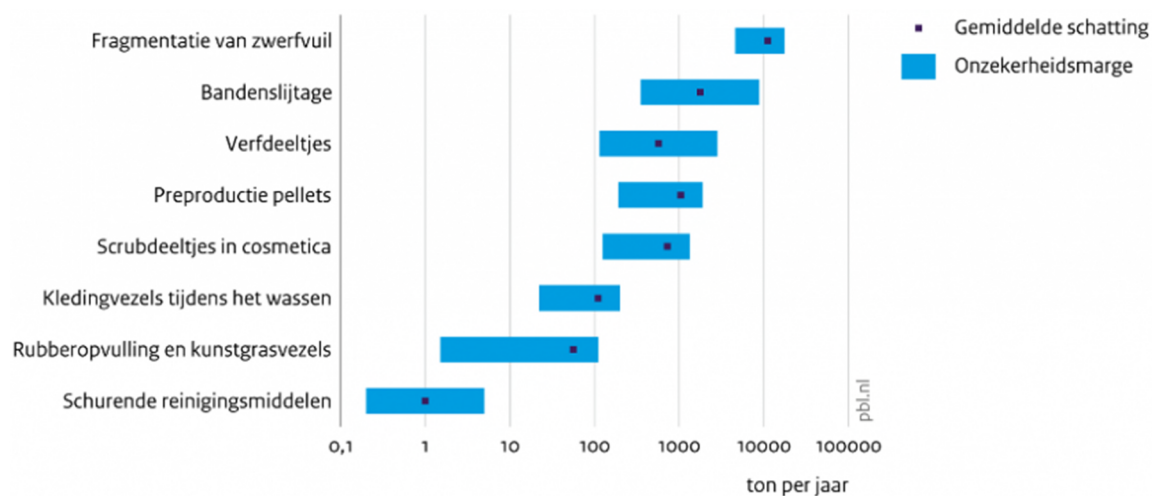
INTRODUCTIE VAN MICROPLASTICS IN WATER

Om tot een weloverwogen selectie van verwijderingstechnieken voor microplastics uit water te komen, is het van belang om de stoffeïenschappen van microplastics te doorgronden en te definiëren wat er onder microplastics wordt verstaan. In dit hoofdstuk is daarom een beknopte introductie gegeven over microplastics. Meer informatie over micro- en nanoplastics is onder andere beschreven in de Deltafacts Microplastic van STOWA (www.stowa.nl/deltafacts/waterkwaliteit/kennisimpuls-waterkwaliteit/microplastics).

2.1 Bronnen en emissieroutes

De bronnen van microplastics zijn door Verschoor en De Valk (2018) treffend samengevat in het schema van afbeelding 2.1. Fragmentatie van plastic-zwerfvuil, bandenslijtage en verf- en plasticproductie zijn als belangrijkste bronnen van microplastics in water aangewezen.

Afbeelding 2.1 Geschatte microplastic-emissies in stroomgebied Nederland in ton/jaar (Verschoor en De Valk, 2018, (KIWK, 2021))¹



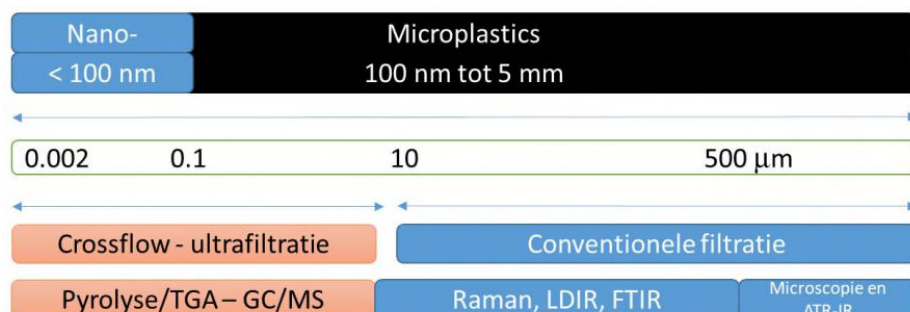
2.2 Deeltjesgrootte

Microplastics zijn gedefinieerd als zijnde (semi-)synthetische polymere deeltjes welke kleiner zijn dan 5 mm. In de literatuur wordt tevens verwezen naar nanoplastics. Echter, een consensus over de ondergrens van microplastic of bovengrens van nanoplastics ontbreekt. In de uitvraag voor deze studie is door de opdrachtgevers een ondergrens voor microplastics van 333 µm voorgesteld. Echter is in de werksessies met experts en op basis van literatuur vastgesteld dat een ondergrens van 1 à 10 µm een doeltreffendere diameter zou zijn die relevant is voor de waterketensector; de waterschappen en drinkwaterbedrijven.

¹ De kolommen laten de onzekerheidsmarge zien; de zwarte stippen zijn het gemiddelde. Let op, de x-as is op log-schaal weergegeven.

In Afbeelding 2.2 is een overzicht gegeven waarin het onderscheid in deeltjesgrootte van micro- en nanoplastics wordt weergegeven. Daaronder staan verschillende analysetechnieken waarmee de verschillende deeltjes geanalyseerd kunnen worden.

Afbeelding 2.2 Nano en microplastics en hun specifieke analyse technieken (KIWK, 2021)¹



Voor de selectie van een passende verwijderingstechniek is uitgegaan van plasticfracties met een diameter van < 5 mm en > 10 µm. Literatuuronderzoek wijst uit dat het grootste gedeelte van de plastics aangetroffen in een rwzi-effluent bestaat uit plastic met een diameter van < 100 µm. Bij de toelichting van de technieken is toegelicht of deze techniek toepasbaar is voor deze kleinere deeltjes. Tevens is bij de selectie van de verwijderingstechnieken beschreven of er nanoplastics kunnen worden gevormd door bijvoorbeeld breuk van grotere microplasticsdeeltjes.

Voor drinkwaterbedrijven zijn kleinere microplastics (<100 µm), en zelfs nanoplastics, van belang en daarom meegenomen in de analyse. Door het ontbreken van adequate analysemethoden en een uniforme standaard zijn vergelijkbare praktijkvoorbeelden schaars. Echter is het effect van kleine microplastics en nanoplastics niet te onderschatten aangezien deze fractie meer voorkomt dan grotere microplastics. Daarnaast wordt geschat dat het risico van deze fractie groter is voor mens en dier, aangezien passage door cellen mogelijk is (Vercauteren et al., 2021).

2.3 Deeltjesvorm

Microplastics komen voor in verschillende vormen. In afbeelding 2.3 is een overzicht gegeven van de meest voorkomende vormen en de benamingen die hiervoor in de literatuur worden gebruikt. Er wordt daarbij onderscheid gemaakt tussen primaire en secundaire microplastics: primaire zijn plastics die specifiek als kleine deeltjes worden geproduceerd; secundaire microplastics zijn afkomstig van grotere plastic delen die door onder meer temperatuur en UV-licht worden afgebroken. Microplastics zijn onder te verdelen in pellets, fragmenten, films, schuimen en vezels:

- pellets, ook wel nurdles genoemd, komen vooral voor als primaire microplastics. Het zijn sferische pre-productie pellets die veelal door een onbedoelde lozing of lekkage in het milieu terecht komen;
- fragmenten zijn microplastics met een ondefinieerbare vorm. Veelal zijn dit macroplastics of secundaire microplastics die (mechanisch) zijn gefragmenteerd;
- films zijn microplastics die zich karakteriseren als dunne, platte membraan-achtige plastics;
- foams, of schuimactie plastics verwijzen naar afgebrokkelde stukken piepschuim (polystyreen);
- vezels zijn gedefinieerd als dunne, langwerpige plastics voornamelijk afkomstig uit synthetische kleding. Bij het wassen van synthetische kleding kunnen door slijtage vezels in het waswater terecht komen. In verscheidende studies is aangetoond dat vezels in relatief hoge concentraties in rwzi effluenten kunnen voorkomen en dat het verwijderingsrendement van vezels in een rwzi relatief laag is (Poerio et al., 2019; Talvitie et al., 2017; Yahyanezhad et al., 2021).

¹ LDIR = laser direct infrared imaging, FTIR = fouriertransformatie infrarood microscopie, ATR = attenuated total reflection, TGA = thermogravimetrische analyse, GC/MS = gas chromatografie gekoppeld aan een massaspectrometer.

Afbeelding 2.3 Verdeling deeltjesvormen microplastics. Volgens (Yahyanezhad et al., 2021)

Type	Afmeting	Definitie	Figuur
Pellet	<5 mm–1 µm	Sferisch plasticdeeltje	
Fragment	<5 mm–1 µm	Onregelmatig gevormd plasticdeeltje	
Fiber	<5 mm–1 µm	Streng- of filamentvormig plasticdeeltje	
Film	<5 mm–1 µm	Dun plaat of membraanvorming plasticdeeltje	
Foam	<5 mm–1 µm	Spons-, schuimachtig plasticdeeltje	

2.4 Dichtheid microplastics

De dichtheid van microplastics kan het gedrag van het plastic in het milieu beïnvloeden. De dichtheid van het plastic kan worden vergeleken met de dichtheid van water (1.000 kg/m^3)¹ om een indicatie te geven of de plastics drijven of zinken. Tabel 2.1 geeft een overzicht van de dichtheden van verscheidende polymeren. Het gedrag in het aquatisch milieu is als volgt te voorspellen

- dichtheid < 1.000 kg/m^3 - drijft in het aquatisch milieu;
- dichtheid > 1.000 kg/m^3 - zinkt in het aquatisch milieu.

