



Ministerie van Infrastructuur  
en Waterstaat

stowa

# DEXFILTER PILOT LELYSTAD

PILOTONDERZOEK DEXFILTER VOOR VERWIJDERING VAN ORGANISCHE  
MICROVERONTREINIGINGEN EN PFAS UIT AWZI-EFFLUENT



RAPPORT

2023  
54

DEXFILTER PILOT LEYSTAD

PILOTONDERZOEK DEXFILTER VOOR VERWIJDERING VAN ORGANISCHE  
MICROVERONTREINIGINGEN EN PFAS UIT AWZI-EFFLUENT

RAPPORT

2023

54

ISBN 978.94.6479.050.4



[stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl) [www.stowa.nl](http://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](http://www.stowa.nl)

# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Tiza Spit (Witteveen +Bos)  
Julianne Goense (Witteveen + Bos)  
Jordi Wevers (Witteveen + Bos)

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Patricia Clevering-Loeffen (SWECO)  
Marlies Verhoeven (Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden)  
Manon Bechger (Waternet)  
Ruud Schemen (Waterschap de Dommel)  
Roberta Hofman-Caris (KWR)  
Arjen van Nieuwenhuijzen (Witteveen + Bos)  
Jaïr Dan (Witteveen + Bos)  
Jan Peter van der Hoek (TUD / Waternet)  
Luuk Rietveld (TUD)  
Nessia Fausta (TUD)  
Bernadette Lohmann (Waterschap Zuiderzeeland)  
Remmie Neef (Waterschap Zuiderzeeland)  
Joost van den Bulk (Tauw)  
Gerard Rijs (RWS-WVL)  
Mirabella Mulder (Mirabella Mulder Waste Water Management)  
Cora Uijterlinde (STOWA)

Het onderzoek is mede gefinancierd door Waterschap Zuiderzeeland, Waternet, Hollandse Delta, Witteveen+Bos en Cyclopure.

VORMGEVING Buro Vormvast  
STOWA STOWA 2023-54  
ISBN 978.94.6479.050.4

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.  
Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

# TEN GELEIDE

## **PILOTONDERZOEK DEXFILTER OP AWZI LELYSTAD BEVESTIGT POTENTIE DEXSORB® VOOR VERWIJDERING MICRO'S**

In dit rapport worden de resultaten van het pilotonderzoek DEXfilter op locatie AWZI Lelystad gepresenteerd. In het filter wordt het adsorbent DEXSORB® gebruikt dat op basis van maïszetmeel geproduceerd wordt. In de Verenigde Staten wordt deze adsorbens toegepast voor het verwijderen van PFAS uit drink, grond- en oppervlaktewater, en industrieel afvalwater. In het half jaar durende onderzoek is aangetoond dat de verwijdering van medicijnresten met behulp van DEXSORB mogelijk is. Om de langdurige prestatie van DEXSORB te borgen, is een aantal hydraulische optimalisaties nodig van het filterontwerp. Na optimalisatie kan het DEXfilter naar verwachting goed concurreren met technieken zoals PACAS, O3-zandfiltratie en (Bio-)GAKfiltratie op geneesmiddelenverwijdering, kosten en duurzaamheid.

Binnen het Innovatieprogramma Microverontreinigingen (IPMV) van STOWA en het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat worden diverse technologieën onderzocht voor de verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater. Het onderzochte DEXfilter verwijdert medicijnresten, PFAS en overige microverontreinigingen uit effluent en is chemisch regenererbaar met een alcohol.

Met dit onderzoek is aangetoond dat DEXSORB microverontreinigingen goed tot zeer goed verwijdert, zolang het filtratieproces en de verblijftijd in het filter geborgd is. In de pilot bleken na verloop van tijd hydraulische complicaties op te treden in de filterkolom, waardoor de contacttijd tussen stof en adsorbent onvoldoende bleek en het verwijderingsrendement afnam. Deze complicaties traden op na 4.000 bedvolumes behandeld. Om deze reden zijn verschillende testen gedaan naar de beperkende hydraulische condities van de filterkolommen, op basis waarvan een aantal optimalisaties zijn aanbevolen in het filterontwerp en terugspoelregime om de adsorptiecondities te verbeteren. Op basis van deze optimalisaties kan naar verwachting een langere standtijd van 20.000 en 40.000 bedvolumes bereikt worden. Een vervolg pilotonderzoek na het IPMV-traject met doorgevoerde optimalisaties zal de standtijden moeten bevestigen.

Niet alle vooraf gestelde onderzoeksvragen zijn in dit onderzoek beantwoord door hydraulische uitdagingen in de filterkolommen. Daarom is het aanbevolen om vervolgonderzoek uit te voeren naar de verwijderingsprestatie en standtijd van het DEXfilter onder de juiste hydraulische condities, zoals borging van een goed stromingsprofiel van de filterketel en voorkoming van kanaalvorming door een effectief terugspoelregime.

In 2018 is op laboratoriumschaal de adsorptieprestatie van DEXSORB aangetoond voor de verwijdering van medicijnresten op Nederlands rwzi-effluent. In 2021 zijn additionele labtesten uitgevoerd waarmee, op basis van de resultaten van dit onderzoek, de technische en financiële haalbaarheid zijn geëvalueerd.

Joost Buntsma  
Directeur STOWA



# SAMENVATTING

Het DEXfilter is een adsorptiefilter dat microverontreinigingen vergaand uit water verwijderd met de innovatieve adsorbent DEXSORB®. DEXSORB is een merknaam voor cyclodextrines die ontwikkeld zijn en gebruikt worden in waterbehandeling door het bedrijf Cyclopure. Cyclodextrines zijn cupjes met een positieve of negatieve lading die microverontreinigingen kunnen adsorberen door elektrostatische en hydrofobe interacties, evenals een uitsluitingsmechanisme op basis van selectiviteit voor molecuulgrootte. DEXSORB is biobased en gemaakt van maiszetmeel. Beladen DEXSORB kan worden geregenereerd met een alcohol (methanol of ethanol) op kamertemperatuur. Dit helpt bij het verminderen van afval en vermindert het energieverbruik in vergelijking met thermische regeneratie van granulair actief kool. Deze voordelen in verwijderingsprestatie, duurzaamheid en kosten zijn aanleiding geweest van het opzetten van het pilotonderzoek DEXfilter.

Dit rapport beschrijft het pilotonderzoek op AWZI Lelystad naar de prestatie van het DEXfilter voor de verwijdering van microverontreinigingen uit AWZI-effluent. Het onderzoek is uitgevoerd als onderdeel van het innovatieprogramma microverontreinigingen uit AWZI-afvalwater (IPMV). De doelstelling van het pilotonderzoek is het aantonen van de zuiveringsprestatie van het DEXfilter op Nederlands rioolwaterzuiveringseffluent. Daarnaast is een leerdoel om leerpunten op te doen voor het ontwerp van een praktijkschaalinstallatie door inzicht te krijgen in het benodigde terugspoel- en regeneratieregime.

De pilotinstallatie heeft een half jaar gedraaid tussen maart en september 2023 op effluent afkomstig van de afloop nabezinktanks van AWZI Lelystad. De pilot behandelde een debiet van 0,5 m<sup>3</sup>/hr. Het effluent werd eerst door een voorfiltratie - bestaande uit een zelfreinigend filter (50 µm) en kaarsenfilters (25 µm en 10 µm) - gereinigd waarna het behandeld werd in 2 filterkolommen in serie. De filterkolommen bevatten elk een verschillende soort DEXSORB: het positief geladen DEXSORB+, gericht op de verwijdering van PFAS en negatief geladen DEXSORB, gericht op de verwijdering van positief geladen microverontreinigingen. Beide soorten zijn toegepast om een breed spectrum aan microverontreinigingen, inclusief PFAS, te verwijderen. De filterkolommen zijn ontworpen op een verblijftijd (EBCT) van 5 minuten per filterkolom. Het pilotonderzoek is in 2 fases uitgevoerd. De 1e fase, de optimalisatiefase van ongeveer 2 maanden, is gebruikt om vaste instellingen te bepalen voor de duurtestfase. Tijdens de 2e fase, de duurtest van ongeveer vier maanden, is lange-termijnonderzoek uitgevoerd om vast te stellen wat effecten zijn op standtijd en verwijderingsrendementen.

Het pilotonderzoek heeft aangetoond dat de pilotinstallatie (exclusief AWZI) een gemiddeld verwijderingsrendement (7 best verwijderbare van de 11 gidsstoffen) van 70 tot 95% behoudt tot in ieder geval 4.000 bedvolumes. Voor PFAS is een verwijderingsrendement van 92% behaald. Op basis van de IPMV-methodiek voor berekening van overall-rendementen rekening houdend met RWA/DWA-verhoudingen resulteert dit in een verwijdering van minimaal 70 % over het gehele systeem.

Na een standtijd van ongeveer 4.000 bedvolumes nam het verwijderingsrendement af door hydraulische knelpunten in de filterkolommen met effect op de contacttijd met de adsorbens. De observatie dat het verwijderingsrendement voornamelijk afnam in de 1e kolom gelijktijdig met de verandering van hydraulische condities in de 1e kolom leidde tot de hypothese: *beperkende hydraulische condities hebben een negatieve invloed op het adsorptiegedrag van het DEXfilter.* Deze hypothese is onderzocht met verschillende testen.

Verblijftijdtesten, zeeftesten, schudproeven en een microscopische analyse hebben bevestigd dat het filterbed overmatig is verkleefd met kanaalvorming tot gevolg. Het aanvankelijke terugspoelregime was niet toereikend om het filterbed goed op te breken en te spoelen. Hierdoor is met name in kolom 1 niet de ontworpen noodzakelijk EBCT van 5 minuten gehaald, met een lager verwijderingsrendement als resultaat. Bovendien spoelde DEXSORB-korrels uit bij terugspoeling door overmatige stratificatie. Dit beperkte de terugspoelsnelheid wat de terugspoelingen ineffectief maakte om kanaalvorming te voorkomen. Hydraulische optimalisatie van de 1e kolom - en in mindere mate de 2e kolom - is nodig om kanaalvorming te voorkomen, de ontwerp-EBCT te behalen en zodoende de volledige hoge adsorptiecapaciteit van DEXSORB te benutten. De optimalisaties zullen niet alleen het verwijderingsrendement verbeteren, maar ook de standtijd van de filterkolommen verlengen.

De optimalisaties die met vervolgonderzoek aangetoond moeten worden, zijn:

1. het verbeteren van het stromingsprofiel van de filterkolommen in de ontwerpfase, met als doel een propstroom te benaderen;
2. het verlagen van de uniformiteitscoëfficiënt van de korrels (van 2,3 naar  $\leq 1,6$ ) om overmatige stratificatie te voorkomen;
3. het terugspoelprogramma van alleen water uitbreiden met lucht om verkleving van DEXSORB-korrels op te breken.

Bij afronding van de pilot is het beladen DEXSORB geregenereerd met ethanol. De resultaten van de regeneratie van de 2e kolom zijn wisselend voor de verschillende microverontreinigingen. Waar negatief en neutraal geladen stoffen volledig worden gedesorbeerd, is de regeneratie-effectiviteit van positief geladen stoffen lager. Dit komt waarschijnlijk omdat slechts een vijfde van de geplande regeneratie is uitgevoerd doordat te veel DEXSORB uitspoelde tijdens de (tegenstroomse) regeneratie met ethanol. Bij een volledige (en met voldoende snelheid voor bed fluidisering) regeneratie worden de positief geladen microverontreinigingen naar verwachting ook gedesorbeerd. Na regeneratie blijkt het verwijderingsrendement van de meeste microverontreinigingen te zijn toegenomen (~50 %); vooral van de stoffen die redelijk tot goed zijn gedesorbeerd tijdens de regeneratie. Dit is in lijn met de verwachting dat een hogere mate van desorptie tijdens de regeneratie leidt tot een hoger verwijderingsrendement na de regeneratie.

Naast microverontreinigingen is er ook gekeken naar het effect van het DEXfilter op reductie van PFAS en ecotoxiciteit in het filtraat. De bevindingen in PFAS-verwijdering gaven vergelijkbare resultaten als voor de microverontreinigingen: ook hier leidde de beperkende hydraulische condities, van voornamelijk de 1e kolom, op een afname in PFAS-verwijdering. Desalniettemin, werd er toch een redelijke verwijdering gevonden (~80 %). Deze afname was voornamelijk van één PFAS (6:2 FTAB, een zwitserion) die werd verwijderd in de 2e kolom. Overige PFAS waren slechts in zeer lage concentraties aanwezig in het effluent van de AWZI. Onderzoek naar ecotoxicologische effecten met behulp van acht bioassays laat zien dat het DEXfilter zorgt voor een verlaging van het negatieve effect op ecotoxiciteit. Het DEXfilter

zorgt voor een verlaging van circa 70 % van de SIMONI Risico Indicatie (SRI). De SRI geeft een indicatie van een reductie in de algehele ecotoxiciteit.

Met dit onderzoek is aangetoond dat DEXSORB medicijnresten en PFAS goed verwijdert. Na verloop van tijd traden echter hydraulische knelpunten op in de filterkolom, waardoor het verwijderingsrendement van het DEXfilter afnam. Om deze reden zijn verschillende testen gedaan naar de hydraulische condities van de filterkolommen. Op basis van deze testen, kan de standtijd naar verwachting sterk verlengd worden na optimalisaties van: 1) het stromingsprofiel van de kolommen, 2) een lagere uniformiteitscoëfficiënt van de korrels, en 3) een effectievere terugspoeling met lucht. Op basis van deze optimalisaties is voor de berekening van kosten en CO<sub>2</sub>-voetafdruk uitgegaan van ingeschatte standtijden van 20.000 en 40.000 bedvolumes. Deze resultaten van de optimalisaties moeten aangetoond worden met - reeds in gang gezet - vervolgonderzoek met een optimaliseerde pilotinstallatie, maar worden voor deze rapportage haalbaar geacht voor verdere berekening van operationele toepassing.

De kosten en CO<sub>2</sub>-footprint van het DEXfilter zijn berekend voor een standaard zuivering van 100.000 i.e Omdat de met de pilot behaalde hoeveelheid behandelde bedvolumes geen reëel en haalbaar scenario geeft, is in de berekeningen uitgegaan van standtijden die potentieel bereikt kunnen worden nadat de optimalisaties zijn uitgevoerd. Na doorvoering van de optimalisaties is de te behalen standtijd ingeschat op 20.000 (realistisch) of 40.000 (optimistisch) bedvolumes. De kosten van een praktijkschaal-DEXfilter zijn geraamd op 0,11 tot 0,29 EUR /m<sup>3</sup>, afhankelijk van de standtijd en kostprijs van bulk-DEXSORB. De CO<sub>2</sub>-footprint van het DEXfilter is ingeschat op 1.793 tot 2.207 ton CO<sub>2</sub> per jaar, ofwel 98 tot 176 g CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> behandeld. Daarbij moet rekening gehouden worden dat de standtijd een zeer bepalende parameter is voor de operationele kosten en CO<sub>2</sub> footprint.

**TABEL 1** VERGELIJKING VAN CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT, KOSTEN EN VERWIJDERINGSRENDEMENT TUSSEN HET DEXFILTER EN DE VERSCHILLENDE REFERENTIETECHNOLOGIEËN VOOR HET BEHANDELEN VAN 20.000 EN 40.000 BEDVOLUMES

	Enheid	PACAS	Ozon+ZF	GAK	DEXfilter (20.000 bv)	DEXfilter (40.000 bv)
CO <sub>2</sub> -footprint	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> behandeld	122	128	325	176	98
CO <sub>2</sub> -footprint	ton CO <sub>2</sub> /jaar	2.198	1.953	3.009	2.207	1.793
kosten	EUR/m <sup>3</sup> behandeld	0,05	0,17	0,26	0,14 (bulk) 0,29 (retail)	0,11 (bulk) 0,18 (retail)
verwijderingsrendement gidsstoffen	%	70-75	80-85	80-85	70 - 80	70 - 80

Concluderend, het DEXfilter heeft aanvankelijk een goed verwijderingsrendement van medicijnresten en PFAS aangetoond waarmee de IMPV-doelen en Europese richtlijn voor gidsstoffenverwijdering worden behaald. Verdere hydraulische optimalisaties zijn nodig om adsorptiecondities te verbeteren en de standtijd te kunnen verlengen. Het effect van deze optimalisaties op de standtijd moet worden bevestigd in een nieuw pilotonderzoek. Parallel onderzoek in Doetinchem met DEXORB+ op saneringswater heeft goede verwijdering van PFAS aangetoond. Aanbevolen wordt om dit onderzoek uit te voeren op AWZI-effluent met PFAS om ook de langdurige verwijdering van anionische PFAS aan te tonen. Wanneer deze hydraulische optimalisaties succesvol worden doorgevoerd, kan het DEXfilter concurreren in kosten en CO<sub>2</sub>-footprint met de referentietechnieken en kan het DEXfilter goed ingezet worden bij verschillende AWZI's waar zowel PFAS als microverontreinigingen moeten worden verwijderd.

# DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

*Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.*

# DEXFILTER PILOT LELYSTAD

## PILOTONDERZOEK DEXFILTER VOOR VERWIJDERING VAN ORGANISCHE MICROVERONTREINIGINGEN EN PFAS UIT AWZI-EFFLUENT

### INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
	1.1 Achtergrond	1
	1.2 Doelstelling pilotonderzoek: opstap naar praktijkschaal	2
	1.3 Organisatie van het onderzoek	2
	1.4 Leeswijzer	3
<b>2</b>	<b>DE PILOTINSTALLATIE</b>	<b>4</b>
	2.1 De werking van DEXSORB	4
	2.1.1 Verschillende ladingen adsorbens: DEXSORB en DEXSORB+	5
	2.1.2 Regeneratie met ethanol	5
	2.2 Onderzoeklocatie: AWZI Lelystad	5
	2.3 Procesbeschrijving pilotinstallatie DEXfilter	7
	2.3.1 Uitbreiding voorfiltratie	8
	2.3.2 Terugspoeling na verhoging drukval	8
	2.3.3 Regeneratieopstelling	8
	2.4 Dimensionering pilotinstallatie	9
<b>3</b>	<b>AANPAK PILOTONDERZOEK</b>	<b>10</b>
	3.1 Kennisvragen	10
	3.2 Testperioden	11
	3.3 Analyseprogramma	11
	3.4 Monsternames	14
	3.5 Testen hydraulische condities	15
	3.6 Verwerking meetgegevens	16

<b>4</b>	<b>RESULTATEN PILOTONDERZOEK</b>	<b>17</b>
<b>4.1</b>	<b>Adsorptie van microverontreinigingen</b>	<b>17</b>
4.1.1	Effect van suboptimale hydraulische condities op de adsorptiecapaciteit	20
4.1.2	Vergelijking pilotresultaten met labonderzoek	23
4.1.3	Toetsing aan IPMV- en Europese richtlijnen	24
<b>4.2</b>	<b>Resultaten regeneratie-onderzoek</b>	<b>25</b>
<b>4.3</b>	<b>PFAS-verwijdering</b>	<b>28</b>
4.3.1	Resultaten van CycloPure test-kits	28
4.3.2	Resultaten PFAS-verwijdering DEXfilter Voltastraat	29
<b>4.4</b>	<b>Ecotoxicologie</b>	<b>29</b>
<b>4.5</b>	<b>Non-target screening (NTS)</b>	<b>30</b>
<b>4.6</b>	<b>Uitlogingstesten</b>	<b>31</b>
<b>4.7</b>	<b>Adsorptie opgeloste organische koolstof (DOC)</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>ADVIES OPERATIONELE ASPECTEN VAN DE PILOT</b>	<b>32</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelering Empty Bed Contact tijd</b>	<b>32</b>
<b>5.2</b>	<b>Terugspoelregime met lucht</b>	<b>32</b>
<b>5.3</b>	<b>Uniformiteit DEXSORB-korrel</b>	<b>33</b>
<b>5.4</b>	<b>Volledige regeneratie met ethanol</b>	<b>33</b>
<b>6</b>	<b>INPASSING IN DE NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK</b>	<b>34</b>
<b>6.1</b>	<b>Verwijderingsrendement en ontwerpdebiet</b>	<b>34</b>
<b>6.2</b>	<b>Verbruiken en ontwerputgangspunten</b>	<b>34</b>
<b>6.3</b>	<b>CO<sub>2</sub> footprint</b>	<b>36</b>
<b>6.4</b>	<b>Kostenberekening</b>	<b>38</b>
6.4.1	Stichtingskosten	38
6.4.2	Operationele kosten	39
<b>6.5</b>	<b>Vergelijking kosten en CO<sub>2</sub>-footprint met referentietechnieken</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	<b>42</b>
<b>7.1</b>	<b>Inzichten en conclusies uit het onderzoek</b>	<b>42</b>
<b>7.2</b>	<b>Geschikte AWZI's in Nederland</b>	<b>44</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFIE</b>	<b>45</b>
BIJLAGE I	RAPPORTAGEGRENZEN PFAS TESTKITS CYCLOPUR	47
BIJLAGE II	RESULTATEN MICROVERONTREINIGINGEN MENGMONSTERS	48
BIJLAGE III	RESULTATEN PFAS TESTKITS CYCLOPURE	50
BIJLAGE IV	RESULTATEN MICROVERONTREINIGINGEN STEEKMONSTERS NA REGENERATIE	51

# 1

## INLEIDING

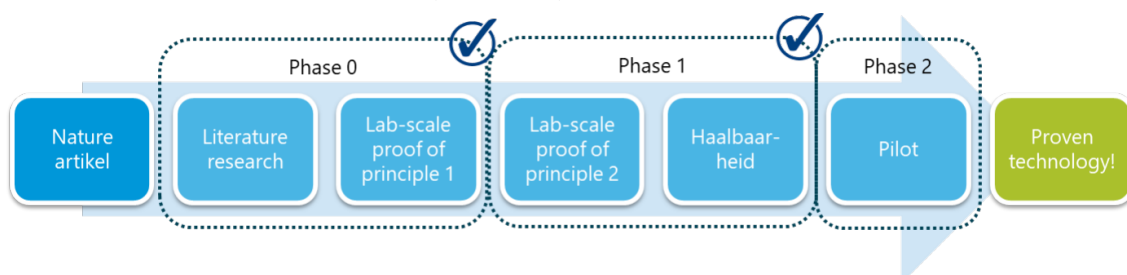
### 1.1 ACHTERGROND

Medicijnresten komen via menselijk gebruik en verkeerde verwerking van ongebruikte medicatie in het rioolwater van afvalwaterzuiveringsinstallaties (AWZI's) terecht. Als de medicijnresten onvoldoende worden verwijderd in de AWZI's, belanden ze via het geloosde effluent in oppervlaktewater. Dit vormt een milieurisico, heeft negatieve effecten op de ecologie en toxicologie en vermoeilijkt de drinkwaterproductie vanuit oppervlaktewater. Deze risico's van medicijnresten en andere microverontreinigingen op het oppervlaktewater, grondwater en drinkwater vragen om extra maatregelen op AWZI's. Bovendien wordt het beperken van medicijnresiduen in de waterlichamen toegevoegd aan de doelen die de Kaderrichtlijn Water (KRW) stelt. Het innovatieprogramma microverontreinigingen uit afvalwater (IPMV), uitgevoerd door het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (I&W), STOWA en de waterschappen, onderzoekt een tal van technologieën die aanzienlijke verbeteringen kunnen bieden voor het verwijderen van microverontreinigingen uit AWZI-effluent.

DEXSORB® is een innovatief adsorbens dat specifiek is ontworpen om microverontreinigingen te adsorberen. In de Verenigde Staten wordt deze adsorbens al toegepast voor het verwijderen van PFAS uit drink, grond- en oppervlaktewater, en industrieel afvalwater. Op labschaal is aangetoond dat DEXSORB ook een hoge mate van verwijdering van geneesmiddelen kan behalen (STOWA 2021-38) op AWZI-effluent in Nederland. Bovendien bleek door de selectiviteit van deze adsorbens een lange standtijd van het filterbed tot verzadiging worden behaald. Hiernaast biedt DEXSORB de mogelijkheid om geregenereerd te worden met organisch oplosmiddel (ethanol, methanol). Dit draagt bij aan zowel voordelen in duurzaamheid als kosten. Dat maakt het materiaal interessant als adsorptiemiddel in waterbehandeling en een veelbelovende techniek voor toepassing op AWZI-effluent (beschreven in Haalbaarheidsstudie DEXfilter (STOWA 2021-38)).

Vanwege deze verwachte voordelen is een pilotonderzoek gestart om de adsorptietechniek DEXSORB verder door te ontwikkelen. Het pilotonderzoek van DEXSORB® maakt onderdeel uit van de begeleidingscommissie (BC) 'overige adsorptie' van het innovatieprogramma microverontreinigingen uit afvalwater (IPMV). Het doel van deze IPMV-pilots is om de technologieën op te schalen tot TRL 6/7. Het hele ontwikkelingstraject van het DEXfilter tot een 'proven technology' is gepresenteerd in afbeelding 1.1.

**AFBEELDING 1.1** ONTWIKKELINGSTRAJECT VAN HET DEXFILTER TOT EEN BEWEZEN TECHNOLOGIE. PHASE 1 IS BESCHREVEN IN HAALBAARHEIDSTUDIE DEXFILTER (STOWA 2021-38)



## 1.2 DOELSTELLING PILOTONDERZOEK: OPSTAP NAAR PRAKTIJSCHAAL

De belangrijkste doelstelling van dit pilotonderzoek is het aantonen van de zuiveringsprestatie van het DEXfilter op Nederlands rioolwaterzuiveringseffluent. Daarnaast is een leerdoel om leerpunten op te doen voor het ontwerp van een praktijkschaalinstallatie door inzicht te krijgen in het benodigde terugspoel- en regeneratieregime. Een succesvolle afronding van de pilot levert een TRL 6 op. TRL 6 is een 'grote pilotinstallatie', waaronder wordt verstaan dat op representatieve schaal met continue operatie is getest. De verwachting is, op basis van ervaringen in het verleden (1-STEP® filter en O<sub>3</sub>-STEP filter), dat de gekozen schaalgrootte voldoende is om direct door te vertalen naar praktijkschaaltoepassing zonder last te hebben van schalingseffecten. Daarmee is het aannemelijk dat na een succesvolle pilot het DEXfilter direct naar een TRL 7/8 doorvertaald kan worden.

Vanuit het IPMV is een tweetal doelen opgesteld voor de zuiveringsefficiëntie van het DEXfilter:

1. verwijdering van tenminste 70 % verwijdering van 7 van de 11 gidsstoffen<sup>1</sup> bepaald over het influent van de zuivering tot het effluent van het DEXfilter;
2. een verlaging van 50 % van de ecotoxiciteit van het AWZI-effluent (volgens de richtlijnen van het IPMV).

