



Ministerie van Infrastructuur
en Waterstaat

stowa

RAPPORT PILOTONDERZOEK MICROFORCE++



RAPPORT

2023
49

RAPPORT PILOTONDERZOEK MICROFORCE++

RAPPORT

2023

49

ISBN 978.94.6479.000.9



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

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)
Gerard Rijs (Rijkswaterstaat)
Koen van Gijn (Waterschap Rijn en IJssel)
Krisjan van Laarhoven (Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard)
Laura Piai (Royal HaskoningDHV)
Maaike Hoekstra (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)
Maarten Schaafsma (Waterschap Rijn en IJssel)
Manon Bechger (Waternet)
Marlies van Hoeve (Waterschap Scheldestromen)
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)

VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2023-49
ISBN 978.94.6479.000.9

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++ EEN DUURZAME, COMPACTE EN VOORDELIGE VERWIJDERING VAN ORGANISCHE MICROVERONTREINIGINGEN

De verwijdering van organische microverontreinigingen in bestaande RWZI's is geoptimaliseerd door de integratie van een fysisch-chemische waterbehandeling en biofilmreactoren zodat moeilijk afbreekbare verbindingen afdoende worden verwijderd. 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.

Binnen het Innovatieprogramma Microverontreinigingen (IPMV) van STOWA en het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat worden diverse technologieën onderzocht voor de verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater. Na een succesvolle haalbaarheidsstudie is in het kader van het IPMV een pilotstudie uitgevoerd op RWZI Walcheren voor de toepassing van MicroForce++. Deze techniek combineert ozonisatie en biologische oxidatie met als doel een duurzame en voordelige verwijdering van organische microverontreinigingen te realiseren.

In dit pilotonderzoek werd de technologie volcontinu bedreven met een representatieve afvalwatermatrix. Voor een succesvolle proof-of-principle dienden de 11 gidsstoffen (2021) met een zo hoog mogelijke efficiëntie te worden verwijderd met een lagere ozondosis en een lagere CO₂ footprint dan de referentietechnologie (Ozon + Zandfiltratie). De CO₂ footprint van MicroForce++ bedraagt 66 g CO₂/m³, wat een verlaging betekent van ongeveer 50% in vergelijking met de referentietechnologie (130 g CO₂/m³ voor Ozon + Zandfiltratie). De belangrijkste besparing in CO₂ footprint is te danken aan de lagere ozondosis (0,43 g O₃/g DOC) die nodig is voor de verwijdering van gidsstoffen, wat op haar beurt een lagere energie- en grondstoffenverbruik mogelijk maakt. Verder is ook aangetoond dat ongewenste, toxische bijproducten (e.g. bromaat) gemitigeerd kunnen worden en er tegelijkertijd een significante bijdrage wordt geleverd aan de verwijdering van ammonium. Momenteel wordt verder onderzocht of er op een kosten efficiënte manier denitrificatie van het gevormde nitraat kan plaatsvinden zodoende de concentratie totale stikstof in het effluent te verlagen.

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 met behulp van biofilm-op-drager technologie.

Aan de hand van een pilotstudie werd deze innovatieve technologie succesvol in de praktijk getest op RWZI Walcheren en bijgevolg geëvalueerd op verschillende criteria, nl. het verwijderingsrendement van gidsstoffen, de CO₂ footprint, TCO (total cost of ownership), ecotoxiciteit en de inzetbaarheid op RWZI's in Nederland. Naast het verwijderen van organische microverontreinigingen werd geëvalueerd onder welke omstandigheden MicroForce++ het best presteert voor het verwijderen van stikstof, teneinde met één en dezelfde nabehandelingstap ook de doelstellingen binnen de Kaderrichtlijn Water (KRW) te halen.

In dit onderzoek werd aangetoond dat een overall verwijderingsrendement (i.e. influent RWZI vs. effluent nabehandeling) voor 7 van de 11 gidsstoffen werd gehaald van ca. 80% bij een ozondosis van 0.43 g O₃/g DOC, een ozonverhouding van 33/66 over de twee ozonreactoren, en een hydraulische verblijftijd van 15 minuten in iedere bioreactor. De ozonbehoefte van MicroForce++ ligt daarmee ca. 40% lager dan bij een stand-alone ozonisatie proces (i.e. 0.72 g O₃/g DOC) om hetzelfde verwijderingsrendement te bereiken op het effluent van RWZI Walcheren. Het overall verwijderingsrendement voor alle 11 gidsstoffen en 19 (kandidaat)gidsstoffen bedraagt 70% en 74% respectievelijk.

Door het toepassen van verschillende mitigatiestrategieën m.b.t. bromaatvorming in het ozonisatieproces van MircoForce++ werd aangetoond dat er tot een ozondosis van ca. 0.55 g O₃/g DOC geen kwantificeerbare concentraties bromaat werden gevormd (i.e. < 0.2 µg/l), ondanks de spectaculair hoge bromideconcentraties van ordegrrootte 1.5-2 mg/l.

Bij een dosis van 0.43 g O₃/g DOC werd een daling van alle gemeten biologische effecten (i.e. Microtox, PAH-Calux, ER-Calux, PXR-Calux, GR-Calux) waargenomen, met een gemiddelde verlaging van ca. 70%. Daphniatox en P53 Calux konden niet worden gekwantificeerd omdat de waarden van het influent reeds onder de detectiegrens lagen.

Onder dezelfde omstandigheden werd bovendien aangetoond dat een volledige nitrificatie kan plaatsvinden in de eerste bioreactor, waardoor de mogelijkheid ontstaat om in een volgende test de tweede reactor onder andere redoxomstandigheden te bedienen en zodoende een volledige stikstofverwijdering te bewerkstelligen met slechts één installatie. Er wordt ook verwacht dat door deze toepassingen een breder pallet aan gidsstoffen zal worden verwijderd. Dit zal in een volgende fase worden onderzocht.

Verder is uit dit onderzoek gebleken dat MicroForce++ uitstekend scoort op CO₂ footprint en TCO. De CO₂ footprint bedraagt 66 g CO₂/m³, wat een verlaging betekent van ongeveer 50 % in vergelijking met de referentietechnologie (130 g CO₂/m³ voor Ozon + ZF). De belangrijkste besparing in CO₂ footprint is te danken aan de lagere ozondosis (0.43 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 verwaarloze contributie hebben op de totale CO₂ footprint.

De kosten van MicroForce++ zullen naar schatting 0.10 €/m³ bedragen, wat een reductie is van ca. 40 % 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.

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 de haalbaarheidsstudie in 2021 en de proof-of-principle tijdens de pilotstudie in 2022-2023 is het de doelstelling om deze technologie verder te gaan implementeren in de praktijk op demo- en fullscale installaties in Nederland en zo niet alleen een oplossing te bieden voor de nakende nieuwe wetgeving rond Stedelijk Afvalwater, maar tegelijk ook voor de objectieven die worden omschreven in de Kaderrichtlijn Water rond emissies van nutriënten.

SUMMARY

MicroForce++ combines ozonation and biological oxidation to remove organic micropollutants (e.g. pharmaceutical residues) from WWTP effluent in a sustainable and cost-effective manner. The MicroForce++ process consists of two consecutive, O₃/Bio reactors connected in series, with a specific ozone dosage in each O₃/Bio reactor. This conversion process transforms non-biodegradable molecules into smaller, biodegradable components, which are simultaneously mineralized in an environmentally friendly way using biofilm-on-carrier technology.

Through a pilot study, this innovative technology was successfully tested in practice at WWTP Walcheren and subsequently evaluated based on various criteria, including the removal efficiency of indicator substances, the CO₂ footprint, Total Cost of Ownership (TCO), ecotoxicity, and its applicability at WWTPs in the Netherlands. In addition to removing organic micropollutants, the study assessed under what conditions MicroForce++ performs best for nitrogen removal, in order to meet the objectives of the Water Framework Directive (KRW) with a single post-treatment step.

The research demonstrated that an overall removal efficiency (i.e. influent WWTP vs. effluent post-treatment) of approximately 80% was achieved for 7 out of 11 indicator substances with an ozone dosage of 0.43 g O₃/g DOC, an ozone distribution ratio of 33/66 between the two ozone reactors, and a hydraulic retention time of 15 minutes in each bioreactor. MicroForce++ requires about 40% less ozone compared to a stand-alone ozonation process (i.e. 0.72 g O₃/g DOC) to achieve the same removal efficiency in the effluent of WWTP Walcheren. The overall removal efficiency for all 11 indicator substances and 19 (candidate) indicator substances was 70% and 74%, respectively.

Moreover, by implementing various mitigation strategies regarding bromate formation in the ozonation process of MicroForce++, it was demonstrated that no quantifiable concentrations of bromate (<0.2 µg/l) were formed up to an ozone dosage of about 0.55 g O₃/g DOC, even with significant bromide concentrations of 1.5-2 mg/l.

At an ozone dosage of 0.43 g O₃/g DOC, a reduction in all measured biological effects (i.e., Microtox, PAH-Calux, ER-Calux, PXR-Calux, GR-Calux) was observed, with an average decrease of approximately 70%. Daphniatox and P53 Calux could not be quantified because the influent values were already below the detection limit.

Under these conditions, it was also demonstrated that complete nitrification can occur in the first bioreactor, allowing for the possibility of operating the second reactor under different redox conditions in a future test, thereby achieving complete nitrogen removal with a single installation. It is also expected that these applications will lead to the removal of a broader range of indicator substances, which will be investigated in a subsequent phase.

Furthermore, this research revealed that MicroForce++ excels in terms of CO₂ footprint and TCO. The CO₂ footprint is 66 g CO₂/m³, representing a reduction of approximately 50% compared to the reference technology (130 g CO₂/m³ for Ozone + ZF). The primary savings in CO₂ footprint result from the lower ozone dosage (0.43 g O₃/g DOC) required for indicator

substance removal, which in turn allows for lower energy and resource consumption. Additionally, the production of sludge or the use of backwash water by the biofilm reactors makes a negligible contribution to the overall CO₂ footprint.

The estimated cost of MicroForce++ is approximately 0.10 €/m³, which is a reduction of about 40% compared to the reference technology using ozone in combination with a sand filter. This cost reduction is primarily attributed to the lower ozone demand and, consequently, reduced energy consumption.

Finally, this study demonstrated that the modular concept of MicroForce++ allows for high adaptability at wastewater treatment hotspots in the Netherlands. MicroForce++ aims to be a standardized water treatment technology that can be easily installed and comes in various available formats to provide a solution regardless of the size of the WWTP. The compact design is made possible by the short residence time in the biological system and intelligent ozone dosing.

As a result of the positive results from the feasibility study in 2021 and the proof-of-principle during the pilot study in 2022-2023, the objective is to further implement this technology in practice on demo and full-scale installations in the Netherlands. This aims to not only provide a solution for upcoming legislation regarding Urban Wastewater but also to address the objectives outlined in the Water Framework Directive regarding nutrient emissions.

LIJST MET AFKORTINGEN

ABR	Antibiotica resistentie
AOC	Assimileerbaar Organische Koolstof
BR x	Bioreactor x
BT x	Buffertank x
BZV5	Biologisch zuurstofverbruik
CAPEX	Capital expenditures - Kapitaaluitgaven
CZV	Chemische Zuurstofverbruik
DBP	Desinfectiebijproducten
DO	Dissolved Oxygen - Opgeloste Zuurstof
DOC	Dissolved Organic Carbon - Opgeloste organische koolstof
EGV	Elektrisch geleidend vermogen
HDPE	High Density Polyethylene
IE	Inwoner Equivalenten
IenW	Infrastructuur en Waterstaat
ILOW	Integraal Laboratorium Overleg Waterkwaliteitsbeheerders
IPMV	Innovatieprogramma Microverontreinigingen
KRW	Kaderrichtlijn Water
LCA	Life Cycle Assessment
LOD	Limit of Detection (detectielimiet)
LOX	Vloeibare zuurstof
NBT	Nabezinktank
Nkj	Kjeldahl-stikstof
Nox	Stikstofoxiden
OMV	Organische Microverontreinigingen
OPEX	Operational expenses - Operationele kosten
OR x	Ozonreactor x
ORP	Redoxpotentiaal
RWZI	Rioolwaterzuiveringsinstallatie
SAARR	Specifieke oppervlakte Ammonium verwijderingssnelheid
SOUR	Specifieke zuurstof opnamesnelheid

SP x	Setpoint x
SS	Suspended Solids - Zwevende stoffen
STOWA	Stichting Toegepast onderzoek Water
TCO	Total cost of ownership
TRL	Technology Readiness Level
TU	Toxic Unit
UVA	UV absorptie
UVT	UV transmissie (254 nm)

DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

RAPPORT PILOTONDERZOEK MICROFORCE++

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	SUMMARY	
	LIJST MET AFKORTINGEN	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
2	BESCHRIJVING TECHNOLOGIE	3
3	DOELSTELLING & ONDERZOEKSVRAGEN	6
3.1	Doelstelling	6
3.2	Onderzoeksvragen	6
3.3	Extra doelstellingen	6
4	MATERIALEN EN METHODEN	8
4.1	Testvariabelen	8
4.2	Pilotconfiguratie	8
4.3	Overzicht pilot testen	9
4.4	Testduur	10
4.5	Bemonstering	10
4.6	Analyses	11
4.6.1	Temperatuur, pH, EGV, ORP, DO	11
4.6.2	Vrij ozon	11
4.6.3	CZV, stikstof en fosfaat	12
4.6.4	Gidsstoffen, DOC, bromide, bromaat, zwevende stoffen	12
4.6.5	Biologische effecten	12
4.6.6	PFAS en ABR	12
4.6.7	Respirometrie en microscopie	12
4.7	Locatie pilot	15

4.8	Karakterisering effluent RWZI Walcheren	15
4.9	Schaalgrootte pilot	15
4.9.1	Design pilot	17
4.9.2	Ondersteunend onderzoek	18
5	RESULTATEN & DISCUSSIE	19
5.1	Basisparameters	19
5.1.1	Temperatuur	19
5.1.2	UV transmissie UVT	20
5.1.3	Redoxpotentiaal (ORP)	21
5.1.4	Elektrisch geleidend vermogen (EGV)	22
5.1.5	Opgeloste zuurstofconcentratie (DO)	23
5.2	Nutriënten	24
5.2.1	Koolstof	24
5.2.2	Stikstofbalans	25
5.2.3	Ammonium	26
5.2.4	Nitriet	27
5.2.5	Nitraat	28
5.2.6	Totaal stikstof en stikstofbalans SP3	29
5.2.7	Fosfor	29
5.3	Microverontreinigingen	30
5.3.1	Resultaten SP1 – enkel nabehandeling (0.25 g O ₃ /g DOC, 50/50, 7.5 min)	31
5.3.2	Resultaten SP2 – enkel nabehandeling (0.35 g O ₃ /g DOC, 33/66, 15 min)	32
5.3.3	Resultaten SP3 – enkel nabehandeling (0.43 g O ₃ /g DOC, 33/66, 15 min)	34
5.3.4	Vergelijking SP1, SP2 en SP3 – enkel nabehandeling	35
5.3.5	Benchmarktesten stand-alone ozonisatie versus MicroForce ⁺⁺ SP3 (0.43 g O ₃ /g DOC, 33/66, 15 min)	36
5.3.6	Verwijdering OMV actief slib zuivering RWZI Walcheren	37
5.3.7	Verwijderingsrendement influent zuivering versus effluent pilot (inclusief bypass)	38
5.3.8	Verwijderingsrendement MicroForce ⁺⁺ concept EU-voorstel Richtlijn Stedelijk Afvalwater 2023	41
5.4	Bromide en bromaat	41
5.4.1	SP1 (0.25 g O ₃ /g DOC, 50/50, 7.5 min)	42
5.4.2	SP2 (0.35 g O ₃ /g DOC, 33/66, 15 min)	42
5.4.3	SP3 (0.43 g O ₃ /g DOC, 33/66, 15 min)	43
5.4.4	Testen met single stage ozon/bioreactor (SP EXTRA)	43
5.5	Respirometrie	44
5.5.1	Specifieke oppervlakte Ammonium verwijderingssnelheden (SAARR)	44
5.5.2	Specifieke oppervlakte zuurstofopnamesnelheden (SOUR)	46
5.6	Biologische effecten	46
6	LCA (KWR)	48
6.1	Prestatie MicroForce⁺⁺ o.b.v. ecopunten	48
6.2	Vergelijking MicroForce⁺⁺ met LOX versus in-situ opgewekt zuurstof	49

7	EVALUATIE MICROFORCE++ VOLGENS CRITERIA IPMV	51
7.1	CO₂ footprint berekeningen	51
7.1.1	Energie	51
7.1.2	Hulpstoffen, slibproductie, spoelwater, opvoerhoogte en civiele materialen	52
7.1.3	Totale CO ₂ footprint	54
7.2	Kosten	55
7.2.1	Investeringskosten (CAPEX)	55
7.2.2	Operationele kosten (OPEX)	56
7.2.3	Samenvatting kosten	57
7.3	Evaluatiecriteria voor MicroForce++ met in-situ opgewekt zuurstof	57
7.3.1	CO ₂ footprint MicroForce++ met in-situ O ₂	58
7.3.2	Kosten MicroForce++ met in-situ O ₂	59
7.3.3	Algemene conclusie LOX vs. In-situ O ₂	59
7.4	Verwijderingsrendement gidsstoffen	60
7.5	Vergelijking met referentie technologieën	60
8	INPASBAARHEID OP NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK	61
8.1	Productlijn MicroForce++	62
8.2	Distributie MicroForce++ op RWZI hotspotlocaties	63
8.3	Effect op de bedrijfsvoering	64
8.3.1	Impact op de energiec capaciteit	64
8.3.2	Continuïteit tijdens diurnale variaties	65
8.3.3	Simultane stikstofverwijdering en OMV verwijdering	65
9	CONCLUSIES	66
10	SUGGESTIES VOOR VERDER ONDERZOEK	69
11	REFERENTIES	70
APPENDIX A	PROCESS FLOW DIAGRAM MICROFORCE++	71
APPENDIX B	ABSOLUTE CONCENTRATIES GIDSSTOFFEN IN SP1, 2 EN 3	73
APPENDIX C	VERWIJDERING GIDSSTOFFEN NIEUWE EU CONCEPTWETGEVING VERSUS IPMV NEDERLAND	75
APPENDIX D	CO ₂ MODELBEREKENING INGEVULD	78
APPENDIX E	BEREKENINGEN CO ₂ FOOTPRINT	80
APPENDIX F	OVERZICHT KOSTENBEREKENINGEN	82
APPENDIX G	LIJST RWZI HOTSPOTS	85

1

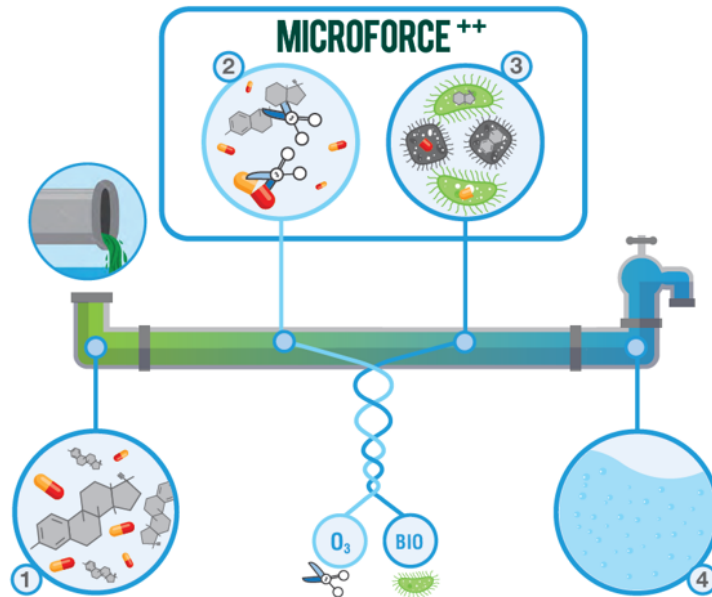
INLEIDING

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 in 2021 een haalbaarheidsstudie (STOWA 2022-14) uitgevoerd op een innovatieve, duurzame oxidatietechnologie waarbij ozonisatie en biologische oxidatie worden gecombineerd. De resultaten van deze haalbaarheidsstudie waren veelbelovend, waardoor werd beslist om de technologie ook in de praktijk op pilotschaal te gaan onderzoeken op RWZI Walcheren in 2022-2023.

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 met ozon 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 drastisch te verlagen ten opzichte van 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. Bovendien wordt in de ontwikkeling zoveel mogelijk gestreefd naar 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 eindgebruiker. Naast de verwijdering van organische microverontreinigingen wordt getracht om met MicroForce++ simultaan een verwijdering van stikstof en uitspoelende deeltjes (SS) uit de nabezinktank (NBT) te realiseren.

De doelstelling van deze pilotstudie is om een objectieve evaluatie te maken en een proof-of-principle te leveren 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).

Om deze evaluatie te maken voeren we eerst praktische testen uit om na te gaan wat de optimale procesomstandigheden zijn om de verwijderingsdoelstellingen te halen. Met dit optimum gaan we opnieuw, analoog aan de haalbaarheidsstudie, doorrekenen wat de verwachte kosten en CO₂ footprint zijn van deze technologie voor een RWZI met schaal-grootte 100.000 IE.

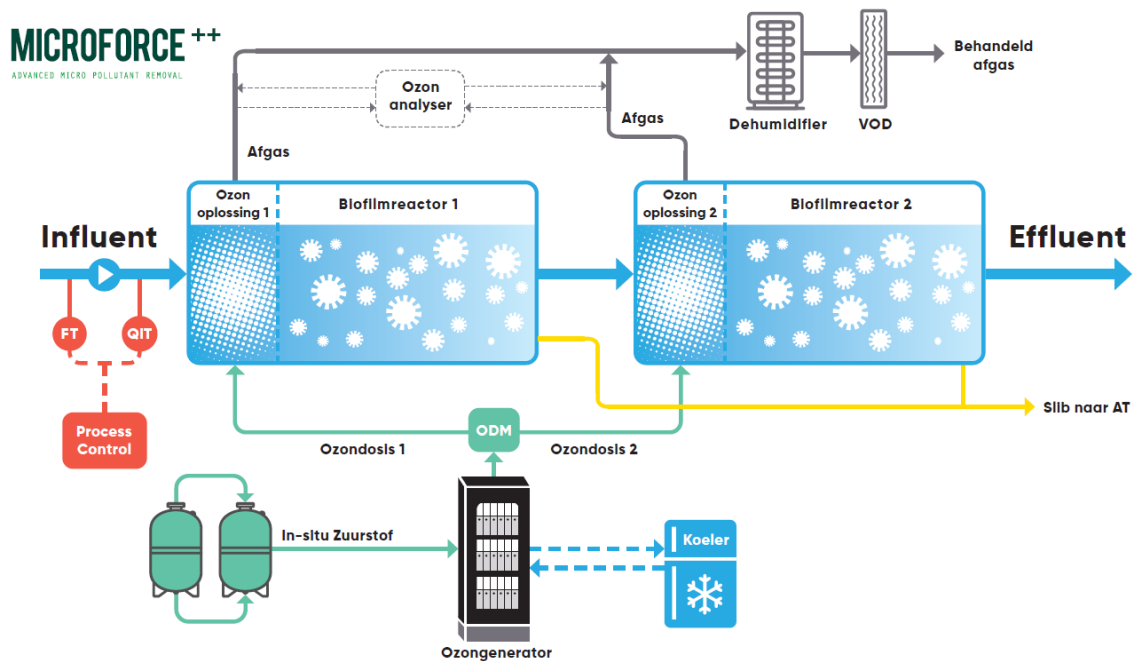
In dit rapport zal eerst een uitvoerige omschrijving worden gegeven van de verschillende procesonderdelen en de MicroForce++ technologie an sich (cfr. Hoofdstuk 2). Daarna wordt dieper ingegaan op de doelstellingen, onderzoeksvragen, testvariabelen en de praktische details van het pilotonderzoek (cfr. Hoofdstuk 3). In hoofdstuk 4 wordt dieper ingegaan op de materialen en methoden die gebruikt werden om de testen en analyses uit te voeren en de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden. Nadien worden de testresultaten van het onderzoek gedeeld en besproken (cfr. Hoofdstuk 5). Nadien worden de resultaten van de LCA studie getoond die in het kader van dit onderzoek werden uitgevoerd in samenwerking met KWR om dieper in te gaan op de duurzaamheidsaspecten van MicroForce++. In hoofdstuk 7 wordt de performantie van MicroForce++ op de verschillende criteria van het IPMV nog eens afgetoetst met de verschillende referentietechnologieën (i.e. PACAS, GAK, Ozon + Zandfiltratie). Nadien wordt een evaluatie gemaakt van de inzetbaarheid van de technologie in de Nederlandse waterzuiveringspraktijk (cfr. Hoofdstuk 8). Tot slot worden de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek gedeeld in hoofdstuk 9. De referenties en appendices zijn terug te vinden in hoofdstuk 10 en 11 respectievelijk.

2

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 recalcitrante 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 2. Voor een uitgebreide omschrijving van alle individuele componenten wordt verwezen naar Appendix A.

FIGUUR 2 PROCESS FLOW DIAGRAM MICROFORCE TECHNOLOGIE



Voor het opwekken van ozon wordt bij MicroForce++ de meest modulaire en onderhoudsvriendelijke ozongenerator ingeschakeld die momenteel beschikbaar is op de markt. Deze kan gevoed worden 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 O_3 /Bio reactoren waarbij in elke O_3 /Bio reactor een specifieke ozondosis wordt gehanteerd. Een distributiemodule na de ozongenerator zorgt ervoor dat verschillende concentraties ozon aan de twee O_3 /Bio compartimenten kunnen worden gevoed met één en dezelfde ozongenerator. Het geproduceerde ozon wordt opgelost in het ozoncompartiment als microbubbels. Microbubbels zorgen voor een hoge massatransferefficiëntie tussen de gas en waterfase waardoor de hoogte van de ozonreactoren relatief laag kan worden gehouden (ca. 2 meter). Deze microbubbels kunnen worden gegenereerd op verschillende manieren. PureBlue heeft een eigen ozoninjectiemethode ontwikkeld

die erin slaagt om in compacte ozonreactoren een hoge ozon oplossingsefficiëntie te realiseren en tegelijk bromaatvorming te beperken.

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 met behulp van een innovatief sturingslogaritme 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 (met behulp van monitoring flow en real-time 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 sibleeftijd 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 ca. $1150 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Ook andere dragermaterialen worden op dit moment onderzocht en zullen deel uitmaken van het vervolgonderzoek op deze pilotstudie. 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 de bergingscapaciteit van het biologisch filter bereikt wordt zal het waterniveau in het filter worden verhoogd en het dragermateriaal in beweging worden gebracht met beluchting schotels 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 moet zorgen voor een significante verlaging 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.

3

DOELSTELLING & ONDERZOEKSVRAGEN

3.1 DOELSTELLING

De doelstelling van het pilotonderzoek is om de MicroForce++ technologie op te schalen t.o.v. het reeds uitgevoerd onderzoek (cfr. STOWA 2022- 14) en een proof-of-principle te leveren wanneer een pilot volcontinu wordt bedreven met een representatieve afvalwatermatrix. Voor een succesvolle proof-of-principle moeten de 11 gidsstoffen (anno 2021) met een zo hoog mogelijke efficiëntie verwijderd worden en dit met een lagere ozondosis en een lagere CO₂ footprint dan de referentietechnologie (Ozon + Zandfiltratie). Tegelijkertijd willen we de vorming van ongewenste, toxische bijproducten zo laag mogelijk houden en een simultane verwijdering van stikstof realiseren. Tot slot is het ook belangrijk om de total cost of ownership van deze installatie zo laag mogelijk te houden door innovatief design en engineering.

Om deze doelstellingen te bereiken werden een aantal onderzoeksvragen opgesteld die enerzijds resulteren uit voortschrijdend inzicht en anderzijds uit de reeds uitgevoerde haalbaarheidsstudie.

3.2 ONDERZOEKSVRAGEN

- Wat is de minimale totale ozondosis benodigd om voldoende verwijdering van gidsstoffen te bewerkstelligen?
- Wat zijn de biologische designparameters die moeten worden gekoppeld aan deze minimale totale dosis om de emissienormen en projectdoelstellingen te halen?
- Wat is de invloed van de ozonverdeling over twee in serie geschakelde reactoren op de verwijdering van micropolluenten en de vorming van toxische, ongewenste bijproducten (e.g. bromaat)
- Wat is de invloed van ozon in combinatie met biofiltratie op ecotoxicologische effectmetingen?

3.3 EXTRA DOELSTELLINGEN

Voorgenoemde doelstellingen willen we bereiken met een zo laag mogelijke CO₂ footprint, tegen zo laag mogelijk kosten (OPEX en CAPEX) en tevens met een zo hoog mogelijke implementeerbaarheid (e.g. modulair en compact).

Verder willen we met deze pilot ook volgende randfactoren onderzoeken:

DE PILOT LANGDURIG (CA. 1 JAAR) EN CONTINU BEDRIJVEN

De pilot mag niet vaak uitvallen door technische storingen: waar liggen falingsrisico's? (HAZOP)

Het sturingslogaritme op basis van real-time DOC analyses die werd ontwikkeld voor de industriële MicroForce++ installaties (cfr. case studies in STOWA 2022 -14) zal worden getoetst en geoptimaliseerd in de praktijk op het effluent van een RWZI.

SIMULTANE VERWIJDERING VAN STIKSTOF

Naast de problematiek rond microverontreiniging trachten we met deze nabehandeling een 2-in-1 oplossing te ontwikkelen en te zorgen voor een effluent dat voldoet aan de doelstellingen van de Kaderrichtlijn afvalwater (KRW) met betrekking tot stikstofemissies naar het milieu. MicroForce++ verleent zich als multi-stage ozon- en biofilmreactor systeem als zeer interessante technologie om deze doelstellingen gelijktijdig te bereiken aangezien de mogelijkheid bestaat om op ieder biofilter een verschillende redoxpotentiaal toe te passen en dus een nitrificatie/denitrificatieproces te introduceren.

ZO LAAG MOGELIJKE VORMING VAN ONGEWENSTE OXIDATIE BIJPRODUCTEN (E.G. BROMAAT)

RWZI Walcheren is gelegen aan de kust. De bromide concentratie werd gemonitord gedurende 12 maanden. Hieruit blijkt dat de bromide concentratie bovengemiddeld tot uitzonderlijk hoog liggen, nl. 1500 – 2200 µg/l. Deze pilotlocatie zal dus ongetwijfeld interessant zijn om een vergelijkend onderzoek uit te voeren omdat er hoogstwaarschijnlijk meetbare bromaat concentraties zullen gevormd worden. Anderzijds kan er ook meteen onderzoek gedaan worden naar mitigatie strategieën om de bromaatconcentratie toch nog onder de maximum target emissies te krijgen van maximaal 1 µg/l.

EXTRA VERWIJDERING VAN ZWEVENDE BESTANDELEN

Door de aanwezigheid van een biologische filtratiestap zal er ook een fysische scheiding plaatsvinden voor potentieel uitspoelende deeltjes uit de nabezinktank. Hierdoor vindt simultaan ook een extra effluent polishing stap plaats. De performantie van deze filtratiestap zal onderzocht worden door analyses op zwevende stoffen (SS) uit te voeren op influent en effluent van beide bioreactoren. Daarnaast is het ook mogelijk om het terugspoelwater te bemonsteren en te analyseren (zie Hoofdstuk 4).

