



Rijkswaterstaat  
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

stowa

VERKENNEND PILOTONDERZOEK

# VERWIJDERING VAN MEDICIJNRESTEN MET BEHULP VAN OZON EN ULTRASOUND



RAPPORT

2023  
30

VERWIJDERING VAN MEDICIJNRESTEN MET BEHULP VAN OZON  
EN ULTRASOUND: VERKENNEND PILOTONDERZOEK

RAPPORT

2023

30

ISBN 978.94.6479.016.0



# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Patricia Clevering-Loeffen (Sweco)  
Amanda Vierwind (Sweco)

## BEGELEIDINGSKOMMISSIE

Manon Bechger (Waternet)  
Maaike Hoekstra (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)  
Robert Kras (Waterschap Aa en Maas)  
Joop Kruithof  
Bernadette Lohmann (Waterschap Zuiderzeeland)  
Kevin van de Merlen (PureBlue Water)  
Mirabella Mulder (Mirabella Mulder Waste Water Management)  
Ruud van der Neut (PWN)  
Gerard Rijs (Rijkswaterstaat)  
Mariska Ronteltap (Hoogheemraadschap van Delfland)  
Nelis de Rouck (PureBlue Water)  
Maarten Schaafsma (Waterschap Rijn en IJssel)  
Ruud Schemen (Waterschap de Dommel)  
Els Schuman (LeAF)  
Cora Uijterlinde (STOWA)  
Marlies Verhoeven (Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden)  
Arnoud de Wilt (RoyalHaskoningDHV)

Een aantal medewerkers van Waterschap Rijn en IJssel is betrokken geweest bij de (technische) realisatie van de pilot, het verlenen van ondersteuning tijdens de pilot, de afstemming met het laboratorium, het verzorgen van monsternamemonsters en de data-verstrekking. Dit zijn Annemarie Kramer-Hoenderboom, Gerrit-Jan Bulten en Ilse Meeuwssen.

VORMGEVING Buro Vormvast  
STOWA STOWA 2023-30  
ISBN 978.94.6479.016.0

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

**De combinatie van ozon en ultrasound is een technologie voor de verregaande verwijdering van microverontreinigingen uit RWZI-effluent. De technologie blijft ook na dit verkennend pilotonderzoek veelbelovend door het in de pilot gemeten hogere verwijderingsrendement van microverontreinigingen bij een lagere ozondosering en waarbij, door de lagere ozondosering, minder bromaatvorming optreedt.**

**In navolging van de eerder afgeronde haalbaarheidsstudie (STOWA 2020-24) is de technologie in een verkennend pilotonderzoek nader onderzocht.**

Het ministerie van IenW, de STOWA en de Nederlandse Waterschappen hebben gezamenlijk het Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit Afvalwater (IPMV) opgezet om de ontwikkeling van veelbelovende verwijderingstechnieken te versnellen. Binnen het thema 'Oxidatieve technieken' is de toepassing van ultrasound in combinatie met ozontechnologie van de leverancier USONiQ in een pilotonderzoek nader bekeken. De onderzoeksvragen die voortkwamen uit de voorafgaande haalbaarheidsstudie zijn onderzocht op pilotschaal om een nauwkeurigere vergelijking te maken met de referentietechnologie (conventionele ozonisatie) op de aspecten verwijderingsrendement, kosten, duurzaamheid (CO<sub>2</sub>-footprint), desinfectie, antibioticaresistentie en bromaatvorming.

De pilottesten zijn in april 2022 uitgevoerd op RWZI Winterswijk van Waterschap Rijn en IJssel. Door omstandigheden was het niet mogelijk het pilotonderzoek volledig uit te voeren. Omdat alleen een batchgewijs gevoede pilotinstallatie is gebruikt (USO4-installatie) kunnen de onderzoeksvragen slechts deels worden beantwoord. In dit verkennend pilotonderzoek is het in de haalbaarheidsstudie gerapporteerde verwijderingsrendement van de gidsstoffen bevestigd. Bij een 20% lagere ozondosering zijn deze rendementen hoger dan de referentietechnologie. De resultaten uit onderhavig onderzoek zijn vergeleken met het pilotonderzoek met conventionele ozonisatie op RWZI Aarle-Rixtel (STOWA 2020-41). Tijdens onderhavig pilotonderzoek was de bromaatvorming vergelijkbaar met de meest gunstige bromaatvorming bij de referentiedosering van 0,7 g O<sub>3</sub>/g. Bij een lagere dosering is de bromaatvorming vergelijkbaar laag als bij conventionele ozonisatie. De resultaten geven een eerste inzicht in de bromaatvorming van de technologie met een combinatie van ozon en ultrasound.

De onderzoeksvragen die niet zijn beantwoord in deze verkennende pilot, zijn op dit moment niet bevestigd noch ontkracht. Voorafgaand aan opschaling naar demo of full-scale installatie is het wenselijk om deze alsnog te onderzoeken. Hiervoor is een duurproef met een grotere pilotinstallatie wenselijk.

Joost Buntsma  
Directeur STOWA

# SAMENVATTING

Bij de combinatie van ozon en ultrasound wordt in een roestvrijstalen buisvormige reactor achtereenvolgens ultrasonificatie, ozonisatie en ultrasonificatie toegepast. De gepatenteerde technologie is het resultaat van diverse (pilot)studies naar de toepassing van ultrasound en ozon. Een gepatenteerde mengschijf zorgt voor een optimale menging van de ingebrachte ozon in het effluent. Ultrasound versterkt het ozonisatieproces op verschillende manieren: het losbreken van bacteriële clusters, het verbreken van chemische verbindingen in het celmembraan, het verbeteren van de overdracht van ozon van de gasfase naar de vloeibare fase en het verbeteren van de vorming van vrije radicalen uit ozon.

In de eerder uitgevoerde haalbaarheidsstudie (STOWA 2020-24) in het kader van het Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit Afvalwater (IPMV) is deze technologie als veelbelovend bestempeld. De onderzoeksvragen die voortkwamen uit deze haalbaarheidsstudie zijn onderzocht op pilotschaal (dit rapport). De pilottesten zijn in april 2022 uitgevoerd op RWZI Winterswijk van Waterschap Rijn en IJssel.

Door omstandigheden was het niet mogelijk het pilotonderzoek volledig uit te voeren. Hierdoor is alleen Fase 1 uitgevoerd en is een batch proces pilotinstallatie toegepast, dit betekent dat niet alle onderzoeksvragen beantwoord kunnen worden. De onderzoeksvragen die (deels) zijn beantwoord, zijn als volgt:

1. Bepaling van het verwijderingsrendement van microverontreinigingen ten opzichte van de ozondosis in combinatie met ultrasound om te vergelijken met de resultaten van de haalbaarheidsstudie;
2. Inzicht in de vorming van bromaat als bijproduct van de combinatie ozonisatie en ultrasound, ten opzichte van de ozondosis om te vergelijken met de resultaten van de haalbaarheidsstudie;
3. Herijking van de gestelde criteria in de haalbaarheidsstudie op basis van de resultaten van het pilotonderzoek.

De pilot is uitgevoerd met het effluent van RWZI Winterswijk dat is gespiked met een geconcentreerde bromideoplossing tot ongeveer 1 mg bromide/l. Er zijn vijf specifieke ozondoseringen getest met de pilotinstallatie in de bandbreedte van 0,16 en 0,72 gO<sub>3</sub>/gDOC. De pilotinstallatie heeft een capaciteit van 1 m<sup>3</sup>/h. In zowel de onbehandelde als de behandelde stroom zijn DOC, microverontreinigingen, bromide en bromaat gemeten.

In dit pilotonderzoek is een verwijderingsrendement van 94% bij een ozondosering van 0,55 gO<sub>3</sub>/gDOC bepaald, voor 7 van de 11 gidsstoffen (conform de benoemde gidsstoffen in 2018). Dit betekent dat de pilot goed vergelijkbaar is met de conclusies van de haalbaarheidsstudie. De resultaten van de pilot valideren hiermee de resultaten uit de haalbaarheidsstudie. Met een 20% lagere ozondosering kan met de onderzochte technologie een hoger verwijderingsrendement worden behaald dan conventionele ozonbehandeling. Het verwijderingsrendement met conventionele ozonbehandeling is 88% conform de gidsstoffen van 2018 en 82% conform de gidsstoffen van 2021, bij een ozon dosering van 0,7 g O<sub>3</sub>/g DOC.

**TABEL 0.1 GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT IN DE NAGESCHAKELDE STAP VAN 7 GIDSSTOFFEN VOOR DE VIJF TOEGEPASTE OZONDOSERINGEN. ER IS ONDSCHIED GEMAAKT IN HET GIDSSTOFFENPAKKET CONFORM 2018 EN 2021**

Ozondosering <sup>1</sup>	gO <sub>3</sub> /gDOC	0,16	0,35	0,55 <sup>2</sup>	0,58 <sup>2</sup>	0,72
Gemiddelde 7 gidsstoffen (2018)	%	64	90	94	93	96
Gemiddelde 7 gidsstoffen (2021)	%	51	76	92	91	96

1 Inclusief correctie voor de concentratie nitriet.

2 Uitgebreid analysepakket waarbij 2 gidsstoffen ontbreken en 1 onder de rapportagegrens is geanalyseerd.

De uitkomsten van dit pilotonderzoek geven een eerste inzicht in de bromaatvorming van de technologie. Net als bij de conventionele ozondosering is de bromaatvorming bij een dosering tot 0,4 gO<sub>3</sub>/gDOC laag. In dit pilotonderzoek is de gemeten concentratie bromaat ≤ 0,4 µg BrO<sub>3</sub>/l. Bij een hogere specifieke ozondosering neemt de bromaatvorming toe, namelijk 3,8 µg BrO<sub>3</sub>/l bij de dosering van 0,55 gO<sub>3</sub>/gDOC en een hoge ingaande bromideconcentratie van 1 mg/l.

De bromaatvorming bij een ozondosering van 0,7 g O<sub>3</sub>/g DOC in dit onderzoek bedraagt 5,7 µg/l en is vergelijkbaar met de laagste bromaatconcentratie die in de pilot met conventionele ozonisatie op RWZI Aarle Rixtel gevormd (STOWA 2020-41, tevens een IPMV-onderzoek). In dit onderzoek werd ordegrootte 6-11 µg/l bromaat gevormd.

**TABEL 0.2 BROMAATVORMING BIJ DE VERSCHILLENDE OZONDOSERINGEN (GEMIDDELTE VAN 2 METINGEN).**

Ozondosering <sup>1</sup>	gO <sub>3</sub> /gDOC	0,16	0,35	0,55 <sup>2</sup>	0,58 <sup>2</sup>	0,72
Bromaat	µg BrO <sub>3</sub> /l	0,2	0,4	3,8	3,8	5,7

1 Inclusief correctie voor de concentratie nitriet.

2 Uitgebreid analysepakket waarbij 2 gidsstoffen ontbreken en 1 onder de rapportagegrens is geanalyseerd.

Zoals ook is geconcludeerd in de voorgenoemde haalbaarheidsstudie blijft deze technologie na dit pilotonderzoek veelbelovend door het hogere verwijderingsrendement voor microverontreinigingen bij een lagere ozondosering en doordat er minder bromaatvorming optreedt bij een lagere ozondosering.

Op dit moment zijn de onderzoeksvragen, die met een grotere continue pilotinstallatie (USO2020) zouden worden onderzocht, niet beantwoord. De grotere pilotinstallatie geeft meer inzicht in:

- de ontwerpgrondslagen en het energieverbruik op basis van de procescondities;
- de mate van desinfectie van het effluent en de impact op de ecotoxiciteit;
- antibioticaresistentie;
- de verwijdering van PFAS.

Wanneer antwoord wordt gekregen op voorgenoemde onderzoeksvragen dan kunnen de gestelde criteria (verwijderingsrendement, kosten, CO<sub>2</sub>-footprint en bijvangst) uit de haalbaarheidsstudie worden getoetst. Voor opschaling naar een demo of full scale installatie is het wenselijk om de onderzoeksvragen te beantwoorden, bijvoorbeeld door fase 2 en 3 van het pilotonderzoek alsnog uit te voeren in Nederland.