Naast de zuiveringsdoelen, is de pilot beoordeeld op de volgende aspecten:

- CO<sub>2</sub>-footprint op basis van het chemicaliën- en het energieverbruik;
- operationele en investeringskosten per m<sup>3</sup> behandeld water;
- inpasbaarheid in de Nederlandse zuiveringspraktijk.

Ten grondslag aan bovenstaande aspecten liggen de standtijd (tijd tot verzadiging) en regeneratie van het filter. Ook uitloging is gemonitord, om te bevestigen dat geen ongewenste stoffen aan het water worden toegevoegd. De doelen van het pilotonderzoek zijn vertaald naar een meetprogramma in hoofdstuk 3.

## 1.3 ORGANISATIE VAN HET ONDERZOEK

De onderzoeken *voorafgaand* aan dit pilotonderzoek (tot en met fase 1 in afbeelding 1.1) zijn uitgevoerd in een onderzoeksconsortium bestaande uit de leverancier van DEXSORB-materiaal (CycloPure), Waternet, TU Delft en Witteveen+Bos onder de vlag van STOWA. De projectorganisatie van het huidige pilotonderzoek bestaat uit zes samenwerkende partijen, te weten:

- waterschap Zuiderzeeland: penvoerder, pilotbeheer; eigenaar van zuiveringslocatie Lelystad;
- Witteveen+Bos: projectmanagement, primaire projectuitvoering, pilot operations;
- Jotem: leverancier pilotinstallatie en randvoorzieningen;
- Waternet: launching customer, inhoudelijke back-up;
- waterschap Hollandse Delta: financier, potentiële customer;
- CycloPure: producent DEXSORB(+), operationele ondersteuning (op afstand), labtesten (op afstand);
- STOWA: financier, facilitator begeleidingscommissie.

1 De door STOWA gehanteerde gidsstoffen (op basis van richtlijnen IenW) zijn som 4-,5-methylbenzotriazol, benzotriazol, carbamazepine, diclofenac, gabapentine, hydrochloorthiazide, irbesartan, metoprolol, sotalol, trimethoprim en venlafaxine. De stoffen amilsulpride, azithromycine, candesartan, clarithromycine, citalopram, furosemide, propranolol en sulfamethoxazol zijn monitoringsstoffen .



#### **1.4 LEESWIJZER**

Het rapport is opgedeeld in zeven hoofdstukken. Hoofdstuk 2 gaat in op het ontwerp van de pilotinstallatie. In hoofdstuk 3 is het pilotonderzoek verder toegelicht waarbij in is gegaan op de onderzoeksvragen en methodes toegepast tijdens de verschillende testperiodes. In hoofdstuk 4 zijn de resultaten van het pilotonderzoek weergegeven. Daarna zijn in hoofdstuk 5 de operationele aspecten van de pilot weergegeven. In hoofdstuk 6 is ingegaan op de inpassing in de Nederlandse zuiveringspraktijk. Als laatste zijn in hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen weergegeven. In hoofdstuk 8 in de bibliografie opgenomen.

# 2

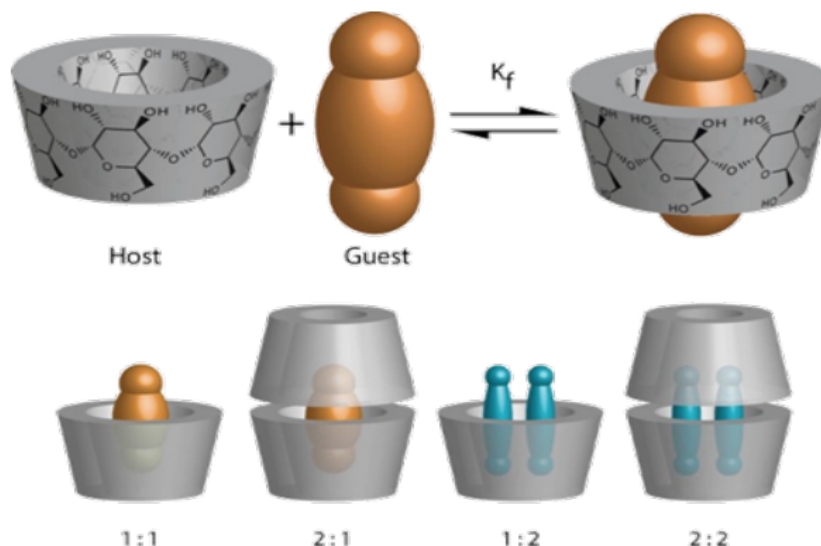
## DE PILOTINSTALLATIE

Dit hoofdstuk presenteert het werkingsprincipe van adsorbens DEXSORB (paragraaf 2.1), de onderzoekslocatie van de pilotinstallatie van het DEXfilter (paragraaf 2.2), de beschrijving van de pilot (paragraaf 2.3) en de dimensionering van de installatie (paragraaf 2.4).

### 2.1 DE WERKING VAN DEXSORB

DEXSORB is de merknaam voor cyclodextrines geproduceerd door CycloPure voor toepassing in waterbehandeling. DEXSORB is afkomstig uit de luchtverfrisserindustrie en opgericht als een spin-off van de Cornell University. Cyclodextrines bestaan uit een soort cupjes met een positieve of negatieve lading waar de microverontreinigingen aan kunnen adsorberen door een combinatie van elektrostatische-, hydrofobe interacties en een uitsluitingsmechanisme op basis van molecuulgrootte. Deze cupjes zijn de zogenaamde 'host' waarin de microverontreinigingen als 'guest' adsorberen door zowel de vorm als de lading van het cupje (afbeelding 2.1). Door de aaneenschakeling van deze hosts wordt een groot intern oppervlak gecreëerd. Bovendien heeft de host een specifieke maat (binnendiameter van 0,6-0,65 nm en hoogte van ongeveer 0,78 nm [1]), waardoor cyclodextrines selectief werken voor het adsorberen van microverontreinigingen en grotere verontreinigingen door hun maat worden uitgesloten [2]. Hierdoor raakt het materiaal minder snel verzadigd door andere organische componenten (zoals opgelost organische koolstof (DOC)) in het water. DOC heeft naar verwachting dus geen invloed op de standtijd en regeneratiefrequentie van DEXSORB.

AFBEELDING 2.1 WERKING CYCLODEXTRINES IN DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN [3]



Verder is DEXSORB gemaakt uit maïszetmeel en dus een biobased adsorbens. DEXSORB is ook bekend in toepassingen voor de verwijdering van PFAS. De combinatie van de hoge mate van verwijdering van geneesmiddelen, de lange standtijd van het filterbed en de mogelijkheid om DEXSORB te kunnen regenereren, maken het materiaal interessant als adsorptiemiddel in

waterbehandeling en een veelbelovende techniek voor toepassing op AWZI-effluent. Verdere technologische beschouwing over DEXSORB is terug te vinden in de haalbaarheidsstudie [4].

### 2.1.1 VERSCHILLENDE LADINGEN ADSORBENS: DEXSORB EN DEXSORB+

Zoals genoemd kan aan DEXSORB een positieve of negatieve lading worden gegeven om verschillende microverontreinigingen beter te adsorberen. In de pilot wordt gebruik gemaakt van 2 soorten cyclodextrines: DEXSORB® en DEXSORB+®. Deze cyclodextrines zijn gebruikt om 2 in serie geschakelde kolommen te bedienen (Paragraaf 2.3). De 1e kolom is gevuld met DEXSORB+. Deze is positief geladen en specifiek toegespitst op de verwijdering van PFAS en negatief geladen microverontreinigingen. De 2e kolom is gevuld met DEXSORB®, deze is negatief geladen en dus meer toegespitst op positief geladen microverontreinigingen. Om de volledige groep microverontreinigingen te verwijderen en PFAS als bijvangst mee te verwijderen, zijn beiden soorten toegepast in de DEXfilter pilot.

In de pilot is gebruik gemaakt van in het lab gefabriceerd DEXSORB-materiaal omdat in de leveringsperiode onvoldoende industrieel gefabriceerd materiaal beschikbaar was. Dit is inmiddels opgelost, dus in een vervolgonderzoek is industrieel gefabriceerd materiaal weer leverbaar.

### 2.1.2 REGENERATIE MET ETHANOL

Na verloop van tijd verzadigen de cupjes waardoor het verwijderingsrendement afneemt en het DEXfilter geregenereerd moet worden. Zoals eerder aangestipt, is een van de eigenschappen van DEXSORB dat regeneratie kan gebeuren met een alcohol zoals methanol of ethanol zonder dat hier hoge temperaturen voor nodig zijn [2]. Methanol en ethanol hebben zowel non-polaire ( $C_2H_5$ ) als polaire groepen (OH) waar de microverontreinigingen zich aan kunnen binden. Hierdoor zijn de stoffen geschikt als universele oplosmiddelen om de microverontreinigingen van het adsorptiemateriaal af te desorberen. Tijdens de haalbaarheidsstudie is methanol aangehouden als regeneratiemiddel. Voor deze studie is om veiligheidsredenen gekozen voor ethanol (methanol is in tegenstelling tot ethanol giftig). Op basis van ervaring in de VS is eenzelfde regeneratie efficiëntie verwacht.

Regeneratie met (m)ethanol voorkomt de productie van grote hoeveelheden afval (verzadigd DEXSORB) en een hoog energieverbruik zoals bij de thermische regeneratie van granulair actief kool. De efficiëntie van het regeneratieproces is daarom ook meegenomen in het pilotonderzoek (uitgewerkt in paragraaf 3.2.2). Het regeneraat kan op verschillende manieren worden verwerkt: verbranding van de alcohol na verdere indikking met membraanfiltratie, of vernietiging van microverontreinigingen met een planetaire ball-mill [5].

## 2.2 ONDERZOEKLOCATIE: AWZI LELYSTAD

De onderzoeklocatie van de pilot is afvalwaterzuiveringsinstallatie (AWZI) Lelystad die valt onder de verantwoordelijkheid van het waterschap Zuiderzeeland. Voor deze locatie is in 1e instantie gekozen omdat daar ook PFAS in het afvalwater is gemeten [6]. Zodoende kan ook de PFAS-verwijdering door het DEXfilter als bijvangst worden gemeten. Echter bleek PFAS nauwelijks meer te worden gemeten bij de start van het pilotonderzoek. Deze locatie is nog steeds geschikt voor het aantonen van de verwijdering van microverontreinigingen en heeft voldoende ruimte en capaciteit beschikbaar.

AFBEELDING 2.2 AWZI LELYSTAD (BRON: WEBSITE ZUIDERZEELAND)



AWZI Lelystad is een biologisch zeer laag belaste actief-slibinstallatie met een carrousel en UCT-proces<sup>2</sup>. De zuivering heeft een capaciteit van 160.000 i.e. (bij 150 g TZV/dag) en 20.500 m<sup>3</sup>/dag. De belasting in 2022 bedroeg 104.000 i.e. à 150 g TZV/dag met een jaargemiddelde hydraulische belasting van 12.825 m<sup>3</sup>/dag. De hydraulische capaciteit bij droogweerafvoer (DWA) is 1.710 m<sup>3</sup>/uur en bij regenweerafvoer (RWA) 3.260 m<sup>3</sup>/uur. Lelystad heeft een verbeterd gescheiden rioolstelsel.

De waterlijn van de zuivering bestaat uit fijnroosters (2), een anaerobe tank, een denitrificerende tank, een nitrificerende tank, beluchtingstanks (2 carrousel waarvan er één wordt gebruikt) en nabezinktanks (3 waarvan er 2 (kleine) worden gebruikt). De sliblijn bestaat vervolgens uit bandindikers en een zeefbandpers.

Het ontvangende oppervlaktewater na zuivering is de Lage dwarsvaart [7]. De lozingeisen en behaalde effluentsamenstelling van de AWZI Lelystad staan weergegeven in tabel 2.1.

TABEL 2.1 LOZINGEISEN EN BEHAALDE EFFLUENTSAMENSTELLING (AFLOOP NABEZINKTANK) AWZI LELYSTAD TEN TIJDE VAN TESTEN

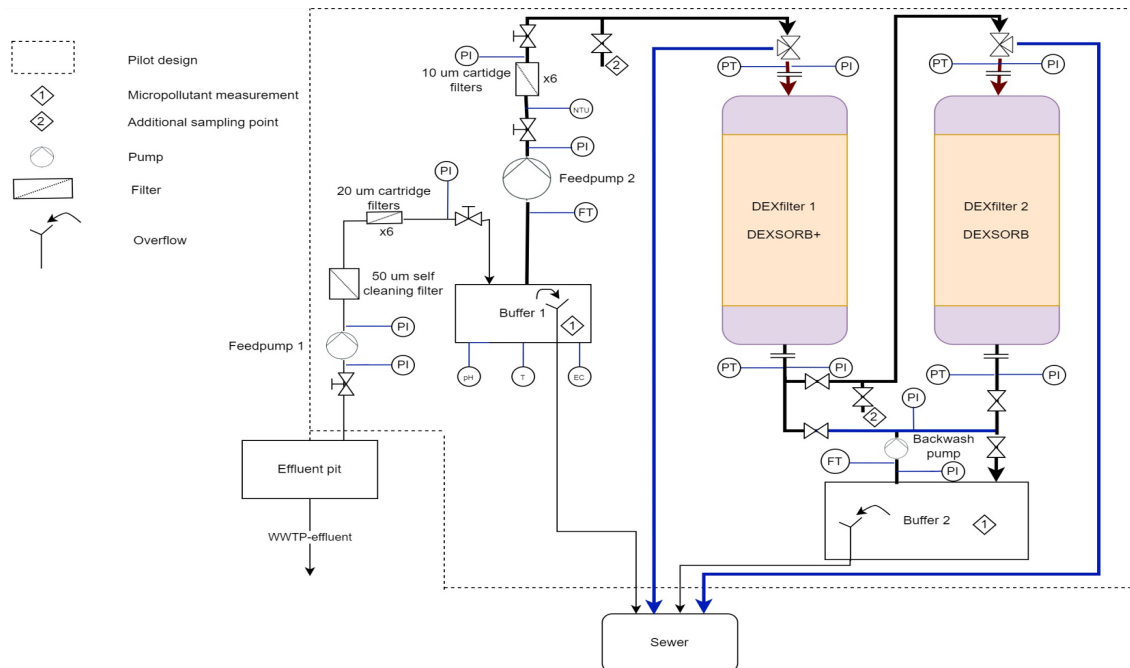
Concentratie	Eenheid	Effluenteis	Gemiddelde effluentconcentratie tijdens pilotperiode
totaal stikstof	mg/l	10	3,9
nitriet	mg/l		0,1
nitraat	mg/l		1,4
total kjeldahl	mg/l		2,0
ammonium	mg/l		0,4
totaal fosfor	mg/l	1	0,4
CZV	mg/l	125	2,3
BZV	mg/l	20	33
onopgeloste stoffen	mg/l	30	9,5

2 University of Cape Town (UCT) proces: een proces waarbij het effect van nitraat op de anaerobe contactzone geminimaliseerd wordt. Dit draagt bij aan de anaerobe omstandigheden wat het vrijkomen van biologische fosfor mogelijk maakt.

### 2.3 PROCESBESCHRIJVING PILOTINSTALLATIE DEXFILTER

Een schematische weergave van de pilotinstallatie is gepresenteerd in afbeelding 2.3. De procesbeschrijving is onder het processchema toegelicht.

AFBEELDING 2.3 PROCES FLOW DIAGRAM VAN PILOTINSTALLATIE DEXFILTER



Het zuiveringsproces van de DEXfilter pilot start vanaf de effluentput van AWZI Lelystad. Een pomp pompt het voedingswater vanuit de effluentput via een automatisch zelfreinigend filter (50  $\mu\text{m}$ ) en een set van 6 kaarsenfilters (20  $\mu\text{m}$ ) naar de geïnstalleerde voedingswaterbuffertank (buffer 1) van de pilotinstallatie. Deze voorfiltratie is in de optimalisatiefase toegevoegd om de filterkolommen van het DEXfilter te beschermen tegen uitspoeling van zwevende stof uit de nabezinktanks van de AWZI (zie paragraaf 2.3.1 voor uitleg van deze wijziging). Deze leiding is voorzien van een troebelheidsmeter. De voedingswaterbuffertank heeft een overstort naar de effluentsloot van de AWZI. Naast een troebelheidsmeter is de voedingswaterbuffertank voorzien van een pH-, geleidbaarheid- en temperatuurmeter.

Vanuit de voedingswaterbuffertank pompt een centrifugaalpomp het water, met een ontwerpdebiet van 0,5  $\text{m}^3/\text{uur}$ , via een aanvoerleiding en nog een set van 6 kaarsenfilters (10  $\mu\text{m}$ ) naar het DEXfilter. De DEXfilter-pilotinstallatie bestaat uit 2 filterketels, uitgevoerd met een lead-lag configuratie (Afbeelding 2.3). Het voedingswater stroomt van boven naar beneden eerst door de lead (1<sup>ste</sup>) kolom, gevuld met DEXSORB+ en doorstroomt dan de lag (2<sup>e</sup>) kolom, gevuld met DEXSORB. Het DEXfilter adsorbeert de organische microverontreinigingen (micro's) aan het DEXSORB materiaal in de kolommen; PFAS zou voornamelijk met het DEXSORB+-materiaal geadsorbeerd moeten worden. Terugspoeling van het DEXfilter wordt in beginsel zoveel mogelijk voorkomen of beperkt om het adsorptieproces te maximaliseren in het pilotonderzoek. Hierdoor wordt de massaoverdrachtszone van het adsorptiebed zo min mogelijk aangetast [8].

Het filtraat van het DEXfilter loopt vervolgens onder vrij verval naar een filtraatbuffertank (buffer 2) die via een overstort op de terreinriolering loost. Deze filtraatbuffertank is voorzien van monsternamekasten.

### 2.3.1 UITBREIDING VOORFILTRATIE

In de optimalisatiefase van het onderzoek is de voorinstallatie van het DEXfilter aangepast om doorslag van zwevende stof naar de filterkolommen te beheersen. De aanvankelijk geïnstalleerde zakkenfilters (25 en 10 µm) verstopten te snel - na ongeveer 3 uur - waardoor deze te vaak vervangen moesten worden. Dat was niet beheersbaar voor de pilotoperators. In de optimalisatiefase is daarom een uitgebreide voorfiltratie geïnstalleerd die aanvankelijk niet was opgenomen in het pilotontwerp.

Om tot een nieuwe voorfiltratie te komen, zijn verschillende mogelijkheden geprobeerd. Allereerst is gekeken naar zakkenfilters met een grotere porie-grootte (50 µm). Dit is niet optimaal gebleken, doordat daardoor als gevolg van doorslag van deeltjes de druk in de DEXSORB kolommen snel (<één dag) oploopt en de filterkolommen daardoor vaak moeten worden teruggespoeld. Hierna is gekeken naar meerdere kaarsenfilters met de oorspronkelijke porie-groottes (20 µm en 10 µm) die per 6 parallel geschakeld zijn. Door de kaarsenfilters parallel te schakelen, is overcapaciteit gecreëerd zodat de kaarsenfilters langer mee gaan. Ondanks de parallelle schakeling moesten de kaarsfilters alsnog te vaak (om de paar dagen) vervangen worden wat te veel tijd van operators van AWZI Lelystad vroeg. Om deze reden is een zelfreinigend filter (50 µm; R2D van Jotem Waterbehandeling) voor de kaarsfilters geïnstalleerd. Op deze voorfiltratie kan (in tegenstelling tot een zandfilter) geen biologische groei plaatsvinden waardoor verwacht wordt dat de beïnvloeding op de OMP-verwijdering minimaal is. Biologische groei kan immers bijdragen aan de verwijdering van microverontreinigingen [9]. De opstelling van zelfreinigend filter (50 µm) - 6 parallelle kaarsfilter (20 µm) - 6 parallelle kaarsfilter (10 µm) is optimaal voor deze pilot gebleken (afbeelding 2.3).

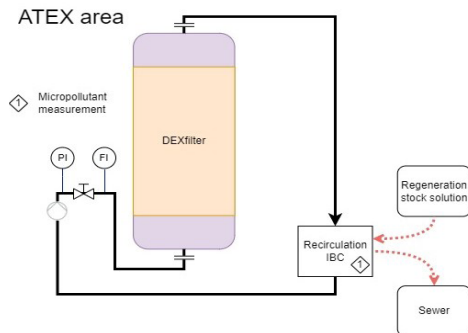
### 2.3.2 TERUGSPOELING NA VERHOGING DRUKVAL

Ondanks de geïnstalleerde voorfiltratie bleek tijdens het onderzoek de druk, in vooral de 1<sup>ste</sup> adsorptiekolom van het DEXfilter, toch op te lopen. Om de drukval over de kolom beheersbaar te houden, is de mogelijkheid tot een terugspoeling opgenomen in de pilotinstallatie. Deze terugspoeling is uitgevoerd met het filtraat uit de filtraatbuffertank (afbeelding 2.3). Het DEXfilter is handmatig teruggespoeld wanneer de drukval over de beiden kolommen tezamen opliep tot boven 1,7 bar.

### 2.3.3 REGENERATIEOPSTELLING

Wanneer na verloop van tijd de effectiviteit van de OMV-verwijdering is afgenomen door verzadiging van het DEXSORB (doorslag), moet het DEXfilter geregenereerd worden (paragraaf 2.1.2). Daarvoor is voor het pilotonderzoek een mobiele regeneratieopstelling ontwikkeld. Regeneratie is tijdens de pilot uitgevoerd door het DEXSORB-materiaal in de filterkolommen te spoelen met ethanol. Omdat ethanol ontvlambaar is, is de regeneratie-installatie opgezet in een ATEX-omgeving op de AWZI (afbeelding 2.4).

AFBEELDING 2.4 REGENERATIEOPSTELLING IN DE ATEX ZONE



Voor de regeneratie is het DEXfilter eerst teruggespoeld om het filterbed losser te maken, zodat meer contactoppervlak ontstaat met de regeneratieoplossing die wordt gebruikt. Het DEXfilter wordt met flexibele slangen op de regeneratieopstelling aangesloten. De regeneratieopstelling bevat een IBC waarin de regeneratie-oplossing gerecirculeerd kan worden en een ATEX-pomp. De regeneratie is uitgevoerd in 5 recirculatie rondes die elk 3 uur duren. Aan het begin van een ronde is de recirculatie-IBC gevuld met 200 liter regeneratieoplossing. Het regenerant is met een debiet van ongeveer 60 l/h gerecirculeerd door de kolom om het filterbed te regenereren. Na elke ronde is uit de recirculatie-IBC een duplometing genomen. In totaal is 1.000 liter regeneratieoplossing gebruikt. Hierna is het DEXfilter met ongeveer 200 liter kraanwater gewassen om de overgebleven regenerant uit het DEXfilter te krijgen.

## 2.4 DIMENSIONERING PILOTINSTALLATIE

Tabel 2.2 geeft een overzicht van de dimensionering van de pilotinstallatie. Dit zijn de procestechnologische uitgangspunten van het adsorptieproces en de stoffeigenschappen van de adsorbens.

TABEL 2.2 DIMENSIONERING DEXFILTER PILOT

Ontwerpparameter	Eenheid	Kolom 1	Kolom 2
voedingsdebiet	m <sup>3</sup> /h		0,5
interne diameter kolom	cm		24
hoogte kolom	cm		150
type DEXSORB vulling	-	DEXSORB <sup>®</sup>	DEXSORB <sup>®</sup>
filterbedhoogte	cm	112	124
filterbedvolume	liter	50,6	56,1
EBCT per kolom (volgens ontwerp)	minuten	6,1	6,7
EBCT totaal (volgens ontwerp)	minuten		12,8
filtratiesnelheid	m/h		11
dichtheid DEXSORB	kg/l		0,4
filterbed gewicht	kg	20,3	22,4

In de tabel is de totale EBCT volgens het ontwerp genoemd (6,1 + 6,7 minuten = 12,8 minuten). Zoals later in het rapport uitgelegd (hoofdstuk 4), is deze EBCT niet behaald in het pilotonderzoek. De EBCT verschilt per kolom, doordat de bedhoogte in praktijk verschillend bleek te zijn na vulling. Dat was vooraf niet precies te meten.

# 3

## AANPAK PILOTONDERZOEK

Dit hoofdstuk beschrijft de methodiek van het pilotonderzoek. In het pilotonderzoek zijn een aantal kennisvragen beantwoord die de toepasbaarheid van het DEXfilter op AWZI-effluent in Nederland moet toetsen. Deze kennisvragen komen voort uit de haalbaarheidsstudie, en moeten onzekerheden uit de haalbaarheidsstudie wegnemen en daardoor bijdragen aan de doelstellingen van het pilotonderzoek (paragraaf 1.2). De kennisvragen zijn uiteengezet in paragraaf 3.1. Paragraaf 3.2 licht de testperiodes van het pilotonderzoek toe. Paragraaf 3.3 presenteert het analyseprogramma. De monsternameprocedures, hydraulische condities en verblijftijd en de verwerking van de meetgegevens zijn beschreven in respectievelijk paragraaf 3.4, 3.5 en 3.6.

### 3.1 KENNISVRAGEN

De kennisvragen bestaan uit vijf hoofdvragen en een aantal subvragen. De hoofd- en subvragen zijn als volgt gedefinieerd:

1. operationele vraagstukken bij continue bedrijfsvoering van filterbed:
  - a. wat is de standtijd (hoeveelheid tijd tot de gidsstoffenverwijdering < 70 %) van het DEXfilter?
  - b. hoeveel vers DEXSORB moet er toegevoegd worden per periode bij continue bedrijf door eventueel verlies van materiaal (als gevolg van terugspoelingen) of door capaciteitsverlies door onvolledige regeneraties (met een massabalans)?
  - c. wat is het optimale terugspoelregime van het DEXfilter?
2. wat is de ecotoxiciteit van het DEXfilter effluent (gemeten volgens Nederlandse richtlijnen)?
3. vindt er uitloging plaats van DEXSORB uit het filter?
4. wat is de duurzaamheid van het DEXfilter uitgedrukt in de CO<sub>2</sub>-footprint, op basis van:
  - a. het chemicaliënverbruik bij langdurig bedrijf;
  - b. het energieverbruik bij langdurig bedrijf;
5. vertaling van de (operationele) pilotresultaten naar een OPEX- en CAPEX-kostenraming op praktijkschaal.

Vraag 1, 2 en 3 zijn beantwoord door metingen aan de pilotopstelling. Vraag 4 en 5 slaan op een vertaling van de pilotresultaten naar een praktijkschaalontwerp. Naast de kennisvragen uit de haalbaarheidsstudie is er ook een aantal eisen aan het onderzoeksprogramma vastgesteld vanuit STOWA: de IPMV-vragen (paragraaf 1.2).