Tabel 2.1 Verschillende polymeren met lage en hoge dichtheden². Uit (WHO, 2019)

Polymeer	Dichtheid laag kg/m^3	Dichtheid hoog kg/m^3
Polypropyleen (PP)	0,9	0,91
Polyethyleen (PE)	0,97	0,97
Styreen rubber	0,98	0,98
Nylon (polyamide)	1,02	1,05
Polystyreen (PS)	1,04	1,1
Polyvinyl chloride (PVC)	1,16	1,58
Polymethacrylaat	1,17	1,2
Polyurethaan	1,2	1,2
Polyester (PES)	1,23	2,3
Polyethylene terephthalate (PET)	1,37	1,45

¹ De dichtheid van zeewater is hoger dan dat van oppervlaktewater, rond de 1.025 kg/m^3 .

² Hetzelfde polymeer kan een hoge of lage dichtheid hebben. Deze verschilt per uitvoeringsvorm.

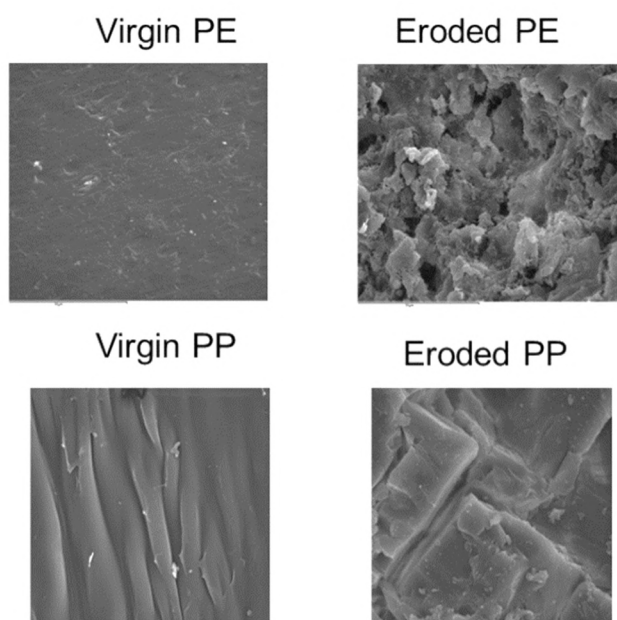
2.5 Oppervlakte-eigenschappen

De oppervlakte-eigenschappen van microplastics kunnen van invloed zijn op de effectiviteit van de verwijdering en de keuze voor de verwijderingstechniek. De oppervlaktelading van een microplasticdeeltje kan bijvoorbeeld de affiniteit van het microplastic ten aanzien van absorbentia of zand beïnvloeden.

Bij de blootstelling van microplastics aan het milieu kan mechanische of chemische verwerking resulteren in een ruwer oppervlak. Hierdoor zal biofilm gemakkelijker vormen op het oppervlakte van het plastic deeltje (Fotopoulou et al., 2014). Biofilms kunnen het gedrag en het verwijderingsrendement van microplastics in een rwzi beïnvloeden. De bijgevoegde afbeelding (Afbeelding 2.4) geeft een visuele weergave van het verschil tussen nieuwe (virgin) en verweerde (eroded) microplastics.

De oppervlakte-eigenschappen van microplastics kunnen eveneens veranderen door de vorming van functionele groepen op het plastic oppervlak bij blootstelling aan zonlicht of water. Bovendien kunnen organische stoffen absorberen op het microplastic oppervlak.

Afbeelding 2.4 Vergelijking nieuw/zuiver (virgin) en verweerd (eroded) plastic-oppervlak (Fotopoulou et al., 2014)



2.6 Elektrostatische lading

De elektrostatische lading van het (type) plastic is van belang in relatie tot de verwijderingsprocessen. Het oppervlakte van zuiver plastic is negatief geladen (Yokota et al., 2017). Door absorptie van andere componenten of door chemische/fysische verwerking van het plastic oppervlakte, kan de lading van het microplasticoppervlak echter positief of neutraal worden (Yokota et al., 2017). Onderzoek naar PFAS-sorptie aan microplastics beschrijft dat microplastics (PE, PVC, PS) negatief geladen zijn (F. Wang et al., 2015).

De lading van microplasticdeeltjes is van invloed op het verwijderingsrendement van microplastics in bepaalde verwijderingstechnieken. Bij coagulatie en membraanfiltratie (voornamelijk nanofiltratie en omgekeerde osmose) wordt gebruik gemaakt van de lading van het microplastic. Tevens kan de lading van het microplastic de affiniteit van de deeltjes ten aanzien van absorbentia beïnvloeden.

3

METHODE EN AANPAK

3.1 Identificatie longlist technieken

In dit project is een longlist opgesteld met technieken die de potentie hebben om effectief microplastics uit waterstromen te verwijderen. Deze longlist is gebaseerd op literatuuronderzoek. De technieken voor de end-of-pipe verwijdering van microplastics zijn opgedeeld in **filtratietechnieken** en **flotatietechnieken**. Daarnaast zijn enkele technieken opgenomen ten behoeve van de verwijdering van plastics uit het oppervlaktewater. Verschillende van de hieronder beschreven technieken worden al ingezet op conventionele rwzi's of waterzuiveringsprocessen.

De technieken in de longlist zijn nader uitgewerkt op de volgende criteria:

- verwijderingsprestaties microplastics;
- verwijderingsmechanisme;
- toepassing op end-of-pipe waterstroom of oppervlaktewater;
- stand-der-techniek (aangeduid met Technology Readiness Level: TRL conform de EU H2020 methodiek¹);
- kosten voor toepassing (globaal).

3.1.1 Deskstudie

De uitgewerkte longlist van technieken is bijgevoegd in bijlage I. De uitwerking van de technieken plus selectie naar de shortlist is te vinden in hoofdstuk 4. Kort samengevat bestaat de longlist van geïdentificeerde verwijderingstechnieken voor microplastics uit rwzi-effluent en oppervlaktewater er als volgt uit:

Tabel 3.1 Longlist geïdentificeerde verwijderingstechnieken microplastics (zie bijlage I)

Hoofdproces	Techniek
Filtratie/zeving (puntbron; effluent)	Microfiltratie
	Ultrafiltratie
	Nanofiltratie
	Omgekeerde osmose
	MBR
	GAK-filtratie
	Zandfiltratie
	Diskfilter
	Doekfilter
	Fijnzeef

¹ https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf

Hoofdproces	Techniek
Flotatie (puntbron, effluent)	Dissolved air flotation (DAF) Foam fractionation
Flotatie (oppervlaktewater)	Bubble barrier
Sedimentatie	Lamellenseparatoren bezinktanks (voor of nabehandeling)
Afvang/zeving (oppervlaktewater) ¹	Interceptor The Shoreliner Mr. Trashwheels Allseas ClearRivers Trashbooms Seabin

3.1.2 Expertsessies

Naast het literatuuronderzoek zijn verschillende experts geraadpleegd. De praktijkervaring die deze experts hebben op het gebied van waterbehandelingen kan waardevol zijn bij de selectie van gepaste technieken.

Witteveen+Bos heeft enkele experts op het gebied van fysische en chemische waterzuivering in dienst. Tijdens de uitvoering van dit project is een **interne expertmeeting** gehouden om te bediscussiëren welke technieken er effectief ingezet zouden kunnen worden om microplastics te verwijderen. Een beknopte samenvatting van dit overleg is te vinden bijlage II. De volgende experts zijn betrokken geweest bij dit overleg:

- Maarten Kooi - drinkwatertechnoloog met ervaring in fysisch- en chemische verwijderingstechnieken in drinkwaterbereiding;
- Jaïr Dan - rioolwatertechnoloog met ervaring in fysisch- en chemische verwijderingstechnieken in rioolwaterbehandeling;
- Arjen van Nieuwenhuijzen - innovatietechnoloog met ervaring in fysisch- en chemische verwijderingstechnieken in rioolwaterbehandeling.

3.2 Selectie van longlist naar shortlist

Met de verkregen inzichten uit de interne expertsessie en het literatuuronderzoek is een (voorlopige) shortlist opgesteld. Deze shortlist is in een werksessie voorgelegd aan de projectgroep (Arjen Markus van Deltares) en experts van KWR (Roberta Hofman en Patrick Bauerlein). Het verslag van deze werksessie is opgenomen in bijlage III. Na validatie middels deze werksessie en met gebruik van de criteria zoals benoemd in 3.1, is de volgende shortlist verder uitgewerkt in factsheets (zie bijlage V).

De gekozen shortlist is gebaseerd op haalbaarheid van de techniek en de verwachte verwijderingsprestaties van microplastics; hieronder een overzicht:

¹ Naast deze voorbeelden zijn er thans meerdere alternatieven in ontwikkeling zoals Allseas (<https://allseas.com/allseas-river-plastics-removal-project/>)

Tabel 3.2 Shortlist geselecteerde verwijderingstechnieken microplastics

Hoofdproces	Techniek
Filtratie/zeving (puntbron; effluent)	Microfiltratie
	Ultrafiltratie
	Multimediafiltratie
	Diskfilter
	Fijnzeef
Flotatie (puntbron, effluent)	Dissolved air flotation (DAF)
Flotatie/Zweving (oppervlaktewater)	Bubble barrier
	ClearRivers

3.3 Validatie factsheets

Om de opgestelde factsheets te toetsen en te beoordelen is een panel van externe experts geraadpleegd. Bij de expertmeetings hebben zich experts aangesloten op het gebied van deze verwijderingstechnieken en op het gebied van microplastic-verontreinig in het algemeen. Hieronder in Tabel 3.3 zijn de experts weergegeven.