VERHOGEN VAN DE TRL

Op basis van de resultaten en de praktijkervaring die we opdoen bij het bedrijven van deze pilot beogen we de TRL te verhogen van 5 naar 7 na het afronden van deze pilotfase. De bevindingen van deze pilot zullen gebruikt worden als grondslag voor de opschaling naar een demo installatie die nog meer hydraulische capaciteit heeft.

4

MATERIALEN EN METHODEN

4.1 TESTVARIABLEN

Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden werden in totaal 3 hoofdvariabelen getest:

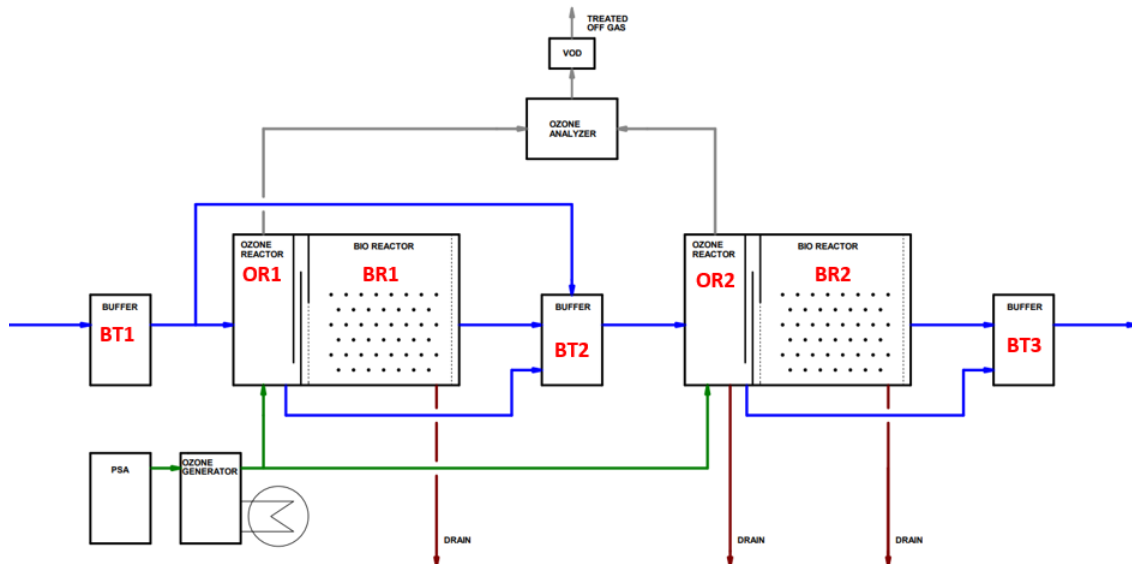
- De ozondosis
 - Variabel tussen 0.15 en 0.5 g O₃/g DOC
- De verdeling van de ozon tussen de reactoren
 - 50/50 en 33/66 of 66/33
- De HRT in de bioreactoren.
 - 3.75 min – 15 min per bioreactor

De strategie die we zullen hanteren om al deze variabelen zo representatief mogelijk te testen wordt verder toegelicht.

4.2 PILOTCONFIGURATIE

In Figuur 3 wordt een vereenvoudigd PFD gegeven van de pilot. Hierin valt op dat door het inbouwen van verschillende bypassen het mogelijk is om de pilot met verschillende configuraties te bedrijven.

FIGUUR 3 PROCESS FLOW DIAGRAM – MOGELIJKE CONFIGURATIES



Net zoals in de pilottesten die werden uitgevoerd op kleine schaal is deze pilot opgebouwd uit twee in serie geschakelde reactoren die telkens uit een ozoncompartiment (OR1 & OR2) bestaan en een biocompartiment (BR1 & BR2).

De standaardconfiguratie van de testopstelling is dus:

OR1 – BR1 – OR2 – BR2

Bovendien bestaat de pilot ook uit 3 buffertanks (BT) om de continuïteit van het proces te borgen, 1 voor het influent (BT1), 1 tussen BIO1 en OR2 (BT2), en 1 na BIO2 (BT3). De totale opstelling kan dus conceptueel omschreven worden als:

BT1 – OR1 – BR1 – **BT2** – OR2 – BR2 – **BT3**

4.3 OVERZICHT PILOT TESTEN

In Tabel 1 wordt een overzicht gegeven van alle testen (SP1-4) die werden uitgevoerd inclusief de testvariabele die werd onderzocht.

TABEL 1 OVERZICHT PILOT TESTEN EN VARIABELEN (TARGET OZONDOSIS = OR1+OR2)

SETPOINT (SP)	Testvariabele	Target Ozondosis (g O ₃ /g DOC)	Ozondistributie (OR1/OR2)	HRT BR (min)
1	Oriënterend	0,35	50/50	7,5
2	HRT/ozondistributie	0,35	33/66	15
3	Ozondosis	0,45	33/66	15
Extra	Configuratie 1 OR +/- BR	0,45	-	0-15
4*	Redox BR1/BR2	0,45	33/66	15

*Deze fase is nog lopende tijdens het schrijven van dit rapport. De resultaten hiervan zullen gerapporteerd worden als addendum of in een afzonderlijk rapportage.

Tijdens setpoint 1 (SP1) werd een oriënterend onderzoek uitgevoerd m.b.t. benodigde ozondosis en de automatisering/sturing op basis van de online DOC metingen die wordt uitgevoerd. Op basis van de resultaten en eerste bevindingen van deze test (zie Hoofdstuk 5) werd ervoor gekozen om zowel de ozondistributie als de HRT in de biofilter te wijzigen, teneinde de verwijderingsrendementen van microverontreinigingen te verhogen en/of de oxidatie van ammonium in de eerste bioreactor te verhogen (SP2). De redenering voor deze keuze wordt verder toegelicht in Hoofdstuk 5.

In SP3 werd de ozondosis licht verhoogd om de verwijdering op een breder pallet aan (kandidaat) gidsstoffen op te krikken en iets meer marge te hebben op een mogelijke verstrenging van de richtlijnen rondom verwijdering van gidsstoffen.

Op het einde van deze test (SP Extra) werden ook nog een aantal losse testen uitgevoerd zonder biofilter en testen met 1 ozon-bio reactor. Hieruit kunnen we afleiden wat het effect is van een meerstaps ozonisatie versus een éénstaps ozonisatie op de bromaatvorming.

Als maximum HRT van de biofilters werd 15 min per bed gekozen omwille van de realistische en praktische implementeerbaarheid op volle schaal installaties. Een kortere HRT betekent dat we de bioreactoren compacter kunnen bouwen en dus een extra besparing kunnen realiseren.

Tot slot zal in SP4 ook het effect van variërende redoxcondities in de bioreactoren worden onderzocht op de verwijdering van gidsstoffen en eventueel verdere mitigatie van bromaat. Dit onderzoek is lopende tijdens het schrijven van dit rapport.

4.4 TESTDUUR

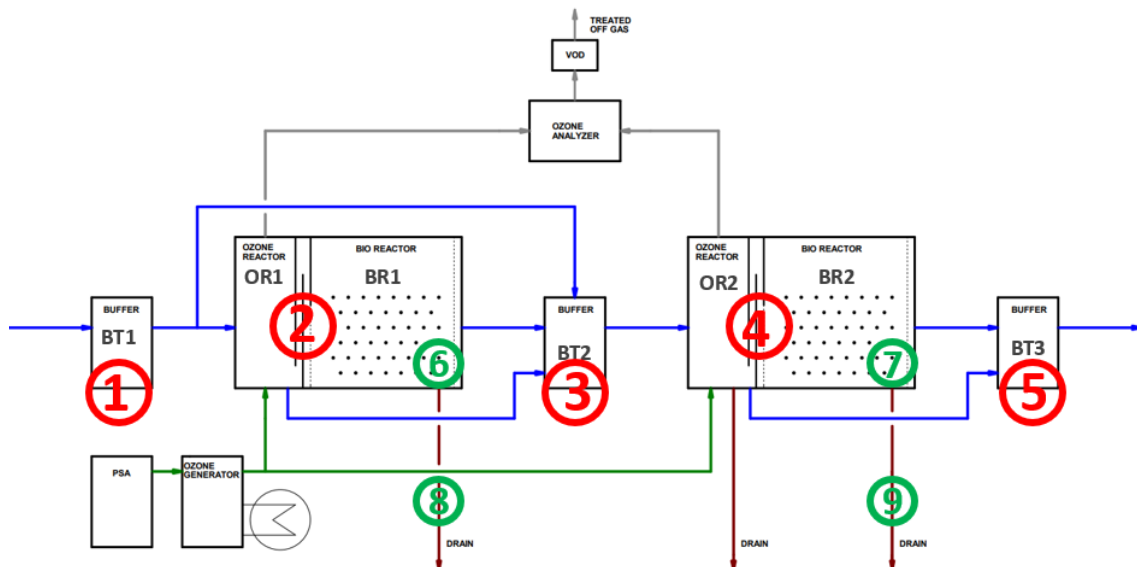
Duurtesten van 6 – 12 weken minimaal per instelling, afhankelijk van de weersomstandigheden, continue belasting van de biofilters en eventuele storingen. Deze relatief lange testduur heeft te maken met adaptatietijd van de biofilm aan het te ontvangen water. In de planning van de testen gaan we initieel uit van een adaptatieperiode van minimaal 6 weken na het wijzigen van een setpoint.

De startsituatie bevatte geen blancobiofilm maar het dragermateriaal was reeds begroeid met een eerder opgekweekte variant afkomstig uit een MBBR pilot die zich gedurende 1 jaar op RWZI Walcheren bevond. Op deze manier werd getracht de eerste opstartperiode te verkorten. Uit onze ervaring met biofilm-op-drager technologie kunnen we zo een kortere opstartperiode realiseren dan wanneer we beginnen met een blanco biofilm situatie. De biofilm is dan nog niet geadapteerd maar deze heeft wel al een basisstructuur waardoor kolonisatie sneller plaatsvindt. Deze methode is reeds gestandaardiseerd in de producten van PureBlue waardoor de opstartkosten laag kunnen worden gehouden.

De opstarttijd en optimalisatie on site nam ongeveer 4 weken in beslag. De totale testtijd voor de 3 setpoints was uiteindelijk ongeveer 38 weken. De totale testperiode waarin de pilot volcontinu bedreven werd bedroeg dus ongeveer 42 weken.

4.5 BEMONSTERING

FIGUUR 4 BEMONSTERINGSLOCATIES OP DE PILOT



BEMONSTERINGLOCATIES EN METHODE**TABEL 2** **BESCHRIJVING MONSTERLOCATIES + TYPE BEMONSTERING**

Monsterlocatie	Omschrijving	Type bemonstering
1	Buffertank 1	2x24h of 1x48h bemonstering
2	Tussen OR1-BR1	Steekmonster
3	Buffertank 2 (Effluent reactor 1)	2x24h of 1x48h bemonstering
4	Tussen OR2-BR2	Steekmonster
5	Buffertank 3 (Effluent reactor 2)	2x24h of 1x48h bemonstering
6	In carrier bed BR1	Carrier monster
7	In carrier bed BR2	Carrier monster
8	Drain	Steekmonster backwash
9	Drain	Steekmonster backwash

Voor de bemonstering van gidsstoffen wordt rekening gehouden met de richtlijnen opgesteld door STOWA (*voorlopige werkinstructie bemonstering en chemische analyse medicijnresten in rwzi-afvalwater, versie 0.7, 2020*)

BEMONSTERINGFREQUENTIE EN STRATEGIE

Tijdens SP1 werden drie steekmonsters per week genomen (maandag, woensdag en vrijdag) en één 48 monster (woensdag). Uit de resultaten en voortschrijdend bleek dat een dergelijke hoeveelheid monsters overbodig is omdat de variatie tussen twee opeenvolgende bemonsteringsdagen beperkt is. Tijdens SP2 en 3 werd het aantal bemonsteringen dus verlaagd naar 1 a 2 keer per week. Het aantal monsters per SP varieert dus naargelang de weersomstandigheden (RWA vs. DWA) en de totale testduur.

De bemonsteringcampagnes voor gidsstoffen werd per test ongeveer 3 keer uitgevoerd (na ca. 4, 5 en 6 weken adaptatietijd van het biofilter, afhankelijk van de weersomstandigheden zodat geen RWA bemonsterd werd. De resultaten die worden weergegeven in hoofdstuk 5 met betrekking tot de gidsstoffen zijn altijd van het laatste monster (i.e. na de langste adaptatietijd).

De bemonstering voor bioassays, PFAS en ABR werd eenmalig uitgevoerd onder de operationele testcondities van SP3.

4.6 ANALYSES**4.6.1 TEMPERATUUR, PH, EGV, ORP, DO**

De standaard eigenschappen van ieder monster zoals temperatuur, pH, elektrisch geleidend vermogen (EGV), redoxpotentiaal (ORP) en opgeloste zuurstof (DO) werden ter plekke geanalyseerd met een Hach Multimeter (type HQ-2200).

4.6.2 VRIJ OZON

De concentratie vrij ozon in de watermatrix werd op regelmatige basis opgevolgd aan de hand van een standaard meetkit van Macherey-Nagel. Deze analyse werd ter plekke uitgevoerd ogenblikkelijk na de afname van het monster. Verhoogde vrije ozonconcentraties in de watermatrix zouden een indicatie kunnen zijn dat verhoogde bromaatconcentraties zullen worden gevormd, alsook kan er mogelijk een toxisch effect optreden voor de microbiologische flora die het geozoniseerde effluent stroomafwaarts ontvangt.

4.6.3 CZV, STIKSTOF EN FOSFAAT

Naast de standaardparameters die ter plekke zijn geanalyseerd en gelogd werden ook samples genomen die vervolgens gekoeld werden getransporteerd naar de labfaciliteiten van PureBlue, waar ze, indien gewenst, werden geanalyseerd op CZV, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, Totaal-N, Totaal-P en Ortho-P aan de hand van doe-het-zelf testkits van Macherey Nagel.

Tijdens SP1 werd ook getracht om DOC te meten aan de hand van Macherey-Nagel testkits. De resultaten hiervan werden echter niet betrouwbaar genoeg bevonden in vergelijking met de analyses die werden uitgevoerd door Aquon. Een mogelijke verklaring hiervoor is de interferentie van de hoge zoutgehalten op deze meting.

4.6.4 GIDSSTOFFEN, DOC, BROMIDE, BROMAAT, ZWEVENDE STOFFEN

De analyse van de 19 (kandidaat)gidsstoffen, DOC, bromide, bromaat en zwevende stoffen werden uitbesteed bij Aquon, een bevoegd ILOW-laboratorium (Integraal Laboratorium Overleg Waterkwaliteitsbeheerders).

De bromaatanalyses werden op hun beurt door Aquon uitbesteed bij Aqualab Zuid, omdat zij een lagere detectiegrens hanteren van 0.2 $\mu\text{g/l}$.

4.6.5 BIOLOGISCHE EFFECTEN

De bioassays voor de analyse van Daphniatox, Microtox, PAH-Calux, ER-Calux, PXR-Calux, GR-Calux, P53-Calux (-S9) werden uitbesteed bij het lab BioDetection Systems (BDS). Hiervoor werd eenmalig 6 liter monster genomen onder DWA omstandigheden in donkere, glazen flessen. Deze analyses werden enkel uitgevoerd op het influent en effluent van de pilot onder de testcondities van SP3.

4.6.6 PFAS EN ABR

In het kader van dit onderzoek werden ook in opdracht van STOWA monsters genomen voor de analyse van PFAS en antibiotica resistentie (ABR). Deze bemonstering en analyses werden uitgevoerd door IMD. De resultaten hiervan zullen in een aparte STOWA rapportage worden opgenomen.

4.6.7 RESPIROMETRIE EN MICROSCOPIE

Respirometrie is een uiterst nuttig instrument om de kinetiek van NH_4 -verwijdering door een specifieke biomassa te begrijpen (Mainardis, 2020). Verschillende factoren (temperatuur, opgeloste zuurstof, koolstof, koolstof/totaal stikstofverhouding, etc.) hebben invloed op de prestaties van de bioreactoren. Daarom is een periodieke controle van de biofilm onder lab omstandigheden a.d.h.v. respirometrie interessant, vooral in de opstartfase of na het veranderen van één of meerdere testvariabelen. De grenzen van de operationele parameters waarbinnen een robuuste werking van de bioreactor kan worden gegarandeerd, worden mede afgeleid uit respirometriemetingen op de biomassa.

FIGUUR 5

LAB SET-UP RESPIROMETRIE – PUREBLUE WATER HQ



Figuur 5 toont de laboratoriumopstelling die voor deze analyses werd gebruikt. Het bestaat uit twee transparante PVC-reactoren die afzonderlijk worden gebruikt om respirometrie uit te voeren op dragers uit bioreactoren 1 en 2. Voor de testen wordt 1 liter dragermateriaal genomen uit elk van de bioreactoren. Nadien wordt kraanwater op 25°C toegevoegd om een totaal volume van 5 liter te bereiken. Verwarmingselementen en/of koelspiralen houden het water in de buitenste schil van de reactoren op temperatuur. Stikstofgas wordt gebruikt om de oplossingen eerst te ontgassen ($DO < 0,5 \text{ mg/l}$). Mengapparaten zorgen voor volledige menging van het systeem. Ammoniumchloride wordt aan de oplossingen toegevoegd om $5 \text{ mg/l NH}_4\text{-N}$ te bereiken, waarna een t0 monster wordt genomen uit elke reactor. Een beluchtingstoestel met diffusors die is aangesloten op de reactoren zorgt ervoor dat de DO-concentratie tussen 2 en 4 mg/l blijft. Nadien wordt elke 10 minuten een monster genomen. De monsters worden getest op $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ en $\text{NO}_2\text{-N}$ met behulp van testkits van de Macherey-Nagel. De meetresultaten worden omgezet naar ammoniumoxidatiesnelheden. De DO-gegevens worden online gelogd en nadien gebruikt als input om de OUR te berekenen.

De operationele parameters in de laboratoriumopstelling kunnen verschillen van die in de bioreactoren van MicroForce++. Een korte bespreking van de gevoeligheid van de specifieke oppervlakte verwijderingssnelheid van ammonium (specific area ammonia removal rate - SAARR) voor de operationele parameters wordt hieronder besproken.

TEMPERATUUR

Temperatuur is een van de meest cruciale factoren die de kinetiek van NH_4 -verwijdering beïnvloeden. De prestaties van de biofilm zijn positief en exponentieel gecorreleerd met de temperatuur van de oplossing volgens de Arrhenius-vergelijking. De operationele temperatuur in de pilot was over het algemeen lager dan de 25°C die tijdens de respirometrietesten werden gehandhaafd.

De resultaten van de SAARR verkregen uit het kinetisch onderzoek werden gecorrigeerd om de SAARR te schatten die zou worden verwacht bij de temperatuur waargenomen in de pilot met behulp van de volgende formule:

$$SAARR_{T \text{ adjusted}} = SAARR_{kinetic} * \theta^{(T_0 - T_1)}$$

Waarbij $\theta = 1,09$ de aanpassingsfactor is, T_1 de temperatuur van het water in MicroForce++ en T_0 temperatuur van het water in het respirometrie-experiment.

OPGELOSTE ZUURSTOF (DO)

De DO concentratie is ook een cruciale determinant voor de kinetiek van NH_4 -oxidatie. Een minimale DO-concentratie van 1.5 mg/l is vereist om ammoniumoxidatie te garanderen. Het DO-niveau in de respirometriestudie werd automatisch gehandhaafd tussen de 2 mg/l en 5 mg/l met behulp van een beluchter. In de pilot werden de biocompartimenten voorafgegaan door de ozonbehandeling. Daarom worden er voldoende hoge concentraties van DO waargenomen. Er worden dus geen verschillen verwacht als gevolg van de verschillen in DO tussen de respirometrietest en de bioreactoren.

Om verdere berekeningen te maken met de output van deze testen werden volgende formules en constantes gebruikt:

Specific area ammonia removal rate (SAARR, g- NH_4 .m².d⁻¹)

$$SAARR = \frac{(NH_4)_{IN} - (NH_4)_{OUT}}{a}$$

waarbij $(\text{NH}_4)_{IN}$ en $(\text{NH}_4)_{OUT}$ de belasting van NH_4 in de oploop en afloop van de bioreactoren zijn, respectievelijk in g/d en a is de specifieke oppervlakte van het dragermateriaal.

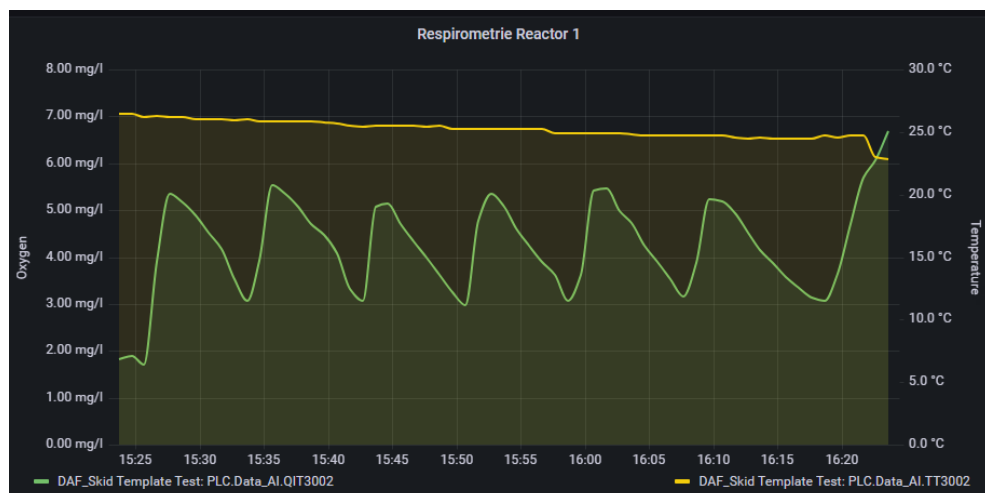
Specific area oxygen uptake rate (SAOUR, g- O_2 .m².d⁻¹)

$$SAOUR = \frac{DO_{t1} - DO_{t2}}{t * a}$$

waarbij DO_{t1} en DO_{t2} de opgeloste zuurstofwaarden zijn op tijdstip t1 en t2, respectievelijk. t, is de duur tussen t1 en t2, en a is de totale oppervlakte van het dragermateriaal.

Tijdens de respirometrie experimenten wordt DO voortdurend online gelogd tijdens het experiment met behulp van Grafana® (Figuur 6). Deze gegevens worden verwerkt met behulp van SciLab® en Excel® om de SAOUR te berekenen. In het geval van de pilot wordt de SAOUR berekend met behulp van de theoretische correlatie van 4.57 g O_2 /g NH_4 -N geoxideerd.

FIGUUR 6 DATALOGGING GRAFANA ZUURSTOFCONCENTRATIE EN TEMPERAATUUR TIJDENS RESPIROMETRIETEST (VOORBEELD)



4.7 LOCATIE PILOT

De pilot werd geplaatst op RWZI Walcheren (Waterschap Scheldestromen). Deze locatie werd enerzijds gekozen omwille van de gunstige geografisch ligging t.o.v. PureBlue Water om praktische en service gerelateerde werkzaamheden te vereenvoudigen. Daarnaast bestaat er ook een historische, goede verstandhouding tussen PureBlue Water en Waterschap Scheldestromen door het succesvol afronden van verschillende projecten samen. RWZI Walcheren is een kustgelegen RWZI wat ervoor zorgt dat een worst-case situatie kan worden getest in verband met de hoge bromide concentraties in het te behandelen effluent. De verhoogde bromideconcentraties bij kustgelegen RWZI's zijn mogelijks toe te schrijven aan de infiltratie van zilt of zout water in zoetwaterbronnen zoals grondwater, die dan uiteindelijk in het rioolnetwerk terechtkomt. Deze RWZI werd als ideale testlocatie voor een ozontechnologie beschouwd in de filosofie dat als de potentieel gevormde bromaatconcentraties hier aanvaardbaar blijven, de technologie ook op andere RWZI locaties in Nederland probleemloos zal kunnen worden ingezet.

4.8 KARAKTERISERING EFFLUENT RWZI WALCHEREN

Het afvalwater dat zal worden behandeld is het effluent van één van de zes nabezinktanks (NBT) op RWZI Walcheren. De karakteristieken van deze afvalwaterstroom worden weergegeven in Tabel 3. Hierin vallen twee belangrijke parameters op die het ozonisatie proces significant kunnen beïnvloeden, nl. relatief hoge nitrietconcentraties (= ozonscavenger of ongewenste verbruiker van ozon) en de enorm hoge bromide concentraties (= verhoogd risico bromaatvorming).

TABEL 3 KARAKTERISERING EFFLUENT RWZI WALCHEREN (GEMIDDELDE O.B.V. 252 METINGEN GEDURENDE PERIODE 2017- 2020, BROMIDE O.B.V. 10 METINGEN 2021-2022)

RWZI Walcheren	Gemiddelde	Eenheid
CZV	44,9	mg/l
BZV5	6,26	mg/l
Nkj	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	1600	ug/l
Flow (DWA)	1660	m ³ /h

4.9 SCHAALGROOTTE PILOT

De pilot heeft een hydraulische capaciteit van 4 -16 m³/h. Bij de dimensionering van deze pilot is rekening gehouden met de fluctuaties die kunnen optreden in DOC concentratie (DWA vs. RWA), het doseerbereik van de geselecteerde ozongenerator (10-180 g O₃/h) en het benodigde volume in de bioreactoren om HRT's van ca. 3-15 minuten te simuleren. Omwille van praktische inzetbaarheid was het overigens een doelstelling om alle pilot onderdelen in een 40 ft container te laten passen.

FIGUUR 7

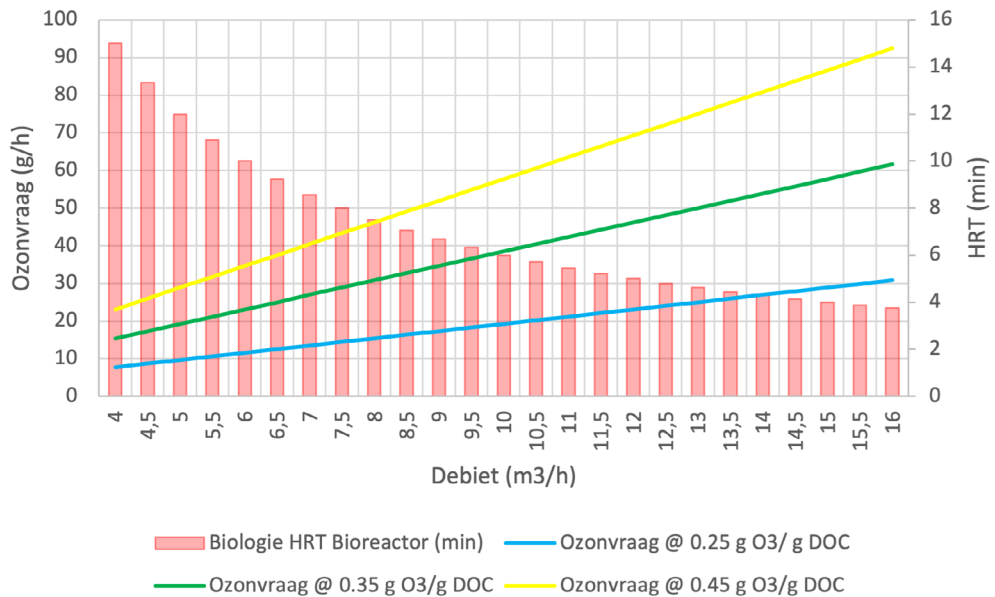
AFBEELDING CONTAINERBOUW MICROFORCE++ PILOT



In Figuur 8 wordt een overzicht gegeven van de verschillende procesinstellingen die kunnen worden toegepast. Hierbij zal de ozongenerator gestuurd worden op een gewenste flow (en corresponderende HRT per biofilterbed). De ozon die door de ozongenerator moet geleverd worden wordt berekend door een gewenste ozondosis (g O₃/g DOC), de DOC concentratie via UVA metingen bij verschillende golf lengtes (s::can) en de flow die moet worden behandeld.

FIGUUR 8

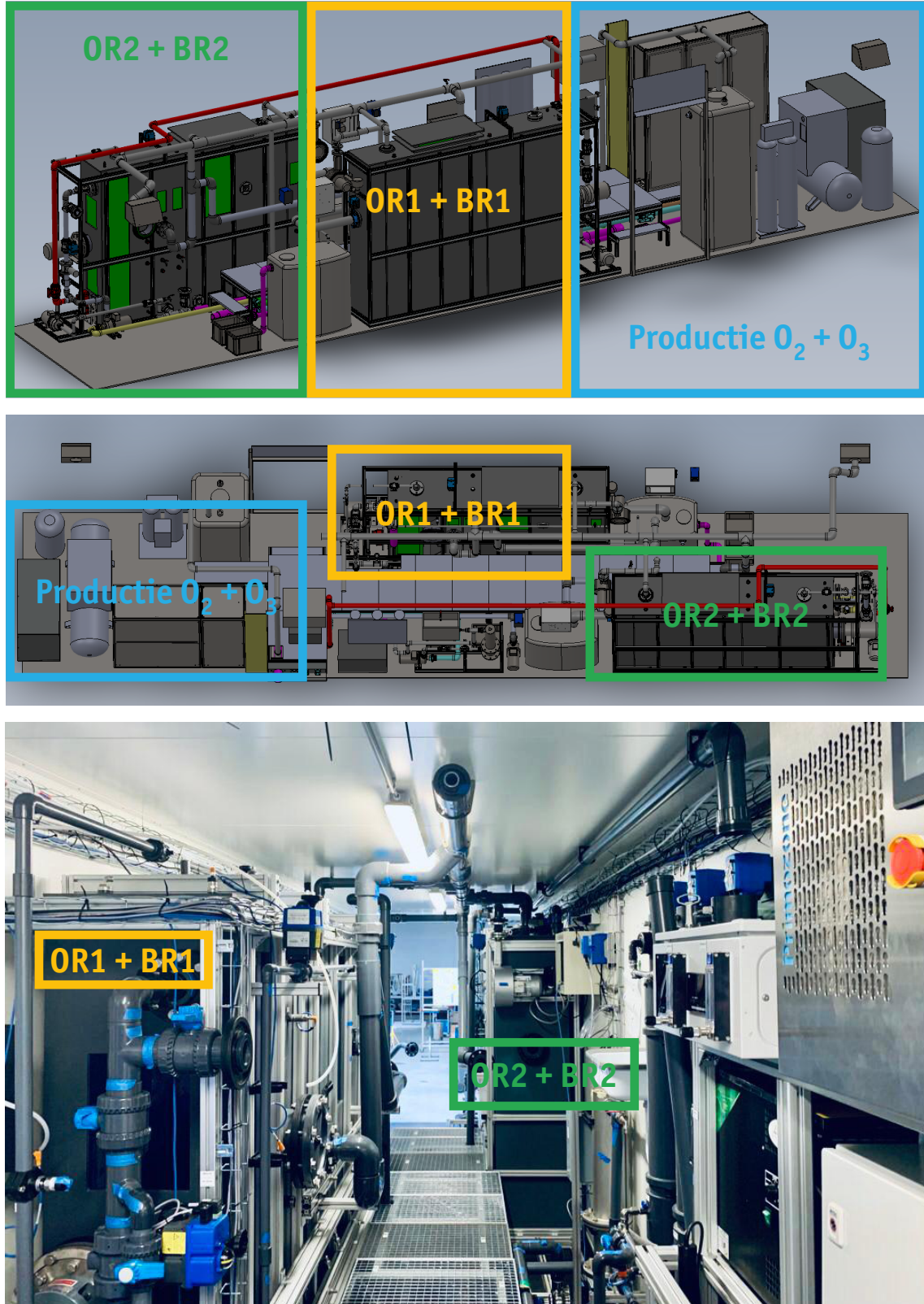
PROCESINSTELLINGEN EN BEREIK MICROFORCE++ (BIJ EEN GEMIDDELTE DOC VAN 11 MG/L)



4.9.1 DESIGN PILOT

In Figuur 9 wordt aan de hand van 3D tekeningen en een afbeelding getracht een impressie te geven van de testopstelling en opbouw van de pilot.