### 3.2 TESTPERIODEN

De projectfasering is in een 5-tal fasen opgesplitst zoals weergegeven in tabel 3.1.

TABEL 3.1 PROJECTFASERING

Fase	Weken (volgens planning)
fase 1: PvA opleveren	8
fase 2: initiatie	16 (4 maanden)
fase 3: procesoptimalisatie	8
fase 4: duurtesten	16
fase 5: evalueren en rapporteren	4

Het doel van de 1e fase is de oplevering van het plan van aanpak voor het pilotonderzoek. Hieronder vallen ook de afspraken over de financiering projectbudget. De doelstelling van fase 2 is de bouw, mobilisatie en opstart van de DEXfilter pilotinstallatie. Het doel van fase 3 is het optimaliseren van de procesinstellingen van de DEXfilter pilot (paragraaf 3.2.1). In fase 4 is het DEXfilter met vaste procesinstellingen bedreven voor meerdere maanden. Het doel is om operationele aspecten van het DEXfilter bij continue bedrijf te onderzoeken en resultaten te genereren. Als laatste evalueert fase 5 de pilotresultaten welke zijn opgeschreven in rapportvorm. Hiermee zijn alle kennisvragen in dit rapport beantwoord.

### 3.3 ANALYSEPROGRAMMA

Het analyseprogramma is opgesteld met als doel de beantwoording van de kennisvragen. De meeste analyses zijn uitgevoerd in het laboratorium van Aqualysis. Dit zijn de analyses van microverontreinigingen, nutriënten, ecotoxiciteit, PFAS, non-target screening en uitloging. Naast deze labanalyses zijn PFAS testkits gebruikt en additionele metingen voor antibiotica-resistentie en PFAS door KWR gedaan (in opdracht van STOWA).

#### ANALYSES MICROVERONTREINIGINGEN

Om de verwijdering van een breed spectrum aan organische microverontreinigingen te monitoren, zijn 11 gidsstoffen en 6 monitoringsstoffen geanalyseerd. Deze zijn gebaseerd op de richtlijnen van het ministerie van IenW<sup>3</sup>. Volgens de Nederlandse richtlijnen van het Ministerie van IenW dient het verwijderingsrendement berekend te worden over 7 van de 11 gidsstoffen. Hierbij geldt een minimaal verwijderingsrendement in elk monster van 70 %. Deze resultaten kunnen vervolgens worden vergeleken met andere gangbare technieken [10].

#### ANALYSES MICROVERONTREINIGINGEN DOOR EU-RICHTLIJN

Naast de analyse voor IPMV, wordt ook gekeken naar de EU-richtlijn. Door de EU is een voorstel gedaan voor een revisie van de Richtlijn Stedelijk Afvalwater<sup>4</sup>. Hierin worden verwijderingsrendementen voorgesteld voor organische microverontreinigingen, die enigszins afwijken van de Nederlandse stoffen voor de bijdrageregeling voor demo installaties en het IPMV van STOWA. Er is sprake van 2 categorieën stoffen (tabel 3.2). In het revisievoorstel is gesteld dat AWZI's groter dan 100.000 i.e. moeten zijn voorzien van een aanvullende verwijdering voor OMVs. Hiernaast moeten ook kleinere zuiveringen (met een capaciteit van 10.000-100.000 i.e.) die lozen op een gevoelig oppervlaktewater aanvullende verwijdering van OMV's toepassen vanwege risico's voor de humane gezondheid of het (water)milieu. Dit

- De door STOWA gehanteerde gidsstoffen zijn som 4-,5-methylbenzotriazol, benzotriazol, carbamazepine, diclofenac, gabapentine, hydrochloorthiazide, irbesartan, metoprolol, sotalol, trimethoprim en venlafaxine. De stoffen azithromycine, candesartan, clarithromycine, propranolol en sulfamethoxazol zijn monitoringsstoffen.
- Proposal for a revised Urban Wastewater Treatment Directive (europa.eu)

dient gerealiseerd te zijn in de periode 2030-2035 voor AWZI's groter dan 100.000 i.e. en uiterlijk in 2040 voor kleinere AWZI's.

**TABEL 3.2 DE STOFFENLIJST VAN DE VOORGESTELDE NIEUWE EUROPESE RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER IN VERGELIJKING MET DE NEDERLANDSE 7 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN**

Categorie 1 EU	Categorie 2 EU	Gidsstoffen NL
amisulpride	benzotriazol	carbamazepine
carbamazepine	candesartan	diclofenac
citalopram	irbesartan	hydrochloorthiazide
clarithromycine	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	metoprolol
diclofenac		venlafaxine
hydrochloorthiazide		1,2,3-benzotriazol
metoprolol		irbesartan
venlafaxine		som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol
		gabapentine
		sotalol
		thrimethoprim

Het verwijderingspercentage moet conform de nieuwe concept Europese Richtlijn Stedelijk Afvalwater berekend worden over tenminste 6 van de 12 stoffen. Hierbij dient de verhouding tussen stoffen uit Categorie 1 en Categorie 2 altijd 2:1 te zijn. Hiermee zijn de volgende combinaties mogelijk:

- 6 stoffen: 4 stoffen uit categorie 1 en 2 stoffen uit categorie 2;
- 9 stoffen: 6 stoffen uit categorie 1 en 3 stoffen uit categorie 2;
- 12 stoffen: 8 stoffen uit categorie 1 en 4 stoffen uit categorie 2.

De verwijdering wordt conform het concept EU-voorstel berekend op basis van de gemiddelde verwijdering van de beschouwde stoffen in elk 24h- of 48h-monster op basis van concentraties. Het verwijderingsrendement dient minimaal 80 % te bedragen.

#### **ANALYSES NUTRIËNTEN EN MACROPARAMETERS**

Hoewel de verwijdering van nutriënten en macroparameters geen onderzoeksdoel is voor deze pilot, kunnen nutriënten en DOC wel invloed hebben op de werking van het filter. Verwijdering van stikstof kan bijvoorbeeld een indicatie zijn voor biologische groei van (de-) nitrificerende bacteriën. Ook filtratie kan bijdragen aan de verwijdering van nutriënten wat voor sommige AWZI's een voordeel kan zijn. Daarom zijn tijdens het onderzoek DOC, totaal stikstof en totaal fosfaat meegenomen.

#### **ECOTOXICOLOGIE**

Een van de doelen van het IPMV is dat de ecotoxiciteit met 50 % afneemt. Daarom zijn effectmetingen met bioassays uitgevoerd om de invloed van het DEXfilter op de ecologische risico's van de effluentlozing van AWZI Lelystad te analyseren. Deze effectmetingen geven een indicatie van de mogelijk risico's van het hele mengsel van organische stoffen (ook afbraakproducten en onbekende stoffen) in het water. Voor de interpretatie van de resultaten van de bioassays is gebruik gemaakt van SIMONI (Slimme Integrale MONItoring). Hoewel er nog veel onzekerheden zijn over de vertaling van bioassay resultaten naar ecologische risico's, zijn deze 2 methoden gebruikt om een indicatie te geven van de mogelijke milieurisico's van organische microverontreinigingen in het AWZI effluent met conventionele zuiveringen en na het DEXfilter.

De watermonsters zijn door BDS (lab) met vaste-fase kolommen geëxtraheerd (SPE = solid phase extraction), zodat organische microverontreinigingen tot 2.000 x werden geconcentreerd. Er zijn 5 specifieke *in vitro* testen uitgevoerd:

- ERA-Calux;
- PAH-Calux;
- Microtox;
- PXR-Calux;
- Cytotox-Calus.

Deze bioassay selectie is gemaakt op basis van de concept-handreiking voor het uitvoeren van biologische effectmonitoring bij vergaande zuivering van AWZI-effluenten [11].

### PFAS

DEXSORB+ wordt ook toegepast als techniek om PFAS te verwijderen in de VS en in pilots in Nederland. Daarom is dit ook een van de onderzoeksdoelen van de DEXfilter pilot op AWZI Lelystad. Uit eerder onderzoek naar PFAS bij AWZI's is namelijk naar voren gekomen dat PFAS niet of nauwelijks worden verwijderd op de reguliere zuivering [6]. In veel gevallen is zelfs sprake van een ogenschijnlijke toename van PFAS in AWZI's. Niet geanalyseerde (onbekende) precursors in het influent worden in de AWZI omgezet naar wel geanalyseerde (bekende) precursors en stabiele PFAS met een korte ketenlengte (C4 – C8). Voor een toelichting op wat PFAS en PFAS precursors zijn en hun belang in de AWZI wordt verwezen naar STOWA rapport [6] [4].

In dit pilotonderzoek is gekeken naar de effectiviteit van aanvullende zuiveringstechnieken bij het verwijderen van PFAS en PFAS-precursors uit AWZI-effluent. Er zijn bij AWZI Lelystad ten behoeve van PFAS analyses steekmonsters genomen op 3 verschillende monsterpunten (afbeelding 3.1):

- influent van de pilotinstallatie (afloop nabezinktank);
- effluent van de 1e (DEXSORB+) kolom (filtraat 1);
- effluent van de 2e (DEXSORB) kolom (filtraat 2).

Er zijn 2 analysetechnieken ingezet om PFAS te analyseren. De Cyclopure testkits zijn wekelijks uitgevoerd, de andere analyses 2 maal gedurende het gehele onderzoek. De gehanteerde analysetechnieken zijn als volgt:

1. Cyclopure testkits waarmee tot 88 verschillende PFAS zijn getest om de verwijdering van PFAS te monitoren (rapportagegrenzen staan aangegeven in bijlage I);
2. het standaard PFAS-analysepakket: 30 verschillende stoffen (stabiele PFAS zoals de bekende stoffen PFOA en PFOA, enkele vervangers daarvan en enkele precursors).

## RESULTATEN PFAS-VERWIJDERING OP ANDERE PILOT (VOLTA STRAAT)

De PFAS-concentraties in het effluent van AWZI Lelystad bleken zodanig laag, dat ook resultaten zijn weergegeven van een ander pilotonderzoek aan de Voltastraat. Daar is DEXSORB toegepast om PFAS uit vervuild grondwater te adsorberen. De opstelling was vergelijkbaar met Lelystad met 2 in serie geschakelde kolommen met een EBCT van 10 minuten totaal en een debiet van 500 l/hr. Op deze locatie waren beide kolommen op deze locatie gevuld met DEXSORB+, omdat dat effectiever is voor de adsorptie van PFAS. De PFAS-concentraties op deze locatie zijn opgedeeld in drie fases waarbij steeds hogere PFAS-concentraties over de kolommen werd gevoed (tabel 3.3).

**TABEL 3.3 GEMETEN PFAS CONCENTRATIES VAN EEN AANTAL KORTE EN LANGE KETENS AAN DE VOLTA STRAAT OP DRIE VERSCHILLENDE MEETPUNTEN**

PFAS	Eenheid	Fase A (laag)	Fase B (medium)	Fase C (hoog)
PFOA totaal	ng/l	123	719	3100
PFOS totaal	ng/l	580	2500	5700
6:2 FTS	ng/l	247	7076	34250
PFBA	ng/l	59	419	2750
PFPeA	ng/l	178	1886	4500

### NON-TARGET SCREENING

Naast de reguliere chemische analyses waarbij de concentratie van doelstoffen is bepaald, is bij dit onderzoek ook een chemische non-target screening (NTS) toegepast. Hierbij worden geen hoeveelheden bepaald, maar meer een indicatie gegeven van de chemische stoffen die in de monsters aanwezig zijn. Met de NTS wordt specifiek naar stoffen gekeken zonder aannames vooraf te doen over welke stoffen gedetecteerd dienen te worden. Het is hiermee ideaal voor onderzoek naar omvangrijke watersamenstelling, als vangnet voor bekende stoffen, of voor het bepalen van opkomende stoffen.

### UITLOGING

Naast het meten van de effectiviteit van de verwijdering van ongewenste stoffen door DEXSORB, is ook gemeten of DEXSORB geen ongewenste stoffen aan het water toevoegt. Hiervoor wordt een uitlogingstest gedaan waarbij met een NTS wordt gemeten of DEXSORB bepaalde stoffen loslaat in water. De methode van de uitloogtest is gebaseerd op norm NEN-EN 12902 'Materialen voor de behandeling van water bestemd voor menselijke consumptie - Anorganische filterhulp- en filtermaterialen - Beproevingmethoden'.

### MICROSCOPISCHE ANALYSE

Om de aanwezigheid van biologie te onderzoeken, is er na afloop van de pilot een monster genomen van DEXSORB korrels uit kolom 1. Dit monster is geconserveerd op kamertemperatuur in een gesloten monsternamesflesje en na 2 weken geanalyseerd onder de microscoop. Dit is gedaan met een microscoop op AWZI Zeewolde, die voor slibanalyses wordt gebruikt.

## 3.4 MONSTERNAMES

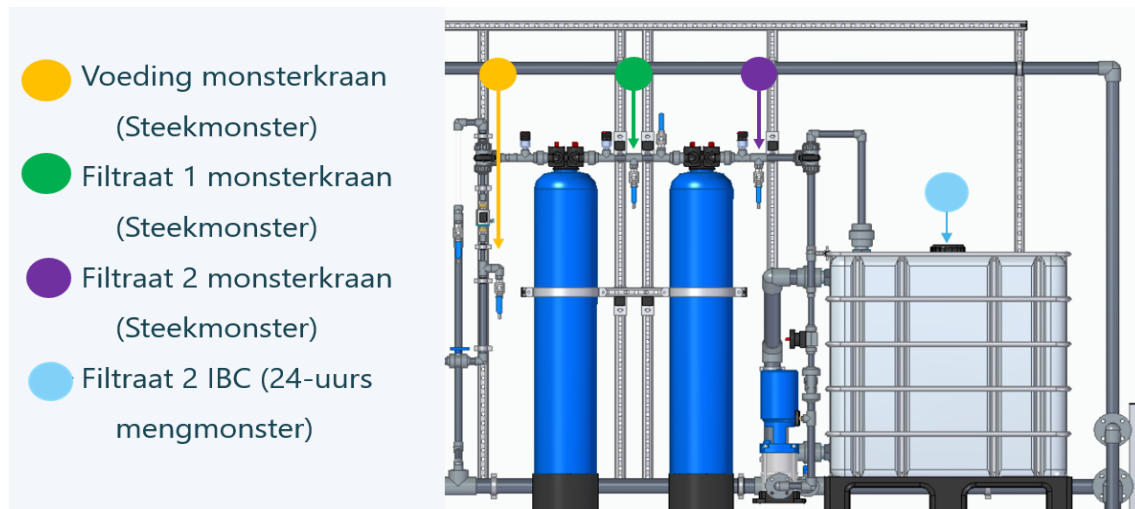
Tijdens het pilotonderzoek is gebruik gemaakt van 24-uurs mengmonsters en steekmonsters. De 24-uurs mengmonster zijn genomen bij de monsternamekast aangesloten op de effluentbuffertank. Voor de analyse van het pilot-voedingswater zijn de monsters uit de bestaande monsternamekast van het AWZI-effluent gehaald.

### INVLOED VOORFILTRATIE OP VERWIJDERINGSRENDEMENT

Uit onderzoek [12] blijkt dat de voorfiltratie met kaarsenfilters geen invloed heeft op de OMV-verwijderingsresultaten van een nageschakeld filter. De voorfiltratie is zodanig gekozen dat verwaarloosbare biologische groei en dus geen biologische verwijdering zal plaatsvinden in de voorfilters. Het gehalte OMV dat mogelijk aan onopgeloste bestanddelen achter blijft in het filter, is verwaarloosbaar [12].

Tijdens dit onderzoek is ook gebruik gemaakt van steekmonsters. Tussen de 1e en 2e kolom konden alleen steekmonsters worden genomen. Om inzicht te krijgen in de verwijdering en werking per kolom zijn er in het analyseplan hiervoor monsternames in opgenomen. Om de vergelijkbaarheid te borgen, zijn op de dagen dat filtraat 1 is meegenomen, ook steekmonsters genomen voor het voedingswater van de pilot en filtraat 2.

**AFBEELDING 3.1** MONSTERNAMEPUNTEN STEEKMONSTERS EN 24-UURS MENGMONSTER IN DE CONTAINER. HET 24 UURS-MENGMONSTER VAN DE VOEDING WORDT GENOMEN BIJ HET EFFLUENT VAN DE AWZI (BUITEN DE CONTAINER)



Naast de meng- en steekmonsters, zijn er ook monsters genomen door IMD voor de PFAS en antibioticaresistentie analyse. Hiervoor zijn mengmonsters uit het influent en het effluent van de pilot genomen.

### 3.5 TESTEN HYDRAULISCHE CONDITIES

Om te testen of de hydraulische condities van de kolommen volgens ontwerp zijn, zijn naast het analyseprogramma ook een aantal fysische testen uitgevoerd: verblijftijdstesten en zeefstesten.

#### VERBLIJFTIJDSTESTEN

De kolommen zijn ontworpen op basis van een bepaalde verblijftijd van de waterstroom in het filtermedium. De verblijftijd van één DEX-filterkolom is ontworpen op 5 minuten, wat betekent dat een 'prop' water er na 5 minuten weer uitkomt. In een geoptimaliseerd filterbed beweegt het water door de kolom als een prop, waar iedere volume ongeveer dezelfde verblijftijd heeft (propstroom). Voor een vastbedfilter is het belangrijk om een goede propstroom en geen kanaalvorming in het filter te hebben. Bij kanaalvorming passeert een deel van het water het medium, waardoor de verblijftijd korter en de verwijdering van micro's lager is.

De propstroom is getoetst door het uitvoeren van verblijftijdstesten. Deze zijn uitgevoerd met keukenzout, wat is toegevoegd aan het voedingswater vóór de kolommen. Na toevoeging van 30 gram zout is de geleidbaarheid van filtraat 1 en filtraat 2 over tijd gemeten. Hierdoor is gemeten hoelang het duurt voordat de prop met het zout in het filtraat te meten is. Zo is de verblijftijdspreiding van het zout in beide kolommen bepaald. Daarnaast is een referentiemeting ('blanco') gedaan, waarbij beide kolommen op bypass stonden met een lagere zoutconcentratie. Hiervoor is maar 1 gram zout gebruikt, zodat de piek in proportie blijft. Het debiet is bij alle testen op 500 L/h vastgesteld, wat correspondeert met de verblijftijd van 5 minuten.

### ZEEFTESTEN

Bij het selecteren van het medium in vastbedfiltratie, wordt vooraf gekeken naar de korreldiameter van het medium. Omdat de korrels niet allemaal dezelfde diameter zullen hebben, is het ook van belang om de uniformiteit van het filtermedium te bepalen. De uniformiteit van het medium is van belang voor effectieve filtratie over de gehele diepte van het filterbed. Er wordt dan namelijk optimaal gebruik gemaakt van de ruimtes tussen de korrels, waardoor het filterbed een lagere weerstand geeft dan bij een slechte uniformiteit. Voor het bepalen van de uniformiteit is er een zeeftest uitgevoerd, die de korrels in verschillende groottefracties indeelt op basis van gewicht. Vervolgens zijn deze fracties geplot op een logaritmische x-as en is de uniformity coefficient (UC) uitgerekend. De UC wordt gedefinieerd als volgt:

$UC = D_{60}/D_{10}$ , waarin:

- D60 de korreldiameter die groter is dan 60 % van het gewicht van de korrels;
- D10 de korreldiameter die groter is dan 10 % van het gewicht van de korrels.

### 3.6 VERWERKING MEETGEGEVENS

De monsternamen en berekening van verwijderingsrendementen zijn uitgevoerd zoals voorgeschreven in de handleiding STOWA 2021-15. Wanneer stoffen worden gemeten onder de rapportagegrens (detectiegrens van het lab), is een substitutiewaarde berekend op basis van de Volkert-Bakkert methode.

Bij de bepaling van verwijderingsrendementen is geen rekening gehouden met een bypass. De bypass zal later in hoofdstuk 6 meegenomen worden in de berekeningen.

## 4

# RESULTATEN PILOTONDERZOEK

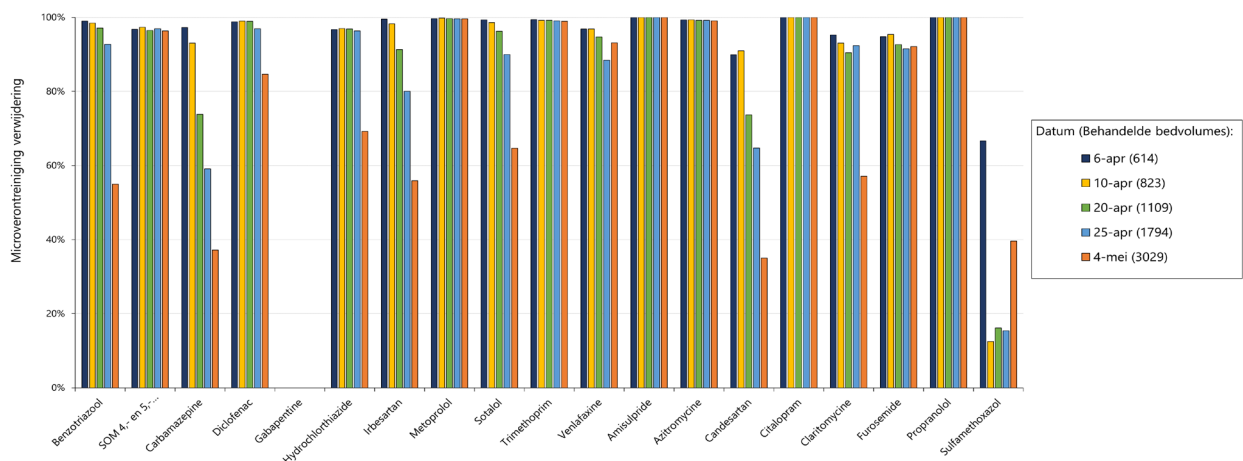
Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van het pilotonderzoek. Allereerst zijn de resultaten weergegeven van de adsorptie van microverontreinigingen (paragraaf 4.1), waarbij ook de resultaten van onderzoek naar de hydraulische condities van de filterkolommen zijn toegelicht. Vervolgens is ingegaan op de resultaten van het regeneratie-onderzoek (paragraaf 4.2). In paragraaf 4.3 zijn de resultaten voor PFAS-verwijdering weergegeven. Paragraaf 4.4 tot en met 4.7 presenteren respectievelijk de bevindingen van ecotoxicologie, non-target analyse, uitloging en de verwijdering opgeloste organische koolstof.

## 4.1 ADSORPTIE VAN MICROVERONTREINIGINGEN

Paragraaf 4.1 evalueert de adsorptie van microverontreinigingen (paragraaf 4.1.1), met een vergelijking van de pilotresultaten van het labonderzoek (paragraaf 4.1.2) en toetst het verwijderingsrendement aan de Nederlandse en Europese (beoogde) richtlijnen (paragraaf 4.1.3).

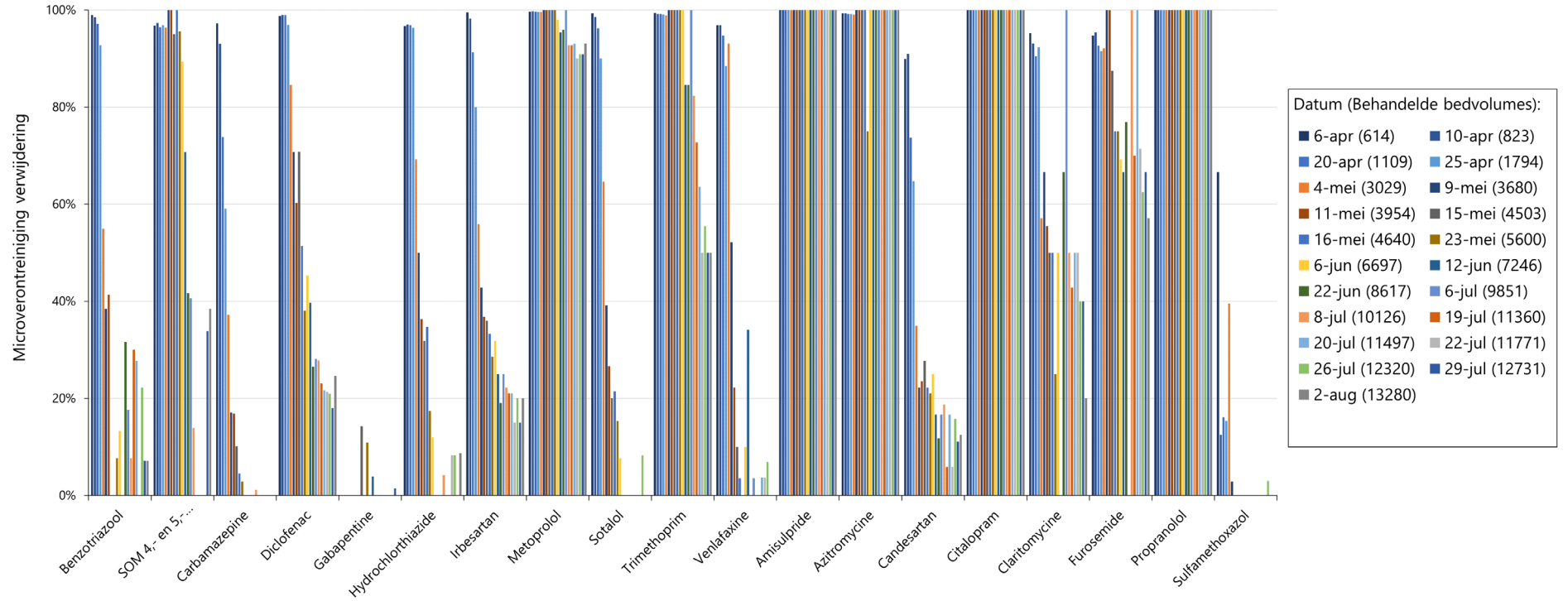
De analyse van het verwijderingsrendement van de microverontreinigingen is opgedeeld in 2 delen: de verwijdering tijdens de operationeel stabiele periode tot 4 mei (afbeelding 4.1) en de verwijdering tijdens de operationeel minder stabiele periode vanaf 4 mei (paragraaf 4.1.1).

AFBEELDING 4.1 VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN (GIDS- EN MONITORINGSSTOFFEN) TIJDENS OPERATIONEEL STABIELE PERIODE



Tijdens de stabiele periode zijn hoge verwijderingsrendementen behaald van gemiddeld meer dan 90 % over de verschillende gids- en monitoringsstoffen. De resultaten in deze periode sluiten goed aan bij de bevindingen uit het labonderzoek van de haalbaarheidsstudie uit 2021 waarin dezelfde stoffen goed of zelfs minder goed werden verwijderd (paragraaf 4.1.2). Na 4 mei nam het verwijderingsrendement zichtbaar af (afbeelding 4.2). Na 4.000 bedvolumes was de vooraf vastgestelde maatgevende standtijd (tot 7 van de 11 gidsstoffen verwijdering <70 %) bereikt. Het bereiken van de standtijd bleek sneller te verlopen dan op basis van referentieprojecten van Cyclopure in de VS en de laboratoriumtesten in de haalbaarheidsstudie was verwacht.

