



**stowa**

# HAALBAARHEIDSTUDIE ULTRASOUND IN COMBINATIE MET OZON TECHNOLOGIE VOOR VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN OP RWZI'S



RAPPORT

2020  
24

HAALBAARHEIDSSSTUDIE ULTRASOUND IN COMBINATIE  
MET OZON TECHNOLOGIE VOOR VERWIJDERING VAN  
MICROVERONTREINIGINGEN OP RWZI'S

RAPPORT

2020

24

ISBN 978.90.5773.894.4



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

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)

# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

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

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

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

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau  
STOWA STOWA 2020-24  
ISBN 978.90.5773.894.4

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

# TEN GELEIDE

**De toepassing van ultrasound in combinatie met ozon technologie biedt op basis van deze haalbaarheidsstudie voldoende perspectief om een vervolg te krijgen in het Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit Afvalwater (IPMV). Er zal aanvullend pilotonderzoek plaatsvinden op RWZI Winterswijk.**

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. Doel is dat de waterschappen binnen vijf tot zeven jaar meer beproefde technieken tot hun beschikking hebben voor de verwijdering van micro verontreinigingen. Het innovatieprogramma is onderverdeeld in vijf verschillende thema's, waaronder het thema 'Oxidatieve technieken'.

In het kader van het IMPV is de haalbaarheid van de toepassing van ultrasound in combinatie met ozon technologie van de leverancier USONiQ beoordeeld op basis van de te verwachten verwijderingsrendementen, geschatte kosten en geschatte CO<sub>2</sub> footprint ten opzichte van drie referentie technieken (poederkool, granulair kool of ozondosering). Ten opzichte van de referentie techniek ozondosering scoort deze nieuwe toepassing op alle criteria scoorde gelijkwaardig (kosten) of beter (verwijderingsrendement en CO<sub>2</sub> footprint).

Tijdens het pilotonderzoek zal eerst worden gevarieerd in de instelling van de ozondosering om zo een beeld te krijgen van de impact op de rendementen op de gidsstoffen en vervolgens vindt een duurproef plaats om gedurende langere tijd de technologie te onderzoeken op met name verwijderingsrendement en kWh verbruik. Aanvullend zullen de concentraties bromide en bromaat, een aantal desinfectie parameters en de ecotoxiciteit worden gemeten. Mogelijk is er ruimte voor meting van antibiotica resistentie. Na afloop van het pilotonderzoek zullen de prestaties naast de uitkomsten van deze haalbaarheidsstudie worden gelegd en kunnen conclusies getrokken worden over de opschaling naar demo en full scale toepassing van de technologie.

Joost Buntsma  
Directeur STOWA

# 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 onderzoeklijnen 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.*

# HAALBAARHEIDSTUDIE ULTRASOUND IN COMBINATIE MET OZON TECHNOLOGIE VOOR VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN OP RWZI'S

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
	1.1 Aanleiding	1
	1.2 Doelstelling	2
	1.3 Leeswijzer	2
<b>2</b>	<b>BESCHRIJVING EN LITERATUURSTUDIE TECHNOLOGIE</b>	<b>3</b>
	2.1 Beschrijving USONiQ technologie	3
	2.2 Algemene literatuur ultrasound en ozonisatie	5
	2.2.1 Ozonisatie	5
	2.2.2 De invloed van ultrasound op ozonisatie	5
	2.2.3 Ervaringen met de USONiQ technologie in het buitenland	6
	2.2.4 Vergelijking technologie met reguliere ozon behandeling	9
	2.3 Aanvullend onderzoek in kader van het innovatieprogramma	10
	2.4 Huidige Technology Readiness Level	10
	2.5 Dimensioneringsgrondslagen	11
<b>3</b>	<b>INPASSING IN NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK</b>	<b>12</b>
	3.1 Uitgangspunten	12
	3.2 Effect op bedrijfsvoering van de rwzi	12
	3.3 Fysieke inpassing	13
	3.4 Toepasbaarheid	13

<b>4</b>	<b>BEOORDELING TECHNOLOGIE OP DE GESTELDE CRITERIA</b>	<b>14</b>
4.1	Inleiding	14
4.2	CO <sub>2</sub> footprint	15
4.3	Kosten	17
4.4	Verwijderingsrendementen gidsstoffen	18
4.5	Effect op ecotoxicologische risico's en bijproducten	19
4.6	Conclusies criteria	19
4.7	Conclusie vervolg met pilotinstallatie	20
<b>5</b>	<b>GEBRUIKTE LITERATUUR</b>	<b>21</b>
BIJLAGE 1	RESULTATEN UIT PILOTONDERZOEK	22

# 1

## INLEIDING

### 1.1 AANLEIDING

Voor de verwijdering van microverontreinigingen en resistente bacteriën is toepassing van Ozon technologie als 4e trap een bewezen technologie. Een conventionele ozon installatie op een rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi) bestaat uit een betonnen tank en een beluchtings-systeem waarmee zuurstof ( $O_2$ ) en ozon ( $O_3$ ) in het effluent ingebracht wordt. De verblijftijd van het effluent in deze tank is ongeveer 15 minuten.

Nieuwe ozon technologieën die gebruik maken van ultrasound, bewerkstelligen mogelijk een verbeterde en snelle ozon overdracht in het effluent. De toepassing van ultrasoon (US) eenheden en een alternatief inbreng- en mengprincipe voor ozon maken de microverontreinigingen wellicht beter ontvankelijk voor omzettingen.

Deze nieuwe ozon technologie kan dus mogelijk een verbetering zijn ten opzichte van de huidige bewezen ozon technologie en komt daarom in aanmerking voor het Innovatieprogramma microverontreinigingen uit afvalwater van het ministerie van I&W en STOWA. In dit innovatieprogramma worden diverse projectideeën eerst uitgewerkt in een haalbaarheidsstudie. Op basis van de uitkomsten van de haalbaarheidsstudie wordt beoordeeld of een vervolgfase zinvol is. STOWA heeft voor deze haalbaarheidsstudies een format opgesteld en een vijftal begeleidingscommissies ingericht die ieder 3 tot 4 haalbaarheidsstudies begeleiden.

In Duitsland zijn twee leveranciers actief met deze nieuwe gecombineerde ozon technologie, namelijk USONiQ en Up2e!

- Oorspronkelijk is de haalbaarheidsstudie gestart met USONiQ en is informatie verkregen over de ervaringen met de toepassing op de verwijdering van microverontreinigingen op pilot schaal. De leverancier USONiQ laat zien dat met beduidend lagere verblijftijden en  $O_3$ -doseringen dezelfde afbraakrendementen kunnen worden behaald in vergelijking met reguliere ozon technologie (zie hoofdstuk 2 tot en met 4).
- Gaandeweg de haalbaarheidsstudie is de leverancier Up2e! in beeld gekomen en is informatie verkregen over de ervaringen van deze leverancier met de toepassing op de verwijdering van microverontreinigingen. Deze informatie is aangeleverd door de Nederlandse partner van Up2e!, Eliquo Water & Energy. Uit een eerste screening van de Up2e! technologie, blijkt dat er beperkte ervaring is met de verwijdering van microverontreinigingen. Op basis hiervan heeft de BC Oxidatieve technieken ervoor gekozen deze technologie niet verder uit te werken in een haalbaarheidsstudie.

In dit rapport is de haalbaarheidsstudie voor de nieuwe technologie waarbij ultrasound gecombineerd is met ozon technologie beschreven, waarbij gebruik is gemaakt van de door USONiQ aangeleverde informatie.



## 1.2 DOELSTELLING

Deze haalbaarheidsstudie heeft tot doel om te beoordelen of het zinvol is om een vervolgfase in te gaan voor de nieuwe technologie waarbij ultrasound gecombineerd is met ozon technologie in de vorm van een pilotonderzoek.

Door STOWA wordt een techniek/technologie als “zinvol voor een vervolgfase” aangemerkt wanneer deze een verbetering oplevert ten opzichte van huidige bewezen technieken voor de verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater voor één of meerdere van de volgende aspecten:

- CO<sub>2</sub>-footprint;
- kosten;
- verwijdering van microverontreinigingen o.b.v. gidsstoffen Ministerie I&W;
- vermindering ecotoxicologische risico's voor lozing van rwzi-effluent in het watermilieu.

## 1.3 LEESWIJZER

In hoofdstuk 2 is een beschrijving van de technologie en relevante literatuur opgenomen. Vervolgens is de inpassing in Nederlandse zuiveringspraktijk beschreven in hoofdstuk 3. Tenslotte is in hoofdstuk 4 de technologie beoordeeld op de gestelde criteria en zijn conclusies getrokken.

# 2

## BESCHRIJVING EN LITERATUURSTUDIE TECHNOLOGIE

### 2.1 BESCHRIJVING USONIQ TECHNOLOGIE

De gepatenteerde USONiQ technologie is het resultaat van diverse (pilot)studies naar de voordelen van ultrasound en ozon in een gecontroleerde omgeving. De technologie kan worden toegepast op zowel sterk vervuild water met verontreinigingen in de range van mg/l, als water met microverontreinigingen in de range van µg/l.