FIGUUR 9.3D TEKENING PILOT OPBOUW; ZIJAANZICHT (BOVEN) EN BOVENAANZICHT (MIDDEN) – FOTO PILOT (ONDER, LINKS = OR1+BR1, RECHTS = OR2 + BR2)



4.9.2 ONDERSTEUNEND ONDERZOEK

4.9.2.1 LCA (KWR)

Aangezien duurzaamheid in dit innovatieprogramma een van de meest cruciale criteria is waarop de inzetbaarheid van technologie wordt beoordeeld is het onze wens om een diepgaande Life-cycle-Assesment (LCA) uit te voeren op de operationele aspecten van MicroForce++ en andere referentietechnologieën. Op deze manier zullen ook de modelberekeningen die worden gemaakt via de CO₂ rekentool van Stowa worden getoetst en uitgebreid met een gedetailleerde contributie op verschillende impactfactoren.

KWR zal op basis van door PureBlue aangeleverde pilotdata de CO₂-voetafdruk van de Microforce++ techniek vergelijken met die van PACAS, O₃/zandfiltratie en GAK-filtratie, op de manier die Stowa hanteert. Daarnaast zal KWR de impact van deze drie referentietechnieken en Microforce++ vergelijken met behulp van het SimaPro programma. Hierbij zal de milieu-impact worden berekend in zowel CO₂-equivalenten als in ecopunten voor de verschillende impact categorieën weergegeven in Tabel 4. Deze impact categorieën kunnen nadien allen herleid worden naar dezelfde eenheid, het ecopunt.

TABEL 4 OVERZICHT VERSCHILLENDE IMPACT CATEGORIEËN ONDERZOCHT MET SIMAPRO

Impact Categorie	Unit
Climate change	kg CO2 eq
Ozone depletion	kg CFC11 eq
Ionising radiation	kBq U-235 eq
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq
Particulate matter	disease inc.
Human toxicity, non-cancer and cancer	CTUh
Acidification	mol H+ eq
Eutrophication, freshwater	kg P eq
Eutrophication, marine	kg N eq
Eutrophication, terrestrial	mol N eq
Ecotoxicity, freshwater	CTUe
Land use	Pt
Water use	m3 depriv.
Resource use, fossils	MJ
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq

Daarnaast zal met SimaPro ook het effect van het gebruik van PSA zuurstofgeneratoren t.o.v. LOX op deze duurzaamheidsaspecten vergeleken worden.

4.9.2.2 MODELLERING OZONINBRENGMETHODES

Buiten het kader van dit IPMV werd ook onderzoek uitgevoerd op verschillende innovatieve ozoninbrengmethodes. Hierbij werd het ozonisatiecompartiment van MicroForce++ gedigitaliseerd en geoptimaliseerd door middel van een Computational Fluid Dynamics (CFD) modellering en tegelijkertijd gevalideerd met praktische pilot testen en analyses. Deze zogenaamde digital twin heeft voornamelijk als doel de ozontransfer te optimaliseren om zo de energievraag en de vorming van schadelijke bijproducten nog verder te drukken.

5

RESULTATEN & DISCUSSIE

In dit hoofdstuk zullen de resultaten worden gedeeld die gedurende de pilotstudie werden verzameld. De resultaten zullen beperkt worden tot de eerste 3 testen uit het onderzoeksplan (SP1-SP3) aangezien de vierde en laatste test (i.e. bioreactoren onder verschillende redoxcondities) nog lopende is tijdens het schrijven van dit rapport. De resultaten van dit laatste luik zullen later worden toegevoegd als addendum of afzonderlijk worden gepubliceerd via de STOWA Hydrotheek.

Voor de rapportage wordt vaak verwezen naar setpoint 1 (SP1), setpoint 2 (SP2) en setpoint (SP3). Ter opfrissing worden hier nog even de verschillende ingestelde parameters weergegevens per setpoint. Ook de resultaten van de extra testen (SP EXTRA - met 1 ozon/bioreactor) zullen worden gerapporteerd.

TABEL 5 OVERZICHT TESTEN EN VARIABELEN VOOR DE RESULTATEN

SETPOINT (SP)	Target Ozondosis (g O ₃ /g DOC)	Effectieve ozondosis (g O ₃ /g DOC)	Ozondistributie (OR1/OR2)	HRT Bio (min)
1	0,35	0,25	50/50	7,5
2	0,35	0,35	33/66	15
3	0,45	0,43	33/66	15
EXTRA	0,35-0,55	0,35-0,45-0,55	100/0	15-30

In deze Tabel valt verder op dat de effectieve ozon soms afwijkt van de target dosis, dit heeft vooral te maken met de correctiefactoren die achteraf worden toegepast door onder andere scavenging door NO₂, de oplosefficiëntie van ozon in de ozonreactoren (gemeten door ozon afgasconcentratie/ingående gasconcentratie) en een correctie na de lab-analyse van DOC t.o.v. de online DOC meting waarop de ozon gestuurd werd.

5.1 BASISPARAMETERS

5.1.1 TEMPERATUUR

Aangezien de MicroForce++ technologie gebruik maakt van biofilm op drager systemen is temperatuur een cruciale parameter om op te volgen doorheen de testperiode. Net zoals bij een actief slib systeem wordt de biologische activiteit of performantie verwacht hoger te zijn bij relatief hogere temperaturen (e.g. seizoensgebonden verschillen winter versus zomer).

Tijdens de testen werd een gemiddelde temperatuur waargenomen van 15.9 °C, 16.2 °C en 20.2 °C voor testen bij SP1, SP2 en SP3 respectievelijk. De gemiddelde temperatuur doorheen de volledige testperiode van ca. 42 weken bedroeg ca. 17 °C met maximaal gemeten temperaturen tot 25 °C tijdens de hittegolf van juni 2023 (cfr. Figuur 10).

Hieruit kunnen we afleiden dat de groeicondities in de biologische reactoren licht gefavoreerd waren tijdens SP3 (zomer 2023). Echter, om het effect van deze verhoogde temperatuur op de NH₄ verwijdering door de biofilm te standaardiseren werden respirometrietesten uitge-

voerd en gecorrigeerd volgens de Arrhenius vergelijking (zie Hoofdstuk 4). Uit deze respirometriemetingen kunnen we dus afleiden of de verhoogde biologische performantie te wijten is aan de verhoogde temperatuur of door een gunstigere microbiologische flora als gevolg van gewijzigde procesomstandigheden.

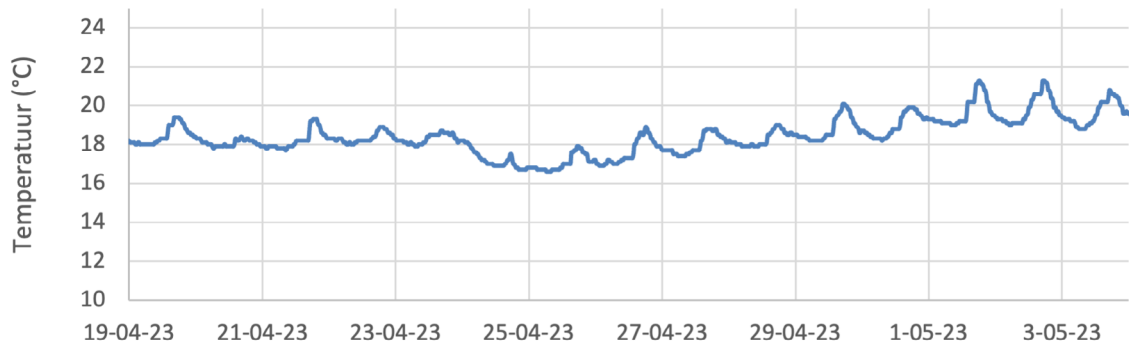
FIGUUR 10 TEMPERAATUUR DOORHEEN TESTPERIODE (SP1-3)



De gemiddelde en maximum effluenttemperatuur vallen bovendien ook nog binnen een zeer aanvaardbaar en werkbaar bereik om de koelingsenergie te recupereren met behulp van een warmtewisselaar en deze bijgevolg te gebruiken voor het koelen van de ozongenerator. Aangezien de effluenttemperatuur doorheen het jaar gemiddeld 17 °C en de ozongenerator werkzaam blijft met koelwatertemperaturen hoger dan 25 °C zal de Δt altijd ruim voldoende zijn.

Verder werd ook nog geobserveerd dat de temperatuur in het effluent van de RWZI mee fluctueert met de buitentemperatuur tussen dag en nacht (i.e. diurnale variaties).

FIGUUR 11 DIURNALE VARIATIES IN RWZI EFFLUENTTEMPERATUUR TIJDENS WILLEKEURIGE TESTWEEKEN (14D)

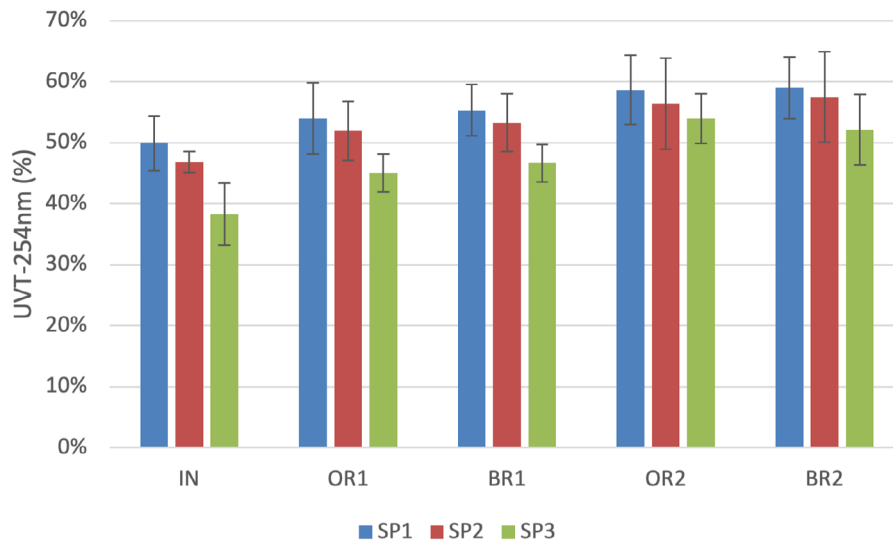


5.1.2 UV TRANSMISSIE UVT

Aangezien er in de toekomst mogelijk verder wordt gekeken naar hergebruik en desinfectie van RWZI effluent is het interessant om de UV transmissie (UVT) bij 254 nm op te volgen. Een hogere UV-transmissie van het effluent betekent namelijk dat minder opgesteld UV vermogen nodig zal zijn om een extra desinfectiestap te realiseren. Verder geeft een verbetering in UV transmissie ook aan dat het ozonisatie en/of biologische proces gunstig werkt. Doorheen de verschillende compartimenten van de pilot kunnen we opvolgen welke bijdrage iedere stap levert aan de verhoging van de UVT (cfr. Figuur 12). Hierbij valt op dat enkel de ozonisatie een significante bijdrage levert aan de verhoging van de UVT, aangezien ozon de aromatische componenten oxideert die de UV 254 nm absorberen.

FIGUUR 12

GEMIDDELDE UVT (254 NM) EVOLUTIE DOORHEEN VERSCHILLENDE MF COMPARTIMENTEN VOOR SP1 (N = 53), SP2 (N=20), SP3 (N=12) – [SP1 0.25 G O₃/G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]



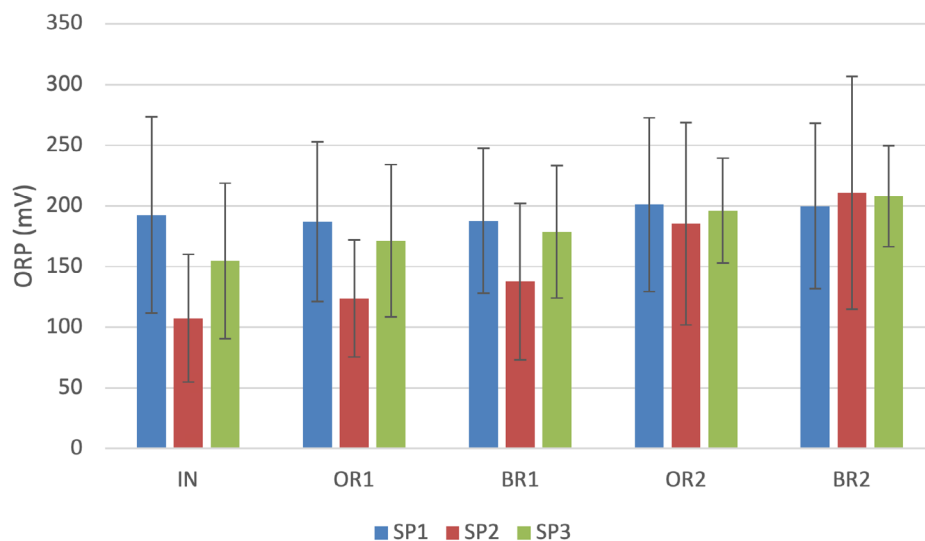
Uit deze resultaten leiden we verder ook af dat de gemiddelde Δ UVT tussen influent en effluent 9%, 11% en 14% voor respectievelijk SP1, SP2 en SP3 bedraagt. De hogere Δ UVT kan toegeschreven worden aan de hoge(re) ozonosis in combinatie met een langere verblijftijd in de bioreactoren voor SP3.

5.1.3 REDOXPOTENTIAAL (ORP)

In Figuur 13 wordt het verloop van de redoxpotentiaal (ORP) weergegeven doorheen de MicroForce++ pilot. Hierin valt op dat de ORP positief is en licht stijgt doorheen de verschillende compartimenten van de MicroForce++. Dit is vooral te wijten aan de extra hoeveelheid zuurstof die aan het water wordt toegevoegd. Aangezien de stijging van ORP niet drastisch te noemen is kunnen we ervan uitgaan dat het water ook nooit oververzadigd raakt met ozon, en de gewenste dosis dus nooit teveel wordt overschreden.

FIGUUR 13

EVOLUTIE GEMIDDELDE REDOXPOTENTIAAL EN STANDAARDEVIATIE DOORHEEN DE MF COMPARTIMENTEN VOOR SP1 (N = 53), SP2 (N=20), SP3 (N=12) – [SP1 0.25 G O₃/G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]



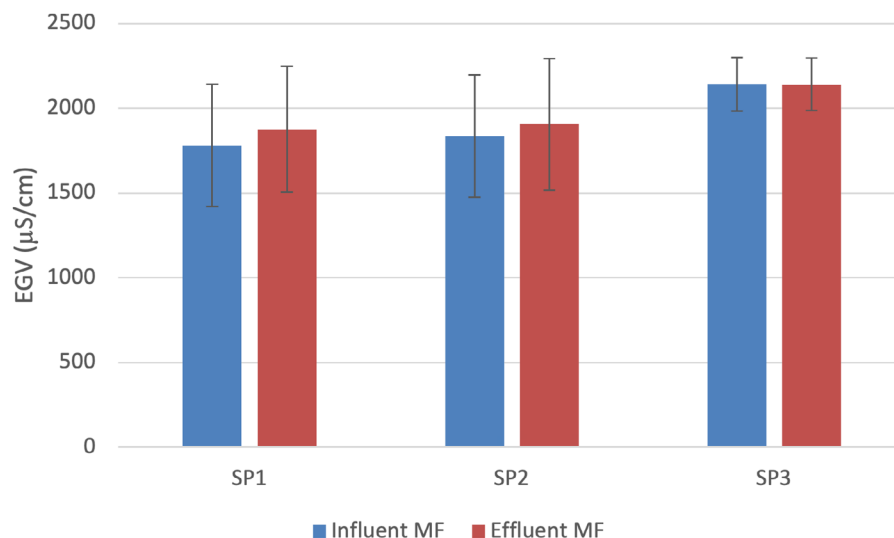
De sterkere stijging tijdens SP3 kan toegeschreven worden aan de hogere ozon dosis die werd toegepast en bijgevolg de ook de hoeveelheid opgeloste zuurstof.

Bovendien toont de positieve ORP ook aan dat we in de bioreactoren onder aerobe omstandigheden werken in zowel bioreactor 1 als bioreactor 2. In de volgende stap van dit pilotonderzoek wordt verder onderzocht om de redoxpotentiaal in BR2 te wijzigen zodat denitrificerende omstandigheden ontstaan. Door het toevoegen van een koolstofbron zal de concentratie opgeloste zuurstof drastisch zakken en bijgevolg ook de ORP zakken en zelfs negatieve waarden (ca. -100 tot -400 mV) vertonen die de reducerende, denitrificerende omstandigheden typisch kenmerken.

5.1.4 ELEKTRISCH GELEIDEND VERMOGEN (EGV)

Gegeven dat RWZI Walcheren geografisch aan de kust gelegen is wordt er verwacht dat een verhoogd zoutgehalte in het effluent van de zuivering aanwezig is en er dus ook een verhoogd elektrisch geleidend vermogen (EGV) en bromideconcentratie zal worden waargenomen. De gemiddelde waarde voor het EGV over de volledige testperiode was 1934 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Verder werden er geen significante veranderingen in EGV waargenomen tussen het influent en het effluent van de MicroForce++ pilot (cfr. Figuur 14), alsook niet doorheen de verschillende compartimenten van de pilot.

FIGUUR 14 GEMIDDELD ELEKTRISCH GELEIDEND VERMOGEN (EGV) DOORHEEN DE MICROFORCE++ PILOT (INFLUENT VERSUS EFFLUENT) VOOR SP1 (N=53), SP2 (N=20), SP3 (N=12) - [SP1 0.25 G O₃/G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]

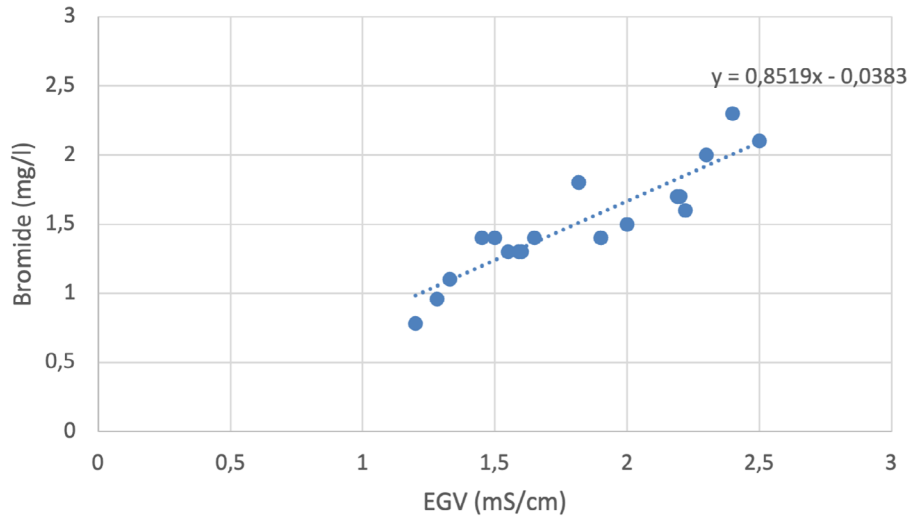


In dit onderzoek werd ook verder bekeken of er een verband bestaat tussen het EGV en de bromide concentratie van het effluent. Dit laat namelijk toe om in real-time een inschatting te maken hoeveel bromide aanwezig is in het effluent en, indien nodig, de nodige maatregelen te treffen om de vorming van bromaat te mitigeren zonder te moeten wachten op de chemische analyseresultaten van bromide.

In Figuur 15 wordt aangetoond dat er een lineair verband bestaat tussen het EGV en de bromide concentraties. Hier valt ook meteen op dat de gemeten bromideconcentraties uitzonderlijk hoog liggen op RWZI Walcheren met pieken tot 2.3 mg/l (i.e. 2300 $\mu\text{g}/\text{l}$). We merken hier op dat het verband zeer duidelijk zichtbaar is wanneer het EGV en de bromide concentraties hoog zijn. Het is niet onderzocht of dit verband ook kan gevonden worden in niet-kustgelegen RWZI's met lagere concentraties bromide (50-200 $\mu\text{g}/\text{l}$) en een lager EGV.

IGUUR 15

VERBAND ELEKTRISCH GELEIDEND VERMOGEN (EGV) VERSUS BROMIDE CONCENTRATIE DOORHEEN DE VOLLEDIGE TESTPERIODE

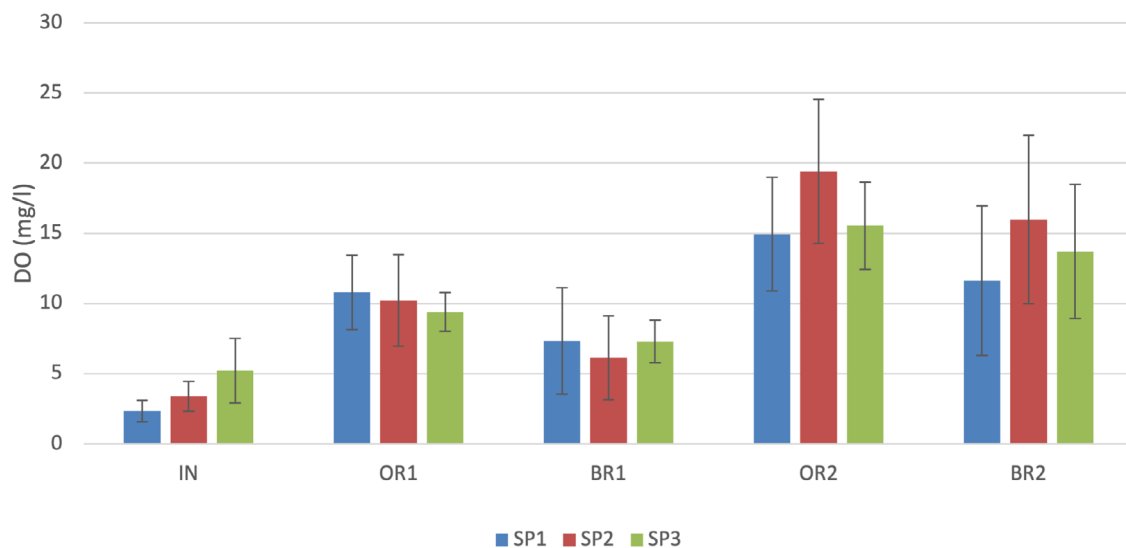


5.1.5 OPGELOSTE ZUURSTOFCONCENTRATIE (DO)

De opgeloste zuurstofconcentratie is een belangrijke parameter om op te volgen in het MicroForce++ proces omdat er enerzijds voldoende zuurstof beschikbaar moet zijn om nitrificatie te bewerkstelligen, en anderzijds ook zo weinig mogelijk zuurstof moet achterblijven om de kosten voor denitrificatie te drukken. In SP1-3 was het echter enkel de doelstelling om op te volgen of een volledige, of beter, zo hoog mogelijke verwijdering van NH_4 mogelijk was in de eerste bioreactor. Daarom is het zaak om te kijken of er na ozonisatie voldoende zuurstof wordt ingebracht om het nitrificatieproces te laten doorgaan. In Figuur 16 kan worden waargenomen dat de ozonreactoren zuurstof aan het proces toevoegen, terwijl de bioreactoren terug zuurstof verbruiken om te nitrificeren en eventueel ook gevormde BZV, of AOC (assimileerbare organische koolstof), (gedeeltelijk) te mineraliseren. We zien verder ook dat er ruim voldoende zuurstof aanwezig is in alle SP's om nitrificatie mogelijk te maken (> 1.5 mg/l DO) en dit dus geen limiterende factor is.

FIGUUR 16

GEMIDDELDE OPGELOSTE ZUURSTOF (DO) DOORHEEN DE MICROFORCE++ PILOT VOOR SP1 (N = 53), SP2 (N=20), SP3 (N=12) - [SP1 0.25 G O₂/G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O₂/G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O₂/G DOC, 33/66, 15 MIN]



Met het ozoninjectiesysteem van PureBlue wordt verder onderzoek uitgevoerd om de ozonoverdrachtefficiëntie te optimaliseren terwijl de zuurstofoverdracht zo laag mogelijk blijft. Bij een ozondosis van ca. 0.45 g O₃/ g DOC wordt geobserveerd dat we ca. 15 mg/l opgeloste zuurstof bereiken. Voor een standaard fijnbellenkolom met 5 meter hoogte werd berekend dat de concentratie opgeloste zuurstof ca. 28 mg/l zal bedragen. Met een O₂/koolstof-ratio van 0.75 en een kostprijs van 0.002 €/g koolstof zou dit betekenen dat een besparing van koolstofbron ter waarde van ca. 0.05 euro/m³ zou kunnen gerealiseerd worden indien een nageschakelde denitrificatiestap wenselijk is.

5.2 NUTRIËNTEN

5.2.1 KOOLSTOF

Voor een ozonisatieproces is het belangrijk om ten allen tijde een idee te hebben wat de organische vracht is die binnenkomt, zodoende de ozondosis hierop af te kunnen stellen. Een te hoge ozondosis zou namelijk kunnen leiden tot een onnodig verhoogd energie- en/of zuurstofverbruik, alsook ontstaan er dan extra risico's met betrekking tot de vorming van vrij ozon in de waterfase en bijgevolg dus ook bromaat. Een te lage ozondosis is uiteraard ook ongewenst omdat er in dit scenario mogelijk onvoldoende organische microverontreinigingen worden afgebroken om de vooropgestelde doelstellingen te halen.

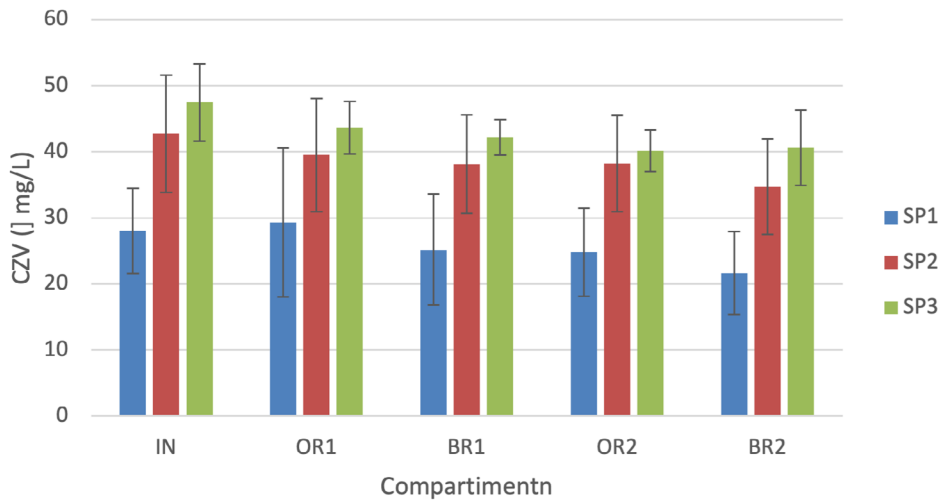
In dit onderzoek werd gebruik gemaakt van een in-line DOC sensor die de opgeloste organische koolstof in real time bepaald aan de hand van UVA metingen bij verschillende golflengtes en uitleest naar de PLC van de pilot. De PLC stuurt de ozondosis op zijn beurt verder automatisch bij op basis van een intelligent sturingslogaritme op verschillende parameters (e.g. ozongasconcentratie, waterdebiet, gasdebiet, Vg/Vl, etc.). Om deze automatisering succesvol te laten verlopen is de betrouwbaarheid van deze DOC sensor uiteraard van kritisch belang. Daarom werden deze meetwaarden uitvoerig en regelmatig gecontroleerd met DOC analyses van een extern lab. Hieruit bleek dat regelmatig (i.e. wekelijks) een nulkalibratie en tweepunts-kalibratie noodzakelijk was om de sturing betrouwbaar te laten verlopen.

DOC werd bij iedere monsternamen voor gidsstoffen ook opgestuurd naar Aquon ter verificatie. Er werd verder ook getracht om DOC via standaard meetkits van Macherey Nagel te bepalen maar dit gaf in deze afvalwatermatrix geen betrouwbare resultaten (cfr. Hoofdstuk 4). Mogelijk zorgden de hoge zoutgehalten in deze matrix voor een verstoring op deze meetmethode.

CZV werd ook opgevolgd, dit zowel voor gefilterd als ongefilterde samples teneinde een mogelijk verband te vinden tussen de verhouding CZV/DOC. Zo werd getracht alsnog een snelle, goedkope en eenvoudige methode de DOC concentratie in te schatten. Zo werd in het effluent van RWZI Walcheren volgende correlatie gevonden: $CZV = 3.4 \pm 0.43 \times DOC$

FIGUUR 17

VERLOOP GEMIDDELD CHEMISCH ZUURSTOF VEBRUIK (CZV – GEFILTERD MET 0,45 MICRON) DOORHEEN DE MF COMPARTIMENTEN VOOR SP1 (N = 53), SP2 (N=20), SP3 (N=12) – [SP1 0.25 G O₃/G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]

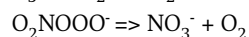
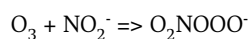


Uit Figuur 17 kunnen we afleiden dat er een beperkte hoeveelheid CZV wordt gemineraliseerd in de verschillende compartimenten van MicroForce⁺⁺. Deze beperkte verwijdering wordt toegeschreven aan het feit dat de hardnekkige, niet-biodegradeerbare organische componenten slechts getransformeerd worden in andere organische structuren met korte C-ketens, maar dus wel nog steeds als CZV worden gedetecteerd.

5.2.2 STIKSTOFBALANS

Zoals reeds werd geïntroduceerd in de voorgaande hoofdstukken trachten we met MicroForce⁺⁺ niet alleen de problematiek rond microverontreiniging aan te pakken maar kan het inzetten van deze nabehandeling simultaan zorgen voor een effluent dat voldoet aan de doelstellingen van de Kaderrichtlijn afvalwater (KRW) met betrekking tot stikstofemissies naar het milieu. MicroForce⁺⁺ verleent zich als multi-stage ozon- en biofilmreactor systeem als zeer interessante technologie om deze doelstellingen gelijktijdig te bereiken aangezien de mogelijkheid bestaat om op ieder biofilter een verschillende redoxpotentiaal toe te passen. Echter, in SP 1, 2 en 3 werden de mogelijkheden onderzocht om de nitrificatie (ammonium-oxidatie) te optimaliseren. In test 4 (lopend) werd de tweede bioreactor omgebouwd tot een denitrificerend, reducerend filter zodoende een verwijdering van totale stikstof te realiseren.