# 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.*

# VERWIJDERING VAN MEDICIJNRESTEN MET BEHULP VAN OZON EN ULTRASOUND: VERKENNEND PILOTONDERZOEK

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
	1.1 Aanleiding	1
	1.2 Doel van het pilotonderzoek	2
	1.3 Projectorganisatie	2
	1.4 Leeswijzer	2
<b>2</b>	<b>TECHNOLOGIE EN ONDERZOEKSOPZET</b>	<b>3</b>
	2.1 Korte beschrijving technologie	3
	2.2 Onderzoeksopzet	3
	2.2.1 Tijdslijn onderzoek	3
	2.2.2 De pilotinstallatie	4
	2.2.3 Onderzoeksopzet Fase 1	5
	2.2.4 Gidsstoffen 2018 versus 2021	5
<b>3</b>	<b>RESULTATEN</b>	<b>7</b>
	3.1 Toegepaste ozondosering, DOC en nitriet	7
	3.2 Microverontreinigingen	7
	3.3 Bromaat	13
	3.3.1 Bromideconcentratie	13
	3.3.2 Bromaatvorming	13



<b>4</b>	<b>VERGELIJKING RESULTATEN PILOT MET REFERENTIES</b>	<b>16</b>
<b>4.1</b>	<b>Verwijdering microverontreinigingen</b>	<b>16</b>
4.1.1	Rendement volgens de haalbaarheidsstudie	16
4.1.2	Rendement van de referentie ozon	16
4.1.3	Vergelijking verwijderingsrendementen	17
<b>4.2</b>	<b>Bromaatvorming</b>	<b>18</b>
4.2.1	Conclusie haalbaarheidsstudie	18
4.2.2	Vergelijking met conventionele ozonisatie uit literatuur	18
4.2.3	Vergelijking met conventionele ozonisatie uit IPMV	19
<b>5</b>	<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	<b>21</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusies</b>	<b>21</b>
<b>5.2</b>	<b>Aanbevelingen</b>	<b>22</b>
<b>BIJLAGE 3</b>	<b>ANALYSE RESULTATEN</b>	<b>28</b>

# 1

## INLEIDING

### 1.1 AANLEIDING

Voor de verwijdering van microverontreinigingen en bacteriën uit RWZI-effluent is nageschakelde ozondosering een bewezen technologie. De innovatieve combinatie van ozon en ultrasound bewerkstelligt mogelijk een verbeterde en snelle ozonoverdracht naar het effluent ten opzichte van reguliere ozonbehandeling. Daarbij wordt een alternatief inbrengen en mengprincipe voor ozon toegepast waardoor de ozon beter beschikbaar is voor de verwijdering van microverontreinigingen.

De haalbaarheid van de combinatie ozonisatie en ultrasound van de leverancier USONiQ is onderzocht en gerapporteerd in het kader van het Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit afvalwater (IPMV)<sup>1</sup>.

Binnen het Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit afvalwater (IPMV) worden veelbelovende nieuwe verwijderingstechnieken en mogelijke verbeteringen van bestaande technieken onderzocht. Het doel hiervan is dat waterschappen binnen vijf tot zeven jaar een breder scala aan beproefde verwijderingstechnieken tot hun beschikking hebben, waaruit ze de beste keuze kunnen maken voor hun eigen situatie.

Over deze technieken bestaan momenteel nog onzekerheden, onder meer qua verwijderingsrendementen, kosten en CO<sub>2</sub>-voetafdruk. Maar ook omdat onvoldoende duidelijk is of de technieken goed kunnen worden ingepast op Nederlandse RWZI's en welke effecten er optreden in de bedrijfsvoering en het zuiveringsproces van de RWZI.

In de eerder uitgevoerde haalbaarheidsstudie<sup>1</sup> is de technologie vergeleken met reguliere ozonbehandeling op basis van een voor het IPMV gestandaardiseerde set criteria (zie Tabel 1.1). Daaruit is geconcludeerd dat de combinatie van ozonisatie en ultrasound qua CO<sub>2</sub>-footprint en verwijderingsrendement beter scoort dan de referentietechnologie ozon, en qua kosten vergelijkbaar scoort. Qua bromaatvorming is een voorzichtige uitspraak gedaan dat het effect van de combinatie van ozonisatie en ultrasound kan leiden tot een lagere bromaatvorming doordat er minder 'rest-ozon' aanwezig is in het behandelde effluent. Daarnaast is een lagere ozondosering benodigd.

**TABEL 1.1** CRITERIA EN HUN WAARDEN VOOR DE REFERENTIE TECHNOLOGIEËN

	PACAS	Ozon + zandfilter	GAK	ozon en ultrasound + ZF	Eenheid
1. CO <sub>2</sub> -footprint	122	128	325	108-123	gCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> <sub>behandeld</sub>
2. Kosten	0,05	0,17	0,26	0,17*	€/m <sup>3</sup> <sub>behandeld</sub>
3. Verwijderingsrendement gidsstoffen	70-75%	80-85%	80-85%	85-90%	%**

\* Uitgaande van € 0,10/m<sup>3</sup><sub>behandeld</sub> voor ZF

\*\* Rendement is totale effluent (na extra technologie) ten opzichte van het influent van de RWZI op basis van de gidsstoffen uit 2018 van het Ministerie I&W

1 STOWA 2020-24, Haalbaarheidsstudie ultrasound in combinatie met ozon technologie voor de verwijdering van microverontreinigingen op RWZI's

Vervolgens is een pilotonderzoek op RWZI Winterswijk gestart. Fase 1 van het pilotonderzoek had als doel om tijdens een kortdurend onderzoek met een kleine pilotinstallatie het verband tussen ozondosering en verwijderingsrendement voor de gidsstoffen te bepalen. Daarnaast is gespiked met bromide om inzicht te krijgen in de bromaatvorming bij deze technologie.

Vervolgens zou fase 2 en 3 van het pilotonderzoek aanvangen met een grotere pilotinstallatie (zie bijlage 1). Door externe omstandigheden heeft deze oorspronkelijk geplande opvolgende duurproef niet plaatsgevonden. Hierdoor zijn de beoogde metingen van kWh-verbruik, desinfectie parameters, antibioticaresistentie en ecotoxiciteit niet uitgevoerd.

De prestaties van het pilotonderzoek (alleen fase 1) zijn in dit rapport beschreven en vergeleken met de uitkomsten van de haalbaarheidsstudie.

## 1.2 DOEL VAN HET PILOTONDERZOEK

Vooraf zijn voor het pilotonderzoek de volgende doelen geformuleerd:

1. Bepalen van het verwijderingsrendement van microverontreinigingen ten opzichte van de O<sub>3</sub>-dosis met ozonisatie en ultrasound om te vergelijken met de resultaten van de haalbaarheidsstudie.
2. Inzicht in de vorming van bromaat als bijproduct van de combinatie van ozonisatie en ultrasound, ten opzichte van de O<sub>3</sub>-dosis om te vergelijken met de resultaten van de haalbaarheidsstudie.
3. Herijking van de gestelde criteria in de haalbaarheidsstudie op basis van de resultaten van het pilotonderzoek.

## 1.3 PROJECTORGANISATIE

De projectorganisatie van de pilot bestond uit:

- Waterschap Rijn en IJssel: gastheer voor de locatie (RWZI Winterswijk), ondersteuning bij (de voorbereidingen van) de pilot en communicatie met het laboratorium.
- Sweco Nederland B.V.: als adviesbureau betrokken bij de opzet van de pilot, aanwezigheid bij de pilot, o.a. voor monsternamen, uitwerking resultaten en opstellen van de rapportage.
- USONiQ: leverde pilotinstallaties inclusief transport, zorgde zelfstandig voor het opstarten en draaien van de pilotinstallaties.
- Laboratorium (Aqualysis): zorgde voor de analyses tijdens het pilotonderzoek. Analyse van bromide en bromaat werd uitgevoerd door het Waterlaboratorium.

## 1.4 LEESWIJZER

Hoofdstuk 2 beschrijft in het kort de technologie en de onderzoeksopzet. In hoofdstuk 3 zijn de onderzoeksresultaten gegeven, waarna deze in hoofdstuk 4 vergeleken zijn met de eerder uitgevoerde haalbaarheidsstudie en andere pilotonderzoeken. Tenslotte zijn de conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 5 gegeven.

# 2

## TECHNOLOGIE EN ONDERZOEKSOPZET

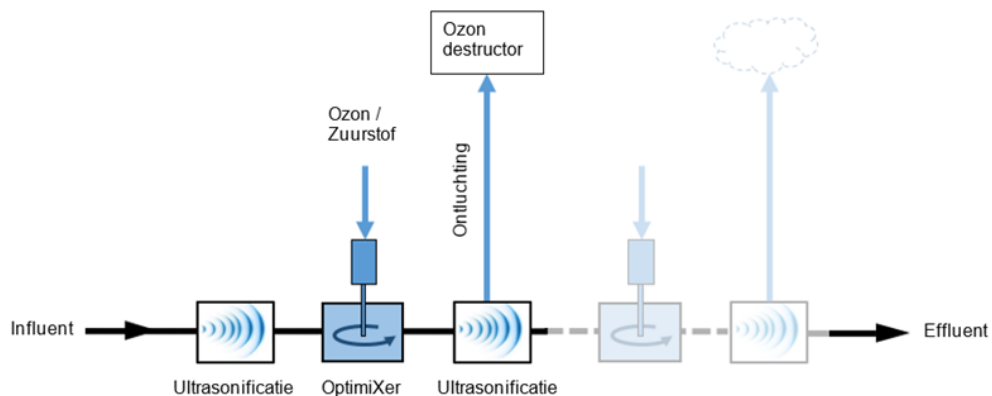
### 2.1 KORTE BESCHRIJVING TECHNOLOGIE

De gepatenteerde technologie (USONiQ) is het resultaat van diverse (pilot)studies naar de toepassing van de combinatie van ozon en ultrasound in een gecontroleerde omgeving. Ultrasoon versterkt het ozonisatieproces op verschillende manieren:

- het losbreken van bacteriële clusters;
- het verbreken van chemische verbindingen in het celmembraan;
- het verbeteren van de vorming van vrije radicalen uit ozon;
- het verbeteren van de overdracht van ozon van de gas- naar de vloeibare fase.

Het systeem bestaat uit een roestvrijstalen, buisvormige reactor, zie Figuur 2.1. In deze leiding vindt achtereenvolgens de toediening van ultrasound, ozon en ultrasound plaats. In het deel dat als reactieruimte dient voor de behandeling met ultrasound zijn ultrasoundgeneratoren verdeeld over de leiding. Daarna vindt ozontoevoer plaats dicht bij een gepatenteerde mengschijf die voor optimale menging van de ingebrachte ozon zorgt. Vervolgens wordt er opnieuw ultrasound toegediend.

FIGUUR 2.1 PROCESSHEMA COMBINATIE OZONISATIE EN ULTRASOUND (BRON: LEVERANCIER USONIQ, STOWA 2020-24)



Afhankelijk van de lokale situatie en de te behalen doelen kan vervolgens nogmaals enkele malen achtereenvolgens ozon en ultrasoon worden toegediend.

### 2.2 ONDERZOEKSOPZET

#### 2.2.1 TIJDLIJN ONDERZOEK

Oorspronkelijk was de pilot opgezet in drie fases met twee verschillende pilotinstallaties en waren er zes onderzoeksdoelen. Beperkingen als gevolg van COVID-19 en onvoorziene omstandigheden hebben ertoe geleid dat fase 1 van het pilotonderzoek met de kleinere (USO4) pilotinstallatie (zie paragraaf 2.2.2) verlaat is uitgevoerd en daarna nog tweemaal is herhaald door het niet juist uitvoeren van het onderzoek. De derde keer is fase 1 geslaagd en zijn de bijbehorende doelen die in paragraaf 1.2 zijn opgesomd behaald en vervolgens uitgewerkt in dit rapport.

De grote pilot (genaamd USO2020) die gebruikt zou worden in fase 2 en 3 (zie bijlage 1) draaide sinds 2021 op een RWZI in Duitsland en conform afspraken zou RWZI Winterswijk de eerstvolgende pilotlocatie zijn. Bij de pilot in Duitsland is eerst vertraging opgelopen door beperkingen vanwege corona. Vervolgens bleken de resultaten aldaar dusdanig positief dat het onderzoeksproject is uitgebreid met aanvullende experimenten. Dit heeft vertraging opgeleverd in de planning van de grote pilot op RWZI Winterswijk. Deze vertraging was zodanig dat de onderzoeksplanning ging conflicteren met uitvoeringsplannen van waterschap Rijn en IJssel op RWZI Winterswijk voor een nabehandelingsinstallatie. Dit leverde een harde deadline voor het uitvoeren van de pilot, waarbij de leverancier niet kon garanderen dat de grote pilot gereed was voor aanvang van de uitvoeringsplannen.

De risico's voor hoge kosten en het niet halen van de planning zonder de zekerheid van de leverancier heeft ertoe geleid dat fase 2 en 3 niet zijn uitgevoerd. De niet uitgevoerde fases 2 en 3 en de bijbehorende pilotinstallatie zijn wel beschreven in bijlage 1.

### **2.2.2 DE PILOTINSTALLATIE**

De USO4 is een pilotinstallatie met een capaciteit van 1 m<sup>3</sup>/h. In fase 1 van dit onderzoek is de pilot batchgewijs ingezet, waarbij meerdere keren een nieuwe hoeveelheid van ongeveer 1 m<sup>3</sup> effluent van RWZI Winterswijk is behandeld met een bepaalde vaste ozondosering.

Op de afbeelding in Figuur 2.2 staat vooraan het voorraadvat van 1 m<sup>3</sup> waarin het effluent is gepompt. Daarachter bevindt zich de installatie waarin de ozondosering en ultrasone behandeling plaatsvindt. Achteraan is de elektriciteitsvoorziening en de regelaar. Aan de achterzijde van de installatie bevindt zich, uit het zicht, de ozongenerator en de zuurstofvoorziening.

Met deze installatie zijn de effecten van de technologie op de verwijdering van microverontreinigingen en de vorming van bromaat inzichtelijk gemaakt bij verschillende specifieke ozondoseringen. Daarbij kan met deze installatie een eerste inschatting worden gemaakt van de toepasbare procescondities, zoals de specifieke ozondosering, voor het vervolgonderzoek met de grote pilotinstallatie.