Tabel 3.3 Samenstelling expertteam validatie technieken

Techniek	Externe expert
Filtratietechnieken	Joris de Grooth (Universiteit Twente/NX filtration)
Fysische zuiveringstechnieken	Merle de Kreuk (TU Delft)
	Harry Bruning (WUR)
Oppervlaktewatertechnieken	Paul Vriend (werkzaam bij RWS, aanwezig uit eigen interesse)
Specialisten microplastics algemeen	Harmen Spek (Plastic Soup Foundation)
	Rianne van den Meiracker (Deltares)
	Kevin Ouwerkerk (Deltares)

In twee sessies zijn de zuiveringstechnieken uit de shortlist geëvalueerd en beoordeeld op potentiële toepasbaarheid, impact en het verwijderingsrendement. De verslaglegging van deze sessies is bijgevoegd in bijlage IV.

3.4 Factsheets en vergelijking

De technieken op de shortlist zijn nader uitgewerkt in factsheets (zie bijlage V). Van de technieken zijn in tabel 3.4 benoemde criteria samengevat om de technieken onderling uiteindelijk in een evaluatiematrix te kunnen verwerken.

Tabel 3.4 Criteria factsheets

Verwijderingsmechanisme	Emissies
Verwijderingsprestaties	Beheer en onderhoud
Kostenindicatie	Verbruiken
Voorbeeldcasus	Inpasbaarheid
Multifunctionaliteit	Reststroomverwerking
Impact op waterkwaliteit	Risico's en nadelen

In hoofdstuk 4 zijn de technieken kort toegelicht. Om technieken onderling te vergelijken is een vergelijkingsmatrix opgesteld waarin punten worden gegeven aan de volgende criteria:

- Kosten (total cost of ownership met OPEX en CAPEX);
- verwijderingsprestaties microplastics >1 à 10 µm;
- reststroomverwerking;
- beheer en onderhoud;
- verbruiken:
 - ruimte;
 - elektriciteit;
 - chemicaliën.

Per criterium is een score van laag tot hoog (0 tot 5) gegeven.

4

VERWIJDERINGSTECHNIKEN MICROPLASTICS

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van het literatuuronderzoek en de expertsessie besproken. Hierbij is tevens toegelicht hoe in de huidige, conventionele rwzi's in Nederland microplastics verwijderd worden om zo beter inzicht te verkrijgen in hoe en waar er ingegrepen kan worden om microplastics te verwijderen. Daarnaast zijn de technieken uit de geselecteerde longlist en shortlist nader toegelicht.

4.1 Voorbehandeling en voorbezinking rwzi

De voorbehandeling op een rwzi verwijdert een groot deel van (>40-60 %) de microplastics in het influent. Een deel wordt in de roostergoed- en zandverwijdering verwijderd en een deel in de voorbezinking (wanneer aanwezig). Verwijdering van de microplastics vindt vooral plaats door flotatie en bezinking, waarbij de drijvende en zinkende plastics worden verwijderd (STOWA, 2021).

Voorbehandeling heeft voornamelijk effect op de verwijdering van vezels (STOWA, 2021). Deze vezels kunnen worden ingevangen in de slibvlokken en na sedimentatie verwijderd uit het water. Daarnaast wordt door het afscheiden van de drijfslag (sterk) drijvende plastics, zoals polyethyleen, verwijderd. De verhoogde aanwezigheid van olie en vetten in de voorbehandelingsstap in vergelijking met secundaire behandeling, zal hydrofobe interacties kunnen bevorderen waardoor verwijdering gefaciliteerd wordt (STOWA, 2021; Sun et al., 2019).

4.2 Biologische zuivering rwzi

In de secundaire behandeling worden microplastics hoofdzakelijk verwijderd door adsorptie van het plastic aan het actief slib (STOWA, 2021). Microplastic deeltjes worden ingevangen in de slibvlok en uit het systeem verwijderd met het slib in de nabezinktank. In de secundaire behandelingsstap worden voornamelijk microplastic fragmenten, pellets, schuim en folies verwijderen.

Een langere contacttijd kan bijdragen aan een betere verwijdering van microplastics (STOWA, 2021; Sun et al., 2019).

4.3 Coagulatie en flocculatie

Toevoeging van een hulpmiddel als een coagulant en/of flocculant kan een positief effect hebben op de verwijdering van microplastics uit waterstromen (Lapointe et al., 2020; Talvitie et al., 2017); zowel in actief-slibsystemen, nabezinktanks als nageschakelde technieken.

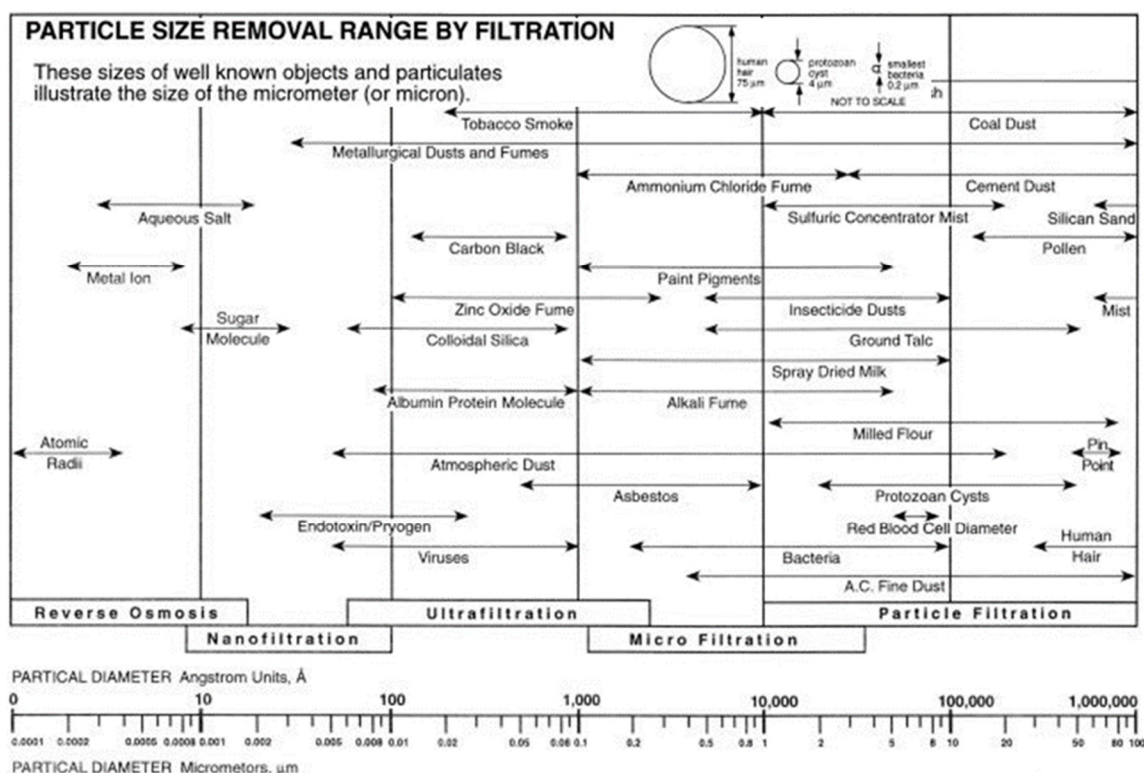
De toevoeging van een coagulant leidt tot een toename van het verwijderingsrendement van verweerde microplastics ten opzichte van zuivere plastics. Door de groei van organisch materiaal op het verweerde oppervlakte van deze microplastics neemt de interactie tussen het plastic en coagulant (Lapointe et al., 2020).

Een ander onderzoek toont aan dat microplastics >10 µm vrijwel volledig verwijderd werden uit een drinkwaterzuivering door coagulatie en sedimentatie. Hierin wordt tevens vermeld dat vezelachtige microplastics (filamenten) makkelijker aan door coagulatie gevormde vlokken kunnen hechten dan andere vormen, en daardoor deze relatief effectiever verwijderd worden (Z. Wang et al., 2020).

4.4 Fysisch-chemische technieken longlist

Voor de verwijdering van microplastics uit water zijn fysische in combinatie met chemische processen (zie Coagulatie en flocculatie) essentiële technieken. Fysische technieken zoals bezinking, flotatie (opdrijving) en filtratie zijn prominent in beeld voor de verwijdering van de beoogde microplasticfractie. Belangrijk is daarbij de effectiviteit van de techniek op een specifiek deeltjesgroottebereik. Voor filtratie is dit bereik bijvoorbeeld samengevat in afbeelding 4.1.

Afbeelding 4.1 Deeltjesgrootteverdeling filtratietechnieken; gebaseerd op (A.F. van Nieuwenhuijzen, 2002)



Hieronder is een overzicht weergegeven met de verschillende technieken en de daarbij gebruikte literatuur.