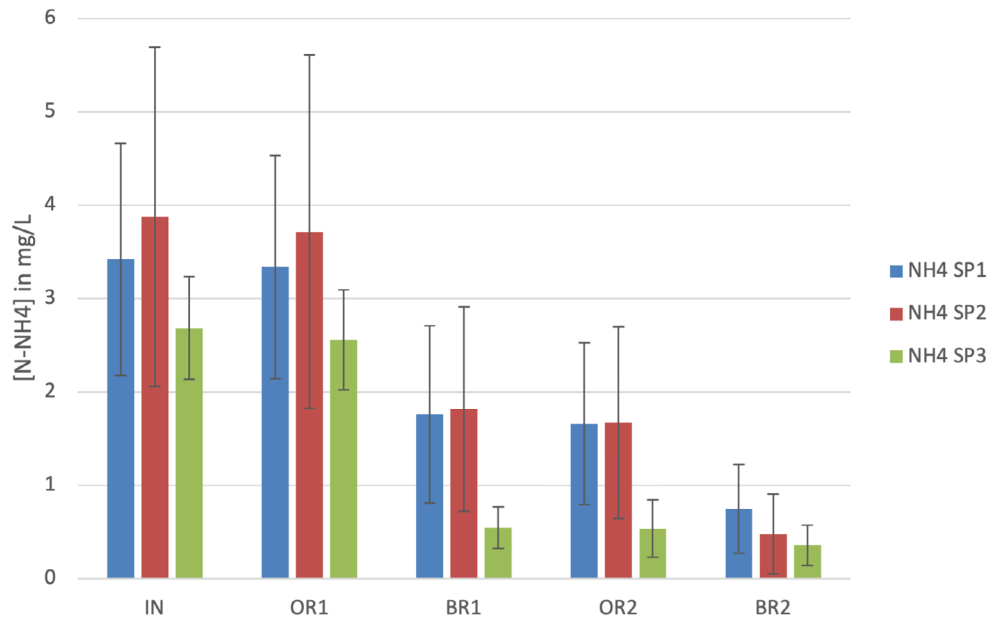
Daarnaast is het belangrijk de NH₄ en NO₂ doorheen alle compartimenten van MicroForce⁺⁺ op te volgen omdat beiden het ozonisatieproces kunnen beïnvloeden. Verhoogde ammoniumconcentraties zorgen namelijk voor extra mitigatie van bromaatvorming, aangezien er een reactie plaatsvindt van ammonium met hypobromig zuur tot bromamines (Gerrity et al., 2018). Nitriet daarentegen is ook belangrijk aangezien het een belangrijke scavenger is van ozon, of ook wel ongewenste verbruiker van ozon, en dus een significante hoeveelheid van de gedoseerde ozon kan opslorpen die bijgevolg niet meer kan ingezet worden voor de verwijdering van doelcomponenten, in dit geval de gidsstoffen en andere microverontreinigingen. Eerst resulteert de reactie van ozon en nitriet in de vorming van een tussenproduct, O₂NOOO⁻, dat vervolgens uiteenvalt in nitraat en enkelvoudig zuurstof. Bovendien kan peroxy-nitriet ook worden gevormd wanneer de reactie tussen ozon en nitriet een ander tussenproduct vormt, namelijk ONOOO⁻ (Naumov, Mark, Jarocki, & Clemens, 2010).



5.2.3 AMMONIUM

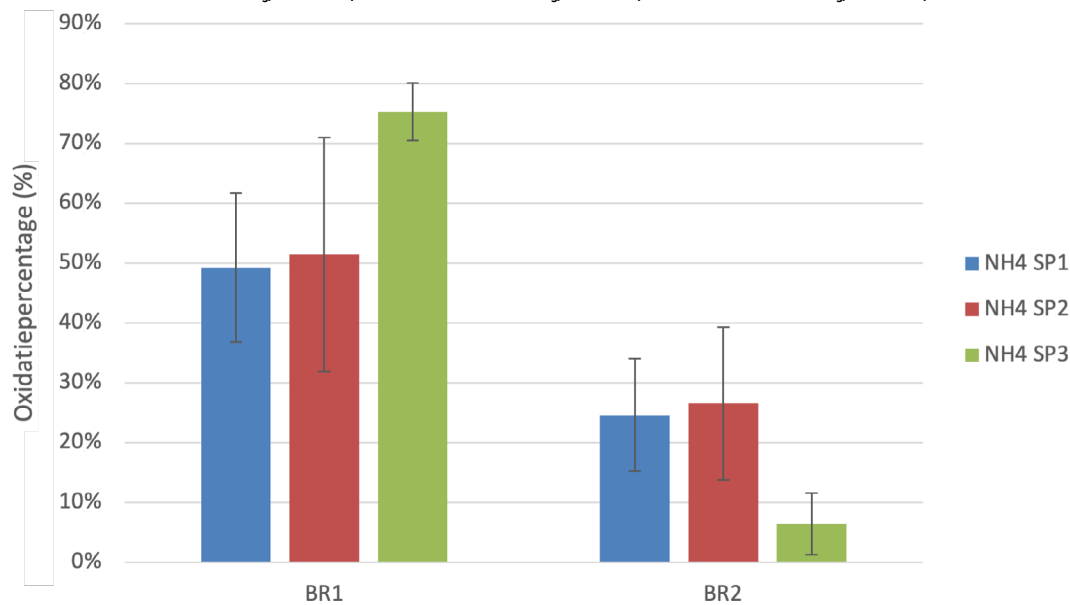
Tijdens SP1-3 werd de concentratie $\text{NH}_4\text{-N}$ doorheen alle compartimenten voortdurend opgevolgd. Uit Figuur 18 kan worden afgeleid dat de inkomende $\text{NH}_4\text{-N}$ concentraties gemiddeld 3.42, 3.87 en 2.68 mg/l bedroegen voor SP1, 2 en 3 respectievelijk. Verder zien we dat de ozoncompartimenten geen bijdrage leveren aan de verwijdering van $\text{NH}_4\text{-N}$, terwijl bioreactor 1 (BR1) er wel in slaagt om de gemiddelde NH_4 concentraties te verlagen tot 1.75, 1.81 en 0.54 mg/l respectievelijk. Bioreactor 2 draagt verder bij tot de verlagen van de $\text{NH}_4\text{-N}$ concentraties van 0.74, 0.47 en 0.35 mg/l $\text{NH}_4\text{-N}$ voor SP1, 2 en 3 respectievelijk.

FIGUUR 18 GEMIDDELDE AMMONIUMCONCENTRATIES DOORHEEN DE MF COMPARTIMENTEN VOOR SP1 (N = 53), SP2 (N=20), SP3 (N=12) – [SP1 0.25 G O_3 /G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O_3 /G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O_3 /G DOC, 33/66, 15 MIN]



Als we de contributies van beide bioreactoren op de verwijdering van $\text{NH}_4\text{-N}$ procentueel uitdrukken t.o.v. de ingaande concentratie (cfr. Figuur 19), dan zien we dat voor SP1 én SP2 ongeveer 50% van de verwijdering wordt bewerkstelligd in BR1 en vervolgens nog ca. 25% in BR2. Dit is een opvallend gegeven aangezien een langere hydraulische verblijftijd werd gehanteerd in SP2 t.o.v. SP1, en dus ook een lagere belasting op het biofilter waardoor een hogere verwijdering in SP2 werd verwacht. Door deze observatie werd verondersteld dat er kortsluitstromen konden ontstaan in de bioreactoren waardoor het filterbed niet volledig wordt benut en er dus een deel van de oxidatiecapaciteit verloren gaat. Deze hypothese werd bevestigd in SP3, waarbij de beluchting in BR1 werd ingeschakeld zodoende kortsluitstromen te vermijden en dus de volledige capaciteit van het filterbed te gebruiken. Dit verklaart ook de drastische stijging in oxidatiepercentrage tussen SP2 en SP3, terwijl de verblijftijd in het filter constant bleef. De absolute verwijdering van $\text{NH}_4\text{-N}$ in BR2 ligt voor alle SP lager dan in BR1 omdat de ingaande concentratie in deze reactor veel lager ligt. Tegelijkertijd zien we ook dat bij een stijging van het oxidatiepotentieel in BR1 er een daling optreedt in BR2. Dit is een logisch gevolg gezien de belasting op BR2 in dat geval nog lager wordt en de beschikbare NH_4 concentratie die kan geconverteerd worden een limiterende factor wordt.

FIGUUR 19 GEMIDDELDE CONTRIBUTIES IN ABSOLUTE AMMONIUMOXIDATIE PER BIOREACTOR VOOR SP1 (N = 53), SP2 (N=20), SP3 (N=12) – [SP1 0.25 G O₃/G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]

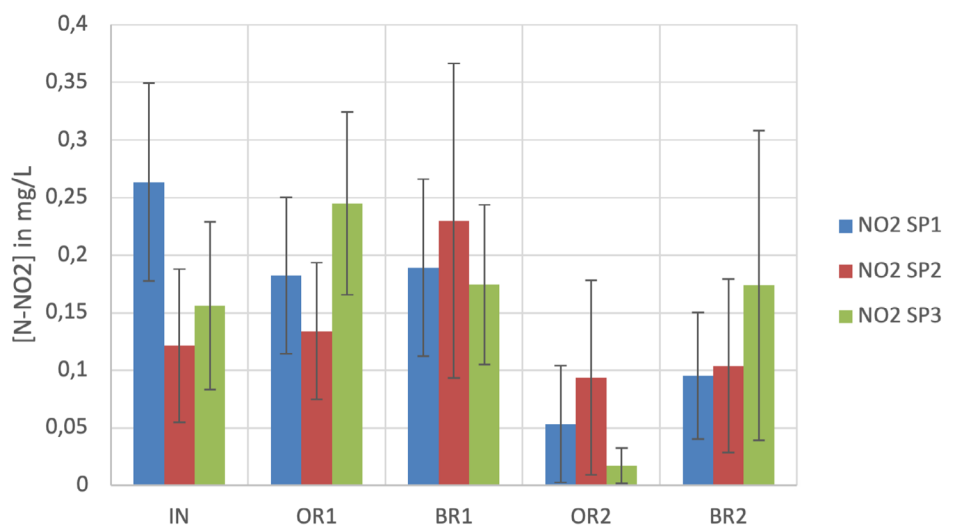


We zien dus ook dat bij een HRT van 15 minuten per bioreactor het totale oxidatiepotentieel ongeveer 80-85% zal bedragen. Mogelijks was de verhoging van de HRT toch niet noodzakelijk om een volledige verwijdering van NH₄ in 1 reactor te realiseren, maar is de optimalisatie van het bioreactordesign met intensieve engineering van cruciaal belang.

5.2.4 NITRIET

Ook de nitrietconcentraties werden tijdens de testen zorgvuldig opgevolgd aangezien het een belangrijke scavenger is tijdens het ozonisatieproces, met 3.43 mg O₃ per mg NO₂-N. (Naumov et al., 2010). In Figuur 20 valt op dat de nitrietconcentraties in het RWZI effluent in zekere zin significant te noemen zijn, nl. 0.26, 0.12 en 0.16 mg/l voor SP1, 2 en 3 respectievelijk. Waakzaamheid is dus geboden als men een bepaalde ozondosis wenst te benaderen om voldoende verwijdering van OMV te realiseren.

FIGUUR 20 GEMIDDELDE CONCENTRATIES NITRIET DOORHEEN DE MF COMPARTIMENTEN VOOR SP1 (N = 53), SP2 (N=20), SP3 (N=12) – [SP1 0.25 G O₃/G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]



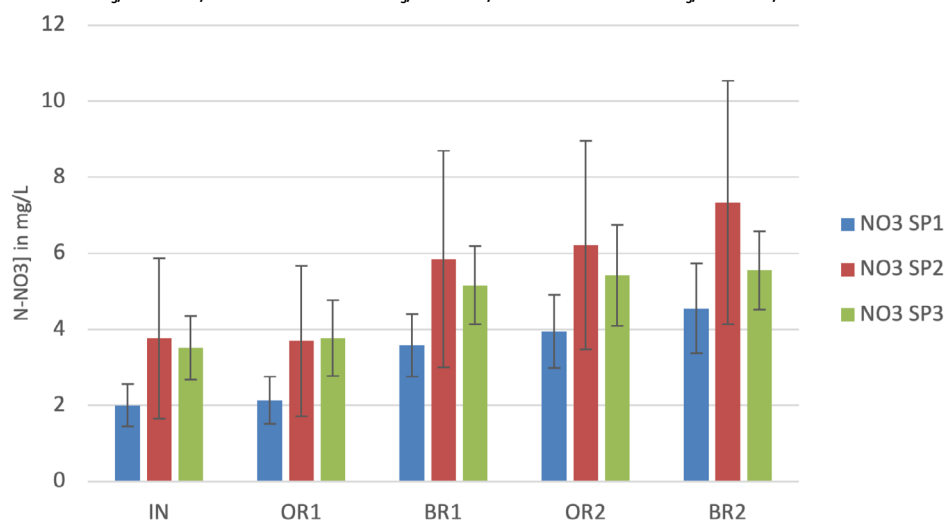
Verder kunnen we uit deze grafiek opmaken dat nitriet inderdaad voornamelijk wordt verbruikt in de ozonreactoren. Dit geldt voor alle SP's in OR2, in OR1 zien we dit fenomeen enkel voor SP1. Voor SP2 en SP3 vinden we onverwacht hogere nitrietconcentraties terug na de eerste ozonstap.

Daarnaast is het ook belangrijk om de nitrietconcentraties na de bioreactoren op te volgen. Het is namelijk gewenst dat er een volledige nitrificatie plaatsvindt in BR1 en geen significante extra nitrietconcentraties gevormd worden die vervolgens terug ozon kunnen opgebruiken. Voor BR2 is dit uiteraard minder van belang gezien daarna geen ozonstap meer volgt. Uit de resultaten leiden we af dat in BR1 geen extra nitriet gevormd wordt in SP1 en SP3. In SP2 zien we toch een verhoging van de nitrietconcentraties opduiken na de eerste bioreactor. Dit kan erop wijzen dat er tijdelijke een onevenwicht is ontstaan in de biofilm bestaande uit nitrificerende bacteriën. *Nitrosomonas* kan in dit geval bijvoorbeeld minder ontwikkeld zijn geweest tijdens dit setpoint dan *Nitrobacter*, waardoor een onvolledige nitrificatie is ontstaan. Dit kan bijvoorbeeld door een plots hogere ammoniumconcentratie in het influent, deficiënties van andere sleutel nutriënten, temperatuurschommelingen of tijdelijke pH schokken.

5.2.5 NITRAAT

Tot slot werd het nitraat ook opgevolgd waarbij de RWZI effluent concentraties voor SP1, 2 en 3 respectievelijk 2.0, 3.7 en 3.5 mg/l $\text{NO}_3\text{-N}$ bedroegen. Door het nitrificatieproces van NH_4 naar NO_3 stegen de nitraat concentraties in de bioreactor 1 tot 3.6, 5.8 en 5.1 mg/l $\text{NO}_3\text{-N}$ voor SP1, 2 en 3 respectievelijk. De vorming van nitraat in de tweede bioreactor is voor SP1 en SP2 nog duidelijk waarneembaar, maar is in SP3 verwaarloosbaar te noemen. Dit is toe te schrijven aan het feit dat de ingaande NH_4 concentraties zeer laag werden en er dus amper nog iets te nitrificeren viel. Dit merken we ook op tijdens de respirometriemetingen en microscopie, waarbij de biofilm zichtbaar dunner werd op het dragermateriaal van BR2 voor alle SP's. De exacte concentratie $\text{NO}_3\text{-N}$ in de afloop van BR1 kan, samen met zuurstofconcentratie en ORP, gebruikt worden als indicatie voor het inschatten van de koolstofbehoefte en verblijftijd om een denitrificatieproces mogelijk te maken.

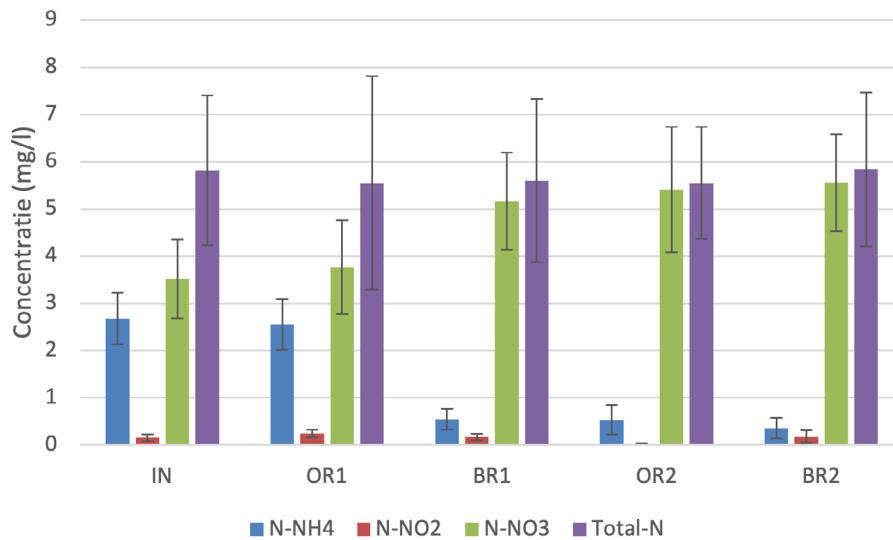
FIGUUR 21 GEMIDDELDE NITRAATCONCENTRATIES DOORHEEN DE MF COMPARTIMENTEN VOOR SP1 (N=53), SP2 (N=20), SP3 (N=12) – [SP1 0.25 G O_3 /G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O_3 /G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O_3 /G DOC, 33/66, 15 MIN]



5.2.6 TOTAAL STIKSTOF EN STIKSTOFBALANS SP3

Tot slot stellen we voor SP3, het ideale scenario, nog eens de stikstofbalans op voor alle stikstofspecties alsook de concentratie Totale stikstof. Zoals reeds besproken zien we dat de $\text{NH}_4\text{-N}$ concentratie bijna volledig verwijderd wordt in BR1. Als gevolg van de nitrificatie stijgen de NO_3 concentraties. De NO_2 concentraties blijven in SP3 relatief laag doorheen de MicroForce++ maar krijgen toch de nodige aandacht in verband met mogelijke ozon scavenging. Aangezien er nog geen denitrificatie gekoppeld is en dus geen omzetting van NO_3 naar N_2 , zien we dat de concentratie totale stikstof nog relatief constant blijft doorheen de verschillende compartimenten.

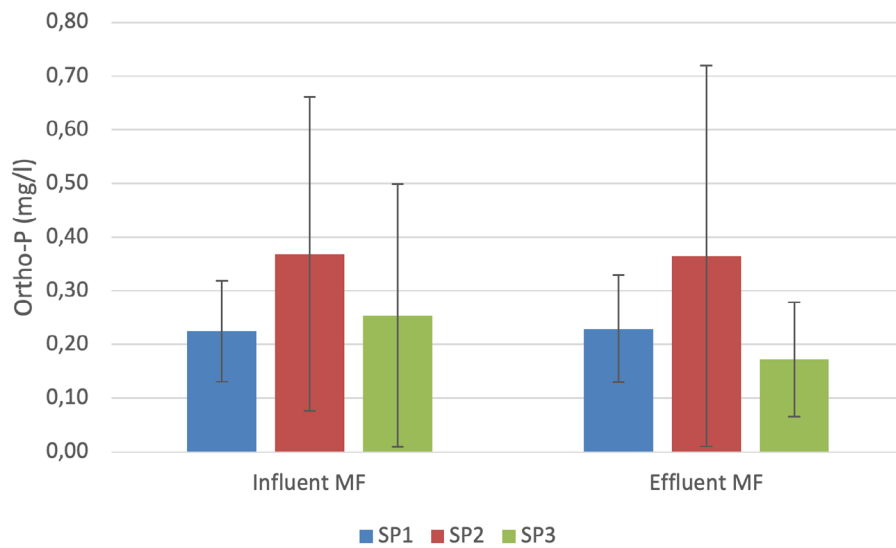
FIGUUR 22 STIKSTOFBALANS SP3 DOORHEEN DE MF COMPARTIMENTEN, INCLUSIEF TOTAAL STIKSTOF VOOR SP3 (N=12) – [SP1 0.25 G O_3 /G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O_3 /G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O_3 /G DOC, 33/66, 15 MIN]



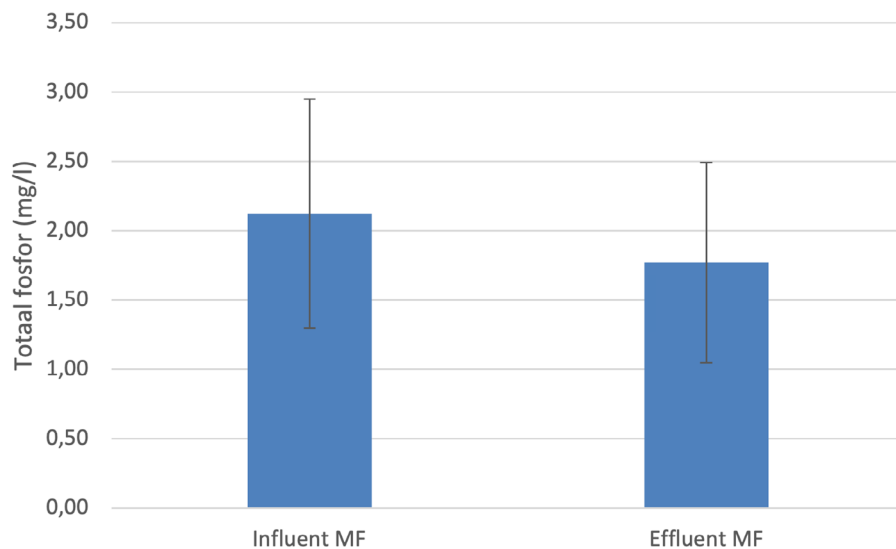
5.2.7 FOSFOR

In dit onderzoek werd ook onderzocht of er fosfor zou kunnen worden verwijderd met MicroForce++ zonder het toevoegen van extra flocculanten of ander chemicaliën. Mogelijks zouden ook fosfaathoudende pinflocs kunnen worden verwijderd in het filtratieproces. De concentraties ortho-P in het effluent van de RWZI bedroegen 0.22, 0.37 en 0.25 mg/l voor SP1, 2 en 3 respectievelijk (cfr. Figuur 23). Echter kon geen significante verwijdering van ortho-fosfaat of Totaal fosfor (cfr. Figuur 24) worden waargenomen en bleven de effluent concentraties bijgevolg ongewijzigd.

FIGUUR 23 GEMIDDELDE ORTHO-P CONCENTRATIES DOORHEEN DE MF COMPARTIMENTEN VOOR SP1 (N=32), SP2 (N=10) EN SP3 (N=6) – [SP1 0.25 G O₃/G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]



FIGUUR 24 CONCENTRATIE TOTAAL FOSFOR IN INFLUENT MF VERSUS EFFLUENT MF VOOR SP3 (N=5) – [SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]



5.3 MICROVERONTREINIGINGEN

In deze paragraaf zullen de resultaten m.b.t. (kandidaat)gidsstoffen worden gedeeld en besproken. Hierbij worden enkel representatieve resultaten gedeeld, namelijk resultaten die zijn bekomen door een 48h bemonstering zoals vooropgesteld in de Stowa voorschriften. Zoals aangegeven in Hoofdstuk 4 kan deze bemonstering worden uitgevoerd op 3 verschillende locaties, nl. in het influent van de pilot (= effluent van de zuivering), na de eerste OR/BR combinatie (MF1) en na de tweede OR/BR combinatie (MF2 = effluent pilot). Voor de bepaling van het verwijderingsrendement werden ook de voorschriften van het koepelvoorschrift door STOWA gerespecteerd (STOWA 2021 – 15).

Om de leesbaarheid van het rapport te waarborgen en de bevindingen op een coherente manier te volgen worden de verschillende procesomstandigheden van ieder setpoint nogmaals gedeeld:

TABEL 6 HERHALING: OVERZICHT TESTEN EN VARIABELN VOOR DE RESULTATEN

SETPOINT (SP)	Target Ozondosis (g O ₃ /g DOC)	Effectieve ozondosis (g O ₃ /g DOC)	Ozondistributie (OR1/OR2)	HRT Bio (min)
1	0,35	0,25	50/50	7,5
2	0,35	0,35	33/66	15
3	0,45	0,43	33/66	15
EXTRA	0,35-0,55	0,35-0,45-0,55	100/0	15-30

De getoonde resultaten worden gepresenteerd binnen het 95% zekerheidsinterval aan de hand van de herhaalbaarheidsvariatiëcoëfficiënten (Vcr) weergegeven in Tabel 7. De herhaalbaarheidsvariatië-coëfficiënten zijn dus bepalend voor de foutvlaggen wanneer de resultaten van een enkele analyse worden geëvalueerd. Wanneer gidsstoffen niet gedetecteerd werden of verwijderd werden tot onder de detectiegrens werd volgens de voorschriften van STOWA de effectieve concentratie van de detectiegrens gehanteerd (en niet de helft van de detectiegrens).

TABEL 7 HERHAALBAARHEIDSVARIATIECOËFFICIËNTEN VOOR DE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (STOWA 2021-15)

(kandidaat)gidsstof	Influent Vcr (%)	Effluent Vcr (%)
1,2,3-benzotriazool	7	14
amisulpride	28	12
azitromycine	36	15
candesartan	12	14
carbamazepine	12	14
citalopram	11	5
claritromycine	34	9
diclofenac	13	11
furosemide	14	11
gabapentine	9	13
hydrochloorthiazide	10	6
irbesartan	15	8
metoprolol	9	9
propranolol	13	15
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	6	14
sotalol	12	9
sulfamethoxazol	15	13
trimethoprim	8	9
venlafaxine	6	10

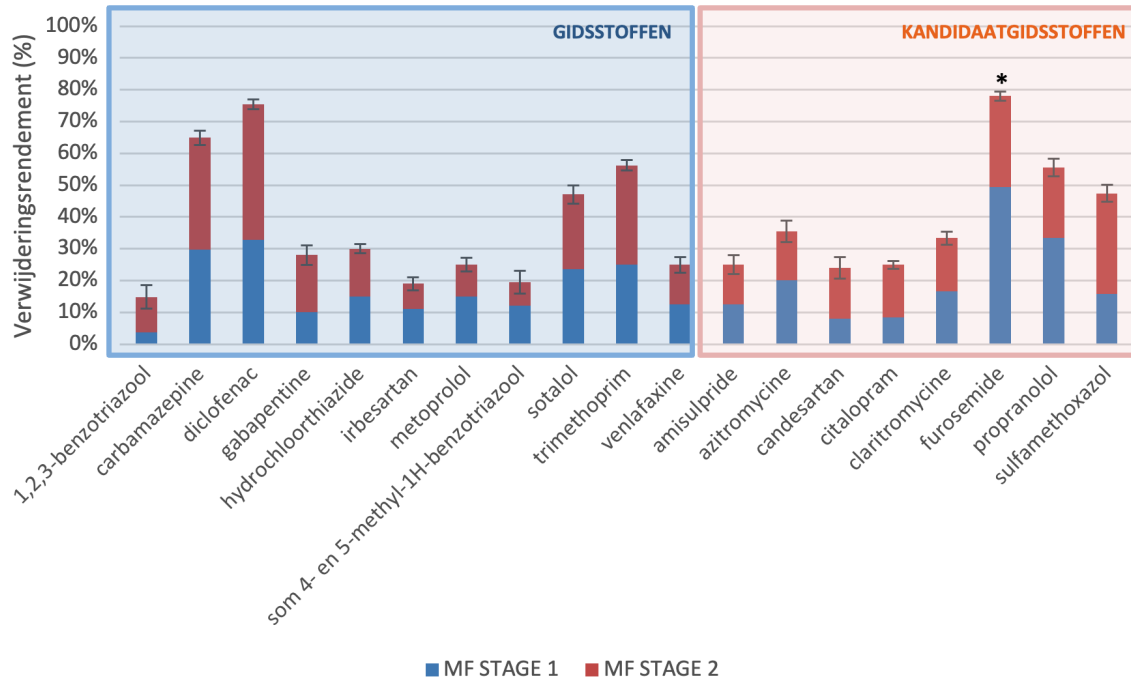
5.3.1 RESULTATEN SP1 – ENKEL NABEHANDELING (0.25 G O₃/G DOC, 50/50, 7.5 MIN)

In Figuur 25 worden de resultaten weergegeven voor de verwijdering van de individuele gidsstoffen en kandidaatgidsstoffen voor SP1. Tijdens deze test werden alle (kandidaat) gidsstoffen in detecteerbare concentraties teruggevonden in het influent van de pilot (= effluent van de zuivering). De absolute, gemeten concentraties worden weergegeven in Appendix B

Als we de verwijderingsrendementen beschouwen van de 11 gidsstoffen dan zien we dat 4 componenten er bovenuit schieten, nl. carbamazepine, diclofenac, sotalol en trimethoprim met een totaal verwijderingsrendement van 64.7 ± 2.3 %, 75.4 ± 1.5 %, 47.0 ± 2.88 % en 56 ± 1.7 % respectievelijk. De vier componenten die het moeilijkst verwijderd werden zijn 1,2,3 benzotriazool, irbesartan, som 4- en 5-methylbenzotriazool en metropolol met een verwijderingsrendement van 14.8 ± 3.7 %, 19 ± 2.0 %, 19.5 ± 3.6 en 25.0 ± 2.2 % respectievelijk.

Als we het onderzoek uitbreiden en ook de kandidaatgidsstoffen in beschouwing nemen dan zien we dat furosemide, propranolol en sulfamethoxazol ook relatief goed worden verwijderd onder deze omstandigheden met een verwijderingsrendement van respectievelijk 78.0 ± 1.5 %, 55.6 ± 2.8 en 47.3 ± 2.7 % respectievelijk.

FIGUUR 25 RESULTATEN VERWIJDERINGSRENDEMENT GIDSSTOFFEN SP1 - 48 H BEMONSTERING OP INFLUENT VS. NA MF1 (OR1/BR1) EN MF2 (EFFLUENT PILOT) (N=1, STANDAARDDEVIATIE O.B.V. VCR, * WIJST OP HET BEREIKEN VAN HET MAXIMALE VERWIJDERINGSRENDEMENT I.V.M. LOD) - [SP1 0.25 G O₃/G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]



Naast de totale verwijderingsrendementen zie we ook dat voor de meeste componenten een gelijkwaardig (50/50) verwijderingsrendement werd gerealiseerd door MF1 en MF2. Dat wijst er op dat de componenten vooral door de ozonisatiestappen worden afgevangen gezien de verdeling van ozon gelijk is over de twee reactoren in dit SP. Voor de componenten waarbij er toch een significant verschil zit en het grootste aandeel door MF1 wordt verwijderd kan dit wijzen op een rechtstreekse contributie van de BR1. Voor de componenten waarbij het evenwicht eerder schuift naar MF2 dan kan er sprake zijn van een onrechtstreekse contributie van BR1, waarbij organische scavengers worden afgevangen in het eerste biofilter en zo de tweede ozonisatiestap efficiënter laten verlopen. Verder kan een verhoogde verwijdering in MF2 ook wijzen op een extra rechtstreekse contributie van BR2 door het ontwikkelen van een specifieke, dunne, laag belaste biofilm. De gidsstoffen waarvoor geen volledige 50/50 verdeling wordt gevonden zijn de volgende: 1,2,3-benzotriazool, gabapentine, candesartan, citalopram.