FIGUUR 2.2 FOTO VAN DE KLEINE PILOT (US04) VOOR HET ONDERZOEK IN FASE 1



### 2.2.3 ONDERZOEKSOPZET FASE 1

Het onderzoek heeft plaatsgevonden op twee droogweerdagen, 13 en 14 april 2022. De dagen voorafgaand aan het onderzoek is geen of een verwaarloosbare hoeveelheid regen gevallen. Daardoor is er geen invloed van regen op de effluentkwaliteit geweest en heeft dit het pilotonderzoek niet beïnvloed. Dit laatste is een aandachtspunt bij onderzoek op RWZI Winterswijk. Vanuit het onderzoek 'Robuuste bemonstering'<sup>2</sup> is bekend dat door kenmerken van het rioelstelsel de effecten van regenweer langer doorwerken in de effluentkwaliteit van deze RWZI dan van de andere onderzochte Nederlandse RWZI's. In de ochtend werd het benodigde aantal IBC's gevuld met 1 m<sup>3</sup> effluent van RWZI Winterswijk, zodat bij iedere ozondosering het effluent een vergelijkbare samenstelling heeft. Er zijn vervolgens vijf verschillende ozondoseringen getest, zie paragraaf 3.1. Deze doseringen liggen rondom de ontwerpparameter uit de haalbaarheidsstudie van 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC<sup>1</sup>. Tijdens het onderzoek is gespiked met bromide om de bromaatvorming bij deze ozondoseringen in beeld te brengen. RWZI Winterswijk heeft een relatief lage bromideconcentratie (ongeveer 100 µg/l) in het influent. Om toch inzage te krijgen in het effect van de technologie op bromaatvorming, is het effluent gespiked met bromide tot een concentratie van 1.000 µg Br/l. Er is gekozen voor deze hoge concentratie bromide om er zeker van te zijn dat er bromaat gevormd kan worden indien de technologie daar aanleiding toe geeft.

### 2.2.4 GIDSSTOFFEN 2018 VERSUS 2021

De haalbaarheidsstudie<sup>1</sup> is uitgevoerd voor de 11 gidsstoffen uit 2018. In 2021 is de lijst van 11 gidsstoffen aangepast, waarbij drie stoffen zijn vervangen door andere stoffen<sup>3</sup>. De overeenkomsten en verschillen in stoffen zijn gegeven in Tabel 2.1. In de resultaten van de pilot zijn de rendementen voor de microverontreinigingen volgens beide gidsstoffenlijsten uitgewerkt.

- 2 LeAF (2021) Grip op verwijdering van microverontreinigingen door RWZI's: Verwerking en interpretatie meetgegevens fase 1, Conceptrapportage versie 2, d.d. 19-5-2021
- 3 Mulder (2021) 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

**TABEL 2.1 GIDSSTOFFEN ANALYSEPAKKET VAN 19 MICROVERONTREINIGING EN ONDERVERDELING NAAR DE GIDSSTOFFEN CONFORM 2018 EN 2021 \***

	2018	2021
1,2,3-benzotriazol	X	X
4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	X	X
Carbamazepine	X	X
Diclofenac	X	X
Hydrochlorothiazide	X	X
Metoprolol	X	X
Sotalol	X	X
Trimethoprim	X	X
Clarithromycine	X	
Propranolol	X	
Sulfamethoxazol	X	
Gabapentine		X
Irbesartan		X
Venlafaxine		X
Amisulpride		
Azitromycine		
Candesartan		
Citalopram		
Furosemide		

\* De gidsstoffen zijn aangegeven met een X, de overige stoffen zijn monitoringsstoffen.

De gidsstoffen zijn gemeten door middel van 2 verschillende analysepakketten (zie bijlage 2):

- Het 'gidsstoffenpakket' met in totaal 19 microverontreinigingen: alle 14 gidsstoffen, aangevuld met vijf verplichte monitoringsstoffen (zie Tabel 2.1). Deze 19 stoffen dienen gemonitord te worden in pilots van het IPMV en demonstratieprojecten (demo's) van uit de bijdrageregeling 'Zuivering Medicijnresten'. Dit pakket is tijdens de pilot bij 3 ozon-doseringen geanalyseerd;
- Bij 2 ozondoseringen is een uitgebreid 'geneesmiddelenpakket' geanalyseerd met 62 microverontreinigingen, zodat een vergelijking kon worden gemaakt met eerdere analyses op RWZI Winterswijk. In dit pakket ontbreken 2 gidsstoffen, namelijk 4,5-methyl-1H-benzotriazol en 1,2,3-benzotriazol. Dit was vooraf niet bekend.

# 3

## RESULTATEN

### 3.1 TOEGEPASTE OZONDOSERING, DOC EN NITRIET

Er zijn vijf ozondoseringen gehanteerd, gebaseerd op een verondersteld DOC-gehalte in het effluent. Deze doseringen waren 0,3; 0,4; 0,5; 0,7; en 0,9 g O<sub>3</sub>/g DOC. Achteraf is de exacte dosering bepaald aan de hand van DOC-analyses en is gecorrigeerd voor de concentratie nitriet (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>).

De DOC-concentraties waren tussen de 11-14 mg DOC/l. De ingaande concentratie van nitriet was 0,10 - 0,14 mg NO<sub>2</sub>-N /l en de uitgaande concentratie altijd <0,02 mg NO<sub>2</sub>-N /l. Nitriet reageert met ozon op basis van de stoichiometrische verhouding van 3,43 g O<sub>3</sub>/g NO<sub>2</sub>-N<sup>4</sup>. Op basis van de meetgegevens verkregen uit het pilotonderzoek kan worden geconcludeerd dat 5-9% van de ozondosering reageert met nitriet. Inclusief de correctie voor nitriet zijn de specifieke ozondoseringen respectievelijk 0,16; 0,35; 0,55; 0,58 en 0,72 g O<sub>3</sub>/g DOC, zie Tabel 3.1. Door het verschil in DOC op de twee testdagen liggen de specifieke ozondoseringen in twee situaties onbedoeld dicht bij elkaar (0,55 en 0,58 g O<sub>3</sub>/g DOC).

Deze rapportage benoemd telkens de specifieke ozondosering inclusief de correctie voor nitriet.

TABEL 3.1 OZONDOSERING TIJDENS (KLEINE) PILOTTEST

Gewenste dosis	Absolute dosis	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	O <sub>3</sub> consumptie NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Absolute dosis na correctie NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	DOC	Specifieke ozon dosering	Specifieke ozon dosering na correctie NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
g O <sub>3</sub> /g DOC	mg O <sub>3</sub> /l	mg N/l	mg O <sub>3</sub> /l	mg O <sub>3</sub> /l	mg/l	g O <sub>3</sub> /g DOC	g O <sub>3</sub> /g DOC
0,3	2,28	0,10	0,34	1,94	12,0	0,19	0,16
0,4	4,56	0,11	0,36	4,20	12,0	0,38	0,35
0,7*	8,15	0,14	0,48	7,66	14,0	0,58	0,55
0,5*	6,79	0,11	0,36	6,43	11,0	0,62	0,58
0,9	10,51	0,14	0,48	10,03	14,0	0,75	0,72

\* Door het verschil in DOC tussen de twee monsters die op twee verschillende dagen zijn genomen, zijn deze twee gewenste doses omgewisseld in volgorde kijkende naar de uiteindelijke reële doses.

### 3.2 MICROVERONTREINIGINGEN

De gemeten ingaande en uitgaande concentraties zijn gegeven in bijlage 3.

- Het gidsstoffenpakket is geanalyseerd bij de testen met 0,16 , 0,35 en 0,72 g O<sub>3</sub>/g DOC;
- Het uitgebreide geneesmiddelenpakket is geanalyseerd bij de testen met 0,55 en 0,58 g O<sub>3</sub>/g DOC. Hierbij wordt het volgende opgemerkt:
  - 2 gidsstoffen ontbreken in dit pakket, namelijk *4,5-methyl-1H-benzotriazol* en *1,2,3-benzotriazol*;
  - *Hydrochlorothiazide* heeft een hogere rapportagegrens in dit pakket (hoger dan de concentratie in het effluent) waardoor het verwijderingsrendement niet kan worden bepaald.

4 STOWA (2018). Zoetwaterfabriek AWZI De Grootte Lucht; Pilotonderzoek ozonisatie en zandfiltratie, Rapportnummer: 2018-46



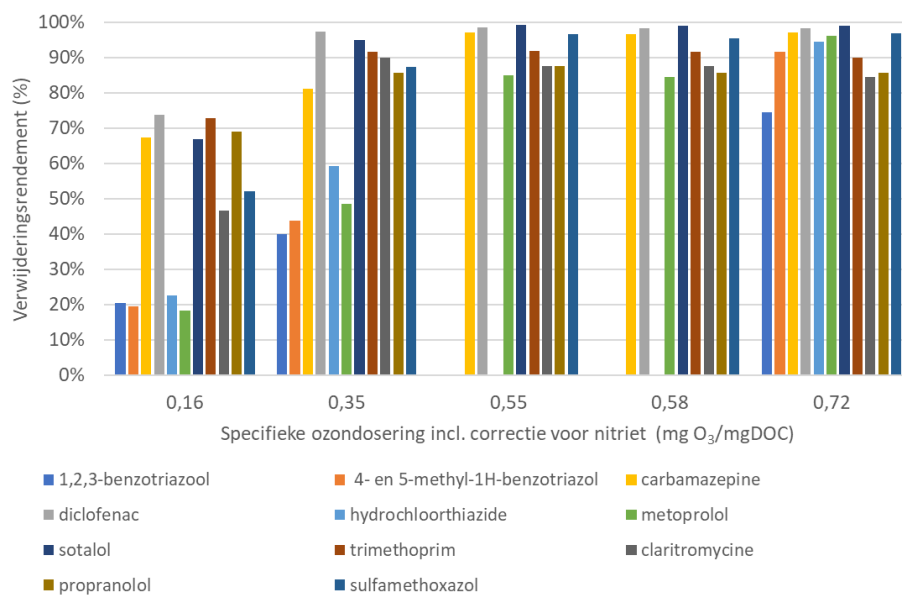
Het verwijderingsrendement van de microverontreinigingen is bepaald over de nageschakelde technologie. Dit betekent dat het verwijderingsrendement van de RWZI niet is meege-  
nomen. Indien de concentratie in de afloop van de pilot lager is dan de rapportagegrens, dan  
is de rapportagegrens als concentratie aangenomen (STOWA 2021-15<sup>5</sup>). In dergelijke gevallen  
wordt het verwijderingsrendement dus onderschat.

De verwijderingsrendementen zijn weergegeven in Figuur 3.1. De rendementen nemen toe  
bij een hogere specifieke ozondosering (in g O<sub>3</sub>/g DOC). Bij de laagst geteste en relatief lage  
ozondosering van 0,16 g O<sub>3</sub>/g DOC wordt:

- voor drie gidsstoffen een verwijderingsrendement tussen 60 en 70% gehaald, dit betreft *carbamazepine*, *sotalol* en *propranolol*;
- voor drie stoffen een verwijderingsrendement hoger dan 70% gehaald, dit betreft *diclofenac*, *trimethoprim* en *furosemide* (kandidaat gidsstof);
- voor de overige gidsstoffen een verwijderingsrendement lager dan 50% gehaald.

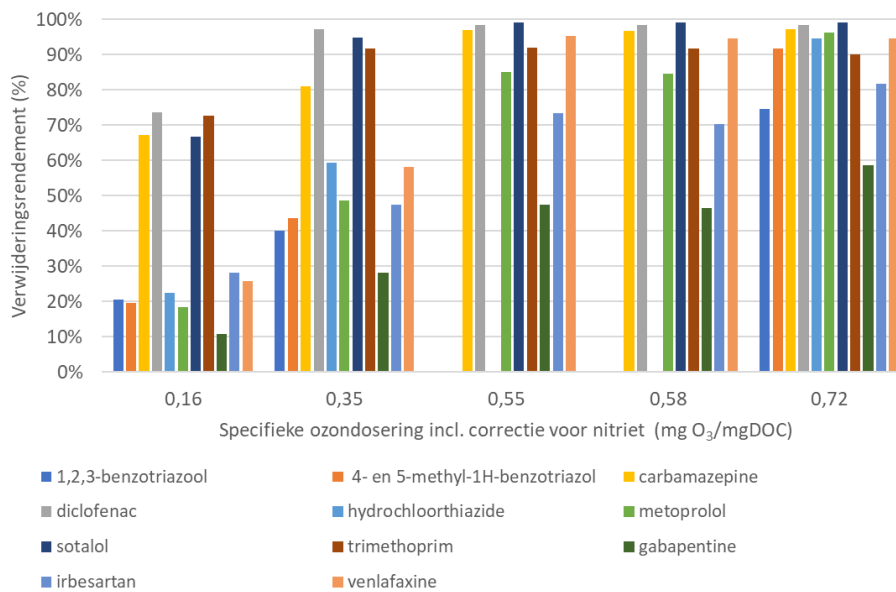
Bij de hoogste dosering (0,75 g O<sub>3</sub>/g DOC) is het verwijderingsrendement van elke stof 75% of  
hoger, met uitzondering van *Gabapentine*.

**FIGUUR 3.1 VERWIJDERINGSRENDEMENT IN DE NAGESCHAKELDE STAP VAN 11 GIDSSTOFFEN (GIDSSTOFFEN 2018) BIJ VIJF VERSCHILLENDE OZONDOSERINGEN**



5 Bepaling verwijderingsrendement medicijnresten RWZI-afvalwater, koepelvoorschrift en onderbouwende eindrap-  
portage, STOWA 2021-15.

