



Ministerie van Infrastructuur
en Waterstaat

stowa

HAALBAARHEIDSSSTUDIE MICROFORCE⁺⁺



RAPPORT

2022
14

HAALBAARHEIDSTUDIE MICROFORCE++

RAPPORT

2022

14

ISBN 978.90.5773.977.4



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Nelis De Rouck (PureBlue Water)
Kevin Van de Merlen (PureBlue Water)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Amanda Vierwind (SWECO)
Arnoud de Wilt (Royal HaskoningDHV)
Bernadette Lohmann (Waterschap Zuiderzeeland)
Cora Uijterlinde (STOWA)
Els Schuman (LeAF)
Erik Knol (Hoogheemraadschap van Delfland)
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)
Patricia Clevering-Loeffen (SWECO)
Roberta Hofman-Caris (KWR)
Robert Kras (Waterschap Aa en Maas)
Ruud Schemen (Waterschap de Dommel)
Ruud van der Neut (PWN)

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau bv
STOWA STOWA 2022-14
ISBN 978.90.5773.977.4

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

MicroForce⁺⁺ combineert ozonisatie en biologische oxidatie voor een duurzame, compacte en voordelige verwijdering van organische microverontreinigingen uit RWZI effluent.

Er is momenteel behoefte aan kostenefficiënte, duurzame en robuuste technologieën voor de verwijdering van organische microverontreinigingen uit afvalwater. In dit kader wordt er gekeken naar hybride systemen die fysisch-chemische en biologische processen met elkaar combineren. Het Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit afvalwater (IPMV) is een initiatief van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW), Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), en de Nederlandse Waterschappen om de zoektocht naar deze innovatieve oplossingen te versnellen.

In het kader van het IPMV is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd waarbij ozonisatie en biologische oxidatie worden gecombineerd. De MicroForce⁺⁺ technologie is een ontwikkeling binnen het thema 'Oxidatieve Technieken' van het IPMV. In deze haalbaarheidsstudie werden verschillende criteria (i.e. verwijderingsrendement gidsstoffen, CO₂ footprint, kosten, ecotoxiciteit en vorming van bijproducten) geëvalueerd. De prestaties van MicroForce⁺⁺ zijn vergeleken met de referentietechnologie, een nageschakelde ozondosering met zandfilter. Op basis van de haalbaarheidsstudie presteert Microforce⁺⁺ beter dan de referentie technologie.

Om de verwijdering van organische microverontreinigingen in bestaande RWZI's te optimaliseren is het mogelijk om een fysisch-chemische waterbehandeling met biofilmreactoren te integreren teneinde moeilijk afbreekbare verbindingen afdoende te verwijderen. In geïntegreerde systemen is de effectiviteit van de twee behandelingen synergetisch en wordt het beste van twee werelden gecombineerd, namelijk de sterk oxiderende eigenschappen van ozon en het duurzame karakter van een biologische filtratie.

In navolging van de haalbaarheidsstudie wordt in 2022 een pilotstudie uitgevoerd met MicroForce⁺⁺ op RWZI Walcheren van het Waterschap Scheldestromen.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

MicroForce⁺⁺ combineert ozonisatie en biologische oxidatie om organische microverontreinigingen (e.g. medicijnresten) op een duurzame en voordelige manier uit RWZI effluent te verwijderen. Het MicroForce⁺⁺ proces bestaat uit twee opeenvolgende, in serie geschakelde O₃/Bio reactoren waarbij in elke O₃/Bio reactor een specifieke ozondosis wordt gehanteerd. Hierdoor worden niet-biodegradeerbare moleculen omgezet naar kleinere, biodegradeerbare componenten die tegelijkertijd op een duurzame, biologische manier worden gemineraliseerd a.d.h.v. biofilm-op-drager technologie.

Aan de hand van een haalbaarheidsstudie werd deze innovatieve technologie geëvalueerd op verschillende criteria, nl. het verwijderingsrendement van gidsstoffen, de CO₂ footprint, TCO en de inzetbaarheid op RWZI's in Nederland.

Uit deze haalbaarheidsstudie is gebleken dat MicroForce⁺⁺ uitstekend scoort op CO₂ footprint en TCO. De CO₂ footprint bedraagt 59 g CO₂/m³, wat een verlaging betekent van ongeveer 55% in vergelijking met de referentietechnologie (130 g CO₂/m³ voor Ozon + ZF). De belangrijkste besparing in CO₂ footprint is te wijten aan de lagere ozondosis (0,35 g O₃/g DOC) die nodig is voor de verwijdering van gidsstoffen, wat op haar beurt een lagere energie- en grondstoffenverbruik mogelijk maakt. Verder zal de productie van slib of het gebruik van spoelwater door de biofilmreactoren een verwaarloosbare contributie hebben op de totale CO₂ footprint.

De kosten van MicroForce⁺⁺ zullen naar schatting 0,06-0,07 €/m³ bedragen, wat een reductie is van ca. 60 % t.o.v. de referentie technologie met ozon in combinatie met een zandfilter. De impact op dit criterium is ook voornamelijk toe te schrijven aan de lagere ozonvraag en dus de lagere energievraag.

Als we het verwijderingsrendement van MicroForce⁺⁺ in beschouwing nemen voor de 11 gidsstoffen van het Ministerie I&W dan wordt vastgesteld dat 85-95 % verwijdering kan bewerkstelligen worden voor minstens 7 van de 11 gidsstoffen met een dosis van 0,3-0,4 g O₃/g DOC. Dit is een stijging van ongeveer 10% t.o.v. de referentietechnologie.

Tot slot heeft deze studie ook uitgewezen dat het modulaire concept van MicroForce⁺⁺ een hoge inzetbaarheid op de hotspot RWZI's in Nederland mogelijk maakt. MicroForce⁺⁺ heeft als doel een gestandaardiseerde waterbehandelingstechnologie te zijn die plug en play kan worden geïnstalleerd en verschillende beschikbare formaten heeft om een oplossing te bieden onafhankelijk van de grootte van de RWZI. De compacte bouw is mogelijk door de korte verblijftijd in het biologische systeem en de intelligente ozondosering.

Als gevolg van de positieve resultaten van deze haalbaarheidsstudie zal in 2022 een pilotstudie worden uitgevoerd met MicroForce⁺⁺ op RWZI Walcheren in samenwerking met KWR en Waterschap Scheldestromen.

SUMMARY

MicroForce⁺⁺ combines ozonation and biological oxidation to remove organic micropollutants (e.g. pharmaceutical residues) from WWTP effluent in a sustainable and economical way. The MicroForce⁺⁺ process consists of two successive O₃/Bio reactors connected in series, in which each O₃/Bio reactor uses a specific ozone dose. This converts non-biodegradable molecules into smaller, biodegradable components that are simultaneously mineralized in a sustainable, biological manner using biofilm-on-carrier technology.

By means of a feasibility study, this innovative technology was evaluated on various criteria, i.e. the removal efficiency of indicator substances, the carbon footprint, TCO and the applicability on WWTPs in the Netherlands.

This feasibility study showed that MicroForce⁺⁺ scores excellent on carbon footprint and TCO. The carbon footprint is 59 g CO₂/m³, which means a reduction of about 55% compared to the reference technology (130 g CO₂/m³ for Ozone + SF). The main saving in carbon footprint is due to the lower ozone dose (0,35 g O₃/g DOC) required for indicator substance removal, which in turn allows for lower energy and raw material consumption. Furthermore, the production of sludge or the use of rinse water by the biofilm reactors will have a negligible contribution on the total carbon footprint.

The TCO of MicroForce⁺⁺ is estimated to be 0,06-0,07 €/m³, which is also a reduction of about 60% compared to the reference technology with ozone in combination with a sand filter. The impact on this criterion is also mainly due to the lower ozone demand and thus the lower energy demand.

Considering the removal efficiency of MicroForce⁺⁺ for the 11 indicator substances of the Ministry of Infrastructure and the Environment, it can be concluded that 85-95% removal is achieved for at least 7 of the 11 indicator substances with a dose of 0,3-0,4 g O₃/g DOC. This is an increase of about 10% compared to the reference technology.

Finally, this study also showed that the modular concept of MicroForce⁺⁺ allows a high applicability at hotspot WWTPs in the Netherlands. MicroForce⁺⁺ aims to be a standardized water treatment technology that can be installed plug and play and has several available sizes to provide a solution independent of the size of the WWTP. The compact construction is made possible by the short residence time in the biological system and via intelligent ozone dosing.

As a result of the promising results of this feasibility study, a pilot study with MicroForce⁺⁺ will be conducted at WWTP Walcheren in 2022 in collaboration with KWR and Waterschap Scheldestromen.

LIJST MET AFKORTINGEN

AC	Activated Carbon - Actief Kool
AOP	Advanced Oxidation Process - Geavanceerd Oxidatieproces
API	Active Pharmaceutical Ingredients - Actieve Farmaceutische Ingrediënten
BTZ	Benzotriazool
BZV	Biologisch zuurstofverbruik
CAPEX	Capital Expenditures - Kapitaaluitgaven
CBZ	Carbamazepine
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLA	Clarithomycine
CZV	Chemisch zuurstofverbruik
CPX	Ciprofloxacin
DBP	Desinfectie bijproducten
DCF	Diclofenac
DOC	Dissolved Organic Carbon - Opgeloste Organische Koolstof
DWA	Droogweerafvoer
EC	Elektrische Conductiviteit
EfOM	Effluent Organic Matter - Effluent Organisch Materiaal
ERY	Erytromycine
GBT	Gabapentine
HCT	Hydrochloorthiazide
HDPE	High Density Polyethyleen
HPLC	High-Performance Liquid Chromatography
HRT	Hydraulic Residence Time - Hydraulische Verbliftijd
IBC	Intermediaire Bulkcontainers
IBS	Irbesartan
IenW	Infrastructuur en Waterstaat
IPMV	Innovatieprogramma Microverontreinigingen
LCA	Life Cycle Assessment - Levenscyclusanalyse
LOX	Liquid Oxygen - Vloeibaar zuurstof
MBBR	Moving Bed Biofilm Reactor
MBTZ	Methylbenzotriazool
MPL	Metropolol
MS	Massaspectrometrie
MW	Molecular Weight - Molecuulgewicht
NBT	Nabezinktank
OMP	Organische Micropolluenten
OPEX	Operational Expenditures - Operationele Uitgaven
PRP	Propranolol
PSA	Pressure Swing Adsorption
RWA	Regenweerafvoer
RWZI	Rioolwaterzuiveringsinstallatie

SMX	Sulfamethoxazool
SS	Suspended Solids - Zwevende Stoffen
STL	Sotalol
STOWA	Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
TBT	Turbiditeit
TCO	Total Cost of Ownership
TKI	Topconsortium voor Kennis en Innovatie
TMP	Trimetoprim
tN	Total Nitrogen - Totaal stikstof
TOC	Total Organic Carbon - Totaal Organische Koolstof
tP	Total Phosphorus - Totaal Fosfor
UVA	Ultraviolet Absorbantie
UVT	Ultraviolet Transmissie
VLF	Venlafaxine
ZF	Zandfilter

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 MICROFORCE++

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	SUMMARY	
	LIJST MET AFKORTINGEN	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
2	PROCESOMSCHRIJVING	4
2.1	Beschrijving technologie	4
2.2	Process flow diagram en toelichting	6
3	LITERATUURSTUDIE	8
3.1	Achtergrond organische microverontreinigingen	8
3.2	Integratie van ozonisatie en biofilm-op-drager technologie	10
3.3	Samenvatting evaluatiecriteria	12
4	UITGEVOERD ONDERZOEK	13
4.1	RWZI Panheel (lab-scale & pilot scale, 2016)	13
4.1.1	Algemeen	13
4.1.2	Testprotocol	14
4.1.3	Resultaten	15
4.2	Industrieel (full-scale, Frankrijk, 2018)	16
4.2.1	Algemeen	16
4.2.2	Resultaten	16
4.3	Medium-pilot scale (PureBlue, Kapellebrug, 2021)	16
4.3.1	Algemeen	16
4.3.2	Resultaten	19
4.3.3	Conclusies	20

5	GRONDSLAGEN DIMENSIONERING	21
5.1	Ozonisatie	21
5.2	Biologische filtratie	21
6	EVALUATIECRITERIA HAALBAARHEIDSSSTUDIE	22
6.1	CO ₂ footprint	22
6.1.1	Energie	22
6.1.2	Hulpstoffen, slibproductie, spoelwater, opvoerhoogte en civiele materialen	24
6.1.3	Totale CO ₂ footprint	25
6.2	Kosten	26
6.2.1	Investeringskosten (CAPEX)	26
6.2.2	Samenvatting kosten	28
6.3	Ecotoxiciteit	29
6.4	Evaluatiecriteria voor MicroForce ⁺⁺ met in-situ opgewekt zuurstof	29
6.4.1	CO ₂ footprint MicroForce ⁺⁺ met in-situ O ₂	29
6.4.2	Kosten MicroForce ⁺⁺ met in-situ O ₂	30
7	INZETBAARHEID IN RWZI'S NEDERLAND	32
7.1	Productlijn MicroForce ⁺⁺	32
7.2	Distributie MicroForce ⁺⁺ op RWZI hotspotlocaties	33
8	CONCLUSIE	35
9	PILOTLOCATIE EN VERVOLGONDERZOEK	37
9.1	Waterschap Scheldestromen	37
9.2	Pilotlocatie	37
9.3	Vervolgonderzoek	38
10	BRONNEN	39
11	APPENDICES	41
11.1	Appendix A	41
11.2	Appendix B	42
11.3	Appendix C	43
11.4	Appendix D	48

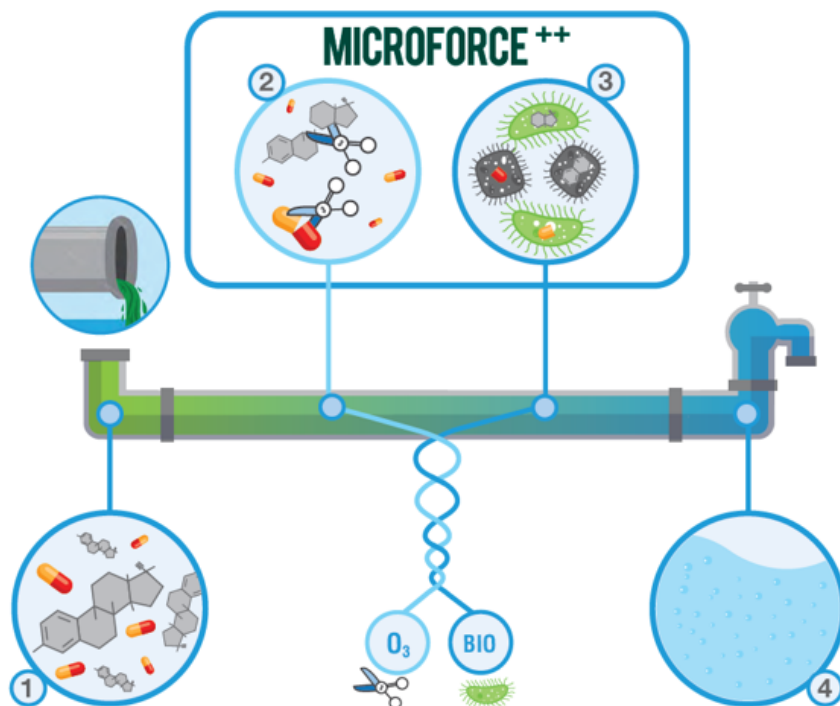
1

INLEIDING

Binnen het kader van het InnovatieProgramma MicroVerontreinigingen uit afvalwater 2020 (IPMV 2020), een initiatief van Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA) en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW), werd een haalbaarheidsstudie uitgevoerd op een innovatieve, duurzame oxidatietechnologie waarbij ozonisatie en biologische oxidatie worden gecombineerd. De technologie in kwestie is een ontwikkeling van PureBlue Water en kreeg als doopnaam MicroForce⁺⁺. De deelname van PureBlue Water aan het innovatieprogramma verloopt in samenwerking met partner KWR, die technologische ondersteuning en advies verleent doorheen de volledige productontwikkeling.

MicroForce⁺⁺ staat voor ozonisatie en biologische oxidatie. Deze twee processen bestaan in dit geval niet enkel naast elkaar, maar ze zitten letterlijk en figuurlijk in elkaar verweven. PureBlue tracht met MicroForce⁺⁺ het beste van twee werelden met elkaar te combineren, enerzijds de oxidatieve kracht van ozon en anderzijds het duurzame karakter van een biologische oxidatiestap. Hierbij worden recalcitrante organische verbindingen eerst omgezet in kleinere, biodegradeerbare componenten, die dan verderop op een duurzame manier kunnen worden geoxideerd en gemineraliseerd door biofilm-op-drager technologie.

FIGUUR 1

INFOGRAPH MICROFORCE⁺⁺

Door de introductie van een biologische stap beogen we de ozonvraag met ca. 50 % te verlagen. Concreet betekent dit dat we de totale ozondosis kunnen verlagen tot 0,3-0,35 g O₃/ g DOC, dit in tegenstelling met de stand der techniek waarbij stand-alone ozonisatie doorgaans wordt toegepast aan 0,7 g O₃/ g DOC om afdoende verwijdering van microverontreinigingen uit RWZI effluent te bewerkstelligen. Door een verlaging van de totale ozondosis en het aanbieden van ozon in verschillende in serie geschakelde reactoren, alsook de mogelijkheid om een innovatieve ozoninbrengmethode toe te passen, zal de vorming van toxische desinfectiebijproducten (DBP) door ozonisatie (e.g. bromaat) gedrukt worden. Alle producten van PureBlue worden bovendien ontwikkeld met het oog op compactheid, flexibiliteit, modulariteit en standaardisatie. Dit vereenvoudigt niet alleen het transport en de bouw van de units, maar dit heeft ook een positieve impact op de footprint on site en de mogelijkheid om een installatie eenvoudig up- of down te scalen naargelang de wensen van de klant. Naast de verwijdering van organische microverontreinigingen zal MicroForce⁺⁺ ook een extra verwijdering van nutriënten (N,P) en uitspoelende deeltjes (SS) uit de nabezinktank (NBT) realiseren.

FIGUUR 2 MODULARITEITSPRINCIPE MICROFORCE⁺⁺



De doelstelling van deze haalbaarheidsstudie is om een objectieve evaluatie te maken over het potentieel om MicroForce⁺⁺ in te schakelen op RWZI's in Nederland en bij uitbreiding Europa als nabehandelingstechniek voor de verwijdering van organische microverontreinigingen (bv. medicijnresten). Hierbij brengen we verschillende eigenschappen van de technologie in kaart, zoals CO₂ footprint, energieverbruik, Total Cost of Ownership (TCO), ecotoxiciteit en het verwijderingsrendement van 11 verschillende gidsstoffen geselecteerd door het Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat. Naast de verschillende operationele en financiële parameters zal ook een praktische haalbaarheidsstudie worden uitgevoerd met betrekking tot de functionele inzetbaarheid van MicroForce⁺⁺ op de RWZI's in Nederland. Op basis van dit onderzoek, met in het bijzonder de evaluatie en onderbouwing van de verschillende criteria, zal uiteindelijk beslist worden of MicroForce⁺⁺ al dan niet wordt opgenomen in de volgende fase van het IPMV, nl. een pilot-fase, waarbij de technologie in de praktijk wordt getest op een RWZI van een Waterschap die mee wil inhaken in dit traject.

