

## Medicijnresten te lijf met (geavanceerde) oxidatie

*Bram Delfos (Delfos Ventures), Ruud van der Neut (PWN), Maaike Hoekstra (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier), Bram Martijn (PWN Technologies)*

**Met het traject Ge(O)zond Water worden organische microverontreinigingen, met name medicijnresten, door oxidatie verwijderd uit effluent van RWZI Wervershoof. Onderzoek op laboratorium- en pilotschaal heeft uitgewezen dat ozonisatie van de effluentstroom toereikend is voor afbraak van de medicijnresten conform de beoogde normering. Tevens blijkt geavanceerde oxidatie, een combinatie van ozon en waterstofperoxide, verdergaande zuivering te realiseren. Hierbij blijft de vorming van bromaat ruim binnen de normen. Gesteund door deze resultaten bereidt Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier een demoschaal-investering voor op de RWZI Wervershoof.**

Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) en drinkwaterbedrijf PWN, met dochteronderneming PWN Technologies als technologieontwikkelaar, onderzoeken samen een geavanceerde behandelingsstap voor een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) met als doel te komen tot hoogwaardig hergebruik. PWN streeft naar schonere bronnen en HHNK wil gezond en voldoende schoon oppervlaktewater verzorgen. De inspanning is primair gericht op de RWZI in Wervershoof, waarvan het effluent indirect wordt geloosd in het IJsselmeer nabij de waterinlaat voor de productie van drinkwater in Andijk. De RWZI in Wervershoof is geïdentificeerd als prioriteit voor het toepassen van nazuivering door de relatief grote bijdrage van medicijnresten in het effluent aan het milieu [1].

Medicijnresten en andere microverontreinigingen vormen een steeds grotere uitdaging voor rioolwaterzuiveringsinstallaties. In Nederland komt jaarlijks 140 ton farmaceutische producten en 30 ton röntgencontrastvloeistoffen het milieu binnen via onze rioleringen [2], een hoeveelheid die naar verwachting alleen maar zal toenemen. Deze belasting heeft niet alleen negatieve gevolgen voor ecologie en mens, maar beperkt ook de opties voor hoogwaardig hergebruik van gezuiverd effluent. Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (I&W) ontwikkelt beleid om het gehalte farmaceutische stoffen in afvalwater te verminderen, om zo de kwaliteit van het oppervlaktewater te beschermen. De gekozen behandelingsstap moet in staat zijn om van 7 van de 11 'gidsstoffen' voor 70 procent te verwijderen [3]. Dit is de zogeheten bijdrageregeling. Dit beleid in ontwikkeling is op dezelfde manier gestructureerd als het kader dat al in Zwitserland wordt geïmplementeerd en in Duitsland wordt overwogen.

Drie hoofdmethoden om geneesmiddelen en andere organische microverontreinigingen uit effluent te verwijderen zijn: filtratie via omgekeerde osmose (RO); adsorptie via actieve kool (in poeder- of korrelvorm); en afbraak via UV of oxidatie (ozonisatie en geavanceerde oxidatie). Deze zuiveringsstappen kunnen worden gevolgd door een zandfilter. In Zwitserland en Duitsland zijn verschillende van deze geavanceerde behandelingsstappen op industriële schaal geïmplementeerd. Adsorptie via actieve kool en oxidatie via ozonisatie zijn de technologieën die hiervoor het meest worden toegepast [4].

Deze studie doet verder onderzoek naar (geavanceerde) oxidatie, aangezien dit de medicijnresten afbreekt zonder dat daarbij een afvalstroom wordt gevormd. Afbraak van medicijnresten door

ozonisatie is onder anderen onderzocht door van Gunten 2018 [5]. Bij de ozonisatie van bromidehoudend water ontstaat het verdacht carcinogene bijproduct bromaat. Er zijn strategieën ontwikkeld om bromaatvorming te remmen, waaronder toevoeging van waterstofperoxide. Afbraak van organische microverontreinigingen wordt beïnvloed door de samenstelling van de waterfase (ook wel de matrix genoemd), waarin de medicijnresten zich bevinden.