**FIGUUR 3.2 VERWIJDERINGSRENDEMENT IN DE NAGESCHAKELDE STAP VAN 11 GIDSSTOFFEN (GIDSSTOFFEN 2021) BIJ VIJF VERSCHILLENDE OZONDOSERINGEN**

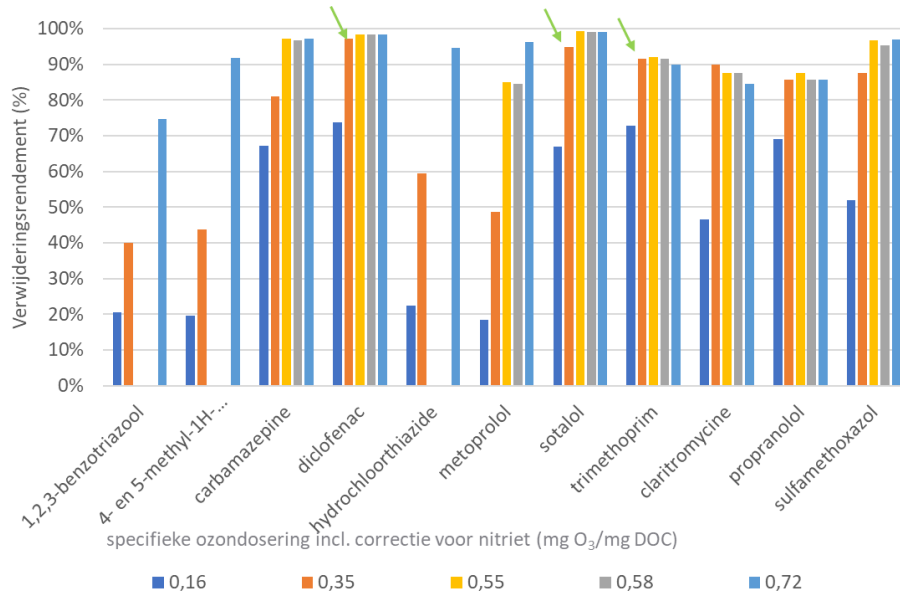


Wanneer de resultaten worden gerangschikt op gidsstof (zie Figuur 3.3) is goed zichtbaar dat het verwijderingsrendement van de meeste stoffen bij een bepaalde ozondosering sterk stijgt en minimaal stijgt of stabiel blijft bij een verdere verhoging van de dosering. Zo heeft bijvoorbeeld voor drie stoffen de verhoging van de ozondosering van 0,19 naar 0,38 g O<sub>3</sub>/g DOC een significante impact op het verwijderingsrendement (zie de groene pijlen). Dit betreft de gidsstoffen *diclofenac*, *sotalol* en *trimethoprim*. Bij bijvoorbeeld *claritromycine* en *Venlafaxine* wordt deze stap tussen 0,38 en 0,58 g O<sub>3</sub>/g DOC gemaakt.

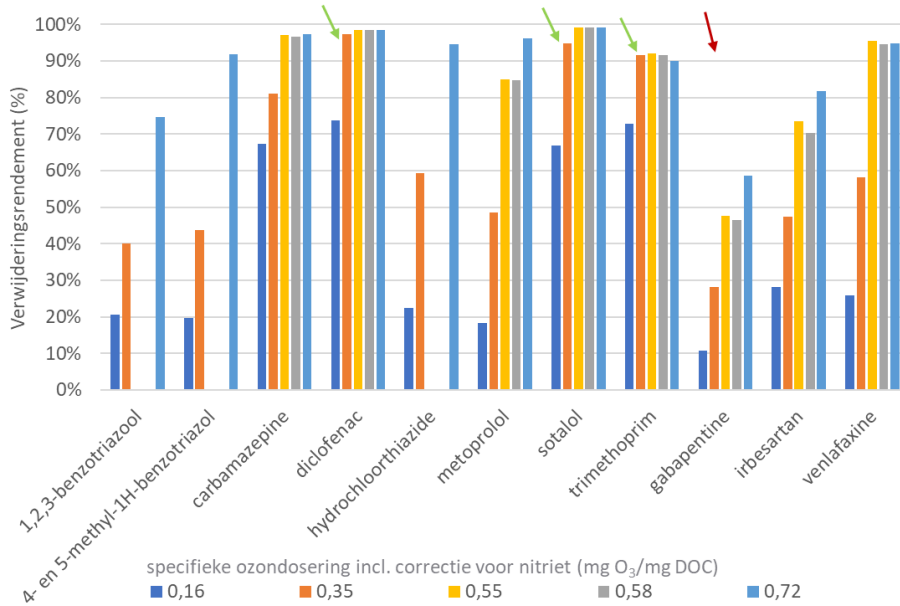
Ook is duidelijk dat de gidsstof *Gabapentine* het laagste verwijderingsrendement behaalt bij alle ozondoseringen (rode pijl in Figuur 3.3).

De resultaten bij 0,55 en 0,58 g O<sub>3</sub>/g DOC zijn zeer vergelijkbaar. Deze testen zijn op een andere dag en bij een ander DOC-gehalte uitgevoerd. Ondanks dat de doseringen onbedoeld dicht bij elkaar liggen, kan de uitkomst bij 0,58 g O<sub>3</sub>/g DOC als bevestiging of duplo van de uitkomst bij 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC worden gezien.

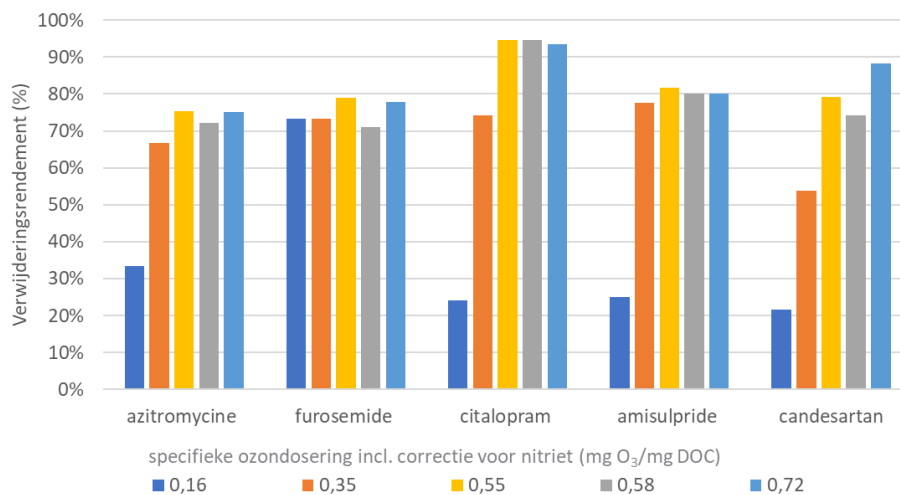
**FIGUUR 3.3 VERWIJDERINGSRENDEMENT IN DE NAGESCHAKELDE STAP PER GIDSSTOF 2018 BIJ VIJF VERSCHILLENDE OZON DOSERINGEN (NA BEHANDELING IN DE KLEINE PILOT). VERKLARING PIJLEN: ZIE TEKST VOORAFGAAND AAN FIGUUR**



**FIGUUR 3.4 VERWIJDERINGSRENDEMENT IN DE NAGESCHAKELDE STAP PER GIDSSTOF 2021 BIJ VIJF VERSCHILLENDE OZONDOSERINGEN (NA BEHANDELING IN DE KLEINE PILOT). VERKLARING PIJLEN: ZIE TEKST VOORAFGAAND AAN FIGUUR**



**FIGUUR 3.5 VERWIJDERINGSRENDEMENT IN DE NAGESCHAKELDE STAP PER MONITORINGSSTOF (ZIJNDE NIET GIDSSTOF 2018 OF 2021) BIJ VIJF VERSCHILLENDE OZONDOSERINGEN (NA BEHANDELING IN DE KLEINE PILOT)**



In Tabel 3.2 en Figuur 3.6 zijn de verwijderingsrendementen als gemiddelde van de 7 best verwijderde en alle 11 gidsstoffen gegeven. Vanuit het IPMV is het gebruikelijk de verwijderingsrendementen als gemiddelde van de 7 best verwijderde gidsstoffen te rapporteren. Wanneer onderscheid wordt gemaakt tussen de gidsstoffen conform 2018 en 2021 dan is duidelijk dat het gemiddelde verwijderingsrendement van alle stoffen uit het gidsstoffenpakket van 2021 over het algemeen lager ligt.

Het gemiddelde verwijderingsrendement van de 7 best verwijderde gidsstoffen bij een dosering van 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC is 94 % en 92 % voor respectievelijk de gidsstoffen uit 2018 en 2021. Deze dosering is vergelijkbaar met de in de haalbaarheidsstudie genoemde dosering van 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC (zie paragraaf 4.1).

**TABEL 3.2 GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT IN DE NAGESCHAKELDE STAP VAN 11 OF 7 GIDSSTOFFEN VOOR DE VIJF TOEGEPASTE OZONDOSERINGEN. ER IS ONDSCHIED GEMAAKT IN HET GIDSSTOFFENPAKKET CONFORM 2018 EN 2021**

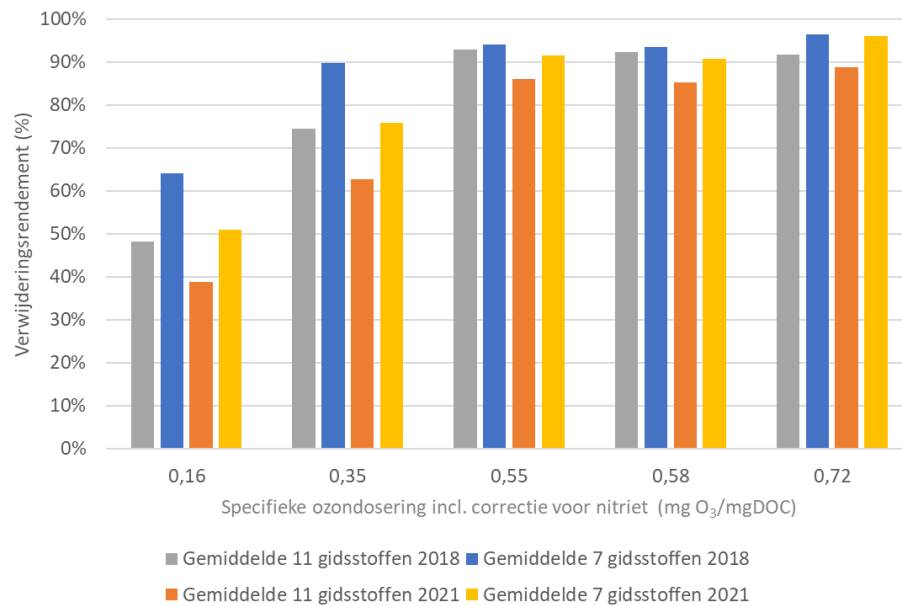
Ozondosering	g O <sub>3</sub> /g DOC <sup>1</sup>	0,16	0,35	0,55 <sup>2</sup>	0,58 <sup>2</sup>	0,72
Gidsstoffenpakket 2018						
Gemiddelde 11 gidsstoffen	%	48	75	93	92	92
Gemiddelde 7 gidsstoffen	%	64	90	94	93	96
Gidsstoffenpakket 2021						
Gemiddelde 11 gidsstoffen	%	39	63	86	85	89
Gemiddelde 7 gidsstoffen	%	51	76	92	91	96
Totaal 19 stoffen gidsstoffenpakket	%	41	68	86	84	87

<sup>1</sup> Inclusief correctie voor nitriet

<sup>2</sup> Uitgebreid analysepakket waarbij 2 gidsstoffen ontbreken en 1 onder de rapportagegrens is geanalyseerd. Er is hier gemiddeld over 9 van de 11 gidsstoffen.

FIGUUR 3.6

GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT IN DE NAGESCHAKELDE STAP VAN 11 OF 7 GIDSSTOFFEN VOOR DE VIJF TOEGEPASTE OZONDOSERINGEN. ER IS ONDSCHIED GEMAAKT IN HET GIDSSTOFFENPAKKET CONFORM 2018 EN 2021

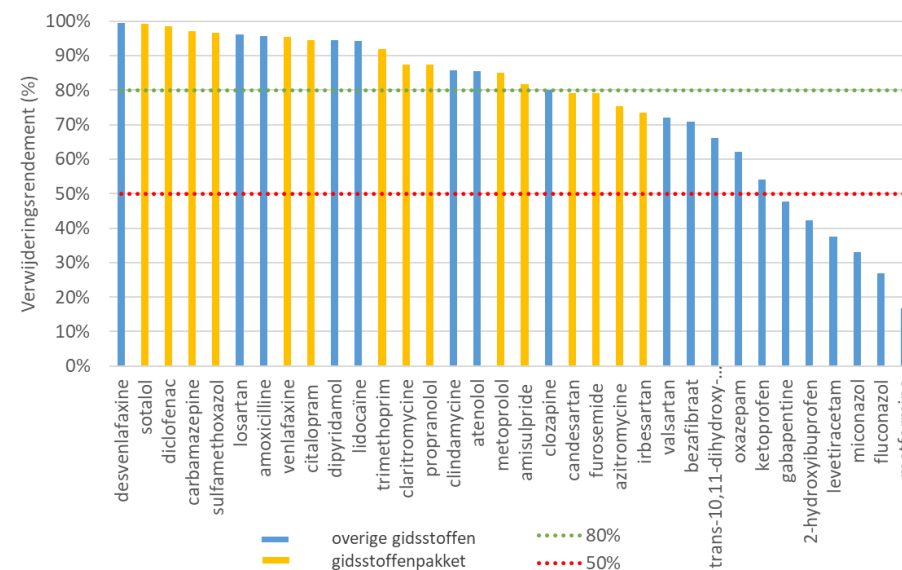


Het gemiddelde rendement van de 7 best verwijderde gidsstoffen bij een dosering van 0,35 g O<sub>3</sub>/g DOC is voor de gidsstoffen uit 2018 met 90% lager dan bij de dosering van 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC met 94%. Voor de gidsstoffen uit 2021 is deze met 76% significant lager dan bij de hogere dosering van 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC (91% en hoger). Bij een dosering van 0,16 g O<sub>3</sub>/g DOC is voor beide gidsstoffenpakketten het rendement < 70 %.