Tot slot merken we op dat in SP1 de maximale verwijdering van furosemide werd bereikt (< LOD).

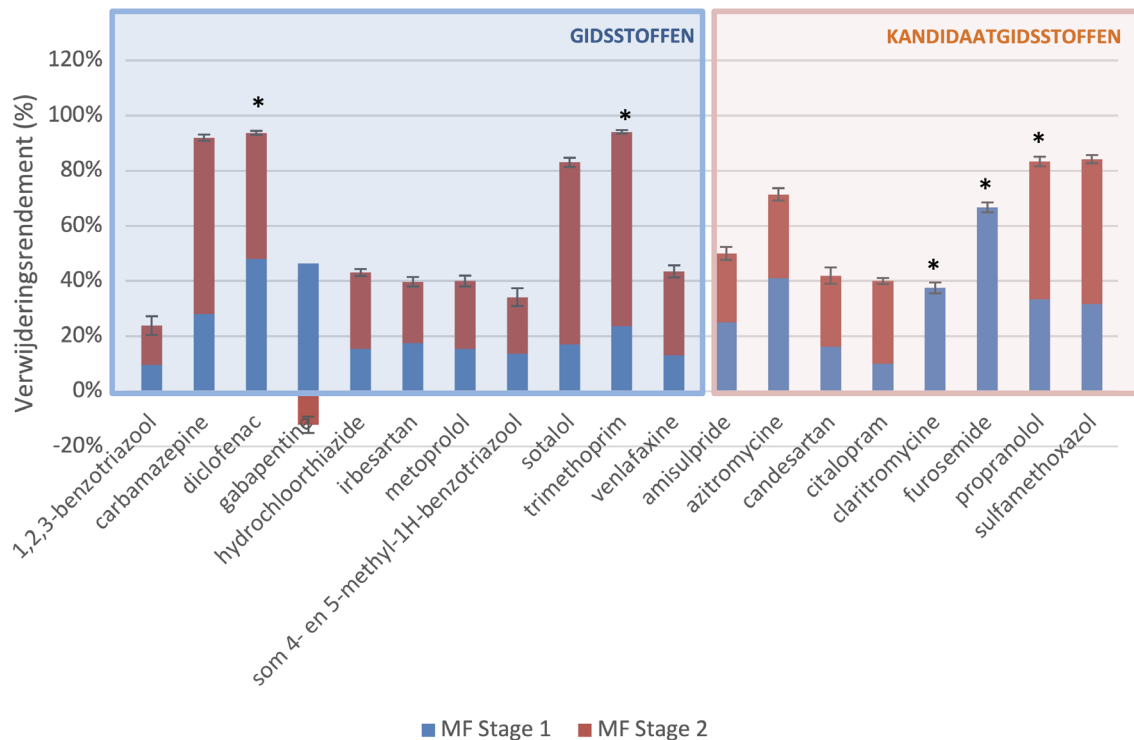
5.3.2 RESULTATEN SP2 – ENKEL NABEHANDELING (0.35 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN)

Net zoals voor SP1 worden nu ook de verwijderingsrendementen voor zowel de gidsstoffen als de kandidaatgidsstoffen weergegeven voor SP2 (Figuur 26). In het algemeen worden alle individuele gidsstoffen verwijderd met een hoger rendement onder de procesomstandigheden van SP2 t.o.v. SP1.

Net zoals in SP1 zijn de vier componenten met het hoogste rendement carbamazepine, diclofenac, sotalol en trimethoprim met een verwijdering van $92.0 \pm 1.1\%$, $93.8 \pm 0.8\%$, $83 \pm 1.6\%$ en $94 \pm 0.6\%$ respectievelijk. De gidsstoffen die het minst goed verwijderd worden zijn 1,2,3-benzotriazol, som 4- en 5 methylbenzotriazol, irbesartan en metoprolol met een verwijderingsrendement van $23.8 \pm 3.5\%$, 34 ± 3.2 , 39.7 ± 1.8 en $40.0 \pm 2.0\%$ respectievelijk.

Van de kandidaatgidsstoffen zien we ook een verhoogde verwijdering van azitromycine, furosemide, propranolol en sulfamethoxazol.

FIGUUR 26 RESULTATEN VERWIJDERINGSRENDEMENT GIDSSTOFFEN SP2 - 48 H BEMONSTERING OP INFLUENT VS. NA MF1 (OR1/BR1) EN MF2 (EFFLUENT PILOT) (N=1, STANDAARDDEVIATIE O.B.V. VCR, * WIJST OP HET BEREIKEN VAN HET MAXIMALE VERWIJDERINGSRENDEMENT I.V.M. LOD) – [SP1 0.25 G O₃/G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]



Hierbij merken we ook graag op dat voor zowel diclofenac, trimethoprim, claritromycine, furosemide en propranolol het maximale verwijderingsrendement werd behaald en de componenten dus tot onder de detectiegrens werd verwijderd. De (maximale) verwijderingsrendementen zijn berekend met de effluentconcentraties die overeenkomen met de detectiegrens, dit kan dus zeker nog een onderschatting zijn.

Hierbij zien we ook dat er voor gabapentine enkel een positieve contributie van MF1 waarneembaar is, zonder de detectiegrens te bereiken. Na MF2 werd een verhoogde concentratie gabapentine gevonden, namelijk een stijging van 2.2 ug/l naar 2.7 ug/l, wat op een negatief verwijderingsrendement zou duiden. Gegeven de bevindingen uit SP1 en SP3 is dit eerder onwaarschijnlijk. Toch werd hier rekening mee gehouden in de berekeningen van het globale verwijderingsrendement, waardoor de verwijdering niet 46% is maar slechts 34% voor deze gidsstof.

Verder zien we ook voor vele componenten een logische verschuiving in het evenwicht tussen de behandeling in MF1 en MF2, aangezien de ozonodosis nu ongelijk verdeeld werd

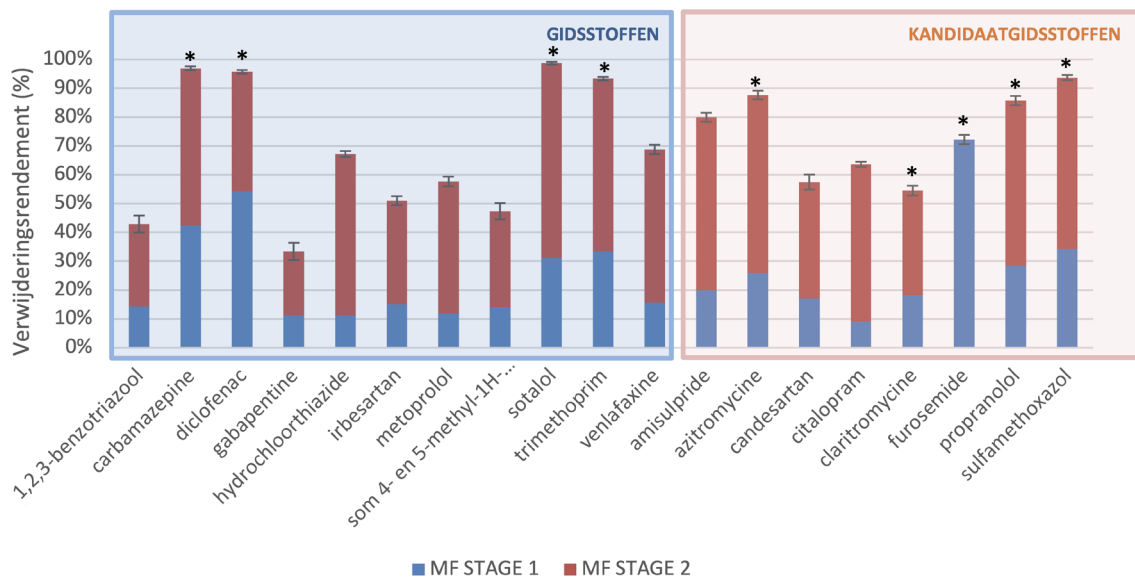
over de twee compartimenten volgens een 33/66 verhouding, waarbij dus dubbel zoveel ozon werd geïntroduceerd in OR2 als in OR1. De beweegreden hiervoor was dat er tijdens SP1 veel BOD en AOC werd gevormd in BR1, waardoor werd aangenomen dat de nitrificatie hierdoor negatief werd beïnvloed. Daarnaast werd ook verondersteld dat een hogere ozondosis in OR2 gunstiger zou zijn omdat er dan relatief minder ozonscavengers in het water zouden achterblijven en de tweede dosis dus intrinsiek meer effect zou hebben. Het nadeel om meer ozon in OR2 te introduceren is dat mogelijks meer vrij ozon zal ontstaan, met een hoger risico op bromaatvorming als gevolg. De resultaten m.b.t. bromaatvorming worden verderop besproken in dit hoofdstuk.

Ook hier geldt dat als de verhoudingen in verwijderingsrendement niet overeenkomen met de ozonverdeling over de twee reactoren (33/66), er sprake is van een (on)rechtstreekse contributie van BR1 en/of BR2.

5.3.3 RESULTATEN SP3 – ENKEL NABEHANDELING (0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN)

Tot slot werden voor SP3 ook de resultaten voor gidsstoffen en kandidaatgidsstoffen in kaart gebracht. Aangezien de verschillende testvariabelen werden aangepast op basis van voortschrijdend inzicht tijdens de verschillende testen zou dit het setpoint moeten zijn die de hoogste verwijdering in gidsstoffen oplevert en dus het ideale scenario zou moeten zijn. Dit wordt ook bevestigd in Figuur 27, waarin de verwijderingsrendementen voor de gidsstoffen en de kandidaatgidsstoffen worden getoond. Hierin valt in het algemeen al op dat de globale verwijderingsrendementen hoger liggen voor SP3 t.o.v. SP1 en SP2. De vier componenten die het best verwijderd worden zijn wederom carbamazepine, diclofenac, sotalol en trimethoprim met een verwijderingsrendement van $97.0 \pm 0.7\%$, $95.7 \pm 0.6\%$, $98.7 \pm 0.4\%$ en $93.3 \pm 0.7\%$ respectievelijk.

FIGUUR 27 RESULTATEN VERWIJDERINGSRENDEMENT GIDSSTOFFEN SP3 - 48 H BEMONSTERING OP INFLUENT VS. NA MF1 (OR1/BR1) EN MF2 (EFFLUENT PILOT) (N=1, STANDAARDDEVIATIE O.B.V. VCR, * WIJST OP HET BEREIKEN VAN HET MAXIMALE VERWIJDERINGSRENDEMENT I.V.M. LOD) – [SP1 0.25 G O₃/G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]



Hierbij merken we ook op dat de componenten carbamazepine, diclofenac, sotalol, trimethoprim, azitromycine, claritromycine, furosemide, propranolol en sulfamethoxazol tot onder de detectiegrens werden verwijderd en dus het maximale mogelijke verwijderingsrendement werd gehaald.

Deze resultaten tonen meteen ook aan dat de veranderingen in de testcondities ook een positief effect hadden op de kandidaatgidsstoffen.

Net zoals in SP2 werd de ozon dosis hier onevenredig verdeeld met een distributie 33/66. Dit verklaart ook waarom sommige componenten beter werden verwijderd in MF2 t.o.v. MF1. Bij een ozonisatie zonder biofilters zou dit in theorie betekenen dat we ook een 33/66 verdeling zien in de contributie van beide MF reactoren. In het geval een relatief hogere contributie wordt waargenomen in MF1 kan dit wijzen op een extra contributie van de eerste biofiltratie. Wanneer een relatief hogere contributie wordt waargenomen in MF2 dan kan dit enerzijds wijzen op een onrechtstreekse contributie van de eerste biofilter, waarbij organische of anorganische scavengers reeds worden verwijderd waardoor de tweede ozonisatiestap efficiënter verloopt. Verder kan een verhoogde verwijdering in MF2 wijzen op rechtstreekse verwijdering van oudercomponenten in BR2.

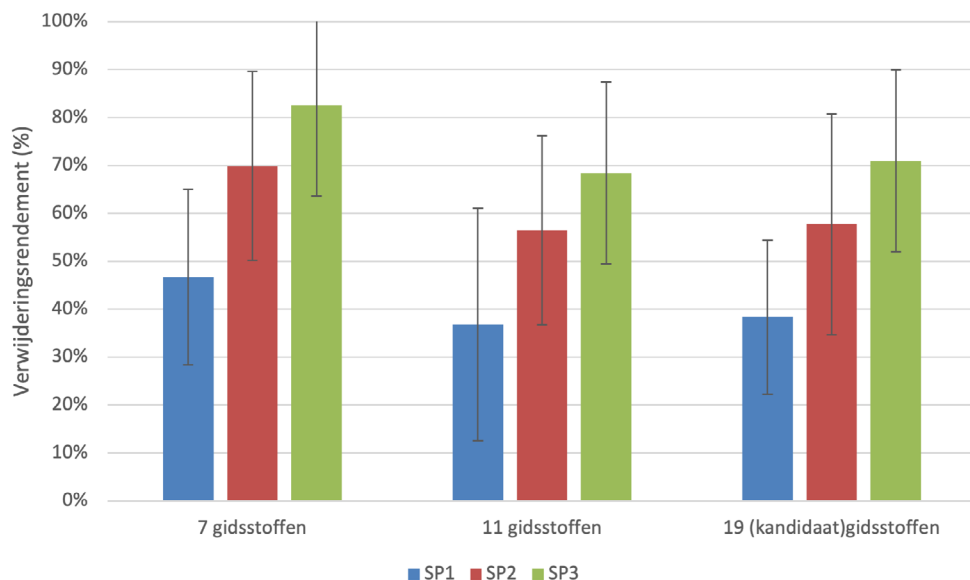
5.3.4 VERGELIJKING SP1, SP2 EN SP3 – ENKEL NABEHANDELING

Nu we een beeld hebben op de verwijderingsrendementen van de nabehandeling in alle setpoints, is het interessant om een evalueatie te maken met betrekking tot het verwijderingsrendement voor de 7 best verwijderbare gidsstoffen. Omdat deze richtlijn mogelijk te weinig ambitieus is brengen we ook het gemiddelde verwijderingsrendement in kaart voor alle 11 gidsstoffen en zelfs alle 19 (kandidaat)gidsstoffen. Als opmerking geven we ook mee dat in alle SP's sommige componenten het maximale verwijderingsrendement werd bereikt, dit heeft als gevolg dat het globale verwijderingsrendement in realiteit mogelijk nog iets hoger kan liggen.

In Figuur 28 worden de resultaten weergegeven van de gemiddelde verwijderingsrendementen van de nabehandeling.

FIGUUR 28

GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT VOOR 7/11 GIDSSTOFFEN, 11/11 GIDSSTOFFEN EN DE 19 (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ENKEL NABEHANDELING - EXCLUSIEF RWZI) (N=1, STANDAARDDEVIATIE O.B.V. VCR) – [SP1 0.25 G O₃/G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]

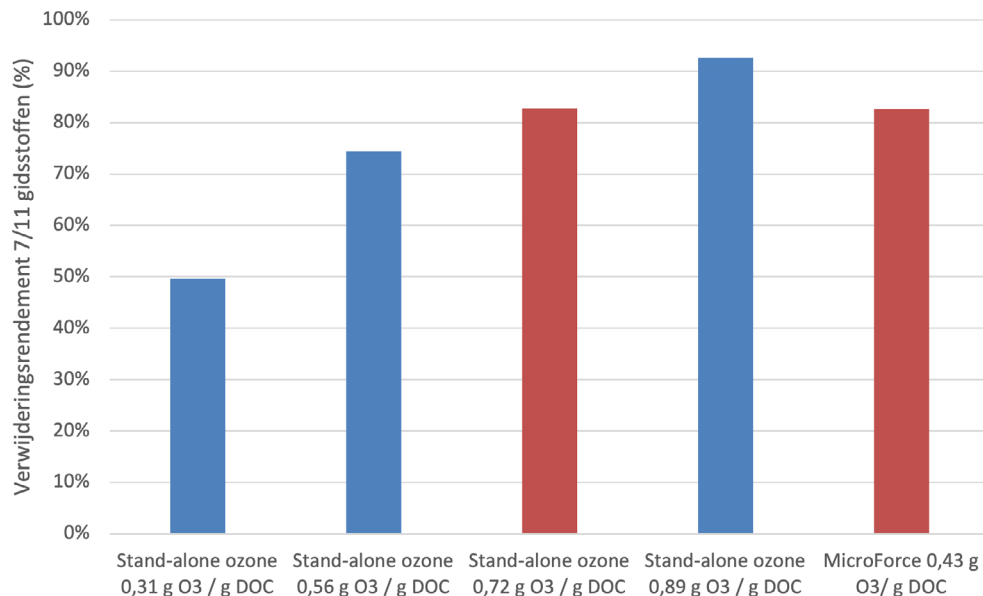


Uit deze gegevens leiden we af dat de gemiddelde verwijderingsrendement voor 7 van de 11 gidsstoffen 46.6 %, 69.9 % en 82.6 % bedroeg voor SP1, 2 en 3 respectievelijk. De aanpassingen die werden doorgevoerd doorheen de teststrategie hebben dus telkens een gunstig effect gehad op de verwijdering van gidsstoffen. Als we naar de gemiddelde verwijderingsrendementen kijken voor alle 11 gidsstoffen zien we een lichte daling voor alle testen; nl. 36.8% , 56.5% en 68.5 % voor SP1, 2 en 3 respectievelijk. Dit is logisch gezien we in dit geval ook de minder goed verwijderbare gidsstoffen in rekening brengen die het gemiddelde naar omlaag brengen. Tot slot werd ook het gemiddelde verwijderingsrendement in kaart gebracht voor alle 19 (kandidaat)gidsstoffen. Hierin leiden we af dat er terug een stijging in het gemiddelde verwijderingsrendement kan worden waargenomen. Dit is een logisch gevolg gezien uit voorgaande paragrafen ook bleek dat de individuele verwijderingsrendementen voor de kandidaatgidsstoffen relatief hoger lag dan de minder goed verwijderbare componenten uit de gidsstoffenlijst.

5.3.5 BENCHMARKTESTEN STAND-ALONE OZONISATIE VERSUS MICROFORCE++ SP3 (0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN)

Om in kaart te brengen en in te schatten hoe MicroForce++ presteert ten opzichte van stand-alone ozonisatie (zonder zandfilter) op dit specifieke RWZI effluent werden ook aanvullend een aantal benchmarktesten uitgevoerd waarbij de biofilters van MicroForce tijdelijk niet in gebruik werden genomen. Hierbij werden 4 verschillende ozondosissen getest, namelijk. 0.31 g O₃/ g DOC, 0.56 g O₃/ g DOC, 0.72 g O₃/ g DOC en 0.89 g O₃/ g DOC. De resultaten van deze test voor 7 van de 11 gidsstoffen worden weergegeven in Figuur 29. Als belangrijke opmerking geldt hier dat de resultaten van de stand-alone ozonisatie gebaseerd zijn op een eenmalige steekmonster. Het is dus belangrijk kritisch om te springen met de representativiteit van deze testen.

FIGUUR 29 GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT 7 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN T.B.V. BENCHMARKTESTEN STAND-ALONE OZONISATIE; 4 DOSISSEN 0.31 G O₃/ G DOC, 0.56 G O₃/ G DOC, 0.72 G O₃/ G DOC EN 0.89 G O₃/ G DOC (N=1, STEEKMONSTER) VERSUS SP3 MICROFORCE++ (N=1, 48H BEMONSTERING)



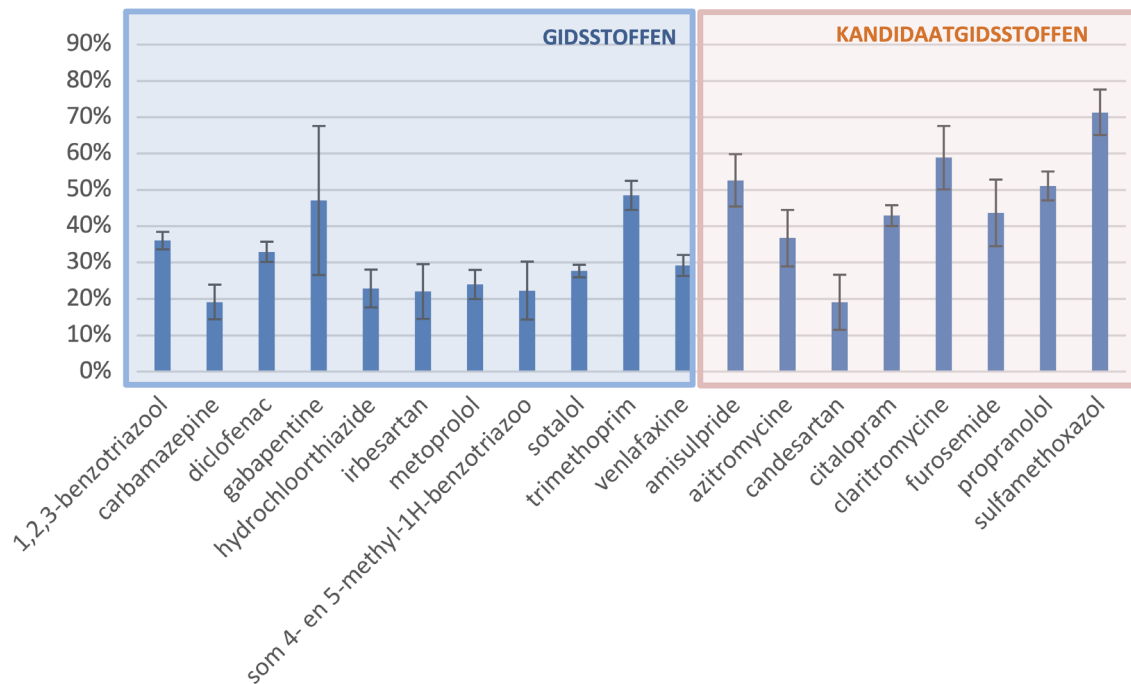
Uit deze resultaten kan worden afgeleid dat het gemiddelde verwijderingsrendement (7 van de 11 gidsstoffen) voor MicroForce++ onder de procesomstandigheden van SP3 het dichtst in de buurt komt van het resultaat bij 0.72 g O₃/ g DOC voor stand-alone ozonisatie. Dit illus-

treert dat de besparing in ozon significant te noemen is, i.e. ca. 40%, om een gelijkaardige verwijdering van gidsstoffen te behalen.

5.3.6 VERWIJDERING OMV ACTIEF SLIB ZUIVERING RWZI WALCHEREN

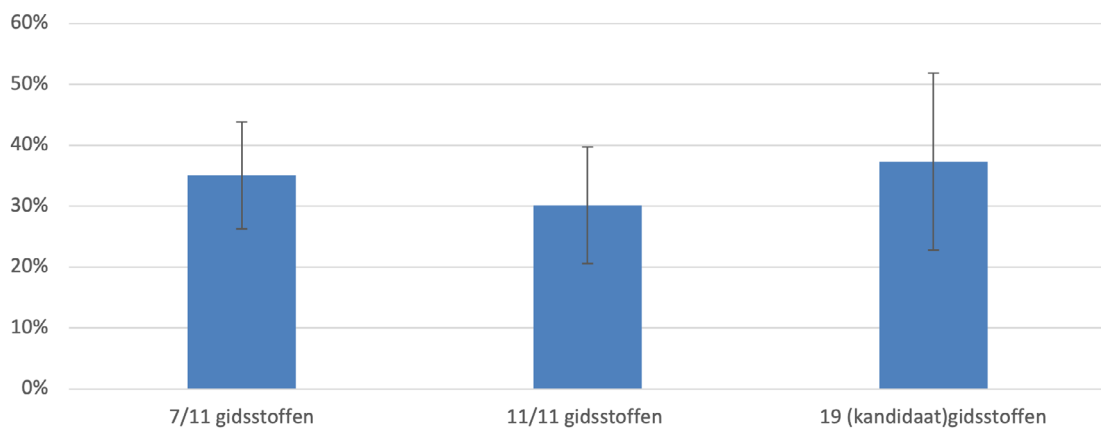
Om een idee te krijgen in hoeverre de gidsstoffen reeds worden verwijderd in de biologische zuivering van RWZI Walcheren werden verschillende bemonsteringscampagnes opgesteld, waarbij het influent en het effluent van de zuivering debietproportioneel werden bemonsterd gedurende 48 uur, rekening houdende met een standaard verblijftijd in de RWZI van 24 uur. De gemiddelde verwijderingsefficiëntie van de verschillende gemeten (kandidaat) gidsstoffen worden weergegeven in Figuur 30.

FIGUUR 30 GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT (KANDIDAATGIDSSTOFFEN) RWZI WALCHEREN (INFLUENT VERSUS EFFLUENT) (N=4, VERSPREID OVER TESTPERIODE)



Nadien evalueren we, analoog aan de analyses voor de nabehandelingstechniek, wat de gemiddelde verwijderingsrendementen zijn voor 7 van de 11 gidsstoffen, 11 van de 11 gidsstoffen en alle 19 (kandidaat)gidsstoffen. De resultaten hiervan worden weergegeven in Figuur 31.

FIGUUR 31 GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT VOOR 7/11, 11 EN ALLE 19 (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN OP RWZI WALCHEREN (N=4)



Uit deze resultaten leiden we af dat het gemiddelde verwijderingsrendement op de actief slib zuivering 35%, 30% en 37 % bedraagt voor 7/11, 11/11 en alle 19 (kandidaat)gidsstoffen respectievelijk.

Daarnaast werd ook in kaart gebracht hoe de verwijderingsrendementen op RWZI Walcheren zich verhouden tot de gemiddelde verwijderingsefficiëntie die reeds zijn waargenomen op de RWZI'S in Nederland, dewelke gerapporteerd zijn door STOWA (Mirabella Mulder, 2021)

TABEL 8 VERWIJDERINGSRENDEMENT GIDSSTOFFEN T.O.V. MINIMUM (MIN), MAXIMUM (MAX) EN GEMIDDELDE (GEM) RENDEMENT IN NEDERLAND

Gidsstof	RWZI WALCHEREN	Verwijdering RWZI (STOWA)		
		MIN	MAX	GEM
1,2,3-benzotriazool	36,1%	25%	60%	43%
carbamazepine	19,2%	5%	15%	10%
diclofenac	32,9%	10%	35%	23%
gabapentine	47,1%	30%	60%	45%
hydrochloorthiazide	22,9%	5%	25%	15%
irbesartan	22,1%	5%	15%	10%
metoprolol	24,0%	20%	50%	35%
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	22,3%	10%	40%	25%
sotalol	27,7%	15%	35%	25%
trimethoprim	48,5%	30%	80%	55%
venlafaxine	29,2%	5%	15%	10%

Uit deze tabel leiden we af dat bijna alle gidsstoffen binnen de min-max grenzen van de RWZI's in Nederland vallen en het actief slib systeem dus een normale verwijdering van gidsstoffen vertoont. Voor de gidsstoffen carbamazepine, irbesartan en venlafaxine werd zelf een bovengemiddeld verwijderingsrendement gevonden.

5.3.7 VERWIJDERINGSRENDEMENT INFLUENT ZUIVERING VERSUS EFFLUENT PILOT (INCLUSIEF BYPASS)

Volgens de criteria van het IPMV wordt de verwijderingsefficiëntie van de technologie geëvalueerd tussen het influent van de RWZI versus het effluent van de pilot. Hierbij moet verder ook rekening worden gehouden met de behoefte om de nageschakelde installatie te bypassen in geval van zeer hoge RWA pieken, die dus de designcapaciteit soms zullen overstijgen. Als vuistregel geldt dat een installatie die een ontwerp piek heeft van ca. 1.5 x de gemiddelde DWA, op jaarbasis ongeveer 85 % van al het influent kan behandelen. Dat wil zeggen dat de installatie ongeveer 15% zal moeten worden gebypassed en er dus in dat scenario onbehandeld effluent zal worden gemengd met behandeld effluent, resulterend in een emissiewater met een iets hogere concentratie aan organische microverontreinigingen OMV.

Om al deze factoren in rekening te brengen werd door STOWA een standaard modelberekening opgesteld en beschikbaar gemaakt (STOWA 2021 – 15) die toelaat zowel de preformantie van de biologische zuivering als de bypass in rekening te brengen in de totaalverwijdering ('overall verwijdering') aan microverontreinigingen.

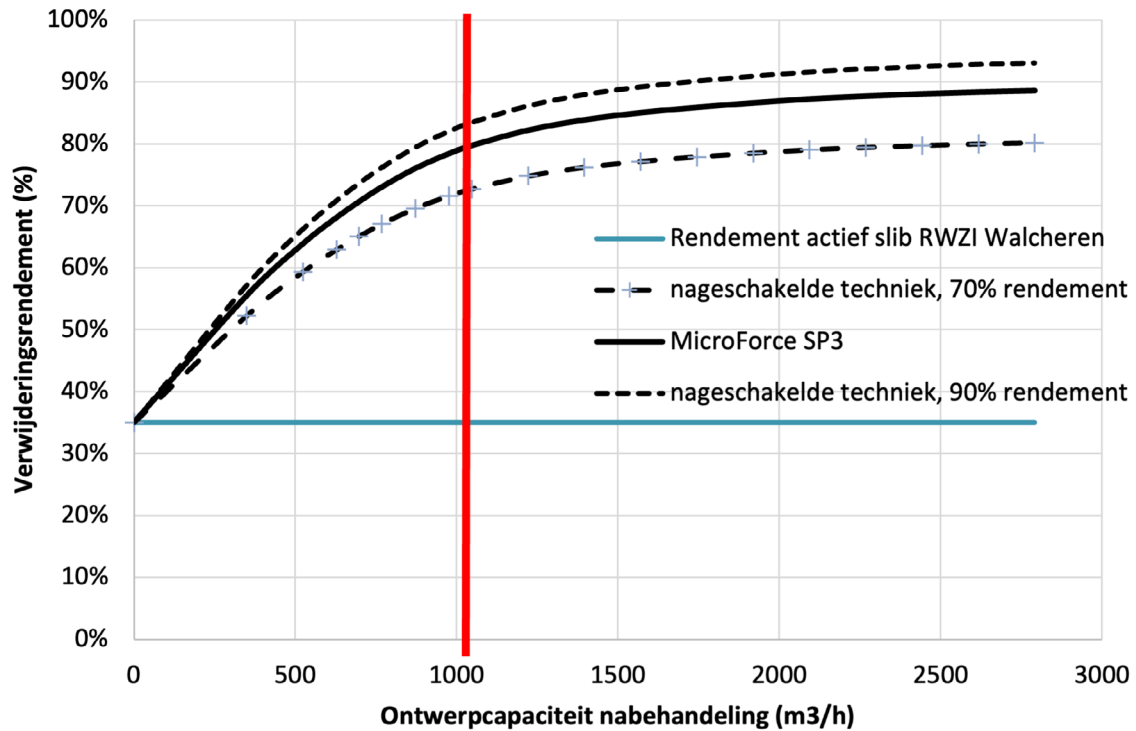
7 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN

Eerst werd dit model toegepast op de resultaten van 7 van de 11 gidsstoffen voor SP3. Verder werden volgende assumpties gebruikt voor de berekeningen van het totale verwijderingsrendement:

- Designcapaciteit nabehandeling = 1047 m³/h (= ca. 1.5 x DWA)
- Verwijderingsrendement RWZI voor 7/11 gidsstoffen = 35% (zie paragraaf 5.3.6)
- Verwijderingsrendement nabehandeling met MicroForce++ SP3 voor 7/11 gidsstoffen = 83%

De resultaten van deze berekening worden weergegeven in Figuur 32.