Dit leidt tot de onderzochte hypothese dat ozonisatie en geavanceerde oxidatie met ozon/waterstofperoxide medicijnresten kunnen afbreken in overeenstemming met de bijdrageregeling, waarbij een lage ozondosering of toevoeging van waterstofperoxide voorkomt dat er schadelijke bromaatconcentraties optreden, voor zowel effluent- als drinkwatermatrices. In het vervolg van dit artikel wordt met geavanceerde oxidatie steeds ozon/waterstofperoxide-geavanceerde oxidatie bedoeld.

## **Methode**

Voor het eigenlijke onderzoek zijn de onderstaande materialen en methoden van toepassing.

### ***Experimentele opstelling***

Voor de experimentele opstelling is een systeem op laboratoriumschaal gebruikt, dat bestaat uit een verticale cilindrische glazen kolom (netto 6 liter inhoud) met een gasdispersieplaat in de bodem. Het water met opgeloste medicijnresten is de vloeistoffase in de kolom, terwijl de ozon als gas door de vloeibare fase wordt geborreld. Deze experimentele opzet is ook in eerder onderzoek door PWN Technologies gebruikt en is primair gekozen omdat het industriële systemen nabootst die op de markt beschikbaar zijn. Voor de experimenten met geavanceerde oxidatieregimes wordt het waterstofperoxide voorafgaand aan de ozondoorleiding toegevoegd aan de vloeistoffase in de kolom.

### ***Ozoneringsregimes***

Om de ozonopname per ozoneringsregime te bepalen, is een initieel experiment uitgevoerd om de omzetting van bromide naar bromaat als functie van ozonopname te bepalen. Dit experiment bestaat uit ozonisatie van effluent, waar bij verschillende niveaus van ozonisatie monsters van het behandelde effluent zijn genomen voor bromaatanalyse. Het ozoniseringsregime met de ozonopname die resulteert in 30µg per liter bromaat, de limiet voor Nederlands natuurlijk oppervlaktewater [6], is bepaald ('regime 3'). Hier zijn drie ozonisatieregimes van afgeleid, twee lagere ('regime 1 en 2') en een hoger regime ('regime 4'). Voor de geavanceerde oxidatieregimes worden de condities van de twee hoogste ozonregimes gekopieerd, met de waterstofperoxide toegevoegd in de vloeistoffase ('regime 5 en 6'). Tot slot is het niet behandelde blanco monster ook geanalyseerd als referentie ('regime 0'). Per experiment is het ozonverbruik voorspeld en achteraf exact bepaald op basis van meetresultaten. Het ozonverbruik is voor elk regime in de tabel met resultaten opgenomen. Het waterstofperoxide voor de geavanceerde oxidatie wordt in een 4:1-gewichtsverhouding aan de verbruikte ozon toegevoegd zoals bepaald bij de ozonisatie-experimenten.

### ***Selectie van geneesmiddelen***

In het onderzoek zijn verschillende geneesmiddelen toegevoegd om de effecten beter te kunnen waarnemen ('spike'). De selectie van geneesmiddelen voor dit onderzoeksproject volgt verschillende criteria. Ten eerste moeten ze voorkomen in de RWZI van Wervershoof. Ten tweede zijn alle

doelstoffen die in overheidspublicaties worden genoemd om de kwaliteit van effluent te meten ('gidsstoffen') opgenomen. Ten derde wordt rekening gehouden met voldoende spreiding in verwachte respons op de oxidatiemethode van ozonisatie. En ten slotte wordt voldoende spreiding in functioneel gebruik meegewogen (diversiteit van medicijnen). Deze criteria hebben geleid tot de selectie van 16 verbindingen zoals vermeld in tabel 1. Atrazine is opgenomen als referentiestof voor de degradatie-experimenten.

Met betrekking tot de reactiviteit van ozon met de verschillende geneesmiddelen kunnen drie groepen worden onderscheiden: Snelle reacties met snelheden variërend van  $10^5$ - $10^6$  Ms; een middengroep met snelheden variërend van  $10^1$ - $10^2$  Ms; en langzame reacties met snelheden variërend van 0-1 Ms. Deze groepen zijn met kleurcodes aangegeven in tabel 1, onder k-Ozone. Zoals duidelijk is reageren alle verbindingen zeer snel met de hydroxylradicalen (ook aanwezig in de experimenten door de tevens optredende reactie van ozon met water), met snelheden variërend van  $10^9$ - $10^{10}$  Ms. De reactieconstanten k zijn afkomstig uit de literatuur, met de bronvermeldingen weergegeven in het achterliggende afstudeerverslag [7].