Tabel 4.1 Overzicht technieken uit de longlist

	Beschrijving	Bron
Filtratie		
Zandfiltratie	Verwijdering door zeefwerking van een zandlaag. Terugspoelregime vaak toegepast.	(Talvitie et al., 2017; Z. Wang et al., 2020; Wolff et al., 2020)
GAK-filtratie	Verwijdering door zeefwerking van een granulair actiefkoolbed (GAK-bed).	(Z. Wang et al., 2020)
Diskfiltratie	Verwijdering door zeefwerking van kunststof schijven (> 10 µm) die (deels) onopgeloste	(Simon et al., 2019; Talvitie et al., 2017)

	Beschrijving	Bron
	deeltjes afvangen. Terugspoelregime van toepassing.	
Doekfiltratie	Verwijdering door zeefwerking van doeken die onopgeloste delen afvangen. Terugspoelregime van toepassing.	Haalbaarheidsstudie PAK + Doekfiltratie voor verwijdering van microverontreinigingen op rwzi's. STOWA 2020-21
Fijnzeven	Verwijdering door zeefwerking van een poreus filterdoek (> 100 µm). Terugspoelregime van toepassing.	Influent fijnzeven in rwzi's. STOWA 2010-19
Microfiltratie	Drukgedreven filtratie door een fysieke barrière. Poriëgrootte tussen 0,1 en 5 µm. Kleine afvalstroom.	(Ma et al., 2019; Poerio et al., 2019; Yahyanezhad et al., 2021)
Ultrafiltratie	Drukgedreven filtratie door een fysieke barrière. Poriëgrootte tussen 20 nm en 100 nm. Kleine afvalstroom.	(Ma et al., 2019; Poerio et al., 2019; Yahyanezhad et al., 2021)
Nanofiltratie	Drukgedreven filtratie door een fysieke barrière. Poriëgrootte rond 1 nm. Kleine afvalstroom.	(Ma et al., 2019; Poerio et al., 2019; Yahyanezhad et al., 2021)
Flotatie		
Dissolved air flotation (DAF)	Scheiding door flotatie. In combinatie met coagulatie/flocculatie kunnen plastics hechten aan TSS waarna via flotatie gescheiden wordt.	Dissolved air flotation (DAF) als voorbehandeling van communale rioolwater. STOWA 2014-03
Foam Fractionation	Scheidingstechniek door opwaartse beweging van luchtbelletjes. Hydrofobe plastics zullen aan luchtbelletjes kleven en kunnen met het schuim verwijderd worden.	contact met leverancier (OPEC-systems AUS)
Flotation Froth	Scheidingstechniek waarbij drijvende deeltjes uit een waterstroom worden gehaald op basis van flotatie door dichtheidsverschil. Impact onbekend.	(Crawford & Quinn, 2017)
Conventionele rwzi / bezinking		
Lamellenseparatoren	Verbetering van scheiding vaste deeltjes uit oplossing door het plaatsen van schotten/lamellen in een (bezink)tank.	https://www.logisticon.com/technieken/lamellen-separator
Oppervlaktewater		
The Bubble Barrier	Bellengordijn in een rivier welke diagonaal op de stroomrichting wordt geplaatst. Hydrofobe plastics zullen aan bubbel absorberen en hierdoor naar het oppervlak drijven, waarna ze verwijderd kunnen worden.	https://thegreatbubblebarrier.com
The Interceptor	Boom (vangarm)+receptable techniek. Een boom bestaat uit een plastic 'buis' op water die het plastic naar de boot geleidt. Het plastic wordt hier vervolgens machinaal verwijderd, via een lopende band en een rooster/filter waarin het plastic blijft hangen.	https://theoceancleanup.com/rivers/
The Shoreliner	Plastic val in een havengebied Plastic wordt door natuurlijke stroming in val gedreven, waar het blijft hangen achter een aantal schotten en manueel moet worden verwijderd.	https://www.tauw.nl/op-welk-gebied/duurzaamheid/shoreliner.html
Mr. Trashwheels	In riviermondingen of havengebieden. Met een 'boom' (vangarm) wordt het plastic naar een receptable geleid en er machinaal uit gefilterd wordt. Mr. Trashwheel.	https://www.mrtrashwheel.com/meet-the-trash-wheels/

	Beschrijving	Bron
ClearRivers	Plastic volgt natuurlijke stroom naar de val. Via verschillende schotten wordt het plastic in de val gehouden, waarna het handmatig verwijderd kan worden.	https://www.clearrivers.eu/littertrapsrotterdam
Trashbooms	Een plastic 'boom' (vangarm) met opvang net van 50cm onder de oppervlakte. Deze trashbooms worden horizontaal op een rivier(monding) geplaatst, waardoor het voorbij drijvende macroplastic wordt afgevangen.	https://plasticfischer.com/solutions
Seabin	Een 'vuilnisbak' die achter een boot kan worden gehangen en water erdoor heen zuigt. De filter vangt plastic af, maar is tevens geschikt voor het verwijderen van oliën uit het water. De Seabins dienen handmatig geleegd worden.	https://seabinproject.com/the-seabin-v5/technical-specs/

De uitwerking van deze longlist is te vinden in bijlage I.

4.5 Shortlist end-of-pipe-technieken

In de onderstaande paragrafen zijn de voor de shortlist geselecteerde verwijderingstechnieken kort toegelicht. Een volledige uitwerking per techniek is te vinden in de factsheets in bijlage V. De end-of-pipe technieken zijn verdeeld in twee hoofdcategorieën: filtratie en flotatie. Er worden tevens enkele technieken voor oppervlaktewaterstromen behandeld.

Filtratietechnieken:

- multimediafiltratie;
- fijnzeven;
- diskfiltratie;
- membraanfiltratie:
 - microfiltratie;
 - ultrafiltratie;

Flotatie technieken:

- Dissolved air flotation (DAF).

Technieken voor oppervlaktewater:

- The Bubble Barrier;
- CleanRivers plasticvanger.

4.5.1 Filtratie en zeven

Multimediafiltratie

Multimediafiltratie is een combinatie van verschillende filtermedia in één (meestal neerwaarts doorstroomde) contacttank ter verwijdering van zwevende stof en (mits chemisch en biologisch ondersteund) nutriënten. Potentieel kan deze techniek effectief worden ingezet voor de verwijdering van microplastics. Door de toevoeging van geactiveerd kool (GAK) aan het filterbed kunnen ook naast zwevende stof, nutriënten en microplastics ook organische (micro-)verontreinigingen (bijvoorbeeld medicijnresten) worden verwijderd.

Multimediafilters op rwzi-effluent worden meestal toegepast als neerwaarts doorstroomde discontinu filters. Hierbij vindt periodieke opwaartse spoeling plaats om afgevangen zwevende stof en microplastics te verwijderen uit het filter en terug te spoelen naar de hoofdzuivering. Multimediafiltratie is gebaseerd op

filtratie over een semi-poreus filtermateriaal. De poriëngrootte en porositeit definieert de hoeveelheid beschikbare ruimte tussen de korrels. Plastics kunnen afgevangen worden in de poriën. De porositeit en poriëngrootte zal verschillen per type zand. Het verwijderingsrendement ten aanzien van microplastics kan hierdoor variëren. De korrelgrootte van het filtermateriaal is van invloed op de porositeit van de filter, waarbij een kleinere korrelgrootte resulteert in een lagere porositeit. Bij een lagere porositeit zal materiaal met een kleinere diameter effectiever worden afgevangen, dan wanneer de porositeit relatief groot is.

Naast korrelgrootte kan ook biologische en chemische ondersteuning een rol spelen in het verwijderingsrendement van de multimediafiltratie ten aanzien van zwevende stof, nutriënten en microplastics. In een biologisch ondersteund filter vindt groei van biofilm plaats op het filtermateriaal. Hierdoor neemt de porositeit van het filter af en de zeefwerking toe. Chemische ondersteuning door toevoeging van een coagulant vergroot het verwijderingsrendement van microplastics door het filtermateriaal (Lapointe et al., 2020; Ma et al., 2019; Talvitie et al., 2017).

Multimediafilters vormen geen absolute barrière voor microplastics in de fractie 1 à 10 µm tot 100 µm, maar leveren wel een essentiële bijdrage aan de verwijdering van deze fractie en met namen deeltjes > 50 µm.

De schurende werking van filtermateriaal (zand/GAK) kan tot breuk van microplastics leiden, waardoor mogelijk nanoplastics zouden kunnen vormen (STOWA, 2021).

Diskfiltratie

Als rwzi-effluent polishingtechniek voor de verwijdering van zwevende stof uit rwzi-effluent kan diskfiltratie worden toegepast. In de literatuur wordt gerapporteerd dat diskfiltratie hoge verwijdering van microplastics kan realiseren (pilot-schaal, maaswijdten 10 en 20 µm) (Talvitie et al., 2017). Diskfiltratie berust op zeefwerking door een filterdoek met poriën ≥ 10 µm in diameter (verschillende uitvoeringsvormen beschikbaar). Koeklaagfiltratie zorgt voor aanvullende zeefwerking.

Het systeem wordt gereinigd door periodieke terugspoeling waarbij de gevormde koeklaag van het filterdoek af wordt gespoten en opgevangen wordt om vervolgens terug te worden gespoeld naar de hoofduivering.

Er zijn geen data beschikbaar van de verwijdering van microplastics uit full-scale diskfilters op rwzi-effluent.

Membraanfiltratie

Membraanfiltratie is de overkoepelende naam voor drukgedreven filtratietechnieken die nagenoeg absolute barrière (on)opgeloste deeltjes vormen. Microfiltratie (poriën 0,1 - 5 µm) en ultrafiltratie (poriën 20 nm - 0,1 µm) zijn beide opgenomen in de shortlist. Nanofiltratie en omgekeerde osmose, beiden gericht op de verwijdering van de kleinste deeltjes (>0,1 nm), zijn niet meegenomen in de shortlist.

Immers, dit project richt zich op de te verwijderen microplastics met een diameter van > 1 à 10 µm, dus (membraan)filtratietechnieken met een grotere poriegrootte dan 1 µm volstaan.

Membraanfiltratie is een multifunctionele techniek en is geschikt voor de verwijdering van een variëteit aan verontreinigingen, zwevende stof, bacteriën (ultrafiltratie), en voor nanofiltratie of kleiner (RO) virussen, organische microverontreinigingen, PFAS/PFOA en nanoplastics. De afgevangen deeltjes zullen accumuleren op het membraan, waardoor periodieke reiniging met chemicaliën noodzakelijk is.