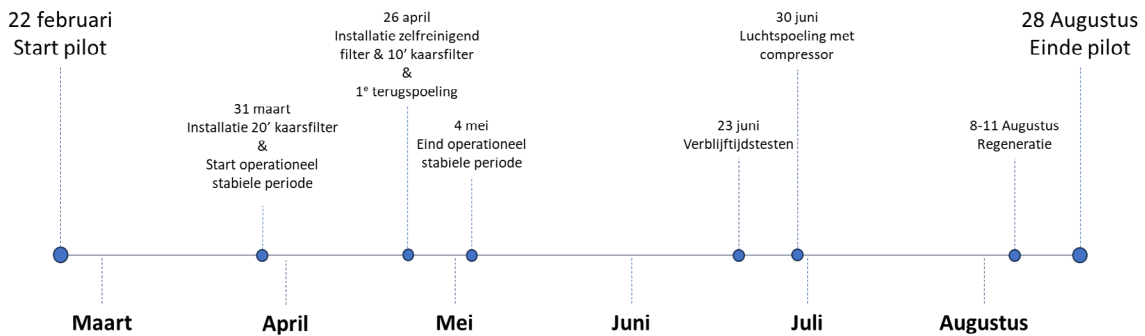
**AFBEELDING 4.2 VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN (GIDS- EN MONITORINGSSTOFFEN) TIJDENS OPERATIONEEL STABIELE PERIODE. DE 1E 4 DATA (BLAUW) ZIJN DEEL VAN DE OPERATIONEEL STABIELE PERIODE, VANAF 4 MEI (ORANJE) OBSERVEREN WE EEN DALING IN VERWIJDERING VAN EEN AANTAL MICROVERONTREINIGINGEN. DE VERWIJDERINGSRENDERMENT TOT DE REGENERATIE ZIJN WEERGEGEVEN. DE RESULTATEN NA REGENERATIE ZIJN WEERGEGEVEN IN PARAGRAAF 4.2. DE COMPLETE RESULTATEN ZIJN WEERGEGEVEN IN BIJLAGE II**





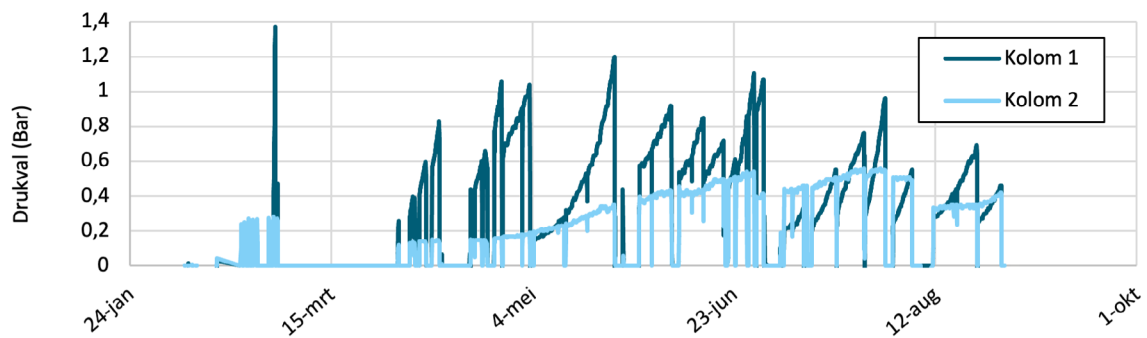
De afname in verwijderingsrendement begin mei viel samen met uitdagingen met terugspoelen van de 1e kolom (afbeelding 4.4). Eind april is de voorfiltratie uitgebreid met een zelfreinigend filter en kaarsenfilters (paragraaf 2.3.1). Doordat de zakkenfilters te snel verstopte, hebben de kolommen in de opstart- en optimalisatiefase meerdere keren stil gestaan. In deze fase is naar verwachting relatief veel vervuiling in voornamelijk de 1e kolom terecht gekomen. Na 3 weken is hierdoor de drukval opgelopen tot > 1,7 bar. Daarom is besloten om de 1e kolom terug te spoelen (26 april 2023). Tijdens deze terugspoeling was het filterbed gecompacteerd en verkleefd. Dat maakte het moeilijk tot onmogelijk het filterbed op te breken en deeltjes uit te spoelen. Zodoende spoelde kleinere deeltjes DEXSORB uit, doordat deze omhoog geduwd werden door het gecompacteerd filterbed. Om overmatige uitspoeling van DEXSORB te voorkomen, is de terugspoelsnelheid verlaagd, met een slechtere terugspoeling als gevolg.

AFBEELDING 4.3 TIJDLIJN MET BELANGRIJKSTE GEBEURTENISSEN GEDURENDE DE PILOT



Na herhaaldelijke, langere terugspoelingen - met een lage terugspoelsnelheid - leek de drukval wel te herstellen naar de schoonwaterweerstand (3 mei 2023). Na deze terugspoelingen nam het verwijderingsrendement echter af met ruim 10 % (afbeelding 4.2). Dit patroon heeft zich herhaald bij de volgende terugspoelingen van de 1e kolom, waarbij vies terugspoelwater uit de kolom bleef spoelen. Dit is het einde van de operationeel stabiele periode. De terugspoelingen waren niet altijd succesvol; dat wil zeggen: de drukval is niet altijd volledig hersteld (afbeelding 4.4).

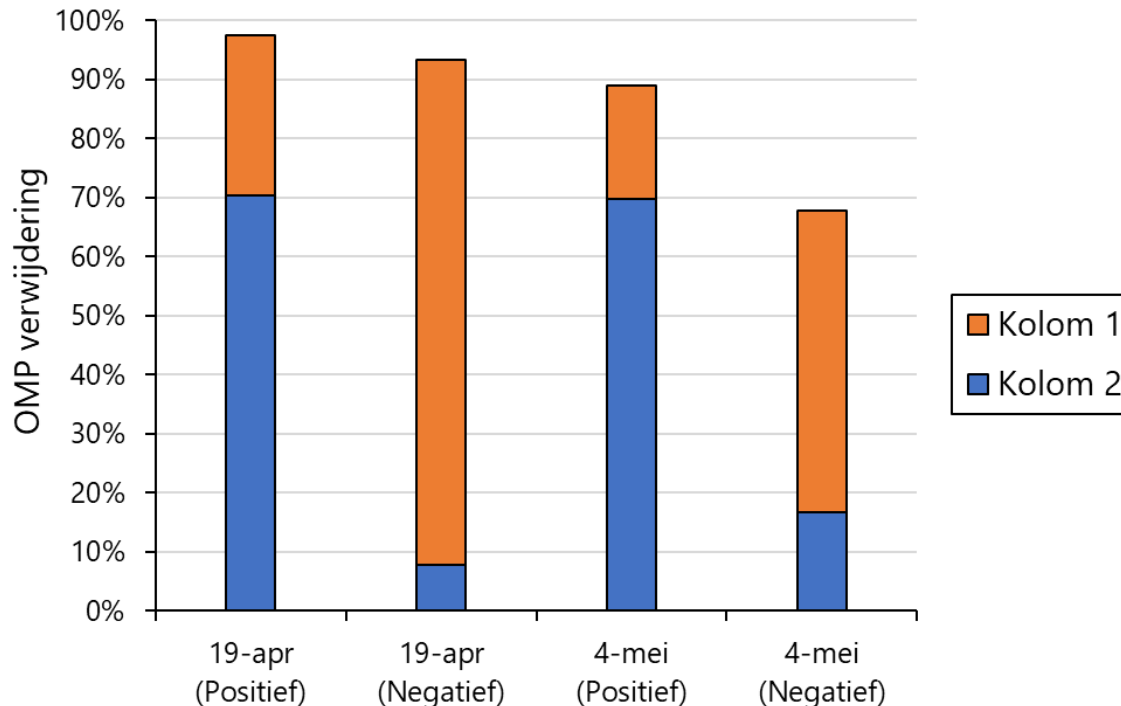
AFBEELDING 4.4 DRUKVAL OVER DE PILOTPERIODE. HIER IS DE Y-AS DE DRUKVAL (BAR), DE BLAUWE LIJN DE 1E KOLON EN DE LICHT BLAUWE LIJN DE 2E KOLON. WAAR DE DRUKVAL NAAR BENEDEN SCHIET, IS EEN TERUGSPOELING UITGEVOERD. DIT IS VOORNAMELIJK IN KOLON 1 GEBEURD



Afbeelding 4.4 maakt goed zichtbaar dat de drukopbouw voornamelijk in kolom 1 plaatsvond. De drukval van kolom 2 steeg slechts geleidelijk. De 1e kolom fungeerde als ware een zwevende stof verwijderend filter. In dit kader is de verwijderingsprestatie per kolom onderzocht (met steekmonsteranalyses; afbeelding 4.5). Zoals uitgelegd in paragraaf 2.1.1, bevat de 1e kolom DEXSORB+ en de 2e kolom DEXSORB. DEXSORB+ verwijderd

negatief geladen stoffen zoals Diclofenax en Irbesartan beter, terwijl DEXSORB de positief geladen stoffen zoals Metoprolol, Sotalol, Venlafaxine en Trimethoprim goed verwijdert. Het zwitterion Gabapentine wordt door beide kolommen nauwelijks verwijderd. Dat is in lijn met het labonderzoek uit de haalbaarheidsstudie.

**AFBEELDING 4.5 VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN (GIDS- EN MONITORINGSSTOFFEN) TIJDENS (19 APRIL) AAN HET EINDE VAN DE OPERATIONEEL STABIELE PERIODE (4 MEI) VOOR NEGATIEVE EN POSITIEF GELADEN MICROVERONTREINIGINGEN**



Afbeelding 4.5 laat zien dat de verwijdering van kolom 2 stabiel is voor de verwijdering van positief geladen microverontreinigingen tijdens en na de stabiele periode, 70 % verwijdering. Voor negatief geladen microverontreinigingen is zelfs een kleine toename in verwijdering door kolom 2 zichtbaar. De verwijdering door kolom 1 is daarentegen sterk afgenomen na de stabiele periode (vanaf 4 mei 2023). Voor negatief geladen microverontreinigingen daalt de verwijdering van 86 % naar 51 %. En voor positief geladen microverontreinigingen is dit een daling van 27 % naar 19 %. De terugloop in verwijderingsrendement vond dus voornamelijk in de 1e kolom plaats.

Deze observaties hebben tot de hypothese geleid dat de pilotkolommen suboptimale hydraulische condities vertoonden die het adsorptiegedrag van de DEXSORB-kolommen negatief beïnvloedden. Het vermoeden is dat mogelijk kanaalvorming in het filterbed is ontstaan. Bij kanaalvorming vindt water een snellere weg langs het filtermateriaal (door een kanaal) waardoor de contacttijd, en dus adsorptie van micro's afneemt.

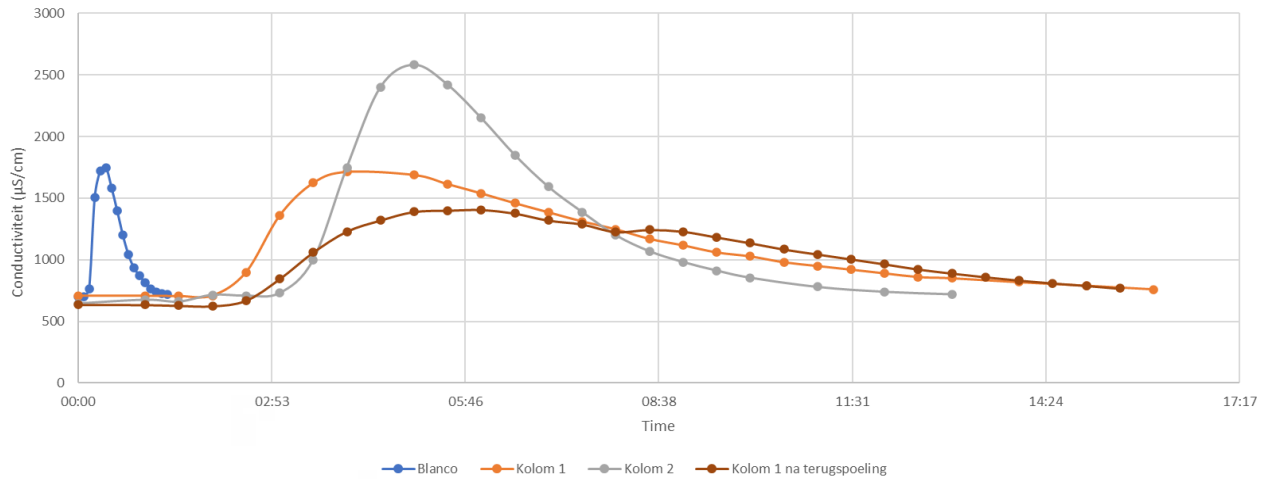
#### 4.1.1 EFFECT VAN SUBOPTIMALE HYDRAULISCHE CONDITIES OP DE ADSORPTIECAPACITEIT

Ter bevestiging van het optreden van kanaalvorming zijn verblijftijdtesten uitgevoerd. Om de oorzaak van uitspoeling van kleine DEXSORB-korrels te onderzoeken bij lage terugspoel-snelheden is onderzoek gedaan naar de korrelgrootteverdeling met zeefstenen. Met schudproeven met gebruikt DEXSORB is de resterende adsorptiecapaciteit van gebruikt DEXSORB onderzocht. De oorzaak van verkleving van het filterbed is onderzocht met microscopische analyses naar biomassagroeï in het filterbed.

### ONDERZOEK MET VERBLIJFTIJDSTESTEN NAAR KANAALVORMING

De resultaten van de verblijftijdstesten geven bij beide kolommen een sterke indicatie voor kanaalvorming (afbeelding 4.6). De verblijftijd van zout - de EBCT - in het filterbed zou volgens ontwerp 6 minuten moet zijn (tabel 2.2), wat betekent dat er rond minuut 6 een scherpe piek in de grafiek wordt verwacht.

AFBEELDING 4.6 VERBLIJFTIJDSTESTEN VAN BEIDE KOLommen



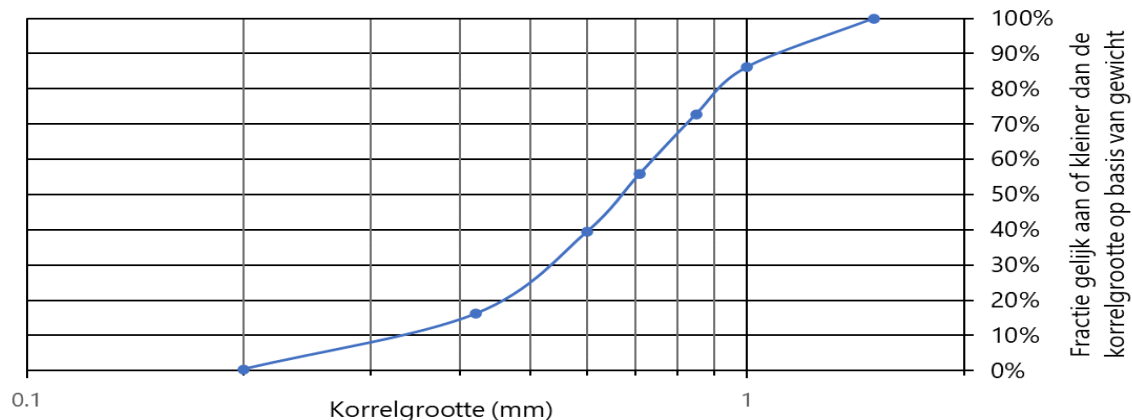
Bij beide kolommen wordt zout gemeten ruim voor de verwachte EBCT van 6 minuten, wat komt door kanaalvorming. De verblijftijdstest in kolom 2 geeft een scherpere - en latere (op circa 4,5 minuut) - piek wat betekent dat het zout gelijkmatiger uit de kolom komt en dus een betere propstroom wordt gevormd met betere turbulentie. De piek van kolom 1 is meer uitgesmeerd en begint veel eerder (al na 2,5 minuut), wat betekent dat in kolom 1 de meeste kanaalvorming en de slechtste propstroom wordt geobserveerd. Bovendien wordt de kanaalvorming niet verholpen na een terugspoeling. De uitgesmeerde piek van zout die door kolom 1 komt, duidt op een grootte spreiding in de stroomsnelheid in de kolom. Naast kanaalvorming (snelle stroomsnelheid), kan dat betekenen dat laminaire stroming - zoals dicht bij de wanden - of dode zones in de kolom optreden. Hier is de stroomsnelheid nagenoeg nihil.

De kanaalvorming en het slechte stromingsprofiel door de kolom hebben een nadelig effect op het verwijderingsrendement. Het verband tussen de EBCT en het verwijderingsrendement en de looptijd van een adsorptiefilter is exponentieel [13]. De laminaire stroming of lagere turbulentie kan eveneens een nadelig effect hebben op de adsorptieprestatie, doordat de diffusie van stoffen in de bulk (van het water) naar en door de filmlaag van de adsorbens verlangzaamt. Een hogere turbulentie - zoals bij een perfecte propstroom - zorgt voor een snellere diffusie. Dit effect is niet gekwantificeerd.

### ONDERZOEK MET ZEEFTSTEN NAAR BEDSTRATIFICATIE

Teneinde stratificatie in het filterbed te onderzoeken, is onderzoek uitgevoerd naar de korrelgrootteverdeling. Na het plotten van de verschillende groottefracties (afbeelding 4.7) is de uniformiteitscoëfficiënt bepaald van DEXSORB-korrels in kolom 1. De korrelgroottevariatie van DEXSORB in kolom 1 is 0,2 mm tot 1,5 mm. De uniformiteitscoëfficiënt (UC) van de DEXSORB korrels in kolom 1 is 2,2.

AFBEELDING 4.7 KORRELGROOTTEVERDELING VAN KOLOM 1 OP BASIS VAN GEWICHTSFRACTIES

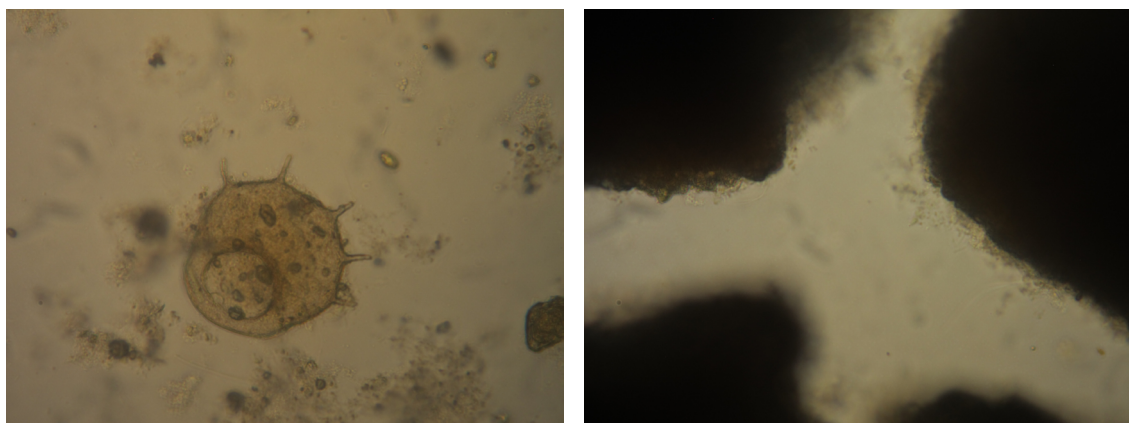


Standaard UC waarden voor typische mono medium filterbedden variëren van 1,1-1,8 [8]. Daarnaast is voor ionenwisselingsharsen de UC maximaal 1,6 [14]. Het DEXSORB uit kolom 1 heeft een hogere UC, wat betekent dat de uniformiteit slechter is. Een slechte uniformiteit kan leiden tot stratificatie van het filterbed tijdens het terugspoelen, waardoor fijne deeltjes kunnen uitspoelen. De terugspoelsnelheid moet hoog genoeg zijn om de zwaardere deeltjes te fluïdiseren, maar kan te hoog zijn voor de fijne deeltjes bovenin. Bovendien kan een te groot verschil in korrelgrootte tussen de fijne korrels bovenin en de zware deeltjes onderin leiden tot snellere drukopbouw bovenin het filterbed. Hierdoor moet het filter vaker worden teruggespoeld dan nodig zou zijn bij een uniform bed. Overigens is enige vorm van stratificatie in een adsorptiefilter gewenst ( $UC < 1,8$ ), zodat na elke terugspoeling de korrels in ongeveer dezelfde volgorde terugzakken. Zo wordt de massatransferzone van adsorptie in het filterbed zo goed mogelijk behouden.

#### ONDERZOEK MET MICROSCOPISCHE ANALYSE NAAR BIOMASSAGROEI OP DE KORRELS

Naar aanleiding van verkleefing van het filterbed, zijn na afronding van de pilot de DEXSORB-korrels onder een microscoop onderzocht voor biomassagroei. De DEXSORB-korrels zijn na afronding van de pilot 2 weken op kamertemperatuur in een gesloten monsternamefles bewaard. De resultaten van dit onderzoek zijn weergegeven in afbeelding 4.8. Uit de analyse blijkt dat biologische groei op de korrels in het filter heeft plaatsgevonden, wat kan zorgen voor verkleefing in het filter. De linker foto laat een amoëbe zien die onder anaerobe condities leeft en bacteriën eet. De rechter foto is gemaakt na vijfvoudige spoeling met demiwater. Hier lijkt de rand van de korrel te bestaan uit biologie. De hechting van biomassa heeft mogelijk kunnen plaatsvinden door de aanwezigheid van micro-organismen in het effluent die door de voorfiltratie zijn 'gedrukt'. Daarnaast is het mogelijk dat de adsorptie van biodegradeerbare OMV's de hechting van micro-organismen op de DEXSORB korrels heeft gefaciliteerd. De suboptimale terugspoelingen hebben onvoldoende biomassa verwijderd. Dit heeft na continue bedrijven mogelijk gezorgd voor een 'neerwaartse spiraal' die tot versnelde biomassaopbouw heeft geleid. Met een goed terugspoelregime met luchtspoelingen zou de biomassagroei en verkleefing beheersbaar moeten zijn.

**AFBEELDING 4.8 MICROSCOPISCHE ANALYSE MET LINKS) MICRO-ORGANISME IN HET WATER EN RECHTS) BIOLOGISCHE ACTIVITEIT RONDOM DE KORRELS (VERGROTING 40X)**



#### DEELCONCLUSIE EFFECTEN HYDRAULISCHE CONDITIES OP ADSORPTIE

De onderzoeken met verblijftijdtesten, zeeftesten, schudproeven en de microscopische analyse hebben bevestigd dat het filterbed overmatig is verkleefd en is gestratificeerd, met kanaalvorming en uitspoeling van DEXSORB-korrels tot gevolg. Hierdoor is niet de ontworpen EBCT gehaald, met een lager verwijderingsrendement als resultaat. Hydraulische optimalisatie van de 1e kolom - en in mindere mate de 2e kolom - in combinatie met een effectief terugspoelregime is nodig om kanaalvorming te voorkomen, de ontwerp-EBCT te behalen en zodoende de volledige adsorptiecapaciteit van DEXSORB te benutten. Deze optimalisaties zijn in hoofdstuk 5 uitgewerkt.

#### 4.1.2 VERGELIJKING PILOTRESULTATEN MET LABONDERZOEK

Tabel 4.1 maakt een vergelijking van het verwijderingsrendement van DEXSORB in de pilot versus het labonderzoek in de haalbaarheidsstudie. De tabel geeft voor alle gids- en monitoringsstoffen aan hoe lang deze worden verwijderd door het DEXfilter tot boven de 70 % (over beide kolommen) in de pilot. Daarnaast toont de tabel de stoffeigenschaften (dalton, log KoW en lading) en het behaalde verwijderingsrendement in het labonderzoek bij een dosering van 400 mg DEXSORB per liter na 48 uur adsorptie.

**TABEL 4.1 VERWIJDERINGSRENDEMENT DEXSORB. BIJ DEXSORB WORDEN IN DE 1E MAAND 2.250 BEDVOLUMES (BV) BEHANDELD, 2MND=5.900 BEDVOLUMES, 3MND = 9.500 BV, 4MND >13.700 BV**

Stof	Dalton	Log KoW (P)	Lading	Verwijdering tijdens pilot (>70%)	Verwijdering labonderzoek (400 mg DEXSORB/L, 48 u)
som 4,- en 5,-methylbenzotriazole	133	1,7	neutraal	t/m 2 maanden	66 %
amisulpride	370	1,5	positief	t/m 4 maanden	99 %
azitromycine	749	4,0	positief	t/m 4 maanden	96 %
benzotriazool	119	1,4	neutraal	1 <sup>e</sup> maand	66 %
candesartan	441	4,8	negatief	1 <sup>e</sup> maand	98 %
carbamazepine	236	2,5	neutraal	1 <sup>e</sup> maand	66 %
citalopram	324	3,8	positief	t/m 4 maanden	99 %
clarithromycine	748	3,2	positief	1 <sup>e</sup> maand	97 %
diclofenac	296	4,4	negatief	1 <sup>e</sup> maand	96 %
furosemide	331	2,0	negatief	t/m 3 maanden	97 %
gabapentine	171	-1,1	zwitterion	niet	1 %
hydrochloorthiazide	298	-0,1	neutraal	1 <sup>e</sup> maand	79 %
irbesartan	429	5,3	negatief	1 <sup>e</sup> maand	96 %
metoprolol	267	1,7	neutraal	t/m 4 maanden	99 %

Stof	Dalton	Log KoW (P)	Lading	Verwijdering tijdens pilot (>70%)	Verwijdering labonderzoek (400 mg DEXSORB/l, 48 u)
propranolol	259	3,5	positief	t/m 4 maanden	100 %
sotalol	272	0,2	positief	1 <sup>e</sup> maand	69 %
sulfamethoxazol	253	0,9	neutraal	niet	16 %
trimethoprim	290	0,9	positief	t/m 3 maanden	niet gemeten
venlafaxine	277	3,2	positief	1 <sup>e</sup> maand	83 %

De positief geladen stoffen worden in de pilot grotendeels (5/8) goed verwijderd. Het rendement neemt voor Clarithromycine en Sotalol na 1 maand (en 2.250 bedvolumes) af tot onder de 70 %. Dit komt voor Sotalol overeen met het lage rendement in het labonderzoek (69 %). Het Zwitterion Gabapentine wordt zowel in de pilot als in de labstudie niet goed verwijderd. Deze stof staat bekend als slecht adsorbeerbaar en wordt ook met actiefkool lastig verwijderd.