Tabel 1. Medicijnresten die in dit onderzoek betrokken zijn

Naam	Functie	Formule	Moleculair gewicht [g/mol]	k-Ozon [1/Ms]	k-Hydroxyl [1/Ms]	Gidsstof?
Diclofenac	NSAID (pijnstiller)	$C_{14}H_{11}Cl_2NO_2$	296,15	1,00E+06	8,38E+09	Ja
Metoprolol	Bètablokker	$C_{15}H_{25}N_3O_3$	267,36	1,00E+06	?	Ja
Trimethoprim	Antibioticum	$C_{14}H_{18}N_4O_3$	290,32	4,30E+05	6,90E+09	Ja
Sulfamethoxazool	Antibioticum	$C_{10}H_{11}N_3O_3S_1$	253,28	4,15E+05	5,82E+09	Ja
Carbamazepine	Anti-epilepticum	$C_{15}H_{12}N_2O$	236,27	3,00E+05	8,02E+09	Ja
Sotalol	Bètablokker	$C_{12}H_{20}N_2O_3S$	272,36	1,30E+05	1,00E+10	Ja
Propranolol	Bètablokker	$C_{16}H_{21}NO_2$	259,34	1,00E+05	1,00E+10	Ja
Hydrochloorthiazide	Diureticum	$C_7H_8Cl_1N_3O_4S_2$	297,74	1,00E+05	5,70E+09	Ja
Clarithromycin	Antibioticum	$C_{38}H_{69}N_4O_{13}$	747,95	?	?	Ja
Benzotriazool	Anticorrosiemiddel	$C_6H_5N_3$	119,12	3,64E+01	1,02E+10	Ja
4- Methylbenzotriazool	Nitrificatieremmer	$C_7H_7N_3$	133,15	3,64E+01	1,02E+10	Ja
5- Methylbenzotriazool	Nitrificatieremmer	$C_7H_7N_3$	133,15	3,64E+01	1,02E+10	Ja
Ibuprofen	NSAID (pijnstiller)	$C_{13}H_{18}O_2$	206,30	9,60E+00	7,04E+09	
17B Estradiol (E2)	Hormoon	$C_{18}H_{24}O_2$	272,38	?	9,80E+09	
Iopromide	Röntgencontrastmiddel	$C_{18}H_{24}I_3N_3O_8$	791,11	<0,8	3,30E+09	
Metformine	Antidiabeticum	$C_4H_11N_5$	129,16	?	1,00E+07	
Atrazine *	Herbicide	$C_8H_{14}ClN_5$	215,68	6,00E+00	3,00E+09	