De USONiQ technologie is getest op complexe verbindingen die moeilijk of niet te oxideren zijn met reguliere ozon, zoals röntgencontrastvloeistoffen. Met de USONiQ technologie kunnen deze verontreinigingen succesvol worden verwijderd door de inbreng van ultrasoon eenheden en (hoge concentraties) ozon. De ultrasoon eenheden dragen bij door de moeilijk of niet te oxideren verbindingen open te breken waardoor deze alsnog kunnen worden geoxideerd. Een andere toepassing die is getest, is het desinfecteren van afvalstromen. Hierbij worden bacteriën sterk beschadigd waardoor een hoge desinfectie graad kan worden behaald. Tenslotte is de USONiQ technologie in pilot onderzoeken succesvol getest op afvalwaterstromen om microverontreinigingen te verwijderen (zie paragrafen 2.2.2 en 2.2.3).

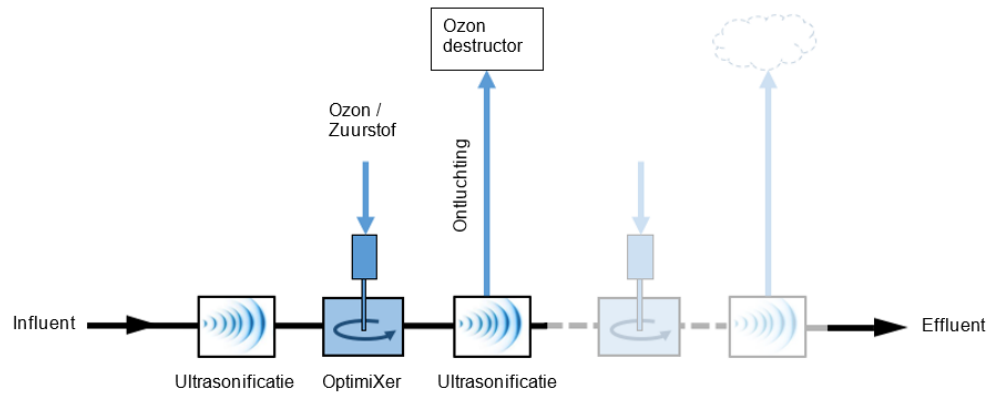
Het systeem bestaat uit een roestvrijstalen buisvormige reactor die begint met een reactieruimte voor de ultrasonificatie met generatoren verdeeld over de lengte en pijpomtrek. Na de ultrasonificatie bevindt zich een ozontoevoer, dichtbij een gepatenteerde mengschijf die voor optimale menging van de ingebrachte ozon zorgt. De reactor eindigt met opnieuw ultrasonificatie (zie Figuur 2.1 en Figuur 2.3).

Voor complexere verbindingen, zoals bijvoorbeeld in industrieel afvalwater, wordt gebruik gemaakt van een buisvormige reactor met meerdere secties die elkaar opvolgen, waarin elke sectie ultrasonificatie en ozon toevoer bevat. De pilot reactor die tot op heden is gebruikt in onderzoeken bestaat uit vier secties. De technologie is ontwikkeld als een modulair principe, dat kan worden opgeschaald naar behoefte door meerdere secties achter elkaar te plaatsen of een parallel geschakelde, tweede buisvormige reactor (mondelinge toelichting door leverancier).

De regeling van het proces gebeurt aan de hand van de in afvalwater (en dus voor de operator) bekende sensoren, zoals debiet, droge stofgehalte, temperatuur en redox. De reactie verloopt zeer snel, waardoor deze goed controleerbaar en regelbaar is (mondelinge toelichting door leverancier).

FIGUUR 2.1

PROCESSCHEMA USONIQ TECHNOLOGIE (BRON: LEVERANCIER)



FIGUUR 2.2

INSTALLATIE USONIQ TECHNOLOGIE (BRON: LEVERANCIER)



Met de pilotreactor zijn verschillende parameters getest om het systeem te optimaliseren, zoals ozon toevoeging en de verhouding ozon-ultrasound (1). Een goed verdeelde ozon toevoeging over de reactor met een gepulseerde ultrasonificatie is het meest efficiënt gebleken. Daarnaast blijkt uit onderzoek dat lineaire verhoging van het aantal ultrasound eenheden met de ozon dosis geen invloed had op het verwijderingsrendement. Het energieverbruik neemt minder hard toe bij verhoging van de ozon dosis door verbeterde efficiëntie en het blijkt dat de benodigde verhoging van ultrasound beter past bij een lineaire verhoging van het energieverbruik. Daardoor is de hoeveelheid toegepaste ultrasound (in kWh) altijd een vast percentage van het totale energieverbruik (1). Het energieverbruik (in kWh) van ultrasound versus het verbruik van de  $O_3$  generatie heeft een verhouding van ongeveer 1 : 3-3,5.

Deze technologie is in verschillende studies, op lab- en pilot schaal, getest met verschillende gidsstoffen en ozon doses (zie paragraaf 2.2.3, 2.2.4 en 2.2.3.2). In deze studies is gekeken naar de gecombineerde technologie (van ultrasound en ozon) zonder eventuele nabehandeling van het water zoals een zandfilter.

## 2.2 ALGEMENE LITERATUUR ULTRASOUND EN OZONISATIE

### 2.2.1 OZONISATIE

Ozonisatie is een zogenaamde oxidatieve techniek. Ozon is een instabiel molecuul en reageert in een waterig milieu op twee manieren (2):

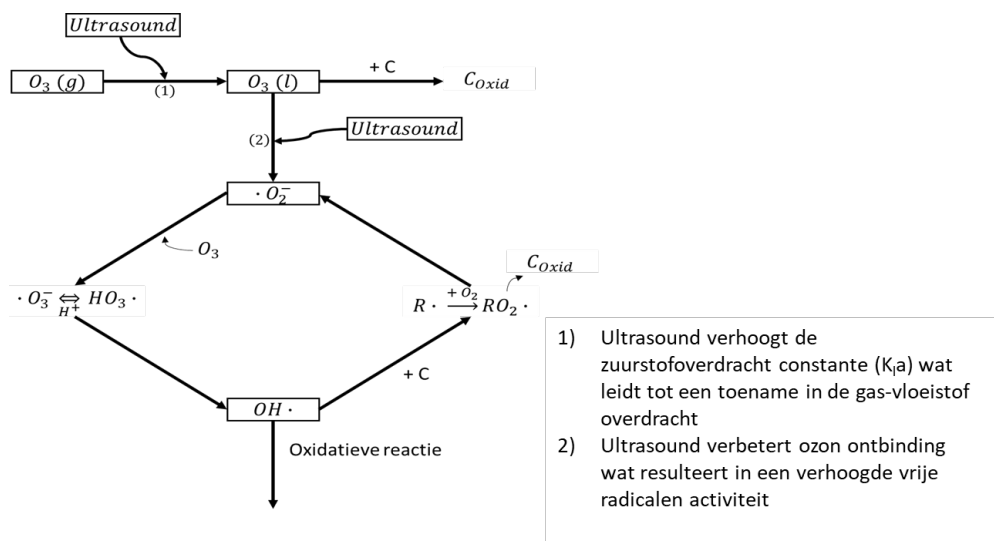
- Selectieve, directe reactie als een krachtige oxidant door het aanvallen van zowel microverontreinigingen en natuurlijk organisch materiaal (DOC). Het reageert bij voorkeur met stoffen die elektronen-rijke verbindingen hebben (zoals aminogroepen, dubbele bindingen, fenolverbindingen en geactiveerde aromatische groepen).
- Ozon reageert met verschillende opgeloste componenten van de water matrix (vooral organisch materiaal) tot hydroxyl-radicalen (OH). OH is zeer reactief en reageert met een grote verscheidenheid aan stoffen met hoge reactiesnelheden.

### 2.2.2 DE INVLOED VAN ULTRASOUND OP OZONISATIE

In literatuur (3; 4; 5; 6) is beschreven dat ultrasound golven het ozonisatie proces op verschillende manieren versterken, namelijk door het losbreken van bacteriële clusters, het verbreken van chemische verbindingen in het celmembraan, het verbeteren van het uiteenvallen van ozon (wat resulteert in een verhoogde activiteit van vrije radicalen) en daarnaast verhoogt ultrasound de zuurstof overdracht-constante ( $K_L a$ ), zie Figuur 2.3.

Dit synergetische proces leidt tot een toename in de gas-vloeistof overdracht en een geoptimaliseerd gebruik van ozon. De verhoogde  $K_L a$  wordt bereikt door de turbulentie die wordt veroorzaakt door cavitatie (cavitatie is het vormen en imploderen van dampbellen door drukverschillen in de bewegende vloeistof dat veroorzaakt wordt door turbulentie als gevolg van de ultrasonische geluidsgolven). Een ander voordeel van de gecombineerde ozon/ultrasound behandeling is dat er lagere ozonconcentraties worden gemeten in het water gedurende ultrasonificatie doordat de uiteenvalling/decompositie van ozon wordt versneld. De combinatie van een verhoogde  $K_L a$  en ozondecompositie resulteert in een efficiëntere ozonisatie bij een lagere dosis ozon en een lagere opgeloste ozon concentratie. Gedurende ozon decompositie worden de vrije radicalen hydroperoxyl, hydroxyl en zuurstof gevormd, dit zijn de hoge energetische oxidanten die chemicaliën oxideren en micro-organismen inactiveren. Deze invloeden resulteren op labschaal in een reductie van de ozon dosis met 50% en een verlaagde energie consumptie (3; 4; 5; 6).

