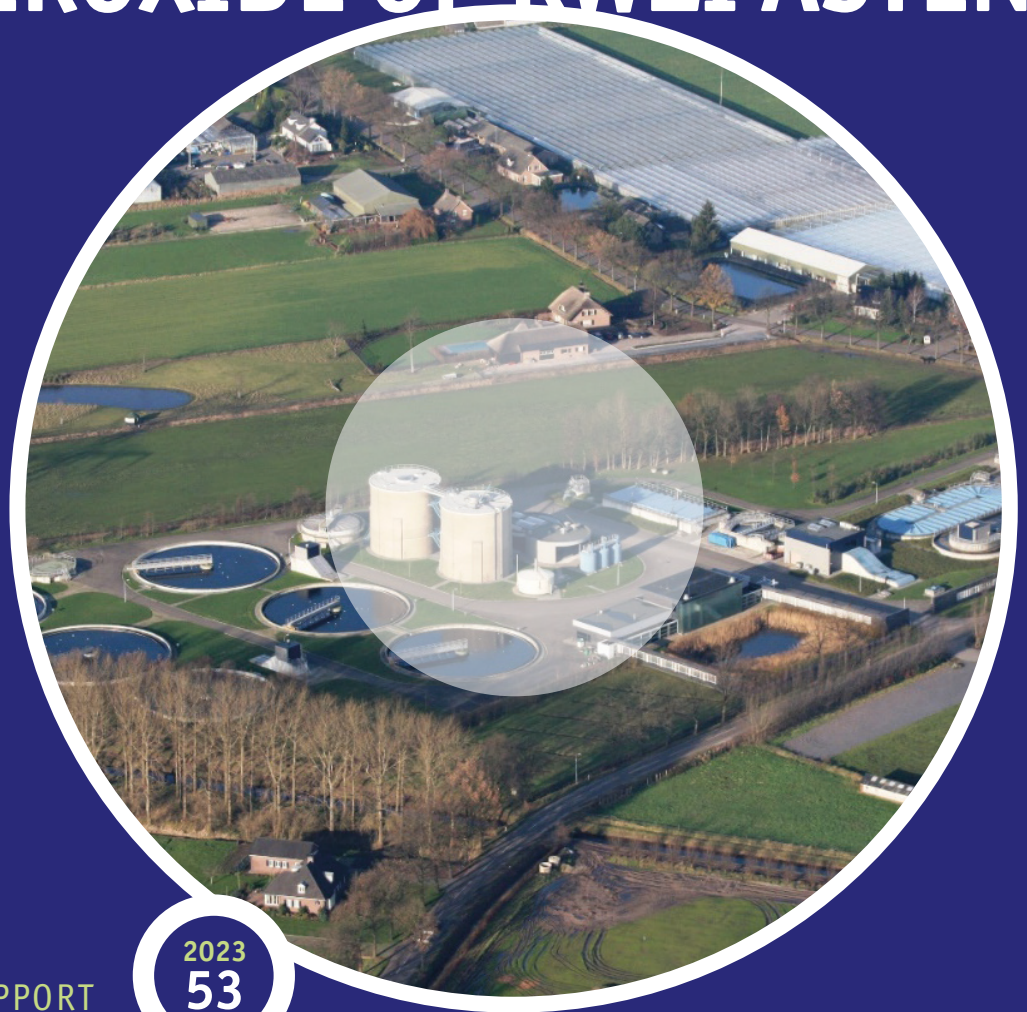




Ministerie van Infrastructuur  
en Waterstaat

stowa

# PILOT DIRECTE NANOFILTRATIE EN UV/ PEROXIDE OP RWZI ASTEN



RAPPORT

2023  
53

PILOT DIRECTE NANOFILTRATIE EN UV/PEROXIDE OP RWZI ASTEN

**RAPPORT**

2023

**53**

ISBN 978.94.6479.057.3



[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 Helena Verloo- Royal HaskoningDHV  
Herman Evenblij - Royal HaskoningDHV

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Ivor Rohof – Waterschap Vechtstromen  
Harm Baten – Hoogheemraadschap van Rijnland  
Karin Bertens Zorzano – Waterschap Aa en Maas  
Paul van den Brink – Evides  
Herman Evenblij – Royal HaskoningDHV  
Maaïke Hoekstra – Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Bram Martijn – PWNT  
Mirabella Mulder – Mirabella Mulder Waste Water Management  
Arjen van Nieuwenhuijzen – Witteveen+Bos  
Coert Petri – Waterschap Vallei en Veluwe  
Gerard Rijs – Rijkswaterstaat  
Martin Spruijt – PWNT  
Cora Uijterlinde – STOWA  
Tom Weijtmans – Waterschap Aa en Maas

De pilot is voor een belangrijk deel gefinancierd door de firma's NX Filtration en Van Remmen UV Techniek.  
Daarnaast is ondersteuning ontvangen van waterschap Aa en Maas.

VORMGEVING Buro Vormvast  
STOWA STOWA 2023-53  
ISBN 978.94.6479.057.3

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

## **NANOFILTRATIE, EFFLUENT KWALITEIT VOOR HERGEBRUIK**

**Met het holle vezel nanofiltratie en geavanceerde oxidatie kunnen medicijnresten vergaand verwijderd worden uit rwzi effluent. Hierdoor ontstaat een waterkwaliteit die voor hergebruik in aanmerking komt.**

In het Innovatieprogramma Microverontreinigingen (IPMV) van STOWA en het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat zijn diverse technologieën onderzocht voor de verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater. Eén van deze technologieën maakt gebruik van membraanfiltratie in combinatie met geavanceerde oxidatie. De technologie is op pilotschaal getest op de rwzi Asten, bij het waterschap Aa en Maas. Gedurende circa een jaar is een drietal membranen getest in combinatie met verschillende intensiteiten van geavanceerde oxidatie. Van deze technologie zijn de verwijderingsrendementen bepaald voor de gidsstoffen uit het IPMV en is onderzocht hoe de kwaliteit op overige parameters kansen biedt voor direct hergebruik.

De resultaten zijn doorgerekend voor een situatie waarbij 82% van het rwzi effluent wordt behandeld met nanofiltratie en oxidatie. In die situatie bleek dat één van de geteste membranen, ook zonder nageschakelde oxidatie, in staat is om precies het vereiste rendement van 70% verwijdering te bereiken. Bij de andere twee membranen bleek de nageschakelde oxidatie noodzakelijk om dit rendement te bereiken. Door de combinatie met oxidatie kan het totaal rendement (dus na opmengen met het onbehandelde deel van het effluent) theoretisch oplopen tot 88% voor 7 van de 11 gidsstoffen uit het IPMV. Om bij regenweeraanvoer de membranen stabiel te kunnen bedrijven is een aanvullende voorfiltratie nodig om zwevendstof dat uitspoelt uit de nabezinktanks, tegen te houden.

Nanofiltratie op een beperkt deel van het effluent van een rwzi creëert een waterkwaliteit die hergebruik in verschillende toepassingen mogelijk maakt. Bij toepassing op een rwzi van 100.000 i.e., waarbij 82% van het effluent wordt behandeld bedragen de kosten van deze technologie 47 cent per kubieke meter (prijspeil 2017).

In dit onderzoek is ervan uitgegaan dat het concentraat dat ontstaat bij filtratie wordt teruggevoerd naar de rwzi. Het is nog niet bekend of dit technologisch acceptabel is en wat de effecten zijn op de effluentkwaliteit tijdens bijvoorbeeld regenweeraanvoer. De verwerking van concentraat is onderwerp van een parallel TKI-onderzoek dat plaatsvindt bij UTwente in samenwerking met Waterschap Vechtstromen.

Joost Buntsma  
Directeur STOWA

# SAMENVATTING

Door de beschikbaarheid van nieuwe technologie ziet Waterschap Aa en Maas kansen om het nagezuiverde effluent van rwzi Asten geschikt te maken voor hoogwaardig hergebruik, zoals gietwater voor de glastuinbouw en proceswater voor industrie. In een haalbaarheidsstudie STOWA (2020-22) is o.a. gebleken dat met capillaire nanofiltratie een hoge waterkwaliteit behaald kan worden tegen relatief lage kosten (ca. €0,50/m<sup>3</sup>). Hiermee wordt (waarschijnlijk) een microbiologisch betrouwbaar water geproduceerd met verwijdering van vrijwel alle opgeloste deeltjes en kleurcomponenten.

De technische haalbaarheid van deze technologiecombinatie werd vanaf april 2021 tot eind oktober 2022 getest op de rwzi Asten. Primaire doelstelling was te laten zien dat uit rwzi effluent water van hoge kwaliteit gemaakt kan worden met de combinatie van capillaire nanofiltratie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie. Daarnaast werd onderzocht wat het verwijderingsrendement is t.a.v. de verwijdering van medicijnresten en andere microverontreinigingen per zuiveringsstap.

In Tabel 1 is weergegeven hoe de drie membranen (zónder nageschakelde oxidatie) presteren op de 11 gidsstoffen uit het IPMV, evenals de beste 7 van deze 11.

**TABEL 1 PRESTATIE VAN DE DRIE GETESTE MEMBRANEN OP DE GIDSSTOFFEN UIT HET IPMV**

Stofgroep	dNF40	dNF80	dNF120
Beste 7 uit 11	61%	44%	25%
Gemiddelde van 11 stoffen	27%	24%	12%

Als de nanofiltratie wordt gevolgd door een geavanceerde oxidatiestap met UV en waterstofperoxide nemen de verwijderingsrendementen sterk toe, zie Tabel 2.

**TABEL 2 PRESTATIES VAN NF + GEAVANCEERDE OXIDATIE VOOR DE GIDSSTOFFEN UIT HET IPMV**

Stofgroep	dNF40	dNF80	dNF120
	UV: 8.000 J/m <sup>2</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 10 mg/l	UV: 6.000 J/m <sup>2</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 15 mg/l	UV: 12.000 J/m <sup>2</sup> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 20 mg/l
Beste 7 uit 11	76%	96%	96%
Gemiddelde van 11 stoffen	55%	85%	92%

In de relatief kortdurende proefperioden met de drie membranen is gebleken dat tijdens droogweeraanvoer de membranen stabiel te bedrijven zijn met een flux van 20 tot 30 l/m<sup>2</sup>.h en een recovery van 80%. In periodes met veel regen spoelt er uit de nabezinktanks meer zwevendstof uit, die vervolgens voor verstoppingen zorgt in de membraanvezels. Voor een full scale toepassing wordt daarom uitgegaan van een extra fijnzeef voorafgaand aan de nanofiltratie.

Het geproduceerde water is vrij van pathogenen, heeft vrijwel geen kleurcomponenten meer en bevat nog slechts sporen van organische microverontreinigingen. Ook stoffen als PFAS worden grotendeels tegengehouden door de membranen en aangenomen mag worden dat microplastics ook de membranen niet zullen passeren. In vergelijking met de EU verordening die hergebruik van effluent in de landbouw reguleert voldoet dit water aan alle

daarin gesteld eisen. Uit een door KWR gepubliceerde lijst van kwaliteitseisen voor water in de landbouw blijkt dat het geproduceerde water geschikt is voor toepassing in vollegronds groenteteelt, fruitteelt en akkerbouw en grasland.

Voor een modelzuivering van 100.000 inwonerequivalenten is uitgerekend wat de pilotresultaten zouden betekenen voor een nageschakelde opwerking van effluent met nanofiltratiemembranen en geavanceerde oxidatie. De kosten hiervan bedragen zo'n 47 cent per m<sup>3</sup> (prijspeil 2017, volgens de richtlijnen van het IPMV). De overige parameters waarop de technologieën in het IPMV zijn vergeleken zijn gepresenteerd in Tabel 3. Bedenk daarbij dat bij het rendement van de gidsstoffen uitgegaan is van behandeling van ruim 80% van al het effluent, waarbij het totaal rendement een gemiddelde is van het behandelde en het resterend onbehandelde deel. NF+AOP heeft een relatief hoge CO<sub>2</sub>-footprint, dit wordt vooral veroorzaakt door een hoog energieverbruik van de membranen.

**TABEL 3** OVERZICHT VERGELIJKING MET REFERENTIETECHNOLOGIEËN

	Eenheid	PACAS	Ozon + ZF	GAK	NF+AOP
CO <sub>2</sub> footprint	gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	122	128	325	244
Kosten	€/m <sup>3</sup>	0,05	0,17	0,26	0,47
Rendement gidsstoffen	%	70-75%	80-85%	80-85%	88%

# 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.*

# PILOT DIRECTE NANOFILTRATIE EN UV/PEROXIDE OP RWZI ASTEN

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
	1.1 Aanleiding onderzoek	1
	1.2 Doelstelling onderzoek NF en AOP Asten	1
	1.2.1 Onderzoeksdoelen	1
	1.2.2 TRL niveau	2
	1.3 Opzet en organisatie	2
<b>2</b>	<b>ONDERZOEKSOPZET</b>	<b>4</b>
	2.1 Rwzi Asten	4
	2.2 NF pilot	6
	2.3 UV installatie	8
	2.4 Fasering van het onderzoek	9
	2.5 Monstername programma en te analyseren parameters	10
	2.5.1 Monstername voor concentratiebepaling van gidsstoffen	11
	2.5.2 Spiking van gidsstoffen	11
	2.5.3 Bacteriologische betrouwbaarheid	11
<b>3</b>	<b>RESULTATEN</b>	<b>12</b>
	3.1 Verwijderingsrendementen van gidsstoffen	12
	3.1.1 DNF40 in combinatie met AOP, 8000 J/m <sup>2</sup>	12
	3.1.2 DNF80 in combinatie met AOP 3.000, 6.000 en 12.000 J/m <sup>2</sup>	12
	3.1.3 DNF120 in combinatie met AOP-4.000 en 12.000 J/m <sup>2</sup>	14
	3.2 Concentratiefactor van de geteste membranen	14
	3.3 De drie membranen met elkaar vergeleken	16
	3.4 Het effect van AOP in alle experimenten	17
	3.5 De effecten van nanofiltratie en AOP gecombineerd	18
	3.6 Verwijdering van macroparameters	18
	3.7 Transmissie van licht	20



<b>3.8</b>	Verwijdering van PFAS	20
3.8.1	Toelichting op PFAS metingen	20
3.8.2	Resultaten PFAS verwijdering	21
<b>3.9</b>	Verwijdering van antibiotica resistentie	22
3.9.1	Opzet onderzoek en uitgevoerde analyses	22
3.9.2	Resultaten antibiotica resistentie	23
<b>3.10</b>	Microbiologische parameters	26
3.10.1	Toelichting op de gemeten parameters	26
3.10.2	Resultaten microbiologische parameters	26
<b>3.11</b>	Verwijderingsrendementen volgens de revisie van EU richtlijn Stedelijk Afvalwater	27
<b>4</b>	PRESTATIES VAN DE PILOT INSTALLATIES	31
<b>4.1</b>	Prestaties van de nanofiltratie	31
4.1.1	dNF40 - november 2020 tot juli 2021	31
4.1.2	dNF80 – van 3 november 2022 tot 6 februari 2023	32
4.1.3	dNF120 - van 12 juli tot 10 oktober 2022	34
4.1.4	Discussie hydraulische membraanperformance	34
4.1.5	Overwegingen bij toepassing van nanofiltratie op de rwzi	35
<b>4.2</b>	Prestaties UV-waterstofperoxide	36
<b>5</b>	TOEPASBAARHEID VAN HET GEPRODUCEERDE WATER	37
<b>5.1</b>	Kwaliteitseisen vanuit landbouw	37
<b>5.2</b>	Kwaliteitseisen vanuit EU richtlijn hergebruik effluent voor irrigatie	39
<b>5.3</b>	NF én AOP voor toepassing in landbouw?	40
<b>6</b>	SPIEGELEN AAN HAALBAARHEIDSTUDIE	41
<b>6.1</b>	Uitgangspunten ontwerp NF filtratie voor rwzi van 100.000 i.e.	42
<b>6.2</b>	Uitgangspunten UV-peroxide dosering	42
<b>6.3</b>	Kosten nabehandeling van rwzi 100.000 ie	43
6.3.1	Kosten van nanofiltratie	43
6.3.2	Kosten van AOP	44
6.3.3	Stichtingskosten NF + AOP	44
6.3.4	Operationele kosten	44
<b>6.4</b>	CO <sub>2</sub> footprint	45
<b>6.5</b>	Verwijdering van gidsstoffen	45
<b>7</b>	CONCLUSIE	46
<b>8</b>	REFERENTIES	48
BIJLAGE I	GEANALYSEERDE PARAMETERS	49
BIJLAGE II	RESULTATEN VAN PFAS ANALYSES	50

# 1

## INLEIDING

### 1.1 AANLEIDING ONDERZOEK

Door de beschikbaarheid van nieuwe technologie ziet Waterschap Aa en Maas kansen om het nagezuiverde effluent van rwzi Asten geschikt te maken voor hoogwaardig hergebruik, zoals gietwater voor de glastuinbouw en proceswater voor industrie. In een haalbaarheidsstudie STOWA (2020-22) is o.a. gebleken dat met capillaire nanofiltratie een hoge waterkwaliteit behaald kan worden tegen relatief lage kosten (ca. € 0,50/m<sup>3</sup>). Hiermee wordt (waarschijnlijk) een microbiologisch betrouwbaar water geproduceerd met verwijdering van vrijwel alle opgeloste deeltjes en kleurcomponenten.

In de haalbaarheidsstudie is ook aangegeven dat niet alle (organische) microverontreinigingen tegengehouden worden met nanofiltratie. Dit is sterk afhankelijk van welk type nanofiltratie-membraan wordt toegepast. Een dicht membraan heeft een hoge verwijdering maar vraagt meer energie en heeft een lagere flux (lager debiet per m<sup>2</sup> membraanoppervlak) en is daarmee duurder. Een open membraan houdt goed deeltjes tegen maar minder goed de organische microverontreinigingen. Voor de verwijdering van de gidsstoffen is het daarom van belang om praktijkmetingen te verrichten bij verschillende membraantypen.

Voor een hoger verwijderingsrendement kan na de membraanfiltratiestap een nabehandeling met UV en waterstofperoxide geplaatst worden. Doordat de membranen de kleurcomponenten verwijderen neemt de transmissie van het water aanzienlijk toe, waardoor behandeling met UV efficiënt kan plaatsvinden. Daarnaast geeft deze hybride opwerking extra robuustheid voor het leveren van bacteriologisch en chemisch betrouwbaar water op een kwaliteitsniveau dat drinkwater benadert.

### 1.2 DOELSTELLING ONDERZOEK NF EN AOP ASTEN

De technische haalbaarheid van deze technologiecombinatie werd vanaf april 2021 tot eind oktober 2022 getest op de rwzi Asten. Primaire doelstelling was te laten zien dat uit rwzi effluent water van hoge kwaliteit gemaakt kan worden met de combinatie van capillaire nanofiltratie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>oxidatie. Daarnaast werd onderzocht wat het verwijderingsrendement is t.a.v. de verwijdering van medicijnresten en andere microverontreinigingen per zuiveringsstap.

#### 1.2.1 ONDERZOEKSDOELEN

Het pilot onderzoek op de rwzi Asten had de volgende onderzoeksdoelen:

- Bepaling van het verwijderingsrendementen van de gidsstoffen van het IPMV over de pilotinstallatie. Hierbij wordt nadrukkelijk gekeken wat het verwijderingsrendement is per stap, dus het afzonderlijke rendement over het membraan en over de UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> behandeling. De bepaling van het rendement gebeurt zoveel mogelijk conform de (voorlopige) werkinstructie 'bemonstering en chemische analyse medicijnresten in RWZI-afvalwater' zoals die in het IPMV is opgesteld;

- Bepalen van de biologische effecten (reductie ecotoxicologie) conform de (voorlopige) handreiking voor het uitvoeren van biologische effectmonitoring bij vergaande zuivering van RWZI-effluenten;
- Bepalen van de CO<sub>2</sub>-footprint:
  - gespecificeerd als de CO<sub>2</sub>-footprint conform het CO<sub>2</sub>-model van het IPMV
- Doorvertalen van de pilotopstelling naar operationele kosten voor full-scale installaties (energie, chemicaliënverbruik, onderhoud etc.).
  - uitgangspunt conform de STOWA richtlijn o.b.v. een rwzi met een ontwerpcapaciteit van 100.000 ie à 150 gram TZV;
- Inschatting van de kostprijs voor het te hergebruiken water;
- Inzicht in de hergebruikstoepassingen in relatie tot de verschillende membraantypen en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> doseringen.
- Een aantal malen is bij alle pilots van het IPMV, dus ook in Asten, doorgemeten wat het verwijderingsrendement is van PFAS en antibiotica resistente genen en bacteriën.

#### ***Wat gebeurt er met het concentraat?***

Membranfiltratie is in principe een concentratiestap, de tegengehouden componenten worden met het concentraat afgevoerd. Voor een volwassen toepassing van membranfiltratie moet voor deze stroom een goede bestemming of verdere behandeling worden gevonden. In dit onderzoek wordt de concentraatproblematiek slechts zijdelings meegenomen. Hoofdstuk 3.10 gaat in op de mate waarin het membraan het aangeboden water kan opconcentreren. In hoofdstuk 4.1.5 wordt nader ingegaan op dit vraagstuk en hoe hiermee omgegaan kan worden. In andere onderzoeken, bijvoorbeeld bij Waterschap Vechtstromen, wordt op grotere schaal onderzocht of het actiefslibstelsysteem de concentraatstroom zelf zou kunnen verwerken.

Op basis van deze onderzoeksresultaten wordt inzicht verkregen of capillaire nanofiltratie een doelmatige technologie is voor de verwijdering van organische microverontreinigingen. Aanvullend wordt inzicht verkregen in de nut en noodzaak van aanvullende UV behandeling met een doorvertaling naar de hergebruikpotentie van het water.