FIGUUR 32 MODELBEREKENING TOTAAL VERWIJDERINGSRENDEMENT 7/11 GIDSSTOFFEN VOOR STANDAARD RWZI VAN 100.000 IE EN NABEHANDELING MICROFORCE++ MET SP3 – [SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]



Uit deze grafiek kunnen we nadien het totale verwijderingsrendement aflezen in het snijpunt op totale ontwerpcapaciteit van de nabehandeling en de logaritmische verwijderingscurve van MicroForce++ die start op het gekozen verwijderingsrendement van het actief slibstelsysteem. Uit deze gegevens vinden we dat de totale verwijdering (influent RWZI versus effluent van MicroForce++) ca. 80% zal bedragen.

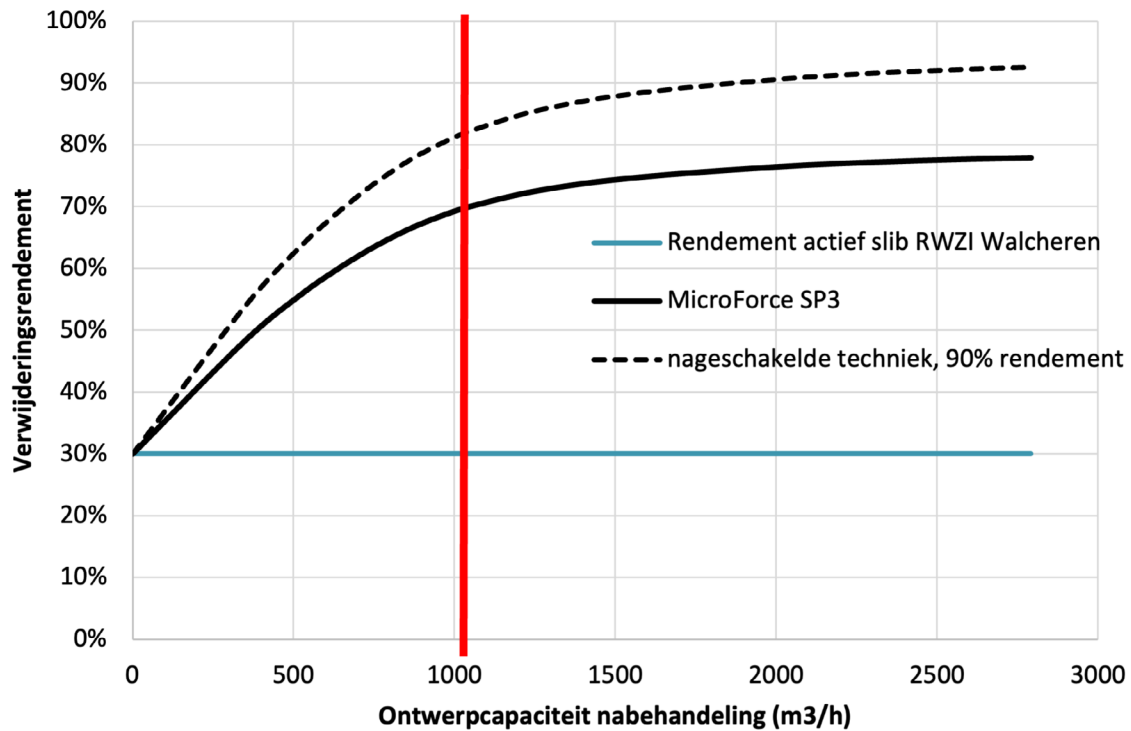
11 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN

Als we deze berekeningen herhalen voor alle gidsstoffen met volgende assumpties:

- Designcapaciteit nabehandeling = 1047 m³/h (= ca. 1.5 x DWA)
- Verwijderingsrendement RWZI voor 11/11 gidsstoffen = 30% (zie paragraaf 5.3.6)
- Verwijderingsrendement SP3 voor 11/11 gidsstoffen = 68%

Dan vinden we volgende resultaten (cfr. Figuur 33):

FIGUUR 33 MODELBEREKENING TOTAAL VERWIJDERINGSRENDEMENT 11/11 GIDSSTOFFEN VOOR STANDAARD RWZI VAN 100.000 IE EN NABEHANDELING MICROFORCE++ MET SP3 - [SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]



Hieruit volgt dat het totale verwijderingsrendement (analoog aan de vorige paragraaf) voor 11 van de 11 gidsstoffen (influent RWZI versus effluent nabehandeling, inclusief bypass) ca. 70% zal bedragen.

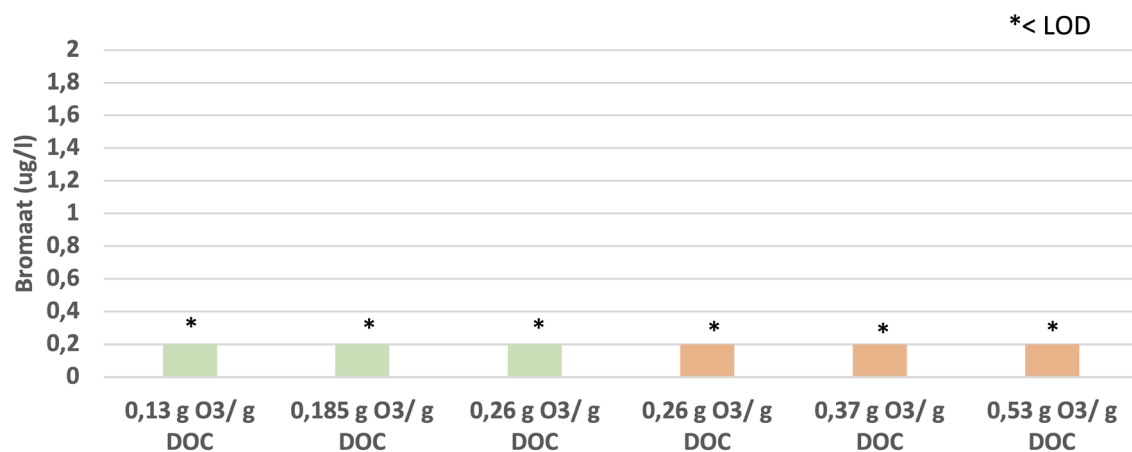
19 KANDIDAAT(GIDSSTOFFEN)

Tot slot voeren we dezelfde berekening nogmaals uit voor alle 19 (kandidaat)gidsstoffen

- Designcapaciteit nabehandeling = 1047 m³/h (= ca. 1.5 x DWA)
- Verwijderingsrendement RWZI voor 19 kandidaatgidsstoffen = 37% (zie paragraaf 5.3.6)
- Verwijderingsrendement SP3 voor 19 kandidaatgidsstoffen = 71%

Dan vinden we volgende resultaten (cfr. Figuur 34):

FIGUUR 34 MODELBEREKENING TOTAAL VERWIJDERINGSRENDEMENT 19 (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN VOOR STANDAARD RWZI VAN 100.000 IE EN NABEHANDELING MICROFORCE++ MET SP3 - [SP3 0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN]



Hieruit volgt dat het totale verwijderingsrendement voor de 19 kandidaatgidsstoffen (influent RWZI versus effluent nabehandeling, inclusief bypass) ca. 74% zal bedragen. Dit gemiddelde verwijderingspercentage van 19 kandidaat gidsstoffen ligt hoger dan voor 11 gidsstoffen omdat de kandidaatgidsstoffen in het algemeen een hoger verwijderingsrendement vertonen in zowel het actief slib systeem als op de nabehandeling met MicroForce⁺⁺.

5.3.8 VERWIJDERINGSRENDEMENT MICROFORCE⁺⁺ CONCEPT EU-VOORSTEL RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER 2023

Door de EU is een voorstel gedaan voor een revisie van de Richtlijn Stedelijk Afvalwater. Hierin worden verwijderingsrendementen voorgesteld voor organische microverontreinigingen, die enigszins afwijken van de Nederlandse stoffen voor de bijdrageregeling voor demo's en het IPMV.

Voor de uitwerking van de verwijderingsrendementen die volgens deze nieuwe concept richtlijn berekend werden verwijzen we graag naar Appendix C.

5.4 BROMIDE EN BROMAAT

Een ozongedreven geavanceerd oxidatie proces staat erom bekend op heel lucratieve manier organische microverontreinigingen te kunnen afbreken. Echter bestaat er ook het risico dat bromaat wordt gevormd als negatief bijproduct tijdens de oxidatiereactie. Er zijn een aantal factoren die de vorming van bromaat beïnvloeden, namelijk de concentratie bromide in het influent, de ozondosis die wordt toegepast, de aanwezigheid van NH_4 in het influent (zie paragraaf 5.3) en de manier waarop het ozon wordt ingebracht. Zoals reeds kort beschreven in de introductie worden een aantal beheersmaatregelen in het ozonisatieproces toegepast om de vorming van bromaat te mitigeren:

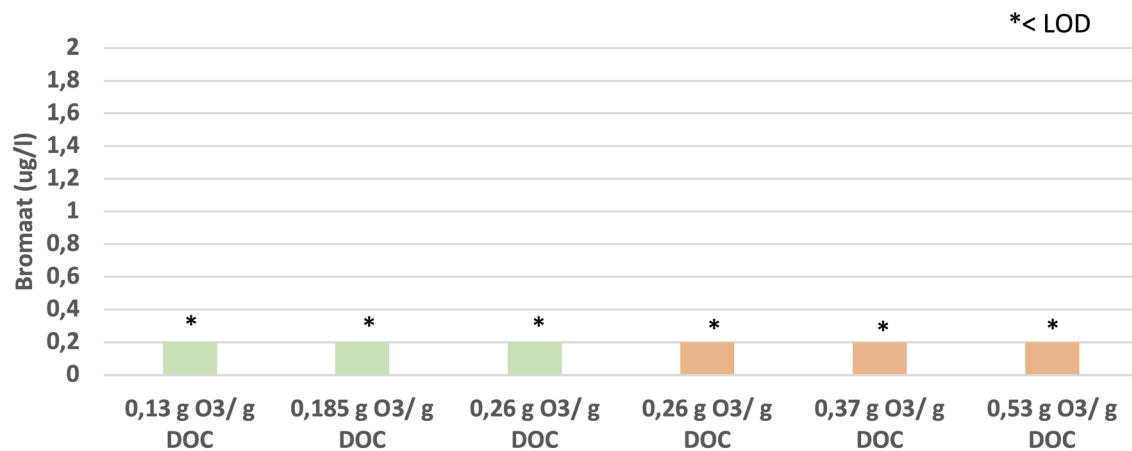
1. Een intelligente ozondosering over twee in serie geschakelde reactoren, waardoor de individuele ozondosis per reactor laag blijft en aanwezigheid van vrij ozon wordt vermeden;
2. De ozonreactoren zijn gemodelleerd aan de hand van een 3D-simulatie - een zogenaamde Computational Fluid Dynamics (CFD) modellering. Met deze simulatie zijn de ozonreactoren geoptimaliseerd (en gevalideerd) om zelfs bij hoge bromide-concentraties en ozondoseringen de lokale ozonconcentraties minimaal te houden, met een wezenlijke reductie van bromaatvorming als positieve uitkomst ten opzicht van alternatieve injectiemethodes zoals standaard venturi-nozzle methodes;
3. Aan de hand van een UVA-sensor monitoren we online de concentraties opgeloste organische koolstof (DOC). Daarop stemmen we de dosering ozon af wat een overmaat aan vrije ozon en bijgevolg bromaatvorming voorkomt;
4. De ozon wordt opgelost met een innovatieve ozonoplosmethode ontwikkeld door PureBlue. In deze inbrengmethode worden microbelletjes gevormd met een hoge ozontransferefficiëntie, maar die toch minimale vrije ozonconcentraties opleveren. Naast het optimaliseren van de ozontransferefficiëntie wordt de zuurstoftransferefficiëntie verlaagd, waardoor minder zuurstof wordt opgelost en bijgevolg minder koolstofbron benodigd is om een nageschakeld denitrificatie proces op gang te brengen. Bovendien wordt hierbij de recuperatie en hergebruik van zuurstof in het afgas nog interessanter. Een aanvullende meerwaarde van deze oplostechnologie is dat de ozonreactoren compact kunnen blijven en de bouwhoogte zodoende lager dan drie meter kan blijven.
5. Het toevoegen van een biofiltratiestap zorgt dat de totale ozondosis kan verlaagd worden van ca. $0.7 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$ naar ca. $0.43 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$, een besparing van ca. 40%.

5.4.1 SP1 (0.25 G O₃/G DOC, 50/50, 7.5 MIN)

Zoals reeds besproken in de paragraaf over het verband tussen EGV en bromide worden zeer hoge bromideconcentraties waargenomen op RWZI Walcheren (ca. 1.3-1.8 mg/l). Onder deze extreme omstandigheden werden verschillende ozondosissen tijdens SP1 toegevoegd aan het effluent, met een 50/50 verdeling over beide reactoren. In Figuur 35 worden de resultaten van de analyses op bromaat weergegeven die telkens na iedere ozonstap werden bepaald.

Uit deze resultaten kunnen we afleiden dat geen significante bromaatconcentraties werden gemeten. Sterker nog, de bromaatconcentraties bleven voor alle enkelvoudige (OR1) en dubbele ozonisatiestappen (OR1 + OR2) onder de detectiegrens van 0.2 µg/l.

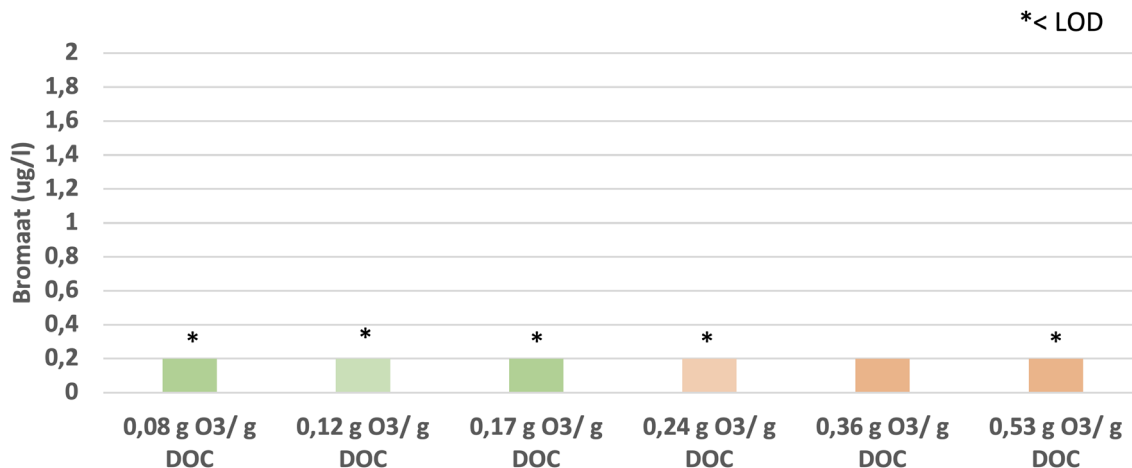
FIGUUR 35 BROMAATVORMING MICROFORCE++ VOOR SP1 MET EEN INFLUENT BROMIDE CONCENTRATIE TUSSEN 1.3 EN 1.8 MG/L – GROEN ZIJN DE BROMAAT CONCENTRATIES NA DE EERSTE OZONSTAP, ORANJE ZIJN DE RESULTATEN NA EEN TWEEDE OZONSTAP (N=1 PER OZONDOSIS, LOD = 0.2 G/L)



5.4.2 SP2 (0.35 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN)

Tijdens SP2 werden gelijkaardige bromideconcentraties gemeten als in SP1 die variëren tussen 1.4 en 1.6 mg/l. Ook tijdens dit SP2 werden nagenoeg geen detecteerbare bromaatconcentraties waargenomen, met uitzondering van 1 meetpunt (0.36 g O₃/g DOC), die net op de detectiegrens van 0.2 µg/l werd waargenomen.

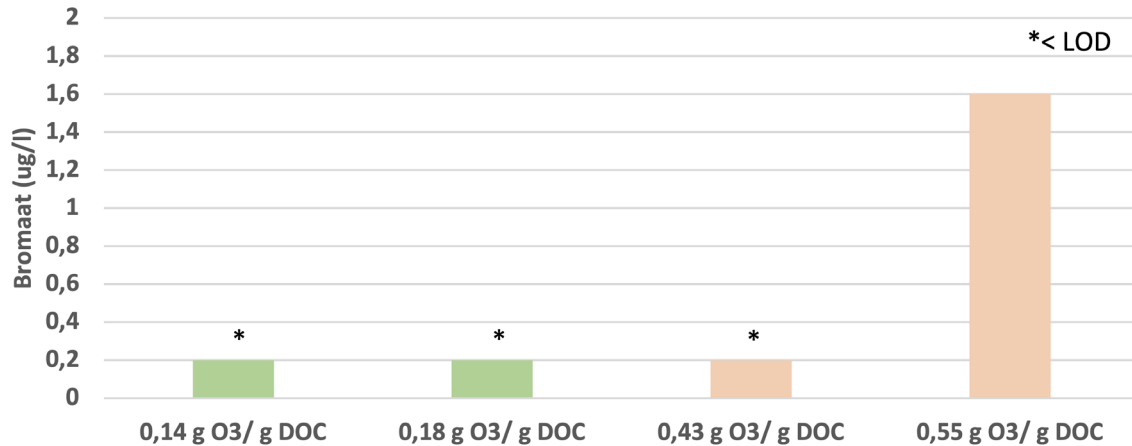
FIGUUR 36 BROMAATVORMING MICROFORCE++ VOOR SP1 MET EEN INFLUENT BROMIDE CONCENTRATIE TUSSEN 1.4 EN 1.6 MG/L – GROEN ZIJN DE BROMAAT CONCENTRATIES NA DE EERSTE OZONSTAP, ORANJE ZIJN DE RESULTATEN NA EEN TWEEDE OZONSTAP (N=1 PER OZONDOSIS, LOD = 0.2 G/L)



5.4.3 SP3 (0.43 G O₃/G DOC, 33/66, 15 MIN)

Ook voor SP3 werd de bromaatvorming opgevolgd voor de verschillende dosissen. Hierbij werden twee verschillende totaaldosissen van 0.43 en 0.55 g O₃/ g DOC onevenredig verdeeld over beide ozonstappen in een verhouding van 33/66.

FIGUUR 37 BROMAATVORMING MICROFORCE++ VOOR SP1 MET EEN INFLUENT BROMIDE CONCENTRATIE TUSSEN 1.7 EN 2.2 MG/L – GROEN ZIJN DE BROMAAT CONCENTRATIES NA DE EERSTE OZONSTAP, ORANJE ZIJN DE RESULTATEN NA EEN TWEEDE OZONSTAP (N=1 PER OZONDOSIS, LOD = 0.2 G/L)



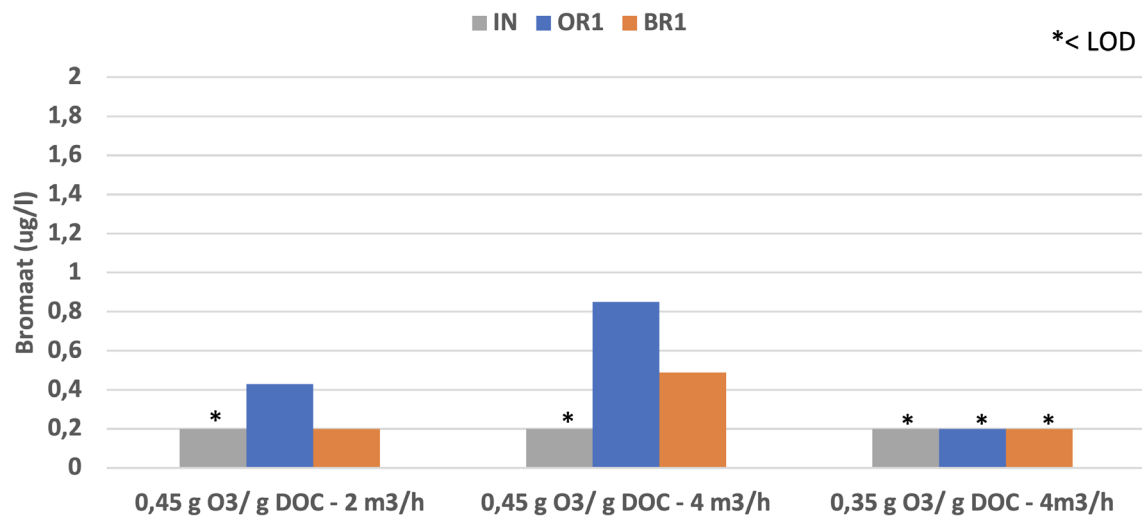
We merken eerst en vooral op dat de bromideconcentraties die gemeten werden tijdens SP3 nog iets hoger lagen dan tijdens SP1 en SP2, nl. tussen 1.7 en 2.2 mg/l. Opnieuw worden voor dosissen t.e.m. 0.43 g O₃/g DOC geen significante bromaatconcentraties gedetecteerd. Echter, werd tijdens de tweede ozonisatiestap resulterend in een totale dosis van 0.55 g O₃/ g DOC een bromaatconcentratie van 1.6 ug/l gemeten. Een verklaring hiervoor kan gevonden worden in het feit dat NH₄ concentraties in deze stap grotendeels was verwijderd, waardoor de reactiekinetieken van bromide naar bromaat werden beïnvloed (zie Hoofdstuk 4). Hoe dan ook is het, afgaande op de huidige resultaten m.b.t. verwijdering van gidsstoffen, onwaarschijnlijk dat in een hybride nabehandelingsstelsel met ozon zoals MicroForce++ een dergelijk hoge ozondosis zal nodig zijn om afdoende verwijdering van microverontreinigingen te bewerkstelligen.

5.4.4 TESTEN MET SINGLE STAGE OZON/BIOREACTOR (SP EXTRA)

Aangezien er tijdens de multi-stage testen met ozon nagenoeg geen significante bromaatconcentraties werden waargenomen werd ook nog een test uitgevoerd met een enkelvoudige ozon- en biostap. Zo trachten we in kaart te brengen wat het effect is van de verdeling van ozon over de verschillende compartimenten op de totale bromaatvorming. Hierbij maken we wel de kanttekening dat de analyses zijn uitgevoerd op steekmonsters en dus een momentopname zijn. De resultaten van deze test worden weergegeven in Figuur 38.

FIGUUR 38

BROMAATVORMING MET SINGLE STAGE OZONE REACTOR EN BIOFILTRATIE (OR/BR), BROMIDECONCENTRATIE 1.4 MG/L (N=1, LOD = 0.2 G/L)



Uit deze resultaten kunnen we afleiden dat er bij een een-stapsdosis van 0.45 g O₃/ g DOC wel detecteerbare bromaatconcentraties werden waargenomen. Bij een debiet van 2 m³/h over de pilot bedroeg de gevormde bromaatconcentratie 0.43 ug/l, en bij een debiet van 4 m³/h was de bromaatconcentratie 0.85 ug/l. Bij een eenmalige dosis van 0.35 g O₃/g DOC werden, net zoals in de twee-staps reactoren, ook geen bromaatconcentraties gedetecteerd. Opvallend aan deze resultaten is ook dat er een, weliswaar beperkte, verwijdering van bromaat plaatsvindt in de bioreactoren. Dit kan mogelijks worden toegeschreven aan een aantal anoxische zones in het filter die bromaat terug reduceren.

Tot slot werden ook een aantal monsters genomen op het influent, echter werden hier geen detecteerbare achtergrondconcentraties van bromaat waargenomen.

5.5 RESPIROMETRIE

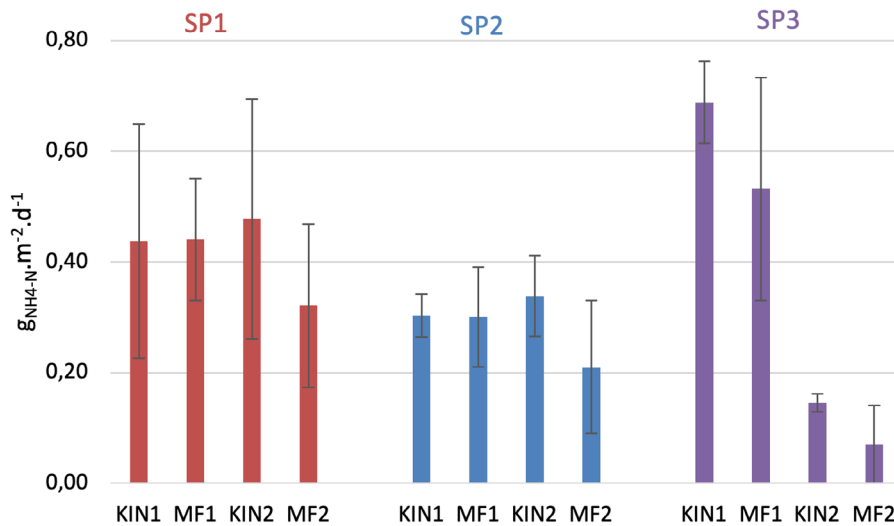
Zoals beschreven in hoofdstuk 4 kan respirometrie gebruikt worden om de performantie van de biofilm te karakteriseren onder lab omstandigheden en, indien nodig, de resultaten te standaardiseren. In deze sectie zal de performantie van de biofilm objectief geëvalueerd worden op basis van 2 parameters, nl. de specifieke oppervlakte ammonium verwijderingssnelheid (SAARR) en de zuurstofopnamesnelheden (SOUR).

5.5.1 SPECIFIEKE OPPERVLAKTE AMMONIUM VERWIJDERINGSSNELHEDEN (SAARR)

In figuur 39 worden de resultaten weergegeven voor de SAARR tijdens de verschillende testen (SP1-3). Hieruit kunnen we afleiden dat de SAARR bij SP1 en SP2 in zekere zin vergelijkbaar zijn met elkaar, waarbij een iets betere prestatie wordt waargenomen bij SP1. Visueel werd een dunnere biofilm waargenomen tijdens SP2, vooral in bioreactor 2 (Figuur 40 en Figuur 41). Een mogelijke verklaring is de verminderde specifieke belasting van CZV en NH₄-N tijdens SP2. Als gevolg van de halvering van het debiet zal de biofilm onvoldoende nutriënten ontvangen om biomassa te ontwikkelen en loskomen van het dragermateriaal. Hoewel de verblijftijd in SP2 dubbel zo lang was in vergelijking met SP1 bleek dit nog onvoldoende te zijn voor de aanwezige biomassa om een volledige oxidatie van ammonium te realiseren in de eerste bioreactor, zoals reeds besproken in de resultaten met betrekking tot NH₄-N. Aangezien er geen significant verschil werd waargenomen in het nitrificatiepoten-

tieel van de eerste reactor, zelfs bij een verdubbeling van de hydraulische verblijftijd, rees de assumptie dat er mogelijk kortsluitstromen ontstaan in het filterbed, waardoor het potentieel van het bed niet volledig benut werd.

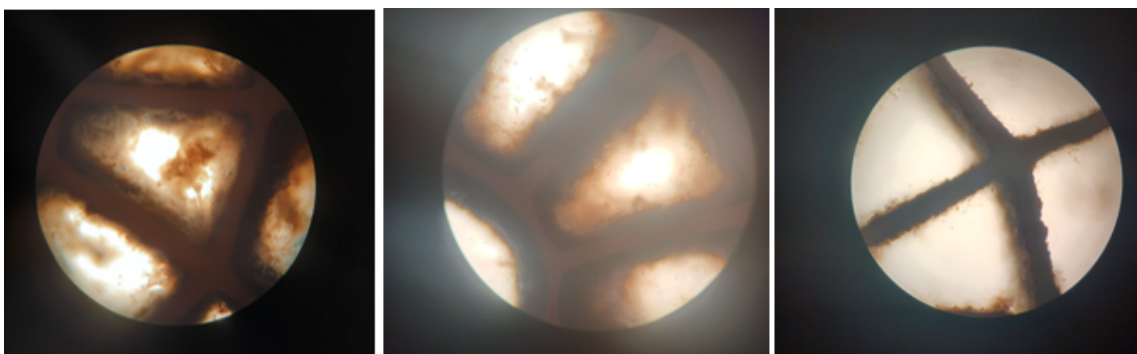
FIGUUR 39 SPECIFIEKE AREA AMMONIA REMOVAL RATES (SAARR) VOOR DE RESPIROMETRIETESTEN (KIN) VERSUS DE PILOTRESULTATEN (MF) VOOR REACTOR 1 (KIN1/MF1) EN REACTOR 2 (KIN2/MF2) TIJDENS SP1 (N=5), SP2 (N=3) EN SP3 (N=3) - [SP1 0.25 G O₂/G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O₂/G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O₂/G DOC, 33/66, 15 MIN]



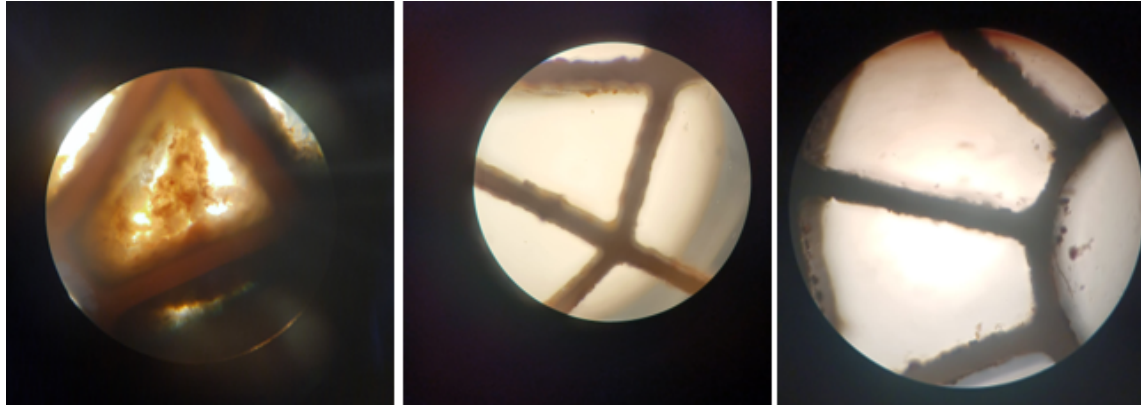
Bij SP3 werden de bioreactoren continu belucht waarbij het dragerbed nog steeds stil bleef liggen maar het water wel over de volledige filter werd verdeeld. Dit bleek inderdaad een gunstig effect te hebben aangezien een hogere SAARR werd waargenomen in bioreactor 1 onder SP3 in vergelijking met SP1 en SP2. Zoals te zien is op de microscopische beelden van de dragers, is de dikte van de biofilm sterk afgenomen in bioreactor 2 gedurende de periode dat de pilot werd bedreven onder SP3. Dit is een logisch gevolg omdat de belasting van nutriënten over deze reactor veel lager was door de verwijdering van NH₄-N over reactor 1. Bijgevolg werd dus ook een aanzienlijk lagere SAARR waargenomen in bioreactor 2 onder SP3.