FIGUUR 2.3 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE INVLOED VAN ULTRASOUND OP OZON



## 2.2.3 ERVARINGEN MET DE USONIQ TECHNOLOGIE IN HET BUITENLAND

### 2.2.3.1 VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN

Om de effectiviteit van de gecombineerde technologie van ultrasound en ozon (USONiQ technologie) te beoordelen, zijn verschillende onderzoeken uitgevoerd, waaronder:

- De verwijdering van carbamazepine uit afvalwater (Technische Universiteit München).
- De verwijdering van 8 microverontreinigingen waaronder de gidsstoffen carbamazepine en sulfamethoxazol, en röntgencontrastmiddel Iopromide (USS GmbH, VS).
- De verwijdering van verschillende microverontreinigingen (pilotonderzoek, Ostfalia Hochschule, RWZI Wolfsburg).

FIGUUR 2.4 PILOTINSTALLATIE 20 VOET CONTAINER



In 2008 werd in een afstudeeronderzoek, aan de Technische Universiteit van München, voor het eerst de invloed van de USONiQ technologie op de stof carbamazepine onderzocht. Resultaten lieten zien dat de technologie een verbeterd effect heeft op de verwijdering van carbamazepine (7). Uit onderzoek van USONiQ op afvalwater in de VS, bleek dat de technologie in staat was om verschillende microverontreinigingen te verwijderen, waaronder de gidsstoffen carbamazepine en sulfamethoxazol. Met een ozon dosis van 6 mg/L en een gemiddeld DOC gehalte van 11 mg/L (0,55 mg O<sub>3</sub>/mg DOC), konden deze gidsstoffen voor meer dan 95% worden verwijderd in de behandelde stroom. Deze studie liet ook zien dat de USONiQ technologie in staat is om het röntgencontrastmiddel iopromide te verwijderen bij dezelfde ozon dosis met een rendement van 45%. Een verdergaande verwijdering vraagt om een ozon dosis hoger dan 0,90 mg O<sub>3</sub>/mg DOC, dit resulteert in een concentratie iopromide van ongeveer 10 ng/L (begin concentratie was 60 ng/L) (8).

Vervolgens is in 2012 een pilot-onderzoek uitgevoerd door de Universiteit van Ostfalia met het effluent van RWZI Wolfsburg, het DOC gehalte was gemiddeld 11 mg/L (zie Tabel 2.1 en Bijlage 1, Tabel 5.1). In dit onderzoek zijn 5 van de 11 gidsstoffen (van Min. I&W) meegenomen. Over het algemeen waren de concentraties van de 5 gidsstoffen in de afloop van de nabe-

zinktank ruim boven het detectielimiet. Bij een lage ozon dosering van 0,15 mg O<sub>3</sub>/mg DOC werd al een concentratie onder de detectielimiet (5 ng/L) behaald met de stoffen diclofenac en furosemide. Bij citalopram was dit het geval bij een ozon dosering van 0,28 mg O<sub>3</sub>/mg DOC. Bij de gidsstoffen hydrochloorthiazide en metoprolol kon met een ozon dosis van 0,43 en 0,56 mg O<sub>3</sub>/mg DOC, respectievelijk, een concentratie onder de detectielimiet worden bereikt. Bij 1-H-Benzotriazool was een concentratie van 0,85 mg O<sub>3</sub>/mg DOC nodig om de gidsstof te reduceren tot onder de detectielimiet, Tabel 21 (9). Een uitgebreide versie van deze tabel is weergegeven in Bijlage 1, Tabel 51. Uit dit onderzoek kan een 'omslagpunt' worden waargenomen wanneer wordt gekeken naar de gidsstoffen metoprolol en 1-H-Benzotriazool; een verhoging van de ozon dosis van 0,43 naar 0,56 mg O<sub>3</sub>/mg DOC levert een forse stijging in het verwijderingsrendement van gemiddeld 56 naar 88%. Hierdoor lijkt een keuze voor een ozon dosering van ongeveer 0,55 mg O<sub>3</sub>/mg DOC optimaal. Van de 11 gidsstoffen zijn metoprolol en 1-H-Benzotriazool het lastigst te verwijderen met ozon.

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 ozon dosering van ongeveer 0,55 mg O<sub>3</sub>/mg DOC.

Wanneer gekeken wordt hoe representatief deze vijf gidsstoffen uit de pilot op RWZI Wolfsburg zijn in relatie tot de 11 gidsstoffen, kunnen deze niet per definitie de meest makkelijkste van de 11 gidsstoffen worden genoemd voor de verwijdering met ozon. Twee van de onderzochte vijf (diclofenac en sulfamethoxazol) hebben normaal gesproken een zeer hoge verwijdering met alleen ozon (>90%). Kijkende naar alle 11 gidsstoffen, dan hebben 6 ervan dezelfde hoge verwijdering, 2 een middelmatige verwijdering (>75%, o.a. Hydrochloorthiazide) en zijn er 3 lastiger te verwijderen met ozon. Dit zijn onder andere metoprolol en 1-H-Benzotriazool, welke zijn meegenomen in dit onderzoek. Over het algemeen is de verwijdering van het mengsel van 4,5-Benzotriazool vergelijkbaar met die van 1-H-Benzotriazool. Omdat in het onderzoek op RWZI Wolfsburg ook de lastig met ozon te verwijderen gidsstoffen zijn meegenomen, mogen de genoemde rendementen voor de onderzochte vijf gidsstoffen zeker representatief genoemd worden voor vergelijk met de referentieverwijdering van de 11 gidsstoffen.

TABEL 2.1

OVERZICHT VAN DE TOEGEPASTE OZON DOSIS EN BIJBEHOOREND VERWIJDERINGSRENDEMENT IN HET PILOTONDERZOEK IN WOLFSBURG MET USONIQ (9), HET DOC GEHALTE IN DIT ONDERZOEK WAS 11 MGD/ML

Verbinding	Gidsstof Min I&W	Ozon dosis (mg O <sub>3</sub> /mg DOC)	Verwijderingsrendement in de behandelde stroom (%)
Citalopram	-	0,28	93,3
Diclofenac	ja	0,15	99,8
Furosemide	-	0,15	99,9
Hydrochloor-thiazide	ja	0,37	99,6
Sulfamethoxazol	ja	0,37	98,3
Metoprolol	ja	0,56	99,3
1-H-Benzotriazool*	ja	0,85	100
		0,56	76,9

\* Er zijn twee verschillende ozon doses (0,85 en 0,56 mg O<sub>3</sub>/mg DOC) gegeven in de tabel, zodat zichtbaar is wanneer deze volledig verwijderd is en bij welke dosis in de test de verwijdering >75% is.

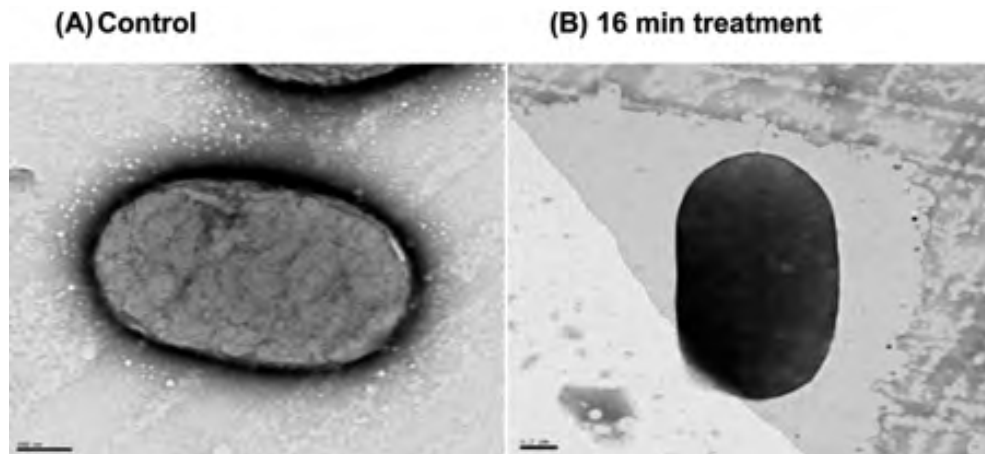
Op dit moment wordt met meerdere locaties in Duitsland gesproken over onderzoek met USONiQ naar de verwijdering van microverontreinigingen en naar mogelijke bijvangst. Ook vanuit Zwitserland is er interesse bij de leverancier USONiQ. Omdat dit concurrentiegevoelige informatie is, kan hierover niets worden gerapporteerd.