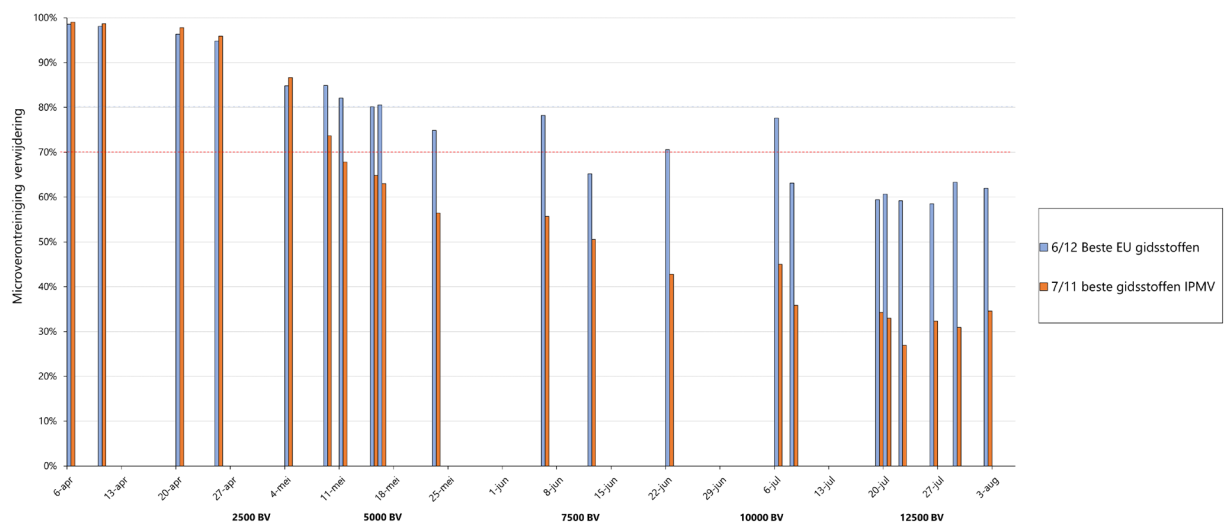
Bij de neutraal geladen stoffen zijn de resultaten wisselend. Stoffen als Benzotriazool, Carbamazepine en Hydrochloorthiaziazide worden in de pilot initieel goed verwijderd door de 2e kolom, maar na 1 maand neemt dit af. Dit is in lijn met de het labonderzoek, waar deze stoffen met relatief lage rendementen geadsorbeerd worden (< 80 %). Metoprolol wordt, in lijn met het labonderzoek, goed verwijderd in de pilot (2e kolom). Sulfamethoxazol wordt in de pilot nauwelijks verwijderd net zoals in het labonderzoek.

De negatief geladen stoffen werden initieel goed verwijderd door de 1e kolom (DEXSORB+), maar het verwijderingsrendement neemt na de 1e maand af. Deze kolom zal hydraulisch verder geoptimaliseerd moeten worden om deze verwijdering vol te houden en de standtijd te verlengen (paragraaf 4.1.1).

#### 4.1.3 TOETSING AAN IPMV- EN EUROPESE RICHTLIJNEN

In afbeelding 4.9 zijn de verwijderingsrendementen voor het DEXfilter weergegeven op basis van de rekenregels van de concept EU gidsstoffen (Richtlijn stedelijk afvalwater) en Nederlandse gidsstoffen (IPMV).

AFBEELDING 4.9 VERGELIJKING EU-RICHTLIJN MET IPMV-RICHTLIJN VAN HET VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN MICROVERONTREINIGINGEN



In deze grafiek zie je dat de 6/12 EU-gidsstoffen een hoger verwijderingsrendement behalen dan de 7/11 gidsstoffen van het IPMV. Het eindresultaat is echter vergelijkbaar: Het DEXfilter

behaald een hoger verwijderingsrendement voor de EU-richtlijn, maar daar is ook een hoger minimaal verwijderingsrendement nodig (80 % in plaats van 70 %). Hierdoor kunnen, op basis van de resultaten van het pilotonderzoek, in beiden gevallen ongeveer 4.000 bedvolumes worden behandeld tot regeneratie (tot ongeveer 11 mei).

Wanneer dit verwijderingsrendement (gemiddelde tot 11 mei) wordt ingevoerd in de STOWA webtool met een verwijderingsrendement van de biologische zuivering van 25-35 %, wordt een verwijderingsrendement voor de EU-gidsstoffen van 75-85 % gehaald tot 4.000 bedvolumes. Dit verwijderingsrendement wordt mogelijk langer behaald wanneer de optimalisaties zijn doorgevoerd. Tabel 4.2 geeft een vergelijking van de verwijderingsrendementen van het DEXfilter met de meest gangbare microverwijderingstechnieken: ozonisatie, PACAS en GAK.

**TABEL 4.2 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN, BEREKEND VOLGENS DE VOORGESTELDE REKENREGELS VAN DE NIEUWE EUROPESE RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER IN VERGELIJKING MET DE NEDERLANDSE SYSTEMATIEK CONFORM DE BIJDRAGEREGELING EN HET IPMV VANUIT HET MINISTERIE VAN IENW VOOR DE 7 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN**

	Ozonisatie	PACAS	Granulair Actief Kool (GAK)	DEXfilter
Instelling	0,7 g O <sub>3</sub> /g DOC	15-20 mg PAK/l	EBCT (verblijftijd): 30 min; standtijd 6 maanden	EBCT (verblijftijd): 10 min; standtijd 1,4 maanden*
nageschakeld verwijderingsrendement (%)	80-90 %	nvt	80-90 %	80-95 %
overall verwijderingsrendement (%) volgens rekenregels concept EU Richtlijn Stedelijk Afvalwater dd 26/10/2022 (6 van de 12 onderverdeeld in categorieën)	75-85 %	70-80 %	75-85 %	75-85 %
gekozen gidsstoffen EU (6 van de 12; verhouding van 2:1 voor aantal stoffen uit categorie 1 ten opzichte van aantal stoffen uit categorie 2)	benzotriazol, carbamazepine diclofenac, citalopram, - keuze tussen metoprolol of venlafaxine - keuze tussen irbesartan of som 4,5-methyl benzotriazol	benzotriazol, som 4,5-methyl benzotriazol, hydrochloor-thiazide, metoprolol; venlafaxine citalopram	benzotriazol, som 4,5-methyl benzotriazol, hydrochloor-thiazide, metoprolol; venlafaxine citalopram	categorie 1: metoprolol, citalopram, amisulpride en clarithromycine. categorie 2: som 4- en 5- methyl-1h-benzotriazol en irbesartan.
overall verwijderingsrendement (%) volgens rekenregels bijdrageregeling Ministerie IenW en IPMV (7 van de 11)	80-85 %	70-80 %	80-85 %	70-80 %
gekozen gidsstoffen NL (7 van de 11)	carbamazepine, diclofenac, hydrochloor-thiazide, sotalol, metoprolol, trimethoprim, venlafaxine	benzotriazole, som 4,5-methyl benzotriazol, hydrochloor-thiazide, sotalol, metoprolol, trimethoprim, venlafaxine	benzotriazole, som 4,5-methyl benzotriazol, hydrochloor-thiazide, sotalol, metoprolol, trimethoprim, venlafaxine	benzotriazole, som 4,- en 5,-methylbenzotriazole, diclofenac, hydrochloor-thiazide, metoprolol, trimethoprim en venlafaxine.

\* Deze standtijd is gebaseerd op het pilotonderzoek waarvan bewezen is dat tot deze standtijd (4.000 bedvolumes) in ieder geval aan de eisen kan worden voldaan (worst-case). Wanneer de optimalisaties worden toegepast, kan deze standtijd significant verlengd worden.

## 4.2 RESULTATEN REGENERATIE-ONDERZOEK

Aan het einde van het pilotonderzoek is een regeneratie van het verzadigde DEXSORB uitgevoerd met een zout-ethanoloplossing (paragraaf 2.3.3). De regeneratie leverde echter een aantal operationele uitdagingen op. Het regeneratiedebiet moest volgens protocol op 200 l/h worden uitgevoerd. In het pilotonderzoek spoelde veel DEXSORB uit tijdens het terugspoelen met de ethanoloplossing, waardoor niet op het volledige debiet kon worden geregenereerd (afbeelding 4.9). Dit had 2 gevolgen: 1) het filterbed werd onvoldoende gefluidiseerd door de lage terugspoelsnelheid en 2) is het niet mogelijk gebleken om binnen de planning meer dan een 20 % van de beoogde regeneratie-oplossing door de filterkolom te spoelen. Door operationele uitdagingen met het regeneratieskid is in het kader van de planning enkel 1 kolom

geregenereerd, namelijk kolom 2. Uit onderzoek bleek dat deze kolom een beter stromingsprofiel heeft dan de 1e kolom, waardoor een hogere vracht aan microverontreinigingen is afgevangen door deze kolom.

De uitspoeling had waarschijnlijk als oorzaak het pulserende karakter van de ATEX-pomp in de regeneratie-opstelling. Er is een duidelijk verschil in puls tussen persslag en zuigslag te zien. Er wordt 50 % van de tijd op een 2 keer zo hoog debiet gedraaid waardoor er 50 % van de tijd hoger wordt gedraaid dan hydraulisch haalbaar is, met uitspoeling tot gevolg. Daarnaast is het mogelijk dat het filterbed niet goed fluïdiseert door enige verkleefing van het filterbed (door onopgeloste stoffen of biologische groei), die niet met een luchtwaterspoeling is verholpen. De regeneratie vond immers plaats tegen het einde van het pilotonderzoek.

**AFBEELDING 4.10 HET UITGESPOELDE DEXSORB TIJDENS REGENERATIE WERD AFGEVANGEN IN EEN ZAK ZODAT DIT LATER WEER AAN HET FILTER KON WORDEN TOEGEVOEGD**



Tabel 4.3 (op de volgende pagina) vat de resultaten van de regeneratie van de 2<sup>de</sup> (negatief geladen) kolom weer. Voor de analyse van de regeneratie zijn de vrachten microverontreinigingen die door de kolom zijn verwijderd en in de regeneratie zijn geadsorbeerd berekend. De geadsorbeerde vracht is een zo goed mogelijke benadering, en kent een onnauwkeurigheidsmarge. Daarom is de regeneratie-efficiëntie afgerond op vijftallen (om geen schijnnaauwkeurigheid te bieden). De regeneratieresultaten zijn wisselend. Sommige microverontreinigingen worden volledig geadsorbeerd in de regeneratieoplossing. Dit zijn enkel negatief en neutraal geladen stoffen. De positief geladen stoffen worden niet of nauwelijks geadsorbeerd in de regeneratieoplossing. Dit is opvallend, omdat deze wel in een hoge mate zijn geadsorbeerd en dus uit de waterfase zijn verwijderd. Gezien de 2<sup>de</sup> kolom negatief geladen DEXSORB bevat, laten de positieve microverontreinigingen mogelijk minder gemakkelijk los. Zoals beschreven kon de regeneratie niet volledig volgens de beoogde opzet verlopen en is uiteindelijk ongeveer 1/5<sup>e</sup> van een volledige regeneratie uitgevoerd. Naar verwachting komen bij een optimale regeneratie ook de positief geladen microverontreinigingen makkelijker los.

Na de regeneratie is een toename waarneembaar in het verwijderingsrendement van de meeste microverontreinigingen. Dit zijn voornamelijk de stoffen die tijdens de regeneratie redelijk tot goed zijn geadsorbeerd (tabel 4.3). Dit sluit aan bij de verwachting: wanneer meer geadsorbeerd wordt tijdens de regeneraties, is het verwijderingsrendement na regeneratie verhoogd ten opzichte van voor de regeneratie.

De resultaten in verwijderingsrendement na regeneratie zijn weergegeven in bijlage IV.



**TABEL 4.3 UITKOMSTEN REGENERATIE: VERWIJDERDE VRACHT, GEREGENEREEDE VRACHT, REGENERATIE RENDEMENT EN VERSCHIL IN VERWIJDERINGSRENDEMENT VOOR EN NA DE REGENERATIE. HET VERWIJDERINGSRENDEMENT VOOR EN NA DE REGENERATIE ZIJN BEREKEND OP BASIS VAN DEZELFDE DRAAIPIERODE (2 WEKEN)**

Stof	Lading	Vracht verwijderde micro's voor regeneratie (mg)	Vracht gemeten micro's in ethanol tijdens regeneratie (mg)	Regeneratie rendement (%)	Verwijderings-rendement voor regeneratie (%)	Verwijderings-rendement na regeneratie (%)	Vershil in verwijderings-rendement voor en na regeneratie (%)
som 4,- en 5,-methylbenzotriazole		283	326	± 100	14	68	+54
amisulpride	+	207	15	± 5 - 10	100	100	0
azitromycine	+	405	0	0	100	100	0
benzotriazool		302	281	± 90	19	59	+40
candesartan	-	1	3	± 100	12	20	+8
carbamazepine		166	118	± 70	0	48	+48
citalopram	+	204	8	± 5	100	100	0
clarithromycine	+	40	18	± 40 - 50	39	100	+61
diclofenac	-	100	145	± 100	22	65	+44
furosemide	-	291	75	± 25	71	90	+19
gabapentine	z	0	0	n.v.t.	0	0	0
hydrochloorthiazide		564	429	± 75 - 80	3	48	+45
irbesartan	-	344	396	± 100	19	60	+41
metoprolol		1300	112	± 10	92	82	-10
propranolol	+	45	0	± 0	100	100	0
sotalol	+	460	70	± 15	2	21	+19
sulfamethoxazol		17	15	± 90	1	8	+7
trimethoprim	+	443	79	± 15 - 20	58	51	-7
venlafaxine	+	336	32	± 10	2	30	+27

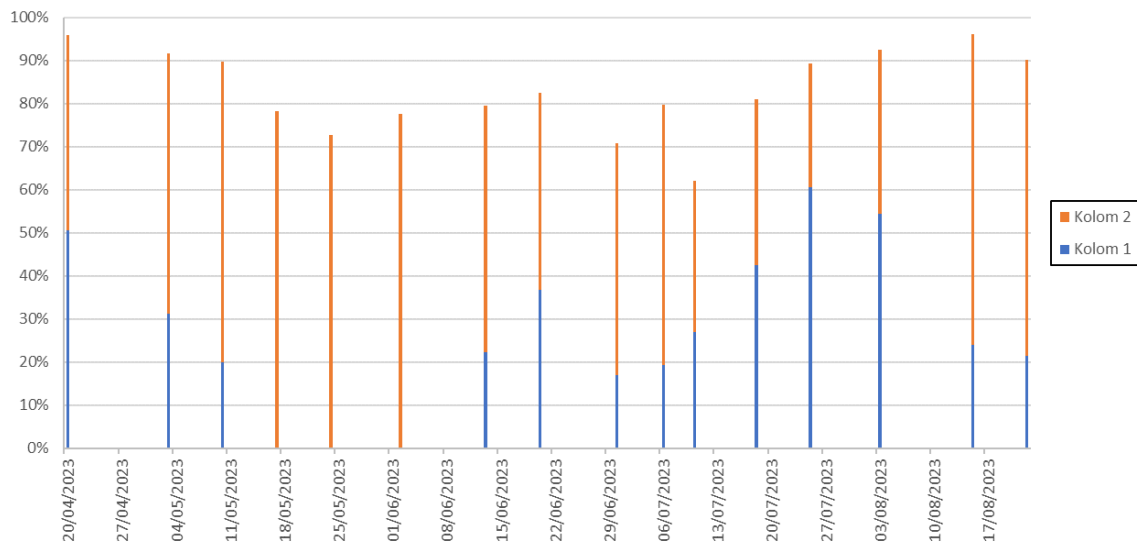
### 4.3 PFAS-VERWIJDERING

Tijdens het pilotonderzoek zijn zowel PFAS-metingen uitgevoerd met Cyclopure testkits als door het lab (paragraaf 4.3.1). Echter waren de resultaten voor een groot deel van de PFAS onder de rapportagegrens. Om deze reden zijn ook resultaten van een pilotonderzoek met DEXSORB aan de Voltastraat beschreven (paragraaf 4.3.2).

#### 4.3.1 RESULTATEN VAN CYCLOPURE TEST-KITS

Gedurende de pilot is nagenoeg elke week een PFAS-testkitmetingen gedaan van voeding, filtraat 1 en filtraat 2. Deze testkits zijn geanalyseerd door Cyclopure in de VS. Van de 83 PFAS-verbindingen die in de PFAS-testkits zijn geanalyseerd, zijn 18 PFAS-verbindingen gedetecteerd. De overige PFAS-verbindingen zijn onder de detectielimiet gemeten. De concentraties van de gemeten stoffen zijn bij elkaar opgeteld om een algemeen beeld van de PFAS-verwijdering te geven (afbeelding 4.11). De volledige resultaten zijn weergegeven in bijlage III.

AFBEELDING 4.11 TOTALE PFAS-VERWIJDERING VAN BEIDE KOLOMMEN



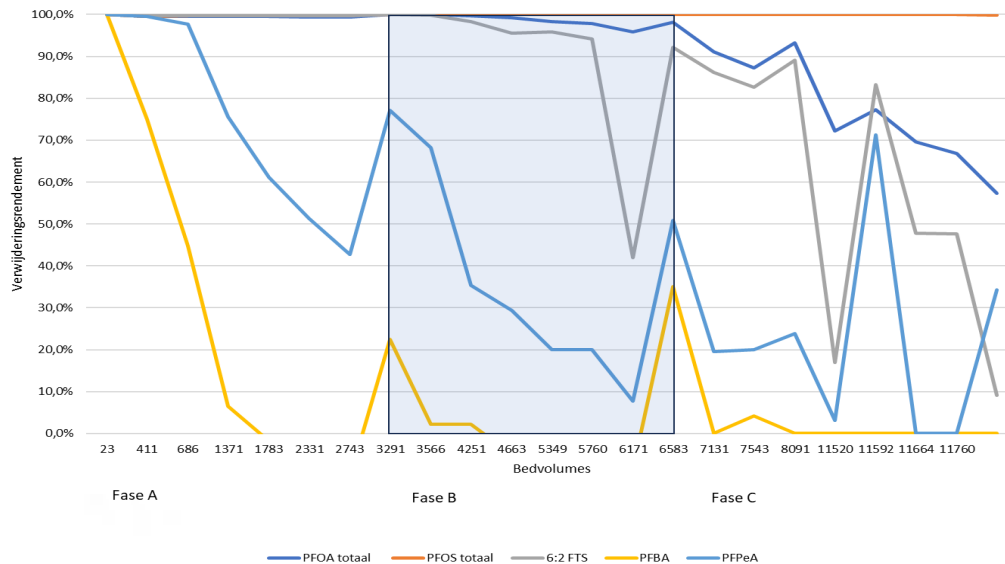
Kolom 1 verwijdert negatiefgeladen PFAS en zou op basis van bevindingen uit andere projecten een hoge verwijdering in PFAS moeten laten zien (paragraaf 4.3.2). In de grafiek is echter te zien dat de PFAS-verwijdering van kolom 1 sterk varieert. De PFAS-verwijdering neemt in mei af, net zoals de gidsstoffenverwijdering afneemt (paragraaf 4.1). Kanaalvorming in het filterbed zorgt voor een te korte contacttijd, waardoor ook het PFAS-verwijderingsrendement afneemt.

Desalniettemin is het verwijderingsrendement in alle monsters meer dan 60 %. Dat komt voornamelijk door de goede verwijdering van 6:2 FTAB (aandeel van 72 % van de totale gemeten PFAS, bijlage III) door kolom 2, met een rendement van 99 %. 6:2 FTAB is een zwitserion met een betaïne-groep en wordt verwijderd door het negatief geladen DEXSORB. Dat kolom 2 deze PFAS goed verwijderd, strookt met de constatering dat kolom 2 redelijke hydraulische condities kent. Gemiddeld wordt 54 % van de PFOA en 100 % van de PFOS verwijderd door het DEXfilter. Deze stoffen worden met name verwijderd door kolom 1. Er is niet meer dan 6 ng/L PFOA en 20 ng/L PFOS gedetecteerd. Daarnaast zijn PFPeA, PFHxA en PFHpA niet verwijderd. Deze PFAS zijn moeilijk te adsorberen door hun korte ketenlengte. Door de korte contacttijd - door kanaalvorming - kan het DEXfilter deze stoffen niet verwijderen.

#### 4.3.2 RESULTATEN PFAS-VERWIJDERING DEXFILTER VOLTA STRAAT

Op de locatie Voltastraat in Doetinchem heeft DEXSORB een hoge adsorptiecapaciteit voor PFAS laten zien. Afbeelding 4.12 laat de resultaten zien van 2 lange keten PFAS (PFOA en PFOS) en drie kortere PFAS (PFBA, PFPeA en 6:2 FTS) bij zeer hoge influent concentraties (paragraaf 3.3). Het filterbed DEXSORB was niet geregenereerd tijdens de pilotperiode; de verwijderingsrendementen schommelen vanwege de variërende ingaande PFAS-concentratie van het voedingswater (tabel 3.3).

AFBEELDING 4.12 VERWIJDERINGSRENDEMENT PFAS AAN DE VOLTA STRAAT BIJ HOGE INFLUENTCONCENTRATIES (TOT 10.000 NG/L)



De lange ketens PFAS - zoals PFOA - braken pas na 5.350 bedvolumes door. PFOS is niet doorgebroken in de hele pilotperiode (> 12.000 BV's). Korte keten PFAS zijn een stuk lastiger te adsorberen: na < 410 bedvolumes sloeg PFBA door. Dit is een PFAS die bij veel adsorbentia slecht wordt verwijderd.

Dit laat zien dat DEXSORB+, zoals verwacht, een hoge potentie heeft voor de verwijdering van PFAS uit een watermatrix. Een kanttekening is dat de samenstelling van AWZI-effluent verschillend is van vervuild grondwater. Hierom is een vervolgpilot met de focus op PFAS-verwijdering in AWZI-effluent aanbevolen.

#### 4.4 ECOTOXICOLOGIE

Tabel 4.4 geeft de resultaten van de ecotoxicologietesten weer.

TABEL 4.4 GEMIDDELDE RESULTATEN ECOTOXICOLOGIE OP BASIS VAN 2 METINGEN

	Voeding	Filtraat	Verwijderingspercentage
Microtox	0,13	0,07	18 %
Cytotox CALUX	1,2	0,6	49 %
Era CALUX	3,5	0,1	96 %
PAH Calux	107,5	30	72 %
PXR Calux	167,5	21	87 %
totaal	279,8	51,8	70 %

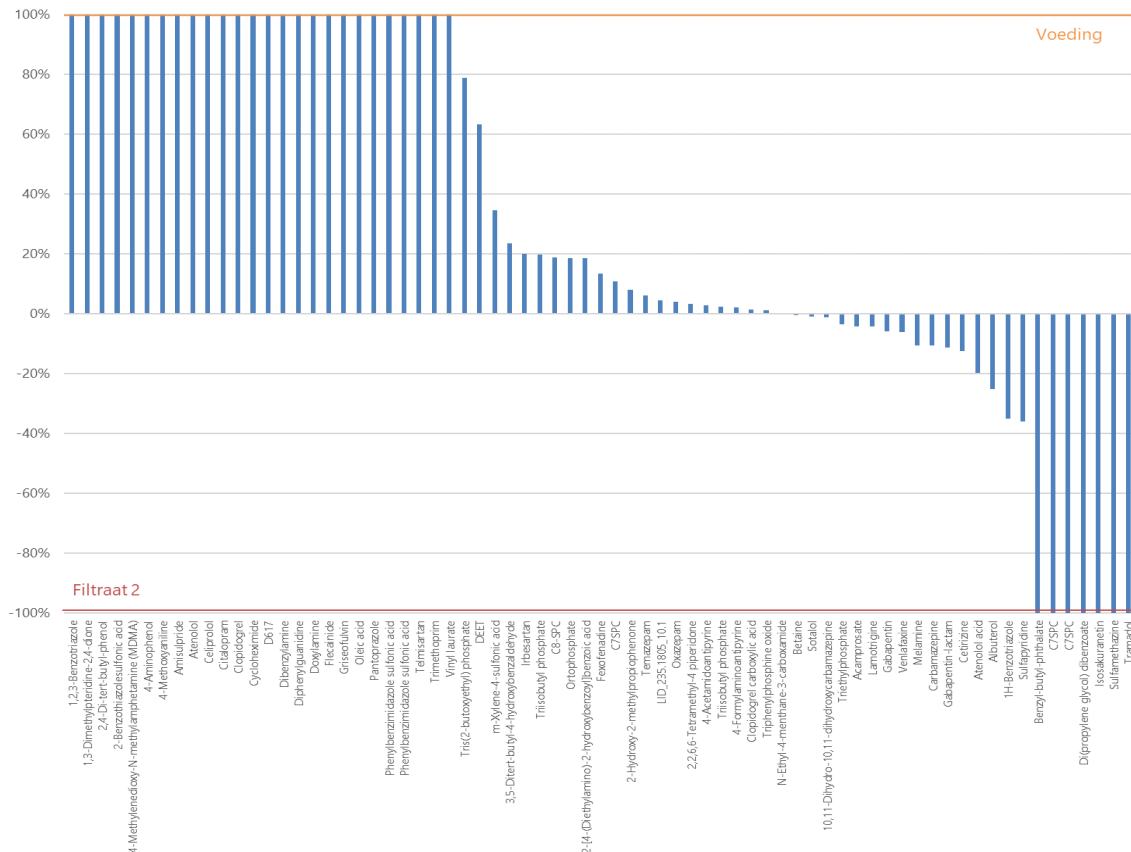
Er is 1 *in vivo* test uitgevoerd met bacteriën en watervlooiën (Microtox) om de algemene toxiciteit te analyseren. Daarnaast zijn er vier specifieke *in vitro* testen uitgevoerd om effecten op hormoonhuishouding (Era en Cytotox CALUX) en detoxificatie & metabolisme (PAH en PXR CALUX) aan te tonen. Op basis van deze resultaten is voor alle bioassays een afname van het effect gevonden na het DEXfilter. Vooral de afname in de *in vitro* testen is hoog. In totaal is er een verlaging van het ecologische risico van 70 % gemeten. Hiermee is de doelstelling voor de ecotoxiciteit (minimaal 50 %) behaald.

#### 4.5 NON-TARGET SCREENING (NTS)

De NTS is eenmalig uitgevoerd op de voeding en het filtraat 2 - dus effluent - van het DEXfilter. Het doel van de NTS is om alle stoffen aanwezig in de voeding en het filtraat van het DEXfilter te identificeren (met open vizier). De NTS werkt met behulp van een combinatie van vloeistofchromatografie (LC) en hoge resolutie massaspectrometrie (HRMS). De stoffen worden geïdentificeerd op basis van massa en frequentie, en geven een bepaalde respons. Deze respons is een uiting van concentratie, hoge responsen komen waarschijnlijk overeen met hoge concentraties. Dit betekent dat de responsen binnen één stof van voeding en filtraat 2 (verwijderingsrendement) wel met elkaar vergeleken kunnen worden om een verwijderingsrendement te bepalen, maar verschillende stoffen niet met elkaar.