Door de aanwezigheid van grotere microplastics kunnen scheuren ontstaan in het membraanoppervlak. Daarnaast bestaat de kans dat vezels membranen kunnen verstoppen.

Fijnzeven

Als voorbehandeling van ruw effluent op rwzi's kunnen fijnzeven worden ingezet ter verwijdering van cellulose, zwevende stof, BZV en P. Verwijdering vindt plaats door filtratie over een filterdoek met poriën van ongeveer 100 µm of groter (verschillende uitvoeringsvormen beschikbaar). Hierdoor kan fijnzeven een absolute barrière zijn voor microplastics > 100 µm; maar niet voor microplastics tussen 1 à 10 µm tot 100 µm.

Fijnzeven worden momenteel hoofdzakelijk ingezet of rwzi influent. De relatief hoge concentratie zwevende stof, faciliteren de groei van een 'koek' op het filterdoek, welke periodiek verwijderd dient te worden. De vorming van een koeklaag op filterdoeken (kan ook op diskfilters en membranen) zou mogelijk kunnen resulteren in een hoger verwijderingsrendement van microplastics (Poerio et al., 2019). Echter, praktijk referenties voor de toepassing van fijnzeven ter verwijdering van microplastics ontbreken. Tevens ontbreekt praktijkervaring ten aanzien van de inzet van fijnzeven op een rwzi effluent. De concentratie zwevende stof en organisch materiaal zullen hier lager zijn, waardoor koek formatie bemoeilijkt wordt. Het ontbreken van de koeklaag zal mogelijk zijn weerslag hebben op het verwijderingsrendement van de fijnzeef ten aanzien van microplastics.

4.5.2 Flotatie

Dissolved air flotation (DAF)

Dissolved air flotation, afgekort DAF gebruikt luchtbellens om zwevende stof en nutriënten uit het water te verwijderen. Door het water onder hoge druk (5-7 bar) in te brengen en perslucht toe te voegen, en vervolgens deze druk los te laten (tot 1 bar, atmosferische druk) ontstaan micro-luchtbellens (30 - 50 µm). Deze bellens drijven naar het oppervlak. Onopgeloste delen en microplastics kunnen vastkleven aan de bellens en zullen zo naar het oppervlakte drijven.

Voor de effectieve verwijdering van zwevende, worden in DAF veelal chemicaliën toegevoegd (coagulanten en flocculanten). Hierdoor worden complexen of vlokken gevormd die kunnen door hechten aan de luchtbellens. Microplastics hechten zich aan deze complexen waardoor deze mee worden verwijderd. Tevens zijn microplastics veelal hydrofoob waardoor zij geneigd zijn zich te hechten aan de luchtbel.

De verwijdering van zwevende stof is het meest effectief wanneer de luchtbel kleiner is dan het te verwijderen deeltje. Gerapporteerde verwijderingsrendement van microplastics variëren tussen de (afgerond) 30-50 %. Hierbij zijn lagere verwijderingsrendementen gerapporteerd voor vezels (Talvitie et al., 2017).

4.6 Oppervlaktewaterstromen

Bubble barrier

Door middel van een PVC-buis met gaatjes geplaatst op de bodem van een rivier of beek worden luchtbellens in de waterkolom gebracht die een fysiek scherm vormen voor voorbijrijvend plastic. Daarnaast wordt door de opwaartse kracht ook plastic wat zich lager in de waterkolom bevindt naar het oppervlak gebracht. Dit bellenscherm ligt diagonaal in het water, waarbij aan de oever stroomafwaarts een opvangbak ligt om plastic af te vangen.

Door het gebruik van luchtbellens vormt de Bubble barrier geen belemmering voor vismigratie en/of vaart. The Bubble barrier kan bovendien het water beluchten, waardoor zuurstof kan worden toegevoegd in mogelijk zuurstofarme wateren.

De Bubble barrier wordt met name ingezet om macroplastics te verwijderen. Over de verwijdering van microplastics is nog weinig bekend. Afgevangen macroplastics worden momenteel opgevangen voor ander onderzoek.

Plasticvanger

In een havengebied wordt een plasticvanger in het water gelegd. Deze plasticvanger is geconstrueerd van gerecycled plastic en bestaat uit een drijvende bak waar enkele schotten in zijn geplaatst. Het drijvende plastic wordt door de natuurlijke stroming en de wind in de val gedreven en zal door het schottensysteem daar blijven hangen. Vervolgens wordt het plastic handmatig verwijderd. Het verwijderde plastic wordt circulair verwerkt en gerecycled.

In een rivier kan een pvc buis worden geplaatst met daaronder een rooster (naar gerefereerd als een 'boom'). Deze boom voorkomt de doorstroom van drijvende macroplastics naar andere milieucompartiment. Het opvangen plastic dient handmatig verwijderd te worden.

Door de fysieke barrière vormt deze techniek een belemmering voor scheepvaart. Daarnaast richt deze techniek zich exclusief op macroplastics.

4.7 Onderlinge vergelijking technieken

De technieken opgenomen in de shortlist zijn met elkaar vergeleken middels een multi-criteria analyse (te vinden in paragraaf 5.4). Hierin is per criterium een score gegeven van 1 tot 5 (negatief-positief). Voor multimediafiltratie, fijnzeven en diskfiltratie is separaat de score berekend wanneer chemische ondersteuning (toevoeging coagulant) wordt toegepast.

5

ANALYSE VAN TECHNIEKEN

De onderstaande analyse beschrijft en bediscussieert de verkregen resultaten uit de literatuurstudie en expertsessies. Per techniek worden de voor- en nadelen bij toepassing op end-of pipestromen zoals rwzi-effluent, rioolwateroverstort, afstromend hemelwater of op oppervlaktewaterstromen toegelicht.

Hoewel deze discussie een algemeen inzicht geeft in de inzetbaarheid van de verschillende technieken ten behoeve van de verwijdering van microplastics, dient er per locatie en situatie onderzoek te worden gedaan naar welke techniek het beste inzetbaar is. Hierbij dient rekening te worden gehouden met het beoogde doel, de kosten en de multifunctionaliteit van de techniek. Belangrijk hierbij is dat de techniek niet leidt tot de formatie van nanodeeltjes door bijvoorbeeld schuring, slijtage, afbraak.

5.1 Conventionele rwzi

Zoals beschreven in hoofdstuk 4 kan een rwzi een groot deel (>90 %) van de microplastics uit het rioolwater(influent) verwijderen door bezinkprocessen, drijfslagafvoer en opname in het slib. Echter, mogelijk kan door enkele aanpassingen en zonder toevoeging van een nieuwe techniek dit verwijderingsrendement verhoogd worden. Contacttijden zouden bijvoorbeeld verlengd kunnen worden waardoor wellicht meer plastics hechten aan slibvlokken (Lapointe et al., 2020; STOWA, 2021; Talvitie et al., 2017). Het spoelwater kan bovendien teruggevoerd kunnen worden naar de voorbehandelingsstappen, waar verwijdering van microplastic het meest efficiënt is. Daarnaast zouden chemische hulpmiddelen kunnen worden toegevoegd.

Hoewel grofweg 90 % van de microplastics verwijderd wordt in een conventionele rwzi, is er ook een fractie plastics die niet verwijderd wordt. Naar deze fractie wordt gerefereerd als zijnde de 'kritische fractie'. De kritische fractie bestaat voornamelijk uit kleine (<100 µm) microplastics en is veelal vezelvormig (STOWA, 2021; Sun et al., 2019). De inzet van een aanvullende techniek op het effluent (afloop nabezinktanks) zal zich dus wellicht (ook) moeten richten op de verwijdering van deze kleinste deeltjes.

5.2 End-of-pipestromen

In deze sectie is per techniek de effectiviteit en toepassing geanalyseerd.

5.2.1 Multimediafiltratie

Voordelen multimediafiltratie:

- effectief voor deeltjes > 50 µm;
- relatief goedkoop, robuust en reeds vaak toegepast op rwzi's als nabehandelingstap;
- hoge multifunctionaliteit (zwevende stof, nutriënten en medicijnresten);
- reststroom (spoelwater) relatief makkelijk te behandelen;
- chemicaliënvrij, toevoeging hulpmiddel mogelijk om verwijderingsrendement ten aanzien van microplastics te verhogen.

Nadelen multimediafiltratie

- omvangrijk, voornamelijk bij langzame zandfiltratie;
- kans op kortsluitstromen in het filter;
- verwijdering kleinste microplastics (1 - 50 µm) onduidelijk.

Multimediafiltratie kan effectief worden ingezet voor de verwijdering van microplastics. Echter, recentelijk onderzoek toont aan dat bij de inzet van multimediafiltratie, nanoplastics kunnen vormen door fragmentatie van de microplastics. Dus hoewel het aandeel microplastics zal afnemen, is de afname deels te danken aan een groter aandeel deeltjes die kleiner zijn dan <333 µm (STOWA, 2021).

Het filtermateriaal dient regelmatig gespoeld te worden. Hierdoor ontstaat een reststroom met een relatief hoog microplasticgehalte. Dit spoelwater dient terug te worden teruggevoerd naar de primaire zuiveringsstappen, omdat hier relatief veel microplastics in verwijderd worden (STOWA, 2021).

De effectiviteit van de techniek zal afhangen van de stofeigenschappen van microplastics, de porositeit van het filtermedium en de exacte samenstelling van het filtermedium. Zo zal het verwijderingsrendement toeneemen als gevolg van biofilmgroei op het filter en de plastics (Liu et al., 2020). Bovendien kan het verwijderingsrendement worden verhoogd door toevoeging van chemicaliën. Bijkomend voordeel hiervan is dat eveneens meer zwevende stof en fosfor worden verwijderd.