De verwijderingsrendementen die bepaald zijn aan de hand van het uitgebreide geneesmiddelenpakket bij een dosering van 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC zijn weergegeven in Figuur 3.7. De stoffen waarbij de ingaande concentraties lager zijn dan de rapportagegrens, zijn niet opgenomen. Dit betrof 28 stoffen (zie bijlage 3). Van de aangetroffen 34 stoffen (inclusief de gidsstoffen en de monitoringstoffen) hebben 19 stoffen een verwijderingsrendement van 80% of hoger, bij 9 ligt het rendement tussen de 50 en 80% en bij 6 is het rendement lager dan 50%.

FIGUUR 3.7

VERWIJDERINGSRENDEMENT IN DE NAGESCHAKELDE STAP BIJ EEN TOEGEPASTE OZONDOSERING VAN 0,55 G O<sub>3</sub>/G DOC (INCL. CORRECTIE VOOR NITRIET). ER IS ONDSCHIED GEMAAKT IN OVERIGE GIDSSTOFFEN EN DE GIDSSTOFFEN UIT HET GIDSSTOFFENPAKKET (ZIE TABEL 2.1)



### 3.3 BROMAAT

#### 3.3.1 BROMIDECONCENTRATIE

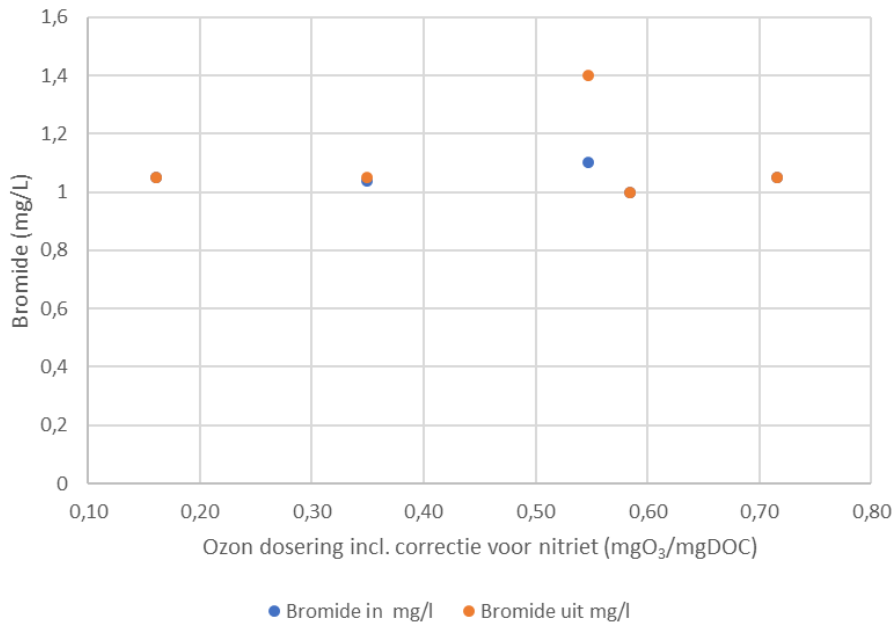
Het influent van RWZI Winterswijk bevat een relatief lage bromideconcentratie van ongeveer 100 µg/l. Om inzage te krijgen in het effect van de combinatie van ultrasound en ozon op bromaatvorming is ervoor gekozen om het influent van de pilot te spiken met bromide tot een concentratie van 1.000 µg Br/l.

In Figuur 3.8 zijn de gemeten bromideconcentraties na het spiken weergegeven in het influent en het effluent van de pilot bij de verschillende ozondoseringen.

- De gemeten ingaande bromideconcentratie varieerde tussen 1,0 en 1,1 mg Br/l en is daarmee conform de verwachte concentratie na het spiken.
- Met uitzondering van de uitgaande concentratie bij de dosering van 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC, zijn de uitgaande concentraties gelijk aan de ingaande. Er is dus geen significante hoeveelheid bromide verwijderd of omgezet.

Er is geen verklaring voor de hogere uitgaande bromideconcentratie bij 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC.

**FIGUUR 3.8** CONCENTRATIE BROMIDE IN HET INFLUENT EN EFFLUENT VAN DE PILOT. HET INFLUENT VAN DE PILOT IS GESPIKED MET BROMIDE TOT EEN CONCENTRATIE VAN 1.000 µG BR/L. DE METINGEN VAN DE INFLUENT VAN DE PILOT ZIJN EXACT GELIJK AAN HET EFFLUENT BIJ 0,16, 0,35, 0,58 EN 0,72 G O<sub>3</sub>/G DOC, WAARDOOR ALLEEN DE EFFLUENT METING ZICHTBAAR IS IN DE GRAFIEK



#### 3.3.2 BROMAATVORMING

De resultaten van de kleine pilot met het gespikete afvalwater (1 mg/l Br) laten zien dat de bromaatvorming toeneemt bij een hogere ozondosering en dat deze bij een dosering tot 0,4 g O<sub>3</sub>/g DOC veel lager is dan bij de drie hogere doseringen, zie Figuur 3.9 en Tabel 3.3. De maximale bromaatconcentratie is 6 µg BrO<sub>3</sub>/l bij een ozondosering van 0,72 g O<sub>3</sub>/g DOC. Bij een ozondosering van ongeveer 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC is de bromaatconcentratie in de orde grootte 3-4 µg BrO<sub>3</sub>/l. Bij de laagste twee ozondoseringen ligt de concentratie met 0,2-0,4 µg BrO<sub>3</sub>/l ruim onder de norm voor bromaat in het oppervlaktewater (1 µg BrO<sub>3</sub>/l<sup>6</sup>).

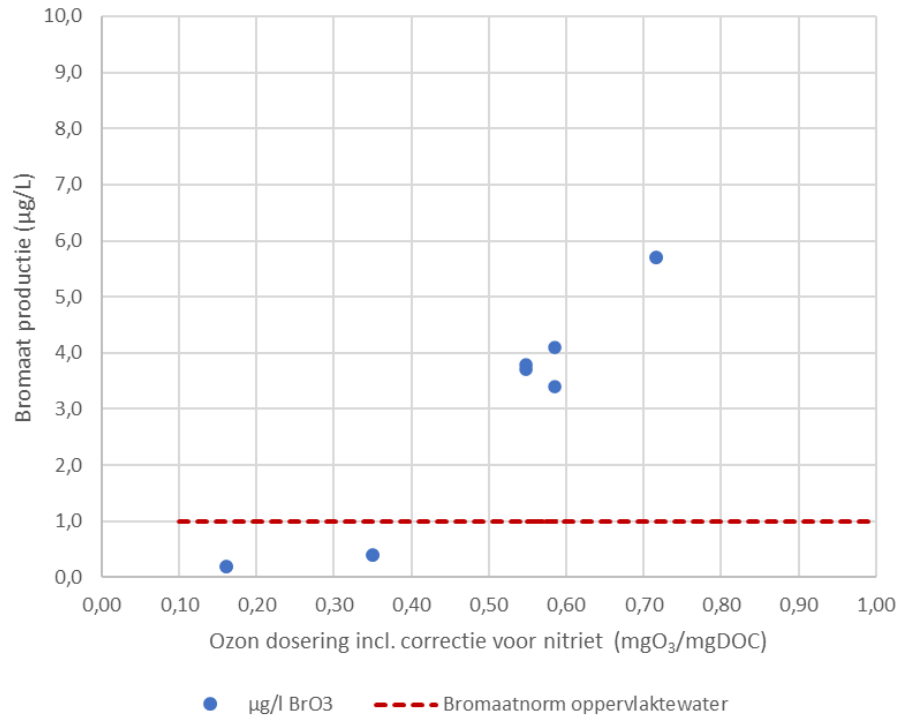
6 Op 4 april 2022 heeft het RIVM de door het ministerie van IenW vastgestelde jaargemiddelde milieukwaliteitsnorm (JG-MKN) gepubliceerd voor zoet oppervlaktewater. Deze norm is 1 µg BrO<sub>3</sub>/l. De maximaal aanvaardbare concentratie (MAC-MKN) is vastgesteld op 250 µg BrO<sub>3</sub>/l

De daadwerkelijk te realiseren maximale jaargemiddelde concentratie aan bromaat in het effluent is afhankelijk van de lokale lozingsituatie en het oppervlaktewater. Dit is doorgaans hoger dan of gelijk aan de jaargemiddelde milieukwaliteitsnorm voor het oppervlaktewater<sup>6</sup>.

**TABEL 3.3 BROMAATVORMING BIJ DE VERSCHILLENDE OZONDOSERINGEN (GEMIDDELTE VAN 2 METINGEN)**

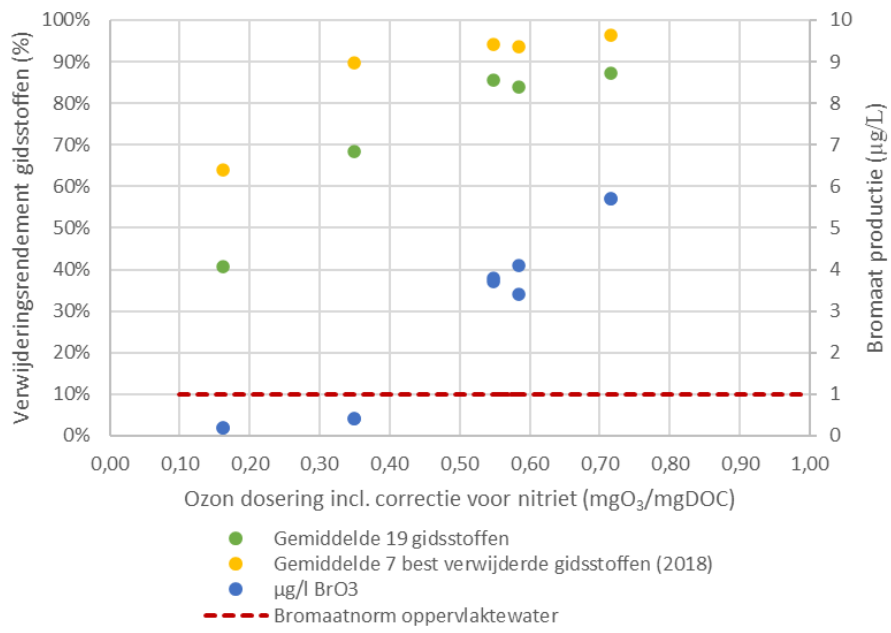
Ozon dosering (g O <sub>3</sub> /g DOC)	0,16	0,35	0,55	0,58	0,72
Bromaat (µg BrO <sub>3</sub> /l)	0,2	0,4	3,8	3,8	5,7

**FIGUUR 3.9 CONCENTRATIE BROMAAT IN HET EFFLUENT VAN DE PILOT BIJ EEN BROMIDE SPIKE VAN 1.000 µG BR/L. DE RODE STIPPELIJN GEEFT DE BROMAATNORM IN ZOET OPPERVLAKEWATER<sup>6</sup> WEER**



In Figuur 3.10 is zowel het verwijderingsrendement van de microverontreinigingen als de bromaatvorming weergegeven van de kleine pilot. Dit geeft niet alleen inzicht in welk verwijderingsrendement in de nageschakelde stap gerealiseerd kan worden bij welke ozondosering, maar ook welke ozondosering gehanteerd kan worden indien de norm voor bromaat in het effluent van een RWZI bekend is.

**FIGUUR 3.10** VERWIJDERINGSRENDEMENT IN DE NAGESCHAKELDE STAP (%) EN BROMAATCONCENTRATIE ( $\mu\text{G/L}$ ) VAN DE KLEINE PILOT. DE BROMIDECONCENTRATIE WAS ONGEVEER 1 MG/L BIJ ALLE OZONDOSERINGEN





## 4

# VERGELIJKING RESULTATEN PILOT MET REFERENTIES

## 4.1 VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN

### 4.1.1 RENDEMENT VOLGENS DE HAALBAARHEIDSTUDIE

In de eerdere haalbaarheidsstudie is geconcludeerd dat het nageschakelde verwijderingsrendement van de technologie ongeveer 95% in de behandelde stroom is bij een ozoninbreng van 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC (zie onderstaand kader).

#### *Haalbaarheidsstudie (STOWA 2020-24), paragraaf 2.2.3.1:*

Op basis van dit onderzoek blijkt dat er een zeer hoge verwijdering kan worden gerealiseerd, in de behandelde stroom (gemiddeld ongeveer 95%), voor de onderzochte vijf gidsstoffen bij een ozondosering van ongeveer 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC.