Afbeelding 4.13 toont 71 geïdentificeerde stoffen en hun verwijderingsrendement. In de grafiek betekent 100 % dat de stof niet meer in filtraat 2 aanwezig is, terwijl bij -100 % de stof niet in de voeding maar in filtraat 2 is gevonden. De stoffen rond 0 % hebben in zowel voeding als filtraat 2 een even grote respons en zijn dus niet verwijderd door het DEXfilter. Ongeveer 40 % van de stoffen worden goed verwijderd door het DEXfilter (> 50 % verwijderingsrendement). Dit is op basis van 1 meting in de operationeel minder stabiele periode van de pilot (10 juli).

AFBEELDING 4.13 VERWIJDERING VAN STOFFEN UIT DE NTS OP VOEDING EN FILTRAAT 2



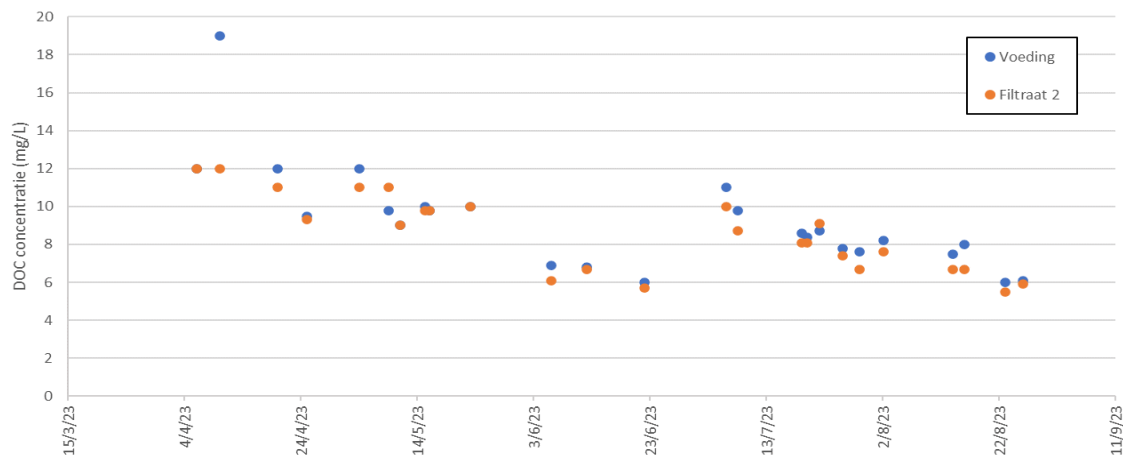
#### 4.6 UITLOGINGSTESTEN

De resultaten van de non-target screening (NTS) in de uitloogtest zijn voorzichtig positief. De NTS heeft vier stoffen gedetecteerd én geïdentificeerd die mogelijk uitloggen, namelijk: 4-Hydroxy-1-(2-hydroxyethyl)-2,2,6,6-tetramethylpiperidine, Benzyl-butyl-phthalate, Diglyme en N-Methyl-2-pyrrolidone. Verder zijn een beperkt aantal andere stoffen gedetecteerd die niet zijn geïdentificeerd. De concentraties en daarmee ook de toxiciteit van zowel de geïdentificeerde als de niet-geïdentificeerde stoffen zijn niet bekend. Wel blijkt uit de ecotoxiciteit-metingen een algehele afname van toxiciteit (paragraaf 4.4). Het is aanbevolen in een volgend onderzoek deze vier stoffen gericht te meten en hiernaast ook de uitloging van metalen uit te sluiten. Daarna kan met zekerheid worden gesteld dat DEXSORB niet uitloogt en geen negatieve effecten op de waterkwaliteit heeft.

#### 4.7 ADSORPTIE OPGELOSTE ORGANISCHE KOOLSTOF (DOC)

Afbeelding 4.14 geeft een grafische representatie van de DOC-metingen over het verloop van de pilot weer. Deze metingen zijn genomen uit de mengmonsters, wat betekent dat dit de DOC-verwijdering van het volledige pilotsysteem inclusief voorfiltratie weergeeft. De resultaten van de steekmonsters geven vergelijkbare concentraties en DOC-afnames, waardoor het effect van de voorfiltratie op de DOC-verwijdering is uitgesloten.

AFBEELDING 4.14 DOC CONCENTRATIES IN VOEDING EN FILTRAAT 2



De gemiddelde afname in DOC is 6 %. Dit duidt op lage adsorptie van DOC door DEXSORB en geen hoge biologische activiteit. Ter vergelijking, bij een biologisch granulair actiefkoolfilter met zuurstofdosing (BODAC) wordt er in de stabiele operationele periode een DOC-verwijdering van rond de 20 % verwacht [15]. Geen referentie is gevonden voor de vergelijking met DOC-adsorptie door een actiefkoolfilter zonder biologie in de Nederlandse rioolwaterzuiveringspraktijk.

# 5

## ADVIES OPERATIONELE ASPECTEN VAN DE PILOT

Uit de resultaten komt naar voren dat voor de volgende demo- of praktijkschaalinstallatie verschillende optimalisaties nodig zijn. Dit hoofdstuk licht, op basis van de resultaten uit hoofdstuk 4, de mogelijkheden voor optimalisaties naar de demo- of praktijkschaalinstallatie toe.

### 5.1 MODELERING EMPTY BED CONTACT TIJD

Zoals blijkt uit de verblijftijdtesten, is de ontwerpcontacttijd van 10 minuten in het pilotonderzoek niet gehaald. Wanneer de contacttijd met de adsorbens (EBCT) wordt verlengd tot in ieder geval de ontwerpcontacttijd, kan een hoger verwijderingsrendement worden behaald met een langere looptijd [13]. Zodoende hoeft de adsorbens ook minder geregenereerd te worden. De pilotresultaten laten het belang zien van een goed hydraulisch ontwerp van een adsorptiefilter. Een middel daartoe is modelering van het stromingsprofiel in de filterkolommen op voorhand met Computational Fluid Dynamics modelering.

### 5.2 TERUGSPOELREGIME MET LUCHT

Wanneer geen voorbehandeling op het effluent wordt toegepast, is het belangrijk dat het filter regelmatig wordt teruggespoeld om onopgeloste bestanddelen uit te spoelen en eventuele biologische groei op te breken. Wanneer de korrels verder zijn geoptimaliseerd (paragraaf 5.1), kan het filterbed adequaat worden teruggespoeld, zodat het filterbed wordt opgebroken en goed fluïdiseert. Bovendien bleek uit het pilotonderzoek dat luchtspoeling noodzakelijk is om verklevingen op te breken. Voorkoming van overmatige biomassagroei en verkleving voorkomt ook het optreden van kanaalvorming. Dit zorgt voor een betere adsorptie van OMV's met een langere standtijd.

#### TERUGSPOELPROTOCOL

Door de ondervonden uitdagingen bij het terugspoelen is gedurende de hele pilotuitvoer onderzoek gedaan naar een passend terugspoelprotocol. Succesvol terugspoelen van de kolom is gedefinieerd als het uitspoelen van de fijne deeltjes die bijdragen aan het oplopen van de drukval over de kolom, zonder uitspoeling van DEXSORB in het terugspoelwater. Aan de start van de pilot bleek het protocol ontoereikend met alleen waterspoeling. Er is vervolgens geëxperimenteerd met het optimaliseren van het terugspoeldebiet, en het opbreken van het filterbed door middel van schokken (geïntroduceerd door hamerslagen op de kolom) en roeren. Deze methodes bleken ook tekort te komen, daarom is uiteindelijk gekozen voor de toevoeging van luchtspoeling aan het protocol. Door middel van een compressor is lucht, voorafgaand aan een waterspoeling, in de kolom gedoseerd. Deze methode bleek, door de toename in uitspoeling van deeltjes, wel in staat tot het opbreken van het filterbed. Na het vastleggen van dit protocol is besloten om deze terug spoeling wekelijks uit te voeren om de accumulatie van deeltjes te verminderen. Het propstroomprofiel kon hierna echter niet meer volledig worden hersteld.

### 5.3 UNIFORMITEIT DEXSORB-KORREL

Tijdens het pilotonderzoek is gebruik gemaakt van DEXSORB-korrels die door Cyclopure zelf, in het lab, geproduceerd zijn. Van deze DEXSORB-korrels blijkt de uniformiteitscoëfficiënt te hoog (2,24), wat leidde tot uitspoeling van DEXSORB bij terugspoelingen door stratificatie (paragraaf 4.1.1). Inmiddels zijn deze korrels verder geoptimaliseerd en worden deze in een fabriek op grote schaal geproduceerd. De uniformiteitscoëfficiënt van het fabriek geproduceerde DEXSORB is 1,7. Dit is vergelijkbaar met actiefkool, waardoor dit waarschijnlijk tot een verbetering van de hydraulische condities in de DEXSORB-filters leidt (lagere drukopbouw). Bovendien kan door deze betere uniformiteitscoëfficiënt een betere fluïdisering worden behaald tijdens terugspoelen waardoor het filterbed gemakkelijker opgebroken kan worden en de terugspoelingen effectiever kunnen zijn.

In de pilot op de Voltstraat zijn de fabrieksmatig geproduceerde korrels toegepast. Verblijftijdsspreidingstesten van de kolommen op de Voltastraat (paragraaf 4.3.2.) laten na terugspoeling een EBCT van 5 minuten zien (volgens ontwerp) met een betere benadering van propstroming. Ook is geen uitspoeling van korrels waargenomen bij terugspoelingen (bij eenzelfde terugspoelsnelheid).

### 5.4 VOLLEDIGE REGENERATIE MET ETHANOL

Op basis van het pilotonderzoek zijn 2 aanbevelingen gemaakt voor de regeneratie. Allereerst is het van belang dat het filterbed goed gefluïdiseerd is om effectief te kunnen regenereren. Hiervoor zijn dezelfde factoren van belang als eerder genoemd over terugspoelingen (paragraaf 5.3). De negatief geladen stoffen konden vrijwel volledig gedesorbeerd worden uit de negatief geladen kolom na 1/5 van de voorziene recirculatietijd en -volume, terwijl de positief geladen stoffen vrijwel niet zijn gedesorbeerd. Naar verwachting desorberen de positief geladen wel na het volledig doorlopen van het regeneratieregime. Dit zal in een vervolgonderzoek moeten worden getoetst. In dit vervolgonderzoek zou ook de standtijd en werking na regeneratie kunnen worden onderzocht.

Tijdens het pilotonderzoek is ethanol toegepast omdat dit veiliger is om mee te werken en er tijdens het pilotonderzoek nog veel handelingen mee uitgevoerd moesten worden. Voor de praktijkschaalinstallatie kan ook worden overwogen methanol toe te passen. Methanol is namelijk net zo effectief, maar goedkoper en heeft een kleinere CO<sub>2</sub>-footprint dan ethanol. Voor het praktijkschaalinstallatie, zoals besproken in hoofdstuk 6, is uitgegaan van ex-situ regeneratie. Dit heeft als voordeel dat je de ATEX-zone (nodig voor werken met (m)ethanol door de lichtontvlambaarheid) maar op één centrale locatie hoeft te hebben en daar professioneel personeel voor kunt inzetten. Op deze locaties zou dan ook de verwerking van de methanoloplossing kunnen plaatsvinden.

# 6

## INPASSING IN DE NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK

Op basis van de uitgangspunten zoals beschreven in hoofdstuk 5 is een inschatting gemaakt van het ontwerp van praktijkschaal-DEXfilter in de Nederlandse zuiveringspraktijk. In dit hoofdstuk is het verwachte verwijderingsrendement over een gehele AWZI toegelicht (paragraaf 6.1), en zijn de ontwerputgangspunten (paragraaf 6.2), de CO<sub>2</sub>-footprint (paragraaf 6.3) en de kosten (paragraaf 6.4) gepresenteerd.

### 6.1 VERWIJDERINGSRENDEMENT EN ONTWERPDEBIET

Voor het ontwerpdebiet is uitgegaan van de standaard AWZI zoals beschreven door STOWA [16]

- DWA-ontwerppiek: 1.040 m<sup>3</sup>/uur (capaciteit nageschakelde stap);
- verwijderingsrendement actief slib: 40 % voor de 7 van de 11 gidsstoffen;
- behandelde jaarlijkse afvalwaterhoeveelheid bij ontwerppiek standaard DWA-patroon AWZI: 80 %.

Uit deze uitgangspunten volgt dat het DEXfilter (uitgaande van 70 % verwijdering over de nageschakelde techniek) een verwijderingsrendement van 75 % over de gehele zuivering kan behalen.

### 6.2 VERBRUIKEN EN ONTWERPUITGANGSPUNTEN

Voor de CO<sub>2</sub>-footprint en de kosten is het belangrijk inzicht te hebben in de verbruiken van energie en chemicaliën en ontwerputgangspunten van het praktijkschaal DEXfilter. Hierbij is uitgegaan van betonnen filterbakken die ex-situ geregenereerd zullen worden.

#### ONTWERPUITGANGSPUNTEN

Voor de ontwerputgangspunten is uitgegaan van de standaard AWZI zoals beschreven door STOWA [16]. De ontwerputgangspunten voor de CO<sub>2</sub>-footprint en kostenbepaling staan beschreven in tabel 6.1.

TABEL 6.1 ONTWERP PRAKTIJSCHAAL DEXFILTER OP BASIS VAN EEN STANDAARD 100.000 I.E. ZUIVERING [16].

Algemene uitgangspunten	Eenheid	Waarde	Opmerking/ referentie
jaaraanvoer		7.655.000	[16]
% behandeld	%	80	[16]
behandeld debiet	m <sup>3</sup> /jaar	6.124.000	
ontwerpdebiet	m <sup>3</sup> /uur	1.040	[16]
spoelwater	m <sup>3</sup> /uur	49	terugspoeldebiet, frequentie en tijdsduur
behandeld debiet incl. spoelwater	m <sup>3</sup> /uur	1.089	



Algemene uitgangspunten	Eenheid	Waarde	Opmerking/ referentie
uitgangspunten filterbed			
EBCT	min	10	Gebaseerd op pilotontwerp
filtratiesnelheid	m/h	11	Gebaseerd op pilotontwerp
benodigd totaal filteroppervlak	m <sup>2</sup>	95	
oppervlak filterbed	m <sup>2</sup>	28	
aantal filters	n	4	
filteroppervlak geïnstalleerd		112	
hoogte filterbed	m	1,55	Op basis van de EBCT
maximale bed-expansie bij terugspoelen		40 %	
hoogte geëxpandeerd filterbed	m	2,2	
totale filterbakhoogte (opvoerhoogte)	m	2,6	Voldoende BWS voor gravitaire filtratie
geïnstalleerd filterbedvolume	m <sup>3</sup>	173	
aantal opvoerpompen	n	2	1+1 redundant
rendement pompen	%	67	
vermogen Elektrisch	kW	10	voor totaal debiet 2 pompen
specifiek energieverbruik	kWh/m <sup>3</sup>	0,009	incl. opvoerhoogte, excl. terugspoeling
energieverbruik per jaar	kWh/j	53.751	
uitgangspunten terugspoelpompen			
aantal terugspoelpompen	n	2	1+1 redundant
spoeltijdpercentage	%	3	
gemiddelde terugspoeldebiet	m <sup>3</sup> /uur	1.500	
frequentie voor alle filters totaal	/uur	0,26	15,7 effectieve uren per etmaal
tijdsduur	minuten	10	
spoelwaterverbruik	m <sup>3</sup> /uur	65	
energieverbruik per jaar	kWh/j	16.125	o.b.v. inschatting GAC-filters
compressor			
aantal compressors	n	2	1+1 redundant
spoelluchtdebiet	m <sup>3</sup> /h	5.000	
spoeltijd per cyclus	minuten	2	
energieverbruik per jaar	kWh/j	6.450	o.b.v. inschatting GAC-filters

## ENERGIE

Het energieverbruik wordt voornamelijk bepaald door de toevoerpomp en het terugspoelregime van het DEXfilter. Op basis van de opvoerhoogte en een dagelijkse terugspoeling zou het energieverbruik van een praktijkinstallatie 89.000 kWh/jaar zijn (tabel 6.1). Hierbij is uitgegaan van een zeer uitgebreid terugspoelprogramma met zowel lucht- als waterspoeling (1 terugspoeling per dag, per filter).

## CHEMICALIËN

Het DEXfilter gebruikt 2 hulpstoffen die op jaarbasis moeten worden aangevuld en afgevoerd: DEXSORB en geregenereerd DEXSORB. Na regeneratie met (m)ethanol neemt de DEXSORB met ongeveer 10 % af per regeneratiecyclus door onder andere slijtage [17]. Dit betekent dat er per regeneratie naast 90 % geregenereerd DEXSORB, 10 % van het materiaal in de filters moet worden aangevuld met nieuw DEXSORB. Na regeneratie kan de (m)ethanol vervolgens voor ongeveer 80 % worden hergebruikt (tabel 6.1).

TABEL 6.2 DEXSORB VERBRUIKEN BIJ DE 2 VARIANTEN (20.000 EN 40.000 BEDVOLUMES). BEREKEND OP BASIS VAN VERBRUIK 1E 5 JAAR

	20.000 bedvolumes	40.000 bedvolumes
1e vulling	173 m <sup>3</sup>	173 m <sup>3</sup>
aantal regeneraties per 5 jaar	7,8	3,4
verlies bij regeneratie	10%	10%
vers DEXSORB per jaar	62 m <sup>3</sup>	47 m <sup>3</sup>
geregenereerd DEXSORB per jaar	244 m <sup>3</sup>	107 m <sup>3</sup>

### VERSCHIL MET ONTWERP HAALBAARHEIDSSSTUDIE

In de haalbaarheidsstudie is uitgegaan van de korrels die op dat moment beschikbaar waren. Inmiddels zijn deze korrels een stuk sterker, waardoor DEXSORB in een vastbedfilter kan worden bedreven. In een vastbedfilter zijn geen lamellensystemen meer nodig die in het ontwerp van de haalbaarheidsstudie wel toegepast zijn voor het afvangen van DEXSORB-korrels. De overgang van upflow naar downflow heeft ook consequenties voor de manier van regenereren. Waar eerst een kleine uitstroom van DEXSORB continu werd geregenereerd, zal nu het gehele filterbed worden geregenereerd wanneer de standtijd van het filterbed is bereikt. Hierdoor zou het gehele ontwerp ATEX uitgevoerd moeten worden, waardoor ervoor is gekozen de regeneratie ex-situ plaats te laten vinden. Wanneer het DEXSORB is verzadigd, zullen de filterbedden leeggezogen worden en op een centrale locatie worden geregenereerd.

### INSCHATTING VAN DE TE BEHALEN STANDTIJD NA OPTIMALISATIES

Tijdens de pilotperiode is een standtijd van 4.000 bedvolumes behaald. Hierover zal nog een factor 1,7 voor de werkelijke belasting worden toegepast. Het filter wordt immers niet altijd volledig op de volledige ontwerpcapaciteit belast. Door het ontwerpdebiet te delen door het werkelijk behandelde debiet [16], wordt de factor 1,7 verkregen en dus 6.800 bedvolumes. Zoals besproken in hoofdstuk 5, is de verwachting dat na doorvoering van de optimalisaties de standtijd significant langer zal zijn. Bovendien geeft 4.000 bedvolumes, zonder optimalisatie, een niet realistisch scenario voor de kosten en CO<sub>2</sub>. Om deze reden zijn 2 scenario's gekozen die respectievelijk als realistisch en optimistisch worden geacht:

1. *standtijd 20.000 bedvolumes*. Dit komt neer op een standtijd van ongeveer een half jaar. Dat is vergelijkbaar met actiefkool. Gezien de resultaten uit het labonderzoek van de haalbaarheidsstudie [4], wordt scenario als reëel gehaald;
2. *standtijd 40.000 bedvolumes*. Dit komt neer op een standtijd van ongeveer een jaar. Wanneer het DEXfilter optimaal wordt bedreven, trekt DEXSORB minder begroeiing aan dan bijvoorbeeld actiefkool en door selectiviteit van het materiaal (op basis van molecuulgrootte) is het ook minder belast met DOC. Daarmee is een langere standtijd dan actiefkool realistisch. Dit is een optimistisch scenario, waar in een vervolgstadium naar wordt gestreefd.

Een nieuw pilotonderzoek zal moeten bevestigen of het behalen van deze standtijden realistisch is nadat de optimalisaties zijn doorgevoerd.

## 6.3 CO<sub>2</sub> FOOTPRINT

Met behulp van het IPMV-model voor CO<sub>2</sub>-footprint voor een standaard AWZI met 100.000 i.e. [18] zijn de CO<sub>2</sub> emissies berekend. In de haalbaarheidsstudie is deze berekening al uitgevoerd; hieronder volgt een update van deze berekening [4]. De berekening voor CO<sub>2</sub> is zo gedaan dat het DEXSORB in een soortgelijke opstelling toegepast als een actiefkoolfilter met een minimale voorfiltratie en regelmatige terugspoeling. Hierin is ook de CO<sub>2</sub>-footprint van geregenereerd DEXSORB opgenomen (ex-situ).

### CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT VAN (GEREGENEREERD) DEXSORB

De CO<sub>2</sub>-footprint van het DEXSORB materiaal is nog niet formeel vastgelegd in een LCA-studie. Daarom is de CO<sub>2</sub>-footprint van ionenwisselaarshars gekozen als geschikte proxy voor DEXSORB. De CO<sub>2</sub> footprint van een anion ionenwisselaarshars is 3,5 kg CO<sub>2</sub>/kg hars (opgaaf leverancier).

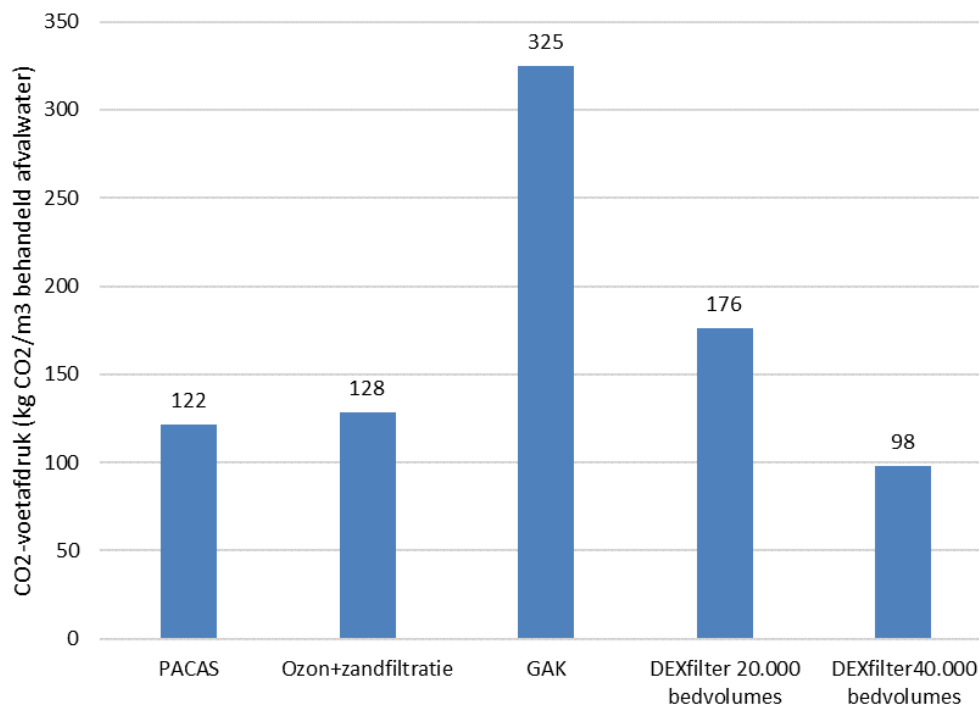
Zowel ionenwisselaarshars als DEXSORB zijn polymeren die verbonden zijn door middel van een crosslinker. Voor DEXSORB worden eerst cyclodextrines geproduceerd uit mais, waarna chemische crosslinking met specifieke crosslinkers plaatsvindt om goede adsorptie-eigenschappen te verkrijgen [19]. Bij productie van een ionenwisselaarshars wordt eerst styrene gepolymeriseerd om vervolgens chemisch een anion of kation toe te voegen [20]. Beiden hebben, anders dan bijvoorbeeld actiefkool, geen extreem hoge temperaturen nodig (< 100 graden Celsius). Om deze vergelijking te toetsen, zal wanneer DEXSORB in bulk wordt geproduceerd een uitgebreide LCA van DEXSORB uitgevoerd moeten worden.

Voor geregenereerd DEXSORB is uitgegaan van 7,1 kg CO<sub>2</sub>/kg DEXSORB. Dit is op basis van regeneratie van methanol waarbij ook hergebruik met behulp van RO wordt toegepast. Het methanolverbruik is gebaseerd op het huidige verbruik in de pilot. Deze regeneratie moet nog geoptimaliseerd worden. In de toekomst wordt dus een significante verbetering van de CO<sub>2</sub>-footprint van regeneratie verwacht.

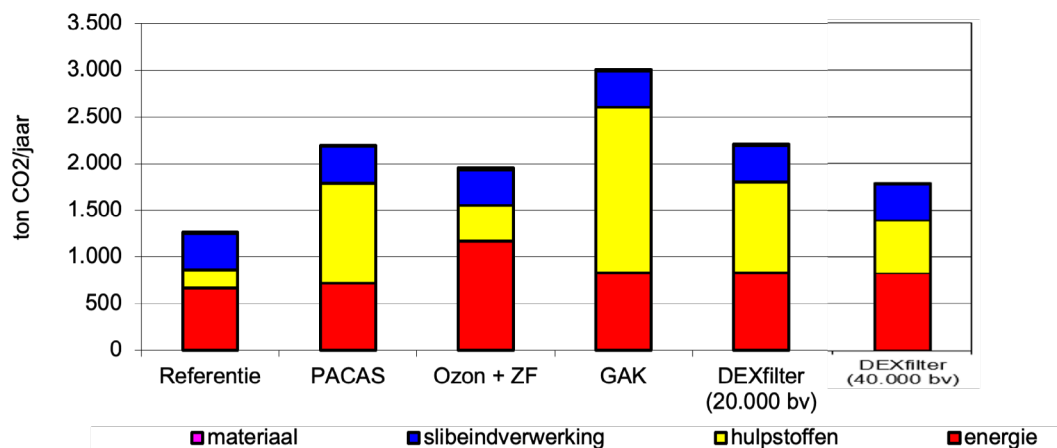
### CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT VAN DEXFILTER

In afbeelding 6.1 en afbeelding 6.2 is de berekende CO<sub>2</sub>-footprint van het DEXfilter vergeleken met die van de referentie technieken PACAS, Ozon+zandfiltratie en GAK. Dit is gedaan voor 2 varianten met een verschillende standtijd, namelijk 20.000 en 40.000 bedvolumes.