In dit rapport zal eerst een uitvoerige omschrijving (Hoofdstuk 2) worden gegeven van de verschillende procesonderdelen en de MicroForce⁺⁺ technologie an sich. Daarna worden aan de hand van een beknopte literatuurstudie (Hoofdstuk 3) en reeds uitgevoerd onderzoek (Hoofdstuk 4) een aantal grondslagen voor de dimensionering van de technologie (Hoofdstuk 5) gedefinieerd. Wanneer alle operationele en praktische parameters zijn onderzocht en in kaart gebracht zal MicroForce⁺⁺ worden geëvalueerd op de verschillende evaluatiecriteria, waaronder CO₂ footprint, kosten, toxicologische risico's en verwijderingsrende-

ment van de 11 gidsstoffen in kwestie (Hoofdstuk 6). Daarna zal ook een korte studie worden gepresenteerd met betrekking tot de functionele inzetbaarheid van de technologie op de verschillende RWZI's in Nederland, waarbij de focus vooral ligt op de verschillende hot-spots in NL waarbij de concentratie actieve farmaceutische ingrediënten (API's) het hoogst liggen (Hoofdstuk 7). Tot slot zal bij wijze van conclusie (Hoofdstuk 8) een reflectie worden gemaakt over de uitgevoerde studie, waarbij een GO of NO GO wordt geadviseerd, alsook de suggesties voor verder onderzoek waarbij deelnemende kandidaat partners/waterschappen en pilotlocatie(s) worden geïntroduceerd (Hoofdstuk 9).

2

PROCESOMSCHRIJVING

2.1 BESCHRIJVING TECHNOLOGIE

Als resultaat van jarenlang onderzoek in geavanceerde oxidatietechnologie (AOP) werd MicroForce⁺⁺ ontwikkeld. In deze technologie worden chemische en biologische oxidatie met elkaar verweven om de verwijdering van recalcitrante, organische verbindingen (CZV) in afvalwater zo duurzaam mogelijk te realiseren. MicroForce⁺⁺ behandelt het water door middel van een oxidatie met ozon waarbij de onzuiverheden specifiek worden aangevallen. Hierdoor worden niet-biodegradeerbare moleculen omgezet naar kleinere, biodegradeerbare componenten die tegelijkertijd op een duurzame, biologische manier worden gemineraliseerd a.d.h.v. biofilm-op-drager technologie. Een vereenvoudigd Process Flow Diagram (PFD) van het werkingsprincipe wordt gegeven in Figuur 3.

Voor het opwekken van ozon wordt bij MicroForce⁺⁺ de meest modulaire en onderhoudsvriendelijke ozongenerator ingeschakeld die momenteel beschikbaar is op de markt. Deze wordt conventioneel gevoed met vloeibaar zuurstof (LOX), maar de generatoren zijn ook compatibel met in-situ gegenereerd zuurstof op een zeer compacte oppervlakte. Het MicroForce⁺⁺ proces bestaat uit twee opeenvolgende, in serie geschakelde O₃/Bio reactoren waarbij in elke O₃/Bio reactor een specifieke ozondosis wordt gehanteerd. Een distributiemodule na de ozongenerator zorgt ervoor dat verschillende concentraties ozon aan de twee O₃/Bio compartimenten kunnen worden gevoed met één en dezelfde ozongenerator. Het geproduceerde ozon wordt opgelost in het ozoncompartiment als microbubbels. Deze microbubbels kunnen worden gegenereerd op verschillende manieren. PureBlue maakt hiervoor gebruik van een innovatieve injectiemodule die uniek is in haar soort, bestaande uit roterende keramische schijven met een specifieke porositeit. Hierdoor is bijna geen energie benodigd voor ozon-oplossing en transfer. Daarnaast kan het ozon ook worden aangeboden via conventionele venturi/nozzle oplossystemen.

Als eenmaal de ozon microbubbels werden gevormd worden deze gevoed aan het RWZI effluent in het eerste compartiment van de biofilmreactor. Op deze manier worden niet-biodegradeerbare, recalcitrante micro's geoxideerd en verknipt tot kleinere, biodegradeerbare verbindingen.

Het feit dat ozon in twee verschillende concentraties gevoed wordt aan de in serie geplaatste biofilmreactoren heeft verschillende voordelen:

1. Microverontreinigingen worden specifiek getarget met microdoseringen zodat de reactiekinetiek voor oxidatie van DBP (e.g. bromide naar bromaat) niet op gang wordt gebracht.
2. De ozondosis wordt in real time (afhankelijk van flow en DOC-concentratie) afgestemd op de ozonvraag van het water dat naar de in serie geschakelde biofilmreactoren gaat, zodat er nooit te veel of te weinig ozon naar de reactoren wordt gestuurd en het verlies aan resources wordt gemineraliseerd.

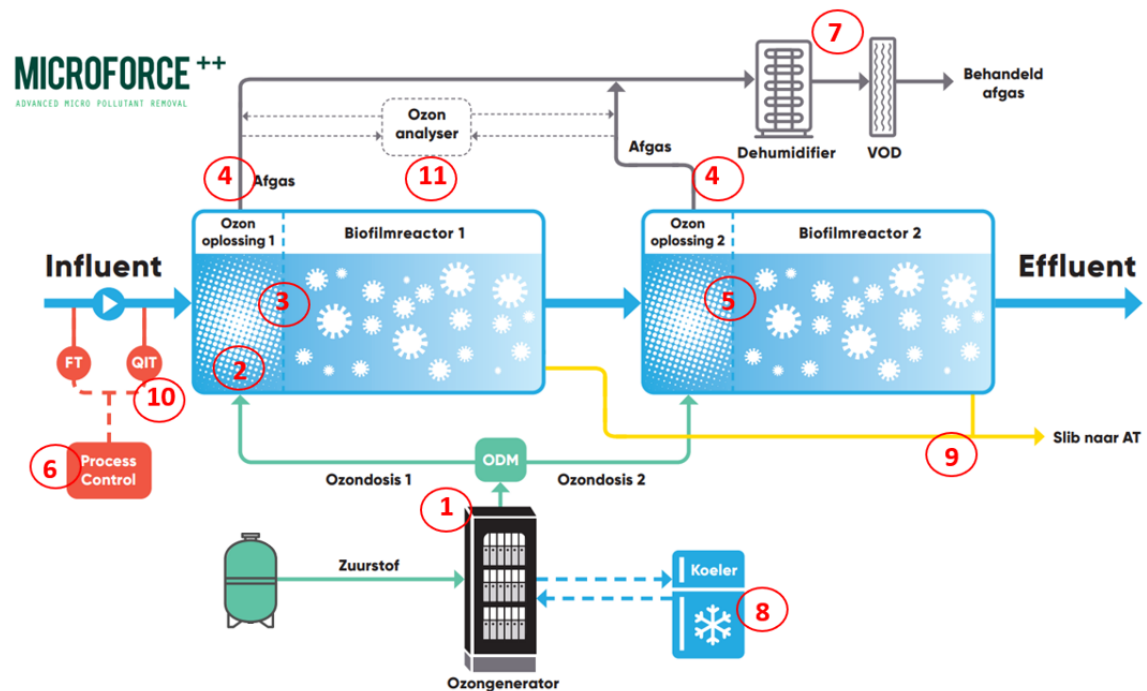
3. De microbiologische flora in de biofilm kan zich dankzij de lage belasting en hoge slijbleeftijd gaan specialiseren in de behandeling van de eerder gevormde metabolieten, waardoor de totale afbraak van de microverontreinigingen wordt geoptimaliseerd.

Tijdens en vlak na de oxidatie met ozon worden de biodegradeerbare intermediairen verder afgebroken door micro-organismen in de biologische reactor met biofilm-op-drager technologie. De biofilmreactor wordt ingezet als een fixed bed biofilmreactor waardoor een actieve biologische filtratie plaatsvindt om het resterende, uitspoelende organische materiaal van de RWZI en farmaceutische metabolieten af te vangen en te mineraliseren. Het dragermateriaal voor de biofilm, dat tegelijk ook als filtermedium wordt gebruikt, is een custom made ontwerp van PureBlue. Dit is een cirkelvormige carrier gemaakt uit Hoge Dichtheid Polyethyleen (HDPE) met een diameter van 17 mm, een dikte van 5 mm en een specifieke oppervlakte van 1150 m²/m³. Ook andere dragermaterialen worden op dit moment onderzocht en zullen deel uitmaken van het vervolgonderzoek op deze haalbaarheidsstudie. Zoals bij elk filter is er een maximale hoeveelheid zwevende stof die kan worden afgevangen vooraleer er doorbraak van het filter zal optreden, die we verder omschrijven als de maximale bergingscapaciteit. Wanneer deze bergingscapaciteit van het biologisch filter bereikt wordt, zal het dragermateriaal in beweging worden gebracht om het aangehechte slib los te maken. Nadien zal het water via de onderkant worden gedraineerd, waardoor het slib zonder extra backwash spoelwater wordt verwijderd uit het filter (i.e. 1 bedvolume backwash per keer). Hierbij wordt de biofilm niet uitgespoeld, maar enkel het gefilterde materiaal dat voornamelijk bestaat uit afgevangen deeltjes van het uitspoelend slib van de RWZI. De hoeveelheid slib die hierbij extra zal worden afgevangen, hangt dus sterk af van de hoeveelheid uitspoelende deeltjes uit de nabezinktank van de RWZI.

Deze combinatie van chemische oxidatie & biologische mineralisatie maakt van de MicroForce⁺⁺ een uniek en betrouwbaar systeem en zorgt bovendien voor minstens een halvering van de operationele kosten voor de verwijdering van microverontreinigingen t.o.v. stand-alone ozon technieken. In deze technologie wordt het beste van twee werelden gecombineerd; de proceszekerheid van oxidatie met ozon & het duurzame karakter van een biologische behandeling.

Dankzij de compacte containerbouw heeft Microforce⁺⁺ bovendien een zeer kleine footprint on site, is de installatie gemakkelijk transporteerbaar (zowel over land als zee) én snel te installeren. Deze plug-and-play modulaire eenheden zijn bovendien eenvoudig uit te breiden en zorgen voor een maximale flexibiliteit in capaciteit. Uiteraard is het ook mogelijk dat de installaties als skid aangeleverd worden, of on-site worden ingebouwd in een permanent opgestelde infrastructuur.

2.2 PROCESS FLOW DIAGRAM EN TOELICHTING

FIGUUR 3 PROCESS FLOW DIAGRAM MICROFORCE⁺⁺ - RWZI

1. Ozon wordt opgewekt uit zuivere zuurstof in een modulaire ozongenerator en wordt nadien door een ozon distributie module (ODM) verdeeld in verschillende concentraties naar de biofilmreactoren.
2. Ozon wordt in een eerste 'inkomhal'-compartiment van de biofilmreactoren ingebracht d.m.v. een ozon inbrengmethode naar keuze. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door conventionele venturi-nozzle systemen, maar ook door een unieke microbubbelgenerator met roterende keramische, poreuze schijven. Het gebruik van fijne microbubbels zorgt voor een grotere beschikbare transferoppervlakte voor de ozonoverdracht van gas naar water (hoge α -factor). Daarnaast is PureBlue ook nog volop aan een volledig eigen design aan het ontwikkelen om zo efficiënt mogelijk ozon op te lossen in water.
3. RWZI effluent komt binnen in de eerste ozon/biofilmreactor. Het inkomende water wordt direct in contact gebracht met een ozonoplossing bestaande uit ozon microbubbels (concentratie variabel). In het eerste compartiment vindt een reactie van water & ozongas plaats. Het water stroomt nadien in horizontale richting verder richting het filterbed en verlaat de reactor aan de andere kant van de reactor (i.e. horizontale flow/filtermechanisme).
4. Deze reactoren zijn bovenaan gesloten en het afgas wordt opgevangen en verder behandeld. Het gros van het onopgeloste gas zal echter worden afgevangen in het eerste water/ozon compartiment van iedere reactor.
5. Een gelijkaardig proces vindt plaats in de tweede biofilmreactor, waar een lagere concentratie ozon zal gevoed worden. De microbiologische flora op het dragermateriaal zal hier verschillend zijn t.o.v. de eerste biofilmreactor en zich specialiseren in het verwerken van de afbraakproducten en residueel organisch materiaal van de eerste biofilmreactor.
6. De zuurstof die overblijft na de reactie van ozon wordt in dit systeem verder gerecupereerd als voedingsbron voor de microbiologie op het dragermateriaal. Het proces is dermate ontwikkeld dat al het ozon is weg gereageerd vooraleer het actief biologische bed wordt bereikt. De reactie van ozon met organische microverontreinigingen zal dusdanig worden gestuurd dat de ozondosis steeds marginaal hoger ligt dan de ozonvraag. Dit wordt mede bewerkstelligd

door een nauwkeurige online en real-time monitoring van de inkomende DOC concentratie (bv. via UVA254) & via ORP metingen vóór, tijdens en na het betreden van het carrier bed. De tolerantie van het biologisch filterbed t.o.v. ozon en de meest praktische preventie van ozon-intoxicatie is één van de onderzoeksvragen die verder worden beantwoord in Hoofdstuk 4.

7. Het afgas en eventueel gevormd schuim worden afgevangen in een aparte dehumidifier; deze reactor is ook een eigen ontwikkeling van PureBlue en zorgt ervoor dat (mogelijk gevormd) schuim efficiënt kan worden afgevangen d.m.v. een sproeimechanisme en het afgas kan worden gedroogd alvorens door een ozon destructiemodule (VOD) te worden geleid voor een veilige afvoer naar buiten.
8. De ozongenerator en de dehumidifier worden beiden gekoeld met een centrale koelingsunit. Deze koelingsunit zal haar koeling energie kunnen recupereren aan de hand van een koeling spiraal die zich in het RWZI effluent bevindt. De ozongeneratoren blijven echter functioneel tot een koelingstemperatuur van ca. 25 °C zonder verlies aan ozoncapaciteit, wat relatief hoog is.
9. Wanneer de standtijd van het biologisch bed is bereikt (zie hoofdstuk 6) kan het bed in beweging worden gebracht door het waterniveau in de tank te verhogen. Op deze manier zal het dragermateriaal worden losgeschud en het afgevangen organisch materiaal terug worden losgemaakt. Het geproduceerde slib zal worden afgevoerd naar de AT van de RWZI.
10. Alle processen worden automatisch gestuurd op basis van sensoren zoals druk, flow, ORP en UV absorptie (UVA254), zodat de dosering in real time kan worden aangepast aan de hand van de inkomende vuilvracht.
11. Veiligheidsmaatregelen d.m.v. omgevingsdetectoren (O_2 , O_3) zijn inherent verbonden aan de unit. De concentratie ozon die richting de verschillende biofilmreactoren gaat wordt bovendien gemonitord door een externe ozon analyzer. Hetzelfde apparaat kan ook potentieel residueel ozon in het afgas detecteren.

3

LITERATUURSTUDIE


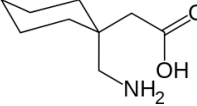
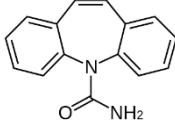
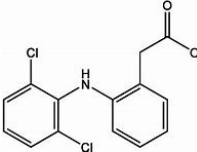
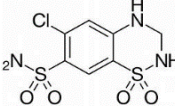
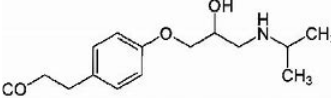
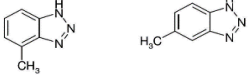
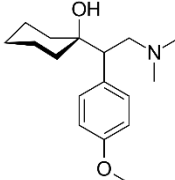
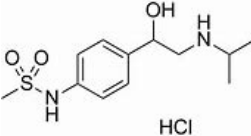
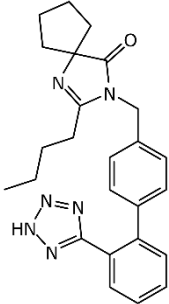
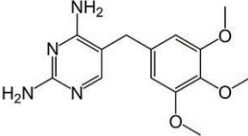
3.1 ACHTERGROND ORGANISCHE MICROVERONTREINIGINGEN

EPA (2008) definieert medicijnresten of actieve farmaceutische ingrediënten (API's) als "contaminanten van opkomende zorg, waaronder farmaceutische producten en producten voor persoonlijke verzorging (PPCP), die in toenemende mate worden gedetecteerd in lage concentraties in oppervlaktewater". De bezorgdheid dat deze verbindingen mogelijk invloed hebben op het aquatische milieu is de laatste jaren enorm toegenomen. De Europese Commissie heeft daarom inmiddels 33 API's opgenomen in de watch list van de Water Framework Directive sinds 2008. Tot op heden is er geen internationale richtlijn met betrekking tot de maximaal toegelaten concentraties van API's in water als gevolg van hiaten in de kennis over hun voorkomen, het gedragspatroon, de monitoring en het milieurisico. Echter, in 2008 heeft de Europese Commissie voor Milieubeheer, Volksgezondheid en Voedselveiligheid de toelaatbare concentraties vastgelegd voor de emissies van medicijnresten in het aquatische milieu. De criteria om geselecteerd te worden voor de lijst met prioritair verbindingen zijn (i) frequente detectie in RWZI-effluenten, (ii) weerspanning, (iii) persistentie, (iv) mobiliteit in water, en (v) milieurisico voor mens en fauna.

In Nederland werkt de Rijksoverheid sinds 2016 samen met de zorg- en watersector aan de Ketenaanpak 'Medicijnresten uit Water' (www.medicijnresten.org). Het doel is om de belasting van grond- en oppervlaktewater met medicijnresten terug te dringen. De aanpak bestaat uit een samenhangend pakket aan werkzaamheden binnen de gehele geneesmiddelenketen: van ontwikkeling en toelating, voorschrijven en gebruik tot afvalinzameling en vergaande zuivering van stedelijk rioolwater. De huidige RWZI's zijn niet ontworpen om medicijnresten en een breed scala aan organische microverontreinigingen te verwijderen. Per stof kan de mate van verwijdering sterk verschillen. Met behulp van vergaande zuiveringstechnieken als ozon (oxidatie), actiefkool (adsorptie), membraanfiltratie of combinaties van deze technieken of wellicht innovatieve technieken is het mogelijk om dit zuiveringsrendement op RWZI's substantieel te verhogen. Om de zuiveringsprestaties tussen deze verschillende technieken onderling te kunnen vergelijken is door het Ministerie van IenW een lijst met 11 gidsstoffen opgesteld. Dit zijn de stoffen benzotriazol (BTZ), clarithomycine (CLA), carbamazepine (CBZ), diclofenac (DCF), hydrochloorthiazide (HCT), metropolol (MPL), 4/5-methylbenzotriazol (4/5MBTZ), propranolol (PRP), sotalol (STL), sulfamethoxazol (SMX) en trimethoprim (TMP) (Cortes et al., 2020). Inmiddels is deze lijst met gidsstoffen aangepast en de stoffen clarithomycine, sulfamethoxazol en propranolol vervangen door gabapentine (GBP), irbesartan (IBS), en venlafaxine (VLF) (Mulder, 2021).

De fysisch-chemische parameters (nl. categorie, moleculaire structuur, logKow, pKa en molecuulgewicht (MW)) van de 11 gidsstoffen die zullen worden onderzocht in deze haalbaarheidsstudie zijn weergegeven in Tabel 1.

TABEL 1 OVERZICHT KARAKTERISTIEKEN GIDSSTOFFEN MINISTERIE I&W

OMP	Categorie	Moleculaire structuur	logK _{ow}	pK _a	MW (g/mol)
Benzotriazol (BTZ)	Agonist		1,44	8,37	119,12
Gabapentine (GBP)	Anti-epileptica		-1,1	3,7	171
Carbamazepine (CBZ)	Antidepressi-va		2,45	15,96	236,27
Diclofenac (DCF)	Ontstekings-remmer		4,51	4,15	296,1
Hydrochloortiazide (HCT)	Diuretica		-0,07	7,9	297,7
Metropolol (MPL)	Beta-blocker		1,88	9,7	267,36
4/5-Methylbenzotriazol (MBTZ)	-		0,97	8,85	133,15
Venlafaxine (VLF)	Antidepressiva		3,2	10,09	277
Sotalol (STL)	Beta-blocker		0,24	8,2	272,37
Irbesartan (IBS)	Angiotensin receptor blocker		1,13	4,12	428
Trimetoprim (TMP)	Antibiotica		0,91	7,12	290,32

Er heerst op dit moment een gebrek aan kostenefficiënte, duurzame en robuuste technologieën die zijn gefocust op het verwijderen van OMP uit afvalwater. Verschillende technologieën, zoals adsorptie, membraantechnologie, geavanceerde oxidatie processen en biologische methoden hebben reeds bewezen organische micropolluenten (OMP) op efficiënte wijze uit drinkwater te verwijderen. Echter, beperkingen met betrekking tot de opschaling en de total cost of ownership (TCO) kunnen een belemmering zijn voor hun praktische toepassing in bestaande RWZI's. Voorgenoemde technologieën zijn reeds goed ingeburgerd in drinkwaterbehandeling, omdat dit rechtstreeks in verband staat met de volksgezondheid en de financiële impact eerder van ondergeschikt belang is. Eén van de grootste zorgen bij chemische behandelingen om OMP te verwijderen is de vorming van bijproducten die mogelijk de ecotoxiciteit van afvalwater kunnen verhogen. Daarom staan de schijnwerpers momenteel gericht op milieuvriendelijke, innovatieve oplossingen zoals hybride systemen die fysisch-chemische en biologische processen met elkaar combineren. Op die manier tracht men de beperkte verwijdering van medicijnresten en andere OMP in RWZI's op te vangen, alsook om het spectrum van verwijderde OMP te verbreden en om de kosten van fysicochemische behandelingen te verlagen (Rathi et al., 2021). Verschillende studies onderzochten de toepassing van biologische en geavanceerde oxidatiebehandeling om organische microverontreinigingen te verwijderen op lab-, pilot- en full scale.