De onderzoeken die zijn uitgevoerd met de USONiQ technologie omvatten niet alle gidsstoffen die zijn gedefinieerd door het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Vijf gidsstoffen die binnen deze gedefinieerde gidsstoffen vallen, zijn geëvalueerd in dit rapport en laten met 95% (over de behandelde stroom) een hoger verwijderingsrendement zien vergeleken met reguliere ozonbehandeling (zie paragraaf 2.2.3.1 en 2.2.4). Aan de hand van deze resultaten is de verwachting dat de andere gidsstoffen ook vergaand verwijderd kunnen worden. De verwachting is dat met USONiQ het totale verwijderingsrendement (influent-effluent) ongeveer 85-90% is ten opzichte van 80-85% voor de referentie met ozon.

### 4.1.2 RENDEMENT VAN DE REFERENTIE OZON

Na afronding van de haalbaarheidsstudie is in 2021 de lijst met gidsstoffen gewijzigd, waarbij drie stoffen van de lijst uit 2018 zijn vervangen door andere stoffen. Ook zijn in 2021 de verwijderingsrendementen per stof gerapporteerd voor zowel de behandelde stroom als voor de totale zuivering<sup>7</sup>. Het verwijderingsrendement van conventionele ozonbehandeling (exclusief RWZI) is 88% op basis van de gidsstoffen van 2018 en 82% op basis van de gidsstoffen van 2021. Hierbij is binnen het IPMV uitgegaan van een ozondosering van 0,7 g O<sub>3</sub>/g DOC.

TABEL 4.1 GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN 7 GIDSSTOFFEN CONVENTIONELE OZONISATIE<sup>3</sup>

	Nageschakeld rendement*	Overall rendement RWZI **
Ozondosering (g O <sub>3</sub> /g DOC)	0,7	
Gidsstoffenpakket 2018		
Gemiddelde 7 gidsstoffen	88%	92%
Gidsstoffenpakket 2021		
Gemiddelde 7 gidsstoffen	82%	86%

\* Nageschakeld rendement: het rendement over de in de nageschakelde technologie behandelde stroom.

\*\* Totaal effluent van de RWZI versus in influent van de RWZI.

7 Mulder (2021) 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

#### 4.1.3 VERGELIJKING VERWIJDERINGSRENDEMENTEN

De pilot is gericht op de verwijdering van medicijnresten uit effluent. De verwijderingsrendementen van medicijnresten door de RWZI zelf zijn niet bepaald in deze periode. In Tabel 4.2 en Figuur 4.1 zijn de resultaten van de kleine pilot vergeleken met de verwachte nageschakelde rendementen op basis van de haalbaarheidsstudie en van conventionele ozonisatie.

##### VERGELIJKING MET HAALBAARHEIDSSSTUDIE

Het in de pilot gemeten verwijderingsrendement (7 gidsstoffen) van 94% bij een ozondosering van 0,55 gO<sub>3</sub>/g DOC komt vrijwel overeen met het in de haalbaarheidsstudie gerapporteerde rendement van 95% bij een ozondosering van 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC (uitgaande van de gidsstoffenlijst uit 2018).

Hierbij is in de pilot het verwijderingsrendement berekend over 7 gidsstoffen, in tegenstelling tot 5 gidsstoffen in de haalbaarheidsstudie. Wanneer wordt gekeken naar het verwijderingsrendement van dezelfde 5 gidsstoffen als in de haalbaarheidsstudie (met uitzondering van 1,2,3-benzotriazol doordat deze niet in het analysepakket zit) dan resulteert dit in een vergelijkbaar verwijderingsrendement van 93%.

Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat het verwijderingsrendement zoals afgeleid in de haalbaarheidsstudie is bevestigd in dit onderzoek met de kleine pilot.

**TABEL 4.2 GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT IN DE NAGESCHAKELDE STAP VAN 7 GIDSSTOFFEN VOOR TWEE TOEGEPASTE OZON DOSERINGEN IN DE PILOT, VOOR DE HAALBAARHEIDSSSTUDIE EN VOOR CONVENTIONELE OZONISATIE**

	Pilot	Pilot	Haalbaarheid- studie <sup>1</sup>	Pilot	Conventionele ozonisatie <sup>3</sup>
Ozon dosering (g O <sub>3</sub> /g DOC)	0,35	0,55*	0,55	0,72	0,7
Gidsstoffenpakket 2018					
Gemiddelde 7 gidsstoffen	90%	94%	95%	96%	88%
Gidsstoffenpakket 2021					
Gemiddelde 7 gidsstoffen	76%	92%		96%	82%

\* Uitgebreid analysepakket waarbij 2 gidsstoffen ontbreken en 1 onder de rapportagegrens is geanalyseerd.

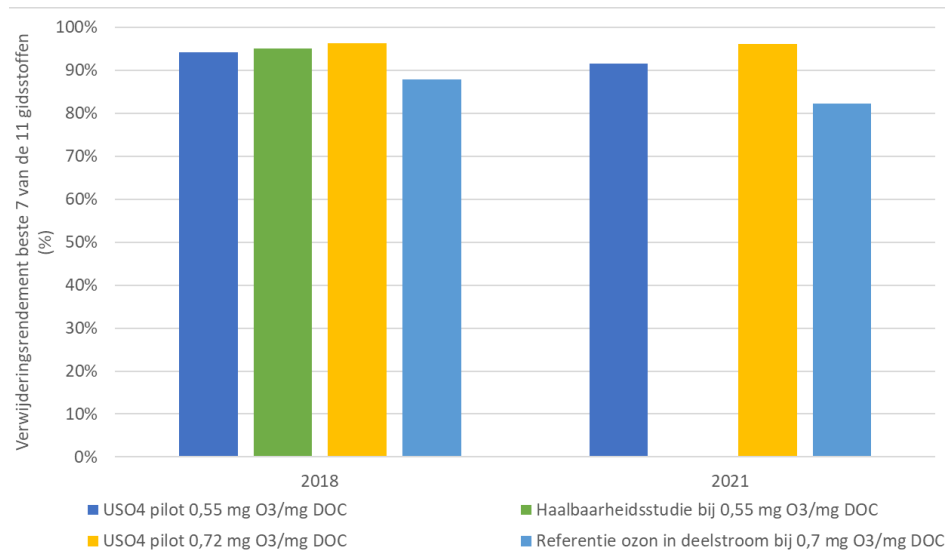
##### VERGELIJKING MET CONVENTIONELE OZONISATIE

In Tabel 4.2 en Figuur 4.1 zijn de verwijderingsrendementen van de pilot met ozonisatie en ultrasound vergeleken met conventionele ozonisatie:

- Bij een 20% lagere ozondosering is het verwijderingsrendement van de pilot hoger:
  - 7 % (of 6 procentpunt) voor de gidsstoffen 2018.
  - 4 % (of 9 procentpunt) voor de gidsstoffen 2021.
- Bij een vergelijkbare ozondosering (0,72 versus 0,7 g O<sub>3</sub>/g DOC) is het verwijderingsrendement van de pilot hoger:
  - 10 % (of 8 procentpunt) voor de gidsstoffen 2018.
  - 17 % hoger (of 14 procentpunt) voor de gidsstoffen 2021.
- De verwijderingsrendementen zijn vergelijkbaar bij 0,7 g O<sub>3</sub>/g DOC:
  - Bij een ozondosering van 0,35 g O<sub>3</sub>/g DOC in de pilot gebaseerd op het gidsstoffenpakket 2018.
  - Bij een dosering van ongeveer 0,43 g O<sub>3</sub>/g DOC (uitgaande van een lineaire toename van het rendement tussen 0,35 en 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC) gebaseerd op gidsstoffenpakket 2021.

FIGUUR 4.1

GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDERMENT IN DE NAGESCHAKELDE STAP VAN 7 GIDSSTOFFEN VOOR TWEE TOEGEPASTE OZONDOSERINGEN IN DE PILOT, VOOR DE HAALBAARHEIDSSSTUDIE EN VOOR CONVENTIONELE OZONISATIE



## 4.2 BROMAATVORMING

### 4.2.1 CONCLUSIE HAALBAARHEIDSSSTUDIE

In de haalbaarheidsstudie is de verwachting uitgesproken dat de bromaatvorming lager is dan of maximaal vergelijkbaar is met conventionele ozonisatie (zie onderstaand kader).

#### *Haalbaarheidsstudie (STOWA 2020-24), paragraaf 2.2.4:*

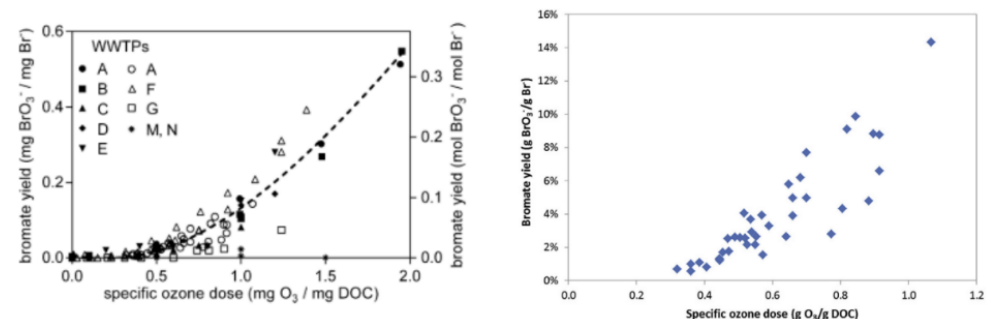
De vorming van bromaat is (naast de ingaande concentratie bromide) ook afhankelijk van de hoogte van de ozondosering en de restozonconcentratie (zie paragraaf 4.5). Omdat de ozondosering lager is bij USONiQ en de reactie efficiënter kan aangenomen worden dat de vorming van bromaat lager of maximaal vergelijkbaar is met die in reguliere ozonbehandeling.

### 4.2.2 VERGELIJKING MET CONVENTIONELE OZONISATIE UIT LITERATUUR

In literatuur is de relatie tussen de bromaatvorming en ozondosering gerapporteerd, zie Figuur 42. Hieruit is af te lezen dat de bromaatvorming bij 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC ongeveer 2-4% is van de ingaande bromideconcentratie. Bij 0,7 g O<sub>3</sub>/g DOC is dit ongeveer 5-8%.

FIGUUR 4.2

DE RELATIE TUSSEN DE SPECIFIEKE OZONDOSERING EN DE BROMAAT YIELD. IN DE LINKER GRAFIEK STAAN RESULTATEN VAN MEERDERE RWZI'S IN ZWITSERLAND<sup>8</sup> EN RECHTS VAN RWZI NEUGUT IN ZWITSERLAND<sup>9</sup>



8 Solterman et al. (2017). Options and limitations for bromate control during ozonation of wastewater. Water research 116, pagina 76-85

9 Bourgin et al. (2018). Evaluation of a full-scale wastewater treatment plant upgraded with ozonation and biological post-treatment: Abatement of micropollutants, formation of transformation products and oxidation by-products. Water Research 129, p 486-498.

Kijkende naar de ingaande bromide(Br<sup>-</sup>)-concentratie van 1.000 µg Br/l in de pilot zijn, op basis van de beschreven relatie, concentraties bromaat te verwachten tussen 20-40 µg BrO<sub>3</sub>/l en 60-80 µg BrO<sub>3</sub>/l voor de ozondoseringen van respectievelijk 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC en 0,72 g O<sub>3</sub>/g DOC. De gemeten concentraties van 3,8 µg BrO<sub>3</sub>/l en 6 µg BrO<sub>3</sub>/l bij een ozondosering van respectievelijk 0,58 g O<sub>3</sub>/g DOC en 0,75 g O<sub>3</sub>/g DOC in de pilot liggen hier significant onder (zie Tabel 4.3).

**TABEL 4.3 BROMAATVORMING BIJ DE VERSCHILLENDE OZONDOSERINGEN\***

Ozondosering (g O <sub>3</sub> /g DOC)	0,55	0,72
Op basis van literatuur (Figuur 4.2)		
Bromaat als % van ingaande bromideconcentratie	2-4	5-8
Te verwachten bromaatconcentratie (µg BrO <sub>3</sub> /l)	20-40	60-80
Pilot Winterswijk (Tabel 3-3)		
Bromaat (µg BrO <sub>3</sub> /l) pilot	3,8	5,7
Bromaatvorming als % van ingaande bromideconcentratie	0,4	0,6
Pilot RWZI Aarle Rixtel (zie paragraaf 4.2.3)		
Bromaat (µg BrO <sub>3</sub> /l) pilot		5-12
Bromaatvorming als % van ingaande bromideconcentratie**		0,5-1,5

\* literatuurwaarde is afgeleid van zie Figuur 4.2 en een ingaande concentratie 1.000 µg bromide/l. De pilot waarden zijn overgenomen uit Tabel 3.3

\*\* bij een gemiddelde bromideconcentratie van 800 µg bromide/l (uit bijlage 27 uit STOWA 2020-41).

#### 4.2.3 VERGELIJKING MET CONVENTIONELE OZONISATIE UIT IPMV

De resultaten van de pilot kunnen op hoofdlijnen worden vergeleken met de resultaten die zijn verkregen met reguliere ozonbehandeling op RWZI Aarle Rixtel<sup>10</sup>. Daarbij dient op voorhand te worden opgemerkt dat het waarschijnlijk niet mogelijk is hier een exacte een-op-eenvergelijking te maken gezien de verschillen van de RWZI-locaties en/of de pilotopstellingen en analysemethode<sup>11</sup>.