De gemiddelde SAARR die werd waargenomen uit de pilotresultaten is 0.69 ± 0.07 g/m²/d. Hieruit volgt dat de totale capaciteit voor NH₄-verwijdering van de MicroForce⁺⁺ pilot 518 ± 53 g/d per reactor bedraagt.

FIGUUR 40 AFBEELDINGEN MICROSCOPISCH ONDERZOEK BIOREACTOR 1 (SP1-3)



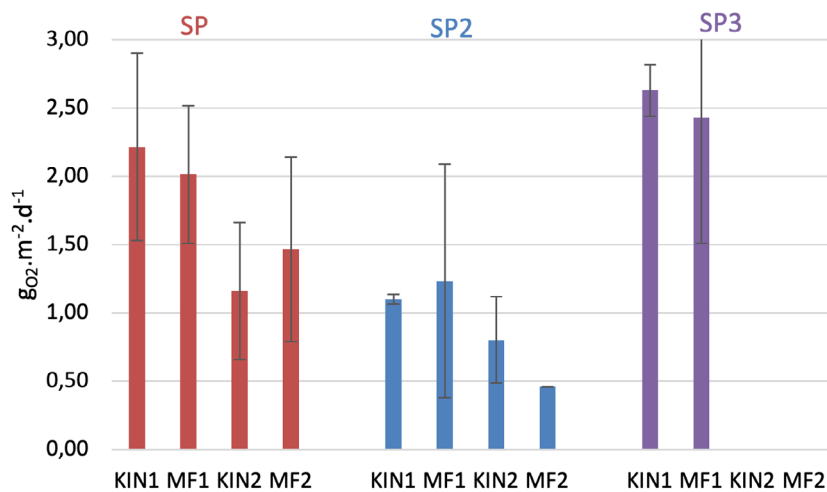
FIGUUR 41 AFBEELDINGEN MICROSCOPISCH ONDERZOEK BIOREACTOR 2 (SP1-3)



5.5.2 SPECIFIEKE OPPERVLAKTE ZUURSTOFOPNAMESNELHEDEN (SOUR)

Figuur 42 toont een vergelijking van de SOUR berekend volgens de formules uit Hoofdstuk 4 bij SP1, SP2 en SP3. De waarnemingen komen goed overeen met die in Figuur 39, omdat ze met elkaar gecorreleerd zijn. De resultaten van de SOUR bevestigen de hogere activiteit van bioreactor 1 tijdens SP3 in vergelijking met SP1 en SP2, en een vergelijkbare activiteit in SP1 en SP2. Soortgelijke resultaten van KIN en MF tonen aan dat het zuurstofverbruik voornamelijk te wijten was aan $\text{NH}_4\text{-N}$ verwijdering door de biomassa en niet zozeer voor CZV.

FIGUUR 42 SPECIFIEKE AREA ZUURSTOFOPNAMESNELHEDEN (SOUR) VOOR DE LAB-RESPIROMETRIETESTEN (KIN) VERSUS DE PILOTRESULTATEN (MF) VOOR REACTOR 1 (KIN1/MF1) EN REACTOR 2 (KIN2/MF2) TIJDENS SP1 (N=5), SP2 (N=3) EN SP3 (N=3) - [SP1 0.25 G O_3 /G DOC, 50/50, 7.5 MIN; SP2 0.35 G O_3 /G DOC, 33/66, 15 MIN; SP3 0.43 G O_3 /G DOC, 33/66, 15 MIN]

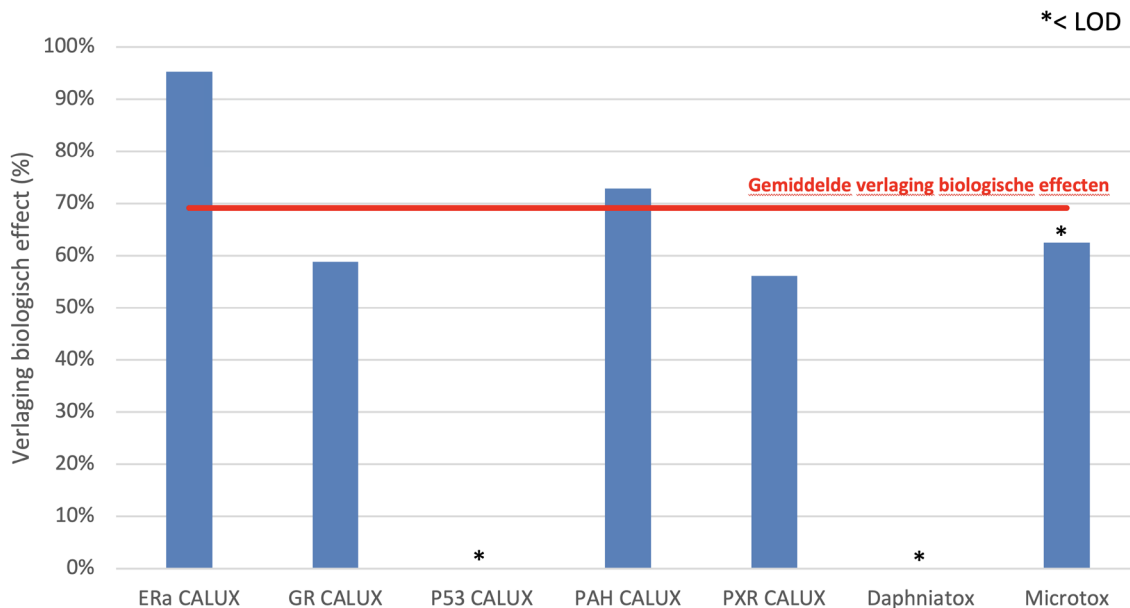


5.6 BIOLOGISCHE EFFECTEN

In dit onderzoek werden eenmalig biologische effectmetingen uitgevoerd conform de 'handreiking voor uitvoeren van biologische effectmonitoring bij vergaande zuivering van RWZI-effluenten'. De bemonstering werd uitgevoerd onder de procescondities van SP3, nl. een ozondosis van 0,43 g O_3 / g DOC, een 33/66 ozonverdeling over OR1 en OR2 en een HRT over ieder biofilter van 15 min. De resultaten worden weergegeven in Figuur 43.

FIGUUR 43

RESULTATEN PROCENTUELE VERLAGING BIOLOGISCHE EFFECTEN MICROFORCE++ (N=1) VOOR SP3 (0,43 G O₃/ G DOC, 33/66 OZONDISTRIBUTIE, 15 MIN HRT PER BIOREACTOR), ERA CALUX = OESTROGENEN, GR CALUX = GLUCOCORTICOÏDES, P53 CALUX = P53 TRANSCRIPTIONAL ACTIVATORS, PAH CALUX = POLYCYCLISCHE AROMATISCHE KOOLWATERSTOFFEN, PXR CALUX – XENOBIOTIC SENSING. WEERGAVE GEMIDDELDE = GEMIDDELDE VAN DE EFFECTEN DIE KONDEN GEKWANTIFICEERD WORDEN, I.E. ALLE EFFECTEN ZONDER P53 CALUX EN DAPHNIATOX



Over het algemeen kunnen we afleiden dat de biologische effecten die konden gekwantificeerd worden allen afnemen met meer dan 50%. Hierbij valt ook op dat het effect op twee parameters, nl. P53-Calux meting en de Daphniatox jammer genoeg niet konden geavanceerd worden omdat de detectielimieten van deze methodes werden bereikt.

Voor P53-Calux werd deze detectiegrens reeds bereikt in het influent van de pilot (i.e. RWZI effluent), nl. lager dan 0,0054 µg Actinomycin D eq./l. Deze indicator geeft een idee van de oxidatieve stress in de watermatrix en zou na een oxidatieproces zoals ozonisatie kunnen toenemen, wat nadelig zou zijn. Echter, door de relatief lage ozon dosis die werd toegepast zien we geen toename voor de oxidatieve stress in het effluent.

Wat betreft Daphniatox werd voor het influent wel nog een waarde gemeten die net op de detectiegrens lag, nl. 0.015 TU (Toxic Unit) per liter water. Maar na de behandeling met MicroForce++ duikt deze parameter onder het meetbereik, waardoor de absolute verlaging niet kwantificeerbaar was. Microtox wordt wel nog significant gemeten in het RWZI effluent (0.04 TU/l), maar zakt na behandeling met MicroForce++ ook tot onder de detectiegrens (<0.015 TU/l)

Als we deze twee parameters buiten beschouwing laten dan vinden we een gemiddelde verlaging in biologische effecten van ca. 67%, wat zeer gunstig is naar opwaardering van de effluentkwaliteit toe.

6

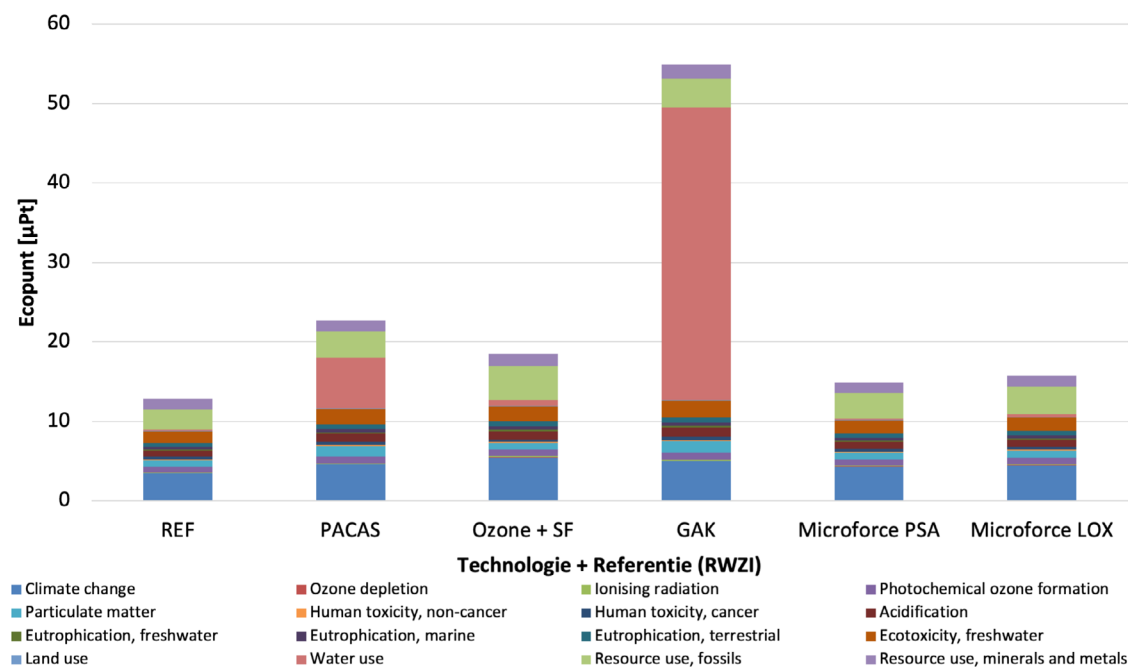
LCA (KWR)

6.1 PRESTATIE MICROFORCE++ O.B.V. ECOPUNTEN

Zoals omschreven in hoofdstuk 4 werd door KWR een LCA studie uitgevoerd op de MicroForce++ technologie om een dieper inzicht te krijgen in de duurzaamheidsaspecten aan de hand van verschillende, vooraf gedefinieerde impactcategorieën. Net zoals in de CO₂ berekeningen volgens de modellering van Stowa (cfr. Hoofdstuk 7) werd een vergelijking gemaakt voor de verschillende standaardtechnieken en met elkaar vergeleken. Hierbij merken we op dat deze evaluatie zich enkel focust op het operationele verbruik en consumables van iedere technologie. Om een volledig LCA beeld te krijgen zouden ook alle hardware onderdelen in kaart moeten worden gebracht. Dit is echter buiten de scope van deze studie.

De resultaten van dit onderzoek worden weergegeven in Figuur 44. Hierbij valt meteen op dat MicroForce++ op twee manieren werd geïmplementeerd, namelijk gebruik makend van een PSA zuurstofgenerator voor het opwekken van zuurstof (i.e. 'MicroForce PSA') en MicroForce++ gevoed met LOX ('MicroForce LOX'). Op deze manier zijn we ook in staat om het verschil tussen beiden op de verschillende impactcategorieën in kaart te brengen.

FIGUUR 44 EVALUATIE ECOPUNTEN VOLGENS LCA: STANDAARD RWZI ZONDER NABEHANDLING (REF), MET ALTERNATIEVE NAGESCHAKELDE TECHNOLOGIEËN (PACAS, GAK, OZON + ZF) EN MET MICROFORCE++ (LOX) EN MICROFORCE++ (LCA)



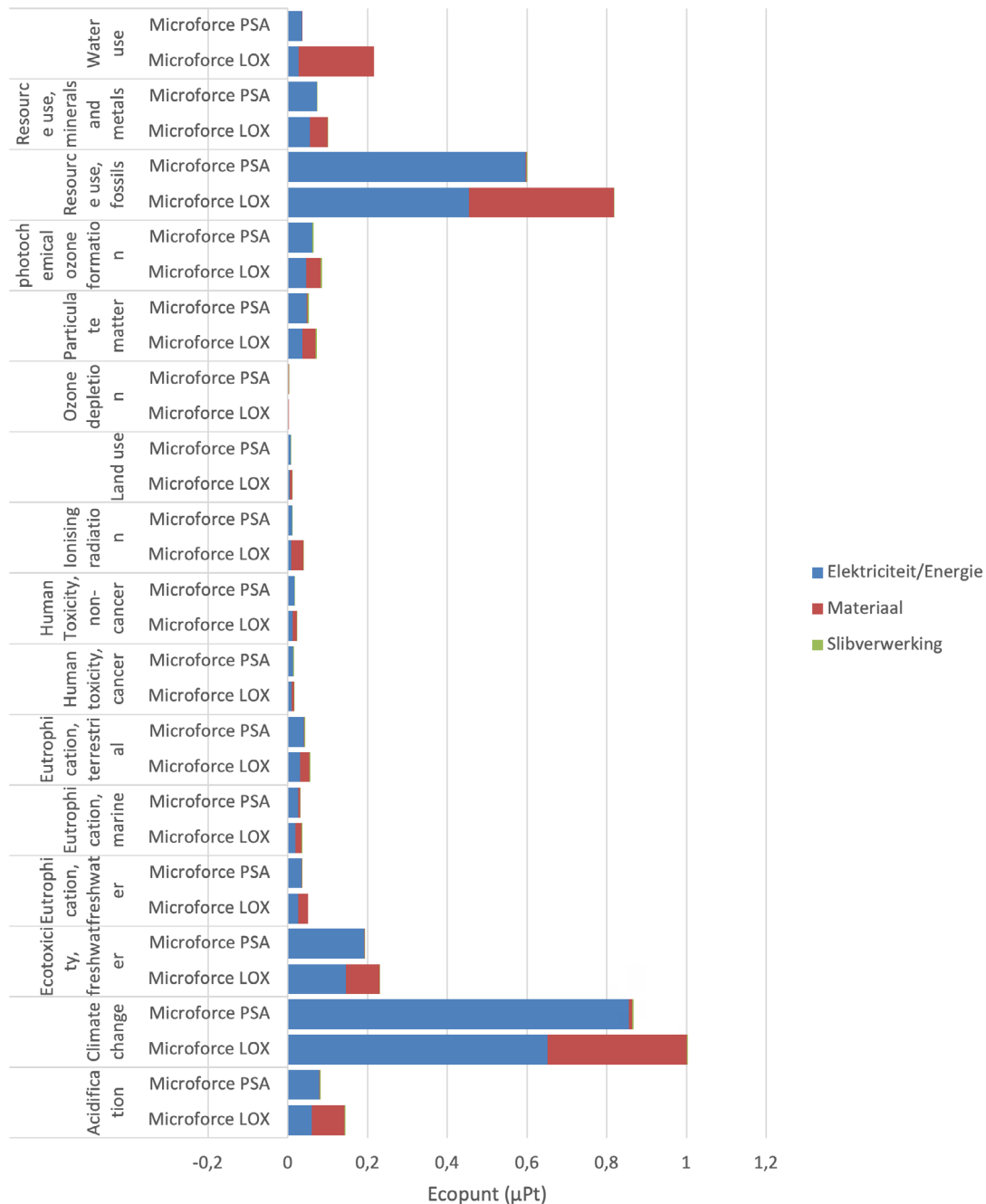
Uit deze resultaten kan worden geconcludeerd dat MicroForce++ de laagste totale milieupact heeft o.b.v. Ecopunten van alle nabehandelingstechnieken. Ten opzichte van de referentie ('REF', i.e. de standaard actief slibzuivering) is er een stijging waarneembaar van slechts 16% en 23% voor MicroForce++ met PSA en MicroForce++ met LOX respectievelijk. Ter vergelijking, de extra bijdrages van PACAS, Ozone + zandfilter en GAK resulteerden in

een stijging van respectievelijk 77%, 44 % en 327% t.o.v. de situatie zonder OMV behandeling. De belangrijkste reden voor de algemeen hoge impact van GAK en PACAS is uiteraard het gebruik van actief kool. Dit effect is het meest uitgesproken voor het geval van GAK, gezien het hoge koolstof verbruik en de hoge waterbehoefte voor de regeneratie ervan. Als we MicroForce++ vergelijken met de standaard ozonisatie met nageschakeld zandfilter dan zien we ook een verbetering op vlak van ecopunten. Dit is voornamelijk toe te schrijven aan het lagere ozonverbruik, wat rechtstreeks gecorreleerd is met het energieverbruik.

6.2 VERGELIJKING MICROFORCE++ MET LOX VERSUS IN-SITU OPGEWEEKT ZUURSTOF

Bij het vergelijken van Microforce++ (LOX) en Microforce++ (PSA) is de belangrijkste bijdrage aan de milieu-impact toe te schrijven aan het energieverbruik tijdens de ozonproductie. Microforce++ (PSA) heeft echter een lagere milieu-impact van ongeveer 30% vergeleken met Microforce++ (LOX) (cfr. Figuur 45).

FIGUUR 45 ECOPUNTEN VOOR MICROFORCE (LOX) EN MICROFORCE (PSA) VOOR DE VERSCHILLENDE IMPACTFACTOREN



Bij het gebruik van in-situ geproduceerd zuurstof is er iets meer gebruik van energie, maar bij het gebruik van LOX ligt het grondstoffenverbruik hoger. Dit vertaalt zich in een relatief hoge impact op de categorieën climate change en resource use voor beide methoden. Echter zien we voor LOX dat de overige impact categorieën ook negatief beïnvloed worden, m.a.w. ze zijn hoger dan in-situ opwekking. Uit deze studie blijkt dat het gebruik van in situ geproduceerde zuurstof resulteert in een lagere impact voor alle impactcategorieën in vergelijking met de productie en het transport van vloeibare zuurstof. De totale Ecopunten voor Microforce++ (LOX) en Microforce++ (PSA) zijn respectievelijk 2.91 en 2.13, dus vertonen ze een verschil van ca. 30% ten opzichte van elkaar (0.78 μ pt). We merken op dat het relatief verschil uitgedrukt in Ecopunten groter is dan wanneer het verschil wordt uitgedrukt in CO₂ footprint volgens het Stowa model (i.e. 15%, zie par. 7.3.1).

7

EVALUATIE MICROFORCE⁺⁺ VOLGENS CRITERIA IPMV

7.1 CO₂ FOOTPRINT BEREKENINGEN

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. Een overzicht van alle ingevulde waarden in Excel voor deze haalbaarheidsstudie wordt weergegeven in de Appendix D.

7.1.1 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 E.

Zoals bij de meeste chemische oxidatietechnologieën zal energie één van de belangrijkste contributies zijn aan de totale CO₂ footprint. Bij MicroForce⁺⁺ kunnen we het totale energieverbruik onderverdelen in twee aparte categorieën, ten eerste het energieverbruik voor het opwekken van ozon en ten tweede de pompenergie benodigd voor het opvoeren van het te behandelen waterdebiet en de hoogte van de biofilters (i.e. 2.5 meter of 0.25 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 koelings temperatuur, zonder dat er een significant verlies aan ozonproductie optreedt. De monitoring van het effluent op RWZI Walcheren leert ons dat de temperatuur van het effluent gemiddeld 17 °C bedraagt, waardoor de Δt altijd ruim voldoende zal zijn.

Daarnaast moet het ozon worden ingebracht in het water. Dit kan op verschillende manieren, in de pilottesten werd gebruikt gemaakt van een eigen ontwikkelde inbrengmethode van PureBlue die omgerekend ca. 3 kWh/kg O₃ zal verbruiken. Met deze gegevens komt het totale energieverbruik ten behoeve van de productie en inbrenging van ozon op ca. 13 kWh/kg O₃, wat neerkomt op 0.06 kWh/m³ behandeld water aan een dosis van 0.43 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. 2.5 meter) en eventuele beluchting in de biofilmreactoren voor het (extra) losschudden van afgevangen deeltjes, indien nodig. Voor een RWZI van 100.000 IE (ca. 1047 m³/h) zal het opgesteld vermogen hiervoor ca. 6.8 kW bedragen, corresponderend met 0.007 kWh/m³. Het benodigde pompvermogen werd theoretisch berekend aan de hand van een afgeleide formule van de wet van Bernoulli.

$$P(W) = \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) * g \left(\frac{m}{s^2} \right) * qv \left(\frac{m^3}{s} \right) * \Delta p (m)$$

Waarin:

P = vermogen

Rho = soortelijke massa of dichtheid

qv = debiet

g = 9.8 m/s²

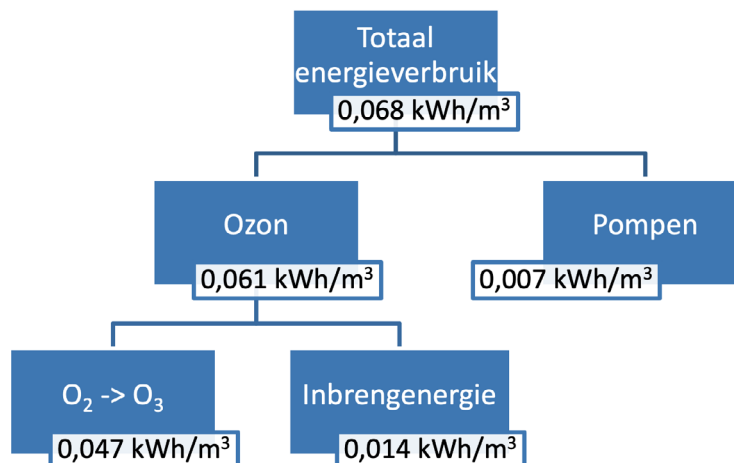
Δp = opvoerhoogte

In totaal komen we op een totaal energieverbruik van 0.068 kWh/m³, wat volgens de reken-sleutels (i.e. 0.53 kg CO₂ /kWh) neerkomt op zo'n **36 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. 150 m² en een output van zonnepanelen 400 kWh/m²/jaar zou de te recupereren energie slechts 0,003 kWh/m³ of zo'n 4 % van de totale energievraag kunnen dekken.

Een overzicht van alle contributies met betrekking tot het energieverbruik wordt weergegeven in onderstaand boomdiagram (Figuur 46).

FIGUUR 46 OVERZICHT ENERGIEVERBRUIK MICROFOCE++



7.1.2 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 0.43 g O₃/g

DOC hebben we voor een RWZI van 100.000 IE met een gemiddelde DOC concentratie van 11 mg/l zo'n 4.73 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 (0,43 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. 253.788 kg LOX. Als we deze waarde invullen in het CO₂ rekenmodel dan vinden we dat de bijdrage aan de CO₂ footprint van LOX ca. 20 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 filtrerende eigenschappen van het dragermateriaal en dient dus tegelijk als extra effluent polishing. Voor de berekening van gevormd slib leren we uit de pilottesten dat er ongeveer 7 mg CZV/l 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. 21 ton extra slib (DS) op jaarbasis.

Tijdens de pilottesten was het niet mogelijk de verwijderingsefficiëntie van de uitspoelende deeltjes in het filter te bepalen omdat de TSS metingen op het effluent van de zuivering telkens onder de LOD (12 mg/l) zaten. Voor het berekenen van het slib dat wordt geproduceerd bij het afvangen van uitspoelende deeltjes gaan we echter, net zoals in de haalbaarheidsstudie, nog steeds uit van een worst case scenario van 10 mg/l SS. 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 maximale totale jaarlijkse hoeveelheid extra gevormd slib op ca. 112 ton, wat ten opzichte van een standaard RWZI zonder nabehandeling met een slibproductie van 4100 ton/jaar nog steeds beperkt is (<3%). Dit vertaalt zich ook in de lage bijdrage aan de CO₂ footprint gezien de extra slibproductie overeenkomt met een CO₂ footprint van slechts 1-2 g CO₂/ m³.

Zoals gebruikelijk is voor fysische scheidingstechnieken zal het filter teruggespoeld worden wanneer de bergcapaciteit bereikt wordt. De filters zullen naar schatting elk een volume hebben van 100 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 210 kg DS. Uit voorgaande berekeningen met betrekking tot de totale slibproductie weten we dat er maximaal 13 kg slib wordt gevormd per uur (i.e. 112 ton/jaar). Hieruit volgt dat de standtijd van de filters ca. 16 uur en 40 minuten zou bedragen. Echter tijdens de pilottesten hebben we geleerd dat dit een ruime onderschatting is aangezien we weinig tot geen zwevende deeltjes (moeten) opvangen en deze dus geen bijdrage leveren aan de organische belasting op het filter. Omwille van deze observaties hebben we aangetoond dat 1 backwash per 24 uur ruim voldoende is om het filter optimaal te bedienen. Met deze frequentie hebben we de pilot ook gedurende 10 maanden succesvol kunnen bedienen.

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 in beide filters). Het terugspoelmechanisme van MicroForce++ is echter zeer duurzaam in waterverbruik. Het mechanisme, zoals eerder toegelicht 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 100 m³ water per filter zal bedragen. Op jaarbasis voor 2 filters (aan maximaal 365 backwashes/jaar) komt dit neer op zo'n 73.000 m³ spoelwater, rekening houdend met een totaal behandeld debiet in de RWZI van 7.665.000 m³ vinden we dat het spoelwaterpercentage ca. 1 % bedraagt, wat overeenkomt met een bijdrage van 1 g CO₂/m³ aan de CO₂ footprint.

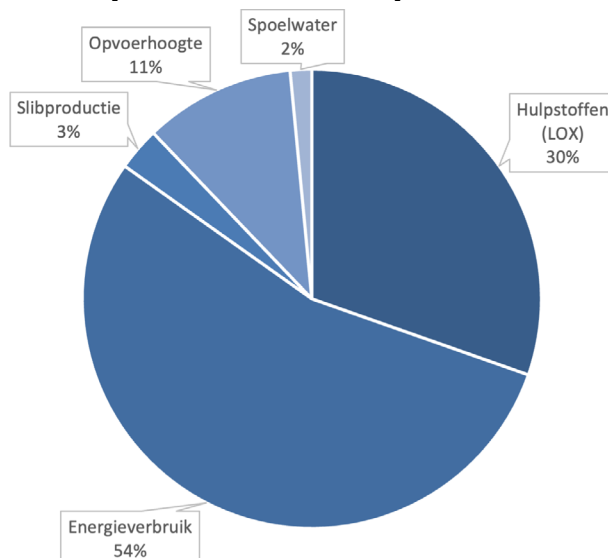
Daarnaast hebben we ook het verbruik aan materialen voor civiele werkzaamheden. Gezien MicroForce++ zal opgeschaald worden volgens een modulair concept wordt verwacht dat de benodigde civiele materialen maximaal het equivalent zullen zijn van die voor de referentietechnologie, ozon i.c.m. zandfiltratie, wat neerkomt op zo'n 250 ton gewapend beton. Volgens de modelberekening aangeleverd door STOWA (Appendix D) 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 gebracht. Gezien de MicroForce++ installaties voorzien zijn van de nodige equipment om zelf de opvoerhoogte te leveren (cfr. pompenergie) hoeven we deze factor in principe niet in rekening te brengen. Echter werd voor de zekerheid nog een totale extra opvoerhoogte beschouwd van 3 m. Dit komt overeen met een bijdrage van 7 g CO₂/m³ aan de CO₂ footprint, wat normaliter dus zeker een overschatting is.

7.1.3 TOTALE CO₂ FOOTPRINT

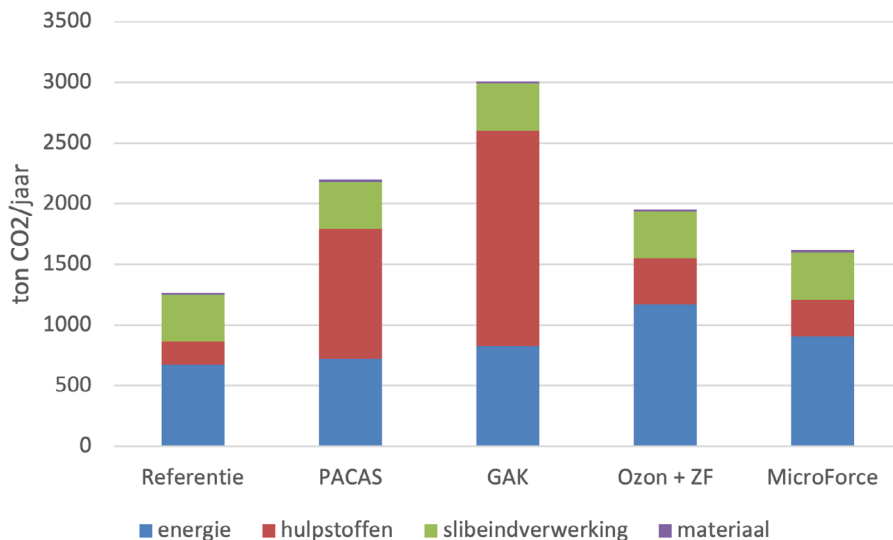
Als we de optelsom maken van de CO₂ footprint van alle voorgaande posten komen we uit op een totale CO₂ footprint van 66 g CO₂/m³ voor de nabehandelingstechniek. Hierbij merken we op dat het energieverbruik het grootste aandeel heeft in de totale CO₂ footprint (54%), met daaropvolgend het vloeibaar zuurstof (30%), de opvoerhoogte (11%), de slibafvoer (3%), het spoel water (2%), en de materialen voor civiele werkzaamheden (0%). Een overzicht van de verschillende contributies wordt weergegeven in Figuur 47.

FIGUUR 47 OVERZICHT CO₂ FOOTPRINT MICROFORCE++ (66 G CO₂/M³)



Om het aandeel van de nageschakelde technologie in de totale CO₂ footprint van een referentie RWZI in perspectief te plaatsen wordt in Figuur 48 de totale CO₂ footprint van de volledige RWZI zonder nabehandeling weergegeven (i.e. 'referentie') naast een aantal nageschakelde technologieën die conventioneel reeds worden toegepast ter preventie van OMV emissies naar 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 in te brengen. Daarnaast is het aandeel van materiaal en de slibeindverwerking van de nabehandeling met MicroForce++ eerder verwaarloosbaar. In het algemeen kunnen we besluiten dat MicroForce++ significant beter scoort dan de andere technologieën op dit criterium.

FIGUUR 48 CO₂ FOOTPRINT MICROFORCE++ T.O.V. STANDAARD RWZI ZONDER NABEHANDLING (REFERENTIE), MET ALTERNATIEVE NAGESCHAKELDE TECHNOLOGIEËN (PACAS, GAK, OZON + ZF) EN MET MICROFORCE++



7.2 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.