3.2 INTEGRATIE VAN OZONISATIE EN BIOFILM-OP-DRAGER TECHNOLOGIE

Er werden reeds verschillende studies uitgevoerd op lab-, pilot- en full-scale waarbij ozonisatie wordt gecombineerd met een biologische voor en/of nazuivering. Biofilmreactoren worden beschouwd als een effectief biologisch alternatief voor CAS, aangezien een hogere verwijderingsefficiëntie wordt gevonden in Moving Bed Biofilm Reactoren (MBBR) in vergelijking met conventionele RWZI's. Om de verwijdering van OMP in biologische systemen te versterken, is de integratie van een fysisch-chemische waterbehandeling met biofilmreactoren nodig om biorecalcitrante verbindingen afdoende te verwijderen. In de geïntegreerde systemen wordt aangenomen dat de effectiviteit van de twee behandelingen eerder synergetisch dan additief is. Een nabehandeling met ozonisatie wordt eerder aanbevolen bij afvalwater met een lage organische belasting (b.v. RWZI-effluent) dat zowel biologisch afbreekbare als recalcitrante verbindingen bevat. Micro-organismen, vooral in biofilm, hebben het vermogen om hun enzymatische apparaat aan te passen aan de medicijnresten die aanwezig zijn en kunnen zo mogelijke toxische effecten op hun biomassagroei verminderen. Er komen echter ook langzaam en niet-biologisch afbreekbare OMP vrij die vrijwel nauwelijks veranderd of volledig onveranderd door de biologische behandeling gaan. Daarom wordt aanbevolen een ozonisatie stap toe te voegen aan het proces. In het geval van afvalwater, dat zowel biologisch afbreekbare als niet-afbreekbare verbindingen bevat, wordt in het algemeen een fysicochemische voorbehandeling aanbevolen. Ozonisatie breekt complexe, weerbarstige verbindingen af in kleinere biologisch afbreekbare moleculen die verder biologisch kunnen worden verwijderd. De verhouding BZV5/CZV wordt over het algemeen gebruikt om de biologische afbreekbaarheid van afvalwater te schatten. Aangenomen wordt dat afvalwater met een BZV5/CZV-verhouding van minder dan 0,2 voor elke biologische behandeling eerst dient te worden voorbehandeld. Naast de verschillende voordelen van ozonisatie op de waterkwaliteit, kunnen ook gevaarlijke bijproducten gevormd worden die giftig zijn voor waterorganismen en soms zelfs schadelijk voor de micro-organismen die aanwezig zijn in de biofilm. Dit is een reden om ozonisatie als nabehandeling te vermijden. Daarom is er vaak behoefte aan nog een extra biologische polishing om geozoniseerd afvalwater verder te zuiveren en/of om de verwijdering van ozon resistente OMP te vergroten.

De laatste jaren zijn meerstapsystemen ontwikkeld om de ozonisatiekosten verder te verlagen en de verwijderingscapaciteit van OMP te maximaliseren. In het meerstappenconcept worden AOP's of ozonisatietechnieken tussen twee of meer biologische stappen geplaatst en leiden ze tot een omzetting van biorecalcitrante verbindingen (die in de eerste biologische stap niet werden afgebroken) naar biologisch afbreekbare verbindingen, die verder biologisch worden gemineraliseerd. De efficiëntie van de verwijdering in verschillende hybride combinaties met ozonisatie, zijn gerapporteerd in Tabel 2.

TABEL 2

OVERZICHT O₃ - BIO HYBRIDE SYSTEMEN – CARBAMAZEPINE (CBZ), DICLOFENAC (DCF), TRIMETOPRIM (TMP), SULFAMETHOXAZOOL (SMX), CARBAMAZEPINE (CBZ), METROPOLOL (MPL), PROPRANOLOL (PRP), CLARITHOMYCINE (CLA), CIPROFLOXACINE (CPX), ERYTHROMYCINE (ERY)

Hybride systeem	Verwijderingsefficiëntie (%)	Testcondities	Referenties
Bio-O ₃	CBZ) 100% DCF) 98% TMP) 93% SMX) 86%	Lage belasting 0,6 g O ₃ /g DOC	Schaar et al. (2010)
	CBZ) 100% DCF) 99% TMP) 98% SMX) 95%	Lage belasting 0,9 g O ₃ /g DOC	
O ₃ -Bio-O ₃	Pre O ₃ Post O ₃ TMP) 28% 93 % CBZ) 52% 95% SMX) 62% 100%	0,25 g O ₃ /g DOC	Yang et al. (2017)
	TMP) 62% 96 % CBZ) 100% 100% SMX) 98% 100%	0,5 g O ₃ /g DOC	
	TMP) 98% 100 % CBZ) 100% 100% SMX) 97% 100%	0,75 g O ₃ /g DOC	
O ₃ +Bio	CPX) 100%	> 1 g O ₃ /g CZV	Mohan et al. (2021)
	DCF) 97% ERY) 93%		El-taliawy et al. (2018)
			Edefell et al. (2021)
O ₃ +Bio	MPL) 33% CLA) 38% PRP) 100% CBZ) 100% DCF) 100% SMX) 100% TMP) 100% BTZ) 40%	0,4 g O ₃ /g DOC	
Bio-O ₃ -Bio	CBZ) 40% DCF) 100% MPL) 100% SMX) 100% TMP) 40%	0,1 g O ₃ /g TOC for 33 min	De Wilt et al. (2018)

Schaar et al. (2010) onderzochten de invloed van ozonisatie als nabehandeling op de verwijderingsefficiëntie van vijf klassen geneesmiddelen in relatie tot biologische afbreekbaarheid. De implementatie van een nageschakelde ozonisatie met een specifieke dosis van 0,6 g O₃/g DOC resulteerde in het algemeen in een toename van de verwijdering in het totale zuiveringsproces (onder lage organische belasting condities), vooral voor CBZ en DCF, die niet verwijderd worden tijdens biologische behandeling, en voor de antibiotica ERY, SMX en TMP.

Yang et al. (2017) onderzochten dat een ozondosis hoger dan 1,5 mg O₃/l (i.e. 0,14 g O₃/g DOC) voornamelijk in verband werd gebracht met een verbeterde biologische afbreekbaarheid van de organische verbindingen in water. Pre- en post-ozonisatieprocessen vertoonden vergelijkbare prestaties bij het verwijderen van 8 belangrijke OMP van 14 gedetecteerd in het influent bij concentraties van 0,03 tot 200 ng/L. Het verwijderingspercentage van 6 op de 8 belangrijke verontreinigingen in beide modi was meer dan 88% bij een ozondosis van 1,0 mg/L (i.e. 0,1 g O₃/g DOC), behalve voor cafeïne en metoprolol. De hoge verwijdering werd voornamelijk toegeschreven aan de verbeterde biologische afbreekbaarheid van de weerbarstige organische verbinding. Deze studie toonde verder aan dat protonering ook effectief zou kunnen zijn bij het verwijderen van geneesmiddelen. Edefell et al. (2021) onderzochten de verwijdering van een breed spectrum aan geneesmiddelen onder verschillende redox-omstandigheden. Ze ontdekten dat beperkingen in substraatbeschikbaarheid voor de microbiologische flora de afbraak van verschillende geneesmiddelen zoals CLA en MPL kunnen versterken, maar een significante vermindering van de biomassa-groei veroorzaken. Bovendien vertoonden sommige verbindingen een wispelturig gedrag onder verschillende redoxomstandigheden en in aanwezigheid/afwezigheid van zuurstof en nitraat. De volledige verwijdering van CLA, SMX, TMP vond echter plaats onder alle omstandigheden. Terwijl de verwijdering van DCF en MPL enkel plaatsvond in aanwezigheid van moleculaire zuurstof onder anaërobe omstandigheden.

3.3 SAMENVATTING EVALUATIECRITERIA

In Tabel 3 wordt een beknopte samenvatting weergegeven van de literatuurstudie met betrekking tot de verschillende evaluatiecriteria.

TABEL 3

SAMENVATTING LITERAATUURSTUDIE STAND DER TECHNIEK OZON + BIOLOGISCHE BEHANDELING

Criteria	O ₃ + Bio hybrides
OMP Verwijdering (%)	>85% (@ 0,2 g O ₃ /g TOC) (de Wilt et al., 2018)
Energieconsumptie (kWh/m ³)	0,04-0,08 kWh/m ³ (STOWA rapport 41, 2020)
Kosten (€/m ³)	0,18-0,22 €/m ³ (STOWA rapport 41, 2020)
Ecotoxiciteit reductie (%)	50 – 75% (Postma et al., 2019)
CO ₂ -footprint	180 g CO ₂ /m ³ (@ 1,2 g O ₃ /g DOC) (STOWA rapport 41, 2020)

4

UITGEVOERD ONDERZOEK

4.1 RWZI PANHEEL (LAB-SCALE & PILOT SCALE, 2016)

4.1.1 ALGEMEEN

In het kader van een TKI-project (2016) vond reeds een samenwerking plaats tussen PureBlue Water (Voorheen: Advanced Waste Water Solutions), KWR, Waterschapsbedrijf Limburg (WBL), Waterleidingmaatschappij Limburg (WML) & Waterschap Roer & Overmaas om een aantal nieuwe inzichten m.b.t. geneesmiddelenverwijdering uit RWZI effluent te verwerven. In dit onderzoek werd IEX ingezet als voorbehandeling op een AOP om het organisch materiaal (EfOM) vooraf te verwijderen en dus de effectiviteit van nageschakelde AOP processen te verhogen. Daarnaast kwam in dit onderzoek het principe van ozon oxidatie in combinatie met een biologisch filter (MicroForce⁺⁺) uitvoerig aan bod. Hierbij werden in de eerste plaats testen uitgevoerd op kleine pilotschaal en nadien werd deze technologie ook op grotere schaal ingezet d.m.v. een pilot bij RWZI Panheel.

Bij een voorbehandeling met IEX werden voornamelijk de humuszuren verwijderd, terwijl bij ozon/biofiltratie de hydrofobe fractie van het EfOM verwijderd werd en tegelijk ook de microverontreinigingen. In deze fase had de combinatie ozon/biofiltratie veel potentieel, maar het onderzoek was toegespitst op een voorbehandeling voor UV/H₂O₂. Tijdens de kleine pilotfase werd ozon/biofiltratie ook positief beoordeeld als standalone alternatieve technologie voor verwijdering van API's.

Inmiddels werd deze technologie doorontwikkeld waaruit we hebben geleerd dat de technologie die oorspronkelijk werd ingezet als voorbehandeling voor andere AOP's (i.e. UV/O₃, UV/H₂O₂, AC) ook kan ingezet worden als holistische benadering voor de behandeling van medicijnresten. M.a.w. ozon & biologische filtratie/oxidatie kan als stand-alone AOP technologie rechtstreeks worden ingezet op het RWZI effluent om op een duurzame manier microverontreinigingen en prioritaire stoffen te verwijderen. Zo is uit dit onderzoek gebleken dat ozon/biofiltratie elektronrijke verbindingen zeer efficiënt kon afbreken (bv. metoprolol, atenolol, etc.). Tot slot werd in dit onderzoek een belangrijk voordeel van ozon/biologisch filter geconcludeerd, nl. dat er geen reststromen zijn en geen bromaat werd gevormd. Verder is uit dit onderzoek gebleken dat de ozon de complexe microverontreinigingen niet mineraliseert, maar eerder oxideert in kleinere molecules. Hieruit is gebleken dat de kleinere molecules makkelijker biodegradeerbaar werden, waardoor een biologische behandeling voor de hand ligt om te besparen in chemische oxidantia en energie.

Voor de efficiëntie berekeningen van deze pilot test werd een cocktail van een 40-tal farmaceutische stoffen (zie volgende secties) gedoseerd aan het RWZI effluent van Panheel. Het volledige rapport van dit TKI-onderzoek kan op verzoek worden gedeeld. In dit onderzoek vond geen evaluatie plaats over de CO₂-footprint van ozon + biofiltratie. Algemene, openbare projectinformatie kan verder geraadpleegd worden via volgende URL's:

- <https://www.kwrwater.nl/en/actueel/effective-removal-of-pharmaceuticals-from-wastewater/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=1JSNWZNS0LM&feature=youtu.be>

4.1.2 TESTPROTOCOL

EIGENSCHAPPEN VAN RWZI EFFLUENT PANHEEL

RWZI effluent werd op voorhand bemonsterd en chemisch gekarakteriseerd aan de hand van volgende procedure:

- Monsters werden genomen op weekdays onder droge weersomstandigheden
- Er werden 24 uur debiet proportionele monsters van het effluent genomen
- Monsters zijn genomen door een RWZI-medewerker
- Monstervolume: 2 x 5 L
- Een deel van de monsters is gebruikt voor analyse, de rest werd ingevroren

De CZV concentratie van het RWZI effluent bedroeg 62 mg/l & de bromide concentratie was 50 µg/l.

BATCH EXPERIMENTEN MET O₃/BIO

Hiervoor werd 1 m³ water bemonsterd waaraan 1 L van een 1-5 mg/l cocktail van 40 pharmaceuticals en metabolieten werd toegevoegd/gespiket, om zodoende een geneesmiddelenconcentratie van 1- 5 µg/l te verkrijgen.

De batch-experimenten voor ozonisatie zijn gebeurd in een labschaal AOP reactor. Deze werd bedreven met een ozondosis van 7 g/h. Het zuurstof/ozonmengsel werd ingebracht met een pomp en venturi-systeem. De flow van de pomp was 1500 l/h en de werkdruk 1 bar. Het totaalvolume gebruikt bij de start van de experimenten was 83 l, met een CZV concentratie van 62 mg/l, wat relatief hoog is. Als we uitgaan van een CZV/DOC verhouding van 3/1 dan schatten we DOC concentratie op ca. 21 mg/l.

TABEL 4

TESTVERLOOP O₃ + BIOFILTRATIE OP RWZI PANHEEL

Ozon dosis (g O ₃ /g CZV)	Totaal volume (l)	Totale vracht (g CZV)	Tijd monstername (u:mm:ss)
0	83	5,15	00:00:00
0,15	83	5,15	00:06:37
0,3	63	3,91	00:10:03
0,5	43	2,67	00:11:26

Telkens werd een monster van 20 liter genomen om verder te analyseren en te behandelen met de biofiltratie. Deze biofiltratie werd uitgevoerd met verschillende hydraulische verblijftijden (HRT), nl. 4 & 6 min.

In totaal nam de testperiode van dit TKI onderzoek (pilot-scale) ongeveer 4 maanden in beslag (19 oktober 2015 – eind februari 2016).

FIGUUR 4

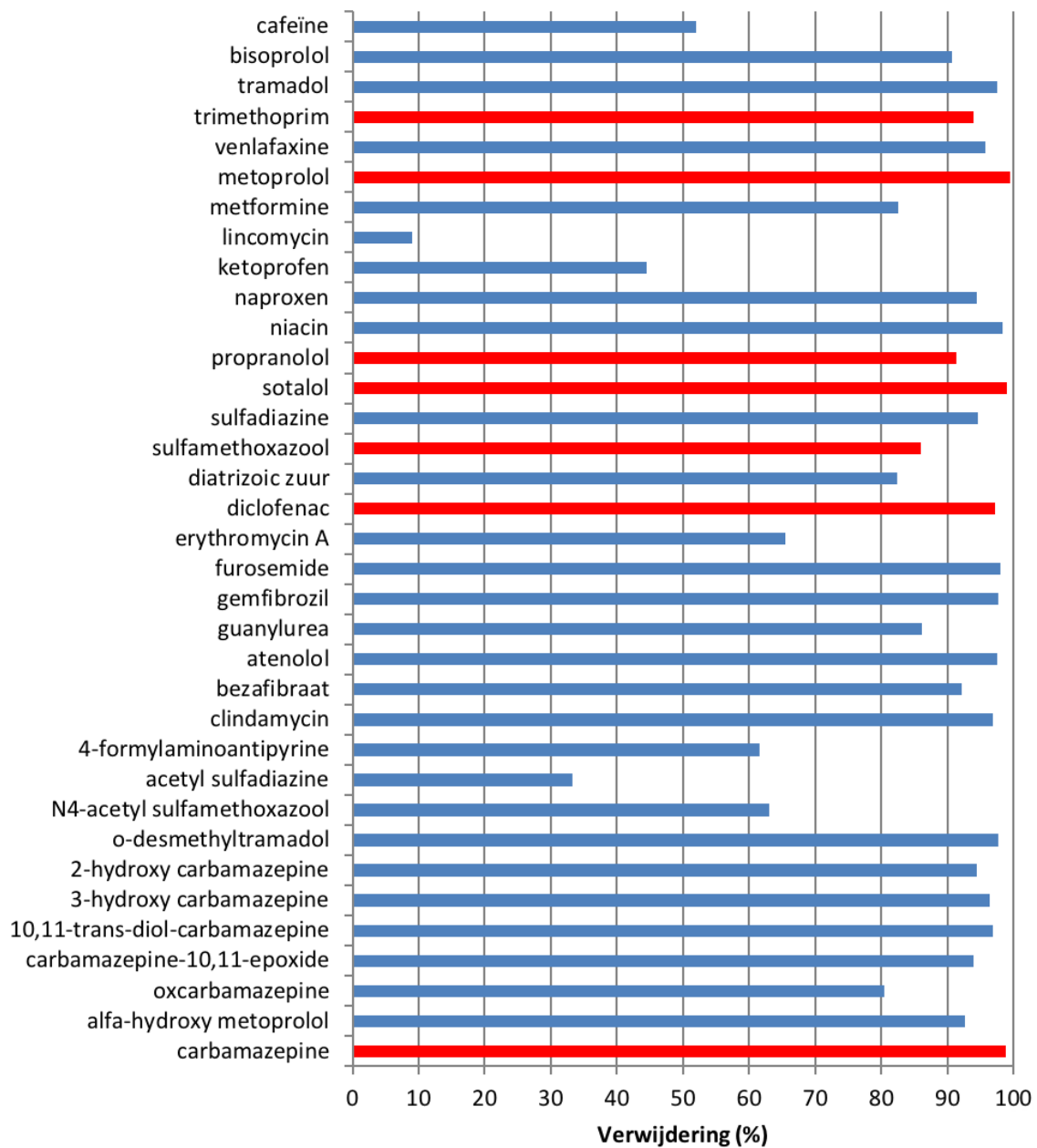
SFEERBEELDEN PILOT TESTEN BIJ RWZI PANHEEL. OPSTELLING TESTINSTALLATIE (LINKS). AANSLUITING OP DE RWZI (RECHTS)



4.1.3 RESULTATEN

In deze paragraaf worden de verwijderingsrendementen van de verschillende geanalyseerde API's opgelijst (ca. 40 farmaceutische stoffen en metabolieten). In het rood worden de actieve stoffen weergegeven die ook in dit STOWA onderzoek werden opgenomen (7 van de 11). Dit zijn de resultaten van de laagste ozondosering (ca. 0,15 g O₃/g CZV ≈ 0,45 g O₃/g DOC) & kortste HRT in het biofilter (ca. 4 min.). Hieruit kan worden afgeleid dat de minimale verwijderingsrendementen voor de 7 gidsstoffen ruim worden gehaald. Dit impliceert dat in verder onderzoek de ozon dosis nog verder kan worden verlaagd in combinatie met het biofilter met als doelstelling dat nog steeds meer dan 70% verwijdering van de API's wordt gegarandeerd. Verder werd ook aangetoond dat geen bromaat werd gevormd (<0,5 µg/l), zelfs niet bij een toegepaste O₃ concentratie van 23 mg O₃/l (≈1 g O₃/g DOC).