#### **1.2.2 TRL NIVEAU**

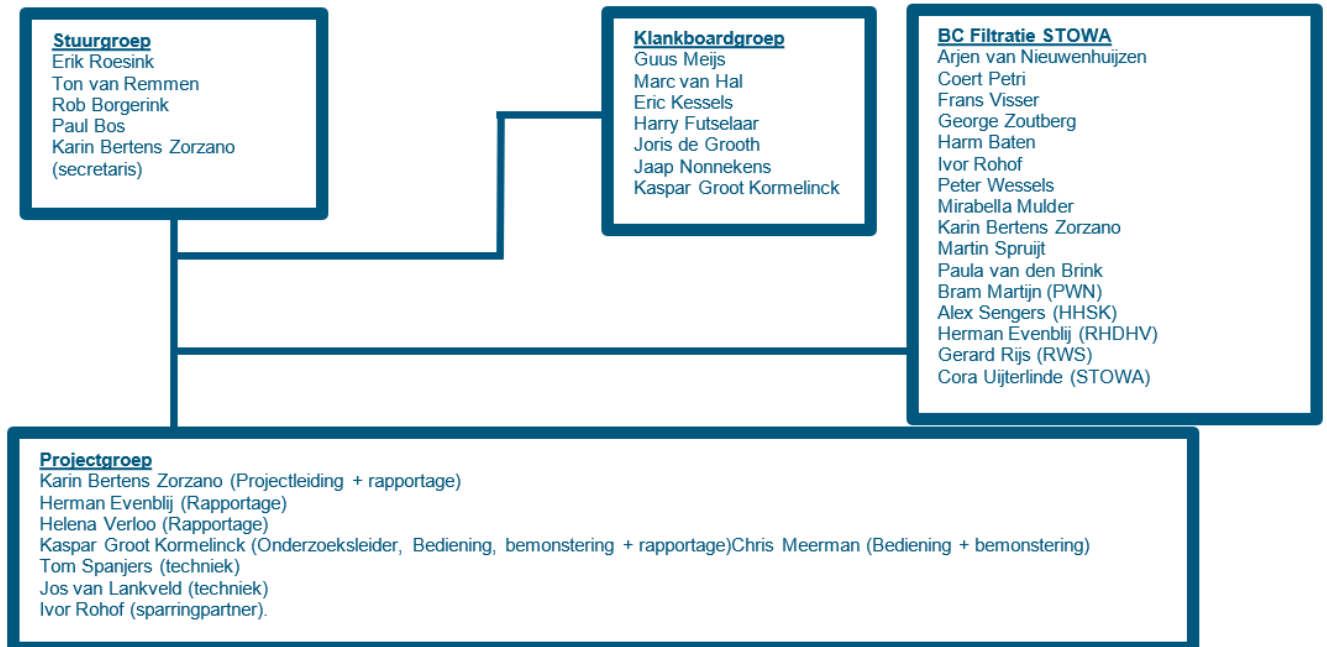
Directe capillaire nanofiltratie op rwzi effluent is op pilotschaal getest en heeft daarmee een TRL van 5. Behandeling van rwzi effluent met UV en waterstofperoxide is eveneens op pilotschaal getest en heeft eveneens een TRL van 5. Voor andere toepassingen (industriële waterbehandeling en drinkwaterbereiding, in het kader van desinfectie bijvoorbeeld) zijn beide technologieën al op TRL 8-9. De combinatie op rwzi effluent is echter nog niet in de praktijk bewezen. Na de voorstudie op rwzi Asten wordt het TRL niveau geschat op 5 en na het afronden van de pilot wordt voor de gecombineerde technieken het TRL niveau 5 behaald. Het beoogde vervolgonderzoek bij Vechtstromen en de lopende studie bij NWO brengt de technologie op TRL 6 of 7. Het onderzoek in samenwerking met STOWA wordt daarom gezien als belangrijke tussenstap om de technologie verder te brengen tot demonstratieniveau.

### **1.3 OPZET EN ORGANISATIE**

Figuur 1 geeft het overzicht weer van de projectorganisatie. Waterschap Aa en Maas trad op als gastheer voor de pilot installatie en als penvoerder voor dit project. In het onderzoek waren de leveranciers van de beide te onderzoeken technologieën nauw betrokken. De projectuitvoering lag bij de projectgroep, die werd aangestuurd door de Stuurgroep, waarbij

de uitvoering vrijwel volledig bij NX Filtration en UV-van Remmen lag. In de klankbordgroep werd input gegeven vanuit onderwijs, onderzoek en LTO. Via de Begeleidingscommissie Filtratie van STOWA werd geborgd dat de aanpak en rapportage overeenkomen met de eisen die daaraan gesteld worden vanuit het IPMV. De financiering van het onderzoek wordt gedragen door STOWA, Waterschap Aa en Maas, NX Filtration en UV-Van Remmen.

FIGUUR 1 PROJECTORGANISATIE VAN PILOT DIRECTE NANOFILTRATIE EN AOP OP EFFLUENT VAN RWZI ASTEN



# 2

## ONDERZOEKSOPZET

In het onderzoek dat op rwzi Asten plaatsvond is de resulterende effluentkwaliteit onderzocht van de opstelling met verschillende membranen (400, 800 en 1200 dalton) en instellingen van de UV (3.000 – 12.000 J/m<sup>2</sup>) en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dosering (10 tot 20 mg/l).

### 2.1 RWZI ASTEN

De rwzi Asten behandelt het ingezamelde afvalwater van de huishoudens en bedrijven. Door drie strengen wordt het afvalwater van de volgende rioleringsgebieden aangevoerd:

- Streng Helenaveen : Helenaveen, Neerkant, Liessel, de Hutten en Heusden
- Streng Someren : Someren-Heide, Someren-Zuid, Someren-Noord en Lierop
- Streng Vlierden : Vlierden, Ommel en Asten

De voornaamste processen van de rwzi zijn het zuiveren van afvalwater, vergisten van slib en het ontwateren van resterend uitgedist slib. In de onderstaande tekst is het proces op de rwzi verder toegelicht onder de kopjes “waterlijn”.

#### WATERLIJN RWZI ASTEN

Het rioolwater voor de rwzi Asten wordt door middel van persleidingen en vrijvvalleidingen in de ontvangput van de zuivering verzameld. De rwzi is ontworpen voor de verwijdering van SS en het langs biologische weg verwijderen van CZV, BZV, stikstof en fosfaat. Onder normale omstandigheden ondergaat het aangeboden afvalwater de volgende mechanische en biologische behandelingen.

FIGUUR 2 OVERZICHTSFOTO RWZI ASTEN



### *Ontvangstvoorzieningen*

Het afvalwater wordt met behulp van drie vijzels (à 850 m<sup>3</sup>/uur) de rwzi in gebracht. Het rioolwater van gemaal de Hutten (max. 350 m<sup>3</sup>/uur) wordt direct, via een stripperput, na de vijzels op niveau ingebracht. De rwzi is hydraulisch begrensd op 2.900 m<sup>3</sup>/uur. Om eventuele stankproblemen te voorkomen is de ontvangstput voorzien van een chemicaliën-doseerunit.

### *Roosters en zandvang*

Het rioolwater wordt door fijnroosters geleid waarmee het grof materiaal uit het afvalwater wordt verwijderd. Het roostervuil wordt gespoeld en ontwaterd en wordt daarna afgevoerd naar de regionale afvalstort. Het spoelwater wordt terug naar de zandvanger geleid. Verder doorloopt het rioolwater een zandvanger. In de zandvanger bezinkt het zand en ander zwaar materiaal naar de bodem: een schraper verwijdert het bezonken materiaal uit de zandvanger. Het zandvangmateriaal wordt verzameld in een container. Een recyclebedrijf voert het zandvangmateriaal af en maakt het geschikt voor hergebruik. Op de zandvanger is een duikschot aangebracht om drijfvuil tegen te houden. Dit drijfvuil wordt afgevoerd naar een recycle bedrijf die het verwerkt in een vergisting.

Het mechanische voorgezuiverde rioolwater passeert een selector. De selector draagt bij aan de beheersing van de slibindex, omdat hierin door specifieke procesomstandigheden het slib goede bezinkeigenschappen krijgt.

### *Beluchting*

Het voorgezuiverde afvalwater wordt naar een beluchtingscircuit geleid. Om een goede nitrificatie en denitrificatie te kunnen bewerkstelligen zijn in het beluchtingscircuit aerobe en anoxische ruimten gecreëerd. Hiervoor zijn drie puntbeluchters geïnstalleerd. Om de voortstuwing te garanderen en tussentijdse bezinking van het slib te voorkomen, zijn er ook voortstuwingsgeïnstalleerd.

In het beluchtingscircuit wordt CZV, stikstof en fosfaat verwijderd. Om dit proces goed te laten verlopen is het beluchtingscircuit voorzien van diverse online metingen (ammonium, nitraat en zuurstof). Aan de hand van het gemeten ammoniumgehalte in het beluchtingscircuit worden de puntbeluchters aangestuurd tot het benodigde zuurstofgehalte is bereikt. Het ammoniumgehalte wordt elke 20 minuten bepaald.

Indien de ammoniummeting niet goed functioneert wordt de regeling om gezet naar zuurstofregeling. Het actief slib neemt fosfaat op. Verwijdering van fosfaat vindt plaats door een deel van het slib uit het systeem te onttrekken (spuislib). Er is een mogelijkheid om chemicaliën te doseren in het beluchtingscircuit en selector. In de toekomst zou dosering van chemicaliën nodig kunnen zijn om biologische processen te stimuleren, dan wel als aanvulling op deze biologische processen.

### *Nabezinking*

Middels een verdeelwerk wordt het water/slibmengsel verdeeld over zes nabezinktanks. Deze zes nabezinktanks scheiden het slib van het gezuiverde afvalwater door middel van bezinking. Het grootste deel van het slib wordt teruggevoerd naar het beluchtingscircuit en de selector. Een klein deel wordt gespuid naar de banddikker. Het gezuiverde afvalwater wordt via de effluentgoten geloosd op het oppervlaktewater (de Voordeldonsche Broekloop).

## 2.2 NF PILOT



De membraanpilot is opgebouwd rondom één verticaal opgestelde membraanmodule (zie ook Figuur 3, p. 8), die in crossflow wordt bedreven. Het effluent van de rwzi wordt voorbehandeld met een AMIAD filter met een poriegrootte van 200  $\mu\text{m}$ . Het concentraat van het NF-membraan wordt teruggevoerd in de waterlijn van de rwzi. De installatie was voorzien van een automatische sampler, waarmee het inkomende rwzi effluent, het permeaat en het concentraat tijdstipproportioneel konden worden bemonsterd.

Er is een drietal membranen getest met verschillende afscheidingskarakteristieken (MWCO<sup>1</sup>), het molecuulgewicht van de nog af te scheiden componenten wordt steeds groter. Anders gezegd, kleine verbindingen zullen steeds minder tegengehouden worden bij oplopende MWCO. Een overzicht van molecuulgewichten van de gidsstoffen is opgenomen in Tabel 1. Hierin is te zien dat op twee stoffen na (irbesartan en clarithromycine), alle gidsstoffen kleiner zijn dan de cutoff van de dNF40. De mate van verwijdering van deze stoffen hangt af van de vorm van het molecuul, de lading en ladingssverdeling in het molecuul en de interactie met andere componenten in het water.

**TABEL 3** LINKS:GIDSSTOFFEN EN MOLGEWICHTEN; RECHTS: MEMBRAANTYPE EN MWCO

Stofnaam	Molmassa (g/mol)	Membraan	MWCO (Dalton, g/mol)
Som 4-,5-methylbenzotriazol	133	DNF40	400
benzotriazol	119	DNF80	800
carbamazepine	236	DNF120	1.200
clarithromycine	748		
diclofenac	296		
gabapentine	171		
hydrochloorthiazide	297		
irbesartan	428		
metoprolol	267		
propranolol	259		
sotalol	272		
sulfamethoxazol	253		
trimethoprim	290		
venlafaxine	277		

1 MWCO Molecular Weight Cut Off – inschatting, hangt af van de afmetingen, de vorm, lading en polariteit van de geteste component, en van de test condities. Standaard wordt getest met Magnesiumsulfaat bij 5 mmol/L, 3 bar, 25°C, crossflow 0,5 m/s

Naar verwachting zal de verwijderingsefficiëncy van de membranen voor de gidsstoffen dus afnemen. Dit wordt gecompenseerd door de toepassing van UV en peroxide. De membranen zullen wel altijd de transmissie verbeteren, waardoor UV-AOP een efficiënte tweede stap kan zijn. Daarnaast is de verwachting dat de transmembraandruk lager kan worden bij oplopende MWCO. Energetisch zijn membranen met een hogere MWCO dus mogelijk interessanter. Een andere optie is dat bij een hogere flux wordt gewerkt, waardoor de investering in membranen lager wordt.

De eigenschappen van de membraanpilot zijn hieronder samengevat.

Capaciteit voedingspomp	m <sup>3</sup> /h	2
Capaciteit circulatiepomp	m <sup>3</sup> /h	10
Voorfilter	µm	200
Te doseren reinigingschemicaliën	chloorbleekloog, natronloog, citroenzuur	

#### MEMBRAANMODULE

Membraanmateriaal		modified PES
MWCO	Dalton	400, 800 en 1200
Retentie magnesiumsulfaat (dNF12)		n.b.
Retentie magnesiumsulfaat (dNF80)		76%
Retentie magnesiumsulfaat (dNF40)		91%
Binnendiameter membraanvezel	mm	0,7
Membraanoppervlak dNF40, dNF80	m <sup>2</sup>	43
Membraanoppervlak dNF120	m <sup>2</sup>	50
Behuizing		PVC
Maximale TMP	bar	6

De gehanteerde bedrijfsparameters tijdens de pilotproeven:

Membraanflux	l/m <sup>2</sup> /h	20-30
Crossflowsnelheid	m/s	0,5
Recovery	%	80%
Filtratiecyclus (filtratie/reiniging)	min/min	60/1
Reinigingsfrequentie FF, luchtspoeling	na # cycli	1
Reinigingsfrequentie chemische reiniging	na # cycli	36-72

Het membraanfiltratieproces is een scheidingsstap, waarbij allerlei componenten aan de voedingskant van het membraan ophopen. Hierdoor kunnen vervuilingmechanismen in werking treden die verder filtratie hinderen. Om de vervuilingmechanismen te voorkomen of te onderbreken wordt in de pilot gebruik gemaakt van drie typen reiniging.

#### FORWARD FLUSH

Met de forward flush wordt de voedingskant van het membraan gespoeld, de belangrijkste functie van de forward flush is het uitspoelen van opgehoopte deeltjes. De forward flush wordt over het algemeen gecombineerd met een ander type reiniging, zoals de backwash of de luchtreiniging.

#### LUCHTREINIGING

Bij een luchtreiniging wordt de membraanmodule gedraind, dat wil zeggen dat de inhoud van de membraanrietjes wordt afgevoerd. Daarna wordt de module doorstroomd met een



mengsel van water en perslucht, zodat sprake is van een intensieve forward flush. Het uitgespoelde materiaal wordt afgevoerd naar het influent van de rwzi.

### BACKFLUSH

Bij een backflush wordt de stroomrichting door het membraan omgekeerd. Eventueel aangekoekte verontreiniging wordt zo teruggespoeld en met een forwardflush uit de module gespoeld. Afhankelijk van de toepassing kan deze stroom afgevoerd worden met het concentraat, of zoals in de pilot, terug naar de rwzi.

### CHEMISCHE REINIGING

De chemische reiniging vond plaats door achtereenvolgens een zure en een oxidatieve stap. De zure reiniging bestond uit een 5.000 ppm oplossing van citroenzuur, bij een pH van 2,8. Deze werd over het membraan gecirculeerd, zonder permeaatonttrekking.

De oxidatieve reiniging bestond uit een dosering van chloorbleekloog bij een actief chloor gehalte van 150 ppm, waarbij met natronloog de pH werd verhoogd tot 11,5. Deze oplossing werd gedurende 30 minuten over het membraan gecirculeerd, zonder permeaatonttrekking.

FIGUUR 3 DE OPSTELLING VAN NANOFILTRATIE PILOT (A. EN B.) EN DE UV-INSTALLATIE (C.) IN ZEECONTAINERS



A. OPSTELLING MET 1 MEMBRAANMODULE



B. OPSTELLING VOOR DOSERING VAN REINIGINGSCHEMICALIËN VOOR DE NF



C. DE UV INSTALLATIE

## 2.3 UV INSTALLATIE

De UV installatie bestond uit een UV-C<sup>2</sup> reactor met een inhoud van 5,9 liter, met daarin 1 lamp en ingebouwde statische mixer geoptimaliseerd voor AOP toepassingen. De intensiteit van de lichtinbreng kon geregeld worden tussen 3.000 en 15.000 J/m<sup>2</sup>. Verder werd waterstofperoxide in-line gedoseerd, met een regelbereik tussen 5 en 50 mg/l.

De installatie is voorzien van een katalytisch bed van actiefkool voor destructie van resten waterstofperoxide, met een verblijftijd van 2 minuten. De sampling voor bepaling van de efficiency vindt plaats vóór de destructor. Door te variëren met het behandelde debiet en opgenomen vermogen van de lamp kon de UV-dosis ingesteld worden.

2 UV-C heeft met een golflengte van 100 tot 280 nm de kleinste golflengte binnen het UV spectrum (100 tot 420 nm)

**UV INSTALLATIE**

Aantal lampen	-	1
Vermogen per lamp	W	120-205
Totaal opgesteld vermogen	W	205
Inhoud reactor	L	5,9
Doseerrange	J/m <sup>2</sup>	3.000 – 15.000
Behandelde debiet	m <sup>3</sup> /h	0,7 – 1,9

**WATERSTOFPEROXIDEDOSERING**

Opslagvolume	L	50
Doseerconcentratie	mg/l	5-50

**2.4 FASERING VAN HET ONDERZOEK**

Vanaf november 2021 tot februari 2023 is met een drietal membraantypes onderzoek gedaan naar de verwijdering van microverontreinigingen. Het permeaat van de membranen is aanvullend behandeld met AOP, bij verschillende instellingen, zie Tabel 2. Het gaat in totaal om 6 instellingen. In de combinatie van instellingen wordt gebalanceerd tussen afscheidingsrendement van het membraan (wat afneemt bij oplopende MWCO) enerzijds en anderzijds de inbreng van oxidatievermogen (wat toeneemt bij oplopende UV-doses en peroxidedosering). Daarbij speelt het risico dat door het testen van te hoge UV-doseringen de technologie zich uit de markt prijst. Gestreefd is naar het doormeten van drie doseringen, waarbij aan de onderkant van de doseerrange wordt aangesloten op doseringen die getest zijn op oppervlaktewater (Kruithof et al, 2007) en de proeven op Panheel (KWR, 2016), zie ook onderstaand overzicht.

	UV-doses J/m <sup>2</sup>	Peroxidedoseringen mg/l
Oppervlaktewater (Kruithof et al, 2007)	2.000-10.000	0-15
Effluent onderzoek Panheel (KWR, 2016)	1.500-3.000	10

In eerste instantie is bij een UV-dosis van 8.000 J/m<sup>2</sup> onderzocht of een peroxidedosering nog nodig was. Dat bleek inderdaad het geval te zijn, deze is doorgemeten bij een dosering van 10 mg/l.

Wat betreft de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dosering werden drie doseringen toegepast: van 10, 15 en 20 mg/l.

Van het membraan met de kleinste cutoff werd verwacht dat de benodigde energie-input van de AOP het laagst zou zijn, maar ook dat de te bereiken flux het laagst zou zijn (c.q. de benodigde transmembraandruk het hoogst). Een verhoging van de cutoff zou naar verwachting leiden tot hogere fluxen, maar ook tot meer energie-input van de AOP.

**TABEL 4 OVERZICHT VAN VERSCHILLENDE INSTELLINGEN GEBRUIKT TIJDENS DE PILOT TESTEN**

Membraan	UV-doses (J/m <sup>2</sup> )	Peroxidedosering (mg/l)	Getest vanaf	Getest tot
DNF40 (400 dalton)	8.000	10	24 november 2021	12 juli 2022
DNF80 (800 dalton)	3.000, 6.000, 12.000	10, 15	12 juli 2022	10 oktober 2022
DNF120 (1.200 dalton)	4.000, 12.000	15, 20	3 nov 22	6 feb 23

## 2.5 MONSTERNAME PROGRAMMA EN TE ANALYSEREN PARAMETERS

De testlocatie Asten is hieronder schematisch weergegeven met de voor projectdoelen specifieke monsterpunten. Door dit document zullen deze nummers altijd verwijzen naar deze monsterpunten:

1. Rwzi influent (niet in schema)
2. Influent direct nanofiltration
3. Effluent direct nanofiltration
4. Effluent UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> behandeling
5. Concentraat direct nanofiltration

De volgende parameters worden gelogd en gerapporteerd

- Directe Nanofiltratie
  - Recovery
  - Transmembraandruk
  - Crossflow snelheid
  - Flux
  - Water temperatuur
  - Systeemdebiet
  - Elektriciteitsverbruik
- UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> geavanceerde oxidatie
  - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentratie
    - Voor/na UV, na katalytisch bed
  - UV-C Transmissie
    - Voor/na directe nanofiltratie
    - In concentraat van NF
    - Voor/na UV, na katalytisch bed
  - Systeemdebiet
  - Electriciteitsverbruik
  - Afgegeven UV-C dosis (rekenkundig bepaald)
- RWZI Asten
  - Capaciteit RWZI
  - Troebelheid effluent RWZI

De opzet van deze testen vertaalt zich naar onderstaande monsternamefrequentie per analysepakket en per fase, zie ook Figuur 4. De analysepakketten zijn opgenomen in Bijlage I.