### 2.2.3.2 DESINFECTIE

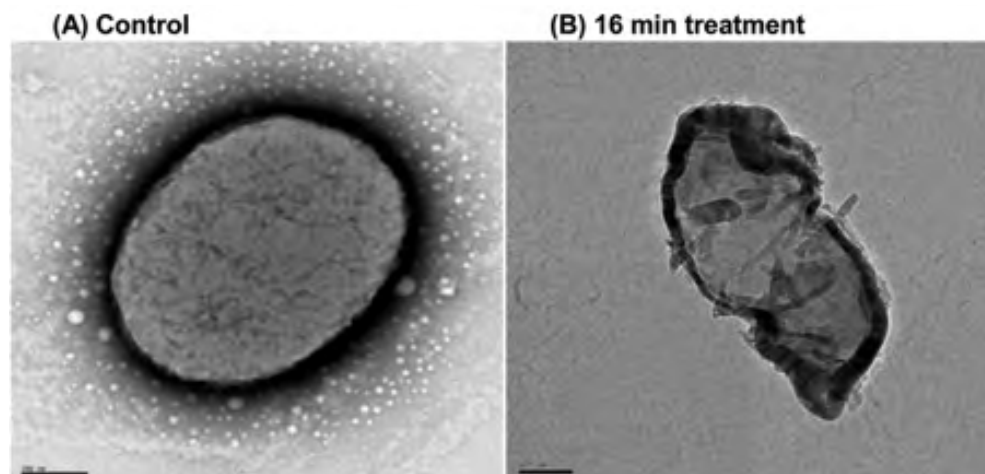
Een andere toepassing van de USONiQ technologie, die ook is onderzocht, is het desinfecteren van afvalwaterstromen. In het eerder vermelde onderzoek in München is de invloed van de combinatie van ultrasound met ozon op bacteriën onderzocht (1). Hieruit blijkt dat desinfectie van afvalwater door ozon afhankelijk is van de hoeveelheid opgeloste (kool)stof, pH, temperatuur en bromide concentraties.

Andere studies op lab-schaal laten zien dat de behandeling van afvalwater met ozon resulteert in een reductie van levende cellen van 86% in 16 minuten. Wanneer deze techniek wordt gecombineerd met ultrasound eenheden, stijgt de reductie van levende cellen naar 95% in 4 minuten (3). De combinatie van ozon en ultrasound resulteert in meer beschadigde bacteriën en daarmee een hogere desinfectiegraad dan met alleen ozontoevoeging, zie Figuur 2.5 en Figuur 2.6.

FIGUUR 2.5 WEERGAVE VAN HET EFFECT VAN OZON OP DE STRUCTUUR VAN DE BACTERIE E.COLI, MET EEN CONTROLE (A) EN NA 16 MIN BEHANDELING (B) (3)



FIGUUR 2.6 WEERGAVE VAN HET EFFECT VAN ULTRASOUND EN OZON OP DE STRUCTUUR VAN DE BACTERIE E.COLI, MET EEN CONTROLE (A) EN NA 16 MIN BEHANDELING (B) (3)



De lab-schaal resultaten uit de literatuur kunnen worden vergeleken met resultaten uit het pilot onderzoek in München. Bij beide onderzoeken werd een verbeterde desinfectie behaald wanneer ozon verdeeld en pulserend (aan/uit) werd toegediend in de reactor, dan bij met continu ingebrachte ozon op één locatie. Ditzelfde geldt voor het toedienen van ultrasone

eenheden, een verbeterde desinfectie werd behaald bij een gepulseerde ultrasonificatie (1; 6). De installatie voor een van de desinfectie toepassingen had een capaciteit van 6 - 35 m<sup>3</sup>/h en was daar een full scale opstelling.

#### 2.2.4 VERGELIJKING TECHNOLOGIE MET REGULIERE OZON BEHANDELING

Voorafgaand aan het haalbaarheidsonderzoek is gesteld dat:

- de footprint van een USONiQ installatie beduidend kleiner is dan die van een reguliere ozon installatie;
- bij USONiQ beduidend lagere verblijftijden en O<sub>3</sub>-doseringen volstaan om een zelfde verwijderingsrendement te behalen als met reguliere ozon behandelingsinstallaties.

Na het literatuuronderzoek (paragraaf 2.2.3 en 2.2.2), en de ervaringen van de leverancier in het buitenland (paragraaf 2.2.3), kunnen deze drie voordelen worden bevestigd. Dit is hieronder toegelicht.

De USONiQ technologie wordt toegepast in een leiding, dit kan worden gerealiseerd in een bestaande leiding of in een container opstelling, en kan worden geschaald naar behoefte. Hierdoor is er geen civiele tank met verblijftijd nodig en is de *ruimtelijke footprint* aanzienlijk *kleiner*.

De *verblijftijd* kan *korter* omdat door de introductie van ultrasoon eenheden, een verbeterde en snelle O<sub>3</sub> overdracht in het effluent bewerkstelligd kan worden. Daarbij worden de microverontreinigingen beter ontvankelijk gemaakt voor oxidatieve reacties door ultrasoon eenheden toe te passen voor de ozon inbreng, de ultrasoon eenheden kunnen (bacteriële) clusters namelijk losbreken.

Uit onderzoek lijkt een ozon dosering van ongeveer 0,55 mg O<sub>3</sub>/mg DOC een goede waarde, hierbij kan een verwijderingsrendement van ongeveer 95% worden behaald op de gidsstoffen in de behandelde deelstroom, zie paragraaf 2.2.3. Voor de referentie met ozon is binnen het STOWA innovatieprogramma uitgegaan van een ozon dosering van 0,7 mg O<sub>3</sub>/mg DOC en 11 mg DOC/l. Dit betekent dat met USONiQ ongeveer 20% *bespaard* zou kunnen worden *op het ozon verbruik*. Dit wordt ook in vergelijkende literatuur gevonden (10).

Uit onderzoek blijkt dat een zeer hoge verwijdering kan worden gerealiseerd (gemiddeld ongeveer 95%) voor de onderzochte vijf gidsstoffen bij een ozon dosering van ongeveer 0,55 mg O<sub>3</sub>/mg DOC. Hierbij zijn de meest moeilijk afbreekbare gidsstoffen met ozon meegeenomen, waardoor aangenomen mag worden dat de verwijdering van de gidsstoffen ongeveer 95% is met USONiQ in de behandelde stroom. Afhankelijk van de keuze hoeveel van het debiet behandeld wordt en de huidige verwijdering op de rwzi kan het totale rendement over de rwzi bepaald worden. Dit is met USONiQ naar verwachting 85-90%, kijkende naar de verwijdering in het totale effluent van de rwzi in vergelijking met het influent, en is daarmee hoger dan de 80-85% met reguliere ozon technologie.

Hierbij dient te worden opgemerkt, dat er ook voor gekozen kan worden om een lagere verwijdering van de gidsstoffen te realiseren met USONiQ, bijvoorbeeld 80-85% in lijn met de referentie. In deze situatie zou de ozon dosering naar verwachting nog lager kunnen zijn, wat resulteert in een *besparing hoger dan 20%* ten opzichte van de referentie (reguliere ozon behandeling).



De vorming van bromaat is (naast de ingaande concentratie bromide) ook afhankelijk van de hoogte van de ozon dosering en de rest ozon concentratie (zie paragraaf 4.5). Omdat de ozon dosering 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 ozon behandeling. Metingen aan rest ozon concentraties in het onderzoek door de Technische Universiteit van München en in het onderzoek van USONiQ zelf (in de VS) geven aan dat er geen rest ozon meer aanwezig is na afloop (<0,2 mg/l).

### 2.3 AANVULLEND ONDERZOEK IN KADER VAN HET INNOVATIEPROGRAMMA

Niet van toepassing. Er is geen aanvullend onderzoek uitgevoerd.

### 2.4 HUIDIGE TECHNOLOGY READINESS LEVEL

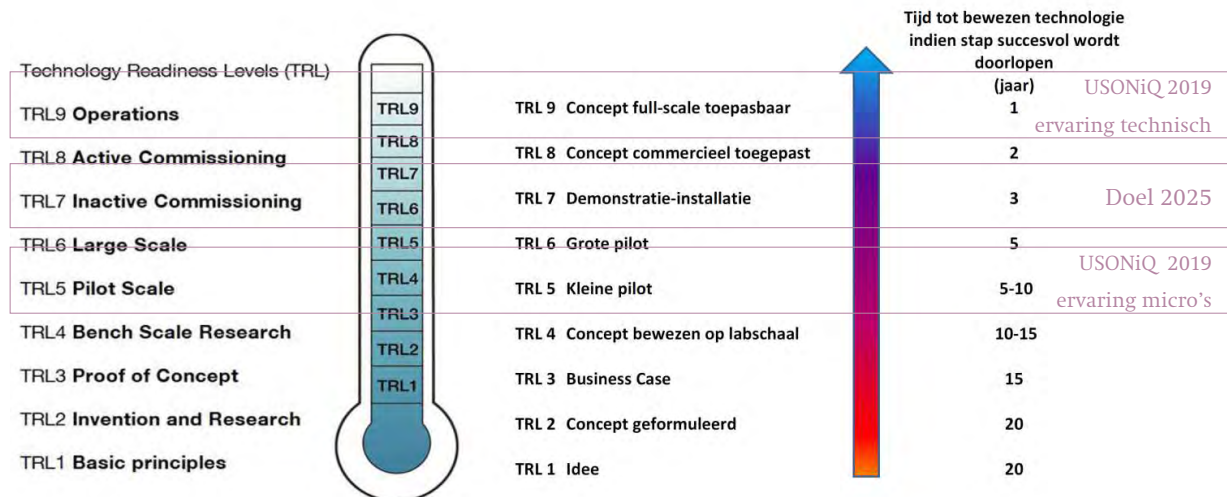
De technologie van USONiQ wordt in de industrie reeds meerdere jaren toegepast. Technisch gezien betekent dit een Technology Readiness Level (TRL) van 9. Op dit moment (zomer 2019) zijn meerdere onderzoeken met een pilot installatie uitgevoerd, gericht op de verwijdering van microverontreinigingen uit effluenten van rwzi's; een aantal onderzoeken staat gepland voor de nabije toekomst. Op basis hiervan kan gesteld worden dat de technologie op basis van ervaringen met de verwijdering van microverontreinigingen een Technology Readiness Level (TRL) van 5 heeft.