FIGUUR 5 VERWIJDERINGSRENDEMENT O₃/BIOFILTRATIE RWZI PANHEEL (2016) – GIDSSTOFFEN OPGENOMEN IN IPMV 2020 IN ROOD



4.2 INDUSTRIEEL (FULL-SCALE, FRANKRIJK, 2018)

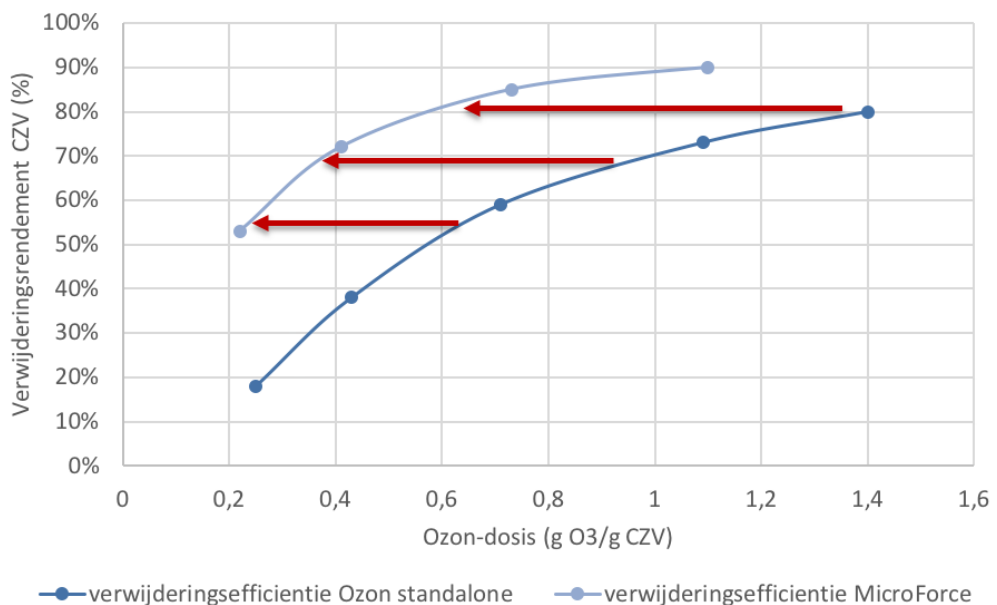
4.2.1 ALGEMEEN

De MicroForce⁺⁺ technologie (O₃ + Bio) werd reeds succesvol toegepast op een chemische, industriële afvalwaterstroom in Zuid-Frankrijk waarbij organisch materiaal en recalcitrante microverontreinigingen worden verwijderd vooraleer de afvalwaterstroom rechtstreeks wordt geloosd op het oppervlaktewater. Deze full-scale installatie behandelt een sterker geconcentreerde afvalwaterstroom (CZV ≈ 500-1500 mg O₂/l) aan een debiet van ongeveer 12 m³/h, wat neerkomt op een belasting van ongeveer 150-300 kg CZV/d. In een vergelijkende studie met stand-alone ozon werd aangetoond dat de ozondosis met 50-60% kon worden verlaagd met een beter rendement voor de verwijdering van de organische pollutanten. Voor deze toepassing is het de doelstelling om aanwezige microverontreinigingen met meer dan 95-99% te verwijderen (Aniline : 98%, Ethylenethiourea (ETU): 99%, Dibutylamine (DBA): 98%, MTSC: 99%, Diphenylthiourea (DPTU): 98%, TMTM: 98%, Amines: 95%).

Twee pilots (stand-alone O₃ + MicroForce⁺⁺) werden gedurende een periode van 12 maanden met elkaar vergeleken d.m.v. continue, debiet proportionele meting en bemonstering on site. Deze full-scale installatie is sinds 2018 operationeel en wordt tot op heden volledig binnen de vooropgestelde specificaties en targets succesvol bedreven.

4.2.2 RESULTATEN

FIGUUR 6 VERGELIJKING PERFORMANTIE CZV VERWIJDERING VS. O₃ DOSIS VOOR STAND-ALONE O₃ & MICROFORCE⁺⁺



Uit de resultaten van de langdurige pilottesten (Cfr. Figuur 6) op de industriële site in Frankrijk kunnen we afleiden dat er met MicroForce⁺⁺ minstens 50% ozon kan gespaard t.o.v. stand-alone technologie voor hetzelfde CZV verwijderingsrendement.

4.3 MEDIUM-PILOT SCALE (PUREBLUE, KAPELLEBRUG, 2021)

4.3.1 ALGEMEEN

In het voorjaar van 2021 werd een MicroForce⁺⁺ pilotinstallatie ontwikkeld en gebouwd door PureBlue zodoende de verschillende technologische principes op kleine schaal te kunnen

onderzoeken met een representatieve afvalwatermatrix die aansluit bij de voorwaarden opgelegd door STOWA. De pilot kan worden beschouwd als zijnde ‘medium-sized’ aangezien deze in staat is om minstens 300 l/dag RWZI-effluent te behandelen. Voor deze testen werd wekelijks 2 tot 4 m³ effluent opgehaald in IBC's bij RWZI Hulst en vervolgens in de testfaciliteiten bij PureBlue gebufferd in een 5 m³ buffervat. Op die manier kon de continuïteit van de testen worden geborgd en werden de fluctuaties in de afvalwatermatrix (RWA versus DWA) gedeeltelijk opgevangen. De effluentkwaliteit werd gedurende 91 dagen opgevolgd aan de hand van steekmonsters en de verschillende chemische parameters worden weergegeven in onderstaande tabel.

TABEL 5 EFFLUENTKwaliteit RWZI HULST (GEMIDDELTE 91 DAGEN)

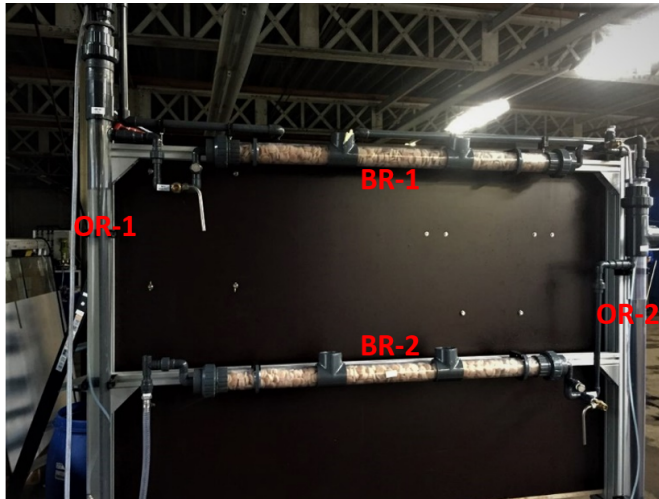
Parameter	Gemiddelde ± STDEV	Eenheid
CZV	33,2 ± 13,4	mg/l
tN	2 ± 0,7	mg/l
N-NH ₄ ⁺	0,7 ± 0,1	mg/l
N-NO ₂ ⁻	0,1 ± 0,1	mg/l
N- NO ₃ ⁻	0,4 ± 0,3	mg/l
tP	1,7 ± 0,5	mg/l
EC	509,3 ± 118,2	(µS/cm)
TBT	6,5 ± 3,6	NTU
T	16,8 ± 3,4	°C
pH	6,7 ± 0,3	(-)
UVT ₂₅₄	53,44 ± 5,04	%
SS	<0,1	mg/l

De testpilot is opgedeeld uit twee delen die van elkaar gescheiden zijn door een verticale wand (cfr. Figuur 7 en 8), waarbij de voorzijde wordt benut om ozon op te wekken en te distribueren naar de verschillende ozonreactoren. Hierbij wordt gebruik gemaakt van ozongeneratoren met een capaciteit van 100 mg O₃/h. De exacte dosis die naar de reactoren wordt gestuurd kan worden geregeld aan de hand van een geautomatiseerd pulse/pauze systeem met driewegkleppen, waarbij de pulse/pauze ratio's van 100/0, 50/50, & 25/75 overeenkomen met 100, 50 & 25 mg O₃/h. Het overbodige ozon, alsook het onopgeloste ozon in het afgas wordt over een ozondestructiemodule geleid. Een ozon analyzer laat ons toe de exacte hoeveelheid gedoseerde ozon, alsook de oplosefficiëntie van de ozonreactoren en de ozontransfer te bepalen.

FIGUUR 7 MICROFORCE** PILOT - GASLIJDIG



FIGUUR 8

MICROFORCE⁺⁺ PILOT - WATERZIJDIG

Op de andere zijde van de pilot staan de verschillende reactoren gemonteerd, nl. een eerste ozonreactor (OR-1), een eerste biofilmreactor (BR-1), een tweede ozonreactor (OR-2) & tot slot een tweede biofilmreactor (BR-2). De ozonreactoren zijn telkens ozon bellenkolommen waarvan de optimale bellengrootte versus gasdebiet op voorhand werd vastgelegd voor optimale ozontransfer. De biofilmreactoren zijn horizontale biofilters opgevuld met cirkelvormig HDPE dragermateriaal ontwikkeld door PureBlue. Alle reactoren werden bovendien vervaardigd uit transparant PVC ten einde het proces, de efficiëntie en eventuele calamiteiten visueel op te volgen. Een gedetailleerde beschrijving van de verschillende waterzijdige componenten wordt weergegeven in Tabel 6.

TABEL 6

SPECIFICATIES ONDERDELEN MICROFORCE⁺⁺ PILOT

Onderdeel	Parameter	Waarde
Carrier	Materiaal	HDPE
	Specifieke oppervlaktedichtheid, m ² /m ³	800
	Materiaal	PVC
	Afmetingen (H×buitenD×binnenD), mm	1200 × 56 × 52
Ozonreactor	HRT (min)	11
	Gasdebiet, Nm ³ /h	0,1
	Aantal diffusers	2
	Diameter poriën diffusers, µm	1
	Debiet, m ³ /week	2
Biofilmreactor	Materiaal	PVC
	Afmetingen (H×buitenD×binnenD), mm	1000× 56 × 52
	HRT (min)	10
Luchtfilters	Materiaal	PVC
	Afmetingen (H×buitenD×binnenD), mm	620 × 56 × 52

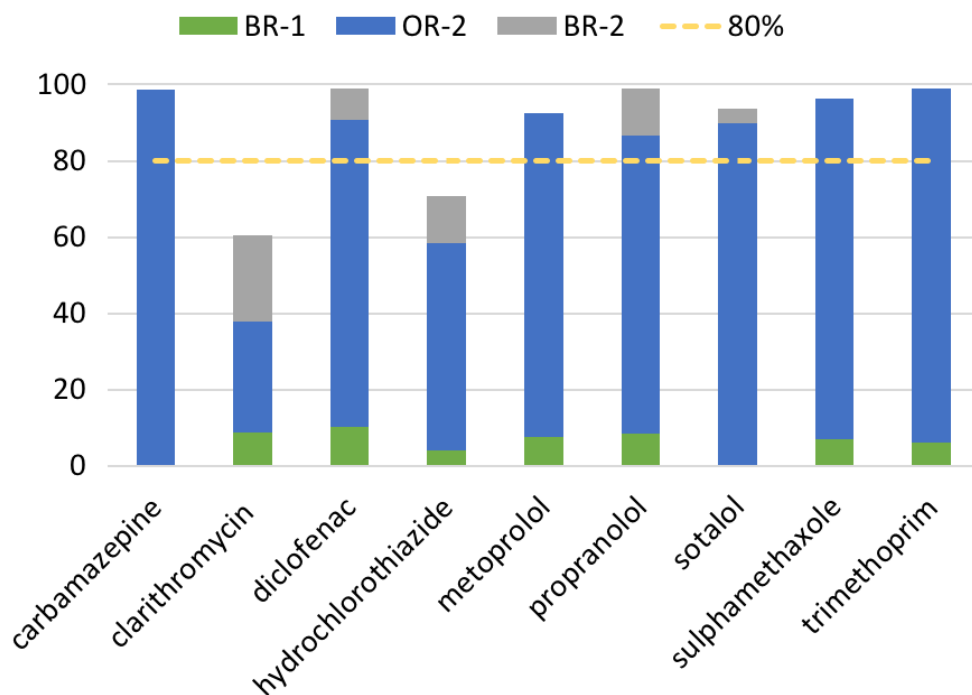
De pilot laat ons toe om bij verschillende ozondosissen volgende zaken te onderzoeken:

- Specialisatie van microbiologische flora door lage belasting en hoge slijbleeftijd => wat is het effect op verwijdering van OMP in iedere stap?
- Wat is het effect van de aanwezigheid nutriënten op O₃ scavenging en OMP verwijdering?
- Toxiciteit van O₃ naar bio-compartimenten?
- Design optimalisatie

4.3.2 RESULTATEN

Om na te gaan wat de invloed en bijdrage is van de verschillende biologische compartimenten werd de pilot continu bedreven gedurende 30 dagen om de biofilm te laten adapteren aan het geozoniseerd influent van MicroForce⁺⁺ (i.e. het effluent van RWZI Hulst). Om de 72h werden steekmonsters genomen om de chemische karakteristieken (CZV, NH₄-N, UVT, NO₃-N, NO₂-N, TBT, SS,..) na ieder compartiment te bepalen. Daarnaast werden op het einde van de test (na ca. 30 dagen) ook steekmonsters genomen na zowel OR-1, BR-1, OR-2, BR-2 om een analyse op medicijnresten en andere OMP uit te voeren. Er wordt verondersteld dat door de aanwezigheid van de buffering van het effluent eventuele RWA/DWA pieken werden opgevangen waardoor het steekmonster als representatief kan worden beschouwd. De concentraties van gidsstoffen en kandidaat gidsstoffen in het effluent van RWZI Hulst (i.e. influent van MicroForce⁺⁺) worden weergegeven in APPENDIX A. De analyses werden uitbesteed bij Aqualab Zuid, die een standaard protocol hanteren waarbij ca. 88 organische microverontreinigingen worden geanalyseerd via High Performance Liquid Chromatography gekoppeld aan tandem massaspectrometrie (HPLC-MS/MS). Van de 88 organische microverontreinigingen zijn er 9 opgenomen in de lijst van gidsstoffen voor het IPMV (2020). De totale verwijderingsrendementen bij een dosis van 0,27 g O₃/g DOC in iedere ozonreactor worden weergegeven in Figuur 9.

FIGUUR 9 RESULTATEN PILOTONDERZOEK MICROFORCE⁺⁺ - ANALYSES OMP (KAPELLEBRUG, 2021)



Uit de resultaten kunnen we afleiden dat van de 9 stoffen die zijn opgenomen in de lijst met gidsstoffen (2020), alle stoffen behalve clarithomycine en hydrochlorotiazide worden verwijderd voor meer dan 80%. Hierbij willen we opmerken dat door een technische storing het eerste ozonisatiecompartiment niet actief was op het moment van de analyse, dat betekent dus dat bovenstaande verwijderingsrendementen werden bereikt met een totale ozondosis van amper 0,27 g O₃/g DOC. Dat zien we ook aan het feit dat OR1 geen bijdrage heeft geleverd aan de totale verwijdering. Daarnaast zien we ook dat er voor alle microverontreinigingen, met uitzondering van carbamazepine, een beperkte bijdrage werd geleverd door de biologische compartimenten. Aan het verschil tussen de groene (BR-1) en grijze bijdrages (BR-2) in Figuur 9 kunnen we verder ook zien dat de biologische bijdrage iets groter wordt na een

eerste ozonisatiestap (in dit geval OR-2), wat mogelijk wijst op de productie van biodegradeerbare metabolieten die verdere biologische mineralisatie mogelijk maken. Anderzijds kan dit ook een indicatie zijn dat de biofilm in de tweede biologische reactor specifiek en beter is geadapteerd aan het verwerken van de resterende ouderverbindingen, wat mogelijks te wijten is aan het feit dat een deel van het organisch materiaal reeds verwijderd is en de snelgroeiende organismen zich minder gaan ontwikkelen. Hierdoor verkleint de kans op het overgroeien van de trager groeiende micro-organismen die zich specialiseren in de behandeling van microverontreinigingen.

De biologische bijdrage is in sommige situaties echter beperkt omdat het ozonisatieproces vaak al een groot deel van de verwijdering voor zich neemt. Hierdoor zijn de moedercomponenten van de OMP in kwestie vaak volledig al verdwenen na een eerste ozonisatie waardoor geen biologische bijdrage meer kan optreden. Echter, de biologische bijdrage kan wel nog steeds van toepassing zijn op de transformatieproducten, die niet werden geanalyseerd maar wel belangrijk zijn voor de algemene ecotoxiciteit van het water. Dit kan er op wijzen op dat de ozondosis nog kan verlaagd worden en zodus de biologische bijdrages in de laatste stap nog vergroot kan worden. Verder is het belangrijk dat we rekening houden met het feit dat er een minimum hoeveelheid ozon zal nodig zijn om de moedercomponenten af te breken en biologisch afbreekbaar te maken.

4.3.3 CONCLUSIES

Dit onderzoek stelt ons in staat om de verschillende vooropgestelde onderzoeksvragen te beantwoorden:

- Er is een > 80% verwijdering van 7/11 organische microverontreinigingen mogelijk met een ozondosis van 0,27 g O₃/ g DOC in combinatie met een biologische filtratiestap. Hierbij zijn de biologische bijdrages voor clarithomycine, diclofenac, hydrochlorothiazine, metropolol, propanolol, sotalol zichtbaar (maar eerder beperkt) en deze worden verwacht te stijgen als de ozondosis verder verlaagd wordt en de adaptatietijd van de biofilm wordt vergroot. Echter is waakzaamheid geboden bij het verder verlagen van de ozondosis omdat we mogelijks de doelstoffen (moedercomponenten) wel verwijderen maar er transformatieproducten, die overigens niet altijd gemeten worden, achterblijven.
- Het effect van NH₄-N scavenging werd gemonitord en gerapporteerd. Hierbij is gebleken dat de scavenging ratio van ozon bij een NH₄-N concentratie van 1,4 mg/l ongeveer 2 % bedraagt. Dat wil zeggen dat 2 % van het geïntroduceerde ozon verloren gaat aan de oxidatie van NH₄ naar NO₃ waardoor deze niet meer beschikbaar is voor de verwijdering van OMP. Bij een NH₄-N concentratie in het influent van 2,1 mg/l kan de scavenging ratio oplopen tot 25 %. Het is dus belangrijk om deze parameter in kaart te brengen en indien nodig een voorbehandeling te voorzien om zo weinig mogelijk ozon te verliezen.
- Er werden geen toxiciteitsrisico's waargenomen voor de biofilm door de aanwezigheid van residueel ozon. Hierbij werd het dragermateriaal op regelmatige basis microscopisch onderzocht en werd de dikte van de biofilm en haar activiteit gevolgd.
- Voor de optimalisatie van het design kijken we inmiddels naar alternatieve dragermaterialen om de footprint van de installatie nog verder te verlagen, alsook naar de validatie van de testresultaten met andere ozon oplosmethodes. Deze optimalisaties kunnen worden onderzocht in de vervolgfase van het IPMV.