FIGUUR 4 PLANNING VAN GETESTE MEMBRANEN EN BEMONSTERINGEN

	Maand	Januari		Februari		Maart		April		Mei		Juni		Juli		Augustus		September		Oktober		November		December		Januari		Februari																																
		Week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	1	2	3	4	5	6
DNF-40	Indraaien Membraan	[Green bar]																																																										
	Interactie DNF40-AOP 8000	[Green bar]																																																										
DNF-120	Indraaien Membraan	[Grey bar]																																																										
	Interactie DNF120-AOP 4000	[Grey bar]																																																										
	Interactie DNF120-AOP 12.000	[Grey bar]																																																										
DNF-80	Indraaien Membraan	[Blue bar]																																																										
	Interactie DNF80-AOP 3000	[Blue bar]																																																										
	Interactie DNF80-AOP 6000	[Blue bar]																																																										
Aquon	Meetpakket BIO	[Blue bar]																																																										
	Meetpakket ZM	[Blue bar]																																																										
Aquon	Meetpakket WK	[Green bar]																																																										
	Meetpakket DST	[Green bar]																																																										
IMD	Antibioticaresistentie + PFAS	[Pink bar]																																																										
Brabant Water	Microbiologische parameters	[Pink bar]																																																										

### 2.5.1 MONSTERNAME VOOR CONCENTRATIEBEPALING VAN GIDSSTOFFEN

#### NANOFILTRATIE

De monstername werd volumeproportioneel alleen bij droogweer (DWA-debiet) uitgevoerd. Zowel de chemische analyses als de biologische effectmetingen zijn aan mengmonsters uitgevoerd, met enige aanpassingen, conform Stowa voorschriften: "Handreiking bemonstering en chemische analyse medicijnresten rwzi-effluent t.b.v. Bijdrageregeling zuivering medicijnresten V0.7". Hiervoor zijn 24-uur volumeproportionele monsters verzameld. Het verschuiven van de influent en effluentbemonstering was niet relevant omdat de verblijftijd in het systeem enkele minuten betreft. Deze mengmonsters zijn gekoeld en opgeslagen en daarna ter analyse aangeboden.

#### AOP

Vanwege de korte verblijftijd en de hoge reactiesnelheid kon hier volstaan worden met steekmonsters. Zodoende konden op een dag meerdere instellingen bemonsterd worden.

### 2.5.2 SPIKING VAN GIDSSTOFFEN

Van een aantal stoffen is de concentratie dusdanig laag na nanofiltratie dat het effect van de nageschakelde UV niet altijd significant te bepalen is, omdat de concentratie nadert of lager is dan de rapportagegrens. Om die reden is gekozen om een spike-vloeistof te introduceren. In deze vloeistof zijn alle gidsstoffen van het IPMV aanwezig. De dosering van deze vloeistof is zodanig gekozen dat een verwijderingsrendement van 80% nog significant te meten is, dat wil zeggen dat na verwijdering van 80% de rapportagegrens nog niet onderschreden is.

### 2.5.3 BACTERIOLOGISCHE BETROUWBAARHEID

De bacteriologische betrouwbaarheid van de pilot installatie werd vastgesteld, door het meten van drie parameters: koloniegetal 22°C, E.coli en enterococci.

Het koloniegetal vormt een maat voor bacteriën die van nature in water voorkomen en groeien. De bepaling van het koloniegetal bij 22 °C wordt meestal uitgevoerd om de invloed van het zuiveringsproces op de aanwezige micro-organismen te meten en ter vaststelling van de nagroei van bacteriën in het distributiesysteem.

Bij het uitvoeren van periodieke metingen in de praktijk wordt een geometrisch jaargemiddelde als maximaal toegestane waarde aangehouden van 100 kve/ml (kolonievormende eenheden). Bij het uitvoeren van een incidentele meting, bijvoorbeeld bij het in gebruik nemen van een drinkwaterinstallatie na desinfectie, wordt een actiegrens aangehouden van 1.000 kve/ml. Het is geen reden tot afkeur van drinkwater, maar kan wel reden zijn tot het nemen van aanvullende maatregelen, zoals het spuien van de installatie of opnieuw uitvoeren van een desinfectie. Na het nemen van de maatregel is herbemonstering aan te bevelen.

E.coli en intestinale enterococci zijn acute gezondheidskundige parameters. Het gaat om bacteriën die direct een negatief effect kunnen hebben op de gezondheid van de mens. Voor beide parameters geldt dat ze niet aanwezig mogen zijn in het drinkwater. De norm is 0 kve/100 ml.

# 3

## RESULTATEN

Alle onderstaande resultaten hebben betrekking tot de prestaties van de pilot installatie. Het effect van het zuiveringsproces op het totale verwijderingsrendement is in deze resultaten niet meegerekend.

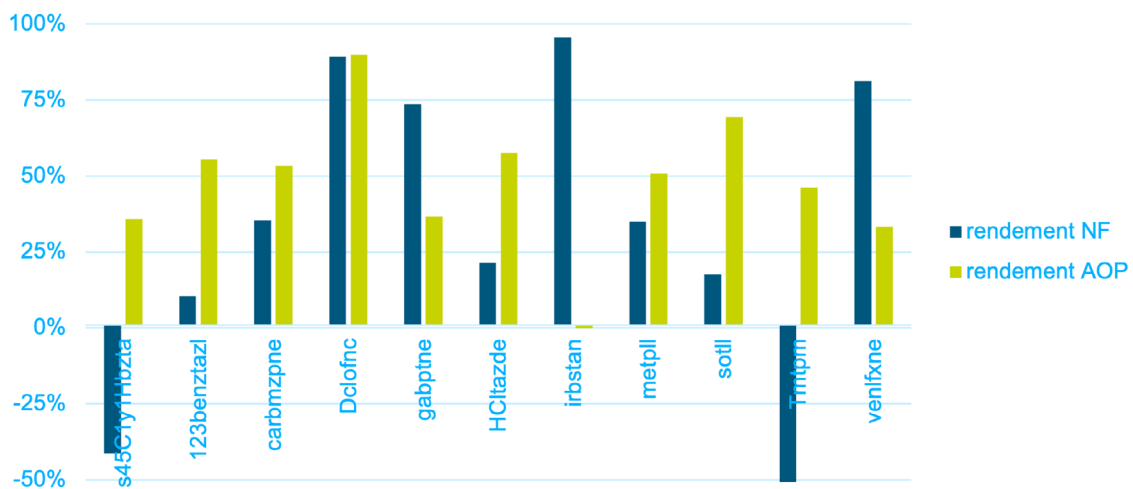
### 3.1 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VAN GIDSSTOFFEN

#### 3.1.1 DNF40 IN COMBINATIE MET AOP, 8000 J/M<sup>2</sup>

Het dNF40 membraan is het meest dichte membraan en heeft van november 2021 tot juli 2022 stabiel gedraaid op rwzi Asten.

Het membraan blijkt veel van de gidsstoffen deels door te laten, en heeft voor één stof een verwijderingsrendement hoger dan 70%, zie Figuur 5. Bedenk hierbij dat de verwijdering is berekend ten opzichte van het onbehandelde rwzi effluent. De toegepaste dosering van 8.000 J/m<sup>2</sup> blijkt een aantal van de nog overblijvende (en deels ook gespikete) stoffen (verder) te verwijderen. Omdat een aantal stoffen is gespiket is niet het totale rendement getoond. Van de varianten benzotriazool (som 4- en 5-methylbenzotriazool en benzotriazool), carbamazepine en trimethoprim zijn de verwijderingsrendementen lager dan 0%. Dat betekent dat de effluentconcentratie hoger is dan de ingaande concentratie. Dit kan o.a. komen doordat in het influent deze stof als metaboliet aanwezig is en dat deze tijdens de behandeling terugvalt in de moedercomponent. Een andere mogelijkheid is dat de foutmarge op de meting in onbehandeld rwzi effluent groter is dan in het permeaat. Het permeaat is veel schoner waardoor het ‘makkelijker’ is om nauwkeurig te meten.

FIGUUR 5 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN DNF40 EN AOP 8000



#### 3.1.2 DNF80 IN COMBINATIE MET AOP 3.000, 6.000 EN 12.000 J/M<sup>2</sup>

In Figuur 6 zijn de verwijderingsrendementen gepresenteerd bij de drie geteste instellingen van de AOP.

Uit deze grafieken kan afgeleid worden dat het rendement van nanofiltratie wordt verlaagd met een oplopende cutoff, een aantal stoffen heeft een slechtere verwijdering dan het dNF40

membraan. Diclofenac en carbamazepine zijn hiervan goede voorbeelden. De AOP kan de gespikete stoffen met 2 of 3 logeenheden verlagen, onafhankelijk van de cutoff van het membraan. Vanaf een intensiteit van 6.000 J/m<sup>2</sup> worden alle stoffen tot meer dan 70% verwijderd. Dit lijkt tegenstrijdig met de verwijderingsprestaties uit de vorige paragraaf, bij 8.000 J/m<sup>2</sup>. Verder valt op dat benzotriazool bij de middelste instelling de hoogste ‘productie’ lijkt te hebben.

**FIGUUR 6** VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VOOR DE GIDSSTOFFEN BIJ DNF80, EN DRIE INSTELLINGEN VOOR AOP; DOSERING VAN WATERSTOFPEROXIDE 10 MG/L



### 3.1.3 DNF120 IN COMBINATIE MET AOP-4.000 EN 12.000 J/M<sup>2</sup>

Dit is het meest open membraan. Dat betekent dat van alle drie membranen dit het minst tegen zal houden, en daarvoor een hogere UV-dosering nodig zal zijn om de gewenste verwijderingsresultaten te bereiken. De gekozen UV-dosering liggen daarom op 4.000 en 12.000 J/m<sup>2</sup>. Met dit membraan zijn er minder ervaringen opgedaan dan met de eerste twee. De verwijderingsrendementen zijn gepresenteerd in Figuur 7. Het membraan blijkt zoals verwacht de gidsstoffen in mindere mate tegen te houden. Voor een (vrijwel) volledige verwijdering is vervolgens een dosering van 12.000 J/m<sup>2</sup> nodig, de lage dosering is daarvoor onvoldoende. Ter referentie, op de rwzi Aarle-Rixtel is onderzoek gedaan naar directe UV-peroxide op rwzi effluent. Door het ontbreken van een voorbehandeling was de UV transmissie lager (60%), waarbij de UV-dosis 17.000 J/m<sup>2</sup> bedroeg en er werd 30 mg/l peroxidized gedoseerd. Met deze instellingen kon ten opzichte van het rwzi influent een rendement van 70% op 7 van de 11 gidsstoffen bereikt worden.

FIGUUR 7 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VOOR DE GIDSSTOFFEN BIJ DNF120, EN TWEE INSTELLINGEN VOOR AOP; DOSERING VAN WATERSTOFPEROXIDE 20 MG/L



### 3.2 CONCENTRATIEFACTOR VAN DE GETESTE MEMBRANEN

Membranefiltratie is een scheidingsstap, de door het membraan tegengehouden stoffen eindigen in het concentraat. Als de concentraties in het permeaat lager worden, moet dat leiden tot een hogere concentratie in het concentraat. Als de retentie van een stof 100% bedraagt, is de theoretische concentratiefactor rechtstreeks afhankelijk van de toegepaste

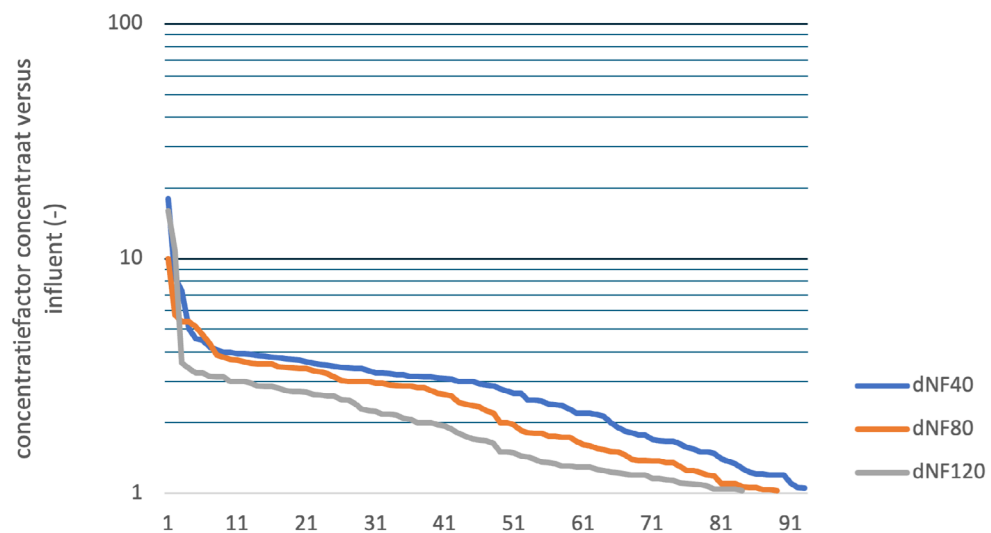
recovery. Bij een recovery van 80% eindigen alle tegengehouden stoffen in 20% van het volume en bedraagt de concentratiefactor dus maximaal 5. De mate waarin de stoffen door het membraan worden opgeconcentreerd, is gepresenteerd in Figuur 8. Hierbij zijn per membraan de aantallen stoffen gepresenteerd in volgorde van concentratiefactor, indien deze groter dan 1 is. Telkens heeft een klein aantal stoffen een concentratiefactor van 10 of meer, dit lijkt te wijzen op een anomalie in de analyse, of heeft wellicht te maken met terugval van metabolieten naar de moedercomponent. Bij dNF40 gaat het om Amoxicycline en jomeprol, bij dNF80 en dNF120 om Johexol.

Verder is te zien dat (zoals verwacht) bij grotere MWCO het aantal stoffen afneemt dat een concentratiefactor groter dan 1 heeft. Van de in totaal 119 geanalyseerde stoffen hebben 79 tot 93 stoffen een concentratiefactor die groter is dan 1, bij afnemende MWCO. De concentratiefactor van 5 wordt voor praktisch geen enkele stof gehaald, terwijl dit te verwachten is voor stoffen die significant zwaarder zijn dan de MWCO van het membraan. Dit kan veroorzaakt zijn door de periodieke afluut van concentraat door het reinigingsregime. Elk uur wordt een deel van het concentraat afgelaten bij een flush, na een flush wordt het systeem weer nieuw gevuld met onbehandeld effluent. Hierdoor krijgt de concentratie wellicht niet de kans om verder te stijgen. Voor de overige stoffen die kleiner zijn geldt dat de concentratiefactor beïnvloed wordt door andere stoffeïenschappen dan de molecuulgrootte. Theoretisch zou voor sommige stoffen de permeaatconcentratie op kunnen lopen als de concentratiefactor hoog genoeg wordt, dat is is bij deze pilot niet waargenomen.

**TABEL 5** AANTALLEN STOFFEN MET CONCENTRATIEFACTOR GROTER DAN 1 BIJ VERSCHILLENDE MEMBRANEN. TOTAAL AANTAL GEANALYSEERDE STOFFEN: 119

	dNF40	dNF80	dNF120
Aantal stoffen met concentratiefactor > 1	93	86	79

**FIGUUR 8** CONCENTRATIEFACTOR VOOR ALLE GEMETEN STOFFEN, PER GETEST MEMBRAAN

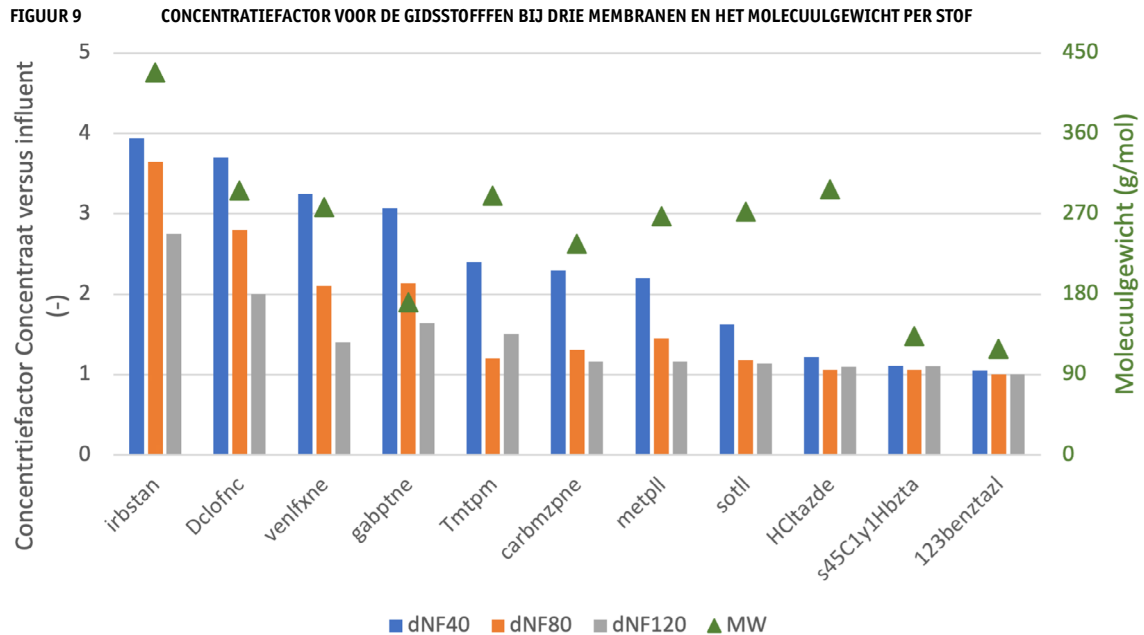


In Figuur 9 zijn de concentratiefactoren voor alle gidsstoffen gepresenteerd, de groene driehoekjes laten het molecuulgewicht zien per stof. Ook hier is een trend te zien afhankelijk van het toegepaste membraan: een hogere MWCO<sup>3</sup> leidt tot een lagere concentratiefactor voor alle stoffen. De relatie met het molecuulgewicht van de individuele stoffen is het

3 MWCO Molecular Weight Cut Off – inschatting, hangt af van de afmetingen, de vorm, lading en polariteit van de geteste component, en van de test condities. Standaard wordt getest met Magnesiumsulfaat bij 5 mmol/L, 3 bar, 25°C, crossflow 0,5 m/s



sterkst voor irbesartan en de benzotriazolen, en wellicht ook voor diclofenac en venlafaxine. Voor de overige stoffen geldt dat andere eigenschappen dan het molecuulgewicht (lading, ladingsverdeling, geometrie van het molecuul) dominant zijn voor de mate waarin ze worden doorgelaten door het membraan.



### 3.3 DE DRIE MEMBRANEN MET ELKAAR VERGELEKEN

In Tabel 4 zijn samenvattend voor de 11 gidsstoffen de verwijderingspercentages gepresenteerd van de drie geteste membranen, dus exclusief AOP. De verwijderingsprestatie neemt af bij toenemende MWCO, voor de 7 beste van de 11 gidsstoffen neemt de gemiddelde verwijdering af van 61% tot 25%.

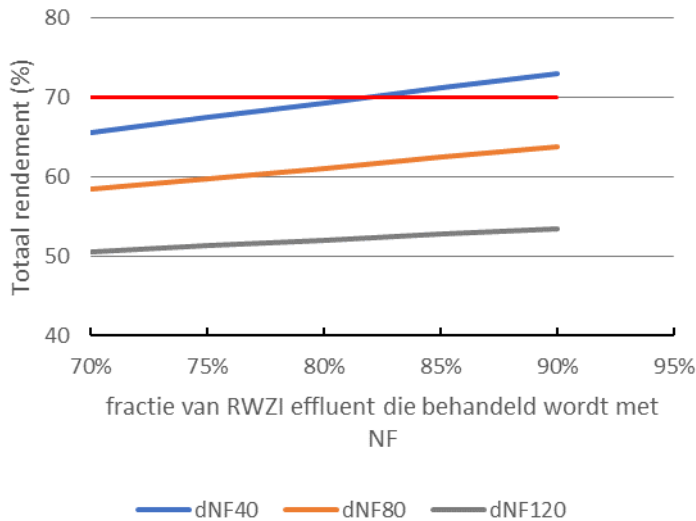
**TABEL 6 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VAN ALLEEN DE NANOFILTRATIE BIJ DRIE MEMBRAANTYPEN, TEN OPZICHTE VAN RWZI EFFLUENT**

Stofnaam	dNF40	dNF80	dNF120
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	-41%	-2%	-44%
1,2,3-benzotriazol	11%	-52%	0%
carbamazepine	35%	6%	-4%
diclofenac	89%	62%	27%
gabapentine	74%	41%	25%
hydrochloorthiazide	21%	7%	17%
Irbesartan	95%	96%	61%
Metoprolol	35%	10%	19%
Sotalol	18%	3%	6%
Trimethoprim	-120%	40%	0%
Venlafaxine	81%	50%	20%
Beste 7 uit 11	61%	44%	25%
Gemiddelde van 11 stoffen	27%	24%	12%

Afhankelijk van de hoeveelheid water die met de nanofiltratie wordt behandeld zal het resulterende verwijderingsrendement van de rwzi als totaal ook veranderen. Met de webtool van STOWA 2020-06 voor standaard rwzi is berekend wat het resulterende rendement is bij toepassing van de drie membranen zonder AOP, uitgaand van een verwijderingsren-

dement van 40% van de gidsstoffen in de rwzi, zie Figuur 10. Om op de rwzi Asten een totaal rendement van 70% te bereiken met het dNF40 membraan moet meer dan 80% van het effluent behandeld worden met nanofiltratie. Merk op dat alle stoffen van de top 7 telkens deze prestatie moeten halen, als 1 van de stoffen minder wordt verwijderd komt het totaalrendement ook in gevaar. De dNF80 en dNF120 kunnen niet voldoen aan de eisen van het IPMV.

**FIGUUR 10** TOTAAL VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN 7 BESTE UIT 11 GIDSSTOFFEN OP EEN RWZI DIE EEN FRACTIE VAN HET EFFLUENT BEHANDELT MET NF, VOOR DE DRIE GETESTE MEMBRAANTYPEN



### 3.4 HET EFFECT VAN AOP IN ALLE EXPERIMENTEN

In Tabel 5 is van alle experimenten het rendement van de AOP gepresenteerd, ten opzichte van het gespikete NF-permeaat. De dosering van 8.000 J/m<sup>2</sup> op het permeaat van dDN40 membraan bleek niet in staat om de verwijdering substantieel te verhogen, terwijl vrijwel alle prestaties van de combinatie dNF80 en 3.000 J/m<sup>2</sup> vergelijkbaar of beter waren. Mogelijk dat dit veroorzaakt is door veroudering van het dNF40 membraan waardoor de transmissiviteit van het permeaat lager was, in vergelijking met de transmissiviteit na het dNF80 membraan dat nieuwer was.