AFBEELDING 6.1 CO<sub>2</sub> FOOTPRINT (KG CO<sub>2</sub>/M<sup>3</sup> BEHANDELD) VAN DE DEXSORB VARIANTEN IN VERGELIJKING MET DE REFERENTIE TECHNIKEN



AFBEELDING 6.2 CO<sub>2</sub> FOOTPRINT (TON CO<sub>2</sub>/JAAR) VAN DE DEXSORB MET 20.000 EN 40.000 BEDVOLUMES VARIANTEN IN VERGELIJKING TOT DE REFERENTIETECHNIKEN



## 6.4 KOSTENBEREKENING

De kosten in deze rapportage zijn gedeeltelijk overgenomen uit eerdere STOWA-rapporten en aangepast aan de bevindingen van het onderzoek. Hierbij zijn zowel de stichtingskosten als de operationele kosten geraamd voor een DEXfilter bij een AWZI van 100.000 i.e. Hierin zijn ook de kosten van geregenereerd DEXSORB opgenomen (ex-situ).

*Disclaimer:*

*De gegeven kosten zijn niet geïndexeerd en dienen niet als raming voor een praktijkschaalinstallatie toepassing, maar enkel ter vergelijking met de andere STOWA projecten.*

### 6.4.1 STICHTINGSKOSTEN

In onderstaande raming zijn de indirecte (bouw)kosten weergegeven per discipline op prijspeil 2018. De kostenberekening volgt de Richtlijnen van STOWA d.d. 17 januari 2019:

- onvolledigheidsfactor van 25 %;
- opslagfactor van bouw- naar stichtingskosten van 1,8.

TABEL 6.3 STICHTINGSKOSTEN (IN EUR EXCLUSIEF BTW) BIJ INZET OP EEN 100.000 IE. AWZI

Discipline	Kostenpost	Kosten in EUR
civiel		1.339.200
	leidingwerk	142.000
	DEXfilterbakken met leidinggalerij	1.120.000
	Gemaal gebouw	77.200
werktuigbouw		476.000
	DEXfilter	320.000
	gemaal pompen	156.000
elektrotechniek		402.600
	DEXfilter	160.000
	aardings, potentiaalvereffening, bliksemafleider en voerspanningsbeveiliging	40.000
	energievoorziening LS	5.600
	schakel- en verdeelinrichting	140.000
	kabeldraagsysteem en graafwerk	17.000
	verlichting en overig	40.000
procesautomatisering		412.000
	procesinstallatie verbruikers	102.000
	procesinstallatie metingen	165.000
	automatiseringsinstallatie	145.000
directe bouwkosten		2.629.800
	onvolledigheidsfactor (25 %)	657.500
bouwkosten inclusief onvolledigheid		3.287.300
opslag i.v.m. stichtingskosten (factor 1,8)		2.629.800
totale stichtingskosten (exclusief omzetbelasting)		5.917.000

#### 6.4.2 OPERATIONELE KOSTEN

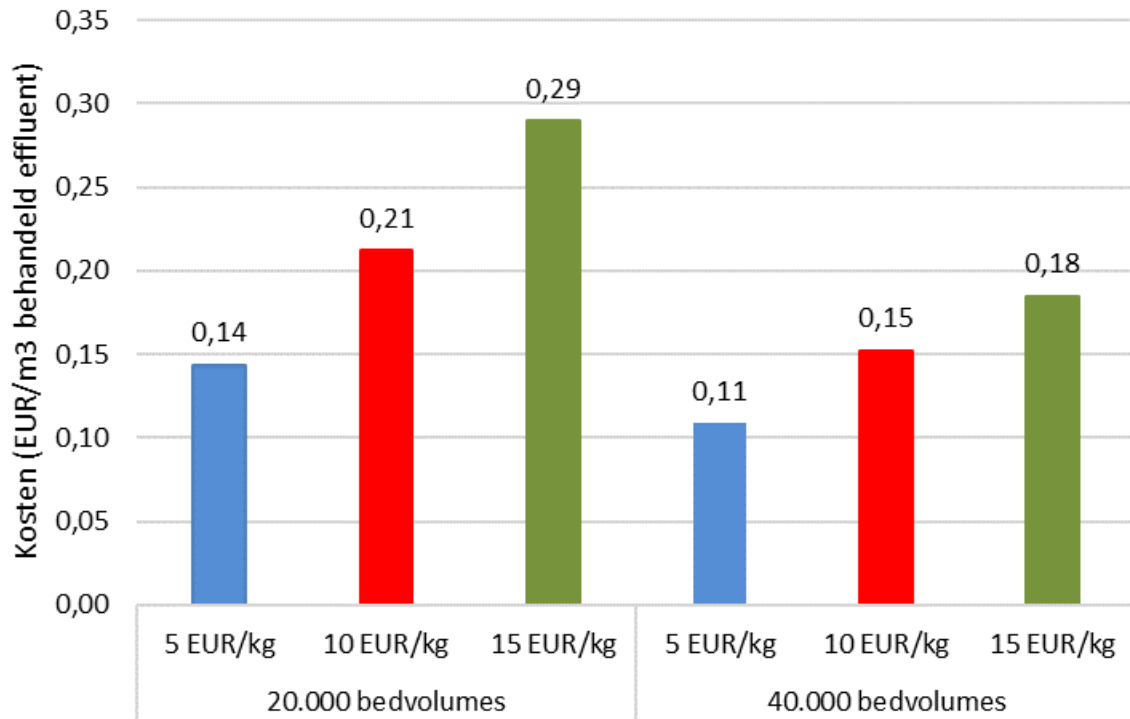
De jaarlijkse kosten zijn conform de STOWA-richtlijnen berekend, met de volgende uitgangspunten:

- annuïtair afschrijving van kapitaallasten bij een rente van 4 % en inflatie van 1,5 %:
  - 30 jaar afschrijvingstermijn voor C;
  - 15 jaar afschrijvingstermijn voor W/E/PA;
- onderhoudskosten op basis van 0,5 % van civiele bouwkosten en 3 % over de W/E/PA bouwkosten;
- personeelskosten: EUR 50.000 /fte;
- elektriciteitskosten: EUR 0,10 /kWh;
- vers DEXSORB (met gevoeligheidsanalyse): 5 EUR/kg, 10 EUR/kg en 15 EUR/kg;
- geregenereerd DEXSORB: 60 % van de kosten van vers DEXSORB;
- spoelwaterverwerking op de AWZI: EUR 0,01/m<sup>3</sup>;
- verwerking verzadigd DEXSORB: EUR 1.000/m<sup>3</sup>.

Omdat DEXSORB een innovatieve adsorbens is, zijn de productkosten nog sterk afhankelijk van de ontwikkelingen van DEXSORB op de Europese markt. De verwachting is dat de prijzen van DEXSORB af zullen nemen naarmate de schaalgrootte toeneemt. Om deze reden is een gevoeligheidsanalyse gedaan voor 3 verschillende prijzen van DEXSORB. In deze gevoeligheidsanalyse zijn ook 2 realistische praktijkscenario's voor de hoeveelheid behandelde bedvolumes uitgewerkt (20.000 bedvolumes en 40.000 bedvolumes) omdat de verwachting is dat met de juiste optimalisaties de behaalde standtijd significant kan worden verlengd.

De kosten voor verwerking verzadigd DEXSORB zijn gebaseerd op de verbrandingsprijzen van PFAS-houdend afval. Dit is een worst-case benadering, waardoor het in praktijk waarschijnlijk lager ligt. De jaarlijkse lasten zijn gedeeld door het behandelde jaardebiet zijn weergegeven in afbeelding 6.3

AFBEELDING 6.3 GEVOELIGHEIDSANALYSE VOOR DE JAARLIJKSE KOSTEN (TOTAL COST OF OWNERSHIP) BIJ VERSCHILLENDE STANDTIJDEN



Op basis van deze gevoeligheidsanalyse zijn de minimale kosten, met de laagste kostprijs en de hoogste hoeveelheid bedvolumes, 0,11 EUR/m<sup>3</sup>. De maximale kosten komen uit op 0,29 EUR/m<sup>3</sup>. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt bovendien dat het grootste effect kan worden behaald door de standtijd te verlengen en dus het aantal behandelde bedvolumes tot regeneratie te verhogen. Met de aanpassingen zoals voorgesteld in hoofdstuk 5, zal naar verwachting een veel hogere standtijd kunnen worden behaald en daarmee ook significant lagere jaarlijkse kosten worden behaald.

## 6.5 VERGELIJKING KOSTEN EN CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT MET REFERENTIETECHNIKEN

De kosten en CO<sub>2</sub>-footprint van de verschillende systemen voor verdergaande verwijdering van microverontreinigingen en medicijnresten zijn samengevat in tabel 6.4. Zoals genoemd in dit hoofdstuk zijn de kosten en CO<sub>2</sub>-footprint van het DEXfilter op basis van de verwachte standtijd na doorvoering van optimalisaties in het filterontwerp.

Tijdens de pilotperiode is een standtijd van 4.000 bedvolumes behaald. Hierover zal nog een factor 1,7 voor de werkelijke belasting worden toegepast. Het filter wordt immers niet altijd volledig op de volledige ontwerpcapaciteit belast. Door het ontwerpdebiet te delen door het werkelijk behandelde debiet [16], wordt de factor 1,7 verkregen en dus 6.800 bedvolumes. Zoals besproken in hoofdstuk 5, is de verwachting dat na doorvoering van de optimalisaties de standtijd significant langer zal zijn. Bovendien geeft 4.000 bedvolumes, zonder optimalisatie, een niet realistisch scenario voor de kosten en CO<sub>2</sub>. Om deze reden zijn 2 scenario's gekozen die respectievelijk als realistisch en optimistisch worden geacht:

1. *standtijd 20.000 bedvolumes*. Dit komt neer op een standtijd van ongeveer een half jaar. Dat is vergelijkbaar met actiefkool. Gezien de resultaten uit het labonderzoek van de haalbaarheidsstudie [4], wordt scenario als reëel gehaald;
2. *standtijd 40.000 bedvolumes*. Dit komt neer op een standtijd van ongeveer een jaar. Wanneer het DEXfilter optimaal wordt bedreven, trekt DEXSORB minder begroeiing aan dan bijvoorbeeld actiefkool en door selectiviteit van het materiaal (op basis van molecuulgrootte) is het ook minder belast met DOC. Daarmee is een langere standtijd dan actiefkool realistisch. Dit is een optimistisch scenario, waar in een vervolgstadium naar wordt gestreefd.

Een nieuw pilotonderzoek zal moeten bevestigen of het behalen van deze standtijden realistisch is nadat de optimalisaties zijn doorgevoerd.

**TABEL 6.4** VERGELIJKING VAN CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT, KOSTEN EN VERWIJDERINGSRENDEMENT TUSSEN HET DEXILTER EN DE REFERENTIETECHNOLOGIEËN

	Eenheid	PACAS	Ozon+ZF	GAK	DEXfilter (20.000 bv)	DEXfilter (40.000 bv)
CO <sub>2</sub> -footprint	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> behandeld	122	128	325	176	98
CO <sub>2</sub> -footprint	ton CO <sub>2</sub> /jaar	2.198	1.953	3.009	2.207	1.793
kosten	EUR/m <sup>3</sup> behandeld	0,05	0,17	0,26	0,14 (bulk) 0,29 (retail)	0,11 (bulk) 0,18 (retail)
verwijderingsrendement gidsstoffen	%	70-75	80-85	80-85	70 - 80	70 - 80

# 7

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 7.1 INZICHTEN EN CONCLUSIES UIT HET ONDERZOEK

Uit de resultaten van het pilotonderzoek blijkt dat het DEXfilter een veelbelovende adsorbens is. Door beperkende hydraulische condities - kanaalvorming en uitspoeling DEXSORB bij terugspoelingen - zijn niet alle onderzoeksvragen definitief beantwoord. Een 2e pilot, waarin de optimalisaties doorgevoerd zijn, is aanbevolen om alle onderzoeksvragen te beantwoorden. Hieronder zijn, waar mogelijk, de antwoorden op de onderzoeksvragen samengevat.

#### **KENNISVRAAG 1: WAT IS DE GIDSSTOFFENVERWIJDERING, STANDTIJD, TERUGSPOELREGIME EN VERBRUIK VAN DEXSORB?**

Het pilotonderzoek heeft aangetoond dat de pilotinstallatie (exclusief AWZI) een gemiddeld verwijderingsrendement (7 best verwijderbare van de 11 gidsstoffen) van minimaal 70 % behoudt tot in ieder geval 4.000 bedvolumes. In de periode hierna zijn operationele problemen opgetreden met de pilotinstallatie waardoor het verwijderingsrendement afnam. De observatie dat het verwijderingsrendement voornamelijk afnam in de 1e kolom gelijktijdig met complicaties met de hydraulische condities in de 1e kolom leidde tot de volgende hypothese: *beperkende hydraulische condities hebben een negatieve invloed op het adsorptiegedrag van DEXSORB*. Deze hypothese is onderzocht met verschillende testen.

Verblijftijdtesten, zeeftesten, schudproeven en een microscopische analyse hebben bevestigd dat het filterbed overmatig is verkleefd met kanaalvorming tot gevolg. Het aanvankelijke terugspoelregime was niet toereikend om het filterbed goed op te breken en te spoelen. Hierdoor is niet de ontworpen EBCT gehaald, met een lager verwijderingsrendement als resultaat. Bovendien spoelde DEXSORB-korrels uit bij terugspoelingen door overmatige stratificatie. Dit beperkte de terugspoelsnelheid wat de terugspoelingen ineffectief maakte om kanaalvorming te voorkomen. De propstroom is niet hersteld in het filterbed.

Hydraulische optimalisatie van de 1e kolom - en in mindere mate de 2e kolom - is nodig om kanaalvorming te voorkomen, de ontwerp-EBCT te behalen en zodoende de volledige adsorptiecapaciteit van DEXSORB te benutten. De optimalisaties zullen niet alleen het verwijderingsrendement verbeteren, maar ook de standtijd van de filterkolommen verlengen. De optimalisaties zijn:

3. het verbeteren van het stromingsprofiel van de filterkolommen in de ontwerpfase, met als doel een propstroom te benaderen in de filterkolom;
4. het verlagen van de uniformiteitscoëfficiënt van de korrels (van 2,3 naar  $\leq 1,6$ ) om overmatige stratificatie van het filterbed te voorkomen;
5. het terugspoelprogramma van alleen water uitbreiden met lucht om verkleefing van DEXSORB-korrels in het filterbed op te breken.

Zoals genoemd zal de te behalen standtijd bij doorvoering van bovenstaande optimalisaties aanzienlijk verlengen. De behaalde standtijd met hydraulische complicaties van 4.000 bedvolumes is daarom als niet reëel geacht voor een praktijkschaalinstallatie. In de kosten en CO<sub>2</sub> zijn daarom scenario's toegepast voor een standtijd van 20.000 en 40.000 bedvolumes.



Dit is een realistisch en optimistische standtijd voor een praktijkopstelling. Een vervolg pilot-onderzoek zal moeten bevestigen of deze standtijd inderdaad haalbaar is.

Naast microverontreinigingen is er ook gekeken naar het effect van het DEXfilter op reductie van PFAS en ecotoxiciteit in het filtraat. De bevindingen in PFAS-verwijdering gaven vergelijkbare resultaten als voor de microverontreinigingen: ook hier leidde de hydraulische condities, van voornamelijk de 1e kolom, op een afname in PFAS-verwijdering. Desalniettemin, werd er toch een redelijke verwijdering gevonden. Deze afname was voornamelijk van één PFAS (6:2 FTAB, een zwitterion) die werd verwijderd in de 2e kolom. Overige PFAS waren slechts in zeer lage concentraties aanwezig in het effluent van de AWZI.

Het verbruik van DEXSORB na een regeneratie door slijtage en efficiëntieverlies is niet beantwoord in dit pilotonderzoek. Het DEXfilter is eenmaal geregenereerd met ethanol aan het einde van het onderzoek. De resultaten van de regeneratie van de 2e kolom zijn wisselend voor de verschillende microverontreinigingen. Waar negatief en neutraal geladen stoffen volledig worden gedesorbeerd, is de regeneratie-effectiviteit van positief geladen stoffen lager. Dit komt waarschijnlijk omdat slechts een vijfde van de geplande regeneratie is uitgevoerd doordat te veel DEXSORB uitspoelde tijdens de (tegenstroomse) regeneratie met ethanol. Bij een optimale regeneratie worden de positief geladen microverontreinigingen naar verwachting ook gedesorbeerd. Na regeneratie blijkt het verwijderingsrendement van de meeste microverontreinigingen te zijn toegenomen; vooral van de stoffen die redelijk tot goed zijn gedesorbeerd tijdens de regeneratie. Dit is in lijn met de verwachting dat een hogere mate van desorptie tijdens de regeneratie leidt tot een hoger verwijderingsrendement na de regeneratie.

#### **KENNISVRAAG 2: WAT IS DE ECOTOXICITEIT VAN HET DEXFILTER FILTRAAT?**

Onderzoek naar ecotoxicologische effecten met behulp van acht bioassays laat zien dat het DEXfilter zorgt voor een verlaging van het negatieve effect op ecotoxiciteit. Het DEXfilter zorgt voor een verlaging van circa 70 % van de SIMONI Risico Indicatie (SRI), zowel voor als na de hydraulische uitdagingen. De SRI geeft een indicatie van een reductie in de algehele ecotoxiciteit. Hiermee wordt voldaan aan het doel van de IPMV (minimaal 50% afname).

#### **KENNISVRAAG 3: VINDT UITLOGING PLAATS VAN DEXSORB NAAR HET FILTRAAT?**

De resultaten van de non-target analyse zijn voorzichtig positief. In een vervolgonderzoek wordt aangeraden de geïdentificeerde stoffen (met de NTS) gericht te meten en hiernaast ook de uitloging van metalen uit te sluiten met een gerichte metaalanalyse. Daarna kan met zekerheid worden gesteld dat uitloging van DEXSORB geen negatieve effecten op de waterkwaliteit heeft.

#### **KENNISVRAAG 4: WAT IS DE CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT VAN HET DEXFILTER?**

De CO<sub>2</sub>-footprint van het DEXfilter is berekend voor een standaard zuivering van 100.000 i.e. De CO<sub>2</sub>-voetafdruk van het DEXSORB materiaal is nog niet formeel vastgelegd in een LCA-studie. Daarom is een vergelijkbaar materiaal uit de watertechnologie gebruikt als proxy: ionenwisselaarshars. Omdat de behaalde hoeveelheid behandelde bedvolumes geen reëel en haalbaar scenario geeft, is in de berekeningen uitgegaan van standtijden waarbij de optimalisaties zijn uitgevoerd: 20.000 (realistisch) of 40.000 (optimistisch) bedvolumes. Afhankelijk van de hoeveelheid bedvolumes die na optimalisatie kan worden behandeld, is de CO<sub>2</sub>-footprint 98- 176 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> behandeld afvalwater.

**KENNISVRAAG 5: WAT ZIJN DE INDICATIEVE KOSTEN VAN EEN PRAKTIJKSCHAALOPSTELLING?**

De kosten van het DEXfilter zijn berekend voor een standaard zuivering van 100.000 i.e. Aangezien DEXSORB een nieuwe adsorbens is, is nog geen commerciële bulkprijs beschikbaar op de Europese markt. De verwachting is dat de bulkprijzen van DEXSORB af zullen nemen naarmate de schaalgrootte toeneemt. Om deze reden is een gevoeligheidsanalyse gedaan voor drie verschillende bulkprijzen van DEXSORB, namelijk 5, 10 en 15 EUR/kg DEXSORB. In deze gevoeligheidsanalyse zijn wederom 2 scenario's voor de standtijd uitgewerkt, namelijk 20.000 en 40.000 behandelde bedvolumes. De verwachting is dat met de juiste optimalisaties deze standtijden kunnen worden behaald. De kosten per behandelde m<sup>3</sup> effluent komen dan uit tussen de 0,11 en 0,29 EUR/m<sup>3</sup>, afhankelijk van de bulkprijs.

**7.2 GESCHIKTE AWZI'S IN NEDERLAND**

Op basis van de 1e resultaten uit het pilotonderzoek kan het DEXfilter geschikt zijn voor zuiveringen waar zowel micro's als PFAS verwijderd moeten worden. In het STOWA onderzoek 2021-46 is een lijst gegeven van AWZI's waarbij verhoogde PFAS concentraties zijn gevonden in het effluent. Ook zuiveringen waar geen KRW-maatregelen nodig zijn (of al staan), maar wel maatregelen voor micro's, kan het DEXfilter een geschikte techniek zijn. De verwachte prestatie van het DEXfilter na doorgevoerde optimalisaties zal moeten worden bevestigd in een 2e pilot op AWZI-effluent.

## 8

## BIBLIOGRAFIE

- [1] L. É. F. Szente, „Cyclodextrin-enabled polymer composites for packaging,” *Molecules*, vol. 23, nr. 7, p. 1556, 2018.
- [2] W. J. P. Ezgi Demircan Ozeltaglayan, „Chemosphere 320 (2023) 137964 Available online 31 January 2023 0045-653.β-Cyclodextrin functionalized adsorbents for removal of organic micropollutants from water,” *Chemosphere*, vol. 320, nr. 137964, pp. 1-11, 2023.
- [3] S. Khaoulani, H. Chaker, C. Cadet, E. Bychkov, L. Cherif, A. Bengueddach en S. Fourmentin, „Wastewater treatment by cyclodextrin polymers and noble metal/mesoporous TiO<sub>2</sub> photocatalysts Traitement d’eaux usées par adsorption sur des polymères de cyclodextrines et photocatalyse,” *Comptes Rendus Chimie*, vol. 18, nr. 1, pp. 23-31, 2015.
- [4] STOWA, „Haalbaarheidsstudie DEXfilter,” STOWA, 2021.
- [5] N. Battye, D. Patch, D. Roberts, N. O'Connor, L. Turner, B. Kueper, M. Hulley en K. Weber, „Use of a horizontal ball mill to remediate per- and polyfluoroalkyl substances in soil,” *Science of the total environment*, vol. 835, 2022.
- [6] STOWA, „STOWA 2021-46: PFAS in influent, effluent en zuiveringslib - resultaten van een meetcampagne op acht rwzi's,” STOWA, Amersfoort, 2021.
- [7] „RWZI - Lelystad,” Stichting Nederlandse Watersector, [Online]. Available: <https://watersector.nl/rwzi/316/rwzi>. [Geopend 19 09 2023].
- [8] M. & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, McGraw Hill Education, 2013.
- [9] J. v. d. Bulk, M. Hoek, F. Rempe, J. Blom, T. Wagner, E. Schuman, S. Melita, R. Kampf, A. de Wilt en A. Otte, „Verkenning natuurlijke zuiveringssystemen voor verwijdering van organische microverontreinigingen,” STOWA, Amersfoort, 2022.
- [10] STOWA, „Bepaling verwijderingsrendement medicijnresten rwzi-afvalwater - Koepelvoorschrift en onderbouwende eindrapportage,” 2021-15.
- [11] Ecofide, *Handreiking voor uitvoeren van biologische effectmonitoring*, 2020.
- [12] STOWA, „Onderzoek Monstervoorbehandeling,” STOWA, 2021.
- [13] TU Delft, „Water treatment: adsorption,” [Online]. Available: <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Adsorption-1.pdf>. [Geopend 20 9 2023].
- [14] Eurotrol, „Ion exchange resins and filtering media,” Eurotrol, 2019.

- [15] STOWA, Biologisch actiefkoolfiltratie met zuurstofdoserings voor verwijdering van microverontreinigingen uit rwzi-effluent, 2020.
- [16] M. Mulder, „Berekening CO2 footprint en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit rwzi-afvalwater,” Mirabella Mulder waste water management, 2022.
- [17] A. Okasha, A. Abdel-Khalek, N. Alenazi, A. AlHammadi, W. Al Zoubi, S. Alhammadi, Y. Gun Ko en M. Abukhadra, „Progress of synthetic cyclodextrins-based materials as effective adsorbents of the common water pollutants: Comprehensive review,” *Journal of environmental chemical engineerin*, vol. 11, nr. 3, 2023.
- [18] M. Mulder, „Model CO2-footprint rwzi micro's 100000, versie 5 d.d. 26-20-2020,” STOWA, 2020.
- [19] K. L. a. G. R. Svenja Wüpper, „Cyclodextrins, Natural Compounds, and Plant Bioactives—A Nutritional Perspective,” *Biomolecules*, vol. 11, nr. 3, p. 401, 2021.
- [20] C. ' . Michaud, „Ion Exchange Resin Synthesis and Reactions,” WCP online, 15 4 2017. [Online]. Available: <https://wcponline.com/2017/04/15/ion-exchange-resin-synthesis-reactions/>. [Geopend 13 10 2023].
- [21] ISO9308-3-Water quality - Detection and enumeration of *Escherichia coli* and coliform bacteria in surface and waste water part 3: miniaturized method by inoculation in a liquid medium., 1998.
- [22] ISO 7899-2 - Water quality-Detection and enumeration of intestinal enterococci part 2: Membrane filtration method., 2000.
- [23] T. Spit, „Removal efficiency of antibiotic resistance using the O3-STEP filter.,” <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:66202565-9277-4513-8b97-e070d7551dd8>, 2021.
- [24] STOWA, „ STOWA | Effect van toepassing van vergaande zuiveringstechnieken op de aanwezigheid van antibioticaresistentie,” Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, 1 Januari 2022. [Online]. Available: <https://www.stowa.nl/onderwerpen/waterkwaliteit/realiseren-van-ecologische-waterkwaliteitsdoelen-krw/effect-van>.
- [25] STOWA, „Haalbaarheidsstudie O3-STEP® filter,” 2020-18.
- [26] Y.-P. Z. Kui Lin, „Entropy and enthalpy changes during adsorption and displacement of shale gas,” *Energy*, vol. 221, 2021.
- [27] C. Li, M. Klemes, W. Dichtel en D. Helbling, „Tetrafluoroterephthalonitrile-crosslinked  $\beta$ -cyclodextrin polymers for efficient extraction and recovery of organic micropollutants from water,” *Journal of Chromatography A*, vol. 1541, pp. 52-56, 2018.