5

GRONDSLAGEN DIMENSIONERING

De resultaten en bevindingen uit de literatuurstudie (Hoofdstuk 3) en uitgevoerd onderzoek (Hoofdstuk 4) dienen als grondslag voor de dimensionering van de MicroForce⁺⁺ voor het bedienen van een RWZI met schaalgrootte 100.000 IE. Hiervoor delen we de MicroForce⁺⁺ installatie op in twee delen, enerzijds de ozonisatie en anderzijds de biologische filtratie. Bovendien worden alle uitgangspunten voor de berekeningen ook volledig weergegeven in APPENDIX C.

5.1 OZONISATIE

Voor het ozonisatiegedeelte werd aangenomen dat we een ozonbesparing van 50% kunnen bewerkstelligen t.o.v. de stand der techniek, wat neerkomt op een ozondosis van ca. 0,35 g O₃/g DOC. Uit de testen die werden uitgevoerd met MicroForce⁺⁺ in 2021 (Hoofdstuk 4) op medium schaal is gebleken dat 0,35 g O₃/ g DOC ruim voldoende moet zijn om de verwijderingsrendementen te behalen die verwacht worden binnen het IPMV. Bovendien wordt de totale ozondosis verspreid over twee verschillende reactoren waardoor de ozondosis per reactor ongeveer 0,175 g O₃/ g DOC zal bedragen.

Voor een RWZI van 100.000 IE, corresponderend met een hydraulische capaciteit van 1040 m³/h. met een gemiddelde DOC concentratie van 11 mg/l betekent dit dus dat er 3,85 kg O₃/h zal nodig zijn om genoeg oxidatiekracht te hebben voor de chemische omzetting van OMP.

5.2 BIOLOGISCHE FILTRATIE

De biologische filtratie werd gedimensioneerd op basis van verschillende factoren, zijnde de bergingscapaciteit van het filter, de beschikbare oppervlakte voor de biofilm om te groeien en de beschikbare ruimte om de biofilm reactoren compact, mobiel en modulair te houden. Verdere details over de verschillende parameters en de berekeningen worden rechtstreeks toegelicht in hoofdstuk 6.

6

EVALUATIECRITERIA HAALBAARHEIDSTUDIE

In dit hoofdstuk zal MicroForce⁺⁺ geëvalueerd worden op verschillende criteria, met in het bijzonder de CO₂ footprint en de kosten. Alle berekeningen die werden gemaakt voor het bekomen van onderstaande resultaten worden weergegeven in APPENDIX C.

6.1 CO₂ FOOTPRINT

In deze paragraaf worden alle onderdelen die een bijdrage leveren aan de CO₂ footprint van de installatie in detail beschreven. Hiervoor werd gebruik gemaakt van het CO₂ rekenmodel dat werd aangeleverd door STOWA in de eerste fase van het IPMV (aanvraagprocedure – call for proposals). Een overzicht van alle ingevulde waarden in Excel voor deze haalbaarheidsstudie wordt weergegeven in de Appendix B.

6.1.1 ENERGIE

Als eerste criterium in deze studie beschouwen we het totale energieverbruik van de MicroForce⁺⁺ installatie, rekening houdend met de assumpties en bevindingen die werden gemaakt in voorgaand(e) hoofdstuk(ken). Onderstaande berekeningen worden overigens ook in tabelvorm weergegeven in Appendix C.

Zoals bij de meeste chemische oxidatietechnologieën zal energie een van de belangrijkste contributies zijn aan de totale CO₂ footprint. Bij MicroForce⁺⁺ kunnen we het totale energieverbruik onderverdelen in twee aparte categorieën, nl. het energieverbruik voor het opwekken van ozon en de pompenergie nodig voor het opvoeren van het te behandelen waterdebiet en de hoogte van de biofilters (i.e. 2 meter of 0,2 bar)

Zuurstof zal worden omgezet in ozon. Dit proces vraagt de meeste energie omdat we een hoge concentratie ozon (ca. 200 g/Nm³) willen toepassen in het systeem ten gunste van een efficiënte ozontransfer in het water. Concreet zullen de modulaire ozongeneratoren zo'n 10 kWh verbruiken per kg geproduceerd ozon. Hierbij merken we op dat de koelingsenergie niet in rekening hoeft te worden gebracht, gezien de koelingsenergie zal worden gerecupereerd door een warmtewisselaar die de energie gebruikt van het effluent van de RWZI. Dit maakt de ozongenerator ook uniek in haar soort omdat deze in staat is om te worden bedreven aan een relatief hoge koelingstemperatuur van 20 – 25 graden Celcius, zonder dat er een significant verlies aan ozonproductie optreedt. De monitoring van het effluent in RWZI Hulst leert ons dat de temperatuur van het effluent gemiddeld 17 graden Celcius bedraagt in zomertijd (Juni-Augustus 2021), waardoor de Δt altijd ruim voldoende is.

Daarnaast moet het ozon worden ingebracht in het water. Dit kan op verschillende manieren, waarbij de roterende keramische schijven op dit moment als meest duurzame techniek wordt ingeschat qua energieverbruik, met een totale energieconsumptie van ongeveer 2 kWh per kg geproduceerd ozon. Met deze gegevens komt het totale energieverbruik ten behoeve van de productie en inbrenging van ozon op 12 kWh/kg O₃, wat neerkomt op 0,046 kWh/m³ behandeld water aan een dosis van 0,35 g O₃/g DOC bij een gemiddelde DOC concentratie van 11 mg/l.

Naast het produceren van ozon hebben we ook een verbruik van pompenergie voor het realiseren van de opvoerhoogte voor de filters (ca. 2 meter) en eventuele beluchting in de biofilm-reactoren voor het (extra) losschudden van afgevangen deeltjes, indien nodig. Voor een RWZI van 100.000 IE (ca. 1040 m³/h) zal het opgesteld vermogen hiervoor ca. 17kW bedragen, corresponderend met 0,016 kWh/m³.

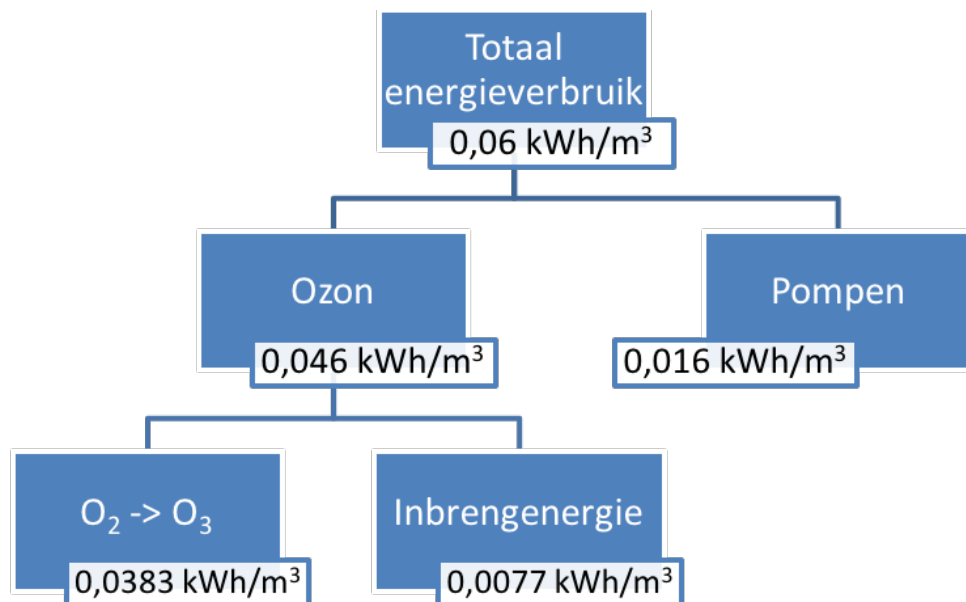
In totaal komen we op een totaal energieverbruik van 0,06 kWh/m³, wat volgens de rekensleutels (i.e. 0,53 kg CO₂ /kWh) neerkomt op zo'n **33 g CO₂/m³**.

Verder zal er volgens de vooropgestelde richtlijnen geen reductie in CO₂ footprint worden meegerekend door het inzetten van duurzame energiebronnen of het recupereren van andere energiedragers. Door de kleine footprint van de installatie zal het opwekken van zonne-energie op het dak van de installatie ook geen significante bijdrage kunnen leveren aan de totale energievraag. Met een beschikbare oppervlakte van ca. 100 m² en een output van zonnepanelen 200 kWh/m²/jaar zou de te recupereren energie slechts 0,002 kWh/m³ of zo'n 3 % van de totale energievraag kunnen dekken.

Een overzicht van alle contributies met betrekking tot het energieverbruik wordt weergegeven in onderstaand boomdiagram (Figuur 10).

FIGUUR 10

OVERZICHT ENERGIEVERBRUIK MICROFOCE**



6.1.2 HULPSTOFFEN, SLIBPRODUCTIE, SPOELWATER, OPVOERHOOGTE EN CIVIELE MATERIALEN

Het gebruik van materialen en hulpstoffen heeft uiteraard ook een impact op de globale CO₂ footprint. Aangezien MicroForce⁺⁺ gedeeltelijk gedreven wordt door een ozonisatieproces zal de belangrijkste (en enige) hulpstof vloeibare zuurstof zijn. Voor het opwekken van 0,35 g O₃/g DOC hebben we voor een RWZI van 100.000 IE met een gemiddelde DOC concentratie van 11 mg/l zo'n 3,85 g O₃/m³ nodig. Voor het berekenen van de benodigde hoeveelheid zuurstof baseren we ons op de verwachte consumptie van LOX in de referentietechnologie (i.e. Ozon i.c.m. zandfiltratie). In het CO₂ rekenmodel kunnen we de totale LOX vraag berekenen door de ozonvraag (0,35 g O₃/g DOC) te vermenigvuldigen met de verwachte omzettingsefficiëntie (conventioneel 10%), de jaarlijks te behandelen flow en de DOC concentratie, wat neerkomt op ca. 206.527 kg LOX. Als we deze waarde invullen in het CO₂ rekenmodel dan vinden we dat de bijdrage aan de CO₂ footprint van LOX ca. 17 g CO₂/m³ bedraagt.

Door de aanwezigheid van een biologisch filter zal er enerzijds slib gevormd worden en zullen anderzijds deeltjes worden afgevangen. Het gevormde slib is te wijten aan de continue aangroei van biofilm. Het afvangen van deeltjes daarentegen is enkel te wijten aan de extra fysische scheiding van uitspoelende deeltjes uit de NBT die plaatsvindt door de filterende eigenschappen van het dragermateriaal en dient dus tegelijk als extra effluent polishing. Voor de berekening van gevormd slib gaan we ervan uit dat ongeveer 5 mg/l CZV effectief wordt behandeld in de biologische compartimenten en de jarenlange expertise van PureBlue met biofilm-op-drager technologie leert dat we een ratio slibvorming/CZV behandeling kunnen aannemen van ca. 1/3. Rekening houdend met de minimale hydraulische capaciteit van een RWZI corresponderend met 100.000 IE (i.e. 1040 m³/h) komt dit neer op ca. 15 ton extra slib (DS) op jaarbasis.

Voor het berekenen van het slib dat wordt geproduceerd bij het afvangen van uitspoelende deeltjes werd een worst case scenario van 10 mg/l SS aangenomen. Indien deze hoeveelheid deeltjes worden afgevangen, zelfs bij een (onverdunde) hydraulische capaciteit van 1040 m³/h, dan zal de filtratie verantwoordelijk zijn voor een extra slibproductie van 91 ton slib (DS) op jaarbasis. Het gevormde slib kan retour gestuurd worden richting de AT van de RWZI waar het uiteindelijk wordt opgenomen in de globale slibverwerking.

Dit brengt de totale jaarlijkse hoeveelheid extra gevormd slib op ca. 106 ton, wat ten opzichte van een standaard RWZI zonder nabehandeling met een slibproductie van 4100 ton/jaar eerder beperkt is. Dit vertaalt zich ook in de lage bijdrage aan de CO₂ footprint gezien de extra slibproductie overeenkomt met een CO₂ footprint van slechts 1 g CO₂/m³.

Zoals gebruikelijk is voor fysische scheidingstechnieken zal het filter teruggespoeld worden wanneer de bergcapaciteit bereikt wordt. De filters hebben elk een volume van 50 m³, waarvan 70 % gevuld is met dragermateriaal. We beschouwen verder een maximale belading van het filter met 3 g DS/l. Dat wil zeggen dat elk filter een bergingscapaciteit heeft van ongeveer 105 kg DS. Uit voorgaande berekeningen met betrekking tot de totale slibproductie weten we dat er maximaal 12 kg slib wordt gevormd per uur (i.e. 106 ton/jaar). Hieruit volgt dat de standtijd van de filters ca. 8 uur en 40 minuten zal bedragen. Op jaarbasis betekent dit dat er maximaal 1011 backwashes zullen plaatsvinden onder worst case omstandigheden (i.e. met een assumptie dat er 10 mg/l SS wordt afgevangen). Het terugspoelmechanisme van MicroForce⁺⁺ is echter zeer duurzaam in waterverbruik. Het mechanisme, zoals toegelicht in hoofdstuk 2, houdt in dat het filter eenmalig volledig moet worden gevuld met spoelwater per backwash. Door het verhogen van het waterniveau van de bioreactoren zal het

filterbed in beweging worden gebracht en losgeschud. Nadien kan het water - verrijkt met losgeslagen slibdeeltjes - worden afgevoerd. Dit betekent dat iedere backwash slechts 50 m³ water zal bedragen. Op jaarbasis voor 2 filters (aan maximaal 1011 backwashes/jaar) komt dit neer op zo'n 101.082 m³ spoelwater, rekening houdend met een totaal behandeld debiet van 7.665.000 m³ vinden we dat het spoelwaterpercentage 1,32% bedraagt, wat overeenkomt met een bijdrage van 1 g CO₂/m³ aan de CO₂ footprint.

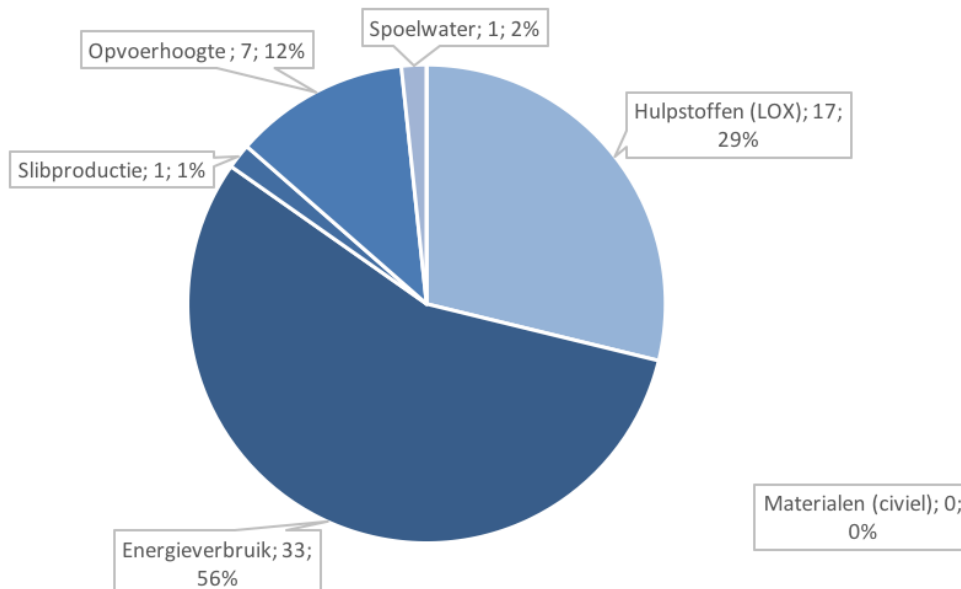
Daarnaast hebben we ook het verbruik aan materialen voor civiele werkzaamheden. Gezien MicroForce⁺⁺ in modulaire en mobiele units kan worden aangeleverd werd aangenomen dat de benodigde civiele materialen gelijkaardig zullen zijn aan die van de referentietechnologie (Ozon + zandfiltratie), wat neerkomt op zo'n 250 ton gewapend beton. Volgens de modelberekening aangeleverd door STOWA (Appendix) levert 250 ton gewapend beton een bijdrage van 0-1 g CO₂/m³ aan de CO₂ footprint.

Tot slot wordt ook de opvoerhoogte in rekening worden gebracht. Gezien de MicroForce⁺⁺ installaties voorzien zijn van de nodige equipment om zelf de opvoerhoogte te leveren (cfr. pompenergie), werd een totale extra opvoerhoogte beschouwd van 3 m. Dit komt overeen met een bijdrage van 7 g CO₂/m³ aan de CO₂ footprint.

6.1.3 TOTALE CO₂ FOOTPRINT

Als we de optelsom maken van de CO₂ footprint van alle voorgaande posten komen we uit op een totale CO₂ footprint van 59 g CO₂/m³ voor de nabehandelingstechniek. Hierbij merken we op dat het energieverbruik het grootste aandeel heeft in de totale CO₂ footprint (56%), met daaropvolgend LOX (29%), de opvoerhoogte (12%), het spoel water (2%), de slibafvoer (1 %) en de materialen voor civiele werkzaamheden (0%). Een overzicht van de verschillende contributies wordt weergegeven in Figuur 11.

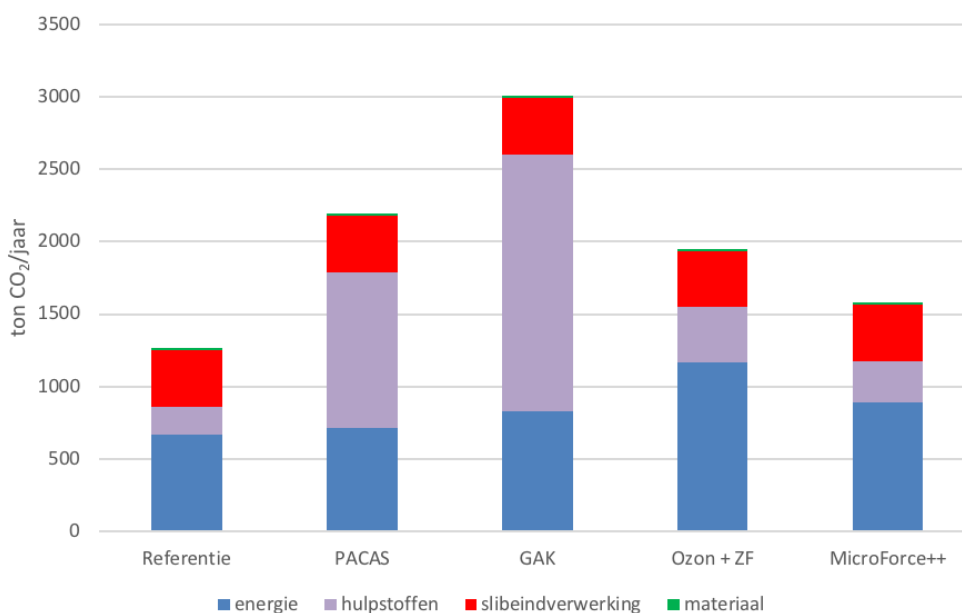
FIGUUR 11 OVERZICHT CO₂ FOOTPRINT MICROFORCE⁺⁺ (59 G CO₂/M³)



Om het aandeel van de nageschakelde technologie in de totale CO₂ footprint van de RWZI in perspectief te plaatsen wordt in Figuur 12 de totale CO₂ footprint van de volledige RWZI zonder nabehandeling weergegeven (i.e. 'referentie') naast een aantal nageschakelde tech-

nologieën die conventioneel reeds worden toegepast ter preventie van OMP emissies in het milieu. Hier kan worden opgemerkt dat actieve kool gebaseerde nabehandelingstechnieken de totale CO₂ footprint van de RWZI quasi verdubbelen. Als we naar ozongebaseerde technieken kijken (O₃ + ZF) dan zien we een verbetering t.o.v. de op actieve kool gebaseerde technieken. Dit is voornamelijk te wijten aan het feit dat minder niet-hernieuwbare hulpstoffen kunnen worden gebruikt. Het nadeel bij stand-alone ozon is het verhoogde energieverbruik. Als we tot slot naar MicroForce⁺⁺ kijken dan zien we dat de totale CO₂ footprint slechts licht stijgt t.o.v. de referentiesituatie zonder nabehandeling en dat deze stijging bijna volledig te wijten is aan de energie die nodig is om het ozon op te wekken en het gebruik van hulpstoffen (i.e. LOX). Daarnaast is het aandeel van materiaal en de slibeindverwerking van de nabehandeling met MicroForce⁺⁺ eerder beperkt.