Op RWZI Aarle-Rixtel is de gevormde concentratie bromaat bepaald bij verschillende concentraties bromide, zie Figuur 4.3. Hierbij was de ozondosering 1,2 g O<sub>3</sub>/g DOC. Bij een bromideconcentratie van 1 mg Br/l is de minimale concentratie bromaat ongeveer 10 µg BrO<sub>3</sub>/l en op basis van de puntenwolk gemiddeld ongeveer 20-35 µg BrO<sub>3</sub>/l (dus 2% - 3,5% van de ingaande bromideconcentratie). Wanneer deze resultaten worden vergeleken met de literatuur uit Figuur 4.2, zou ook bij RWZI Aarle Rixtel een hogere bromaatvorming worden verwacht op basis van de relatie uit de literatuur ten opzichte van de ingaande bromideconcentratie; ongeveer 6-10% bij 1,2 g O<sub>3</sub>/g DOC uit de literatuur en 2 - 3,5% bij pilot RWZI Aarle Rixtel.

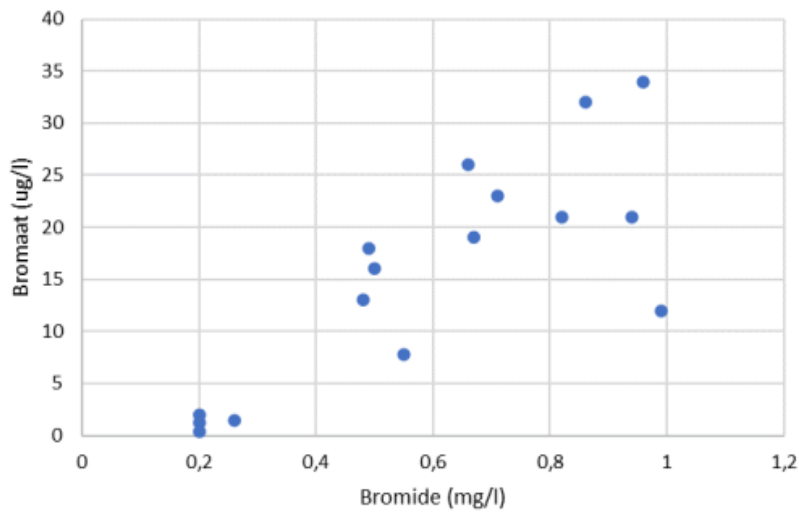
Bij RWZI Aarle Rixtel zijn hogere ozondoseringen getest dan in de kleine pilot. De kleine pilot heeft een maximale concentratie bromaat van 6 µg BrO<sub>3</sub>/l bij een ozondosering van 0,72 g O<sub>3</sub>/g DOC (dus 0,6% van de gespikete bromideconcentratie).

10 STOWA (2020) Pilotonderzoek vergelijking oxidatieve technieken effluent RWZI Aarle-Rixtel. STOWA 2020-41

11 Aandachtspunt hierbij is het verschil in detectiegrens voor de bromaatanalyses. Bij onderhavig onderzoek lag deze grens op 0,1 µg/l. Bij RWZI Aarle-Rixtel was dit gedurende de inregelperiode een hoge rapportagegrens (10 µg/l). Tijdens de vergelijkende test zijn de bromaatanalyses uitgevoerd met een andere analysemethode met lagere rapportagegrens (0,2 µg/l).

FIGUUR 4.3

GEVORMDE BROMAATCONCENTRATIE BIJ VERSCHILLENDE BROMIDE-CONCENTRATIES EN EEN OZONDOSERING VAN 1,2 G O<sub>3</sub>/G DOC, ZALDS GEMETEN BIJ PILOT ONDERZOEK OP RWZI AARLE-RIXEL. (STOWA 2020-41)



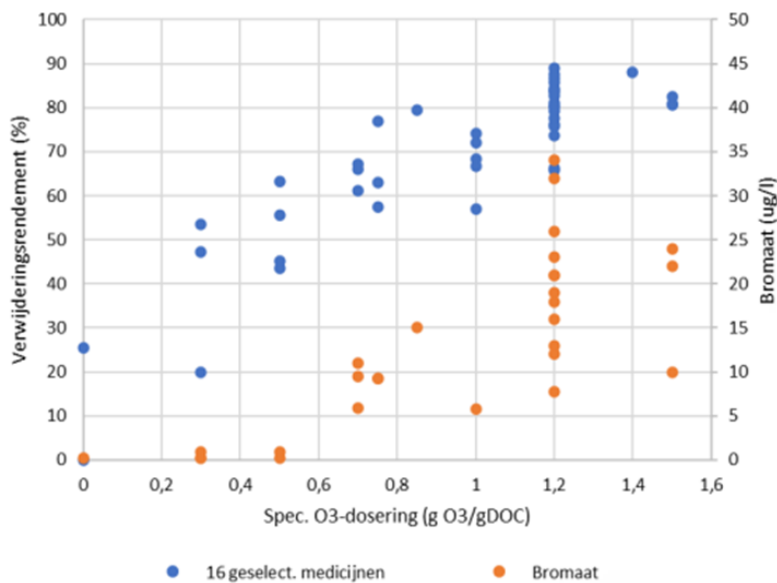
In Figuur 4.4 zijn het verwijderingsrendement en de bromaatvorming bij verschillende ozon-doseringen weergegeven voor het vervolgonderzoek op RWZI Aarle-Rixtel. In de effluent-monsters met bromidegehalten hoger dan 0,3 mg/l wordt nauwelijks (<1 µg/l) bromaat geproduceerd bij specifieke O<sub>3</sub>-doseringen van 0,5 gO<sub>3</sub>/g DOC en lager. Dit is vergelijkbaar met de ozon en ultrasound pilot.

Boven een specifieke ozondosering van 0,5 g O<sub>3</sub>/g DOC gaat bromaatvorming optreden, namelijk 5 tot 12 µg/l bromaat bij 0,7 gO<sub>3</sub>/g DOC. De bromaatvorming bij de kleine pilot zit met 6 µg/l bromaat aan de onderkant van deze range, maar dan wel bij een hogere startconcentratie bromide (1 mg/l bromide in de kleine pilot tegen gemiddeld 0,8 mg/l in Aarle-Rixtel).

Op basis hiervan is geconcludeerd dat de bromaatvorming in de kleine pilot bij de referentie ozondosering van 0,7 g O<sub>3</sub>/g DOC in de onderste range zit van de resultaten bij conventionele ozonisatie op RWZI Aarle Rixtel.

FIGUUR 4.4

VERWIJDERINGSRENDEMENT (%) EN BROMAATCONCENTRATIE (µG/L) VAN OZON PILOT RWZI AARLE-RIXEL (FIGUUR 5.8 UIT STOWA 2020-41). HET BROMIDEGEHALTE WAS MINIMAAL 0,3 MG/L



# 5

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 5.1 CONCLUSIES

Het verkennende pilotonderzoek is uitgevoerd met de kleine pilotinstallatie. De pilotinstallatie heeft een capaciteit van 1 m<sup>3</sup>/h en is als batchproces ingezet. Iedere batch is er een nieuwe hoeveelheid van ongeveer 1 m<sup>3</sup> effluent van RWZI Winterswijk gebruikt en gespiked met bromide tot een concentratie van 1 mg bromide/l. Iedere batch is behandeld met een bepaalde ozondosering.

De conclusies van deze pilot in relatie tot de drie onderzoeksdoelen van het kleine pilotonderzoek worden hieronder toegelicht. Samenvattend komt het erop neer dat de uitkomsten van deze pilot het hogere verwijderingsrendement in relatie tot het ozonverbruik bevestigen en een eerste inzicht in de (iets lagere) bromaatvorming van de technologie geven.

#### **Relatie tussen verwijderingsrendement en specifieke ozondosering, en vergelijking met haalbaarheidsstudie en conventionele ozonisatie**

De verwijderingsrendementen nemen toe bij een hogere specifieke ozondosering. Bij de meeste gidsstoffen is bij een toenemende ozondosering een sterke stijging van het verwijderingsrendement zichtbaar, waarna deze minimaal stijgt of stabiel blijft bij een verdere verhoging van de ozondosering. Dit betekent dat het verder verhogen van het verwijderingsrendement niet mogelijk is of een significant hogere ozondosering vraagt.

Het verwijderingsrendement van 7 van de 11 gidsstoffen in de nageschakelde stap is goed vergelijkbaar met de haalbaarheidsstudie, namelijk 94% in het pilotonderzoek ten opzichte van 95% in de haalbaarheidsstudie bij een ozondosering van 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC. De resultaten van de kleine pilot worden daardoor als validatie gezien van de resultaten uit de haalbaarheidsstudie<sup>1</sup>.

Het verwijderingsrendement van conventionele ozonbehandeling is 88% conform de gidsstoffen van 2018 en 82% conform de gidsstoffen van 2021, bij een ozondosering van 0,7 g O<sub>3</sub>/g DOC. Hierbij wordt het verwijderingsrendement bepaald van de 7 (van de 11) best te verwijderen gidsstoffen in de nageschakelde stap. Om een rendement van 88% te behalen met ozonisatie + US is een ozondosering nodig van 0,35 g O<sub>3</sub>/g DOC conform gidsstoffen 2018. Voor een rendement van 82% conform gidsstoffen 2021 is een ozondosering nodig van ongeveer 0,43 g O<sub>3</sub>/g DOC.

Kortom, in de haalbaarheidsstudie wordt geconcludeerd dat met de combinatie van ozon en ultrasound ongeveer 20% bespaard zou kunnen worden op het ozonverbruik bij een hoger rendement ten opzichte van conventionele ozonisatie. Op basis van de resultaten van de kleine pilot is deze conclusie bevestigd.

### **Inzicht in vorming bromaat in relatie tot de specifieke ozondosering en vergelijking met haalbaarheidsstudie en conventionele ozonisatie**

De resultaten van de kleine pilot laten zien dat bromaatvorming toeneemt bij een hogere ozondosering en dat deze bij een dosering tot 0,4 g O<sub>3</sub>/g DOC veel lager is ( $\leq 0,4 \mu\text{g BrO}_3/\text{l}$ ) dan bij de drie hogere doseringen die zijn toegepast. Bij een ozondosering van 0,55 g O<sub>3</sub>/g DOC (vergelijkbaar met de uitgangswaarde van de haalbaarheidsstudie<sup>1</sup>) is de concentratie bromaat 3,8  $\mu\text{g BrO}_3/\text{l}$ . De maximaal gemeten concentratie bromaat is 6  $\mu\text{g BrO}_3/\text{l}$  bij een ozondosering van 0,75 g O<sub>3</sub>/g DOC.

Vergeleken met literatuur van conventionele ozonisatie (paragraaf 4.2.2) werd tijdens het kleine pilotonderzoek minder bromaat gevormd bij veel hogere ingaande bromideconcentraties. Vergeleken met de pilot op RWZI Aarle Rixtel (STOWA 2020-41) met conventionele ozonisatie, is de bromaatvorming vergelijkbaar laag bij een ozondosering van  $< 0,5 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$ . Bij de referentie ozondosering van 0,7 g O<sub>3</sub>/g DOC is de bromaatvorming van de kleine pilot vergelijkbaar met de meest gunstige resultaten in de onderste range van de conventionele ozonisatie op RWZI Aarle Rixtel.

Kortom, het pilotonderzoek geeft een eerste inzicht van bromaatvorming bij de aanwezigheid van bromide en laat zien dat er bij de combinatie van ozon en ultrasound iets minder bromaat gevormd lijkt te worden, maar er is meer onderzoek nodig om duidelijke conclusies te kunnen trekken.

### **Herijking van de gestelde criteria in de haalbaarheidsstudie op basis van de resultaten van het pilotonderzoek**

Het verwijderingsrendement in relatie tot de ozondosering is bevestigd in dit verkennend pilotonderzoek.

De bromaatvorming bij een ozondosering van 0,7 g O<sub>3</sub>/g DOC in de kleine pilot is vergelijkbaar met de meest gunstige bromaatvorming in de pilot met conventionele ozonisatie op RWZI Aarle Rixtel. Bij een lagere dosering is de bromaatvorming vergelijkbaar laag als bij conventionele ozonisatie.

De overige criteria die op basis van het pilotonderzoek zouden worden herijkt (zoals energieverbruik) of aanvullend onderzocht (zoals ecotoxiciteit) zijn niet aan bod gekomen in fase 1 van het pilotonderzoek.

## **5.2 AANBEVELINGEN**

De combinatie van ozon en ultrasound is in de haalbaarheidsstudie als ‘interessante innovatie’ betiteld. De uitkomsten van deze pilot bevestigen het verwijderingsrendement in relatie tot het ozonverbruik en geven een eerste inzicht in de bromaatvorming van de technologie.

De technologie blijft veelbelovend door het in de pilot gevonden hogere verwijderingsrendement voor microverontreinigingen bij een lagere ozondosering. Daarnaast treedt bij de lagere ozondosering minder bromaatvorming op.

Echter, de (onderdelen van de) criteria die in fase 2 en 3 zouden worden onderzocht, zijn op dit moment niet bevestigd noch ontkracht. Zoals bijvoorbeeld ervaring met het energieverbruik en effect op ecotoxiciteit. Voor opschaling naar demo of fullscale installatie is het wenselijk om deze alsnog in te vullen. Hiertoe kan fase 2 en 3 van het pilot onderzoek alsnog worden uitgevoerd op een andere RWZI in Nederland.