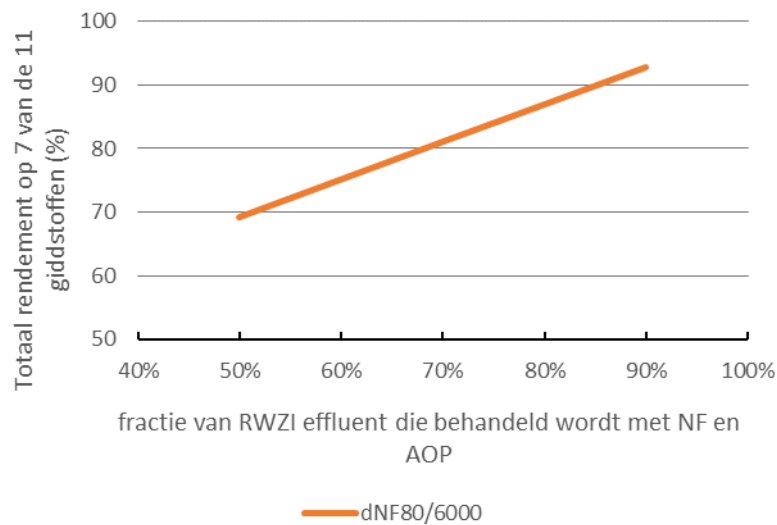
**TABEL 7** VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN UV-WATERSTOFFEROXIDE BIJ VERSCHILLENDE UV DOSES, TEN OPZICHTE VAN GESPIKET NF-PERMEAAT

Stofnaam↓	Membraan:	dNF40	dNF80	dNF80	dNF80	dNF120	dNF120
UV dosis (J/m <sup>2</sup> ):		8.000	3.000	6.000	12.000	4.000	12.000
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -dosering (mg/l):		10	10	15	15	15	20
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol		22%	59%	97%	97%	64%	97%
1,2,3-benzotriazol		48%	66%	98%	99%	61%	98%
Carbamazepine		56%	66%	98%	98%	67%	97%
Diclofenac		93%	95%	92%	94%	90%	92%
Gabapentine		58%	44%	91%	92%	45%	93%
Hydrochloorthiazide		49%	63%	94%	95%	51%	91%
Irbesartan		97%	97%	0,0%	0%	56%	83%
Metoprolol		64%	70%	97%	99%	65%	98%
Sotalol		73%	76%	97%	98%	58%	97%
Trimethoprim		-40%	43%	93%	90%	60%	90%
Venlafaxine		88%	88%	80%	75%	63%	71%
Beste 7 uit 11		76%	80%	96%	97%	67%	96%
Gemiddelde van 11 stoffen		55%	70%	85%	85%	62%	92%

### 3.5 DE EFFECTEN VAN NANOFILTRATIE EN AOP GECOMBINEERD

Met de resultaten van de twee vorige paragrafen is ter illustratie uitgerekend welk deel van het rwzi effluent behandeld moet worden om op 7 van de 11 gidsstoffen in het uiteindelijk opgemengde effluent een 70% verwijderingsrendement te bereiken. Hierbij is uitgegaan van het dNF80 membraan (met 44% verwijdering) en een AOP van 6.000 J/m<sup>2</sup> met een peroxidodosering van 15 mg/l (96% verwijdering). Samen met de verwijdering van 40% in de rwzi geeft dit in de behandelde stroom een verwijderingsrendement van 97,8% voor 7 van de 11 gidsstoffen. Als 52% van het effluent met dit rendement wordt behandeld bedraagt het totaal verwijderingsrendement 70% voor 7 van de 11 gidsstoffen.

**FIGUUR 11** TOTAAL VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN 7 BESTE UIT 11 GIDSSTOFFEN OP EEN RWZI DIE EEN FRACTIE VAN HET EFFLUENT BEHANDELT MET MEMBRANEN EN AOP; MET 96% VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE NF+AOP OP 7 UIT 11 GIDSSTOFFEN



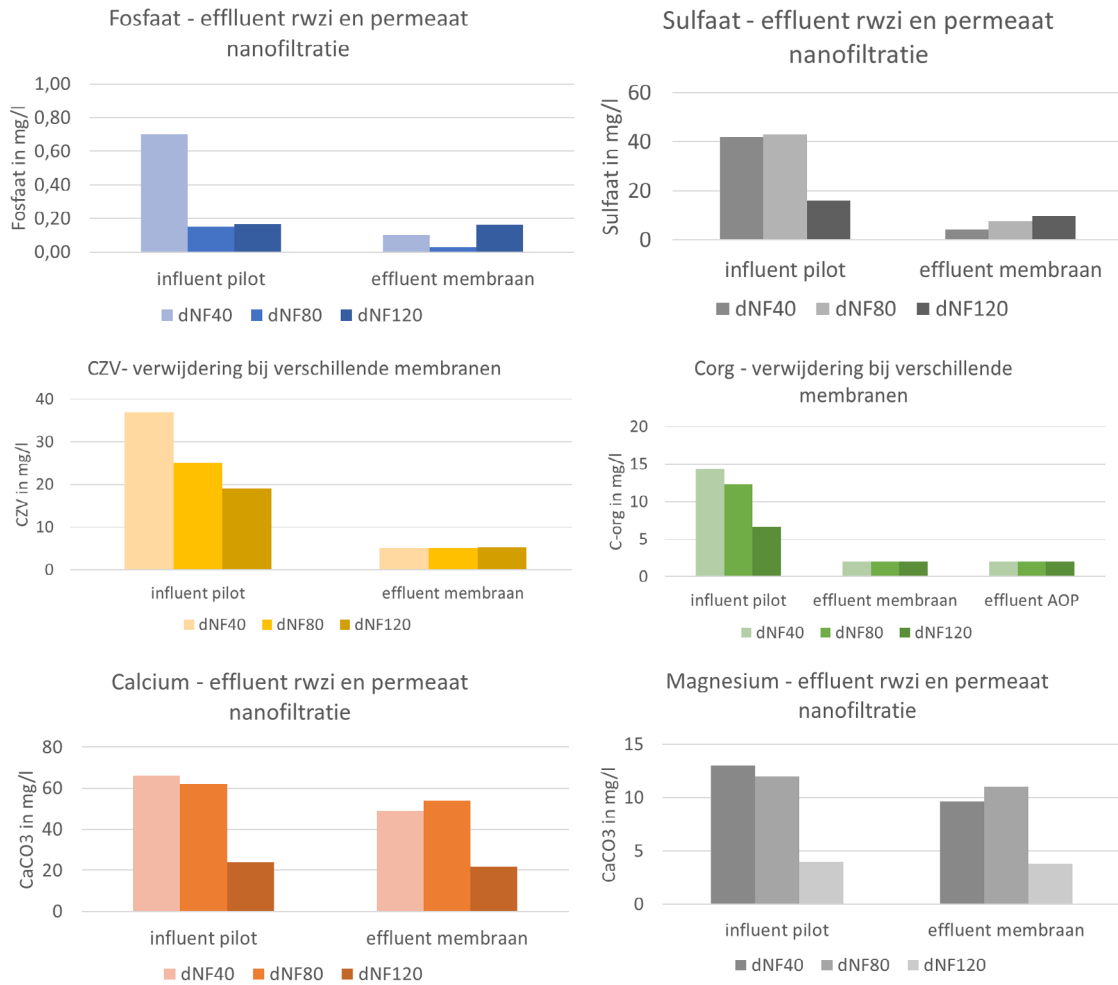
Hierbij dient bedacht te worden dat in deze berekening ervan is uitgegaan dat het teruggevoerde concentraat opnieuw een zekere verwijdering van microverontreinigingen zal laten zien. Dit is waarschijnlijk een overschatting, waardoor de concentraties in de bypass op den duur zullen toenemen. Dit effect is in dit onderzoek niet onderzocht. Verder geldt uiteraard dat aangezien het om een rendement van 7 stoffen gaat, het rendement van elke individuele stof van grote invloed is op het totaal rendement.

### 3.6 VERWIJDERING VAN MACROPARAMETERS

Het nanofiltratiemembraan houdt veel stoffen voor een groot gedeelte tegen, met een verwijdering van vrijwel 100% voor grote organische moleculen tot vrijwel 0% voor eenwaardige zouten zoals chloride.

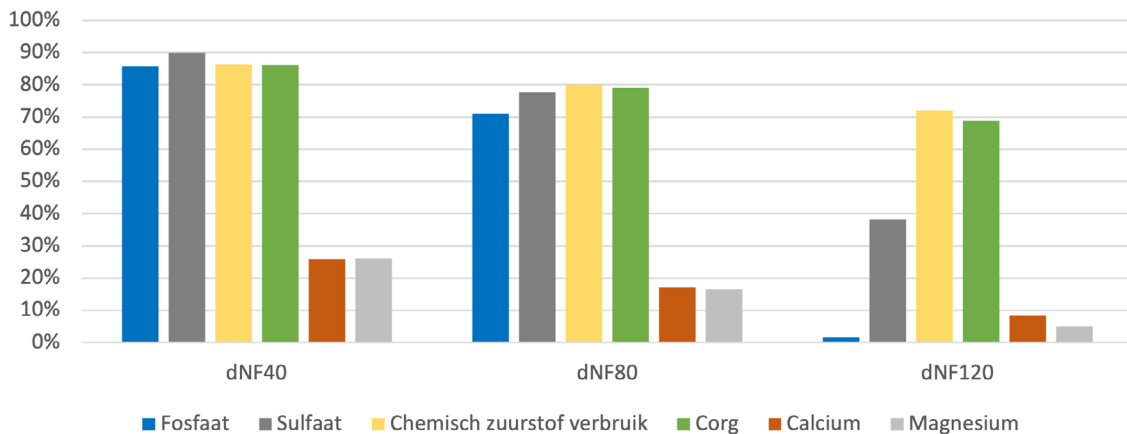
Hierbij zijn van de macroparameters vooral interessant het chemisch zuurstofverbruik (CZV), fosfaat (driewaardig), sulfaat en hardheid (magnesium, calcium, beide tweewaardig). In Figuur 12 zijn deze concentraties gepresenteerd en in Figuur 13 de verwijderingspercentages. Let daarbij op dat de ingaande concentraties grote variatie vertonen, de verwijderingsrendementen moeten daarom gezien worden in samenhang met de concentraties.

**FIGUUR 12** CONCENTRATIES IN RWZI EFFLUENT (INFLUENT PILOT) EN PERMEAAT VAN DE NANOFILTRATIE VAN ZES MACROPARAMETERS



Het organisch koolstof werd door de dNF40 en dNF80 tot minder dan de rapportagegrens van 2 mg/l verwijderd, de dNF120 had eenmaal een concentratie van 2,05 mg/l. De impact van het membraan is goed te zien bij sulfaat, dat bij oplopende cutoff een oplopende permeaat-concentratie heeft.

**FIGUUR 13** VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VAN FOSFAAT, SULFAAT, CZV, ORGANISCHE Koolstof, CALCIUM EN MAGNESIUM, BIJ VERSCHILLENDE MEMBRAANTYPES



### 3.7 TRANSMISSIE VAN LICHT

Nanofiltratie kan een deel van de in water aanwezige kleurcomponenten verwijderen, waardoor de lichtdoorlatendheid, transmissiviteit, verandert. Bij oplopende MWCO is de verwachting dat de lichtdoorlatendheid zal afnemen, immers hoe hoger de MWCO hoe meer licht absorberende componenten worden doorgelaten. De mate waarin licht doordringt in het water wordt als percentage gemeten op een vast afstand van de lichtbron, en aangeduid als transmissie. In dit onderzoek is de transmissie gemeten op 10 mm, en daarom gepresenteerd als T10, zie ook Tabel 6. De transmissie bij het meeste dichte membraan bedraagt ca. 97% en van het meest open membraan 85 tot 88%. Deze hoge transmissiewaarden maken het water zeer geschikt voor behandeling met UV, bij relatief lage input kan een hoge dosis toegediend worden.

**TABEL 8** TRANSMISSIE IN PERMEAAT VAN DE NF EN AFLOOP GEAVANCEERDE OXIDATIE

	Transmissie na nanofiltratie – T10 (%)		Transmissie na NF+AOP – T10 (%)	
			Tussen haakjes: UV dosis J/m <sup>2</sup> – mg H2O2/l	
dNF40	95,7	96,7	(8000 J/m <sup>2</sup> , 10 mg/l)	
dNF80	93,6	95	(3000 J/m <sup>2</sup> , 10 mg/l)	
dNF80	93,6	97,6	(6000 J/m <sup>2</sup> , 15 mg/l)	
dNF80	93,6	96,0	(12000 J/m <sup>2</sup> , 15 mg/l)	
dNF120	83,6	85,8	(4000 J/m <sup>2</sup> , 15 mg/l)	
dNF120	83,6	87,7	(12000 J/m <sup>2</sup> , 20 mg/l)	

### 3.8 VERWIJDERING VAN PFAS

#### 3.8.1 TOELICHTING OP PFAS METINGEN

Uit eerder onderzoek naar PFAS bij rwzi (STOWA rapport 2021-46) is naar voren gekomen dat PFAS niet of nauwelijks worden verwijderd op de reguliere zuivering. In veel gevallen is er zelfs sprake van een ogenschijnlijke toename PFAS in rwzi's. Niet geanalyseerde (onbekende) precursors in het influent worden in de rwzi omgezet naar wel geanalyseerde (bekende) precursors en stabiele PFAS met een korte ketenlengte (aangeduid met het aantal koolstofatomen: C4 – C8). Voor een toelichting op wat PFAS en PFAS precursors zijn en hun belang in de rwzi wordt verwezen naar STOWA rapport 2019-46 en 2019-47. In het huidige onderzoek wordt gekeken naar de effectiviteit van aanvullende zuiveringstechnieken bij het verwijderen van PFAS én PFAS precursors uit rwzi-effluent.

Er zijn bij rwzi Asten ten behoeve van PFAS analyses verschillende membranen en UV-instellingen onderzocht (in duplo):

- Membraan dnf 40, 400 Dalton, UV 1.800 J/m<sup>2</sup>
- Membraan dnf 120 1200 Dalton, UV 4.000 J/m<sup>2</sup>
- Membraan dnf 120, 1200 Dalton, UV 12.000 J/m<sup>2</sup>
- Membraan dnf 80, 800 Dalton, UV 3.000 J/m<sup>2</sup>
- Membraan dnf 80, 800 Dalton, UV 12.000 J/m<sup>2</sup>

Per instelling zijn debietproportionele 24 uursmonsters genomen op 3 verschillende monsterpunten:

- Influent van de nanoinstallatie = effluent nabezinktank reguliere zuivering
- Effluent van de nanoinstallatie = influent UV/H2O2 behandeling
- Effluent UV/H2O2 behandeling

De hier besproken resultaten hebben alleen betrekking op de eerste drie instellingen, die in de periode mei t/m november 2022 zijn bemonsterd en geanalyseerd. De overige instellingen moeten nog worden bemonsterd en/of geanalyseerd. Er worden drie verschillende analysetechnieken ingezet:

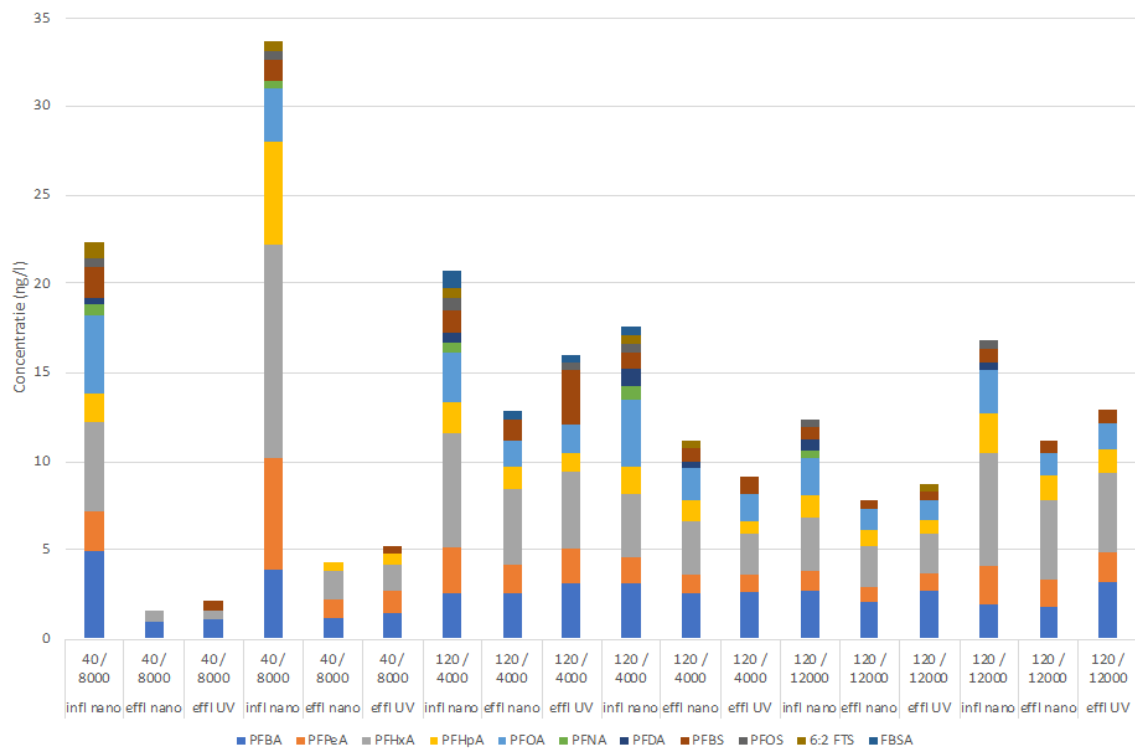
- Het standaard PFAS-analysepakket: 30 verschillende stoffen (stabiele PFAS zoals de bekende stoffen PFOS en PFOA, enkele vervangers daarvan en enkele precursors)
- Analyse van enkele eerder nog nauwelijks onderzochte PFAS met een zeer korte koolstofketen (<C4)
- De TOP-analyse of Totaal Oxideerbare Precursor analyse: een screeningsmethode om een inschatting van de totaal aanwezige precursors (zonder dat bekend is welke stoffen het precies zijn).

Op dit moment zijn alleen resultaten van de standaard analyses bekend.

### 3.8.2 RESULTATEN PFAS VERWIJDERING

De aangetroffen concentraties zijn in tabel 1 en figuur 1 weergegeven, de getalswaarden van de analyses zijn opgenomen in Bijlage I. Wat opvalt is dat de totaalconcentratie PFAS in het influent van de nanofiltratie (dus het effluent van de nabezinktank) varieert in de tijd, van 12 tot 34 ng/l. Door nanofiltratie neemt de PFAS concentratie in alle gevallen af, maar de afname is het grootst bij het fijnste membraan (400 Dalton, circa 90%). De afname bij het membraan van 1200 Dalton is circa 35%. Door UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> behandeling neemt op één uitzondering na in alle gevallen de totaal PFAS concentratie weer licht toe, maar blijft nog steeds lager dan in het influent van de nanofiltratie. Overall is de afname 87% bij het fijnste membraan (400 Dalton) en 26% bij het minder fijne membraan (1200 Dalton) bij de hoogste UV instelling. De lagere UV instelling bij dit membraan geeft een wisselend beeld. De hoogte van UV instelling lijkt geen doorslaggevende rol te spelen bij de verwijdering van PFAS binnen de geteste range (4000 – 12000 J/m<sup>2</sup>).

De verwijdering van PFAS door het fijnste membraan is conform verwachting: stabiele PFAS hebben een molecuulgrootte van ca 200 – 500 Dalton. Een membraan met een poriegrootte kleiner dan 90 Dalton zal in staat zijn om de meeste PFAS te verwijderen. Over de verwijdering van PFAS-precursors door nanofiltratie is nog weinig bekend. Ook over de invloed van UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> behandeling op PFAS en PFAS-precursors is nog weinig bekend. Mogelijk dat deze oxidatieve techniek door afbraak van precursors tot een toename van andere precursors en/of korte stabiele PFAS met korte ketens kan leiden. Op basis van de resultaten van de individuele PFAS is dit niet vast te stellen omdat de concentratie óf te laag zijn om iets zinnigs te kunnen zeggen óf is er geen eenduidige toe- of afname.



### 3.9 VERWIJDERING VAN ANTIBIOTICA RESISTENTIE

Door het onderzoeksbureau H2Oké is in 2022 onderzoek uitgevoerd naar de verwijdering van antibiotica resistentie. Dit onderzoek vond plaats in opdracht van STOWA en het IPMV, op alle op dat moment actieve pilots binnen het IPMV. De volgende paragraaf is door Imke Leenen opgesteld als deelrapportage van het onderzoek op de rwzi Asten.

#### 3.9.1 OPZET ONDERZOEK EN UITGEVOERDE ANALYSES

Er zijn diverse antibiotica resistente bacteriën (AMR), waarvan CPE (Carbapenamseproducerende enterobacteriaceae) bacteriën en ESBL (Extended spectrum beta-lactamases) bacteriën de meeste bekende en voorkomende zijn. De combinatie van de CPE- en ESBL-analyse geeft een goede indicatie van de aanwezigheid van darmbacteriën, die ongevoelig (resistent) zijn voor sommige antibiotica. CPE-bacteriën worden niet altijd aangetroffen in rwzi-effluent en de analyse hiervan is duur. Daarom is in dit project analyse van ESBL-analyse uitgevoerd. De analyse van *E. coli* bacteriën is eenvoudiger en goedkoper dan antibiotica resistente bacteriën (ESBL). Voor rioolwater wordt een verband tussen de aanwezigheid van *E. coli* en ESBL verwacht. Als blijkt dat deze relatie inderdaad bestaat dan zou kunnen worden volstaan met alleen analyse van *E. coli*: als er geen *E. coli* aanwezig is zullen AMR ook niet aanwezig zijn. *E. coli* is in deze studie met b2 verschillende analysemethoden uitgevoerd: de standaard methode voor (drink)water (LSA-methode) en een methode die mogelijk beter geschikt is in sterk vervuuld water (NBX-methode).