FIGUUR 12 CO₂ FOOTPRINT MICROFORCE T.O.V. STANDAARD RWZI ZONDER NABEHANDLING (REFERENTIE), MET ALTERNATIEVE NAGESCHAKELDE TECHNOLOGIEËN (PACAS, GAK, OZON + ZF) EN MET MICROFORCE⁺⁺



6.2 KOSTEN

De total cost of ownership (TCO) van MicroForce⁺⁺ werd uitgerekend op basis van de richtlijnen opgesteld door STOWA, waarbij het onderscheid werd gemaakt tussen de operationele kosten (OPEX) enerzijds en de investeringskosten (CAPEX) anderzijds.

6.2.1 INVESTERINGSKOSTEN (CAPEX)

Om een RWZI te kunnen bedienen van 100.000 IE, corresponderend met een totaal behandelingsdebiet van 1040 m³/h, werden totale kale investeringskosten berekend van ca. 1.8 miljoen euro. De investeringskosten zijn verder opgebouwd uit civiele onderdelen (20%), werktuigbouwkundige en elektrische onderdelen (70%) en procesautomatisering (10%). Een breakdown van deze kosten in de vorm van een scope of supply worden weergegeven in Appendix C. Als we hier de aannemerskosten (25%), onvolledigheidsfactor (25%) en stichtingskosten (80%) in verwerken conform de voorschriften van STOWA dan komen we uit op totale investeringskosten van ca. 5 miljoen euro. Als de minimale levensduur van de installatie wordt vastgelegd op minstens 20 jaar dan bedraagt de CAPEX uiteindelijk maximaal 0,028 €/m³.

TABEL 7

OVERZICHT BEREKENING CAPEX

Type kosten	Bedrag (euro)
Kale Investeringskosten	€ 1.800.000
Aannemerskosten (25%)	€ 450.000
Investering + Aannemerskosten	€ 2.250.000
Onvolledigheidsfactor (25%)	€ 562.500
Investering + Aannemer + Onvolledigheid	€ 2.812.500
Stichtingskosten (80%)	€ 2.250.000
Totale CAPEX	€ 5.062.500

OPERATIONELE KOSTEN (OPEX)

De operationele kosten bij MicroForce⁺⁺ bestaan uit onderhoudskosten, kapitaalslasten, slibverwerking, personeelskosten, energieverbruik en spoelwaterverwerking. Een overzicht van de berekening werd toegevoegd aan Appendix C. Hierbij werden volgende richtlijnen in beschouwing genomen.

TABEL 8

RICHTLIJNEN PERSONEELSKOSTEN, ELEKTRICITEIT, HULPSTOFFEN, SLIBVERWERKING EN SPOELWATER

Kosten	Waarde	Eenheid
Personeelskosten	50000	€/FTE/jaar
Elektriciteit	0,1	€/kWh
Polymeer	3	€/kg
Zuivere zuurstof (LOX)	0,2	€/kg
FeCl ₃ /AlCl ₃	120	€/ton FeCl ₃ /AlCl ₃
PAC	2	€/kg
GAC	1200	€/m ³
Gereactiveerd GAC	500	€/m ³
Methanol	355	€/ton
Slibverwerking	600	€/ton
Productie spoelwater	0,04	€/m ³
Verwerking spoelwater	0,01	€/m ³

Voor de onderhoudskosten en kapitaalslasten werd opnieuw de onderverdeling gemaakt tussen civiele onderdelen, elektromechanische & werktuigbouwkundige onderdelen en procesautomatisering gemaakt. Deze jaarlasten werden berekend conform de richtlijnen die werden aangeleverd door STOWA (Tabel 9).

TABEL 9

RICHTLIJNEN BEREKENING JAARLASTEN

Jaarlasten	Richtlijnen
Onderhoudskosten	<i>Onderhoudskosten: 0,5% van de bouwkosten voor civiele onderdelen en 3% van de bouwkosten voor W/E/PA onderdelen.</i>
Kapitaalslasten	<i>Lineaire afschrijving over 30 jaar voor civiele onderdelen, 15 jaar voor werktuigbouwkundige en elektrotechnische onderdelen, 5 jaar voor procesautomatisering en een rente van 4%.</i>
	<i>Onderhoudskosten: 0,5% van de bouwkosten voor civiele onderdelen en 3% van de bouwkosten voor W/E/PA onderdelen.</i>

MicroForce⁺⁺ wordt ontwikkeld als een geautomatiseerd systeem met focus op eenvoud van operatie voor de gebruiker. Daarnaast heeft PureBlue de ervaring uit voorgaande industriële toepassingen en wordt ingeschat dat er 0,25 FTE nodig zal zijn om een installatie voor

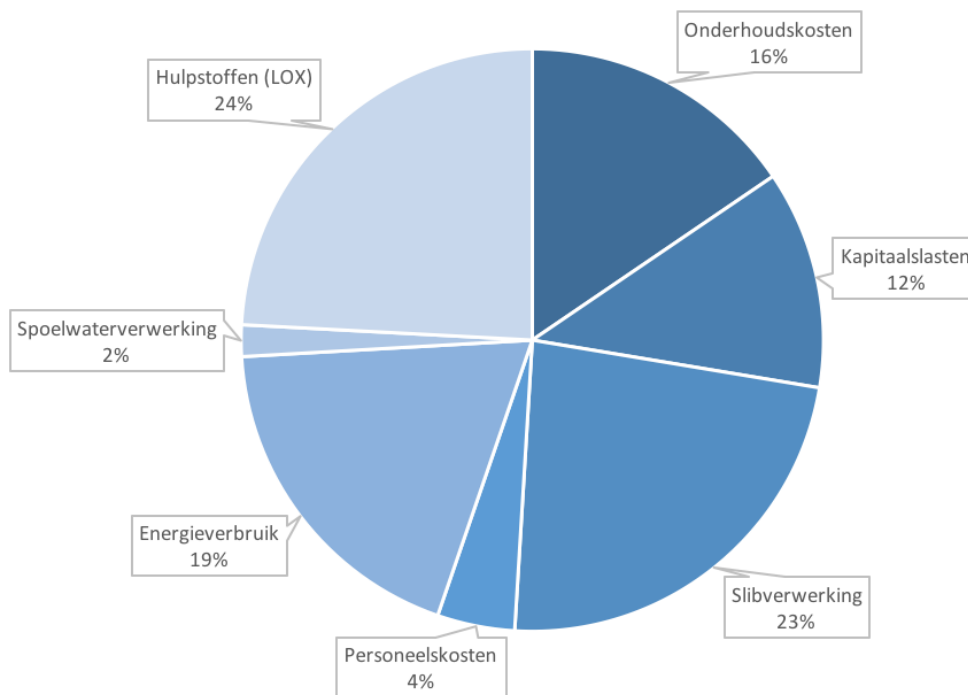
100.000 IE te monitoren en te onderhouden. Dit komt neer op jaarlijkse kosten van 12.500 euro of omgerekend 0,0014 €/m³.

De kosten voor spoelwater, energie en slibverwerking werden berekend aan de hand van de opgelegde richtlijnen zoals weergegeven in Tabel 8 en bedragen in totaal ca. 0,0006 €/m³, 0,006 €/m³ en 0,007 €/m³ respectievelijk.

Voor het berekenen van de zuurstofkosten gaan we uit van een omzettingsefficiëntie van zuurstof naar ozon van 10%. Hierboven werd reeds toegelicht dat de ozonvraag voor MicroForce⁺⁺ 3,85 g O₃/m³ bedraagt. Hieruit volgt dat het zuurstofverbruik kan ingeschat worden op ca. 0,0385 kg O₂/m³. Rekening houdend met de richtlijnen die worden weergegeven in Tabel 8 vinden we dat de kostprijs voor LOX ongeveer 0,0077 €/m³ zal bedragen, wat ineens ook de kostprijs voor alle hulpstoffen samen vertegenwoordigt.

Als alle rubrieken worden opgeteld komen we op totale operationele kosten van ca. 0,032 €/m³ (Cfr. Figuur 13).

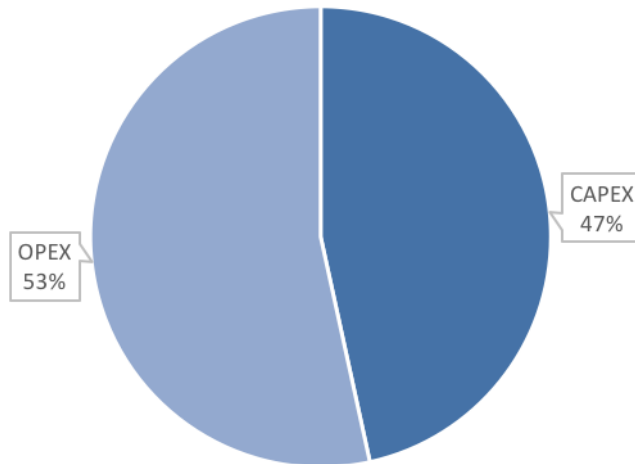
FIGUUR 13 OVERZICHT OPEX MICROFORCE⁺⁺ (0,032 €/M³)



6.2.2 SAMENVATTING KOSTEN

Als we de operationele kosten (0,032 €/m³) en de investeringskosten (0,029 €/m³) uitgedrukt in €/m³ bij elkaar optellen komen we uit op totale kosten van ca. 0,06 €/m³ wat een besparing is van 60% t.o.v. de referentietechnologie met ozon i.c.m. zandfiltratie (Cfr. Figuur 14)

FIGUUR 14

SAMENVATTING VERHOUDING OPEX VS. CAPEX (TCO = 0,06 €/M³)

6.3 ECOTOXICITEIT

Biologische effectmetingen zijn nog niet uitgevoerd. Wij verwachten echter dat MicroForce⁺⁺ gunstigere resultaten zal geven in bioassays dan een stand-alone behandeling met ozon, aangezien er door een lagere ozondosis en door de toepassing van biologische oxidatie meer focus ligt op de volledige mineralisatie van organische micro's en dus minder transformatieproducten en DBP's zullen achterblijven. Deze assumptie wordt ook bevestigd door de literatuurstudie (Postma et al., 2019).

6.4 EVALUATIECRITERIA VOOR MICROFORCE⁺⁺ MET IN-SITU OPGEWEKT ZUURSTOF

In de volgende paragraaf lichten we de modulaire bouw van MicroForce⁺⁺ verder toe. Een voordeel van het modulaire bouwen is dat we kunnen kiezen voor het in situ opwekken van zuurstof, wat ons toelaat te werken met interessantere operationele kosten en een lagere CO₂ footprint.

Voor het opwekken van ozon kan MicroForce⁺⁺ ook gebruik maken van in-situ opgewekt zuurstof. In tegenstelling tot conventioneel toegepaste ozontechnologie wordt dan geen vloeibaar zuurstof (LOX) gebruikt, maar gaan we zuurstof opconcentreren uit omgevingslucht. Dit vraagt extra energie, maar zorgt wel voor een besparing aan verbruikte grondstoffen alsook de transportbewegingen om LOX op locatie te brengen. Met het oog op verdere innovatie, verduurzaming en kostenbesparing van de technologie werd in deze haalbaarheidsstudie ook de impact onderzocht van de omschakeling van LOX naar in-situ opgewekt zuurstof op de CO₂ footprint en kosten.

6.4.1 CO₂ FOOTPRINT MICROFORCE⁺⁺ MET IN-SITU O₂

Als we de evaluatie van de CO₂ footprint opnieuw maken dan zullen er slechts 2 onderdelen veranderen, nl. het energieverbruik en het gebruik van hulpstoffen.

De energie-efficiënte PSA in-situ zuurstofgeneratoren die kunnen worden ingezet bij MicroForce⁺⁺ zullen zo'n 4,5 kWh per kg geproduceerd ozon verbruiken wat overeenkomt met zo'n 0,9 kWh/m³ O₂. Dit zorgt ervoor dat de energieconsumptie zal stijgen van 0,063 kWh/m³ naar 0,08 kWh/m³, wat overeenkomt met een extra 9 g CO₂/m³ voor de CO₂ footprint.

Door het feit dat het zuurstof in-situ wordt opgewekt door een PSA zuurstof generator is er geen vloeibaar zuurstof (LOX) nodig voor de ozonproductie. Dit onderdeel kan dus op 0 gezet worden in vergelijking met de referentietechnologie ozon i.c.m. zandfiltratie en de berekeningen uit paragraaf 6.1.2 voor MicroForce⁺⁺ met LOX. Dit zorgt voor een besparing van 17 g CO₂/m³ op de CO₂ footprint.

Het model laat ons dus toe de impact van de omschakeling van LOX naar in-situ zuurstof te zien op de CO₂ footprint. Hieruit blijkt dat er bij een ozondosis van 0,35 g O₃/ g DOC voor een RWZI van schaalgrootte 100.000 IE een netto besparing van 8 g CO₂/m³ plaatsvindt wanneer in-situ zuurstof wordt verkozen boven LOX (zie Tabel 10). Hieruit volgt ook dat de CO₂ footprint voor MicroForce⁺⁺ met het gebruik van in-situ zuurstof in totaal 51 g CO₂/m³ zou bedragen.

TABEL 10 IMPACT OMSCHAKELING LOX NAAR IN-SITU O₂ OP CO₂ FOOTPRINT

Onderdeel	LOX (g CO ₂ /m ³)	In-situ Zuurstof (g CO ₂ /m ³)	Vershil (g CO ₂ /m ³)
Hulpstoffen (LOX)	17	0	-17
Energieverbruik	33	42	9
Slibproductie	1	1	0
Opvoerhoogte	7	7	0
Spoelwater	1	1	0
Materialen (civiel)	0	0	0
Totaal	59	51	-8

Uit verder onderzoek moet blijken of deze besparing in dezelfde grootorde plaatsvindt bij de grotere RWZI's (>100.000 IE), gezien de individuele impact van LOX dan mogelijk verlaagd kan worden. Echter, de energie-efficiëntie (kW/Nm³ geproduceerd zuurstof) van een in-situ PSA generator zou ook enkel verbeteren voor grotere systemen, wat het huidige energieverbruik van MicroForce⁺⁺ voor opwekken van zuurstof (0,017 kWh/m³) alleen maar ten goede komt. Bij grotere systemen zal het energieverbruik voor het opwekken van zuurstof namelijk nog verder zakken, namelijk van 0,9 kW/Nm³ O₂ naar 0,7 kW/Nm³ O₂, of een extra besparing op dit onderdeel van 22%.

6.4.2 KOSTEN MICROFORCE⁺⁺ MET IN-SITU O₂

Als we dezelfde vergelijking maken voor de kosten, dan worden de investeringskosten voor een systeem met in-situ zuurstofgeneratoren hoger (ca. 100.000 – 150.000 €) dan voor een systeem met LOX. Deze stijging komt overeen met een extra 0,001 €/m³ op de totale CAPEX, wat de investeringskosten op een totaal van 0,029 €/m³ brengt.

De investering heeft een beperkte impact op de onderhoudskosten en de kapitaalslasten, want deze zijn rechtstreeks aan elkaar gekoppeld. Deze twee onderdelen zullen een stijging in de operationele kosten bewerkstelligen van ca. 0,0005 €/m³ en zijn dus eerder als verwaarloosbaar te beschouwen.

De belangrijkste invloed op de kosten zal, net als bij de berekeningen van de CO₂ footprint, in het energieverbruik en in de consumptie van vloeibare zuurstof zitten. De extra 4,5 kWh/kg O₃ die nodig is om het zuurstof op te wekken zal er voor zorgen dat de operationele kosten zullen stijgen met ca. 0,002 €/m³. Daarnaast vallen de kosten voor LOX volledig weg door het feit dat er geen hulpstoffen meer hoeven worden aangevoerd, i.e. een besparing van 0,0077 €/m³. Uiteindelijk zullen de totale operationele kosten voor een systeem met in situ

zuurstof ongeveer 0,026 €/m³ bedragen, wat een daling van ongeveer 15 % is t.o.v. een systeem met LOX (i.e. 0,031 €/m³).

Een vergelijkend overzicht van de verschillende kosten tussen MicroForce⁺⁺ met LOX en MicroForce met in-situ zuurstof wordt weergegeven in Tabel 11.

TABEL 11

OVERZICHT VERSCHIL KOSTEN MICROFORCE⁺⁺ MET LOX VS. MICROFORCE⁺⁺ MET IN-SITU ZUURSTOF

Kosten	Omschrijving	LOX	In-situ O ₂	eenheid
CAPEX		0,0278	0,0293	€/m ³
	Onderhoudskosten	0,0049	0,0052	€/m ³
	Kapitaalslasten	0,0039	0,0041	€/m ³
	Slibverwerking	0,0074	0,0074	€/m ³
OPEX	Personeelskosten	0,0014	0,0014	€/m ³
	Energieverbruik	0,006	0,008	€/m ³
	Spoelwaterverwerking	0,0006	0,0006	€/m ³
	Hulpstoffen (LOX)	0,0077	0	€/m ³
Totaal		0,0597	0,056	€/m ³

7

INZETBAARHEID IN RWZI'S NEDERLAND

Voor deze haalbaarheidsstudie werden niet alleen de technologische parameters onderzocht en hun impact op de CO₂ footprint en kosten. Het is ook belangrijk dat een technologie op een praktische en realistische manier kan worden geïmplementeerd in de bestaande RWZI infrastructuur. Dit kan een uitdaging zijn omwille van het feit dat de RWZI's in Nederlands sterk uiteenlopen in schaalgrootte en het voorkomen van OMP in hun influent en effluent.

Om een beter idee te krijgen van de RWZI's in Nederland heeft PureBlue een eigen database opgesteld waarin alle beschikbare informatie over iedere RWZI (i.e. DWA, RWA, CZV,..) werd geïnventariseerd per waterschap. Op basis van alle beschikbare gegevens (Vereniging Nederlandse Watersector - <https://watersector.nl/rwzi>) werd een model gegenereerd dat ons op een betrouwbare manier de ontbrekende gegevens van de resterende RWZI's laat inschatten. Zo krijgen we een volledige, nationale database die de behoeftes zowel op het niveau van de individuele RWZI's als de overkoepelende Waterschappen weergeeft.

Deze database laat ons ook toe om een idee te krijgen hoe we MicroForce⁺⁺ het beste kunnen op- en/of neerschalen om zo met een beperkt assortiment aan installaties een zo hoog mogelijk percentage van de hotspot RWZI's te kunnen bereiken en te voorzien van een nabehandelingstechniek. Met deze gedachtegang heeft PureBlue een productlijn voor MicroForce⁺⁺ uitgewerkt.

7.1 PRODUCTLIJN MICROFORCE⁺⁺

De productlijn van MicroForce⁺⁺ werd opgesteld volgens het kerngedachtengoed van PureBlue, namelijk met oog voor modulariteit, standaardisatie, flexibiliteit, proceszekerheid en veiligheid.

Hierbij gaan we dus uit van een standaardinstallatie die heel eenvoudig kan uitgebreid worden met gelijkwaardige equivalenten. Het basismodel (M) is gebaseerd op de maximale capaciteit die de modulaire ozongenerator die wordt toegepast kan leveren (i.e. 2,88 kg O₃/h). De basispecificaties van de verschillende formaten MicroForce⁺⁺ worden weergegeven in Tabel 12.