## Resultaten

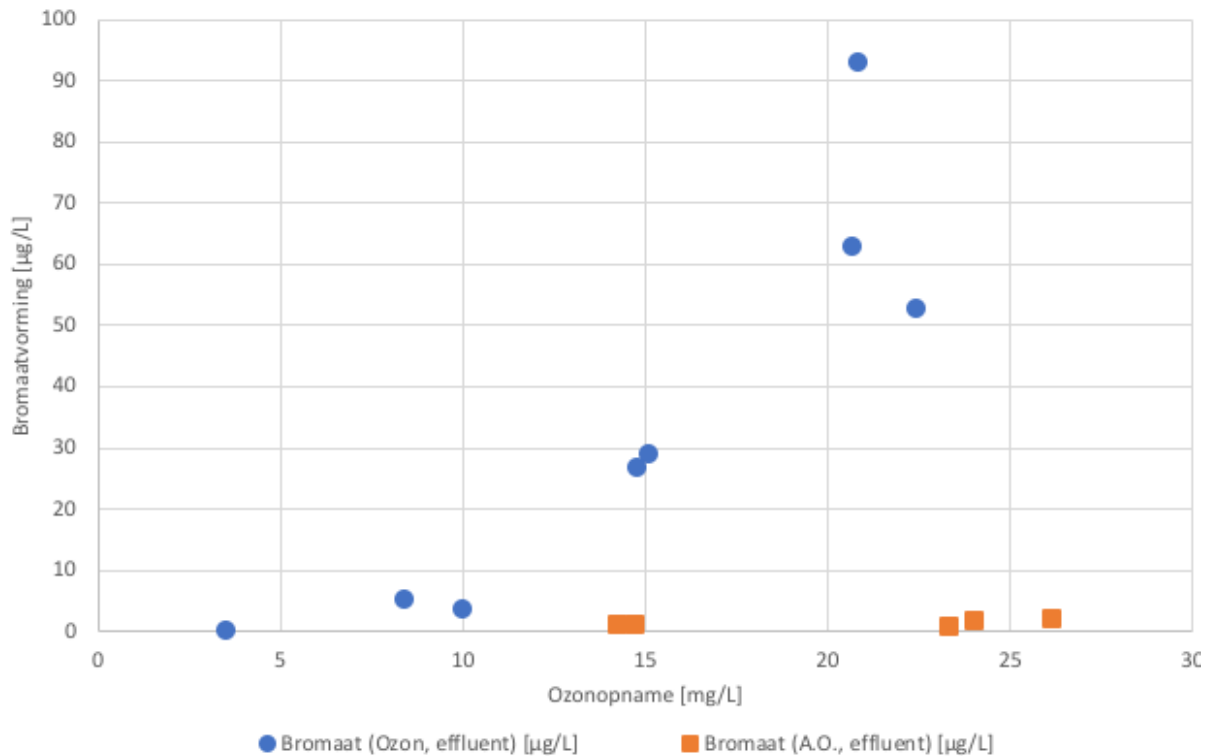
De 16 geselecteerde geneesmiddelen in het effluent zijn behandeld met vier verschillende ozonisatieregimes. Alle geneesmiddelen braken goed af met ozonisatie. Aan de bijdrageregeling van I&W in ontwikkeling wordt voldaan, omdat 7 van de 11 doelverbindingen voor ten minste 70% afbreken bij een ozonopname van 3,05 mg/L of 0,36 mg ozon/mg opgeloste organische stof (DOC) en een bromaatvorming van 0,23µg/L (zie regime 1 uit onderstaande tabel 2).

Tabel 2. Afbraak van medicijnresten bij verschillende regimes voor ozonisatie en geavanceerde oxidatie, relatief ten opzichte van het gespikete effluent

Stof	Eenheid	Blanco	Ozonisatie				Geavanceerde oxidatie	
		Regime 0	Regime 1	Regime 2	Regime 3	Regime 4	Regime 5	Regime 6
Diclofenac	[ng/L]	1988	94%	100%	100%	100%	100%	100%
Metoprolol	[ng/L]	2303	38%	99%	100%	100%	99%	100%
Trimethoprim	[ng/L]	1738	84%	100%	100%	100%	100%	100%
Sulfamethoxazool	[ng/L]	977	90%	100%	100%	100%	100%	100%
Carbamazepine	[ng/L]	1546	86%	100%	100%	100%	100%	100%
Sotalol	[ng/L]	2813	80%	100%	100%	100%	100%	100%
Propranolol	[ng/L]	1701	78%	100%	100%	100%	100%	100%
Hydrochloorthiazide	[ng/L]	10215	26%	100%	100%	100%	98%	100%
Clarithromycin	[ng/L]	5120	75%	99%	99%	99%	100%	100%
Benzotriazool	[µg/L]	21	39%	86%	100%	100%	99%	100%
4-Methylbenzotriazool	[µg/L]	9	36%	98%	100%	100%	99%	100%
5-Methylbenzotriazool	[µg/L]	8	38%	96%	100%	100%	99%	100%
Ibuprofen	[ng/L]	39971	20%	90%	98%	100%	99%	100%
17B Estradiol (E2)	[pg EEQ/L]	9264	NVT	95%	100%	100%	97%	98%
Iopromide	[ng/L]	1453	4%	51%	84%	96%	88%	98%
Metformine	[ng/L]	2486	16%	-3%	53%	70%	70%	73%
Ozonopname	[mg/L]	-	3,05	6,98	13,19	18,25	12,96	22,68
DOC	[mgC/L]	8,65	8,44	8,72	8,70	8,49	8,03	8,23
Ozoneopname/DOC	[mg O <sub>3</sub> /mg DOC]	-	0,36	0,80	1,52	2,15	1,61	2,76
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	[mg O <sub>3</sub> /mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ]	-	-	-	-	-	1:4	1:4