De installatie die op pilotschaal beschikbaar is (tot 35 m<sup>3</sup>/h) kan ook parallel uitgevoerd worden, waarmee het effluent van een kleine rwzi (ongeveer 25.000 i.e.) nu al behandeld kan worden (TRL 6-7). Voor grotere rwzi's zou dit ook op deze manier uitgevoerd kunnen worden. Idealer is om bij grotere rwzi's bij een hoger debiet en een grotere diameter van de buisreactor te werken. De uitdaging hierbij is om de Ultrasound en O<sub>3</sub> op een effectieve manier in te brengen. Op dit moment werkt de leverancier aan deze opschaling van de technologie wat afhankelijk van de vraag naar de technologie maximaal 1-2 jaar zal duren.

Vanuit het innovatieprogramma is het van belang dat de technologie binnen 5-7 jaar op demo-schaal<sup>1</sup> kan worden toegepast (TRL van 7 in 2025). Gezien bovenstaande kan USONiQ hier nu al technisch aan voldoen. Het laten zien van de ervaringen met de verwijdering van microverontreinigingen op een locatie in Nederland middels een pilot of demonstratie installatie is gewenst.

1 Onder demo-schaal wordt in dit innovatieprogramma verstaan: een fullscale toepassing voor zuiveringen kleiner dan 25.000 i.e. Voor zuiveringen groter dan 25.000 i.e. dient minimaal één straat van minimaal 25.000 i.e. te worden omgebouwd.

FIGUUR 2.7 TECHNOLOGIE READINESS LEVELS (TRL) EN USONIQ TECHNOLOGIE



## 2.5 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN

Omdat de technologie slechts TRL5 is, zijn nog niet alle dimensioneringsgrondslagen bekend voor een full scale toepassing (zoals voor 100.000 i.e.). Daarnaast kunnen niet alle dimensioneringsgrondslagen gedeeld worden in verband met concurrentiegevoeligheid.

Grondslagen:

- 70-100% van het totale debiet van de afloop van de nabezinktank wordt behandeld.
- O<sub>3</sub> dosering is ongeveer 0,55 mg O<sub>3</sub>/mg DOC voor verwijdering van 95% van de gidsstoffen in de behandelde stroom.
- Ultrasound energieverbruik in kWh versus het verbruik van de O<sub>3</sub> generatie is ongeveer 1 : 3-3,5

# 3

## INPASSING IN NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK

### 3.1 UITGANGSPUNTEN

Als uitgangspunten zijn de bevindingen uit hoofdstuk 2 met betrekking tot de USONiQ technologie gebruikt en gecombineerd met de waarden genoemd in het CO<sub>2</sub> footprint model (versie 5) en de richtlijn voor de haalbaarheidsstudie.

### 3.2 EFFECT OP BEDRIJFSVOERING VAN DE RWZI

Het geschatte effect op de bedrijfsvoering is gegeven in onderstaande tabel.

TABEL 3.1 EFFECT OP DE BEDRIJFSVOERING, GERELATEERD AAN DE REFERENTIESITUATIE

Parameter	Effect
Behandelde hoeveelheid afvalwater	In de USONiQ technologie kan 70-100% van het jaardebiet worden behandeld. De keuze of dit wenselijk is, zoals bijvoorbeeld voor desinfectie, is locatie specifiek. Bypass behoort tot de mogelijkheden
Slibproductie	N.v.t. er wordt geen extra slib gevormd door USONiQ.
Spoelwaterverbruik en waswaterproductie	N.v.t. er is geen spoelwater nodig voor USONiQ
In te zetten hulpstoffen en chemicalien	Voor de generatie van O <sub>3</sub> is O <sub>2</sub> nodig. Meest waarschijnlijk is dat dit (zeker op grote schaal) met pure vloeibare zuurstof is. Uitgangspunt is een 20% lager verbruik van O <sub>3</sub> en dus ook 20% lager O <sub>2</sub> -verbruik. Op basis van het CO <sub>2</sub> model is af te leiden dat er dan 325.000 kg O <sub>2</sub> /jaar nodig is (80% 414.000 kg O <sub>2</sub> /jaar voor de referentievariant). Daarnaast is aangenomen dat voor het zandfilter 6 mg/l O <sub>2</sub> benodigd is, dit is in alle O3 varianten 32.000 kg O <sub>2</sub> /jaar (CO <sub>2</sub> footprint model versie 5).
Jaarlijks energieverbruik van apparatuur van de technologie/techniek	Uit de referentie CO <sub>2</sub> berekening voor reguliere ozon, is het totale energieverbruik 655.000 kWh/jr voor een rwzi van 100.000 i.e. a 150g TZV, dit is het energieverbruik voor de O <sub>3</sub> generatie, warmte koeling, inbreng en menging. De opbouw is gegeven in de tabel hieronder.

	Reguliere ozon <sup>1)</sup>	USONiQ gunstig <sup>2)</sup>	USONiQ conservatief <sup>3)</sup>
O <sub>3</sub> generatie, warmte en koeling	414.000	325.000	413.000
US, menging/inbreng	241.000	193.000	193.000
Totaal	655.000	518.000	606.000
t.o.v. regulier	100%	79%	93%

<sup>1)</sup> Uit CO<sub>2</sub> model innovatieprogramma versie 5

<sup>2)</sup> Bij 20% minder O<sub>3</sub> verbruik dan reguliere ozon

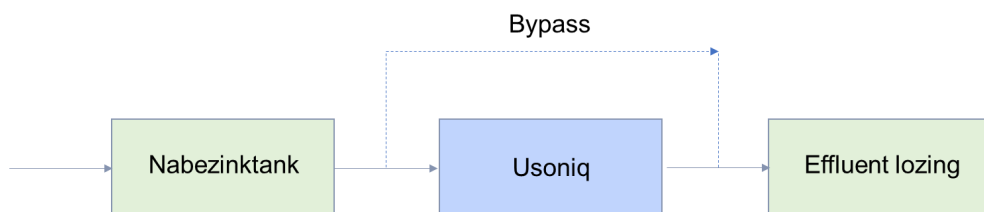
<sup>3)</sup> Bij gelijk O<sub>3</sub> verbruik als reguliere ozon

Parameter	Effect
	<p>Voor de USONiQ technologie is 20% minder <math>O_3</math> nodig, wat betekent dat uitgaande van gelijke efficiëntie voor ozon generatie en koeling, dit voor USONiQ 20% minder energie kost. De technologie heeft daarnaast energie nodig om ultrasound eenheden in het systeem te brengen. Op basis van opgave van de leverancier, is het verbruik voor koeling en ultrasound ongeveer 70% van het verbruik voor <math>O_3</math> generatie. In bovenstaande tabel is uitgegaan dat de inbreng en menging 80% van het energieverbruik van reguliere ozon kost; dit is dus conservatiever dan de opgave van de leverancier. Voor USONiQ met 20% minder <math>O_3</math> verbruik ('gunstig' scenario) is hiermee 518.000 kWh/jr nodig, wat een reductie van 21% betekent ten opzichte van reguliere ozon toepassing.</p> <p>Naast dit energieverbruik, is in bovenstaande tabel ook het energieverbruik gegeven bij een ozon dosering gelijk aan reguliere ozon technologie. Voor dit 'conservatieve scenario' van de USONiQ technologie is 606.000 kWh/jr nodig, wat een reductie van 7% betekent ten opzichte van reguliere ozon toepassing.</p>
Overig verhoogd jaarlijks energieverbruik op de rwzi ten gevolge van toepassing van de techniek/technologie	N.v.t.
Personeel	Door de leverancier is ingeschat dat men slechts een aantal uur per week met de technologie bezig is. Voor deze haalbaarheidsstudie is uitgegaan van 0,2 FTE.

### 3.3 FYSIEKE INPASSING

De USONiQ technologie behandelt de afloop van de nabezinktank. Omdat de opschaling naar een rwzi van 100.000 i.e. à 150 g TZV nog niet gerealiseerd is, is het niet mogelijk het benodigde oppervlak voor de fysieke inpassing exact te bepalen. Deze wordt nu ingeschat op ongeveer 75 m<sup>2</sup>. In elk geval is het kleiner dan reguliere ozon technologie.