Als er antibioticaresistente bacteriën worden aangetroffen, kunnen er ook antibioticaresistente genen worden aangetroffen. De relatie hiertussen in rwzi-effluent is nog niet duidelijk. Wel zijn er aanwijzingen dat vergaande oxidatie van rwzi-effluent leidt tot meer antibioticaresistente genen. Daarom is ook de analyse van (20 geselecteerde) genen meegenomen.

Meetdagen	Gebruikt membraan
24-5-2022	dNF40
21-6-2022	dNF40
6-9-2022	dNF120
13-9-2022	dNF120
4-10-2022	dNF120
11-10-2022	dNF120
15-11-2022	dNF80

Monsterpunten Asten:

Er zijn op zeven momenten monsters genomen op 3 verschillende monsterpunten:

- Influent NF, dat is het effluent van de rwzi Asten
- Effluent NF
- Effluent UV

### 3.9.2 RESULTATEN ANIBIOTICA RESISTENTIE

De resultaten van de verwijdering van *E. coli* en ESBL (AMR) zijn hieronder weergegeven.

E.coli (kve / L)	influent pilot nano	effluent NF	effluent NF / UV
24-5-2022	8,5E+05	1,0E+02	1,0E+02
21-6-2022	1,2E+05	<10	<10
6-9-2022	5,0E+05	1,0E+02	<10
13-9-2022	7,5E+05	3,0E+02	<10
4-10-2022	9,5E+04	1,0E+02	<10
11-10-2022	1,1E+05	<10	<10
15-11-2022	3,6E+05	<10	<10

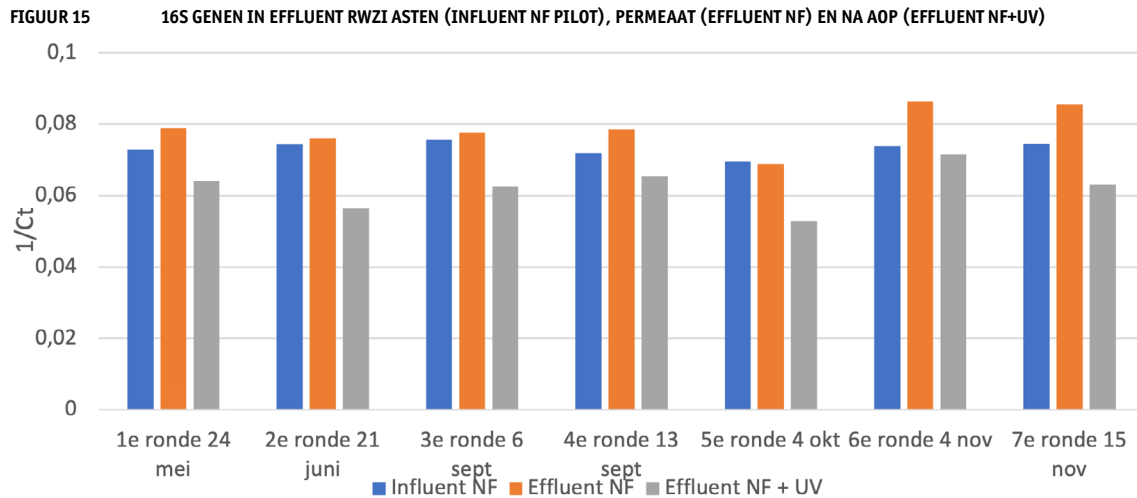
ESBL (kve / L)	influent pilot nano	effluent NF	effluent NF / UV
24-5-2022	6,3E+03	<10	<10
21-6-2022	2,1E+03	<10	<10
6-9-2022	3,7E+03	<10	<10
13-9-2022	4,5E+03	<10	<10
4-10-2022	6,5E+02	<10	<10
11-10-2022	4,4E+02	<10	<10
15-11-2022	1,7E+03	<10	<10

Op alle monsternamemomenten is het beeld vergelijkbaar. Er vindt een duidelijke verwijdering (circa 4 log) van *E. coli* plaats na nanofiltratie. Ook ESBL verwijdering is duidelijk aangetoond: er wordt minimaal 2 logverwijdering gemeten. Echter dit is niet specifiek vast te stellen omdat de concentraties in het influent van de pilot daarvoor te laag zijn.

Het effect van UV is niet meetbaar, vanwege de efficiënte verwijdering van de NF.

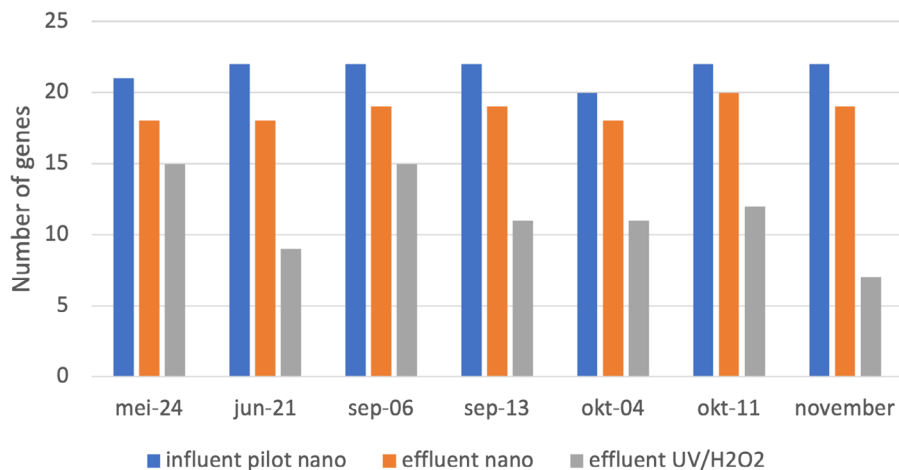
De analyse van de 16S concentratie (maat voor concentratie dna/genen) wordt hieronder weergegeven.





Er wordt een toename gezien van een genconcentratie (16S) na Nanofiltratie, mogelijk doordat cellen door de NF kapot gaan en alleen het genmateriaal het membraan kan passeren. Na UV-behandeling wordt een duidelijke afname gezien van de genconcentratie. Ook het aantal (soorten) genen is bepaald (zie hieronder) en hieruit blijkt dat het aantal soorten AMR genen per behandeling afneemt.

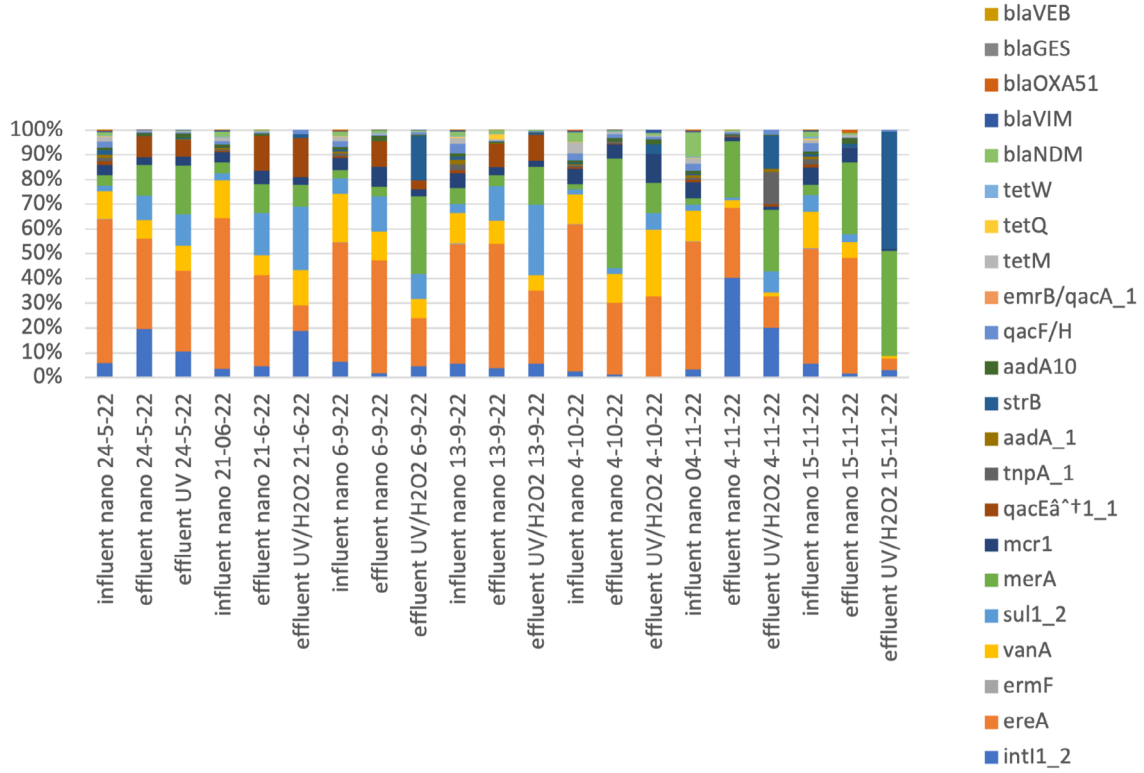
**FIGUUR 16 AANTAL GEN-SOORTEN IN EFFLUENT RWZI ASTEN EN NA BEIDE BEHANDELSTAPPEN**



Bovenstaande analyses geven aan dat UV behandeling een toegevoegde waarde heeft, want zelfs als kweekbare *E.coli* en ESBL niet meer kunnen worden aangetoond wordt een duidelijke afname van de AMR-genaantallen gevonden.

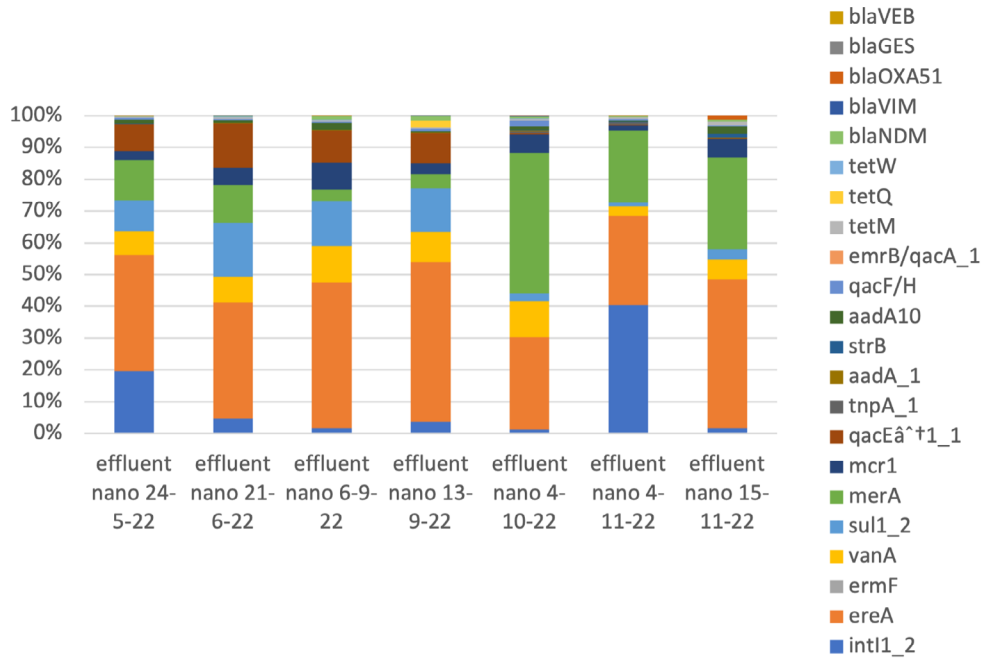
Dit wordt verder verduidelijkt door de analyse van de gemsamenstelling van de monsters. Er is een duidelijke verschuiving van de samenstelling na NF en na UV. Genen die in een relatief lage concentratie voorkwamen voor de behandeling zijn na beide stappen verdwenen.

FIGUUR 17 GEN-SAMENSTELLING PER MONSTER



De verwachting was dat NF-UV zowel antibioticaresistente bacteriën (ESBL) als genen goed zouden verwijderen. Deze resultaten bevestigen dit beeld. Er is geen effect waargenomen van de molecular weight cutoff van de verschillende geteste membranen, zie ook onderstaande figuur.

FIGUUR 18 IMPACT VAN MEMBRAAN OP GENSAMENSTELLING VAN HET PERMEAAT



### 3.10 MICROBIOLOGISCHE PARAMETERS

#### 3.10.1 TOELICHTING OP DE GEMETEN PARAMETERS

Bij elk membraan is door het laboratorium Hydroscope eenmaal een analyse gedaan op microbiologische parameters: coli, E-coli, enterokokken, intestinale enterokokken en het koloniegetal. Achterliggende gedacht bij deze analyse is dat verwacht mag worden dat door nanofiltratie en AOP de microbiologische kwaliteit van het water vergelijkbaar is met drinkwater.

De toelichting op deze parameters is overgenomen uit het adviesrapport dat bij de analyse-resultaten is bijgevoegd.

#### **ESCHERICHIA COLI (E-COLI)**

Dit is een bacterie die in de darmen van mensen en dieren voorkomt. De bacterie wordt daarom ook wel poepbacterie genoemd. Er zijn veel verschillende soorten Escherichia colibacteriën. Van sommigen kunt u ziek worden. Vooral zieke mensen, zwangere vrouwen en ouderen zijn vatbaar voor E-coli. Het kan leiden tot buikklachten. Escherichia coli mag niet in drinkwater worden aangetoond.

#### **ENTEROCOCCEN**

Dit zijn melkzuurbacteriën die voorkomen in de darmen van mens en dier en daar de spijsverteringsprocessen ondersteunen. Er zijn ongeveer 25 soorten Enterococcen, waarvan een aantal ziekteverwekkend kunnen zijn. Ze kunnen leiden tot bijvoorbeeld urineweginfecties, ontsteking van het hart (endocarditis), wondinfecties of buikabscessen. Enterococcen mogen niet in drinkwater worden aangetoond.

#### **COLI 37**

Dit betreft een indicatorparameter voor mogelijke fecale besmetting van drinkwater. Het water wordt onderzocht op de aanwezigheid van bacteriën uit de coligroep. Enkele soorten uit deze groep zijn Escherichia, Klebsiella, Citrobacter, Enterobacter, Hafnia en Serratia. Deze bacteriën komen over het algemeen in de darmen van mensen voor. Het watermonster wordt bij 37°C op het laboratorium op kweek gezet. Het is een snelle en relatief goedkope analysemethode. Het aantreffen van bacteriën uit de coligroep hoeft niet de betekenen dat er ziekteverwekkende bacteriën zijn aangetroffen, maar kan aanleiding zijn voor vervolgonderzoek.

#### **KOLONIEGETAL BIJ 22 °C**

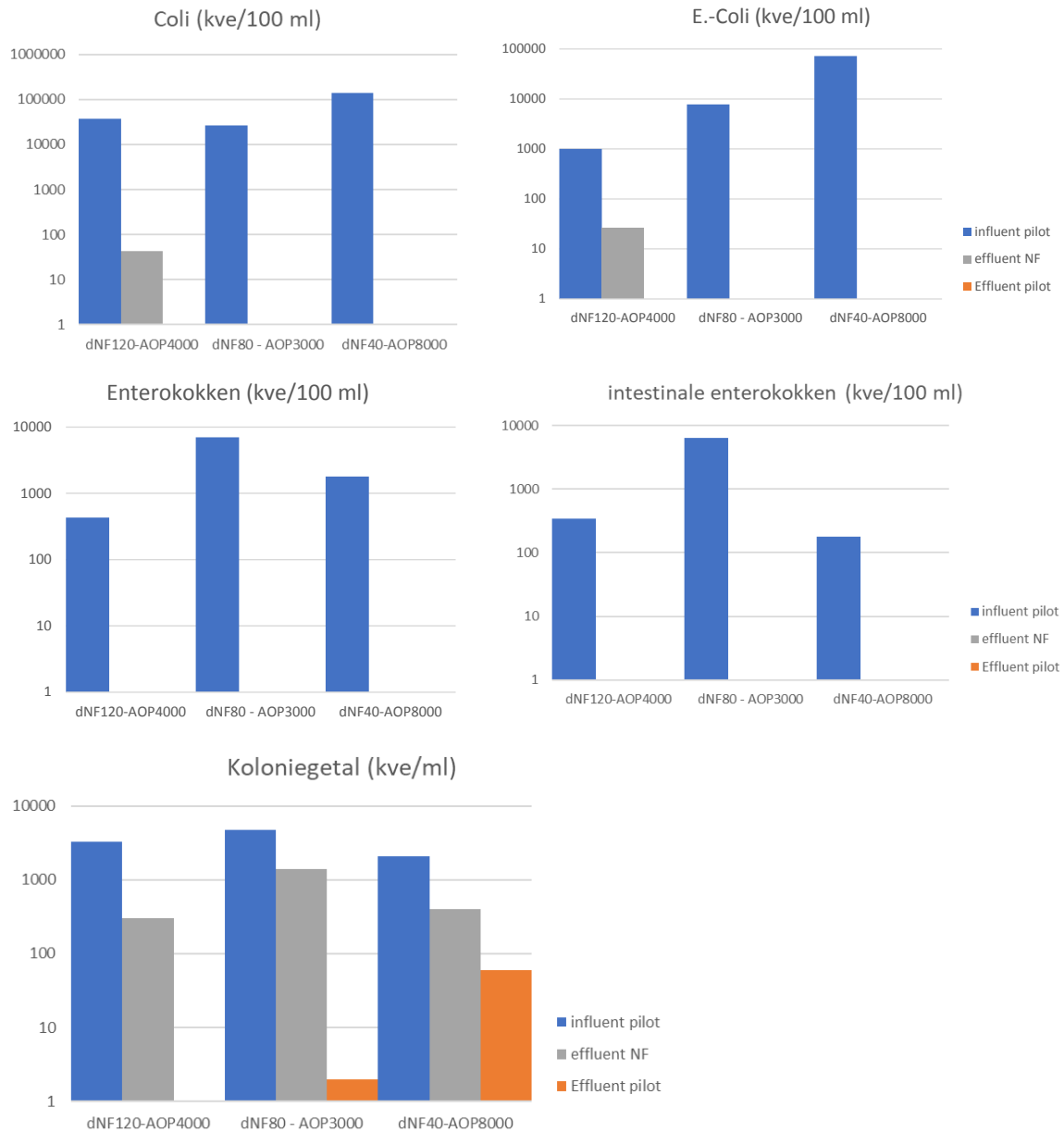
In drinkwater zitten van nature bacteriën. Onder ongunstige omstandigheden kunnen bacteriën in de drinkwaterinstallatie overmatig uitgroeien. Het koloniegetal bij 22°C is een indicatorparameter om nagroei in de waterinstallatie te meten. Bij het uitvoeren van periodieke metingen wordt een geometrisch jaargemiddelde als maximaal toegestane waarde aangehouden van 100 kve/ml. Bij het uitvoeren van een incidentele meting, bijvoorbeeld bij het in gebruik nemen van een drinkwaterinstallatie na desinfectie, wordt een actiegrens aangehouden van 1.000 kve/ml. Het is geen reden tot afkeur van drinkwater, maar kan wel reden zijn tot het nemen van aanvullende maatregelen, zoals het spuien van de installatie of opnieuw uitvoeren van een desinfectie. Na het nemen van de maatregel is herbemonstering aan te bevelen.

#### 3.10.2 RESULTATEN MICROBIOLOGISCHE PARAMETERS

Zoals verwacht heeft de nanofiltratie en AOP een desinfecterende werking. Dit geldt ook voor de dNF40 en dNF80, als ze zonder AOP worden gebruikt. De resultaten van de koloniegetalen laten zien dat er bacterien zijn gaan groeien aan de permeaatkant van het membraan. Naar

verwachting is deze groei te beheersen door regelmatig aan de permeatzijde te desinfecteren met bijvoorbeeld chloorbleekloog. De UV behandeling weet deze waarden voldoende te reduceren, waardoor een totaal logverwijdering van 2 tot 4 bereikt wordt. Desgevraagd heeft de vertegenwoordiger van Brabant Water bij deze resultaten (na NF+AOP) aangegeven dat deze voor Brabant Water geen reden zouden zijn om in actie te komen, mochten ze gemeten worden bij het tappunt van een drinkwateraansluiting.

FIGUUR 19 RESULTATEN VAN BACTERIOLOGISCHE ANALYSES



### 3.11 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VOLGENS DE REVISIE VAN EU RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER

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's en het IPMV. Er is sprake van twee categorieën stoffen, zie Tabel 6. In de revisie wordt gesteld dat rwzi's groter dan 100.000 i.e. moeten zijn voorzien van een aanvullende verwij-

4 Proposal for a revised Urban Wastewater Treatment Directive (europa.eu)

dering voor ‘micropollutants’ en daarnaast kleinere zuiveringen met een capaciteit van 10.000-100.000 i.e. die lozen op gevoelig oppervlaktewater vanwege risico’s voor de humane gezondheid of het (water)milieu. E.e.a. dient gerealiseerd te zijn in de periode 2030-2035 voor rwzi’s groter dan 100.000 i.e. en uiterlijk in 2040 voor kleinere rwzi’s.

**TABEL 9 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
		trimethoprim

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. Volgens de Nederlandse richtlijnen van het Ministerie van IenW dient het verwijderingsrendement berekend te worden over 7 van de 11 gidsstoffen. De verwijdering wordt berekend op dezelfde manier. Hierbij geldt een minimaal verwijderingsrendement in elk monster van 70%.