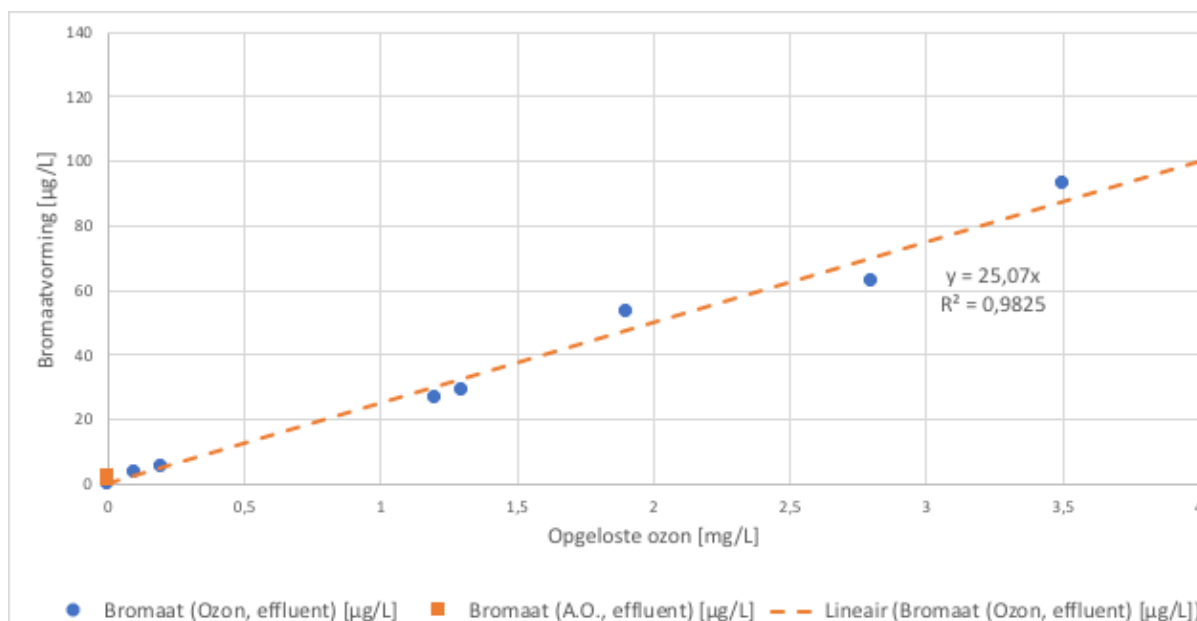
Ozonisatie is in het ozonopnamebereik van 13-25 mg/L vergelijkbaar met geavanceerde oxidatie en vertoont zeer vergelijkbare afbraak voor de 16 geneesmiddelen (vergelijk in tabel 2 regime 3 met 5 en regime 4 met 6). Wat belangrijker is, is dat geavanceerde oxidatie de vorming van bromaat vrijwel voorkomt. Bromaatvorming bereikt een maximum van 2,11 µg/L bij een ozonopname van 24,98 mg/L of 2,91 mg ozon/mg DOC met 83 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ruim binnen de Nederlandse grenzen voor lozing op natuurlijk oppervlaktewater (zie afbeelding 1). Het bromidegehalte in het effluent ligt rond de 300 µg/L.

Bij een opname van ozon van 12 mg/L of hoger in effluent overschrijdt de bromaatvorming 30 µg/L, de Nederlandse limiet voor bromaat in natuurlijk openbaar water (afbeelding 1). Bij geavanceerde oxidatie wordt de vorming van bromaat sterk geremd. Waterstofperoxide in een massaverhouding van 4:1 tot de opgenomen ozon in geavanceerde oxidatie remt bromaatvorming tot maximaal 2 µg/L in effluent, bij een ozonopname van 20 mg/L en met 83 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Onder deze geavanceerde oxidatieomstandigheden is de afbraak van medicijnresten vergelijkbaar met of hoger dan bij vergelijkbare ozonisatieomstandigheden. Let wel: in de experimentele opzet wordt de opname van ozon voorspeld, maar alleen achteraf exact bepaald. Dat verklaart dat de verhouding van de waterstofperoxideconcentratie (83 mg/L) ten opzichte van de opname van ozon (20 mg/L) in dit experiment niet exact 4:1 is.