## BIJLAGE 1

# ONDERZOEKSOPZET FASE 2 EN 3

## AANPAK FASE 2 EN FASE 3

De aanpak in deze fases zou als volgt zijn:

- In Fase 2 wordt met de grote pilot hetzelfde onderzoek uitgevoerd als in fase 1 (5 verschillende ozondoseringen). Naast een verschil in schaalgrootte, zal dit onderzoek niet batchgewijs maar met een continue aanvoer en wisselende samenstelling van het afvalwater plaatsvinden.
- In fase 3 wordt de grote pilot ingezet voor een duurttest met een vaste ozondosering.

## GROTE PILOTINSTALLATIE

De USO2020 (zie Figuur B.1) is een pilotinstallatie met een capaciteit van 10-40 m<sup>3</sup>/h. De installatie wordt ingezet met een continu debiet. Net als bij de USO4-installatie kunnen met deze installatie de effecten van de technologie op de verwijdering van microverontreinigingen en de vorming van bromaat inzichtelijk worden gemaakt. Daarnaast kunnen door de schaal van deze installatie, geschikt voor fullscale toepassing op een RWZI, operationele parameters zoals kWh-verbruik worden gemeten. Dit kan afzonderlijk voor ieder procesonderdeel. Deze installatie is in twee containers van elk 20 voet geplaatst.

FIGUUR B1

FOTO VAN DE GROTE (USO2020) PILOT VOOR ONDERZOEK IN FASE 2 EN 3. BRON LEVERANCIER



## ONDERZOEKSDOELEN FASE 2 EN 3

De onderzoeksdoelen zijn:

1. Bepalen van het verwijderingsrendement van microverontreinigingen ten opzichte van de O<sub>3</sub>-dosering.
2. Inzicht in de vorming van bromaat als bijproduct van de combinatie van ozonisatie en ultrasound ten opzichte van de O<sub>3</sub>-dosering.
3. Inzicht verkrijgen in de ontwerpgrondslagen en energieverbruik op basis van de procescondities.
4. Inzicht verkrijgen in de toxiciteit van het effluent na gecombineerde behandeling met ozonisatie en ultrasound.

5. Inzicht verkrijgen in desinfectie van het effluent door de technologie.
6. Herijking van de gestelde criteria in de haalbaarheidsstudie op basis van de resultaten van het pilotonderzoek.

Een aantal doelen zijn (deels) gelijk aan fase 2, dit betreft de doelen 1,2 en 6. Bij doel 2 is in fase 1 gespiked met bromide, dit zal in fase 2 en 3 door de schaalgrootte niet mogelijk zijn. Ten aanzien van doel 3 en 6 kan een aantal onderdelen van de CO<sub>2</sub>-footprint die in de haalbaarheidsstudie is gegeven, worden geverifieerd in de praktijk (zie Tabel B.1).

TABEL B.1

SPECIFICATIES VAN DE CO<sub>2</sub>-VOETAFDruk CONFORM DE RICHTLIJNEN VAN HET IPMV (VERSIE 5,2019)

Parameter	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Elektriciteit verbruik	Nee	Ja	Ja
Verbruik van hulpstoffen en chemicaliën	Ja	Ja	Ja

## BIJLAGE 2

## ANALYSE PAKKETTEN

**GIDSSTOFFEN (LCMS)**

- 1,2,3-benzotriazol
- som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol
- amisulpride
- azitromycine
- candesartan
- carbamazepine
- citalopram
- claritromycine
- diclofenac
- furosemide
- gabapentine
- hydrochloorthiazide
- irbesartan
- metoprolol
- propranolol
- sotalol
- sulfamethoxazol
- trimethoprim
- venlafaxine

**GENEESMIDDELEN (LCMS)**

- ibuprofen
- lincomycine
- ivermectine
- metformine
- acetylsulfamethoxazole
- amiodarone
- atenolol
- azitromycine
- capectiabine
- cyclofosfamide
- furosemide
- gemfibrozil
- ifosfamide
- jomeprol
- naproxen
- paracetamol
- losartan
- simvastatine
- clofibrat
- propranolol

- trans-10,11-dihydroxy-10,11-dihydrocarbazepine
- venlafaxine
- citalopram
- amisulpride
- erytromycine
- jopromide
- fluoxetine
- candesartan
- 2-hydroxyibuprofen
- quetiapine
- primidon
- levetiracetam
- joxitalaminezuur
- amidotrizoïnezuur
- bezafibraat
- carbamazepine
- ciprofloxacin
- claritromycine
- clindamycine
- clozapine
- diclofenac
- dimetridazol
- dipyridamol
- fenazon (antipyrene)
- gabapentine
- hydrochlorothiazide
- irbesartan
- jopamidol
- ketoprofen
- lidocaïne
- metoprolol
- oxazepam
- pentoxifylline
- pipamperon
- sotalol
- sulfamethoxazol
- trimethoprim
- valsartan
- amoxicilline
- fluconazol
- miconazol
- desvenlafaxine

BIJLAGE 3

# ANALYSE RESULTATEN

## HET GIDSSTOFFEN PAKKET

### ARCERING: ONDER RAPPORTAGEGREN, WAARDOOR RAPPORTAGEGREN GEGEVEN

	Gedoseerde ozon (mg O <sub>3</sub> /mg DOC)	0,16 incl correctie NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> 0,19 excl correctie NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>					0,35 incl correctie NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> 0,38 excl correctie NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>								
		Gidstoffen pakket					Gidstoffen pakket								
		Influent in	Influent in	Effluent uit	Effluent uit	Verwijdering %	Gemiddelde %	Influent in	Influent in	Effluent uit	Effluent uit	Verwijdering %	Gemiddelde %		
2018 & 2021	1,2,3-benzotriazool ug/l	2	1,9	1,6	1,5	20%	21%	21%	2	2	1,2	1,2	40%	40%	40%
	4- en 5-methyl-1H-benzotriazol ug/l	1,2	1,2	1	0,93	17%	23%	20%	1,2	1,2	0,67	0,68	44%	43%	44%
	carbamazepine ug/l	0,28	0,27	0,09	0,09	68%	67%	67%	0,29	0,3	0,1	0,01	66%	97%	81%
	diclofenac ug/l	0,49	0,46	0,13	0,12	73%	74%	74%	0,56	0,56	0,02	0,01	96%	98%	97%
	hydrochloorthiazide ug/l	1,6	1,5	1,2	1,2	25%	20%	23%	1,6	1,6	0,7	0,6	56%	63%	59%
	metoprolol ug/l	1,4	1,3	1,1	1,1	21%	15%	18%	1,4	1,4	0,71	0,73	49%	48%	49%
	sotalol ug/l	1	0,96	0,34	0,31	66%	68%	67%	0,97	0,98	0,05	0,05	95%	95%	95%
	trimethoprim ug/l	0,11	0,11	0,03	0,03	73%	73%	73%	0,12	0,12	0,01	0,01	92%	92%	92%
2021	claritromycine ug/l	0,1	0,06	0,04	0,04	60%	33%	47%	0,1	0,1	0,1	0,01	90%	90%	90%
	propranolol ug/l	0,07	0,06	0,02	0,02	71%	67%	69%	0,07	0,07	0,01	0,01	86%	86%	86%
	sulfamethoxazol ug/l	0,21	0,23	0,11	0,1	48%	57%	52%	0,23	0,25	0,03	0,03	87%	88%	87%
	gabapentine ug/l	2,8	2,8	2,5	2,5	11%	11%	11%	2,6	3	2	2	23%	33%	28%
	irbesartan ug/l	0,93	0,98	0,7	0,67	25%	32%	28%	0,94	1	0,51	0,51	46%	49%	47%
	venlafaxine ug/l	0,16	0,15	0,12	0,11	25%	27%	26%	0,15	0,16	0,06	0,07	60%	56%	58%
kandidaat	azitromycine ug/l	0,3	0,3	0,2	0,2	33%	33%	33%	0,3	0,3	0,1	0,1	67%	67%	67%
	furosemide ug/l	0,8	0,7	0,2	0,2	75%	71%	73%	0,7	0,8	0,2	0,2	71%	75%	73%
	citalopram ug/l	0,15	0,14	0,11	0,11	27%	21%	24%	0,15	0,16	0,04	0,04	73%	75%	74%
	amisulpride ug/l	0,04	0,04	0,03	0,03	25%	25%	25%	0,04	0,05	0,01	0,01	75%	80%	78%
	candesartan ug/l	0,42	0,41	0,34	0,31	19%	24%	22%	0,46	0,41	0,2	0,2	57%	51%	54%

	Gedoseerde ozon (mg O <sub>3</sub> /mg DOC)	0,55 incl correctie NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> 0,58 excl correctie NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>					0,58 incl correctie NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> 0,62 excl correctie NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>								
		Uitgebreid pakket					Uitgebreid pakket								
		Influent in	Influent in	Effluent uit	Effluent uit	Verwijdering %	Gemiddelde %	Influent in	Influent in	Effluent uit	Effluent uit	Verwijdering %	Gemiddelde %		
2018 & 2021	1,2,3-benzotriazool ug/l														
	4- en 5-methyl-1H-benzotriazol ug/l														
	carbamazepine ug/l	0,35	0,34	0,01	0,01	97%	97%	97%	0,31	0,29	0,01	0,01	97%	97%	97%
	diclofenac ug/l	0,61	0,7	0,01	0,01	98%	99%	98%	0,61	0,61	0,01	0,01	98%	98%	98%
	hydrochloorthiazide ug/l	25	25	25	25				25	25	25	25			
	metoprolol ug/l	1,8	1,8	0,28	0,26	84%	86%	85%	1,6	1,4	0,23	0,23	86%	84%	85%
	sotalol ug/l	1,2	1,3	0,01	0,01	99%	99%	99%	1,1	1	0,01	0,01	99%	99%	99%
	trimethoprim ug/l	0,13	0,12	0,01	0,01	92%	92%	92%	0,12	0,12	0,01	0,01	92%	92%	92%
2018	claritromycine ug/l	0,08	0,08	0,01	0,01	88%	88%	88%	0,08	0,08	0,01	0,01	88%	88%	88%
	propranolol ug/l	0,08	0,08	0,01	0,01	88%	88%	88%	0,07	0,07	0,01	0,01	86%	86%	86%
	sulfamethoxazol ug/l	0,31	0,29	0,01	0,01	97%	97%	97%	0,21	0,22	0,01	0,01	95%	95%	95%
	gabapentine ug/l	3,4	3,1	1,7	1,7	50%	45%	48%	2,9	3,1	1,7	1,5	41%	52%	46%
	irbesartan ug/l	1,3	1,3	0,34	0,35	74%	73%	73%	1,1	0,99	0,31	0,31	72%	69%	70%
	venlafaxine ug/l	0,22	0,21	0,01	0,01	95%	95%	95%	0,18	0,19	0,01	0,01	94%	95%	95%
kandidaat	azitromycine ug/l	0,42	0,39	0,1	0,1	76%	74%	75%	0,38	0,34	0,1	0,1	74%	71%	72%
	furosemide ug/l	0,91	1	0,2	0,2	78%	80%	79%	0,71	0,67	0,2	0,2	72%	70%	71%
	citalopram ug/l	0,19	0,18	0,01	0,01	95%	94%	95%	0,18	0,19	0,01	0,01	94%	95%	95%
	amisulpride ug/l	0,05	0,06	0,01	0,01	80%	83%	82%	0,05	0,05	0,01	0,01	80%	80%	80%
	candesartan ug/l	0,63	0,57	0,13	0,12	79%	79%	79%	0,47	0,46	0,12	0,12	74%	74%	74%

	Gedoseerde ozon (mg O <sub>3</sub> /mg DOC)	0,72 incl correctie NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> 0,75 excl correctie NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>						
		Gidstoffen pakket						
		Influent in	Influent in	Effluent uit	Effluent uit	Verwijdering %	Gemiddelde %	
2018 & 2021	1,2,3-benzotriazool ug/l	2,2	2,1	0,53	0,56	76%	73%	75%
	4- en 5-methyl-1H-benzotriazol ug/l	1,7	1,7	0,14	0,14	92%	92%	92%
	carbamazepine ug/l	0,35	0,36	0,01	0,01	97%	97%	97%
	diclofenac ug/l	0,59	0,64	0,01	0,01	98%	98%	98%
	hydrochloorthiazide ug/l	1,8	1,9	0,1	0,1	94%	95%	95%
	metoprolol ug/l	1,6	1,6	0,06	0,06	96%	96%	96%
	sotalol ug/l	1,1	1,1	0,01	0,01	99%	99%	99%
	trimethoprim ug/l	0,1	0,1	0,01	0,01	90%	90%	90%
2018	claritromycine ug/l	0,07	0,06	0,01	0,01	86%	83%	85%
	propranolol ug/l	0,07	0,07	0,01	0,01	86%	86%	86%
	sulfamethoxazol ug/l	0,32	0,32	0,01	0,01	97%	97%	97%
	gabapentine ug/l	3	2,8	1,2	1,2	60%	57%	59%
	irbesartan ug/l	1,2	1,2	0,21	0,23	83%	81%	82%
kandidaat	venlafaxine ug/l	0,19	0,19	0,01	0,01	95%	95%	95%
	azitromycine ug/l	0,4	0,4	0,1	0,1	75%	75%	75%
	furosemide ug/l	0,9	0,9	0,2	0,2	78%	78%	78%
	citalopram ug/l	0,15	0,16	0,01	0,01	93%	94%	94%
	amisulpride ug/l	0,05	0,05	0,01	0,01	80%	80%	80%
candesartan ug/l	0,54	0,56	0,07	0,06	87%	89%	88%	