De kleinste fractie microplastics (1 - 50/100 µm) zullen op basis van de informatie in enige mate verwijderd worden door multimediafiltratie. Toevoeging van chemicaliën én een kleine korrelgrootte zullen een positief effect hebben op de verwijdering. Aanvullend kan adsorptie van de allerkleinste microplastics optreden aan bijvoorbeeld GAK-filtermateriaal. praktijkreferenties ontbreken.

5.2.2 Diskfiltratie

Voordelen diskfiltratie

- absolute barrière voor microplastics > 100 µm (afhankelijk van specificatie filterdoek);
- hoge verwijdering verwacht kritische fractie microplastics, mede door koeklaagfiltratie;
- chemicaliënvrij, toevoeging hulpmiddel (coagulant) mogelijk ter verbetering verwijdering microplastics;
- modulaire bouw, makkelijk schaalbaar;
- toepassing op riooloverstort wordt als haalbaar gezien.

Nadelen diskfiltratie

- geen aanvullende verwijdering organische microverontreinigingen;
- hoge waterdruk tijdens terugspoeling kan beschadiging van het filterdoek veroorzaken waardoor mogelijk microplastics vrijkomen uit het filterdoek.

Evenals fijnzeven kan ook diskfiltratie worden ingezet voor de verwijdering van microplastics uit rwzi-effluenten en rioolwater overstort. Deze techniek is immers chemicaliën vrij en opereert met relatief weinig stroom. De relatief kleinere maaswijdte (ongeveer > 10 µm) leidt tot de verwijdering van de kritische fractie, waardoor de techniek eveneens ingezet kan worden voor de verwijdering van microplastics uit hemelwater; hoewel die fractie in hemelwater relatief klein is.

In diskfilters kan een koeklaag vormen, welke het verwijderingsrendement zou kunnen vergroten. Hiertoe dient de techniek echter wel bij het influent worden ingezet. Het spoelwater van de diskfilters dient te worden teruggespoeld naar de primaire behandelingsstappen in de rwzi.

Door de relatief kleine maaswijdte van het filterdoek (> 10 µm) zal diskfiltratie een passende techniek zijn voor de verwijdering van de kleinste microplastics. Aanvullende filtratie kan optreden door opbouw van een koeklaag én toevoeging van chemicaliën.

5.2.3 Membraanfiltratie: Microfiltratie / Ultrafiltratie

Voordelen micro- en ultrafiltratie

- hoge verwijdering microplastics door lage poriëngrootte ($>0,1\ \mu\text{m}$ (MF), $> 20\ \text{nm}$ (UF));
- hoge verwijdering kleinste microplastics;
- toepassing MBR geeft hoge verwijderingsresultaten bij een lager fysiek ruimtegebruik;
- grote multifunctionaliteit, hoge retentie onopgeloste delen en bacteriën/virussen.

Nadelen micro- en ultrafiltratie

- hoog in CAPEX en OPEX;
- chemicaliën vereist voor volledige reiniging systeem;
- lastig te verwerken reststroom.

Hoewel membraanfiltratie (MF, UF, NF of RO) effectief microplastics kan verwijderen, is de maaswijdte van deze technieken klein in verhouding tot de diameter van de te verwijderen fractie microplastics.

De zeer hoge kosten, de inzet van chemicaliën voor het schoonmaken van membranen en de geconcentreerde reststroom wegen wellicht niet op tegen de voordelen van het verwijderen van een fractie microplastics die ook met andere filtertechnieken verwijderd zou kunnen worden.

Membraanfiltratie is echter wel een absolute barrière voor microplastics (en kan dit ook zijn voor nanoplastics) en het kan dus effectief microplastics verwijderen. De inzet van membraanfiltratie kan wellicht wel (kosten-)effectief zijn wanneer ook gestreefd wordt naar de verwijdering van andere microverontreinigingen.

5.2.4 Fijnzeven

Voordelen fijnzeven

- absolute barrière voor microplastics $> 100\ \mu\text{m}$ (afhankelijk van specificatie zeefdoek);
- robuust, hoge multifunctionaliteit;
- koeklaagfiltratie vergroot zeefwerking microplastics kleiner dan de poriegrootte;
- kleine reststroom;
- toepassing op riooloverstort wordt als haalbaar gezien;
- chemicaliënvrij, toevoeging hulpmiddel mogelijk ter verbetering verwijdering microplastics.

Nadelen fijnzeven

- geen aanvullende verwijdering organische microverontreinigingen;
- zeefwerking mogelijk lager bij toepassing op rwzi-effluent (afwezigheid koeklaagfiltratie);
- toevoeging flocculant kan het filterdoek snel verstopen.

Fijnzeven zou effectief kunnen worden ingezet voor de verwijdering van microplastics in een rwzi of op een riooloverstort. Deze techniek is immers chemicaliënvrij en opereert met een relatief laag energieverbruik. Echter, er dient te worden overwogen of het als end-of-pipe oplossing de meest geschikte techniek is. De effectiviteit van fijnzeven neemt immers toe wanneer er zich een koeklaag vormt. Deze koeklaag wordt gevormd wanneer concentraties organische materiaal en zwevende stof hoog zijn. Fijnzeven wordt hierdoor veelal toegepast als influent techniek.

Een bijkomend nadeel van fijnzeven is dat het uit een polyester doek bestaat meestal met een relatief grote maaswijdte ($100\ \mu\text{m}$). Bij het spoelen van het doek zouden synthetische vezels kunnen vrijkomen. Gegeven de grote maaswijdte kan de kritische fractie bovendien ongehinderd de fijnzeven passeren.

Fijnzeven is in principe een absolute barrière voor alle deeltjes groter dan de maaswijdte. Hierdoor is deze techniek gelimiteerd ten opzichte van diskfiltratie of membraanfiltratie. Echter kan de opbouw van een koeklaag of de toevoeging van chemicaliën de effectiviteit op de kleinste microplastics vergroten.

5.2.5 Dissolved air flotation (DAF)

Voordelen DAF

- grote multifunctionaliteit ten aanzien van andere verontreinigingen (zwevende stof, CZV);
- ontlasting biologische zuivering bij toepassing op influent.

Nadelen DAF

- geen aanvullende verwijdering organische microverontreinigingen;
- hoog energie- en chemicaliënverbruik vereist voor operatie;
- beperkt effectief op kleinere microplastics en vezels ($< 50 \mu\text{m}$).

DAF kan effectief worden ingezet voor de verwijdering van (sommige) microplasticsfracties ($> 50 \mu\text{m}$). Echter, het verwijderingsrendement zal sterk afhangen van de stoffeigenschappen van de plastics en de grootte van de bellen. Wel kan het verwijderingsrendement verhoogd worden door de toevoeging van coagulanten en/of flocculanten. De toevoeging van een coagulant of flocculant kan leiden tot hoge concentraties zware metalen en, indien polymeren, kunnen microplastics introduceren in het rioolwater.

Er is beperkte informatie over de verwijdering van de kritische fractie door DAF. Voor een effectieve verwijdering zouden de flotatie-luchtbellen minstens zo klein moeten zijn als het deeltje.

5.3 Oppervlaktewater

De geselecteerde technieken voor behandeling van oppervlaktewater zijn gericht op de verwijdering van macroplastics. Snel is duidelijk geworden dat geen van de technieken effectief zal zijn op de verwijdering van microplastics.

5.3.1 Bubble barrier

Voordelen Bubble barrier

- effectief op macroplastics;
- relatief goedkoop;
- beluchting waterkolom;
- geen belemmering vismigratie en vaart.

Nadelen Bubble barrier

- verwijdering microplastics onduidelijk, enkel indicaties aanwezig;
- duurder bij diepere wateren.

5.3.2 Plasticvanger

Voordelen Plasticvanger

- effectief op macroplastics;
- relatief goedkoop.

Nadelen Plasticvanger

- enkel werking op drijvende plastics.

De plasticvangers, in het bijzonder de booms, zullen de vaart kunnen belemmeren. Ze zijn hierdoor alleen geschikt voor rivieren die niet gebruikt worden voor de doorvaart van boten. Ze kunnen bovendien alleen ingezet worden voor de verwijdering van drijvende macroplastics. De plasticvanger zijn echter wel relatief goedkoop.

De Bubbel Barrier zal niet de vaart belemmeren en kan bovendien worden ingezet om niet-drijvend plastic te verwijderen. Echter, de energie kosten zijn relatief hoog.

Bij de selectie voor de techniek ter verwijdering van macroplastics uit oppervlaktewater zal dus rekening worden gehouden met de kosten en het gebruik van de rivier. Beide technieken kunnen effectief macroplastics verwijderen. Hierdoor kan fragmentatie van de macroplastics worden voorkomen waardoor er minder microplastics vormen.

5.4 Vergelijking technieken met multi-criteria-analyse

De vergelijking van de verschillende end of pipe technieken (zie tabel 5.1 en voor nadere uitwerking 5.3) toont aan dat diskfiltratie, fijnzeven en multimediafiltratie het meest geschikt is voor de verwijdering van microplastics. Deze technieken kunnen tevens met chemische ondersteuning geoptimaliseerd worden. Met name de hoge verwijderingsprestatie in combinatie met beperkte kosten en verwerkbare spoelwaterstromen zijn gunstig voor deze technieken. Het energieverbruik en eventuele chemische hulpmiddelen (niet persé nodig) en afwezigheid van chemische reinigingsmiddelen laten deze technieken redelijk goed presteren ten opzichte van DAF en membraanfiltratie.