Afbeelding 1. Bromaatvorming als functie van ozonopname bij ozonisatie en geavanceerde oxidatie

Uit het bepalen van bromaatvorming als functie van opgelost ozon in de vloeistoffase blijkt er een lineair verband, tenminste tot 3,5 mg/L (zie afbeelding 2). Bij de gehanteerde doseringen in de geavanceerde-oxidatie-experimenten lost ozon in het grootste deel van de vloeistoffase in het geheel niet in op. De ozon reageert direct en volledig bij de overgang van de gasbel naar de vloeistoffase. De reactie van ozon vindt grotendeels plaats met de base  $\text{HO}_2^-$  van het in de waterfase toegevoegde waterstofperoxide [7]. Hierbij worden via een aantal tussenstappen hydroxylradicalen gevormd. Door toevoeging van het waterstofperoxide krijgt de ozon daardoor geen gelegenheid zich door de vloeistoffase te verspreiden. De bromaatvorming uit bromide treedt duidelijk alleen op als er ozon in oplossing is. De afbraak van de medicijnresten vindt in dit geval wel plaats, vrijwel uitsluitend door de gevormde hydroxylradicalen.



Afbeelding 2. Bromaatvorming als functie van opgeloste ozon bij de ozonisatie- en geavanceerde-oxidatie-experimenten

De experimenten zijn ook met bioassays geanalyseerd op toxiciteitseffecten. Uit de resultaten voor hormonen, genotoxiciteit en oxidatieve stress voor en na ozonisatie en geavanceerde oxidatie blijkt een algehele afname van toxiciteitseffecten bij zowel ozonisatie als geavanceerde oxidatie (tabel 3). Dit houdt in dat de algehele toxiciteitseffecten aanzienlijk worden verminderd door de afbraak van de medicijnresten. De bij de afbraak gevormde transformatieproducten dragen minder bij aan de toxiciteitseffecten en/of worden zelf weer verder afgebroken tot verbindingen met nog minder respons. Voor atrazine zijn de transformatieproducten in meer detail onderzocht, inclusief identificatie van deze producten (hier niet verder besproken). De bioassays konden geen betrouwbaar onderscheid maken tussen de verschillende regimes van ozonisatie en geavanceerde oxidatie die werden gebruikt.

Tabel 3. Impact van ozonisatie en geavanceerde oxidatie in effluentmatrix op bioactiviteit, ten opzichte van het onbehandelde effluent ('Blank')

Bioassay	Karakterisatie	Eenheid	Blanco	Ozonisatie	Geavanceerde oxidatie
Act 17B Estradiol (E2)	Oestrogene hormonen	[pg/EEQ/L]	654	63	<34
Act flutamide	Anti-androgene hormonen	[ng FEQ/L]	7008	<1400	<1400
Act dexamethason	Glucocorticoïden	[ng DEQ/L]	138	37	<4,3
Act curcumine	Oxidatieve stress	[µg CEQ/L]	129	<100	<100
Act actinomycine	Genotoxiciteitsrespons	[ng AEQ/L]	<10	25	<10
Ozonopname		[mg/L]	0	18,43	24,98
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		[mg O <sub>3</sub> /mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ]	-	-	1:4

De invloed van de samenstelling van de matrix is bestudeerd door vergelijking van drinkwater als matrix met effluent van een RWZI. De aanwezigheid van organisch materiaal als DOC lijkt de sleutelfactor die de afbraak van geneesmiddelen vermindert. Dit vangt ozon en hydroxylradicalen af, waardoor de efficiëntie van de afbraak van geneesmiddelen afneemt.

Dit onderzoeksproject toont op laboratoriumschaal aan dat ozonisatie een geschikte methode is voor RWZI's om farmaceutische afbraakdoelen te bereiken. Als bijvoorbeeld voor hergebruik van effluent, hogere niveaus van afbraak van organische microverontreinigingen zoals medicijnen vereist zijn, is geavanceerde oxidatie een geschikt proces dat zowel geneesmiddelen afbreekt als bromaatvorming beperkt. Zowel ozonisatie als geavanceerde oxidatie verminderen effectief de toxiciteitseffecten in het effluent.

Het wordt daarom aanbevolen om dit onderzoek uit te breiden tot verschillende RWZI's, effluentkenmerken en mogelijkheden voor hergebruik.