Op basis van de concept EU-gidsstoffen is een inschatting gemaakt van de verwijderingsrendementen die te behalen zijn met de referentietechnologieën ozonisatie, PACAS en Granulair Actief Koolfiltratie (GAK-filtratie) voor de standaard rwzi van het IPMV, zie Tabel 7. Deze zijn gelijk voor de concept EU-gidsstoffen en de Nederlandse gidsstoffen voor de nageschakelde verwijderingsrendementen van ozonisatie en gak-filtratie. Voor de toepassing van PACAS betekent het voldoen aan de 80% EU-norm dat de PAK-dosering naar verwachting verhoogd moet worden naar 20 mg/l in plaats van 15 mg/l. Voor alle referentie technologieën geldt dat de gekozen gidsstoffen anders zijn voor de EU-methode dan voor de Nederlandse methode.

Het aangenomen actiefslibrendement van de standaard rwzi kan voor de concept EU-gidsstoffen 40% zijn, net zoals voor de Nederlandse gidsstoffen<sup>5</sup>. Dit is echter afhankelijk van in welke mate de concept EU-gidsstoffen daadwerkelijk voorkomen. De concept EU-gidsstoffen Amisulpride, Candesartan en Clarithromycine komen over het algemeen in onvoldoende mate voor in Nederlandse influenten en effluenten van rwzi's. Dit is ook de reden waarom deze niet zijn opgenomen als gidsstof in Nederland. De concept EU-gidsstof Citalopram komt wel voldoende voor, maar is afgevallen als Nederlandse gidsstof vanwege een mogelijk te hoog verwijderingsrendement door het actiefslib (>50%)<sup>6</sup>. Voorgaande betekent niet dat de stoffen Amisulpride, Candesartan en Clarithromycine helemaal niet voorkomen in Nederlandse rwzi influenten en effluenten. Of dit het geval is hangt af van de specifieke rwzi.

De grotere spreiding in actiefslibrendementen op basis van de concept EU-gidsstoffen betekenen ook een grotere spreiding in overall verwijderingsrendementen over de rwzi (effluent rwzi ten opzichte van influent rwzi). Het 'EU actief slib rendement' is afhankelijk van de stoffen die aanwezig zijn in het influent van de rwzi en kan terugzakken naar 25% in plaats van 40% indien niet alle EU gidsstoffen aanwezig zijn. In Tabel 7 is uitgegaan van gidsstoffen die voldoende aanwezig zijn in Nederlandse influenten en effluenten van rwzi's: Citalopram is wel meegenomen, Amisulpride, Candesartan en Clarithromycine niet. Dit betekent dat het actiefslibrendement 25-35% bedraagt. Bij deze tegenvallende actiefslib rendementen is een nageschakeld rendement van 80% onvoldoende om het overall rendement van 80% te behalen: het overall rendement zal dan circa 75% bedragen.

In Tabel 7 zijn de verwijderingsrendementen weergegeven op basis van de concept EU gidsstoffen en Nederlandse gidsstoffen voor de uitgewerkte standaard rwzi van 100.000 i.e. voor de referentietechnologieën ozonisatie, PACAS en Granulair Actief Kool (GAK) filtratie<sup>7</sup> in vergelijking met de technologie in dit rapport. De informatie in deze tabel is gebaseerd op expert judgement en eerste resultaten van pilotinstallaties en actiefslibinstallaties in Nederland en dient daarom alleen als grove indicatie om het verschil tussen de concept EU-wetgeving en de Nederlandse richtlijnen te duiden en kunnen zeker niet als absolute getallen worden gebruikt.

- 5 Voor kenmerken van de standaard rwzi in het IPMV wordt verwezen naar Mulder, M., Berekening CO<sub>2</sub> footprint en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit rwzi-afvalwater, versie 28 december 2022
- 6 Bron: Mulder, M., Evaluatie Gidsstoffen - Ten behoeve van de bijdrageregeling 'Zuivering Medicijnresten' van het Ministerie van IenW en het InnovatieProgramma Microverontreinigingen uit RWZI-afvalwater van STOWA en het Ministerie van IenW, Definitieve versie 2, 9 juli 2021
- 7 Op basis van expert judgement Mirabella Mulder – Mirabella Mulder Waste Water Management, 4 augustus 2023

**TABEL 10 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)	NF+UV/H2O2
Instelling	0,7 g O <sub>3</sub> /g DOC	15-20 mg PAK/l	EBCT (verblijftijd): 30 min; standtijd 6 maanden	dNF80 6.000 J/m <sup>2</sup> 15 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l
Nageschakeld verwijderingsrendement (%)	80-90%	nvt	80-90%	94%
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%	85-87%*
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	Benzotriazol, som 4,5 methylbenzotriazol, irbesartan, carbamazepine, citalopram, diclofenac, hydrochloor-thiazide, metoprolol, venlafaxine
Overall verwijderingsrendement (%) volgens rekenregels bijdrageregeling Ministerie IenW en IPMV (7 van de 11)	80-85%	70-80%	80-85%	89%
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 4,5-methyl benzotriazol, carbamazepine Hydrochloor-thiazide, Sotalol, Metoprolol, Trimethoprim

\* uitgaand van 25-35% rendement in hoofdzuivering en bypass, en behandelen van 82% van de totale aanvoer met een rendement van 94% \*\* uitgaand van 40% rendement in hoofdzuivering en bypass, en behandelen van 82% van de totale aanvoer met een rendement van 96%

## 4

## PRESTATIES VAN DE PILOT INSTALLATIES

## 4.1 PRESTATIES VAN DE NANOFILTRATIE

Gedurende de pilot is een drietal membranen getest, zie ook de tabel, de dNF40, dNF80 en dNF120. De waarden in kolom 2 'Cut off' hebben betrekking op de afmeting van het molecuul dat nog voor 90% wordt tegengehouden door het betreffende membraan. De eenheid Dalton is hier te vergelijken met de molmassa van het molecuul. Nu is de verwijdering van stoffen door nanofiltratie niet alleen afhankelijk van de afmeting van de stof, maar ook van de geometrie ervan, en van ladingverdeling en lading, die vaak op zich ook weer afhankelijk is van bijvoorbeeld de pH van de oplossing.

TABEL 11 INSTELLINGEN VAN DE NANOFILTRATIE

Membraan-type	Cut off (Dalton)	Getest vanaf	tot	J (l/m <sup>2</sup> .h)	Recovery (%)	Crossflow (m/s)
dNF40	400	Januari 2022	13 juni 2022	20	80	0,5
dNF80	800	17 oktober 2022	6 februari 2023	25	80	0,5
dNF120	1.200	12 juli 2022	14 oktober 2022	25 en 30	80	0,5

## 4.1.1 DNF40 - NOVEMBER 2020 TOT JULI 2021

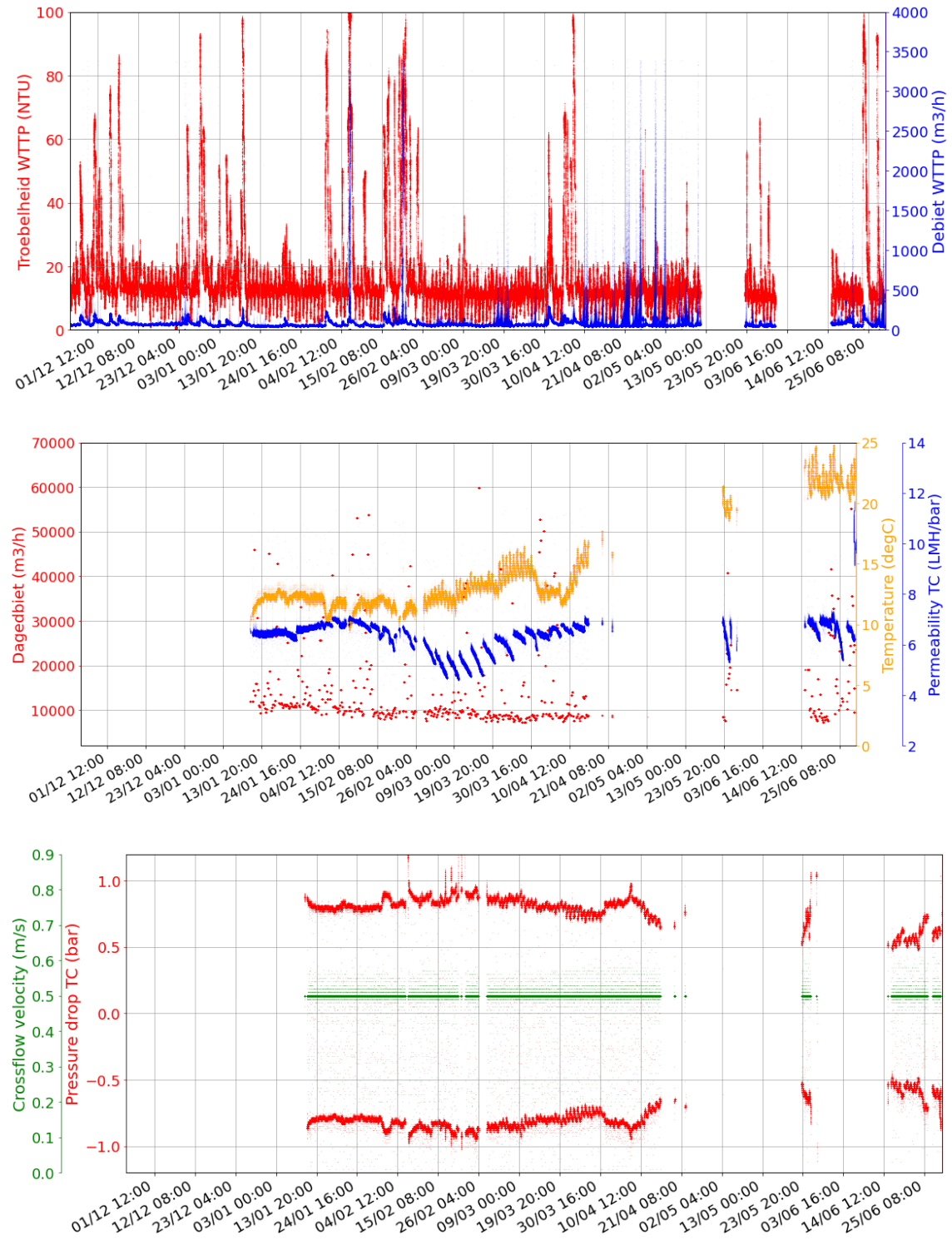
Het dNF40 membraan was in eerdere pilots al ingezet, en was daarmee al 'ingewerkt'. Dit membraan is de langste periode in gebruik geweest, gedurende ruim 7 maanden. In deze periode is veel ervaring opgedaan met de wisselwerking tussen de holle vezels en het effluent, bij wisselende omstandigheden. Bij regenweeraanvoer neemt de toevoer van zwevendstof naar de nanofiltratie toe, wat gemeten is als troebelheid in het effluent, zie Figuur 20. Op een enkele uitzondering na was dit telkens het geval. In de nanofiltratie vertaalde zich dit meestal in een oplopende drukval: de rietjes raakten verstopt met zwevendstof. Met de luchtspoelingen en chemische reinigingen kon dit uiteindelijk weer verwijderd worden, waarna de drukval weer op normale waarden terugkwam.

In deze figuur is een positieve en een negatieve drukval gepresenteerd, omdat in deze periode de stroomrichting door de module wisselde per cyclus: van beneden naar boven, of van boven naar beneden.

In de periode vanaf 15 februari is sprake van een relatief snelle daling van de permeabiliteit, wat duidt op membraanvervuiling. Dit is te zien als een steile daling tot circa 5 l/m<sup>2</sup>.h.bar, met telkens een geheel of gedeeltelijk herstel na een chemische reiniging. In de eerste periode was de effectiviteit van de chemische reiniging overigens niet toereikend, pas na 26 februari neemt de permeabiliteit langzaam weer toe tot in april weer waarden van boven 6 l/m<sup>2</sup>.h.bar bereikt worden. De membraanvervuiling is niet te correleren aan zwevendstof of andere gemeten parameter.



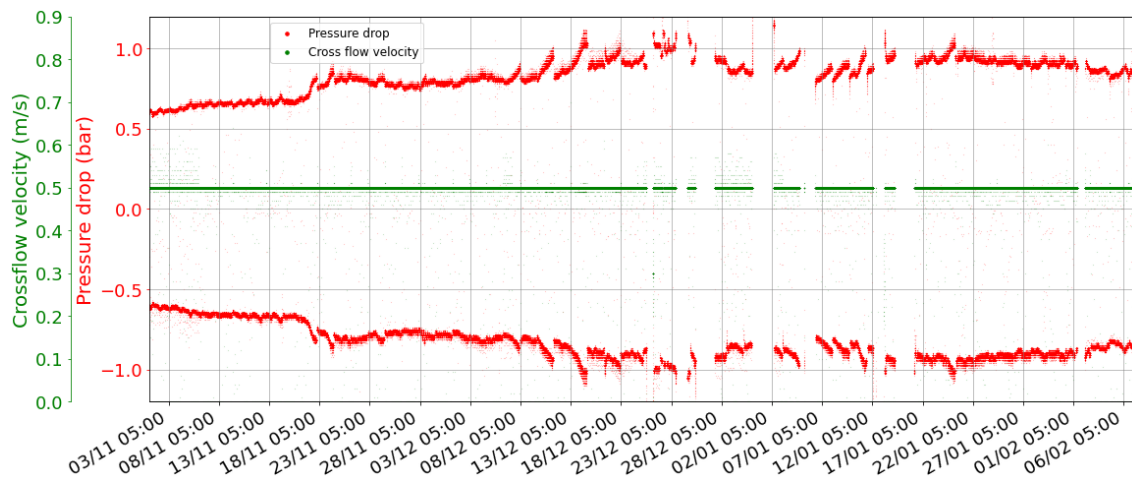
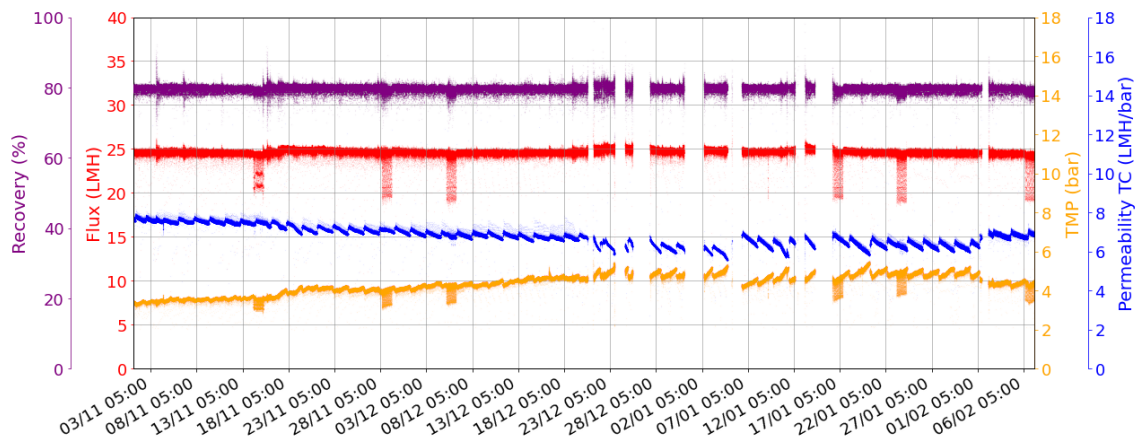
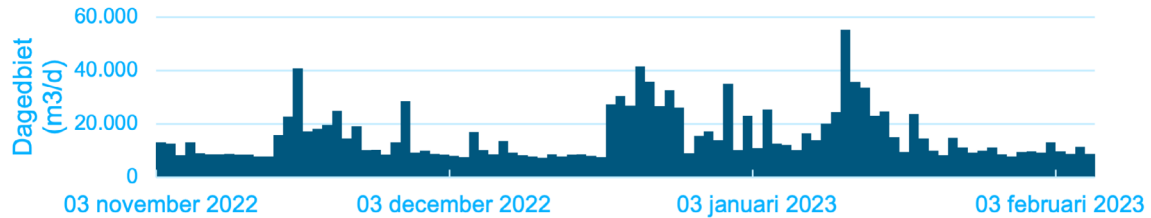
FIGUUR 20 OPERATIONELE PARAMETERS BIJ TESTEN VAN DNF40



#### 4.1.2 DNF80 – VAN 3 NOVEMBER 2022 TOT 6 FEBRUARI 2023

In de beginperiode van deze test heeft het membraan gedurende 8 weken praktisch ononderbroken gefunctioneerd. In die periode liep de transmembraandruk langzaam op, wat ook te verwachten is bij een nieuw membraan. Daarna kwam een periode met veel regenval (in december en januari). In die periodes is te zien dat de nanofiltratie het moeilijk heeft: de benodigde transmembraandrukken lopen binnen een cyclus verder op (gele lijn in figuur b) en beginnen de volgende cyclus hoger dan in de vorige. Verder loopt ook de drukval door

de module op (rode lijn in figuur c). In deze periode zijn ook een aantal witte vlekken te zien: hier is de installatie in storing door bijvoorbeeld een verstopping van het voorfilter. De reguliere luchtspoelingen zijn in die situatie niet voldoende om de nanofiltratie stabiel te kunnen bedienen. Door de verhoogde aanvoer neemt het drogestofgehalte in het effluent van de rwzi toe, en deze vracht hoopt zich op in de membraanvezels.

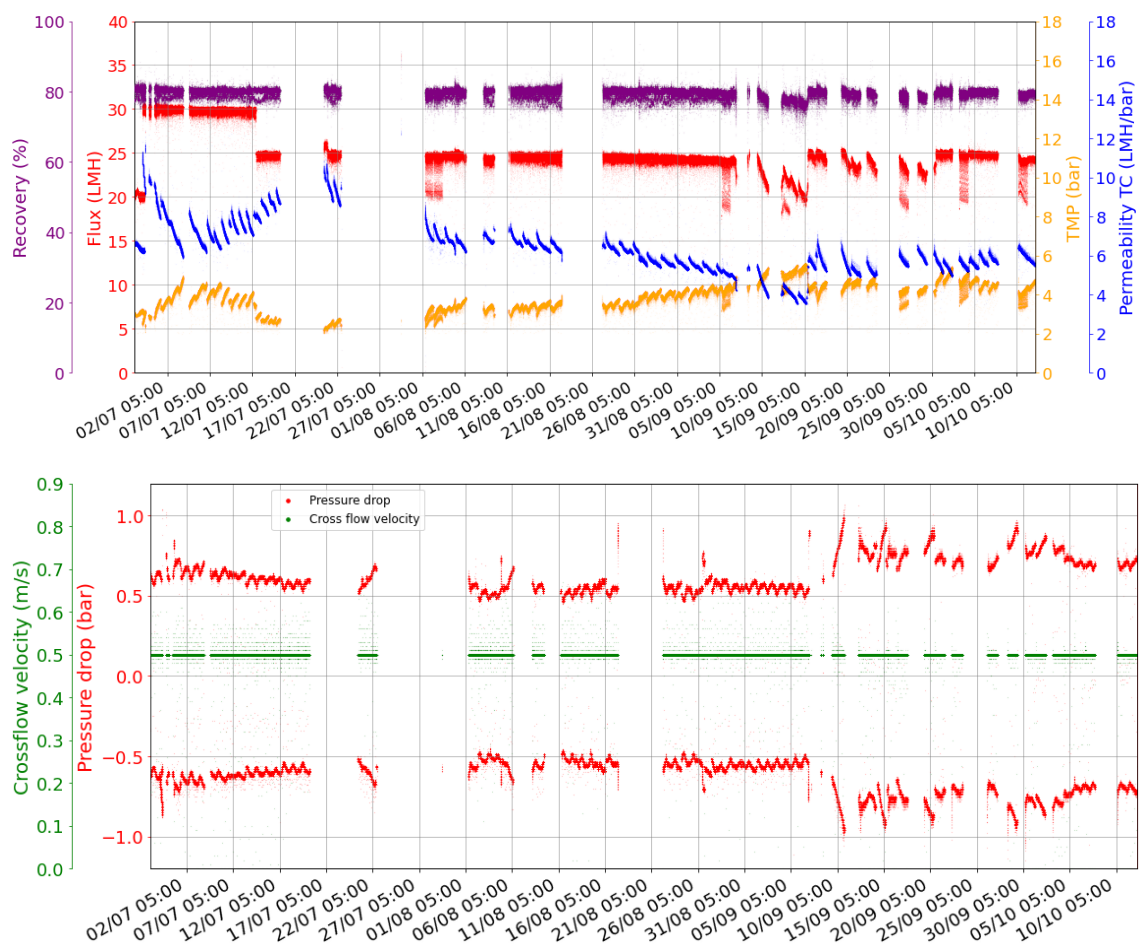


Dit is te zien als een toename in de drukval door de membraanmodule (rode lijn in figuur c). In die situatie is een intensievere reiniging nodig, zoals een hydraulische reiniging zonder permeaatonttrekking en een chemische reiniging met bijvoorbeeld zuur en oxidanten. Aan het eind van deze periode is de permeabiliteit, ook na de chemische reinigingen, ruim 10% lager dan aan het begin.

Ook de drukval door de module is aan het eind van de periode hoger dan aan het begin, wat een aanwijzing is dat een deel van de vezels verstopt is en niet meer meedoet met filtratie.

#### 4.1.3 DNF120 - VAN 12 JULI TOT 10 OKTOBER 2022

De dNF120 is eveneens als nieuw membraan getest. Omdat dit membraan een opener structuur heeft was de verwachting dat de permeabiliteit hoger zou zijn, en dat bij gelijke druk een hogere flux gehaald kon worden. Daarom is begonnen met een flux van 30 l/m<sup>2</sup>.h. De drukken liepen echter relatief snel op en de permeabiliteit liep snel af, daarom is de flux verlaagd naar 25 l/m<sup>2</sup>.h. De permeabiliteit liep daarna weer op tot oorspronkelijke waarden. Na een periode van stilstand tussen 22 juli en 1 augustus is de installatie opnieuw gestart en was de permeabiliteit aanmerkelijk lager. Deze lijkt zich naar het eind van de proefperiode te stabiliseren rond 6 l/m<sup>2</sup>.h.bar. Ook bij dit membraan bleek een gevoeligheid voor uitspoeling uit de rwzi van zwevendstof bij regenweeraanvoer. De regenperiode van begin september leidde tot verhoogde drukval (zie figuur c), die niet volledig reversibel bleek te zijn. In die periode blijkt dat ook de flux niet meer gehaald kan worden, en zijn er intensieve reinigingsprocedures nodig. In deze periode is geëxperimenteerd met instellingen op constant hoge/lage TMP, of constant hogere/lage flux.