Ter verwijdering van macroplastics kunnen zowel de plasticvangers als de Bubble barrier redelijk effectief worden ingezet (tabel 5.2 en 5.3). In de hieronder bijgevoegde tabel is deze vergelijking verder uitgewerkt. Belangrijk is dat hoewel deze tabel een eerste inzicht geeft in de inzetbaarheid van de verscheidende technieken, er per situatie bepaald zal moeten worden welke techniek het beste ingezet zou kunnen worden.

Hieronder in Tabel 5.1 zijn de sommaties van de MCA-scores per end-of-pipe-techniek opgesomd.

Tabel 5.1 Totaalscore MCA (zie tabel 5.3 voor details) onderlinge vergelijking end-of-pipetechnieken

	Zonder chemische ondersteuning	Met chemische ondersteuning
Multimediafiltratie	27	23
Fijnzeven	26	21
Diskfiltratie	29	24
DAF	20	-
Microfiltratie	12	-
Ultrafiltratie	12	-

Hieronder in Tabel 5.2 zijn de oppervlaktewatertechnieken apart beoordeeld op presteren.

Tabel 5.2 Totaalscore MCA (zie tabel 5.3) onderlinge vergelijking oppervlaktewatertechnieken

	Score onderlinge vergelijking
Bubble barrier	23
Plasticvanger	24

Tabel 5.3 MCA End-of-pipetechnieken

	Toepassing	TRL	Bereik	Kosten		Verwijdering microplastics	Reststroomverwerking	Beheer	Verbruiken			Totaal score
			µm	OPEX	CAPEX	> 333 µm			Ruimte	E-verbruik	Chemicaliën	
Multimediafiltratie	effluent	8		3	2	4	4	4	2	3	5	27
Fijnzeven	influent	9	> 100 µm	3	2	5	3	3	2	3	5	26
Diskfiltratie	effluent	9	> 10 µm	3	3	5	4	3	3	3	5	29
DAF	influent	7	> 50 µm	1	2	4	3	3	4	2	1	20
Microfiltratie	effluent	9	> 0,1 µm	0	0	5	1	2	3	0	1	12
Ultrafiltratie	effluent	9	> 20 nm	0	0	5	1	2	3	0	1	12
						0 - hoge kosten	0 - slecht verwijderbaar	0 - lastig verwerkbaar	0 - veel onderhoud	0 - hoog gebruik		
						5 - lage kosten	5 - goed verwijderbaar	5 - makkelijk verwerkbaar	5 - weinig onderhoud	5 - laag gebruik		

Inclusief chemische ondersteuning

	Toepassing	TRL	Bereik	Kosten		Verwijdering microplastics	Reststroomverwerking	Beheer	Verbruiken			Totaal score
			µm	OPEX	CAPEX	> 333 µm			Ruimte	E-verbruik	Chemicaliën	
Multimediafiltratie	effluent	9	-	2	2	5	3	3	2	3	3	23
Fijnzeven	influent	9	> 100 µm	2	2	5	2	2	2	3	3	21
Diskfiltratie	effluent	9	> 10 µm	2	3	5	3	2	3	3	3	24
						0 - hoge kosten	0 - slecht verwijderbaar	0 - lastig verwerkbaar	0 - veel onderhoud	0 - hoog gebruik		
						5 - lage kosten	5 - goed verwijderbaar	5 - makkelijk verwerkbaar	5 - weinig onderhoud	5 - laag gebruik		

Oppervlaktewatertechnieken

	Toepassing	TRL	Kosten		Verwijdering macroplastics	Reststroomverwerking	Beheer	Verbruiken		Impact op omgeving	Totaal score
			OPEX	CAPEX	> 5 mm			Ruimte	E-verbruik		
Bubble barrier	effluent	9	2	2	4	3	3	3	1	5	23
Plasticvanger	influent	9	4	3	3	3	2	3	4	2	24
			0 - hoge kosten		0 - slecht verwijderbaar	0 - lastig verwerkbaar	0 - veel onderhoud	0 - hoog gebruik		0 - veel impact	
			5 - lage kosten		5 - goed verwijderbaar	5 - makkelijk verwerkbaar	5 - weinig onderhoud	5 - laag gebruik		5 - weinig impact	

CONCLUSIE EN HANDELINGSOPTIES

Dit handelingskader is een weerspiegeling van de aanbevelingen die op basis van de in dit project verkregen resultaten zijn gebaseerd. De conclusies en aanbevelingen zijn gebaseerd op de uitgevoerde verkenning en zijn gevalideerd door experts uit het werkveld. Dit handelingskader draagt bij aan het maken van keuzes ter preventie van microplastic-emissie naar het aquatisch milieu. Beperkingen vanwege de recente stand der techniek en beperkte beschikbaarheid van operationele kennis en praktijkervaringen met als doel verwijdering van microplastics zijn een risico bij de invoering van verschillende technieken. Zodra meer literatuur- en praktijkreferenties beschikbaar zijn, alsmede een uniforme meetmethode, moeten deze worden meegewogen in het maken van definitieve beslissingen.

6.1 De conventionele processen op de rwzi hebben belangrijke bijdrage

Uit recentelijke rapportages blijkt dat in conventionele rwzi's al een aanzienlijk aandeel van de microplasticsfracties ($> 10 \mu\text{m}$) verwijderd kunnen worden (circa 80 %). De conventionele processen zoals bezinking, drijfslaagverwijdering en (invang in) actief-slibprocessen op de rwzi hebben een belangrijke bijdrage aan de verwijdering van microplastics. Vooral voorbezinktanks zijn effectief in de verwijdering van microplastics via drijfslaagverwijdering. Het actief-slibproces met goed werkende nabezinktanks verwijdert ook een belangrijk deel door invanging in slibvlokken en verwijdering van drijfslaag en slib over de nabezinktanks. Er kunnen enkele aanpassingen in de rwzi gedaan worden die kunnen leiden tot een hoger verwijderingsrendement ten aanzien van microplastics. Het verlengen van de (slib)verblijftijd wordt gezien (STOWA, 2021) als de meest effectieve aanpassingen, daarnaast kunnen de volgende aanpassingen worden overwogen:

Verbeteren rejectiewater- en reststroomverwerking

De verwijderingsmogelijkheden van microplastics over de rwzi lijken op basis van verwijderingsprestaties over voorbezinktank, actief-slibproces met nabezinktank dan wel veelbelovend; er dient wel rekening gehouden te worden met de invloed van rejectiewater- en reststromen.

De rejectiewaterstromen vanuit de indikking en ontwateringen (de invloed van gisting op microplastics is niet bekend), kunnen de in de waterlijn verwijderde microplastics terugvoeren naar de rwzi waardoor de totale verwijdering over de rwzi beperkt wordt. Inzet van zeeftechnieken op slibstromen en separate afvang van microplastics vanuit slibkoek of roostergoed dient te worden overwogen. Hiervoor is wel verder toegepast onderzoek nodig.

Indien nageschakelde technieken achter de nabezinktanks worden toegepast, dient rekening te worden gehouden met de spoelwater of concentraatstromen. Ook deze stromen kunnen afgevangen microplastics bevatten. Filtratiesystemen worden teruggespoeld om afgevangen delen uit het filter te verwijderen. Dit spoelwater kan daardoor hoge concentraties microplastics bevatten, omdat de afgevangen microplastics uit het filter worden gespoeld. Studies naar de verwijdering van microplastics in rwzi's wijzen uit dat de voorbehandelingstappen (flotatie en bezinking) het effectiefst microplastics kunnen verwijderen. Spoelwater dient daarom terug te worden gespoeld naar deze voorbehandelingstappen.

Toevoegen van (vlok)hulpmiddelen

Toevoeging van chemische hulpmiddelen zoals coagulanten (metaalzouten) en/of flocculanten (organische polymeren) kan leiden tot een hoger verwijderingsrendement over een rwzi¹. Toevoeging kan plaatsvinden op de voorbezinktanks, het actief-slibproces of de inlaat van de nabezinktank.

Microplastics zullen in de gevormde vlokken hechten waardoor ze makkelijk bezinken of makkelijker te verwijderen zijn van het wateroppervlak. De toevoegingen kunnen gecombineerd worden met andere doelen; zoals chemische fosfaatverwijdering, verbetering slibbezinkeigenschappen of slibconditionering.

6.2 Effectieve maatregelen voor verwijdering van microplastics op rwzi-effluent

In deze verkenning van nageschakelde technieken zijn een zestal primaire technieken geïdentificeerd die microplastics van > 1 à 10 µm doeltreffende - al dan niet altijd geheel - kunnen verwijderen puntbronnen naar oppervlaktewater (lees rwzi-effluent). Dit zijn:

- multimediafiltratie;
- diskfiltratie;
- fijnzeven;
- microfiltratie;
- ultrafiltratie;
- dissolved air flotation (DAF).

Hoewel alle bovengenoemde technieken ingezet zouden kunnen worden als additionele behandeling van rwzi-effluent ter verwijdering van microplastics blijken multimedia(zand)filtratie, diskfiltratie en fijnzeven op basis van deze verkenning en de onderlinge vergelijking het meest efficiënt en effectief; mede door de multifunctionele toepassing in combinatie met verwijdering van zwevende stof en nutriënt.

Voor de definitieve keuze voor een techniek, zal een verdere selectie van de 'best toepasbare' techniek plaats moeten vinden per interventielocatie. Veelal zijn de best toepasbare technieken namelijk locatie-specifiek en te combineren met andere zuiveringsdoelen (extra TSS- en nutriëntverwijdering en/of verwijdering van opkomende stoffen zoals microverontreinigingen). Hierbij dienen risico's, kosten, verwijderingsrendement en voordelen ten aanzien van gezondheid en ecologie te worden afgewogen. Enkele factoren die hierbij in overweging dienen te worden genomen zullen hieronder kort worden toegelicht.