TABEL 12 OVERZICHT PRODUCTLIJN MICROFORCE⁺⁺

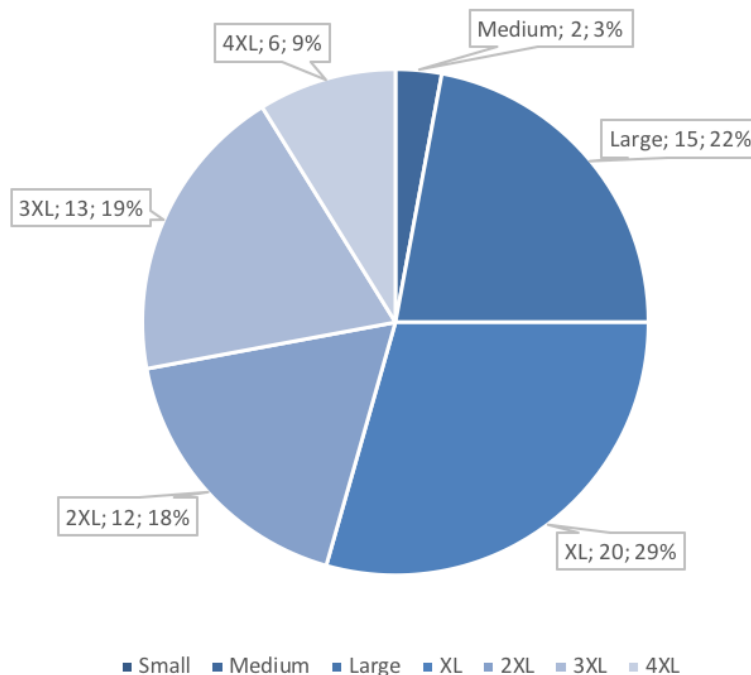
Productspecificaties	Small	Medium	Large	XL	2XL	3XL	4XL
Behandelbare I.E.	36.000	72.000	140.000	216.000	288.000	576.000	1.080.000
Debiet capaciteit (m ³ /h)	374	748	1496	2244	2992	5984	11221
Oppervlakte (m ²)	50	100	200	300	400	800	1500
Ozoncapaciteit (kg O ₃ /h)	1,44	2,88	5,76	8,64	11,52	23,04	43,2
DOC belasting (kg DOC/h)	4,1	8,2	16,5	24,7	32,9	65,83	123,43

7.2 DISTRIBUTIE MICROFORCE⁺⁺ OP RWZI HOTSPOTLOCATIES

Het is belangrijk om te beginnen met de locaties die anno 2021 de grootste problemen vertonen met betrekking tot de emissies van OMP naar het milieu, de zogenaamde ‘hotspots’. Een voorgaand STOWA onderzoek (Vissers et al., STOWA Rapport 42, 2017) brengt deze hotspot-analyse mooi in kaart en op basis van deze studie maken we een selectie van 68 RWZI's die het hoogst scoren op maatlanttabel en emissietabel gegenereerd in dit onderzoek (lees: de hoogste emissie uitgedrukt als percentage van de totale Nederlandse binnenlandse emissie van RWZI's). Een lijst met alle RWZI's die opgenomen zijn als hotspotlocatie in deze studie wordt weergegeven in bijlage (Appendix D).

Nu alle hotspotlocaties geïdentificeerd zijn kunnen we de balans opmaken welke formaten MicroForce⁺⁺ de belangrijkste bijdrage zullen leveren in de aanpak van OMP in Nederland. De resultaten van deze berekening worden weergegeven in Figuur 15.

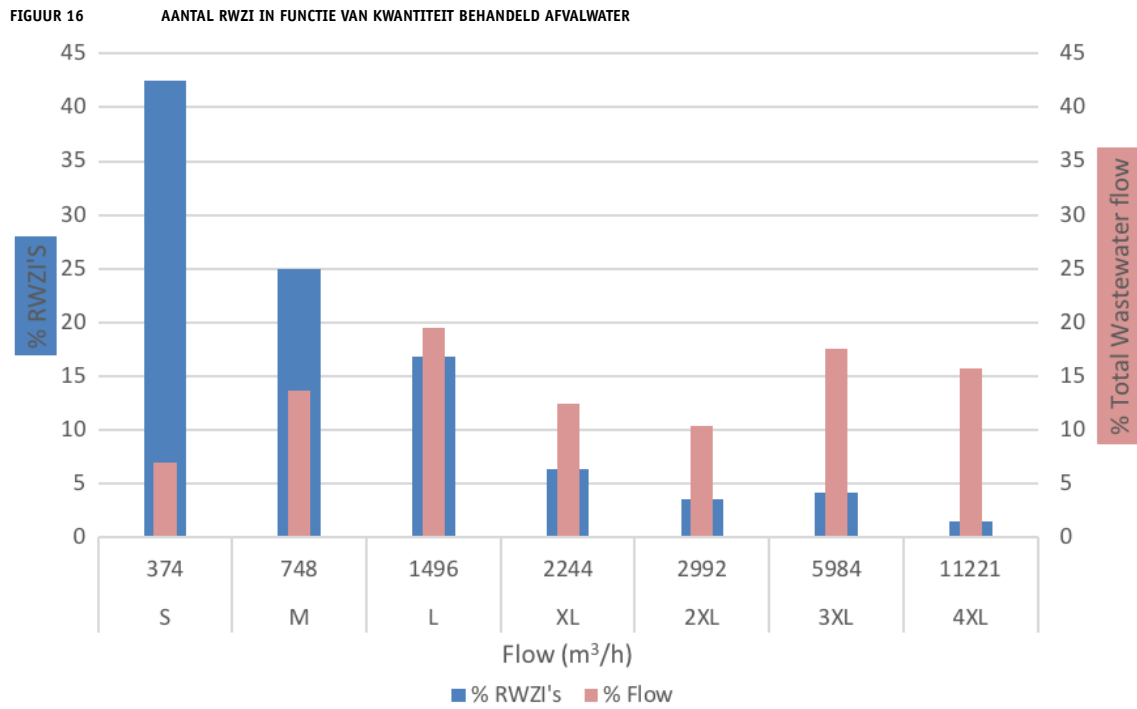
FIGUUR 15

DISTRIBUTIE VAN MICROFORCE⁺⁺ MODELLEN OVER DE HOTSPOTLOCATIES IN NEDERLAND (68 RWZI'S)

Uit deze taartgrafiek merken we op dat de distributie van de verschillende MicroForce⁺⁺ modellen over de hotspotlocaties (68) evenwichtig verdeeld zijn over de modellen L t.e.m. 3XL. Daarnaast zien we ook dat het kleinste formaat op geen enkele locatie zal kunnen worden ingezet en de medium op slechts 2 locaties. De grotere formaten L, XL, 2XL, 3XL zullen het meest kunnen toegepast worden met 15 (22%), 20 (29%), 12 (18%) en 13 (19%) RWZI's respectievelijk. Tot slot zullen er ook 6 heel grote installaties worden gedimensioneerd voor de grootste RWZI's en tevens de grootste OMP hotspots in Nederland.

Vanuit het perspectief dat de hotspot RWZI's als eerste aan de beurt komen is het belangrijk rekening te houden met het feit dat ook de grotere modellen (i.e. L, XL, 2XL, 3XL) van MicroForce⁺⁺ heel wat potentieel zullen hebben om te worden ingeschakeld. Aangezien het modulair opschalen met gelijkwaardige MicroForce⁺⁺ equivalenten geen extra ontwikkeling behoeft of geen extra proces gerelateerde uitdagingen of onzekerheden met zich meebrengt is MicroForce⁺⁺ ook uiterst geschikt om op korte termijn de verschillende hotspots van een oplossing te voorzien.

Als we tenslotte ook het bereik van de verschillende formaten/modellen uitzetten in functie van de hoeveelheid water dat iedere RWZI in NL behandelt, dan kunnen we ook een aantal interessante zaken opmerken. Uit Figuur 16 kan bijvoorbeeld geconcludeerd worden dat de grootste 10 % van de RWZI's (2XL, 3XL & 4XL) verantwoordelijk zijn voor maar liefst 44 % van alle afvalwaterbehandeling in Nederland. Dit betekent dat het, naast de standaardisatie van de kleinere modellen (S, M, L, XL), ook zeker interessant kan zijn om oplossingen op maat te ontwikkelen voor de grootschalige RWZI's als we kijken naar de kwantiteit aan afvalwater die via MicroForce⁺⁺ op een duurzame manier kan worden nagezuiverd.



8

CONCLUSIE

Als conclusie van deze haalbaarheidsstudie kunnen we stellen dat MicroForce⁺⁺ uitstekend scoort op CO₂ footprint en TCO. De CO₂ footprint bedraagt 59 g CO₂/m³, wat een verlaging betekent van ongeveer 55% in vergelijking met de referentietechnologie (130 g CO₂/m³ voor Ozon + ZF).

De belangrijkste besparing in CO₂ footprint is te wijten aan de lagere ozon dosis (0,35 g O₃/g DOC) die nodig is voor de verwijdering van gidsstoffen, wat op haar beurt een lagere energie- en grondstoffenverbruik mogelijk maakt. Naast de verlaging van ozon dosis aan sich heeft het gebruik van in-situ geproduceerd zuurstof ook een positieve impact op de CO₂ footprint, met een verlaging van maar liefst 8 g CO₂/m³ t.o.v. vloeibare zuurstof bij 0,35 g O₃/g DOC. Verder zal de productie van slib of het gebruik van spoelwater door de biofilmreactoren een verwaarlooze contributie hebben op de totale CO₂ footprint.




De kosten van MicroForce⁺⁺ zullen naar schatting 0,06-0,07 €/m³ bedragen, wat ook een reductie is van ca. 60 % t.o.v. de referentie technologie met ozon in combinatie met een zandfilter. De impact op dit criterium is ook voornamelijk toe te schrijven aan de lagere ozonvraag en dus de lagere energievraag. Daarnaast werd, net zoals in de studie met betrekking tot oxidatieve technieken op RWZI Aarle-Rixtel (STOWA 2020 – 41), vastgesteld dat het gebruik van in situ opgewekt zuurstof een besparing in totale kosten met zich meebrengt ten opzichte van LOX.

Als we het verwijderingsrendement van MicroForce⁺⁺ in beschouwing nemen voor de 11 gidsstoffen van het Ministerie I&W dan kunnen we op basis van reeds uitgevoerd onderzoek en de literatuurstudie (Hoofdstuk 3 en Hoofdstuk 4) vaststellen dat we met een dosis van 0,3-0,4 g O₃/g DOC 85-95 % verwijdering kunnen bewerkstelligen voor minstens 7 van de 11 gidsstoffen. Dit is een stijging van ongeveer 10% t.o.v. de referentietechnologie.

Tot slot heeft deze studie ook uitgewezen dat het modulaire concept van MicroForce⁺⁺ een hoge inzetbaarheid op de hotspot RWZI's in Nederland mogelijk maakt.

Een overzicht van de performantie van MicroForce⁺⁺ t.o.v. de referentietechnologie, i.e. O₃ + zandfiltratie, wordt weergegeven in Tabel 13.

TABEL 13 OVERZICHT CRITERIA MICROFORCE++

	EENHEID	Ozon + ZF		MicroForce++
CO ₂ -footprint	g CO ₂ /m ³ ¹	130	- 55 % 	53
Kosten	€/m ³	0,17	- 60 % 	0,06-0,07
Verwijderingsrendement Gidsstoffen Ministerie I&W	% ²	80-85	+ 10 % 	85-95

1) Per m³ behandeld rioolwater

2) Verwijderingsrendement methode voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen: benzotriazool, claritromycine, carbamazepine, diclofenac, metoprolol, hydrochlorothiazide, mengsel van 4- en 5-methylbenzotriazool, propranolol, sotalol, sulfamethoxazol, trimethoprim. Hierbij is het rendement bepaald op basis van het totale effluent (na extra technologie) ten opzichte van het influent van de rwzi

MicroForce⁺⁺ heeft als doel een gestandaardiseerde waterbehandelingstechnologie te zijn die plug en play kan worden geïnstalleerd en verschillende beschikbare formaten heeft om een oplossing te bieden onafhankelijk van de grootte van de RWZI. De compacte bouw is mogelijk door de korte verblijftijd in het biologische systeem en de intelligente ozondosering. De industriële referentie van PureBlue laten verder ook zien dat de automatisering en controle van de installatie direct kan worden toegepast voor een eenvoud in operatie.

9

PILOTLOCATIE EN VERVOLGONDERZOEK

9.1 WATERSCHAP SCHELDESTROMEN

Tijdens het uitwerken van de haalbaarheidsstudie is PureBlue ook pro-actief op zoek gegaan naar een kandidaat waterschap om samen te werken in de volgende pilotfase van het IPMV. Hierbij werd het MicroForce⁺⁺ principe bij verschillende waterschappen gepitcht. Door de historische gegroeide, goede verstandhouding tussen PureBlue Water en Waterschap Scheldestromen kwam ook een samenwerking voor dit project tot stand. Zij tonen een uitgesproken interesse en geloof in het duurzame karakter van MicroForce⁺⁺ en willen graag inhaken in de verdere ontwikkeling en praktische toepassing van MicroForce⁺⁺ on site.

9.2 PILOTLOCATIE

Op dit moment wordt de RWZI Walcheren naar voor geschoven als pilot locatie. Deze locatie heeft een gunstige ligging voor het optimaal bedienen en monitoren van de pilot, gezien het geografisch dichtbij PureBlue gelegen is. Verder werden de chemische waterkarakteristieken reeds onderzocht (Cfr. Tabel 14), met inbegrip van bromide, een belangrijke parameter voor het inschakelen van een ozon gebaseerde techniek. Uit de resultaten kunnen we afleiden dat de bromidegehalten hoog tot zeer hoog liggen (1500 ug/l), wat te verklaren is door het feit dat de RWZI Walcheren vrijwel aan de kust gelegen is. Echter, PureBlue ziet deze situatie eerder als een opportuniteit om de MicroForce⁺⁺ technologie meteen in worst case condities te testen met extra aandacht voor het vermijden van transformatieproducten zoals bromaat en op die manier meteen een oplossing en proof of principle te bieden aan alle kustgelegen RWZI's in Nederland en bij uitbreiding in heel Europa.

TABEL 14

KARAKTERISATIE EFFLUENT RWZI WALCHEREN

RWZI Walcheren	Gemiddelde	Eenheid
CZV	44,9	mg/l
BZV5	6,26	mg/l
N-Kj	5,4	mg/l
NH4	3,2	mg/l
NO2	0,45	mg/l
NO3	3,81	mg/l
Nox	4,29	mg/l
Ntot	9,69	mg/l
PO4	0,49	mg/l
Ptot	0,73	mg/l
Br	1500	ug/l
Debiet	1660	m ³ /h

9.3 VERVOLGONDERZOEK

Voor het vervolgonderzoek is het de wens van PureBlue om MicroForce++ verder op te schalen en op locatie te testen op een RWZI in Nederland. Hierbij zal het volledige MicroForce++ principe worden getest, d.w.z. dat alle procesonderdelen zoals beschreven in Hoofdstuk 2 zullen worden getest en indien nodig geoptimaliseerd, nl. het in-situ opwekken van zuurstof (en ozon), het innovatief inbrengen van ozon, de biologische filtratiestappen alsook de automatisering en sturing van het systeem. De pilot zal on site worden getest in een gecontaineriseerde unit die een hydraulische capaciteit zal hebben van ca. 4-16 m³/h.

Het vervolgonderzoek wordt dus voornamelijk toegespitst op het on site bedrijven van de installatie. In het lab-pilot onderzoek is de bijdrage van een specifieke biofilm onderzocht aan de verwijdering van medicijnresten. Tijdens de praktijktesten bij de RWZI kan de pilot echter nog langer worden bedreven waardoor de biomassa nog beter kan adapteren aan de omstandigheden en wordt er verwacht dat nog meer gespecialiseerde organismen een bijdrage kunnen leveren aan de verwijdering. Daarnaast zal de ozonisatie eenvoudiger kunnen worden gestuurd in een tweestapsysteem met een verschillende dosis per reactor, waardoor we kunnen onderzoeken wat het effect is als we de toegepaste ozondosis nog verder verlagen.

Een indicatie van de planning en budgettering voor de verschillende werkzaamheden om MicroForce++ van een TRL van 5 (huidig) naar 7 te krijgen wordt weergegeven in Tabel 15.

TABEL 15 INSCHATTING PLANNING + KOSTEN ACTIVITEITEN MICROFORCE++ VOOR HET BEREIKEN VAN TRL 7

Jaar	Werkzaamheden	Kosten
2020	Kleine pilotschaal: bromaatbeperking door technologie	€ 10.000
2021	Haalbaarheidsstudie	€ 50.000
2021	LCA op MicroForce++	€ 50.000
2022	Engineering en bouw pilot RWZI	€ 150.000
2022	Inbedrijfname pilot	€ 50.000
2023	Langdurig pilot testen bij RWZI	€ 75.000
2023	Monitoring Pilot bij RWZI + optimalisatie van de procesparameters	€ 25.000
2025	Realisatie Demo pilot	€ 300.000

Daarnaast willen we in het kader van de verdere verduurzaming van MicroForce++ een LCA studie laten uitvoeren (onder leiding van KWR) om de huidige balans op te maken en eventuele pijnpunten en verbeteringen bloot te leggen.

10

BRONNEN

Buttiglieri, G., & Knepper, T. P. (2007). Removal of emerging contaminants in wastewater treatment: conventional activated sludge treatment. In *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste* (pp. 1-35). Springer, Berlin, Heidelberg.

de Oliveira, M. *et al.* Pharmaceuticals residues and xenobiotics contaminants: Occurrence, analytical techniques and sustainable alternatives for wastewater treatment. *Science of The Total Environment* 705, 135568 (2020).

de Wilt, A. (2018). Pharmaceutical removal; Synergy between Biological and Chemical Processes for Wastewater treatment

de Wilt, A., van Gijn, K., Verhoek, T., Vergnes, A., Hoek, M., Rijnaarts, H., & Langenhoff, A. (2018). Enhanced pharmaceutical removal from water in a three step bio-ozone-bio process. *Water research*, 138, 97-105.

Drzymała, J. & Kalka, J. Ecotoxic interactions between pharmaceuticals in mixtures: Diclofenac and sulfamethoxazole. *Chemosphere* 259, 127407 (2020).

Edefell, E., Falås, P., Kharel, S., Hagman, M., Christensson, M., Cimbritz, M., & Bester, K. (2021). MBBRs as post-treatment to ozonation: Degradation of transformation products and ozone-resistant micropollutants. *Science of the Total Environment*, 754, 142103.

El-Taliawy, H., Casas, M. E., & Bester, K. (2018). Removal of ozonation products of pharmaceuticals in laboratory Moving Bed Biofilm Reactors (MBBRs). *Journal of hazardous materials*, 347, 288-298.

Fu, Q. *et al.* API and Personal Care Products: From Wastewater Treatment into Agro-Food Systems. *Environ. Sci. Technol.* 53, 14083–14090 (2019).

Geneesmiddelen en waterkwaliteit. RIVM rapportnr 2016-0111. RIVM – Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven

Irani, R., Khoshfetrat, A. B., & Forouzes, M. (2021). Real municipal wastewater treatment using simultaneous pre and post-ozonation combined biological attached growth reactor: Energy consumption assessment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104595.

Ismail, N. A. H. *et al.* Occurrence and distribution of endocrine-disrupting chemicals in mariculture fish and the human health implications. *Food Chemistry* 345, 128806 (2021).

Livia Gomez Cortes, Dimitar Marinov, Isabella Sanseverino, Anna Navarro Cuenca, Magdalena Niegowska, Elena Porcel Rodriguez and Teresa Lettieri, Selection of substances for the 3rd Watch List under the Water Framework Directive, EUR 30297 EN, Luxembourg: Publications Office of the European Union, (2020).

Mohan, S., & Balakrishnan, P. (2021). Kinetics of ciprofloxacin removal using a sequential two-step ozonation-biotreatment process. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101284.

Mulder, M. (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.

O'Flynn, D., Lawler, J., Yusuf, A., Parle-McDermott, A., Harold, D., Mc Cloughlin, T., ... & White, B. (2021). A review of pharmaceutical occurrence and pathways in the aquatic environment in the context of a changing climate and the COVID-19 pandemic. *Analytical Methods*, 13(5), 575-594.

Postma, J. (2019). Ecologische effecten van vergaande zuiveringen van rwzi-effluent. Ecofiderapport. Ecofide, Weesp.