### **Conclusie**

Het laboratoriumonderzoek heeft aangetoond dat beperkte ozonbehandeling van effluent van RWZI Wervershoof de geselecteerde medicijnresten afdoende afbreekt, zonder overschrijding van de bromaatnormen. Verder is bevestigd dat met een hogere dosering ozon veel verdere verwijdering bereikt wordt. Er is aangetoond dat het bromaatgehalte bij toepassing van ozon/waterstofperoxide-geavanceerde oxidatie ruim binnen de normen blijft, ook bij hoge ozondosering en diepere zuivering. Hiermee is bevestigd dat nazuivering met ozon effectief is als methode voor nazuivering van RWZI-effluent, en dat met geavanceerde oxidatie een diepere zuivering bereikt kan worden zonder de normen voor bromaatgehalte te overschrijden.

### **Tot slot**

Het beschreven onderzoek is uitgevoerd door Bram Delfos als afstudeeronderzoek voor de masteropleiding Water Technology aan Wetsus/Wageningen University & Research [7]. De resultaten zijn tevens gepresenteerd op het wereldcongres van de International Ozone Association (IOA) in oktober 2019. Naast het bovenstaande is nader onderzoek verricht naar de transformatieproducten en het vaststellen van de relatie tussen medicijnrestenafbraak en UV-extinctie.

#### **Ge(O)zond Water**

'Hoe houden we ons oppervlakte- en drinkwater in de toekomst schoon en gezond?' Met die vraag zijn drinkwaterbedrijf PWN en Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) onder de naam Puur en Zuiver eind 2016 gezamenlijk een project gestart om microverontreinigingen uit afvalwater te halen. De kwaliteit van oppervlaktewater, in het bijzonder van het IJsselmeer, is een gedeeld belang van beide organisaties. Een belangrijke rioolwaterzuiveringsinstallatie van HHNK te Wervershoof loost haar effluent indirect op het IJsselmeer, in de directe omgeving van Andijk. Daar haalt PWN oppervlaktewater uit het IJsselmeer voor drinkwaterproductie. Eind 2016 is in dit kader het tweeledige programma Ge(O)zond Water gestart in samenwerking met PWN. In dit programma wordt samengewerkt met verschillende maatschappelijke partijen om te voorkomen dat medicijnresten in het milieu terechtkomen. Daarnaast vindt onderzoek naar de toepassing van oxidatieve technieken plaats voor het nazuiveren van effluent van microverontreinigingen waarvan een groot deel medicijnresten. Ge(O)zond Water is in 2017 onderscheiden met de Waterinnovatieprijs van de Unie van Waterschappen, in de categorie Schoon Water. Het hier besproken onderzoek valt binnen het kader van Ge(O)zond Water. Het is de intentie om in 2020 te investeren in een demo-installatie 'micro's', en een pilot 'circulair'. De demo is gericht op het verwijderen van microverontreinigingen (specifiek medicijnresten en hormoonverstorende stoffen)

uit een aanzienlijk deel van het effluent van RWZI Wervershoof. De pilot 'circulair' richt zich op het hogere ambitieniveau om te komen tot hoogwaardige hergebruik van nagezuiverd effluent als bron voor zwemwater, gietwater, industriewater, koelwater en/of halffabricaat voor drinkwater. Naast Ge(O)zond Water is recent een tweede onderzoekstraject gestart, "new hart", waarbij fysisch chemisch zuiveren als methode voor nazuiveren van RWZI effluent onderzocht wordt.

## Referenties

1. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (1017). *Landelijke hotspot analyse geneesmiddelen RWZI's*. Stowa-rapport 42 2017.
2. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (2016). *Geneesmiddelen en waterkwaliteit*. RIVM-rapportnr 2016-0111.
3. Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat (2018). *Criteria financiële ondersteuning vergaande zuivering RWZI's*
4. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (2015). *Verwijdering van microverontreinigingen uit effluënten van rwzi's*. Stowa-rapport 27 2015.
5. Gunten, U. von (2018). 'Oxidation processes in water treatment: Are we on track?'. *Environmental Science and Technology* 52, p. 5062-5075.
6. Waterdienst. (2018). *Normen Afkomstig van de Helpdesk Water*. <https://rvszoekstysteem.rivm.nl>. Geraadpleegd 28 december 2018.
7. Delfos, B.M.M. (2019). *Impact of ozonation and O<sub>3</sub> / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation on degradation of pharmaceuticals in wastewater treatment plant effluent*. Afstudeeronderzoek voor de masteropleiding Water Technology aan Wetsus/Wageningen University & Research, 2019.