Multifunctionaliteit

De bovengenoemde technieken kunnen naast microplastics ook andere verontreinigingen te verwijderen. Zwevende stof en nutriënten kunnen door biologisch actieve filtratie worden verwijderd. Bovendien kunnen organische microverontreinigingen, zoals medicijnresten en PFAS, worden verwijderd door sorptie op granulair kool of door foam fractionation flotatie.

In end-of-pipe technieken kan het waardevol zijn om in te zetten op multifunctionaliteit. Hierdoor kan de footprint van de waterzuivering verkleind worden en kan zuivering relatief kosten effectief zijn. Het kan immers goedkoper zijn om meerdere verontreinigingen in een stap te verwijderen, dan dat het is om voor verontreiniging een nieuwe installatie te bouwen.

Hulpmiddelen

De inzet van chemische hulpmiddelen kan ook bij de toevoeging van een end-of-pipe techniek leiden tot een verhoging van het verwijderingsrendement. Echter, ook dan dient rekening te worden gehouden met de eventuele introductie van zware metalen of andere verontreinigingen. Zie hiervoor ook de toelichting onder het kopje 'Toevoegen van (vlok)hulpmiddelen'.

¹ Bij de toevoeging van chemische hulpmiddelen dient wel zorg te worden gedragen dat het chemische hulpmiddel niet nieuwe verontreinigingen in het milieu introduceert. Organische polymeren kunnen immers in principe microplastic-achtige verbindingen vormen.

Gewoven plastic filterdoeken

Filterdoeken van diskfilters en fijnzeven bestaan uit gewoven plastics. Bij reiniging worden deze doeken bij onder hoge druk afgespoeld. Hierdoor kan schade ontstaan aan de filterdoeken en kunnen mogelijk microplastics vrijkomen van het filterdoek. Deze mogelijke bron van microplastics dient verder onderzocht te worden en het terugspoelregime en onderhoud zou kunnen worden aangepast om beschadiging van de filterdoeken te minimaliseren.

Riooloverstort en afstromend hemelwater

Afstromend hemelwater kan een grote bron zijn van microplastic-emissie naar het milieu. Atmosferische depositie en bandenslijtage wordt via verhard oppervlak afgevoerd naar het riool. Filtratie door middel van diskfilters wordt gezien als technisch haalbare techniek om deze waterstroom te behandelen. In de beoordeling van end-of-pipestromen wordt voornamelijk gekeken naar rwzi-effluent, aangezien dit een omvangrijke puntbron. Naast rwzi-effluent zou echter ook riooloverstort en afstromend hemelwater als zodanige puntbron beschouwd moeten worden. Om als doelmatige maatregel in aanmerking te komen, dient wel vooraf aangetoond te zijn dat de specifieke overstort een significante bijdrage in de lozing veroorzaakt.

Lozingen vanuit riooloverstort zouden eventueel met fijnzeef- of diskfiltratietechnieken behandeld kunnen worden om directe emissie van microplastics via het riool op oppervlaktewater te voorkomen. Deze waterstroom karakteriseert zich als verdund ruw rioolwater, wat alleen incidenteel bij hevige neerslag wordt geloosd. De lozingsplekken zijn afgelegen wat aanvoer van eventuele hulpmiddelen en afvoer van reststromen bemoeilijkt. Tevens dient elektravoorziening aanwezig te zijn. Zowel fijnzeven als diskfiltratie zijn in staat om een groot deel van de aanwezige microplastics te filteren om zo lozing in het milieu te voorkomen. De technieken werken chemicaliënvrij en produceren een kleine reststroom die periodiek afgevoerd moet worden.

Nanoplastics

Hoewel in dit project geen aandacht is besteed aan de kleinste deeltjes, nanoplastics, moet bij handelingsopties de aanwezigheid van nanoplastics in het water in acht worden genomen. Het gedrag van deze stoffengroep is anders dan die van microplastics. Om ook nanoplastics te verwijderen moet rekening worden gehouden met de noodzaak van membraanfiltratie (ultrafiltratie) en het daaraan gekoppelde elektriciteitsgebruik, reinigingschemicaliën en concentraatstroomverwerking.

6.3 Oppervlaktewater

Voor de verwijdering van macroplastics uit oppervlaktewater zijn twee technieken nader geïdentificeerd:

- bubble barrier;
- CleanRivers plasticvanger;
- booms.

Verschillende pilot- en veldtesten van deze technieken tonen aan dat beide ingezet kunnen worden ter verwijdering van plastics uit oppervlaktewater. Echter, de technieken kunnen (nog) niet ingezet worden ter verwijdering van microplastics. Wegens die constatering is in deze uitwerking enkel gekeken naar de verwijdering van macroplastics door de technieken.

Bij de selectie van oppervlaktewatertechnieken dient rekening te worden gehouden met kosten, verwijderingsrendement, onderhoud en de impact op het milieu. De Bubble barrier kan worden ingezet op locaties waar geen obstructie van het waterverkeer plaats kan vinden en waar het aandeel niet-drijvende plastics groot wordt geacht. Beluchting van het water door de luchtinjectie kan bovendien een positief effect hebben op het zuurstofgehalte van het water.

De CleanRivers plasticvanger en Booms kunnen louter plastic nabij het oppervlak afvangen. Bovendien vormen booms een fysieke obstructie in de rivier. Echter, deze technieken zijn wel relatief goedkoop na initiële installatie.

REFERENTIES

- Crawford, C. B., & Quinn, B. (2017). Microplastic separation techniques. In *Microplastic Pollutants* (pp. 203–218). Elsevier. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128094068000098>
- Fotopoulou et al. (2014). *Surface properties of marine microplastics that affect their interaction with pollutants and microbes*.
- KIWK. (2021). *Microplastics*. DeltaFact. <https://www.stowa.nl/deltafacts/waterkwaliteit/kennisimpuls-waterkwaliteit/microplastics>
- Lapointe, M., Farner, J. M., Hernandez, L. M., & Tufenkji, N. (2020). Understanding and Improving Microplastic Removal during Water Treatment: Impact of Coagulation and Flocculation. *Environmental Science & Technology*, 54(14), 8719–8727. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00712>
- Liu, F., Nord, N., Bester, K., & Vollertsen, J. (2020). Microplastics Removal from Treated Wastewater by a Biofilter. *Water*, 12(4), 1085. <https://doi.org/10.3390/w12041085>
- Ma, B., Xue, W., Hu, C., Liu, H., Qu, J., & Li, L. (2019). Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 359, 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.155>
- Nieuwenhuijzen, van, A.F. (2002). *Scenario Studies into Advanced Particle Removal in the Physical-Chemical Pre-treatment of Wastewater*. Delft University Press, ISBN 90-407-2249-8, <http://resolver.tudelft.nl/uuid:9368124f-132c-4cd1-840d-59060882f5c7>
- Poerio, Piacentini, & Mazzei. (2019). Membrane Processes for Microplastic Removal. *Molecules*, 24(22), 4148. <https://doi.org/10.3390/molecules24224148>
- RIVM. (2019). *Factsheet over microplastics in Nederlandse wateren* [Factsheet]. <https://www.rivm.nl/documenten/factsheet-over-microplastics-in-nederlandse-wateren>
- Simon, M., Vianello, A., & Vollertsen, J. (2019). Removal of >10 µm Microplastic Particles from Treated Wastewater by a Disc Filter. *Water*, 11(9), 1935. <https://doi.org/10.3390/w11091935>
- STOWA. (2021). *Verkenning van verwijderingsroutes microplastics in de rwzi*.

- Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M. C. M., & Ni, B.-J. (2019). Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. *Water Research*, 152, 21–37.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.050>
- Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., & Setälä, O. (2017). Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Research*, 123, 401–407. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.005>
- Vercauteren, M., Semmouri, Ilias, & van Acker, Emmanuel. (2021). *Onderzoek naar verspreiding, effecten en risico's van microplastics in het Vlaamse oppervlaktewater*.
- Wang, F., Shih, K. M., & Li, X. Y. (2015). The partition behavior of perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanesulfonamide (FOSA) on microplastics. *Chemosphere*, 119, 841–847.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.08.047>
- Wang, Z., Lin, T., & Chen, W. (2020). Occurrence and removal of microplastics in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP). *Science of The Total Environment*, 700, 134520.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134520>
- WHO. (2019). *Microplastics in drinking-water*. <http://edepot.wur.nl/498693>
- Wolff, S., Weber, F., Kerpen, J., Winklhofer, M., Engelhart, M., & Barkmann, L. (2020). Elimination of Microplastics by Downstream Sand Filters in Wastewater Treatment. *Water*, 13(1), 33.
<https://doi.org/10.3390/w13010033>
- Yahyanezhad, N., Bardi, M. J., & Aminirad, H. (2021). An evaluation of microplastics fate in the wastewater treatment plants: Frequency and removal of microplastics by microfiltration membrane. *Water Practice and Technology*. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.036>
- Yokota, K., Waterfield, H., Hastings, C., Davidson, E., Kwietniewski, E., & Wells, B. (2017). Finding the missing piece of the aquatic plastic pollution puzzle: Interaction between primary producers and microplastics: Aquatic plastic pollution puzzle. *Limnology and Oceanography Letters*, 2(4), 91–104.
<https://doi.org/10.1002/lol2.10040>

Bijlage(n)



BIJLAGE: LONGLIST



BIJLAGE: VERSLAG INTERNE WERKSESSIE



BIJLAGE: VERSLAG WERKSESSIE KWR

IV

BIJLAGE: VERSLAG EXPERTWERKSESSIES



BIJLAGE: FACTSHEETS TECHNIEKEN VERWIJDERING MICROPLASTICS