Rathi, B. S., Kumar, P. S., & Show, P. L. (2021). A review on effective removal of emerging contaminants from aquatic systems: Current trends and scope for further research. *Journal of Hazardous Materials*, 409, 124413.

Schaar, H., Clara, M., Gans, O., & Kreuzinger, N. (2010). Micropollutant removal during biological wastewater treatment and a subsequent ozonation step. *Environmental Pollution*, 158(5), 1399-1404.

H. Schmitt et al. (2017). Bronnen van antibioticaresistentie in het milieu en mogelijke maatregelen. RIVM Rapport 2017-0058. RIVM – Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven

Soltermann, F., Abegglen, C., Götz, C. & von Gunten, U. Bromide Sources and Loads in Swiss Surface Waters and Their Relevance for Bromate Formation during Wastewater Ozonation. *Environ. Sci. Technol.* **50**, 9825–9834 (2016).

Soltermann et al. - 2016 - Bromide Sources and Loads in Swiss Surface Waters .pdf.

Rizzo, L. et al. Consolidated vs new advanced treatment methods for the removal of contaminants of emerging concern from urban wastewater. *Science of The Total Environment* **655**, 986–1008 (2019).

Vereniging Nederlandse Watersector - <https://watersector.nl/rwzi>

Vierwind A, de Wilt A, Lohmann B., Uijterlinde C., Schuman E., Water G.R., Knol E., Koop J., Kruihof J., Hoekstra M., Schaafsma M., Bechger M., Verhoeven M., Mulder M., Cleveringen-Loeffen P., Kras R., Schemen R., van der Neut R. Pilotonderzoek vergelijking oxidatieve technieken effluent RWZI Aarle-Rixtel, STOWA rapportnr 2020-41. STOWA - Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, Amersfoort.

Vissers, M., Vergouwen, L., Witteveen, S., Derksen, A., & Raadgever, T. (2017). *Landelijke hotspot-analyse geneesmiddelen RWZI's*. STOWA.

Yang, K., Yu, J., Guo, Q., Wang, C., Yang, M., Zhang, Y., ... & Yu, Z. (2017). Comparison of micropollutants' removal performance between pre-ozonation and post-ozonation using a pilot study. *Water research*, 111, 147-153.

11

APPENDICES

11.1 APPENDIX A

TABEL 16 CONCENTRATIES GIDSSTOFFEN EN KANDIDAATGIDSSTOFFEN EFFLUENT RWZI HULST (JULI, 2021) A.D.H.V. STEEKMONSTER, DETECTIEGRENZEN PER STOF EN MAXIMAAL TE BEHALEN VERWIJDERINGSRENDEMENT O.B.V. MEETGRENZEN EN STARTCONCENTRATIE

Stof	Concentratie RWZI Hulst effluent ($\mu\text{g/l}$)	Detectiegrens ($\mu\text{g/l}$)	Maximale verwijdering mogelijk (%)
4,5 Methylbenzotriazol	NB	NA	NA
Amisulpride	0,14	0,005	96,43%
Azithromycine	0,59	0,005	99,15%
Benzotriazol	NA	NA	NA
Cadesartan	0,048	0,01	79,17%
Carbamazepine	0,34	0,005	98,53%
Citalopram	0,11	0,005	95,45%
Clarithomycine	0,14	0,02	85,71%
Diclofenac	0,63	0,005	99,21%
Furosemide	0,18	0,01	94,44%
Gabapentine	0,26	0,005	98,08%
Hydrochlorothiazide	0,72	0,02	97,22%
Irbesartan	0,43	0,005	98,84%
Metropolol	0,82	0,005	99,39%
Propanolol	0,15	0,005	96,67%
Sotalol	1,2	0,005	99,58%
Sulfamethoxazol	0,14	0,005	96,43%
Trimethoprim	0,076	0,005	93,42%
Venlafaxine	0,28	0,005	98,21%

11.2 APPENDIX B

FIGUUR 17 PRINTSCREEN INGEVULDE WAARDES IN EXCEL MODEL CO₂ FOOTPRINT; ENERGIE, SPOELWATER & SLIBVERWERKING

Onderwerp	Eenheid	Parameter per jaar					Invalhulp
		Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	
Naam		Referentie	PACAS	Ozon + ZF	GAK	MicroForce+	
Hoeveelheden							
Aanvoer rioolwater	m ³	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	Niet aanspreekbaar.
Influent CZV	kn	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	Niet aanspreekbaar.
Influent Nkj	kn	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	Niet aanspreekbaar.
Effluent Ntot	kn	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	Niet aanspreekbaar.
Verwijderde i.e. 150 g TZV	i.e. 150 g TZV	97.725	97.725	97.725	97.725	97.725	Niet aanspreekbaar.
Behandelde i.e. in influent 150 g TZV	i.e. 150 g TZV	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	Niet aanspreekbaar.
DOC effluent	mg/l	11	11	11	11	11	Niet aanspreekbaar.
Dimensionering verwijdering micro's							
Minimale jaarhoeveelheid nabehandeling	m ³ /jaar	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	Niet aanspreekbaar.
Behandelde jaarhoeveelheid nabehandeling	m ³ /jaar	5.365.500	7.665.000	5.365.500	5.365.500	5.365.500	Ta behandelen isarhoeveelheid minimaal 70%.
Geproduceerd slib	ton ontwaterd slib	6.100	6.192	6.100	6.100	6.213	Man alleen worden aangeset bij neitereerde maatregelen, niet bij nabehandeling.
Drogeafgehalte slib	%	21.10%	22.29%	21.10%	21.10%	21.10%	Man alleen worden aangeset bij neitereerde maatregelen, niet bij nabehandeling.
Geproduceerd slib	ton ds	1.287	1.380	1.287	1.287	1.311	
Transport voelbaar slib	km	50	50	50	50	50	Niet aanspreekbaar.
Transport voelbaar slib	m	0	0	0	0	0	Niet aanspreekbaar.
Transport ontwaterd slib	km	100	100	100	100	100	Niet aanspreekbaar.
Transport ontwaterd slib	ton	6.100	6.192	6.100	6.100	6.213	Niet aanspreekbaar.
Inkoop energie rwzi exclusief verwijdering micro's							
<i>Inkoop energie</i>							
Inkoop elektriciteit	kWh	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	Niet aanspreekbaar.
Inkoop aardgas	Nm ³	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	Niet aanspreekbaar.
Inkoop warmte	GJ						Niet aanspreekbaar.
<i>Inkoop brandstoffen</i>							
Diesel	kn	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	Niet aanspreekbaar.
Inkoop energie rwzi voor verwijdering micro's							
<i>Inkoop energie</i>							
Inkoop elektriciteit	kWh	0	91.104	654.591	4.381	338.077	Excl. ruwvoeren effluent en spoelwater, excl. productie en behandeling spoelwater.
Overig invloed nabehandeling op rwzi							
Opvoeren rioolwater	meter	0	0	8	8	3	Rij nabehandelde behandelings R meter opvoeren conform standaard.
Percentage spoelwater	%	0%	0%	10%	10%	18%	Rij nabehandelde behandelings 10% spoelwater toetsen conform standaard.
Gebruik spoelwater	m ³	0	0	536.550	536.550	70.825	
Afvoeren spoelwater	m ³	0	0	536.550	536.550	70.825	

FIGUUR 18 PRINTSCREEN INGEVULDE WAARDES IN EXCEL MODEL CO₂ FOOTPRINT; HULPSTOFFEN

Inkoop hulpstoffen		Oolossina					
Actieve kool	kn	100%				83.200	NR, let hi hi GAK, on bulkgewicht per m ³ actieve kool.
Actieve kool geregenereerd	kn	100%	91.980			312.000	NR, let hi hi GAK, on bulkgewicht per m ³ actieve kool.
Actieve kool biologische oorsprong	kn	100%				0	NR, CO ₂ waarde, rhu haalbaarheidsstudie, biokolen.
Aluminiumchloride, hydraatvorm	kn	40%				0	Voor chemisch lijn, let on % oolossina, zie oommeting handtekin cel AR.
Aluminiumsulfat, poedervorm	kn	100%				0	
Antiscalants (polycarboxylaten)	kn	100%				0	
Azijnzuur	kn	98%				0	
Bio-ethanol	kn	100%				0	
Calciumoxide (ongebuste kalk; poeder)	kn	100%				0	
Citroenzuur	kn	50%				0	
Glycine uit epichloorhydrine	kn	100%				0	
Glycerine uit koolzaadolie	kn	100%				0	
Izer(III)chloride	kn	40%	260.000	260.000	260.000	260.000	
Izerchloridesulfat	kn	100%				0	
Izersulfat	kn	100%				0	
Kalkhydraat	kn	100%				0	
Kalkmelk op basis van gebuste kalk	kn	100%				0	
Koolstofoxide, voelbaar	kn	100%				0	
Magnesiumchloride	kn	54%				0	
Magnesiumchloride, anhydride	kn	100%				0	
Magnesiumchloride, hydraat, vaste vorm	kn	100%				0	
Magnesiumoxide	kn	100%				0	
Melasse uit suikerbieten	kn	100%				0	
Methanol	kn	100%				0	
Natriumalminaat oplossing	kn	38%				0	
Natriumchloride (zout), poedervorm	kn	100%				0	
Natriumphochloriet	kn	15%				0	
Natronloog kwikcelproces	kn	50%				0	
Natronloog, membraanproces	kn	50%				0	
Natronloog, productiemix	kn	50%				0	
Polymeer, anionisch	kn	100%				0	
Polymeer, anionisch, voelbaar	kn	100%				0	
Polymeer, kationisch, poeder	kn	100%				0	
Polymeer, kationisch, voelbaar	kn	100%	23.168	22.083	23.168	23.168	23.168
Polyaluminiumchloride	kn	100%	3.200	3.200	3.200	3.200	Niet aanspreekbaar.
Polyaluminiumsulfat, poeder	kn	100%				0	
Waterstofperoxide	kn	50%				0	
Zoutzuur, reactie propyleen en chloor	kn	36%				0	
Zoutzuur uit de reactie van waterstof en chloor	kn	100%				0	
Zoutzuur uit het Mannheim proces	kn	100%				0	
Zuurstof (voelbaar)	kn	100%			445.337	206.522	
Zwavelzuur, voelbaar	kn	100%				0	
Materialen							
Gewapend beton	m ³		3.800	3.800	4.050	4.050	
Levensduur gewapend beton	jaar		30	30	30	30	Niet aanspreekbaar.

11.3 APPENDIX C

11.3.1 BEREKENINGEN CO₂ FOOTPRINT

ALGEMEEN

Algemeen	Waarde	Eenheid
DOC	11	mg/l
Vereiste O ₃ dosis stand-alone	0,7	g O ₃ /g DOC
Besparing door biologie	50%	
O₃ dosis MicroForce (g O₃/ g DOC)	0,35	g O₃/g DOC
O ₃ vraag MicroForce (g O ₃ /m ³)	3,85	g O ₃ /m ³
Flow (m ³ /jaar)	7.665.000	m ³ /jaar
Flow (m ³ /h)	1040	m ³ /h

ENERGIE

Energieverbruik ozon	kWh/kg O ₃	kWh/kg m ³
O ₂ -> O ₃	10	0,039
inbrengenergie	2	0,008
Energieverbruik / kg O ₃	12	0,046

Energieverbruik pompen & divers	Opgesteld vermogen (kW)	kWh/m ³
Energie pompen & divers	17	0,016

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Totaal energieverbruik	0,063	kWh/m ³
Omzettingsfactor	0,53	kg CO ₂ /Kwh
CO ₂ footprint energie	33,15	g CO ₂ /m ³

SLIBVORMING

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Flow	1040	m ³ /h
CZV behandeld	5	mg/l
Ratio Slibvorming/CZV behandeld	33	%
Slib gevormd	1716	g DS/h
Slib gevormd	15	ton DS/j
Uitspoelende SS uit NBT (worst case)	10	mg SS/l
Slib gefilterd	10400	g DS/h
Slib gefilterd	91	ton DS/j
Totaal slib gevormd	12116	g DS/h
Totaal slib gevormd	106	ton DS/j

SPOELWATER

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Volume biofilter	50	m ³
Vullingspercentage biofilter	70%	
Totaal reactorbedvolume	35	m ³
Maximale belading	3	g DS/L
Bergingscapaciteit	105	kg DS/filter
Minimum standtijd filters	8,67	h
Aantal filters	2	(-)
Aantal backwashes per jaar per filter	1011	(-)
Totaal Volume spoelwater per filter	50541	m ³
Totaal volume spoelwater MicroForce	101082	m ³
Percentage spoelwater	1,32%	

SAMENVATTING

Onderdeel	g CO ₂ /m ³
Hulpstoffen (LOX)	17
Energieverbruik	33
Slibproductie	1
Opvoerhoogte	7
Spoelwater	1
Materialen (civiel)	0
Totaal	59

11.3.2 SCOPE OF SUPPLY EN BREAKDOWN INVESTERINGSKOSTEN

Civiel	Permanente en/of Semi-permanente behuizing	Funderingen	€ 360.000
		Containers	
		Epoxy primer & PU coating	
		PVC industriële en waterdichte vloer + drain	
		Isolatie	
		Nooddeur en panic bar	
		Noodverlichting	
		Ventilatie	
		Airco	
		Aanpassingen voor piping en elektrische werkzaamheden	
Elektromechanisch - werktuigbouwkundig	Elektrisch	Elektrokast(en) en controle cabinet	€ 1.260.000
		PLC	
		HMI (touch screen)	
		Frequency drives	
		Motor starters	
	Ozon Equipment	Additional hardware	
		Ozongenerator(en) - 4 kg O ₃ /h	
		Coolingcircuit met warmtewisselaar gasfilters	
		Ozone reactie tank met ozone oplosmodule	
		Mangat	
Biofilmreactor	Ontgassingskleppen		
	Control valve influent		
	Dehumidifier		
	Ozon afgas destructor		
	Piping en appendages		
Procesautomatisering	Instrumentatie	Tank 2 x 50 m ³	€ 180.000
		Dragermateriaal	
		Terugspoelmechanisme	
		Piping en appendages	
		Ozon concentratie meting (in gas)	
		Mass flow controllers (O ₂ en O ₃ gekalibreerd)	
		Druk- en niveau metingen	
		pH & ORP meting	
		UVA metingen	
		Temperatuur meting	
Turbidity transmitter			
Veiligheidsmaatregelen (incl. alarm): analyse omgevingszuurstof en ozon			

11.3.3 BEREKENINGEN OPERATIONELE KOSTEN

ONDERHOUDSKOSTEN

Onderdeel	%	Kosten (€/jaar)	Kosten (€/m ³)
Civiel	0,50%	€ 1.800,00	€ 0,00020
E + W	3%	€ 37.800,00	€ 0,00415
Procesautomatisering	3%	€ 5.400,00	€ 0,00059
Totaal		€ 45.000,00	€ 0,00494

KAPITAALSLASTEN

Onderdeel	Lasten	(€/m ³)
Civiel	€ 216.000,00	€ 0,00079
E + W	€ 378.000,00	€ 0,00277
Procesautomatisering	€ 14.106,94	€ 0,00031
Totaal	€ 608.106,94	€ 0,00387

SLIBVERWERKING

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Slibproductie	113	ton/jaar
Slibverwerkingsprijs	600	€/ton
Kosten voor slibverwerking	0,00744	€/m ³

PERSONEELSKOSTEN

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Operationeel beheer	10	h/week
Personeel benodigd	0,25	FTE
Kosten	50000	€/jaar
Personeelskosten	0,00137	€/m ³

ENERGIEKOSTEN

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Energieconsumptie	0,06	kWh/m ³
Energieprijs	0,1	€/kWh
Energiekosten	0,006	€/m ³

ZUURSTOFVERBRUIK

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Ozonvraag	3,85	g/m ³
Omzettingsefficiëntie O ₂ -> O ₃	10	%
Zuurstofverbruik (LOX)	0,0385	kg/m ³
Zuurstofprijs (LOX)	0,2	€/kg
Kosten zuurstof (LOX)	0,0077	€/m ³

SPOELWATERVERWERKING

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Grootte filterbed	50	m ³
Aantal filterbed	2	(-)
Totaalvolume filterbed	100	m ³
Standtijd filterbed	8,7	h
Spoelwaterverbruik	101082	m ³ /jaar
Kosten voor verwerking	0,01	€/m ³ spoelwater
Spoelwaterproductie	0,04	€/m ³ spoelwater
Spoelwater kosten	0,00056	€/m ³

SAMENVATTING OPERATIONELE KOSTEN

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Onderhoudskosten	0,0049	€/m ³
Kapitaalslasten	0,0039	€/m ³
Slibverwerking	0,0074	€/m ³
Personeelskosten	0,0014	€/m ³
Energieverbruik	0,006	€/m ³
Spoelwaterverwerking	0,0006	€/m ³
Hulpstoffen (LOX)	0,0077	€/m ³
Totaal	0,03188	€/m³

11.4 APPENDIX D

TABEL 17 HOTSPOTLOCATIES MEDICIJNRESTEN RWZI'S NEDERLAND (2017)

RWZI	Waterschap
Nieuwegein	Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden
Utrecht	Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden
Zeist	Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden
Beemster	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Beverwijk	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Geestmerambacht	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Wervershoof	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Harnaschpolder	Hoogheemraadschap van Delfland
Houtrust	Hoogheemraadschap van Delfland - Delfluent
Gouda	Hoogheemraadschap van Rijnland
Haarlem Waarderpolder	Hoogheemraadschap van Rijnland
Katwijk	Hoogheemraadschap van Rijnland
Leiden Noord	Hoogheemraadschap van Rijnland
Leiden Zuid-West	Hoogheemraadschap van Rijnland
Zwaanshoek	Hoogheemraadschap van Rijnland
Zwanenburg	Hoogheemraadschap van Rijnland
Kralingseveer	Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpernerwaard
Amstelveen	Waternet
Amsterdam-West	Waternet
Horstermeer	Waternet
Aarle Rixtel	Waterschap Aa en Maas
Den Bosch	Waterschap Aa en Maas
Dinther	Waterschap Aa en Maas
Land van Cuijk	Waterschap Aa en Maas
Oijen	Waterschap Aa en Maas
Nieuwveer	Waterschap Brabantse Delta
Eindhoven	Waterschap de Dommel
Sint-Oedenrode	Waterschap de Dommel
Tilburg Noord	Waterschap de Dommel
Deventer	Waterschap Drents Overijsselse Delta
Zwolle	Waterschap Drents Overijsselse Delta
Dordrecht	Waterschap Hollandse Delta
Rotterdam-Dokhaven	Waterschap Hollandse Delta
Zwijndrecht	Waterschap Hollandse Delta
Hoensbroek	Waterschap Limburg
Maastricht Bosscherveld	Waterschap Limburg
Roermond	Waterschap Limburg
Susteren	Waterschap Limburg
Venlo	Waterschap Limburg
Venray	Waterschap Limburg
Weert	Waterschap Limburg
Garmerwolde	Waterschap Noorderzijlvest
Nieuwgraaf	Waterschap Rijn en IJssel
Olburgen	Waterschap Rijn en IJssel
Zutphen	Waterschap Rijn en IJssel
Arnhem-Zuid	Waterschap Rivierenland
Nijmegen	Waterschap Rivierenland

Tiel	Waterschap Rivierenland
Walcheren	Waterschap Scheldestromen
Amersfoort	Waterschap Vallei en Veluwe
Apeldoorn	Waterschap Vallei en Veluwe
Ede	Waterschap Vallei en Veluwe
Harderwijk	Waterschap Vallei en Veluwe
Nijkerk	Waterschap Vallei en Veluwe
Renkum	Waterschap Vallei en Veluwe
Soest	Waterschap Vallei en Veluwe
Veenendaal	Waterschap Vallei en Veluwe
Emmen	Waterschap Vechtstromen
Enschede-West	Waterschap Vechtstromen
Hengelo	Waterschap Vechtstromen
Almere	Waterschap Zuiderzeeland
Lelystad	Waterschap Zuiderzeeland
Leeuwarden	Wetterskip Fryslan