FIGUUR 3.1 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE FYSIEKE INPASSING VAN DE USONIQ TECHNOLOGIE



### 3.4 TOEPASBAARHEID

De USONiQ technologie kan op elke rwzi worden toegepast, mits er ruimte is om dit in te passen. De technologie is interessant te overwegen als:

- als er weinig ruimte is;
- als de omvang van de toekomstige aanvoer onzeker is; bij een toename van het debiet is uitbreiding eenvoudig vanwege de modulaire opschaalbaarheid;
- als er ook desinfectie benodigd is;
- als de verwijdering van complexere verbindingen gewenst is. Dit geldt ook voor behandeling van complexe verbindingen in het afvalwater van ziekenhuizen en industrie.

## 4

# BEOORDELING TECHNOLOGIE OP DE GESTELDE CRITERIA

## 4.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk is de technologie beoordeeld op de volgende aspecten:

- CO<sub>2</sub>-footprint
- kosten
- verwijdering van microverontreinigingen op basis van de gidsstoffen Ministerie I&W
- vermindering ecotoxicologische risico's voor lozing van rwzi-effluent in het watermilieu

Als referenties worden drie andere technologieën aangehouden:

- Powder Activated Carbon Activated Sludge (PACAS);
- Ozonisatie van rwzi-effluent gevolgd door zandfiltratie
- Granulair ActiefKool filtratie (GAK).

Om als “zinnig voor een vervolgfase” te kunnen worden aangemerkt dient de techniek/technologie beter te scoren dan de referentie technologieën (Tabel 4.1). Omdat USONiQ een ozon-technologie is, zal de vergelijking voornamelijk plaats vinden met ozon.

TABEL 4.1 CRITERIA EN HUN WAARDEN VOOR DE REFERENTIE TECHNOLOGIEËN

	Eenheid	PACAS	Ozon + zandfilter	GAK
1. CO <sub>2</sub> footprint	g CO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup> <sup>1</sup>	122	128	325
2. Kosten	€/m <sup>3</sup> <sup>1</sup>	0,05	0,17	0,26
3. Verwijderingsrendement gidsstoffen Min I&W	% <sup>2</sup>	70-75%	80-85%	80-85%

<sup>1</sup> Per m<sup>3</sup> behandeld rioolwater

<sup>2</sup> Verwijderingsrendement methode voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen: benzotriazol, clarithromycine, carbamazepine, diclofenac, metoprolol, hydrochlorothiazide, mengsel van 4- en 5-methylbenzotriazol, propranolol, sotalol, sulfamethoxazol, trimethoprim<sup>2</sup> Hierbij is het rendement bepaald op basis van het totale effluent (na extra technologie) ten opzichte van het influent van de rwzi

Voor de USONiQ technologie is een nageschakeld zandfilter geen vereiste. Voor bromaatverwijdering is een zandfilter niet toereikend, net zoals andere nageschakelde technologieën (11). Overige metabolieten kunnen mogelijk verwijderd worden als biologische activiteit aanwezig is in de nageschakelde technologie. Er zijn full-scale alternatieven voor deze nageschakelde technologie beschikbaar die goedkoper zijn dan een zandfilter en een lagere CO<sub>2</sub> footprint hebben.

- 2 In elk 24h of 48h debiets- of tijdsproportioneel monster, waarbij rekening is gehouden met verblijftijd van het water in de rioolwaterzuivering. Bij waarden onder de rapportagegrens heeft toepassing van de Volkert-Bakker methode 4 de voorkeur. Deze methode vergt echter veel inspanning om toe te passen. In plaats van deze methode kan ook worden gerekend met een waarde van 50% van de rapportagegrens. Bij discussie of een techniek voldoet aan de matrix en/of bij verschillende uitkomsten is de Volkert Bakker methode leidend.

Hetzelfde geldt mogelijk ook voor de referentiesituatie met ozon en zandfiltratie. Er zal binnen het innovatieprogramma nader gekeken worden naar 'transformatieproducten bij ozon' en tot de resultaten hiervan bekend zijn, is de referentie ozon gevolgd door zandfiltratie en zal voor een eerlijk vergelijk met USONiQ in deze haalbaarheidsstudie ook uitgegaan worden van nageschakelde zandfiltratie.

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

De CO<sub>2</sub>-footprint is berekend conform het model "CO<sub>2</sub>-footprint rwzi's micro's 100.000 i.e., versie 5". De eigenschappen (zoals verbruiken) van de USONiQ technologie zijn gebaseerd op de resultaten uit de pilotonderzoeken die zijn verricht. Opschaling van het systeem is nog niet gerealiseerd, dit zal meer informatie geven over de daadwerkelijke verbruiken en de CO<sub>2</sub>-footprint.

Aangezien de USONiQ technologie vergelijkbaar is met de reguliere ozon technologie, zijn veel parameters gelijk in de CO<sub>2</sub>-footprint berekening. De drie parameters die verschillen met de reguliere ozon behandeling zijn:

- Het zuurstofverbruik. Op basis van de pilot onderzoeken die zijn uitgevoerd met de USONiQ technologie wordt een ozonbesparing en daarmee een zuurstofbesparing van 20% verwacht, dit is meegenomen in het model (zie paragraaf 2.2.4 en 3.2).
- De hoeveelheid gewapend beton. Voor de USONiQ technologie is een beperkte hoeveelheid beton nodig. Bij gebruik van een container opstelling is dit beperkt tot de bodemplaat. Daarom is de benodigde hoeveelheid beton gelijkgesteld aan die voor de PACAS technologie.
- Het energieverbruik. Voor het energieverbruik wordt aangenomen dat het energieverbruik van de USONiQ technologie 7 tot 21% lager is dan reguliere ozontechnologie (zie paragraaf 3.2).

Met het model (versie 5) is voor de USONiQ technologie een CO<sub>2</sub>-footprint berekend van 1.843-1.926 ton CO<sub>2</sub>/jaar, hetgeen lager is dan die van de ozon technologie (1.953 ton CO<sub>2</sub>/jaar, Tabel 4.2), beiden inclusief nageschakeld zandfilter. Uit deze tabel wordt duidelijk dat de actief kool technologieën een hogere jaarlijkse CO<sub>2</sub>-footprint hebben voor een rwzi van 100.000 i.e.

Wanneer de jaarlijkse hoeveelheid behandeld water wordt meegenomen in de beoordeling,

- is de relatieve CO<sub>2</sub>-footprint in g CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> voor USONiQ;
- in de gunstige berekening (zie paragraaf 3.2) met 108 g CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup><sub>behandeld</sub> lager dan alle referentie technologieën;
- bij de conservatieve berekening met 123 g CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup><sub>behandeld</sub> vergelijkbaar met PACAS.

In het conservatieve scenario voor het energieverbruik van USONiQ is deze 4%, en in het gunstige scenario 16% lager dan de referentietechnologie ozon + zandfiltratie. Tabel 4.2 laat zien dat GAK, zowel in ton CO<sub>2</sub>/jaar als in g CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, veruit de hoogste CO<sub>2</sub>-footprint heeft vergeleken met de andere technologieën.

TABEL 4.2 CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT VOOR DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN BIJ VERSCHILLENDE TECHNOLOGIEËN

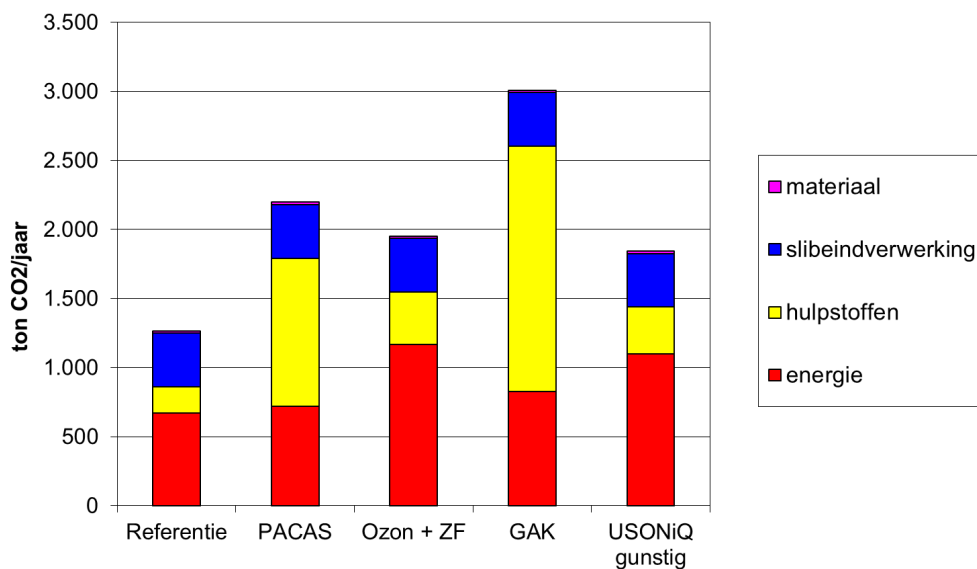
	Eenheid	PACAS	Ozon + zandfiltratie	GAK	USONiQ + zandfilter
CO <sub>2</sub> -footprint totaal	ton CO <sub>2</sub> /jaar	2.198	1.953	3009	1.843-1.926
Behandeld water	m <sup>3</sup> /jaar	7.665.000	5.365.500	5.365.500	5.365.500
CO <sub>2</sub> -footprint relatief	g CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> <sub>behandeld</sub>	122	128	325	108-123

Voor wat betreft de jaarlijkse hoeveelheid behandeld water is voor USONiQ verondersteld dat 70% van het water behandeld wordt. De USONiQ technologie kan ook op de totale stroom worden toegepast. Omdat het grootste gedeelte van de vracht aan micro's al in het behandelde water zit en de extra 30% verdund is door regenwater, zal de investering voor de O<sub>3</sub> generatoren en de US niet of nauwelijks verschillen.