## BIJLAGE I

# RAPPORTAGEGRENZEN

## PFAS TESTKITS CYCLOPUR

Compound	Method Detection Limit
10:2 FTS	< 1 ng/L
11Cl-PF3OUdS	< 0.5 ng/L
3:3 FTCA	< 1 ng/L
4:2 FTS	< 1 ng/L
5:3 FTCA	< 1 ng/L
6:2 FTS	< 1 ng/L
6:2/8:2diPAP	< 1 ng/L
6:2diPAP	< 0.5 ng/L
6:2FTAB	< 10 ng/L
6:6PFPI	< 0.5 ng/L
6:8PFPI	< 0.5 ng/L
7:3 FTCA	< 0.5 ng/L
8:2 FTS	< 1 ng/L
8:2diPAP	< 1 ng/L
8:8PFPI	< 0.5 ng/L
8Cl-PFOS	< 0.5 ng/L
9Cl-PF3ONS	< 0.5 ng/L
ADONA	< 0.5 ng/L
diSAmPAP	< 2 ng/L
FBSA	< 0.5 ng/L
FDSA-I	< 0.5 ng/L
FDUEA	< 1 ng/L
FHpSA	< 0.5 ng/L
FHUEA	< 2 ng/L
FHxSA	< 0.5 ng/L
FOSAA	< 0.5 ng/L
FOUEA	< 1 ng/L
FPeSA	< 0.5 ng/L
GenX	< 1 ng/L
HQ-115	< 0.5 ng/L
Hydro-EVE	< 0.5 ng/L
MeFBSA	< 1 ng/L
MeFBSE	< 1 ng/L
N-AP-FHxSA	< 0.5 ng/L
N-EtFOSA	< 0.5 ng/L
N-EtFOSAA	< 0.5 ng/L
N-MeFOSA	< 0.5 ng/L
N-MeFOSAA	< 0.5 ng/L
N-TAmP-FHxSA	< 5 ng/L
Nafion BP2	< 0.5 ng/L
Nafion BP4 (R-PSDA)	< 10 ng/L
NEtFOSE	< 0.5 ng/L
NFDHA	< 0.5 ng/L
NMeFOSE	< 1 ng/L
NVHOS	< 0.5 ng/L
PEPA	< 0.5 ng/L
PFBA	< 1 ng/L
PFBS	< 0.5 ng/L
PFDA	< 0.5 ng/L
PFDoA	< 0.5 ng/L
PFDoS	< 0.5 ng/L
PFDS	< 0.5 ng/L
PFECHS	< 0.5 ng/L
PFEESA	< 0.5 ng/L
PFHpA	< 0.5 ng/L
PFHpS	< 0.5 ng/L
PFHxA	< 0.5 ng/L
PFHxDA	< 1 ng/L
PFHxS	< 0.5 ng/L
PFMOBA	< 0.5 ng/L
PFMOPrA	< 0.5 ng/L
PFNA	< 0.5 ng/L
PFNS	< 0.5 ng/L
PFO2HxA	< 2 ng/L
PFO3OA	< 0.5 ng/L
PFO4DA	< 0.5 ng/L
PFO5DoA	< 10 ng/L
PFO6TeA	< 5 ng/L
PFOA	< 0.5 ng/L
PFODA	< 1 ng/L
PFOPA	< 50 ng/L
PFOS	< 0.5 ng/L
PFOSA	< 0.5 ng/L
PFPeA	< 0.5 ng/L
PFPeS	< 0.5 ng/L
PFPrA	< 10 ng/L
PFPrS	< 0.5 ng/L
PFTeA	< 0.5 ng/L
PFTrDA	< 0.5 ng/L
PFTrDS	< 0.5 ng/L
PFUdS	< 0.5 ng/L
PFUnA	< 0.5 ng/L
PMPA	< 2 ng/L

# RESULTATEN MICROVERONTREINIGINGEN MENGMONSTERS

48

<b>INPUT CELL</b>
nengmonster
TRUE

1,96

614	823	1109	1794	3029	3680	3954	4503	4640	5600
6-apr (614)	10-apr (823)	20-apr (1109)	25-apr (1794)	4-mei (3029)	9-mei (3680)	11-mei (3954)	15-mei (4503)	16-mei (4640)	23-mei (5600)

voeding	6-04-23 2:00	10-04-23 2:00	20-04-23 2:00	25-04-23 2:00	4-05-23 2:00	9-05-23 2:00	11-05-23 2:00	15-05-23 8:00	16-05-23 2:00	23-05-23 2:00
Benzotriazool ug/l	1,80	1,20	1,40	1,10	1,40	1,30	1,50	0,87	0,95	1,30
SOM 4,- en 5,-meth ug/l	0,39	0,47	0,35	0,40	0,34	0,39	0,34	0,40	0,37	0,46
Carbamazepine ug/l	0,73	0,72	0,65	0,66	0,86	0,82	0,77	0,69	0,66	0,70
Diclofenac ug/l	0,70	0,84	0,83	0,65	0,78	0,82	0,78	1,20	0,72	0,71
Gabapentine ug/l	0,58	0,29	0,58	0,56	0,70	0,86	0,89	1,40	1,70	1,10
Hydrochlorthiazide ug/l	2,50	2,70	2,60	2,20	2,60	2,40	2,20	2,20	2,30	2,30
Irbesartan ug/l	2,10	2,30	2,30	1,70	2,20	2,10	1,90	2,50	2,40	2,10
Metoprolol ug/l	1,40	2,10	1,40	1,20	1,30	1,00	1,00	1,20	1,00	0,95
Sotalol ug/l	1,50	1,40	1,60	1,20	1,50	1,20	1,20	1,50	1,40	1,30
Trimethoprim ug/l	0,76	0,54	0,56	0,46	0,40	0,33	0,32	0,26	0,21	1,80
Venlafaxine ug/l	0,29	0,29	0,38	0,26	1,60	0,46	0,36	0,30	0,28	0,30
Amisulpride ug/l	0,16	0,16	0,13	0,15	0,18	0,23	0,22	0,19	0,19	0,21
Azitromycine ug/l	0,70	0,70	0,60	0,60	0,50	0,60	0,50	0,50	0,60	0,40
Candesartan ug/l	0,18	0,20	0,19	0,17	0,20	0,18	0,17	0,18	0,18	0,19
Citalopram ug/l	0,21	0,24	0,22	0,20	0,23	0,21	0,21	0,24	0,21	0,21
Claritromycine ug/l	0,16	0,11	0,08	0,10	0,07	0,09	0,09	0,06	0,06	0,04
Furosemide ug/l	2,10	2,40	1,50	1,30	1,40	1,20	1,20	1,60	1,20	1,20
Propranolol ug/l	0,15	0,15	0,13	0,12	0,15	0,12	0,12	0,12	0,15	0,11
Sulfamethoxazol ug/l	0,42	0,24	0,31	0,26	0,48	0,35	0,34	0,25	0,28	0,27

filtraat 2 unit	6-04-23 2:00	10-04-23 2:00	20-04-23 2:00	25-04-23 2:00	4-05-23 2:00	9-05-23 2:00	11-05-23 2:00	15-05-23 8:00	16-05-23 2:00	23-05-23 2:00
Benzotriazool ug/l	0,02	0,02	0,04	0,08	0,63	0,80	0,88	0,88	0,95	1,20
SOM 4,- en 5,-meth ug/l	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02
Carbamazepine ug/l	0,02	0,05	0,17	0,27	0,54	0,68	0,64	0,62	0,63	0,68
Diclofenac ug/l	0,01	0,01	0,01	0,02	0,12	0,24	0,31	0,35	0,35	0,44
Gabapentine ug/l	0,60	0,60	0,63	0,63	0,73	0,98	0,92	1,20	1,70	0,98
Hydrochlorthiazide ug/l	0,08	0,08	0,08	0,08	0,80	1,20	1,40	1,50	1,50	1,90
Irbesartan ug/l	0,01	0,04	0,20	0,34	0,97	1,20	1,20	1,60	1,60	1,50
Metoprolol ug/l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sotalol ug/l	0,01	0,02	0,06	0,12	0,53	0,73	0,88	1,20	1,10	1,10
Trimethoprim ug/l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Venlafaxine ug/l	0,01	0,01	0,02	0,03	0,11	0,22	0,28	0,27	0,27	0,30
Amisulpride ug/l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Azitromycine ug/l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
Candesartan ug/l	0,02	0,02	0,05	0,06	0,13	0,14	0,13	0,13	0,14	0,15
Citalopram ug/l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Claritromycine ug/l	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03
Furosemide ug/l	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,00	0,00	0,20	0,30	0,30
Propranolol ug/l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sulfamethoxazol ug/l	0,14	0,21	0,26	0,22	0,29	0,34	0,34	0,34	0,30	0,33

	7246	8617	9851	10126	11771	6697	11497	12320	12731	11360	13280
	12-jun (7246)	22-jun (8617)	6-jul (9851)	8-jul (10126)	22-jul (11771)	6-jun (6697)	20-jul (11497)	26-jul (12320)	29-jul (12731)	19-jul (11360)	2-aug (13280)
	12-06-23 2:00	22-06-23 2:00	6-07-23 2:00	8-07-23 2:00	22-07-23 2:00	6-06-23 2:00	20-07-23 2:00	26-07-23 2:00	29-07-23 2:00	19-07-23 2:00	2-08-23 2:00
1,10	1,90	1,70	1,30	1,20	1,50	1,80	1,80	1,40	2,00	1,40	
0,41	0,36	0,59	0,36	0,37	0,66	0,35	0,39	0,62	0,41	0,65	
0,86	0,69	0,80	0,85	0,68	0,78	0,70	0,69	0,63	0,65	0,54	
0,73	0,64	0,64	0,61	0,61	0,75	0,60	0,62	0,61	0,65	0,61	
0,77	0,57	0,84	0,70	0,64	0,63	0,74	0,68	0,68	1,10	0,71	
2,50	2,20	2,20	2,40	2,40	2,50	2,20	2,40	2,30	2,30	2,30	
2,00	2,10	2,00	1,80	2,00	2,20	1,90	2,00	2,00	1,90	2,00	
1,10	0,99	1,20	1,10	1,00	1,00	1,00	1,10	1,10	0,97	1,30	
1,20	1,20	1,20	1,20	1,00	1,30	1,10	1,20	1,10	1,20	1,10	
0,13	0,13	0,16	0,17	0,08	0,25	0,11	0,09	0,08	0,11	0,08	
0,41	0,27	0,28	0,28	0,27	0,30	0,27	0,29	0,26	0,27	0,24	
0,23	0,24	0,25	0,24	0,24	0,23	0,25	0,23	0,22	0,25	0,21	
0,30	0,20	0,50	0,20	0,20	0,30	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20	
0,18	0,17	0,18	0,16	0,17	0,20	0,18	0,19	0,18	0,17	0,16	
0,22	0,21	0,18	0,17	0,20	0,21	0,20	0,20	0,21	0,20	0,20	
0,04	0,09	0,10	0,08	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,07	0,05	
1,20	1,30	#N/A	1,00	0,70	1,30	0,90	0,80	0,60	1,00	0,70	
0,10	0,11	0,10	0,09	0,09	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	
0,33	0,22	0,23	0,29	0,26	0,34	0,26	0,33	0,30	0,26	0,21	
	12-06-23 2:00	22-06-23 2:00	6-07-23 2:00	8-07-23 2:00	22-07-23 2:00	6-06-23 2:00	20-07-23 2:00	26-07-23 2:00	29-07-23 2:00	19-07-23 2:00	2-08-23 2:00
1,50	1,30	1,40	1,20	1,30	1,30	1,30	1,40	1,30	1,40	1,30	
0,12	0,21	0,35	0,31	0,40	0,07	0,41	0,40	0,41	0,42	0,40	
0,89	0,92	0,86	0,84	0,70	0,87	0,73	0,69	0,70	0,70	0,65	
0,44	0,47	0,46	0,44	0,48	0,41	0,47	0,49	0,50	0,50	0,46	
0,74	0,60	1,10	0,88	0,69	0,69	0,82	0,73	0,67	1,20	0,71	
2,60	2,50	2,30	2,30	2,20	2,20	2,30	2,20	2,30	2,40	2,10	
1,50	1,70	1,50	1,40	1,70	1,50	1,50	1,60	1,70	1,50	1,60	
0,05	0,04	0,00	0,08	0,10	0,02	0,07	0,10	0,10	0,07	0,09	
1,40	1,30	1,30	1,30	1,10	1,20	1,20	1,10	1,10	1,20	1,10	
0,02	0,02	0,00	0,03	0,04	0,00	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	
0,27	0,27	0,27	0,28	0,26	0,27	0,26	0,27	0,27	0,27	0,26	
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,15	0,15	0,15	0,13	0,16	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,14	
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,04	0,03	0,00	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	
0,40	0,30	#N/A	0,00	0,20	0,40	0,00	0,30	0,20	0,30	0,30	
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,39	0,32	0,31	0,29	0,30	0,37	0,31	0,32	0,31	0,31	0,28	

# RESULTATEN PFAS TESTKITS CYCLOPURE

Sample Collection Date (yyyy/mm/dd)	WTK ID	Sampling Location	Sampling Point	Concentration (ng/L)																		
				PFPrA	PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	6:2 FTS	6:2FTAB	3:3 FTCA	FBSA	FHxSA	HQ-115	Total
2023/04/20	WTK PFAS 2980	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	0	0	1,2	2,4	2,2	1,9	0	0,8	0	0,6	0	1,7	2,0	33,9	0	0,5	0	0,7	47,9
	WTK PFAS 2992	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	0,9	1,2	0,7	0	0	0	0	0	0	0	20,9	0	0	0	0	23,7	
	WTK PFAS 2993	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	1,00	1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,0
2023/05/03	WTK PFAS 2994	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	0	0	1,5	2,7	2,2	2,4	0	1,0	0	0	2,0	1,8	38,9	0	0,6	0	0,7	53,8	
	WTK PFAS 2995	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	1,6	2,0	1,5	0,7	0	0,0	0	0	0	0	31,2	0	0	0	0	37,0	
	WTK PFAS 2996	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	1,5	2,0	1,0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,5
2023/05/10	WTK PFAS 2948	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	0	0	1,8	3,2	2,6	2,5	0,6	0,9	0	0,7	0	2,3	2,9	41,9	0	0,6	0	0,8	60,8
	WTK PFAS 2967	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	2,0	2,7	1,8	1,4	0	0	0	0	0	2,4	37,9	0	0,5	0	0	48,7	
	WTK PFAS 2968	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	1,5	2,5	1,4	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,2
2023/05/17	WTK PFAS 2971	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	0	0	1,5	2,8	1,3	2,0	0	0,8	0	0,6	0	1,9	2,0	26,0	0	0,6	0	0,8	40,9
	WTK PFAS 2970	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	1,3	2,4	2,0	1,4	0	0,6	0	0	1,3	1,8	33,8	0	0	0	0	44,6	
	WTK PFAS 2969	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	1,8	2,9	1,9	1,0	0	0	0	0	0	1,3	0	0	0	0	0	0	8,9
2023/05/24	WTK PFAS 2931	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	0	0	1,6	2,2	1,5	1,7	0	0,6	0	0	1,4	1,3	17,0	0	0	0	0,5	27,8	
	WTK PFAS 2979	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	1,5	2,2	1,6	1,3	0	0	0	0	0	1,0	26,3	0	0	0	0	33,9	
	WTK PFAS 2932	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	1,1	2,2	1,5	1,2	0	0	0	0	0	1,6	0	0	0	0	0	0	7,6
2023/06/02	WTK PFAS 2933	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	0	0	1,3	2,0	1,2	1,4	0	0,6	0	0	1,1	1,4	17,1	0	0	0	0,6	26,7	
	WTK PFAS 2934	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	1,4	2,0	1,2	1,2	0	0	0	0	0	1,5	19,8	0	0	0	0	27,1	
	WTK PFAS 2935	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	1,4	2,3	1,3	1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,0
2023/06/13	WTK PFAS 2941	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	0	0	1,4	2,2	1,3	1,8	0	0,8	0	0	1,4	1,5	26,8	0	0,5	0	0,5	38,2	
	WTK PFAS 2940	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	1,2	2,0	1,6	2,8	0	0	0	0	0	1,3	20,8	0	0	0	0	29,7	
	WTK PFAS 2939	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	1,2	2,2	1,2	1,0	0	0,5	0	0	0	1,2	0	0	0,5	0	0	0	7,8
2023/06/20	WTK PFAS 2944	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	0	0	1,4	5,2	2,0	1,7	0	0,8	0	0	1,0	5,5	25,3	0	0,5	0	0,6	44,0	
	WTK PFAS 2942	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	1,3	3,0	1,1	1,2	0	0,6	0	0	0	2,1	18,5	0	0	0	0	27,8	
	WTK PFAS 2943	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	1,2	2,6	1,2	1,2	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	7,7
2023/06/30	WTK PFAS 2945	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	0	0	2,1	4,6	3,5	1,8	0	0,8	0	0	1,4	2,6	18,9	0	0,7	0	0	36,4	
	WTK PFAS 2946	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	1,7	3,4	2,1	1,4	0	0,5	0	0	0	2,2	18,3	0	0,6	0	0	30,2	
	WTK PFAS 2947	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	1,6	3,2	1,7	1,1	0	0,5	0	0	0	1,9	0	0	0,6	0	0	0	10,6
2023/07/06	WTK PFAS 2938	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	0	1,1	1,6	2,5	1,4	2,2	0	0,9	0	0	1,2	1,8	21,9	0	0,5	0	0,6	35,7	
	WTK PFAS 2937	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	1,3	2,2	1,3	1,1	0	0	0	0	0	1,4	21,5	0	0	0	0	28,8	
	WTK PFAS 2936	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	1,4	2,2	1,3	0,9	0	0	0	0	0	1,4	0	0	0	0	0	0	7,2
2023/07/10	WTK PFAS 2928	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	0	0	1,6	3,9	3,2	2,0	0	0,7	0	0	1,9	3,3	43,7	0	0,5	0	0,7	61,5	
	WTK PFAS 2929	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	1,5	3,3	2,5	1,4	0	0,5	0	0	0	2,4	32,8	0	0,5	0	0	44,9	
	WTK PFAS 2930	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	1,9	3,7	2,2	1,3	0	0,6	0	0	0	2,7	10,3	0	0,6	0	0	23,3	
2023/07/18	WTK PFAS 2925	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	0	0	2,0	4,6	3,2	2,0	0	0,9	0	0,9	0	2,4	8,2	47,0	0	0,5	0	0,6	72,3
	WTK PFAS 2926	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	1,6	3,5	2,7	1,3	0	0	0	0	2,7	29,7	0	0	0	0	0	41,5	
	WTK PFAS 2927	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	1,9	4,0	2,7	1,4	0	0,5	0	0	0	2,6	0	0	0,6	0	0	0	13,7
2023/07/25	WTK PFAS 2978	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	11,0	1,1	2,7	6,9	5,7	5,8	0	1,2	0,6	2,0	0	5,4	12,8	83,4	0	0,8	0	0,7	140,1
	WTK PFAS 2976	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	2,4	4,9	3,3	1,8	0	0,6	0	0	0	4,0	37,8	0	0,5	0	0	55,3	
	WTK PFAS 2977	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	1,9	4,1	2,7	1,9	0	0,5	0	0	0	3,3	0	0	0,5	0	0	0	44,9
2023/08/03	WTK PFAS 2972	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	13,7	0	3,7	8,4	11,0	4,0	1,0	1,6	1,2	6,3	0,6	17,3	22,2	392,8	4,1	0,8	0,8	1,3	490,8
	WTK PFAS 2973	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	2,4	6,0	6,0	2,1	0	0,7	0	0,5	0	0,8	10,3	184,2	0	0,6	0	0	233,6
	WTK PFAS 2974	Lag Vessel Effluent	Fi2	11,7	1,1	3,1	5,8	4,2	3,5	0	0,6	0	0	0	6,0	0	0	0,5	0	0	0	36,5
2023/08/15	WTK PFAS 2978	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	0	1,5	2,9	5,4	10,1	3,3	0,9	2,1	0,6	2,8	0	10,7	19,5	242,3	0	0,7	0,6	0,7	304,1
	WTK PFAS 2924	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	2,7	5,7	6,8	2,0	0	0,8	0	0	0	1,0	11,7	199,2	0	0,6	0	0	231,2
	WTK PFAS 2923	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	2,8	4,7	2,6	0	0	0	0	0	0	1,9	0	0	0	0	0	0	12,0
2023/08/22	WTK PFAS 2920	Lead Vessel Influent	Feed (Voe)	0	0	2,0	3,1	4,8	2,8	0,8	0,8	0	0,8	0	5,8	9,5	193,6	0	0,7	0	0,6	225,3
	WTK PFAS 2921	Lead Vessel Effluent	Fi1	0	0	2,2	3,6	5,6	2,1	0	0,8	0	0,7	0	1,3	8,8	151,6	0	0,5	0	0	177,2
	WTK PFAS 2922	Lag Vessel Effluent	Fi2	0	0	2,9	4,6	5,3	1,0	0	0,6	0	0	0	6,9	0	0	0,6	0	0	0	21,9

Note: Lead Vessel contains the DEXSORB(+); Lag Vessel contains the DEXSORB(-).



# RESULTATEN MICROVERONTREINIGINGEN STEEKMONSTERS NA REGENERATIE

<b>INPUT CELL</b>
steekmonster
TRUE

voeding		15-08-23 10:00	17-08-23 10:00	22-08-23 10:00	23-08-23 11:00	24-08-23 10:00	25-08-23 11:30	28-08-23 11:30
Benzotriazool	ug/l	0,81	1,80	1,00	1,40	1,70	1,90	1,00
SOM 4,- en 5,-methylbenzotriazole	ug/l	0,41	0,34	0,29	0,30	0,27	0,29	0,43
Carbamazepine	ug/l	0,55	0,65	0,64	0,65	0,66	0,63	0,61
Diclofenac	ug/l	0,73	0,67	0,78	0,72	0,70	0,63	0,74
Gabapentine	ug/l	0,51	0,49	0,68	0,51	0,59	0,59	0,77
Hydrochlorthiazide	ug/l	2,50	2,70	2,30	2,40	2,50	2,50	2,30
Irbesartan	ug/l	2,30	2,20	2,20	2,20	2,10	2,00	2,10
Metoprolol	ug/l	1,20	1,30	1,20	1,10	1,10	0,91	1,10
Sotalol	ug/l	1,30	1,40	1,30	1,30	1,20	1,30	1,20
Trimethoprim	ug/l	0,10	0,14	0,10	0,14	1,50	1,10	0,11
Venlafaxine	ug/l	0,40	0,36	0,31	0,31	0,29	0,30	0,28
Amisulpride	ug/l	0,19	0,20	0,19	0,19	0,18	0,17	0,18
Azitromycine	ug/l	0,20	0,10	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10
Candesartan	ug/l	0,19	0,19	0,18	0,20	0,17	0,20	0,18
Citalopram	ug/l	0,18	0,18	0,22	0,22	0,20	0,17	0,19
Claritromycine	ug/l	0,07	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,10
Furosemide	ug/l	0,80	0,70	0,90	0,60	0,50	0,50	0,60
Propranolol	ug/l	0,13	0,13	0,11	0,11	0,11	0,10	0,11
Sulfamethoxazol	ug/l	0,24	0,22	0,31	0,29	0,30	0,33	0,24

<b>filtraat 2</b>	<b>unit</b>	<b>15-08-23 10:00</b>	<b>17-08-23 10:00</b>	<b>22-08-23 10:00</b>	<b>23-08-23 11:00</b>	<b>24-08-23 10:00</b>	<b>25-08-23 11:30</b>	<b>28-08-23 11:30</b>
Benzotriazool	ug/l	0,21	0,35	0,84	0,92	0,95	1,00	1,00
SOM 4,- en 5,-methylbenzotriazole	ug/l	0,09	0,08	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13
Carbamazepine	ug/l	0,18	0,28	0,50	0,51	0,54	0,54	0,59
Diclofenac	ug/l	0,10	0,17	0,33	0,34	0,37	0,40	0,42
Gabapentine	ug/l	0,53	0,56	0,71	0,54	0,63	0,55	0,90
Hydrochlorthiazide	ug/l	0,80	1,10	1,70	1,90	1,80	1,90	2,10
Irbesartan	ug/l	0,54	0,79	1,30	1,30	1,40	1,40	1,50
Metoprolol	ug/l	0,18	0,16	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18
Sotalol	ug/l	0,92	0,93	1,10	1,10	1,10	1,20	1,10
Trimethoprim	ug/l	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07
Venlafaxine	ug/l	0,21	0,23	0,26	0,27	0,26	0,27	0,30
Amisulpride	ug/l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Azitromycine	ug/l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Candesartan	ug/l	0,15	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,15
Citalopram	ug/l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Claritromycine	ug/l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Furosemide	ug/l	0,00	0,00	0,20	0,00	0,20	0,20	0,20
Propranolol	ug/l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sulfamethoxazol	ug/l	0,28	0,35	0,34	0,39	0,43	0,39	0,32

<b>filtraat 1</b>	<b>unit</b>	<b>15-08-23 10:00</b>	<b>17-08-23 10:00</b>	<b>22-08-23 10:00</b>	<b>23-08-23 11:00</b>	<b>24-08-23 10:00</b>	<b>25-08-23 11:30</b>	<b>28-08-23 11:30</b>
Benzotriazool	ug/l	1,20	1,10	1,10	1,10	1,30	1,40	1,30
SOM 4,- en 5,-methylbenzotriazole	ug/l	0,47	0,44	0,45	0,42	0,41	0,40	0,40
Carbamazepine	ug/l	0,57	0,59	0,66	0,66	0,63	0,62	0,64
Diclofenac	ug/l	0,55	0,57	0,58	0,57	0,61	0,60	0,58
Gabapentine	ug/l	0,48	0,48	0,73	0,51	0,55	0,50	0,75
Hydrochlorthiazide	ug/l	2,40	2,30	2,40	2,40	2,20	2,40	2,30
Irbesartan	ug/l	1,90	2,00	2,00	2,00	2,00	1,90	2,00
Metoprolol	ug/l	0,46	0,40	0,76	0,58	0,48	0,50	0,49
Sotalol	ug/l	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,20
Trimethoprim	ug/l	0,10	0,11	0,11	0,12	0,42	0,67	0,20
Venlafaxine	ug/l	0,42	0,36	0,32	0,30	0,29	0,30	0,29
Amisulpride	ug/l	0,19	0,18	0,19	0,19	0,16	0,19	0,18
Azitromycine	ug/l	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20
Candesartan	ug/l	0,16	0,17	0,16	0,17	0,16	0,18	0,15
Citalopram	ug/l	0,16	0,14	0,18	0,19	0,17	0,17	0,17
Claritromycine	ug/l	0,06	0,07	0,04	0,05	0,05	0,06	0,09
Furosemide	ug/l	0,30	0,40	0,40	0,40	0,40	0,30	0,40
Propranolol	ug/l	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Sulfamethoxazol	ug/l	0,29	0,33	0,34	0,36	0,36	0,35	0,28