#### 4.1.4 DISCUSSIE HYDRAULISCHE MEMBRAANPERFORMANCE

In deze paragraaf wordt ingegaan op de kwantitatieve prestaties van de membraaninstallatie als geheel, exclusief de geproduceerde effluentkwaliteit. De geteste membranen zijn voor een beperkte periode in bedrijf geweest, waarbij de dNF80 en dNF120 bij aanvang nog helemaal ongebruikt waren. Normaliter is een indraaiperiode van enkele weken nodig voordat de nominale prestaties bereikt worden. Een nieuw membraan zal nog schoon zijn, en dicht bij de specificaties kunnen presteren. Naarmate het membraan veroudert, door inwerking van het te filteren medium, reinigingschemicaliën en drukwisselingen kunnen de eigen-

schappen veranderen. Dit kan te meten zijn als een andere retentie of irreversibiliteit van vervuiling. Typisch zal de membraanperformance in de eerste weken dus snel afnemen, waarna het langdurige, veel langzamer verlopende, verouderingsproces begint.

Al deze effecten zijn in de pilot niet opgetreden, vanwege de relatief korte tijdsduur ervan. De waargenomen vervuilingsverschijnselen en ook retenties zijn daarom op te vatten als startpunt van de genoemde veroudering.

Het membraan met bij aanvang al een aantal draaiuren, de dNF40, heeft gedurende de testen op rwzi Asten goed gepresteerd. De membranen raakten weliswaar vervuild, maar de vervuiling was volledig reversibel, en de permeabiliteit aan het eind van de test was hoger dan aan het begin. Dit kan veroorzaakt zijn doordat er bij aanvang van de proef een moeilijk te verwijderen vervuiling aanwezig was. Deze is dan in de loop der tijd, door bedrijfsvoering met een andere voeding, en het gebruikte reinigingsregime, steeds verder verwijderd.

De toename van TMP bij de testen met dNF40 lijken te wijzen op membraanvervuiling, die in de loop van circa een maand weer ongedaan wordt gemaakt met het toegepaste reinigingsregime.

De beide andere membranen (dNF80 en 120) waren bij aanvang nieuw, en zijn dus eerst enkele weken 'ingedraaid'. Bij de dNF80 is daarbij een toename te zien van de drukval, die pas tegen het einde van de proefperiode afvlakt. Bij de dNF120 is dat niet het geval, hier stabiliseert de drukval al na enkele weken, totdat er regenweer optreedt.

De dNF80 is gedurende de pilotperiode redelijk stabiel te bedienen, met de reeds genoemde gevoeligheid voor regenweeraanvoer. Aan het eind van de periode lijkt de permeabiliteit weer iets terug te komen en te stabiliseren.

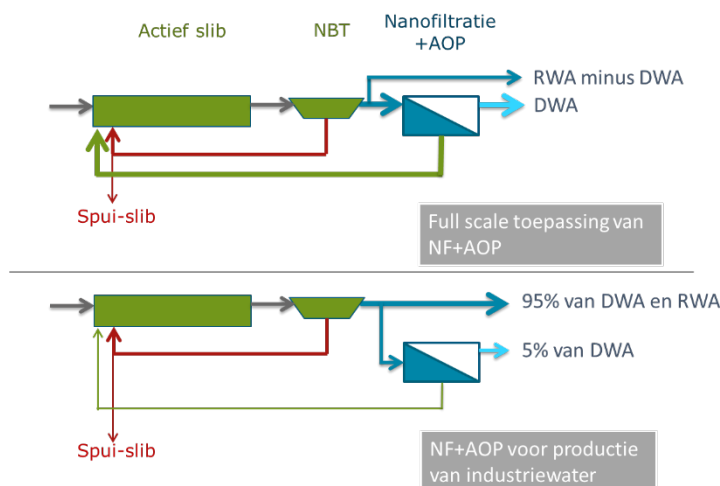
De dNF120 lijkt moeilijk stabiel te bedienen. Al snel is de flux verlaagd van 30 naar 25 l/m<sup>2</sup>.h, maar ook hier lijken veel chemische reinigingen nodig om de permeabiliteit te beheersen.

Bij alle membranen is duidelijk dat de stabiele bedrijfsvoering beïnvloed wordt door de aanvoer van zwevendstof bij regenweeraanvoer. Het toegepaste voorfilter bij de pilotinstallatie was niet in staat om deze pieken af te vangen.

#### 4.1.5 OVERWEGINGEN BIJ TOEPASSING VAN NANOFILTRATIE OP DE RWZI

Nanofiltratie+AOP kan op een rwzi op meerdere manieren worden ingezet: in een full scale toepassing, en als opwerkstap voor de productie van bijvoorbeeld industriewater. Beide zijn in onderstaande figuur gepresenteerd en worden in de volgende paragrafen nader besproken.

FIGUUR 21 TWEE TOEPASSINGEN VAN NANOFILTRATIE+AOP OP DE RWZI



### **FULL SCALE**

Als nanofiltratie wordt toegepast op volle schaal, dus met de bedoeling om het behandelde water vervolgens te lozen op oppervlaktewater, dan moet een werkbare route gevonden worden voor het concentraat. De nanofiltratie zal met een recovery van circa 80% kunnen functioneren, waardoor de resterende 20% een bestemming moet krijgen. Als dit concentraat wordt teruggevoerd naar de rwzi zullen de concentraties van tegengehouden componenten in de loop der tijd oplopen. Daar komt bij dat de geïnstalleerde capaciteit uit kostenoverwegingen niet op regenweeraanvoer zal worden uitgelegd. Dat betekent echter ook dat bij regenweer water om de NF heen zal worden gebypassed. Vanuit de nabezinktanks zal in die situatie het ongefilterde effluent (met hogere concentraties), gemengd met permeaat van de nanofiltratie geloosd worden. Verder zal in dit (hybride) systeem de nabezinktank ook tijdens droogweeraanvoer in bedrijf moeten zijn, om bij overschakelen naar regenweeraanvoer een bezinkbaar slib beschikbaar te hebben.

Door het meest open membraan toe te passen wordt de concentratiefactor voor de gidsstoffen lager, terwijl de effluentkwaliteit (bij dwa) onverminderd goed blijft door de AOP. Het effect van rwa op de effluentkwaliteit zal dan voor de gidsstoffen vergelijkbaar zijn met andere nageschakelde systemen (zoals bijvoorbeeld ozon+zandfiltratie) waarbij niet de volledige rwa capaciteit wordt behandeld.

De tegengehouden componenten (zoals organisch koolstof en sulfaat) hebben dan als enige 'uitgang' uit het systeem de afvoer via spuislib. Nader onderzoek zal moeten uitwijzen of de concentratieverhoging van de tegengehouden componenten tot een verdere verwijdering leiden in het actiefslibstelsel. Verder is de vraag of de lozing tijdens rwa condities (indien geen verdere verwijdering optreedt) tot overschrijdingen zou leiden. Dat laatste is niet bij voorbaat al zeker.

### **PRODUCTIE VAN INDUSTRIEWATER**

Een andere benadering is de toepassing van nanofiltratie voor de productie en levering aan industrie of landbouw. Het zal dan gaan om kleinere capaciteiten, waardoor de concentraatbehandeling geen probleem hoeft te vormen. Uitgangspunt zou kunnen zijn dat de te leveren capaciteit begrensd wordt door de mate waarin de rwzi zonder problemen de concentraatstroom kan verwerken. Door in die situatie uit te gaan van het meest dichte membraan kan een halffabriek geproduceerd worden dat voor verdere opwerking tot bijvoorbeeld demiwater interessant is, zeker in vergelijking met andere bronnen zoals oppervlaktewater, grondwater of zelfs drinkwater.

## **4.2 PRESTATIES UV-WATERSTOFFEROXIDE**

De prestaties van de UV-waterstofperoxide zijn beoordeeld op basis van steekmonsters. De installatie heeft daarom slechts enkele keren langere tijd continu gedraaid. Meestal werd voor een bemonsteringscampagne de installatie aangezet met de juiste condities en werd na enkele verblijftijden gestart met bemonsteren.

Oorspronkelijk was het plan om vanuit een buffertank na de NF de UV te voeden. De buffertank voldeed echter niet om de aanvoer naar de UV constant te kunnen houden, waardoor deze niet continu kon functioneren. Daarom is besloten om de UV alleen aan te zetten op bemonsteringsdagen.

Er zijn dus geen lange termijn trends van UV-afgifte of andere indicaties van bijvoorbeeld vervuiling van de lampen. Er is overigens ook geen afname van de UV-afgifte geconstateerd gedurende de pilot.

# 5

## TOEPASBAARHEID VAN HET GEPRODUCEERDE WATER

### 5.1 KWALITEITSEISEN VANUIT LANDBOUW

Om een eerste indruk te verkrijgen van de inzetbaarheid van de geproduceerde waterkwaliteit is in onderstaande tabel de vereiste waterkwaliteit voor verschillende toepassingen in de landbouw gepresenteerd (KWR, 2017). Vanwege de nabijheid van glastuinbouw bij de rwzi Asten ligt deze toepassing het meest voor de hand. In de laatste twee kolommen is deze vergeleken met de kwaliteit van het effluent, evenals de kwaliteit van het opgewerkte effluent. Met de kleurcodering is aangegeven welke parameters voldoen (in groen) als gebruik wordt gemaakt van water na nanofiltratie (dNF80) en AOP (UV/peroxide). Als de geproduceerde waterkwaliteit beter is dan gevraagd is dit aangegeven met lichtgroen, hier zou door de gebruiker (wellicht) extra spore elementen aan het water toegevoegd moeten worden, afhankelijk van de plantbehoefte. Als het geproduceerde water te hoge concentraties heeft voor de toepassing is dat met rood aangegeven. Oranje staat voor die situatie dat de geleverd kwaliteit gemiddeld beter is dan de gevraagde, het geproduceerde water voldoet hier dus niet altijd.

Opvallend is dat voor toepassing op vollegronds teelt, fruitteelt, akkerbouw en grasland het onbehandelde effluent vaak al voldoende kwaliteit heeft, afgezien van het koloniegetal. In de glastuinbouw is een verdergaande behandeling nodig dan nanofiltratie. Om die reden hebben tuinders vaak ook een membraaninstallatie met omgekeerde osmose. Eventueel zou deze gevoed kunnen worden met voorbehandeld effluent. Afhankelijk van welke bron de tuinders normaliter gebruiken kan opgewerkt effluent een aanvulling zijn. Als een tuinder (brak) grondwater ontzout voor toepassing in de kas, dan is aanvullen met effluent een risico voor membraanvervuiling.

De belangrijkste beperking voor toepassing van het opgewerkte effluent in de glastuinbouw is volgens deze vergelijking de te hoge zoutconcentratie, waarbij natrium opvalt, samen met magnesium, sulfaat en carbonaat. Verdergaande ontwikkelingen hebben er echter toe geleid dat nieuwe plantenrassen zijn ontwikkeld met een hogere tolerantie voor zouten, zoals natrium, waardoor toepassing wellicht toch tot de mogelijkheden behoort (LTO, 2023).

**TABEL 12 VERGELIJKING TUSSEN DE VEREISTE WATERKWALITEIT VOOR TOEPASSING IN LANDBOUW (VOLGENS KWR, 2107) VERSUS DE KWALITEIT VAN EFFLUENT VAN DE RWZI ASTEN, EN OPGEWERKT EFFLUENT NA NANOFILTRATIE (DNF80) EN AOP; DE KLEURCODERING GELDT TEN OPZICHTE VAN HET OPGEWERKTE EFFLUENT; LICHTGROEN: MISSCHIEF TE SCHOON; GROEN = VOLDOET; ORANJE: VOLDOET GEMIDDELD, MAAR NIET ALTIJD; ROOD: VOLDOET NIET.**

Parameter	Glastuin- bouw	Volleggronds groenteelt	Fruitteelt	Akkerbouw en grasland	Effluent rwzi Asten min-max (gem.)	Effluent NF +AOP min-max (gem.)
EC-25 (uS/cm)	300	500 -1700	1500	2700		
pH	6.5	5.5 – 8	5.5 - 8	5.5 – 8	5.5 – 8	
Na (mg/L)	2.3	70 – 115	115	-	45-150 (96)	45-150 (96)
K (mg/L)	46.9		-		n.b.	
Ca (mg/L)	32.1		-		24-66 (45)	24-66 (45)
Mg (mg/L)	4.9		-		4-13 (8)	4-13 (8)
Fe (mg/L)	0.25	0.5 – 2.5	1.0	7 – 15	0,07-0,2 (0,1)	<0,01
Mn (mg/L)	0.25	1.0	1.0	2.0	0,04-0,16 (0,07)	0,02-0,10 (0,05)
NH <sub>4</sub> (mg NH <sub>4</sub> /L) 4	0.4	1.8	1.8	-	0,1-2,2 (0,6)	0,1-2 (0,6)
Cl (mg/L)	17.7	110-180	250	600-1200	54-183 (130)	60-190 (134)
SO <sub>4</sub> (mg/L)	28.8	-	-	-	16-43 (29)	6-7
HCO <sub>3</sub> (mg/L)	91.5	244	244	-	120-310 (218)	140-250
NO <sub>3</sub> (mg N/L)	217	-	-	-	<4	<4
PO <sub>4</sub> tot (mg P/L)	27	-	-	-	<0.2	<0.2
Br (mg/l)	100 / 300	400	400	400	<0,3	<0,3
Zn (µg/L)	196	2000	2000	2000	<110	<110
B (µg/L)	108/ 300 / 600	1000	1000	2000 / 1000	<0,2	<0,2
Cu (µg/L)	200	200	200	200	<10	<10
F (µg/L)	190 / 500	1000	1000	1000	<180	<180
Co (µg/L)	12	50	50	50	n.b.	n.b.
As (µg/L)	50	50	50	50	<0,5	<0,5
Be (µg/L)	100	100	100	100	n.b.	n.b.
Cd (µg/L)	10	10	10	10	<0,1	<0,1
Cr tot (µg/L)	1000	1000	1000	1000	<2,5	<2,5
Hg (µg/L)	-	-	-	-	<0,02	<0,02
Ni (µg/L)	200	200	200	200	<10	<10
Pb (µg/L)	50	50	50	50	<1,2	<1,2
Se (µg/L)	20	20	20	20	<1	<1
Fecale coliformen (kve/100 ml)	1000	1.000	1.000	1.000	>1.000	0

In Tabel 10 is voor de drie geteste membranen in combinatie met AOP weergegeven hoe de kwaliteit voor de in bovenstaande tabel genoemde parameters varieert.

Voor vrijwel alle genoemde componenten van Tabel 9 blijven de concentraties (ver) beneden de vereiste kwaliteit, onafhankelijk van het gebruikte membraan.

TABEL 13 WATERKWALITEIT NA NF EN AOP, VOOR DRIE MEMBRANEN

	dNF40/8000 J/m <sup>2</sup>	dNF80/6000 J/m <sup>2</sup>	dNF120/4000 J/m <sup>2</sup>
Na (mg/L)	87	98	57
K (mg/L)			
Ca (mg/L)	48	34	36
Mg (mg/L)	9,6	6,2	6
Fe (mg/L)	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mn (mg/L)	100	56	86
NH <sub>4</sub> (mg NH /L) 4	2,08	0,19	0,612
Cl (mg/L)	165	138	95,1
SO <sub>4</sub> (mg/L)	4,51	5,8	11,4
HCO <sub>3</sub> (mg/L)	240	180	130
NO <sub>3</sub> (mg N/L)	0,251	1,00	0,259
PO <sub>4</sub> tot (mg P/L)	0,086	0,027	0,173
Br (mg/l)	0,56	< 0,10	0,44
Zn (µg/L)	6,4	26,0	35
B (µg/L)	110	67,0	35
Cu (µg/L)	2,9	3,60	12
F (µg/L)	0,098	0,11	0,082
Co (µg/L)			
As (µg/L)	< 0,5	< 0,50	< 0,5
Be (µg/L)			
Cd (µg/L)	< 0,05	< 0,050	< 0,05
Cr tot (µg/L)	< 0,5	< 0,50	< 0,5
Hg (µg/L)	< 0,02	< 0,020	< 0,02
Ni (µg/L)	< 0,5	< 0,50	0,66
Pb (µg/L)	< 0,2	< 0,20	< 0,2
Se (µg/L)	< 1	< 1,00	< 1

## 5.2 KWALITEITSEISEN VANUIT EU RICHTLIJN HERGEBRUIK EFFLUENT VOOR IRRIGATIE

Sinds 25 mei 2020 is een nieuwe EU verordening gepubliceerd, met daarin richtlijnen voor de toepassing van rwzi effluent in de landbouw.

Hierin zijn twee belangrijke tabellen opgenomen: een indeling in categorieën (A t/m D) van gebruik, en een indeling van minimale waterkwaliteit per categorie, zie de volgende twee tabellen. In de tweede tabel is met kleurcoderingen aangegeven dat het behandelde effluent voldoet aan de eisen voor elke categorie.



Minimale kwaliteitsklasse teruggewonnen water	Gewascategorie (*)	Irrigatiemethode
A	Alle rauw geconsumeerde voedingsgewassen waarvan het eetbare gedeelte rechtstreeks in aanraking komt met teruggewonnen water, en rauw geconsumeerde wortel- en knolgewassen	Alle irrigatiemethoden
B	Rauw geconsumeerde voedingsgewassen waarvan het eetbare gedeelte bovengronds wordt geproduceerd en niet rechtstreeks in aanraking komt met teruggewonnen water, verwerkte voedingsgewassen en "non-food"-gewassen, met inbegrip van gewassen die worden gebruikt voor het voeren van melk- of vleesproducerend vee	Alle irrigatiemethoden
C	Rauw geconsumeerde voedingsgewassen waarvan het eetbare gedeelte bovengronds wordt geproduceerd en niet rechtstreeks in aanraking komt met teruggewonnen water, verwerkte voedingsgewassen en "non-food"-gewassen, met inbegrip van gewassen die worden gebruikt voor het voeren van melk- of vleesproducerend vee	Druppelirrigatie (**) of andere irrigatiemethode die rechtstreeks contact met het eetbare gedeelte van het gewas voorkomt
D	Industriële gewassen, energiegewassen en zaadgewassen	Alle irrigatiemethoden (***)

(\*) Indien eenzelfde soort geïrrigeerd gewas onder verschillende categorieën van tabel 1 valt, zijn de voorschriften van de strengste categorie van toepassing.

(\*\*) Druppelirrigatie (ook wel druppelsgewijze bevoeiing genoemd) is een micro-irrigatiesysteem waarmee de gewassen worden voorzien van water in de vorm van waterdruppeltjes of minieme waterstroompjes die via zeer dunne plastic buisjes met uitlaatopeningen bij een zeer laag debiet (2-20 liter/ uur) druppelsgewijs op de grond of meteen onder het grondoppervlak worden gebracht.

(\*\*\*) In geval van irrigatiemethoden waarbij regen wordt geïmiteerd, is speciale aandacht vereist voor de bescherming van de gezondheid van werknemers of omstanders. Daartoe worden passende preventie maatregelen genomen.

Kwaliteitsklasse teruggewonnen water	Indicatieve technologie-doelstelling	E. coli	BZV_{5}	TSS	Troe-be-lings-graad	Overig
		(aantal/100 ml)	(mg/l)	(mg/l)	(NTU)	
A	Secundaire behandeling, filtratie en desinfectie	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 5	Legionella spp.: < 1000 kve/l waar er een verstuiwingsrisico bestaat. Rondwormen (wormeieren): ≤ 1 ei/l voor irrigatie van weidegewassen of diervoedergewassen
B	Secundaire behandeling en desinfectie	≤ 100	< 25	< 35	—	
C	Secundaire behandeling en desinfectie	≤ 1 000	< 25	< 35	—	
D	Secundaire behandeling en desinfectie	≤ 10 000	< 25	< 35	—	

### 5.3 NF ÉN AOP VOOR TOEPASSING IN LANDBOUW?

De kwaliteitseisen zoals gepresenteerd in Tabel 9 roepen de vraag op of het nu noodzakelijk is om zowel nanofiltratie als AOP toe te passen. Kijkend naar de kwaliteitseisen is een AOP niet noodzakelijk, de AOP voegt op de genoemde parameters niet veel toe. Echter vanuit het voorzorgsprincipe is de AOP wel degelijk van meerwaarde. Ten eerste vormt de combinatie van NF en AOP een dubbele barriere en daarmee veiligheid tegen de verspreiding van pathogenen. Ten tweede worden door de AOP organische microverontreinigingen verdergaand verwijderd, waarmee de verdere verspreiding van bijvoorbeeld medicijnresten verlaagd wordt

# 6

## SPIEGELEN AAN HAALBAARHEIDSSTUDIE

In de haalbaarheidsstudie (STOWA 2020-22) is een ontwerp gemaakt voor een rwzi van 100.000 i.e.. Ten opzichte van de destijds gehanteerde uitgangspunten heeft de pilot een aantal uitgangspunten bevestigd en een aantal nieuwe inzichten opgeleverd.

De keuze voor hoe de NF-membranen worden geschakeld is belangrijk voor de technologische berekeningen en de kostenaspecten. Er is besloten om te gaan voor een ontwerp met meer stages, waarbij het rwzi effluent achtereenvolgens meerdere NF-membranen passeert en waarbij steeds meer permeaat van de concentraatstroom wordt afgescheiden. Er wordt geen recirculatie van het concentraat toepast. Vanwege de omvang van de pilot is dit niet in de praktijk getest. Met de uitgevoerde metingen kan echter wel ingeschat worden hoe een ontwerp met meerdere stages zal functioneren.