Wel zal er meer pomp energie en een grotere buisreactor nodig zijn. Wanneer de technologie op meer dan 70% van het jaardebiet wordt gerealiseerd, is de verwachting dat de CO<sub>2</sub> footprint per behandelde m<sup>3</sup> lager zal zijn.

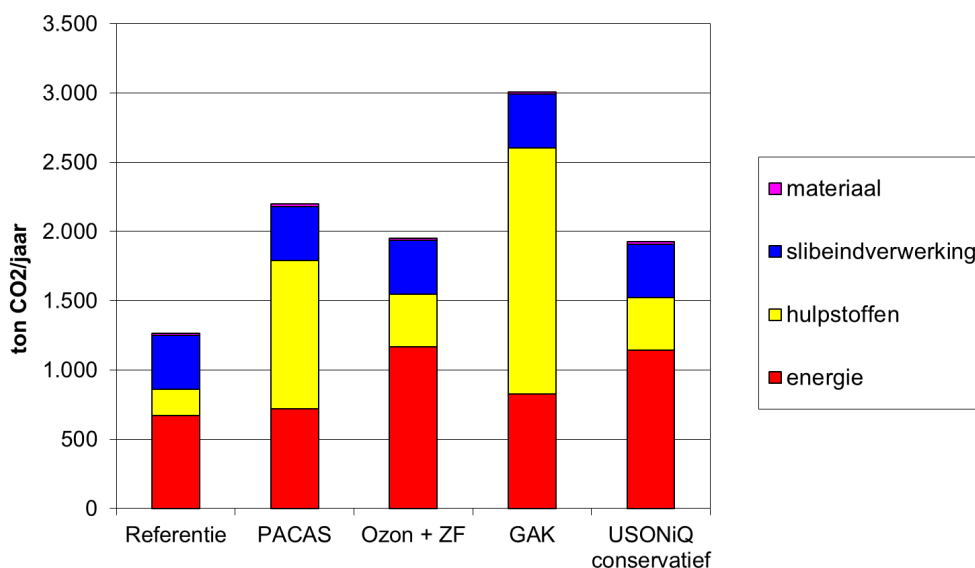
Het model geeft ook inzicht in het aandeel van de slibeindverwerking, energie (elektriciteit, warmte, diesel, aardgas) en het gebruik van materiaal en hulpstoffen aan de CO<sub>2</sub>-footprint per technologie (zie Figuur 41). Hierbij wordt duidelijk dat bij de oxidatieve technologieën energie de grootste bijdrage levert aan de CO<sub>2</sub>-footprint. Bij de actief kool technologieën heeft het gebruik van hulpstoffen het grootste aandeel in de CO<sub>2</sub>-footprint.

Wanneer wordt uitgegaan van een energietransitie naar duurzame energie over de komende 10 jaar, dan scoren de oxidatieve technologieën relatief goed op basis van duurzaamheid, dit is toegelicht in STOWA rapport 2017-36.

FIGUUR 4.1 CO<sub>2</sub> -FOOTPRINT VAN DE GEHELE RWZI INCLUSIEF DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN, BIJ 'GUNSTIG' SCENARIO VOOR HET ENERGIEVERBRUIK VAN USONIQ

FIGUUR 4.2

CO<sub>2</sub> -FOOTPRINT VAN DE GEHELE RWZI INCLUSIEF DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN, BIJ 'CONSERVATIEF' SCENARIO VOOR HET ENERGIEVERBRUIK VAN USONIQ



### 4.3 KOSTEN

De leverancier heeft een globale kostenraming opgesteld. Hierbij is uitgegaan van de ervaringen en de situatie op pilot schaal, welke vervolgens zijn geëxtrapoleerd naar een full-scale toepassing voor een rwzi van 100.000 i.e. à 150 g TZV. Omdat er geen standaard zandfiltratie aanwezig is na USONIq, is dit niet meegenomen in de kostenberekening voor USONIq. Om toch een juiste vergelijking met de referentiesituatie te kunnen maken, is ervan uitgegaan dat een zandfilter na USONIq hetzelfde kost als na een reguliere ozon installatie, zie kader in paragraaf 4.1.

Voor de investering is uitgegaan van een installatie van 1.040 m<sup>3</sup>/h en een ozon dosering van 0,55 mg O<sub>3</sub>/mg DOC.

TABEL 4.3

RAMING GLOBALE INVESTERINGSKOSTEN USONIq TECHNOLOGIE VOOR EEN RWZI VAN 100.000 I.E. (EXCLUSIEF ZANDFILTER)

	USONIq
Civiel	€ 50.000,=
Mechanisch	€ 1.900.000,=
Electrisch	€ 100.000,=
Aannemerskosten (25% van C,M,E)	€ 512.500,=
Bouwkosten	€ 2.562.500,=
Investering (1,8x bouwkosten)	€ 4.612.500,=

Vervolgens zijn de jaarlijkse kosten berekend, zie Tabel 4.4. Hiervoor is gebruik gemaakt van de kengetallen gegeven in de richtlijn voor de haalbaarheidsstudie. De jaarlijkse kosten komen neer op € 393.300,00 per jaar en € 0,07 per m<sup>3</sup> behandeld water (exclusief zandfilter). Dit is hetzelfde als de referentiesituatie met ozon behandeling, zie Tabel 4.5. Toevoeging van zandfiltratie leidt tot een stijging van de jaarlijkse kosten met € 0,10/m<sup>3</sup>.



TABEL 4.4 RAMING GLOBALE JAARLIJKSE KOSTEN USONIQ TECHNOLOGIE VOOR RWZI VAN 100.000 I.E.

	Eenheid	USONiQ	Opmerking
Vaste jaarlijkse kosten			
Kapitaalslasten	€/j	227.000	
Variabele jaarlijkse kosten	€/j		
Onderhoud	€/j	60.300	
Personeel	€/j	10.000	0,2 FTE
Energie	€/j	86.100	861.163 kWh/jr
Chemicalien en hulpstoffen (O <sub>2</sub> )	€/j	9.900	49.577 kg O <sub>2</sub> /jr
Slibverwerking	€/j	0	
Spoelwaterproductie	€/j	0	
Waswaterverwerking	€/j	0	
Totaal variabele kosten	€/j	166.300	
Totaal jaarlijkse kosten	€/j	393.300	
	€/m <sup>3</sup>	0,07	

TABEL 4.5 VERGELIJKING JAARLIJKSE KOSTEN USONIQ TECHNOLOGIE MET OZON

	Eenheid	Jaarlijkse kosten
<i>Referentie</i>		
Ozon + ZF	€/m <sup>3</sup>	0,17
Ozon zonder ZF	€/m <sup>3</sup>	0,07
USONiQ	€/m <sup>3</sup>	0,07

Voor de kostenraming is uitgegaan van de uitgangspunten zoals gesteld in de richtlijn voor de haalbaarheidsstudie. Echter zijn voor de berekening van de referentie technologieën op sommige punten andere uitgangspunten gebruikt, of is de opbouw van de investeringen niet na te gaan, waardoor het niet per definitie een goede vergelijking is. Voorbeelden hiervan zijn de factor 1,8, algemene kosten van 25%, rente van 4%.

#### 4.4 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN GIDSSTOFFEN

De onderzoeken die zijn uitgevoerd met de USONiQ technologie omvatten niet alle gidsstoffen die zijn gedefinieerd door het ministerie Infrastructuur en Waterstaat. Zes 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 ozon behandeling (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 verwijderingsrendement ongeveer 85-90% is, ten opzichte van 80-85% voor de referentie met ozon.

De installatie zoals beschreven in de behandelde onderzoeken in dit rapport, zijn geoptimaliseerd voor bepaalde omstandigheden. Afhankelijk van de richtlijnen en/of wensen zou geschoven kunnen worden in de procescondities.

Het moeilijk te verwijderen röntgencontrastmiddel iopromide vereist bijvoorbeeld een hoge ozon concentratie en energieverbruik voor vergaande verwijdering.

Wanneer een verwijderingsrendement gelijk aan wat nu met reguliere ozon behandeling kan worden bereikt voldoende zou zijn, dan zal dat met de USONiQ technologie naar verwachting resulteren in een nog lagere ozon dosering en energieverbruik. Dit zou een interessant

onderwerp zijn voor verder onderzoek, het doel van dit onderzoek zou zijn om te bepalen of de USONiQ technologie daadwerkelijk minder ozon doseert dan de reguliere ozon behandeling met een verwijderingsrendement van 80-85%.

#### 4.5 EFFECT OP ECOTOXICOLOGISCHE RISICO'S EN BIJPRODUCTEN

In het onderzoek op de Groote Lucht (STOWA 2018-46) is geconcludeerd dat door ozonisatie de milieurisico's van het rwzi effluent substantieel (met meer dan de helft) afnemen. Verder is geconcludeerd dat de zandfilters geen bijdrage leveren aan het verder verminderen van deze milieurisico's.

Voor de USONiQ technologie zijn ecotoxicologische metingen niet uitgevoerd. Gezien de vergelijkbaarheid met reguliere ozontechnologie door het gebruik van ozon en de lagere ozondosering bij USONiQ, is de verwachting dat de milieurisico's vergelijkbaar (of lager) zijn door de nieuwe technologie. Dit betekent dat minimaal 50% verlaging wordt verwacht (t.o.v. de uitgangssituatie zonder de vergaande zuivering).

In de USONiQ pilot onderzoeken naar desinfectie is aangetoond dat de combinatie van ozon en ultrasound resulteert in meer beschadigde bacteriën en daarmee een hogere desinfectiegraad dan met alleen ozon toevoeging. Daarnaast zou de USONiQ technologie een positief effect kunnen hebben op de verwijdering van antibioticaresistentie. Bacteriën worden meer beschadigd met de gecombineerde technologie doordat ultrasone eenheden enzym afbraak versterken en celmembranen meer beschadigen dan reguliere ozon behandeling (3).

In alle gevallen moet bij oxidatietechnieken rekening worden gehouden met de vorming van eventuele schadelijke metabolieten. Voor ozonoxidatietechnieken blijft de bromaat productie een belangrijk aandachtspunt, al blijken onderzoeken aan te tonen dat bij matige ozon doseringen de bromaatvorming (binnen bepaalde grenzen) beheersbaar is (12). Uit de literatuur kan worden geconcludeerd dat bromaatvorming afhankelijk is van de concentratie bromide in de toeloop naar de ozon installatie en de ozon dosering. Eventuele nageschakelde technologieën (zoals zandfiltratie, GAK ed.) hebben geen invloed op de bromaatconcentratie in het effluent (11).

#### 4.6 CONCLUSIES CRITERIA

In Tabel 4.6 is de nieuwe ozon technologie USONiQ toegevoegd aan de referenties en hun waarde voor de drie criteria uit Tabel 4.1. Hieruit is af te leiden dat USONiQ qua CO<sub>2</sub> footprint en verwijderingsrendement beter scoort dan de referentietechnologie Ozon + ZF, tegen vergelijkbare kosten. Ook qua ecotoxicologische effecten scoort de gecombineerde technologie gelijk of beter dan de referentie.

TABEL 4.6 CRITERIA EN HUN WAARDEN VOOR DE REFERENTIE TECHNOLOGIEËN

	Eenheid	PACAS	Ozon + zandfilter	GAK	USONiQ + ZF
1. CO2 footprint	g CO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup> <sub>behandeld</sub>	122	128	325	108-123
2. Kosten	€/m <sup>3</sup> <sub>behandeld</sub>	0,05	0,17	0,26	0,17*
3. Verwijderingsrendement gidsstoffen Min I&W	%**	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

Naast de positieve uitkomsten op de gestelde criteria, zijn de volgende voordelen van de technologie te noemen:

- kleinere ruimtelijke footprint;
- lagere bromaatvorming dan reguliere ozon;
- desinfectie;
- mogelijk positief effect op verwijdering antibioticaresistentie.

#### 4.7 CONCLUSIE VERVOLG MET PILOTINSTALLATIE

Op basis van deze vergelijking is het van waarde om de technologie nader te onderzoeken in een pilotonderzoek en heeft de BC een 'go' gegeven om dit verder uit te gaan werken. USONiQ heeft een 20 voet en 40 voet containeropstelling voor deze toepassing beschikbaar.

Tijdens dit pilotonderzoek kan ervoor gekozen worden om de te behalen rendementen op de gidsstoffen te variëren.

Hierbij is ook zeer interessant om (indien mogelijk) de impact van de technologie op antibioticaresistente bacteriën mee te nemen. Gezien de gebruikte technologieën, zou deze een positief effect kunnen hebben op de verwijdering van antibioticaresistentie.

FIGUUR 4.3 40 VOET CONTAINEROPSTELLING USONIQ (BUITENZIJDJE)



FIGUUR 4.4: 40 VOET CONTAINEROPSTELLING USONIQ (BINNENZIJDJE)



# 5

## GEBRUIKTE LITERATUUR

1. **H. Horn, N. Schwarzenbeck.** *Möglichkeiten des Einsatzes einer Ultraschall-Ozonierung im Rahmen des Sonderförderprogramms an der Ilz.* sl : Technische Universität München, 2007.
2. **NRW, Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.** *Fachbrief Bromat.* 2018.
3. *Combined effect of ultrasound and ozone on bacteria in water.* **A.M. Al-Hashimi, T.J. Mason, M. Joyce.** sl : Environmental Science and technology, 2015, Vol. 2015.
4. *Ozone and cavitation for water disinfection.* **K.K. Jyoti, A.B. Pandit.** sl : Biochemical Engineering journal, 2004, Vol. 2004.
5. *Physicochemical aspects of disinfection of water by means of ultrasound and ozone.* **Dahl, E.** sl : Water Research, 1976, Vol. 1976.
6. *Water disinfection using the novel approach of ozone and a liquid whiste reactor.* **R. Chand, D.H. Bremmer, K.C. Namkung, P.J. Collier, P.R. Gogate.** 35, sl : Biochemical Engineering Journal, 2007.
7. **Mühlen, M. zur.** *Kombinierte Ozon- und Ultraschallbehandlung von biologisch gereinigten Abwässern zum Abbau von Carbamazepin.* sl : Der Technischen Universität München, 2008.
8. **Oliveri, C.** *Project Micropollutants LA.* USA : USS GmbH, 2008.
9. **Mennerich, A.** *Stellungnahme zu orientierenden Versuchen zur Elimination von Mikroschadstoffen aus dem Ablauf der Kläranlage Wolfsburg.* Suderburg : Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, 2012.
10. **J.F.Meier, U.Austermann-Haun, S.Kuhlmann, K.Alt.** *Pilotprojekt zur Mikroschadstoffelimination mittels Ozonung auf der ZKA Detmold.* Stadt Detmold : Hydro-Ingenieure, Hochschule Ostwestfalen Lippe, 2014.
11. **EAWAG.** *Biologische Nachbehandlung von kommunalen Abwasser nach Ozonung - ReTREAT.* 2017.
12. **A. van Nieuwenhuijzen, B. Bloks, A. Essed, C. de Jong.** *Verkenning technologische mogelijkheden voor verwijdering van geneesmiddelen uit afvalwater.* sl : STOWA. 2017-36.
13. *Bromid im Abwasser: Bromatbildung bei der Ozonung-Einschätzung der zukünftigen Situation.* **F. Solterman, C. Abegglen, C. Götz, S. Zimmermann-Steffens, U. von Gunten.** sl : Aqua & Gas , 2018, Vol. 10.
14. *Erwartungen an die Auswirkungen einer gro technischen Abwasserozonung basierend auf Pilotversuchen.* **Brückner.** Presentatie op RWZI Aachen-Soers : sn, 2018.
15. *Options and limitations for bromate control during ozonation of wastewater.* **F. Soltermann, C. Abegglen, M. Tschui, S. Stahel, U. Von Gunten.** 116, sl : Water Research, 2017.

## BIJLAGE 1

## RESULTATEN UIT PILOTONDERZOEK

TABEL 5.1 VERWIJDERINGSRENDEMENT MET DE USONIQ TECHNOLOGIE BIJ VERSCHILLENDE CONCENTRATIES OZON EN VERSCHILLENDE GIDSSTOFFEN IN HET PILOTONDERZOEK IN WOLFSBURG MET USONIQ (9), HET GEMIDDELDE DOC GEHALTE WAS 11MG/L

Gidsstof	Ozon concentratie (mgO <sub>3</sub> /mgDOC)	Begin concentratie (ng/L)	Eind concentratie (ng/L)	Verwijderings- rendement (%)
Citalopram	0,15	74,5	91,4	-
	0,28		5,0	93,3
	0,43		5,0	93,3
Diclofenac	0,15	3190,0	5,0	99,8
	0,28		5,0	99,8
Furosemide	0,15	7560,0	5,0	99,9
	0,28		5,0	99,9
Hydrochloor-thiazide	0,37	1400,0	5,0	99,6
	0,75		5,0	99,6
Sulfamethoxazol	0,37	289,0	5,0	98,3
	0,75		5,0	98,3
Metoprolol	0,15	749,0	858,0	-
	0,28		518,0	30,8
	0,43		320,0	57,3
	0,56		5,0	99,3
1-H-Benzotriazool	0,71	13,0	5,0	99,3
	0,15		12,0	7,7
	0,28		9,9	23,8
	0,43		5,8	55,4
	0,56		3,0	76,9
	0,71	1,3	90	
	0,85	0,0	100	