### MEMBRAANKEUZE EN AOP INSTELLINGEN

Het membraan waar bij voorkeur mee gewerkt wordt is de dNF80, een membraan dat op basis van de cutoff niet de eerste keuze zou zijn. Echter door de tweede barriere van de nageschakelde AOP, kan toch voor dit membraan gekozen worden. Hiermee kan de te hanteren permeaatflux iets omhoog en hoeft minder membraan oppervlak geïnstalleerd te worden. In overleg met NXF en UV Van Remmen is gekozen voor deze benadering, verwacht wordt dat deze combinatie een goede balans geeft van opbrengst in de vorm van gereinigd effluent en input in de vorm van energie en chemicaliën. Voor de AOP is daarbij gekozen voor een UV dosis van 6.000 J/m<sup>2</sup> en een waterstofperoxide dosering van 15 mg/l. Hiermee wordt in het behandelde water een verwijderingsrendement van 98% bereikt voor 7 van de 11 gidsstoffen en 89% voor alle 11 gidsstoffen.

### REINIGINGSREGIME

Tijdens de proeven is gebleken dat gedurende droogweercondities (gemiddeld zo'n 240 dagen per jaar) een mild reinigingsregime tot een stabiele bedrijfsvoering leidt. Het membraan functioneert goed bij een cyclustijd van 60 minuten. Met een hydraulische spoeling, in combinatie met lucht is de vervuiling te beheersen. De frequentie van chemische reinigingen ligt rond 24 uur.

Bij regenweer aanvoer moet de hydraulische reinigingsfrequentie worden opgevoerd, door het verkorten van de cyclus. Daarnaast wordt een extra filtratiestap geïntroduceerd om zwevendstofpieken in de aanvoer af te vangen. Hierbij wordt uitgegaan van een doekfilter.

### CHEMICALIËNVERBRUIK

Ten opzichte van de haalbaarheidsstudie is gebleken dat er geen antiscalant nodig is, aangezien de retentie op hardheid relatief laag is. De concentratiefactoren voor calcium en magnesium bedroegen respectievelijk 1,5 en 1,4.

## 6.1 UITGANGSPUNTEN ONTWERP NF FILTRATIE VOOR RWZI VAN 100.000 I.E.

TABEL 14 ONTWERPGRONDSLAGEN MEMBRAANOPSTELLING

Ontwerpparameters membraanopstelling	Eenheid	Waarde gebruik in haalbaarheidsstudie	Waarde op basis van pilot
MWCO	(Da)	400	800
Ontwerptemperatuur	(°C)	10	10
Gemiddelde temperatuur	(°C)	15	15
Schaling dynamische viscositeit (max temp / gem temp)	(-)	1,15	1,15
Te installeren capaciteit NF	(m <sup>3</sup> /h)	1.040	1.040
Afnemen permeabiliteit over levensduur membraan	(-)	12,5%	12,5%
Permeabiliteit (15 °C)	(l/m <sup>2</sup> *h*bar)	4,2	5,0
Osmotische druk voedingswater	(bar)	0,3	0,3
Hydraulisch verlies over crossflow (per stage, 15 °C)	(bar)	0,1	0,1
Nominale TMP eerste stage (bij 15 °C), exclusief vervuilingmarge	(bar)	5,15	5,15
Nominale TMP eerste stage (bij 15 °C), inclusief vervuilingmarge	(bar)	5,79	5,79
Max TMP eerste stage (bij 10 °C), exclusief vervuilingmarge	(bar)	5,91	5,91
Max TMP eerste stage (bij 10 °C), inclusief vervuilingmarge	(bar)	6,64	6,0
Max bedrijfsdruk (bij 10 °C), exclusief vervuilingmarge	(bar)	6,99	6,99
Aantal stages	(-)	4	4
Recovery (eerste stage)	(-)	35%	35%
Recovery (geheel systeem)	(bar)	75%	75%
Oppervlak per membraanmodule	(m <sup>2</sup> )	50	50
Bedrijfstijd membraanskids	(-)	92%	92%

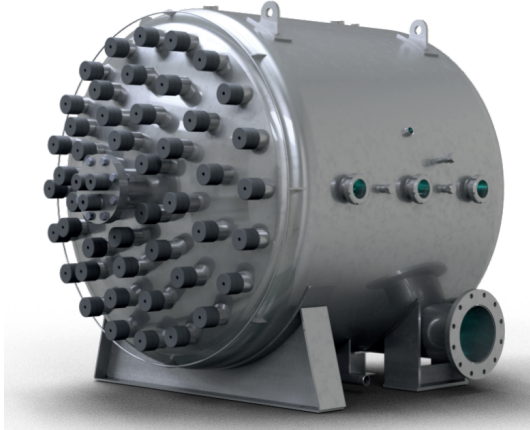
TABEL 15 KENMERKEN MEMBRAANOPSTELLING

Kenmerken membraanopstelling	Eenheid	Waarde haalbaarheidsstudie	Op basis van pilot
Totaal benodigd membraanoppervlak	(m <sup>2</sup> )	54.891	46.108
Totaal aantal modules	(-)	1.098	922
Energieverbruik NF	(kWh/j)	1.670.481	1.675.202
Energieverbruik voorbehandeling	(kWh/j)	43.003	43.003
Energieverbruik totaal	(kWh/j)	1.713.483	1.680.568
Verbruik Antiscalants (continue dosering)	kg/j	26.828	0
Verbruik NaOH (CIP)	kg/j	3.923	3.296
Verbruik NaOCl (CIP)	kg/j	2.556	2.147
Verbruik Citroenzuur (CIP)	kg/j	7.644	6.421
Personeel	FTE	1,0	1,0

## 6.2 UITGANGSPUNTEN UV-PEROXIDE DOSERING

Uit de pilotresultaten is gebleken dat met het dNF80 membraan en een UV-dosering van 6.000 J/m<sup>2</sup> de vereiste verwijdering van 70% behaald kan worden. Hierbij is de transmissiviteit na de nanofiltratie toegenomen tot 95 %.

FIGUUR 22 VOORBEELD VAN EEN UV-INSTALLATIE



De UV installatie is voor deze situatie uitgelegd als twee parallel opgestelde reactoren met elk 48 lampen.

TABEL 16 TECHNOLOGISCHE EN WERKTUIGBOUWKUNDIGE DIMENSIONERING UV-PEROXIDE DOSERING

Parameter	Eenheid	Waarde
Hydraulische capaciteit	m <sup>3</sup> /uur	832
Watertemperatuur	°C	5 – 40
Transmissie	%	95
UV dosering	J/m <sup>2</sup>	6.100
Aantal units	-	2
Dosering waterstofperoxide	mg/l	15
Ruimtebeslag lengte	m	1,66
Ruimtebeslag breedte	m	1,55
Oppervlak	m <sup>2</sup>	2,57
Aantal lampen per unit	#	48
Levensduur van lamp	uur	11.000
Vermogen per lamp	W	570
Totaal vermogen per m <sup>3</sup>	kW/m <sup>3</sup>	0,07
Totaal vermogen per unit	kW	27,4
Totaal energieverbruik per jaar	kWh/j	375.585

### 6.3 KOSTEN NABEHANDELING VAN RWZI 100.000 IE

In onderstaand overzicht zijn de investeringen gepresenteerd voor een systeem waarmee een rwzi van 100.000 i.e. behandeld kan worden met nanofiltratie en UV-peroxide.

#### 6.3.1 KOSTEN VAN NANOFILTRATIE

Voor de kosten van de nanofiltratie is de kostenraming van de haalbaarheidsstudie aangepast naar de inzichten uit de pilot: de permeabiliteit is verhoogd tot 5 l/m<sup>2</sup>.h.bar en als voorbehandeling is een doekfilter toegevoegd in plaats van het eerder berekende microfilter.

<b>Kale bouwkosten (x1000 EUR)</b>	<b>NF</b>
Totaal Civiel	1.200
Totaal WTB	3.400
Totaal Elektro	1.100
Totaal PA	600
Totaal	6.300

<b>Stichtingskosten (x1000 EUR)</b>	<b>NF</b>
Totaal Civiel	3.375
Totaal WTB	9.563
Totaal Elektro	3.094
Totaal PA	1.688
Totaal	17.719

### 6.3.2 KOSTEN VAN AOP

De werktuigbouwkundige installatie van de de AOP bestaat uit twee Advanox units, een waterstofperoxide dosering en een waterstofperoxide destructor. Voor de kosten van UV-installatie is gebruik gemaakt van een prijsopgave van de firma van Remmen (zomer 2023), met een inflatiecorrectie van in totaal 10% om op prijspeil 2018 te komen.

<b>Kale bouwkosten (x1.000 EUR)</b>	<b>UV-AOP</b>
Totaal Civiel (in zelfde gebouw als NF)	
Totaal WTB	665
Totaal Elektro/PA	70
Totaal	735

<b>Stichtingskosten (x 1.000 EUR)</b>	<b>UV-AOP</b>
Totaal Civiel (in zelfde gebouw als NF)	
Totaal WTB	1.795
Totaal Elektro/PA	189
Totaal	1.984

### 6.3.3 STICHTINGSKOSTEN NF + AOP

<b>Stichtingskosten (x 1.000 EUR)</b>	<b>UV-AOP</b>
Totaal Civiel	3.375
Totaal WTB	11.433
Totaal Elektro	3.291
Totaal PA	1.688
Totaal	19.786

### 6.3.4 OPERATIONELE KOSTEN

Ten opzichte van de haalbaarheidsstudie zijn de operationele kosten enigszins gewijzigd, door iets andere onderhoudskosten, die zijn immers gerelateerd aan de eveneens iets andere investering. Verder is de antiscalant achterwege gelaten en zijn de reinigingschemicaliën iets verlaagd. Daar staat tegevenover dat een voorfiltratie is toegevoegd met een energieverbruik. De volgende uitgangspunten voor de berekening van de operationele kosten zijn gebruikt.

<b>Onderdeel</b>	<b>Energieverbruik/m<sup>3</sup></b>
NF + voorbehandeling	0,31
UV/Peroxide	0,04-0,07*

\*de geprojecteerde Advanox installatie is geschikt voor een debiet tot 790 m<sup>3</sup>/h, terwijl een debiet van 832 m<sup>3</sup>/h benodigd is. Theoretisch moeten dus 2 units geplaatst worden. In die situatie is het verbruik 0,07 kWh/m<sup>3</sup>; in de situatie dat maar 1 Advanox in gebruik is is het energieverbruik 0,035 kWh per m<sup>3</sup>.

Onderdeel	Kg/jaar
Citroenzuur (50%)	12.842
Natriumhypochloriet (15%)	14.313
Natronoloog (50%)	6.592
Waterstofperoxide (50%)	160.000
<b>Operationele kosten</b>	
Kapitaalslasten	1.898
Energie	209
Chemicaliën (inclusief eventuele besparingen)	13
Personeel	50
Reservering membranen	94
Onderhoud	283
Jaartijks kosten incl. BTW	2.547
Debiet behandeld	5.365.500
eur/m <sup>3</sup>	0,47

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

In de haalbaarheidsstudie werd een model conform STOWA 2012-06 gebruikt voor het bepalen van de CO<sub>2</sub> footprint.

De hierbij gebruikte uitgangspunten zijn gespiegeld aan de resultaten van de pilot en de daaruit gevonden parameters voor het ontwerp van een rwzi van 100.000 i.e.

Ten opzichte van de haalbaarheidsstudie is gerekend met een iets hogere permeabiliteit van het membraan, en daardoor iets minder benodigd membraanoppervlak en reinigingschemicaliën.

Met de hierboven genoemde investeringen en de rekenregels uit het IPMV<sup>8</sup> zijn de equivalente CO<sub>2</sub>-emissies berekend als 244 gram CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup>, zie Tabel 14. Hierbij is uitgegaan van behandeling van 70% van het aangevoerde effluent en een 40% verwijdering van gidsstoffen in de rwzi.

#### 6.5 VERWIJDERING VAN GIDSSTOFFEN

Een rwzi met een nabehandeling met nanofiltratie en AOP is in staat om 7 van de 11 gidsstoffen voor meer dan 88% te verwijderen (uitgaand van een gemiddeld verwijderingsrendement van 40% in de rwzi en meer dan 90% door NF en AOP). Hierbij is gerekend met een membraan van 800 Dalton, een UV dosering van 6.000 J/m<sup>2</sup> en een peroxidodosering van 15 mg/l. Indien gewenst kan op het rendement gestuurd worden, eenvoudigweg door te variëren met de UV-dosering.

TABEL 17 OVERZICHT VERGELIJKING MET REFERENTIETECHNOLOGIEËN

	Eenheid	PACAS	Ozon + ZF	GAK	NF+AOP
CO <sub>2</sub> footprint	gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	122	128	325	244
Kosten	€/m <sup>3</sup>	0,05	0,17	0,26	0,47
Rendement gidsstoffen	%	70-75%	80-85%	80-85%	88%

8 Berekening CO2 footprint en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit rwzi-afvalwater, M. Mulder, 28-12-22

# 7

## CONCLUSIE

Holle vezel nanofiltratie gecombineerd met geavanceerde oxidatie is als pilot gedurende circa een jaar getest op de rwzi Asten. Er is een drietal membranen getest, telkens in een tijdsbestek van enkele maanden, met een nageschakelde geavanceerde oxidatie bij verschillende instellingen. Van de drie geteste membranen is in een relatief kort tijdsbestek vastgesteld dat:

- Bij toepassing van de dNF40 kan theoretisch een gemiddeld rendement van 70% op 7 van de 11 gidsstoffen bereikt worden indien
  - 82% van het rwzi effluent behandeld wordt én
  - alle met het concentraat teruggevoerde gidsstoffen aanvullend worden verwijderd in de rwzi.
- De membranen van het type dNF80 en dNF120 zijn niet in staat om de gidsstoffen in voldoende mate tegen te houden om te voldoen aan de richtlijnen uit het IPMV (70% verwijdering van 7 uit 11 gidsstoffen).

In combinatie met geavanceerde oxidatie (blootstelling aan UV en dosering van waterstofperoxide) nemen de verwijderingsrendementen aanzienlijk toe. Met het dNF80 membraan en dosering van 6.000 J/m<sup>2</sup> en 15 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> per liter kan in het resulterende water, opgemengd met het niet nabehandelde water, een totaal rendement van 88% op 7 van de 11 gidsstoffen bereikt worden, als 82% van het rwzi effluent wordt behandeld.

Tijdens de pilottesten (met een capaciteit van ca. 1 m<sup>3</sup>/h) is gebleken dat bij **droogweerc**condities de nanofiltratie stabiel te bedienen is onder tenminste de condities zoals die in de haalbaarheidsstudie zijn aangenomen. Uitzondering hierop vormde de dNF120, deze bleek ook bij dwa moeilijk stabiel te bedienen.

Om ook bij **regenweeraanvoer** stabiel te kunnen draaien is een aanvullende zwevendstofverwijdering als voorbehandeling nodig, zonder deze verstopping de vezels van de nanofiltratie met zwevendstof die bij regenweer uit de nabezinktanks uitspoelt.

Een antiscalant dosering blijkt niet nodig te zijn vanwege de lage retentie op tweewaardige zouten calcium en magnesium.

Het geproduceerde water is volledig vrij van pathogenen, heeft geen kleur en heeft een organisch koolstofgehalte van minder dan 2 mg/l. Toch is een toepassing van het geproduceerde water in bijvoorbeeld kassen zonder verdere behandeling niet mogelijk vanwege het te hoge natriumgehalte, uiteraard tenzij sprake is van de genoemde meer zouttolerante gewassen.

Vanwege de hoge kwaliteit zou verdere toepassing in industrie een goede optie kunnen zijn. Doorlevering aan derden is een haalbare optie, vooropgesteld dat een beperkt deel van het rwzi effluent wordt opgewerkt, zodat ook de resulterende concentraatstroom klein genoeg zal zijn om zonder negatieve effecten op de rwzi te kunnen verwerken.

Behandeling van de volledige stroom van een rwzi, voor lozing op oppervlaktewater ligt minder voor de hand. De eisen die gesteld worden aan lozing op oppervlaktewater zijn niet streng genoeg om een dergelijk vergaande behandeling te rechtvaardigen. Daarbij komt dat

volledige behandeling van een rwzi effluent zou resulteren in een concentraatstroom van dusdanige omvang dat nog niet duidelijk is hoe deze verder te verwerken is. De kosten van een nabehandeling met nanofiltratie en UV-peroxide bedragen voor een rwzi van 100.000 ie 47 cent per kubieke meter. Hierin zijn niet meegenomen de kosten voor verwerking van het concentraat. De verwerking van concentraat is onderwerp van een TKI-onderzoek dat plaatsvindt bij UTwente in samenwerking met Waterschap Vechtstromen.



# 8

## REFERENTIES

Kruithof et al, 2007; UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Treatment: A Practical Solution for Organic Contaminant Control and Primary Disinfection ; J. C. Kruithof, P.C. Kamp, B. J. Martijn; in: Ozone: Science and Engineering, 29: 273 – 280

KWR, 2016. Removal of pharmaceuticals from WWTP effluent, R. Hofman-Caris; W. Siegers, J. J. Hofman; KWR 2016.064

KWR, 2017 Kennisdocument Hergebruik van Restwater voor de Landbouwwatervoorziening, BTO rapport, G. Cirkel, G. v.d. Eertwegh, S. Stofberg, R. Bartholomeus

LTO, 2023 Mondelinge mededeling van Guus Meis, juli 2023

STOWA 2020-22, Haalbaarheidsstudie holle vezel nanofiltratie voor verwijdering van microverontreinigingen op rwzi's

STOWA 2020-41, Pilotonderzoek Vergelijking oxidatieve technieken effluent rwzi Aarle-Rixtel (IPMV)

STOWA 2021-46 PFAS in influent, effluent en zuiveringsslib – resultaten van een meetcampagne op acht rwzi's

STOWA 2021-47 Literatuuronderzoek naar bronnen en gedrag van PFAS in afvalwater

## BIJLAGE I

## GEANALYSEERDE PARAMETERS

Pakket	Parameter	Pakket	4
Biologie (Bio)	E.Coli (bacterien van de coligroep)	Simoni (Sim)	Bio essays (SIMONI score bepaling)
	Enterococcen		
Zware metalen (ZM)	Antimoon	Waterkwaliteit (WK)	Sulfaat
	Arseen		Troebelingsgraad
	Boor		Nitraat
	Cadmium		Nitriet
	Chroom		Som NOX
	Fluoride		Ammonium
	Koper		Chloride
	Kwik		DOC
	Lood		TOC
	Nikkel		EGV
	Seleen		Hardheid
Metalen	Aluminium		Waterstofcarbonaat
	IJzer		Zuurgraad
	Mangaan		Zuurstof
	Natrium		BZV
	Zink		PO4-P
	Kwik		Ptot
	Barium		Ntot
	Thallium		
	Mobybdeen		
	Magnesium		
	Silicium		
	Bromide		
Gidstoffen (Gst)			
Extra (Ex)*	Vluchtige organische stoffen		
	Combi geneesmiddelen en gidstoffen		
	Cl/N/P bestrijdingsmiddelen + PCB's		
	PFAS		
	Glyfosaat/AMPA		
	Antibiotica resistente bacteriën		
	Antibiotica resistente genen		
	Broomaat		

# RESULTATEN VAN PFAS ANALYSES

**TABEL 1 AANGETROFFEN PFAS CONCENTRATIES IN NG/L. GEARCEERDE CONCENTRATIES ZIJN TUSSEN DE DETECTIELIMIET EN DE RAPPORTAGEGREN EN MOGEN ALLEEN INDICATIEF GEBRUIKT WORDEN. DEZE STOFFEN ZIJN WEL AANGETROFFEN MAAR KUNNEN NIET BETROUWBAAR GEKWANTIFICEERD WORDEN.**

Matrix	infl nano	effl nano	effl UV	infl nano	effl nano	effl UV	infl nano	effl nano	effl UV	infl nano	effl nano	effl UV	infl nano	effl nano	effl UV	infl nano	effl nano	effl UV
Instelling	40 / 8000	40 / 8000	40 / 8000	40 / 8000	40 / 8000	40 / 8000	120 / 4000	120 / 4000	120 / 4000	120 / 4000	120 / 4000	120 / 4000	120 / 12000	120 / 12000	120 / 12000	120 / 12000	120 / 12000	120 / 12000
PFBA	5,0	0,99	1,1	3,9	1,2	1,5	2,5	2,5	3,1	3,1	2,5	2,6	2,7	2,1	2,7	2,0	1,8	3,2
PFPeA	2,2			6,3	1,1	1,2	2,7	1,7	2,0	1,5	1,1	1,0	1,1	0,84	1,0	2,1	1,5	1,7
PFHxA	5,0	0,54	0,48	12	1,5	1,5	6,4	4,3	4,3	3,6	3,0	2,3	3,0	2,3	2,2	6,4	4,5	4,4
PFHpA	1,6			5,8	0,44	0,59	1,7	1,2	1,1	1,5	1,2	0,76	1,3	0,91	0,81	2,2	1,4	1,4
PFOA	4,4			3,0			2,8	1,5	1,5	3,8	1,8	1,5	2,1	1,1	1,1	2,4	1,3	1,4
PFNA	0,60			0,41			0,63			0,77			0,42					
PFDA	0,42						0,51			0,92	0,42		0,63			0,44		
PFBS	1,7		0,58	1,2		0,48	1,3	1,1	3,1	0,90	0,76	0,99	0,66	0,49	0,49	0,80	0,66	0,84
PFOS	0,47			0,44			0,62		0,39	0,49			0,41			0,41		
6:2 FTS	0,91			0,59			0,61			0,48	0,41				0,42			
FBSA							0,96	0,56	0,55	0,48								