7.2.1 INVESTERINGSKOSTEN (CAPEX)

Om een RWZI te kunnen bedienen van 100.000 IE, corresponderend met een totaal behandelingsdebiet van ca. 1047 m³/h, werden totale kale investeringskosten berekend van ca. 1.99 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 F. 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. 6 miljoen euro. Als de minimale levensduur van de instal-

latie wordt vastgelegd op minstens 20 jaar dan bedraagt de CAPEX uiteindelijk maximaal 0.051 €/m³.

TABEL 9 OVERZICHT BEREKENING CAPEX (2023)

Type kosten	Bedrag (euro)
Kale Investeringskosten	€ 1.990.000
Aannemerskosten (25%)	€ 497.500
Investering + Aannemerskosten	€ 2.487.500
Onvolledigheidsfactor (25%)	€ 621.875
Investering + Aannemer + Onvolledigheid	€ 3.109.375
Stichtingskosten (80%)	€ 2.487.500
Totale CAPEX	€ 5.596.875

7.2.2 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 F. Hierbij werden volgende richtlijnen in beschouwing genomen.

TABEL 10 RICHTLIJNEN PERSONEELSKOSTEN, ELEKTRICITEIT, HULPSTOFFEN, SLIBVERWERKING EN SPOELWATER

Kosten	Waarde	Eenheid
Personeelskosten	50000	€/FTE/jaar
Elektriciteit	0,1	€/kWh
Slibverwerking	600	€/ton
Productie spoelwater	0,04	€/m ³
Verwerking spoelwater	0,01	€/m ³
LOX	0,2	€/kg

Voor de onderhoudskosten en kapitaalslasten werd opnieuw de onderverdeling gemaakt tussen civiele onderdelen, elektromechanische & werktuigbouwkundige onderdelen en procesautomatisering. Deze jaarlasten werden berekend conform de richtlijnen die werden aangeleverd door STOWA (Tabel 11).

TABEL 11 RICHTLIJNEN BEREKENING JAARLASTEN

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

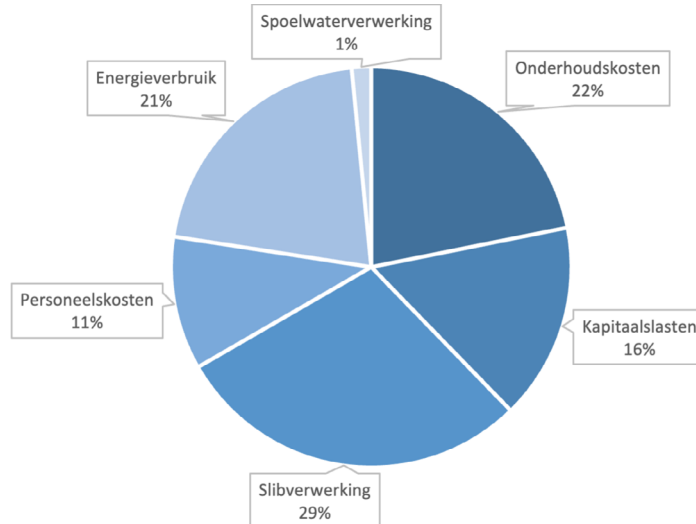
MicroForce++ wordt ontwikkeld als een geautomatiseerd systeem met focus op eenvoud van operatie voor de gebruiker. Daarnaast heeft PureBlue de ervaring uit voorgaande industriële toepassingen en wordt ingeschat dat er 0.5 FTE nodig zal zijn om een installatie voor 100.000 IE te monitoren en te onderhouden. Dit komt neer op jaarlijkse kosten van 25.000 euro of omgerekend 0.00457 €/m³.

De kosten voor spoelwater, energie, slibverwerking en hulpstoffen (LOX) werden berekend aan de hand van de opgelegde richtlijnen zoals weergegeven in Tabel 10 en bedragen in totaal ca. 0.0007 €/m³, 0.007 €/m³, 0.012 €/m³ en 0.009 €/m³ respectievelijk.

Hierbij merken we ook verder op dat de extra kosten voor de optionele denitrificatiestap, indien gewenst, niet mee in rekening zijn gebracht. De kosten hebben dus louter betrekking op het verwijderen van OMV en het nitrificeren van NH_4 .

Als alle rubrieken worden opgeteld komen we op totale operationele kosten van ca. 0.051 €/m³ (Cfr. Figuur 49).

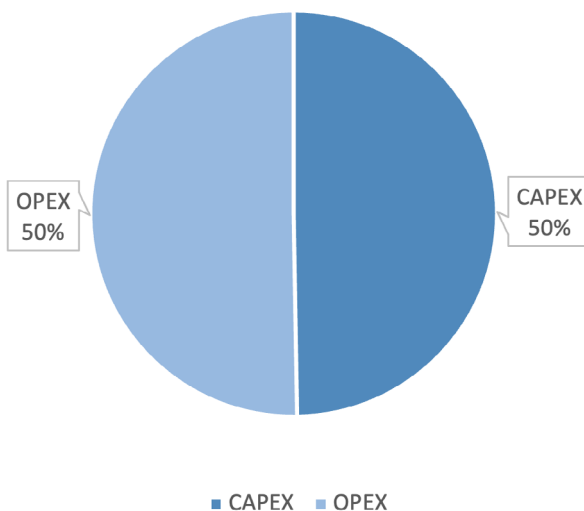
FIGUUR 49 OVERZICHT OPEX MICROFORCE++ (0.051 €/M³)



7.2.3 SAMENVATTING KOSTEN

Als we de operationele kosten (0.051 €/m³) en de investeringskosten (0.051 €/m³) uitgedrukt in €/m³ bij elkaar optellen komen we uit op totale kosten van ca. 0.10 €/m³ wat een besparing is van ca. 40% t.o.v. de referentietechnologie met ozon i.c.m. zandfiltratie (Cfr. Figuur 50).

FIGUUR 50 SAMENVATTING VERHOUDING OPEX VS. CAPEX (TCO = 0.10 €/M³)



7.3 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.

7.3.1 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 0,9 kW/Nm³ O₂ verbruiken wat overeenkomt met 4.5 kWh per kg geproduceerd ozon. Dit zorgt ervoor dat de energieconsumptie zal stijgen van 0,061 kWh/m³ naar 0,082 kWh/m³, wat overeenkomt met een extra 11 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 20 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 0.43 g O₃/ g DOC voor een RWZI van schaalgrootte 100.000 IE een netto besparing van 9 g CO₂/m³ plaatsvindt wanneer in-situ zuurstof wordt verkozen boven LOX (cfr. Tabel 12). Hieruit volgt ook dat de CO₂ footprint voor MicroForce++ met het gebruik van in-situ zuurstof in totaal 57 g CO₂/m³ zou bedragen.

TABEL 12 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)	20	0	-20
Energieverbruik	36	47	11
Slibproductie	2	2	0
Opvoerhoogte	7	7	0
Spoelwater	1	1	0
Materialen (civiel)	0	0	0
Totaal	66	57	-9

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 (0,021 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%.

7.3.2 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 0,004 €/m³ op de totale CAPEX, wat de investeringskosten op een totaal van 0,055 €/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 0,009 €/m³. Uiteindelijk zullen de totale operationele kosten voor een systeem met in situ zuurstof ongeveer 0,043 €/m³ bedragen, wat een daling van ongeveer 15 % is t.o.v. een systeem met LOX (i.e. 0,051 €/m³).

Een vergelijkend overzicht van de verschillende kosten tussen MicroForce++ met LOX en MicroForce++ met in-situ zuurstof wordt weergegeven in Tabel 13.

TABEL 13 OVERZICHT VERSCHIL KOSTEN MICROFORCE++ MET LOX VS. MICROFORCE++ MET IN-SITU ZUURSTOF

Kosten	Omschrijving	LOX	In-situ O ₂	eenheid
CAPEX		0,0511	0,0549	€/m ³
	Onderhoudskosten	0,00926	0,010	€/m ³
	Kapitaalslasten	0,0067	0,0072	€/m ³
	Slibverwerking	0,012	0,012	€/m ³
OPEX	Personeelskosten	0,0045	0,0045	€/m ³
	Energieverbruik	0,0068	0,0089	€/m ³
	Spoelwaterverwerking	0,0006	0,0006	€/m ³
	Hulpstoffen (LOX)	0,00927	0	€/m ³
Totaal		0,100	0,098	€/m ³

Uit deze resultaten kunnen we afleiden dat het gebruik van In-situ zuurstof iets goedkoper uitvalt dan het gebruik van LOX. Echter is deze besparing verwaarloosbaar te noemen.

7.3.3 ALGEMENE CONCLUSIE LOX VS. IN-SITU O₂

In het algemeen concluderen we dus positieve argumenten op vlak van duurzaamheid en, zij het in mindere mate, kosten om voor in-situ opgewekt zuurstof te kiezen. Echter kunnen in de praktijk ook tegenargumenten opduiken om toch LOX te gebruiken. Vooral de schaalgrootte van de RWZI zal een belangrijk rol spelen in deze keuze, omdat LOX toch een aantal praktische voordelen kan hebben voor grootschalige productie. Ook andere risico's, zoals gevoeligheid voor vocht in de PSA generatoren, moeten meegenomen worden in deze afweging.

7.4 VERWIJDERINGSRENDEMENT GIDSSTOFFEN

Zoals reeds besproken in Hoofdstuk 5 bedraagt de overall verwijderingsefficiëntie (i.e. RWZI + nabehandeling en rekening houdend met de bypass i.v.m. designcapaciteit) voor 7 van de 11 gidsstoffen ca. 80%. Deze resultaten worden gehaald met een ozondosis van 0.43 g O₃/g DOC, een hydraulische verblijftijd in de bioreactoren van 15 min en een ozon distributieverhouding van 33/66 over OR1/OR2.

7.5 VERGELIJKING MET REFERENTIE TECHNOLOGIEËN

Ter goeder trouw kan MicroForce++ uiteindelijk vergeleken worden met de conventionele standaardtechnieken, i.e. PACAS, GAK, Ozon + ZF

TABEL 14 OVERZICHT CRITERIA MICROFORCE++

	EENHEID	PACAS	GAK	Ozon + ZF	MicroForce++
CO ₂ -footprint	g CO ₂ /m ³ ¹	122	325	130	66
Kosten	€/m ³	0,05	0,26	0,17	0,10
Verwijderingsrendement	% ²	70-75	80-85	80-85	80
Gidsstoffen Ministerie I&W					

1) Per m³ behandeld rioolwater

2) Verwijderingsrendement methode voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen: benzotriazol, claritromycine, carbamazepine, diclofenac, metoprolol, hydrochlorothiazide, mengsel van 4- en 5-methylbenzotriazol, 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.

Hieruit volgt dat de CO₂ footprint van MicroForce++ het best scoort van alle technieken en er dus ongeveer 50% op vooruitgaat t.o.v. de conventionele ozon + zandfiltratie. Dezelfde conclusies gaan op voor de totale kosten van de nabehandelingsstap. Dit is logisch omdat er een grote besparing plaatsvindt met betrekking tot het ozonverbruik op MicroForce++. Daarnaast kunnen door de compacte, gestandaardiseerde bouw de investeringskosten ook laag gehouden worden.

Wat betreft het algemeen verwijderingsrendement (RWZI + nabehandeling) werd er met een dosis van 0.43 g O₃/g DOC ca. 80% bereikt, wat in dezelfde orde grootte ligt van de referentie-technologie. Hierbij merken we graag op dat het effluent op RWZI Walcheren door de hoge zoutgehalten als een zeer complexe matrix kan omschreven worden, waarbij werd bevestigd dat minstens 0.7 g O₃/g DOC nodig is met stand-alone ozonisatie om een verwijderingsrendement boven de 80% te halen. Mogelijks is er een verhoging van het verwijderingsrendement waarneembaar als MicroForce++ wordt ingezet op een niet-kustgelegen RWZI met deze ozondosis. Daarnaast wordt ook verwacht dat het verwijderingsrendement zal verhogen bij (nog) langere adaptatieperiodes van de biofilm.

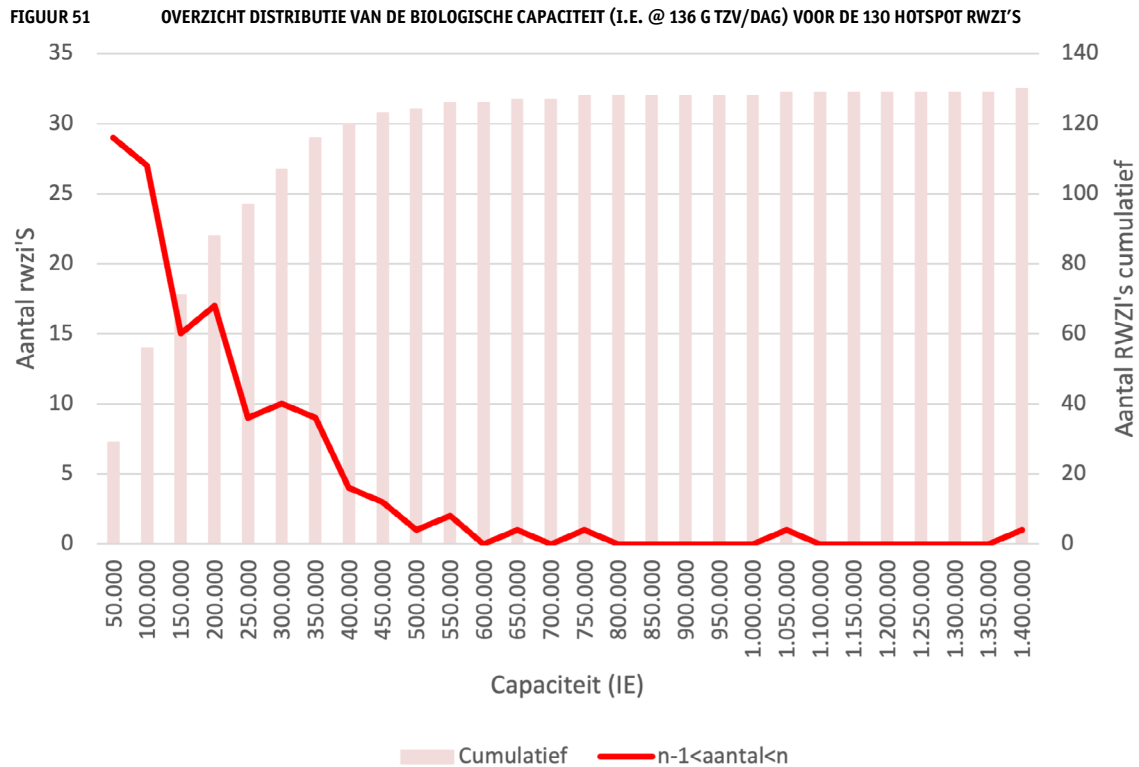
8

INPASBAARHEID OP NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK

Net zoals in de haalbaarheidsstudie werden niet alleen de technologische parameters onderzocht en hun impact op de CO₂ footprint en kosten. Het is ook belangrijk dat de 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 Nederland sterk uiteenlopen in schaalgrootte en het voorkomen van OMV in hun influent en effluent. Op basis van de resultaten en de lessons learned van dit pilotonderzoek zijn we nu in staat om de uitrol en implementatie van de technologie nog beter in kaart te brengen.

Uiteraard is het aangewezen eerst de RWZI's aan te pakken die verwacht worden de meest negatieve invloed te hebben op het milieu. In een voorgaand STOWA onderzoek (Vissers et al., STOWA Rapport 42, 2017) werd een hotspotanalyse uitgevoerd waarbij alle RWZI's in Nederland werden beoordeeld volgens verschillende maatlatten, waaronder o.a. 'concentratiebijdrage bij het lozingspunt', 'invloed benedenstroomse waterkwaliteit', 'beïnvloeding drinkwaterbronnen' en 'emissie'. Uit dit onderzoek kwam naar voor dat bijna 200 van de 314 RWZI's op geen enkele maatlat vallen binnen de groep die 70% van de totale invloed veroorzaken. Deze groep hoeft men daarom niet met hoge prioriteit te optimaliseren. Wij zijn dus voornamelijk geïnteresseerd in die andere RWZI's die wel op minstens één maatlat binnen de groep vallen die 70% van de totale invloed veroorzaken, de zogenaamde hotspots. Aan de hand van deze studie zijn we in staat een lijst van ca. 130 RWZI's op te stellen die het hoogste risico vormen voor mens en milieu op basis van de vier eerder genoemde maatlatten. Deze lijst wordt weergegeven in Appendix G.

Met behulp van deze lijst en de beschikbare capaciteitsgegevens over iedere RWZI (Vereniging Nederlandse Watersector - <https://watersector.nl/rwzi>) krijgen we een overzicht welke schaalgrootte de hotspot RWZI's vooral omvatten. Dit overzicht wordt weergegeven in Figuur 51.



Hierin valt op dat uit de hotspotlijst van RWZI's het leeuwendeel kleiner is dan 300.000 I.E. Het kan dus interessant zijn bij de ontwikkeling van een productlijn voor MicroForce++ om genoeg diversiteit te voorzien in de oplossingen voor de kleinere RWZI's tot 300.000 I.E. Deze informatie laat ons verder 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.

8.1 PRODUCTLIJN MICROFORCE++

Op basis van de inzichten over de schaalgrootte van de hotspot RWZI's werd een productlijn van MicroForce++ 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 (S) werd geselecteerd op basis van de kleinste en meest eenvoudige installatie die kan worden ingezet. Hieraan werd een benodigde maximale capaciteit gekoppeld die de modulaire ozongenerator zal moeten leveren om deze specifieke schaalgrootte te bedienen. De basisspecificaties van de verschillende formaten MicroForce++ worden weergegeven in Tabel 15.

TABEL 15 OVERZICHT PRODUCTLIJN MICROFORCE++

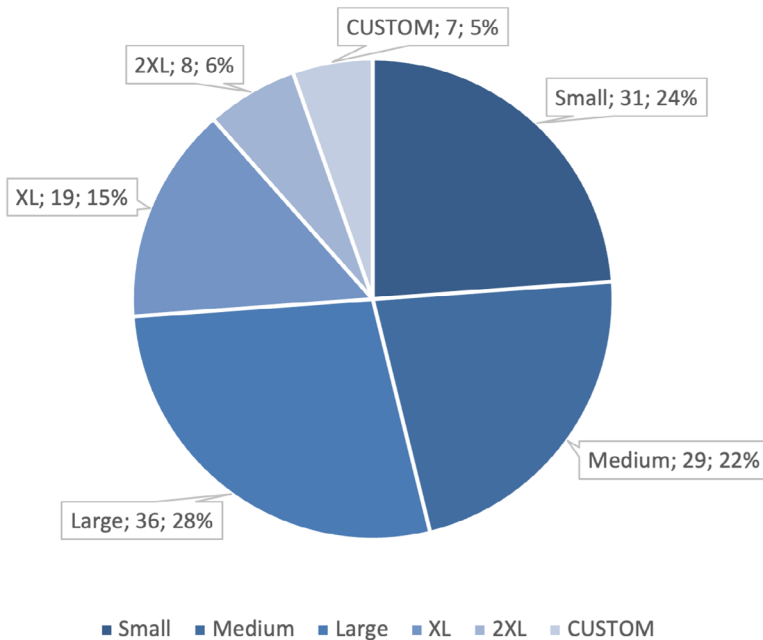
Productspecificaties	Small	Medium	Large	XL	2XL	Custom
Behandelbare I.E.	58.219	116.438	232.876	349.314	465.753	>500.000
DWA designcapaciteit (m ³ /h)	606	1212	2424	3636	4848	>5000
Benodigde Oppervlakte (m ²)	75	150	300	450	600	>600
Ozoncapaciteit (kg O ₃ /h)	3	6	12	18	24	>24
DOC belasting (kg DOC/h)	6,67	13,33	26,67	40,00	53,33	>50

Hierin werd ook duidelijk dat het interessant is om voor het beperkt aantal heel grote RWZI's (> 500.000 I.E.) te gaan werken met custom made oplossingen en deze dus niet op te nemen in de standaardmodellen.

8.2 DISTRIBUTIE MICROFORCE++ OP RWZI HOTSPOTLOCATIES

Nu alle hotspotlocaties geïdentificeerd zijn, de schaalgrootte in kaart is gebracht en een productlijn werd opgesteld kunnen we de balans opmaken welke formaten MicroForce++ de belangrijkste bijdrage zullen leveren in de aanpak van OMV in Nederland. De resultaten van deze berekening worden weergegeven in Figuur 52.

FIGUUR 52 DISTRIBUTIE VAN MICROFORCE++ MODELLEN OVER DE HOTSPOTLOCATIES (130) IN NEDERLAND

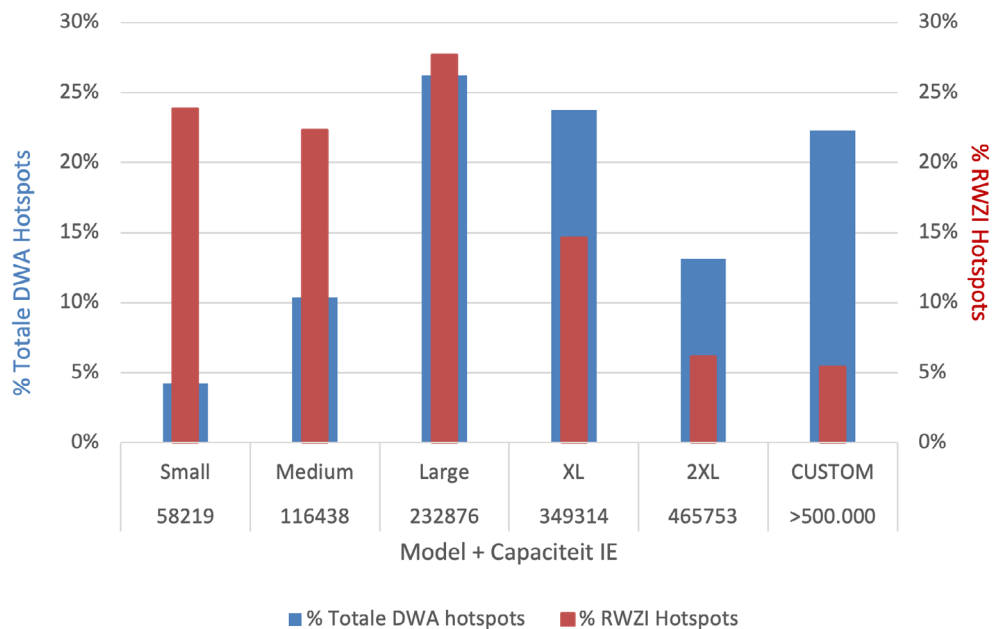


Uit deze taartgrafiek merken we op dat de distributie van de verschillende MicroForce++ modellen over de hotspotlocaties (130) evenwichtig verdeeld zijn over de modellen S t.e.m. 2XL. Daarnaast zien we ook dat het L formaat het meest zal kunnen worden ingezet met een totaal van 36 RWZI's (28%), dat wil dus ook zeggen dat evenveel RWZI's vallen tussen capaciteit van ca 110.000 en 230.000 IE. Daarna volgen de kleinere types small (S), het standaardmodel, en Medium (M) met een totale inzetbaarheid op 31 (24%) en 29 (22%) RWZI's respectievelijk. De grotere modellen XL en 2XL kunnen een oplossing bieden voor 19 (15%) en 8 (6%) RWZI's respectievelijk. Tot slot zullen er ook 7 heel grote installaties moeten worden gedimensioneerd voor de grootste RWZI's (> 500.000 ie). Dit gebeurt best via custom made ontwerpen.

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++ uiterst geschikt om op korte termijn de verschillende hotspots van een oplossing te voorzien.

Als we tenslotte ook het bereik van de verschillende formaten of modellen uitzetten in functie van de hoeveelheid water dat hotspot RWZI's in Nederland behandelen, dan kunnen we ook een aantal interessante zaken opmerken. Uit Figuur 53 kan bijvoorbeeld geconcludeerd worden dat de grootste 5 % van de RWZI's (custom modellen) verantwoordelijk zijn voor maar liefst 25 % van de totale DWA die behandeld wordt in de hotspot RWZI's. Dit betekent dat het, naast de standaardisatie van de kleinere modellen (S, M, L, XL en 2XL), 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.

FIGUUR 53 AANTAL RWZI'S IN FUNCTIE VAN KWANTITEIT BEHANDELD AFVALWATER



8.3 EFFECT OP DE BEDRIJFSVOERING

8.3.1 IMPACT OP DE ENERGIECAPACITEIT

Tot slot is het ook belangrijk de praktische voordelen in kaart te brengen voor de eindgebruikers van MicroForce++ (i.e. de Waterschappen). Aangezien de elektrische capaciteiten op de RWZI's momenteel reeds onder druk staan en de mogelijkheden om deze verder uit te breiden soms beperkt of onmogelijk zijn geworden, is het belangrijk om op zoek te gaan naar oplossingen die minder energie vragen dan de conventioneel toegepaste technologieën. Een nabehandeling met ozon staat erom bekend zeer energie intensief te zijn. MicroForce++ kan hier een oplossing bieden aangezien het minder ozon behoeft en de energievraag dus ook lager wordt. Verder zijn er ook intern een aantal features die het mogelijk maken om energie te besparen, zo kunnen de gebruikte ozongeneratoren gekoeld worden met de koelingsenergie van het effluent door middel van warmtewisselaars.

8.3.2 CONTINUÏTEIT TIJDENS DIURNALE VARIATIES

Daarnaast biedt het modulaire karakter van het ingenieus ozoninbrengsysteem van MicroForce++ ook de mogelijkheid om procescontinuïteit te borgen doorheen de diurnale variaties op de debieten van de zuivering. Wanneer de ozonvraag daalt bij lage DOC concentraties of 's nachts wanneer minder water moet worden behandeld dan moet de installatie, en vooral de ozonreactoren, dermate ontwikkeld zijn dat er nog steeds voldoende ozontransferefficiëntie overblijft. Het is dus een kwestie om zowel qua ozoncapaciteit een breed bereik te kunnen hanteren, alsook hydraulisch of vloeistof dynamisch de nodige voorzieningen te treffen zodat het ozon efficiënt wordt benut. Bovendien is een geautomatiseerde sturing van de ozoninbreng ten opzichte van het ontvangende DOC en/of influent NH_4 bijna imperatief gezien een (tijdelijke) overdosering het risico op bromaatvorming significant verhoogd.

8.3.3 SIMULTANE STIKSTOFVERWIJDERING EN OMV VERWIJDERING

Zoals uitvoerig besproken in de voorgaande hoofdstukken is het de doelstelling om met MicroForce++ twee vliegen in één klap te slaan aangezien er simultaan NH_4 en/of Totaal-N (in onderzoek), en organische microverontreinigingen kunnen verwijderd worden met één enkele nabehandelingsstap. Dit kan voor waterschappen die kampen met (te) hoge stikstofemissies een interessant combinatie zijn.

9

CONCLUSIES

De pilottesten met MicroForce++ werden succesvol uitgevoerd en de technologie heeft zichzelf bewezen als zeer kansrijke oplossing voor de problematiek rond microverontreinigingen in RWZI effluent. De resultaten laten ons toe een aantal conclusies te maken en de onderzoeksvragen te beantwoorden.

VERWIJDERING GIDSSTOFFEN

MicroForce++ bereikt met een ozondosis van 0.43 g O₃/g DOC, een HRT van 15 min per bioreactor en een 33/66 ozonistributie over de twee ozonreactoren, een verwijdering van 83% voor 7 van de 11 gidsstoffen (enkel nabehandeling). De ozonbehoefte van MicroForce++ ligt daarmee ca. 40% lager dan bij een stand-alone ozonisatie proces (i.e. 0.72 g O₃/g DOC) om hetzelfde verwijderingsrendement te bereiken op het effluent van RWZI Walcheren.

Aan de hand van de rekenmodellen opgesteld door STOWA werd een overall verwijderingsrendement (incl. RWZI) gevonden van ca. 80% voor 7/11 gidsstoffen. Hiermee werden de huidige Nederlandse doelstellingen voor de verwijdering van gidsstoffen gehaald. Voor alle 11 gidsstoffen en alle 19 (kandidaat)gidsstoffen bedraagt het overall verwijderingsrendement onder deze omstandigheden 70% en 76% respectievelijk.

BROMAAT

Het doseren en verdelen van de ozondosis over twee in serie geschakelde reactoren heeft een positief effect op de mitigatie van bromaatvorming.

Tijdens de testen werden geen significante bromaatconcentraties (< 0.2 µg/l) gedetecteerd voor het PureBlue injectiesysteem in twee stappen met uitzondering van een paar outliers, waarbij totale ozondosissen tot 0.55 g O₃/g DOC werden getest. Bij een enkelvoudige injectiestap werden maximale bromaatconcentraties gedetecteerd tot 0.85 µg/l bij 0.45 g O₃/g DOC. Deze resultaten zijn indrukwekkend te noemen aangezien deze werden gehaald met uitzonderlijk hoge bromideconcentraties tussen de 1.5 en 2 mg/l.

FLEXIBILITEIT: OZONDOSIS EN HRT

Er is een lineair verband waarneembaar tussen de verhoging van de HRT in de bioreactoren en het verwijderingsrendement van gidsstoffen. Omwille van praktische overwegingen werd een maximale HRT van 15 minuten per biofilter getest, aangezien de bioreactoren anders niet meer compact kunnen gebouwd worden. Vanuit het oogpunt van compacte bouw en maximalisering van het verwijderingsrendement voor gidsstoffen werd daarom een HRT van 15 minuten per biofilter als optimale conditie beschouwd.

De flexibiliteit van MicroForce++ laat toe om de ozondosis en de HRT in het biofilter eenvoudig af te stemmen op elkaar naargelang de effluentmatrix, de 24-uur debietvariaties en het beoogde verwijderingsrendement. Concreet kan de ozondosis verhoogd worden wanneer de HRT in de bioreactoren korter wordt (bv. bij hydraulische pieken) en viceversa.

Een 33/66 distributie van ozon over OR1/OR2 werd als optimaal scenario beschouwd omdat er in dit geval minder BOD en AOC gevormd wordt in BR1, en de biofilm op de dragers zich dus meer kan specialiseren in de verwerking van gidsstoffen en NH_4 .

CO₂ FOOTPRINT

MicroForce++ scoort uitstekend op CO₂ footprint. De CO₂ footprint bedraagt 66 g CO₂/m³, wat ongeveer een halvering betekent in vergelijking met de referentietechnologie (130 g CO₂/m³ voor Ozon + ZF) en 33% lager in vergelijking met stand-alone ozonisatie zonder zandfilter (98 g CO₂/m³). De belangrijkste besparing in CO₂ footprint is een gevolg van de lagere ozondosis (0.43 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 LCA studie die werd uitgevoerd in samenwerking met KWR bevestigt het duurzamere karakter van MicroForce++ t.o.v. de standaardtechnieken op de verschillende impact categorieën.

KOSTEN

De TCO van MicroForce++ zal naar schatting 0.10 €/m³ bedragen, wat een reductie is van ca. 40 % t.o.v. de referentie technologie, i.e. ozon in combinatie met een zandfilter (i.e. 0.17 €/m³). Deze kosten liggen wel ongeveer op dezelfde hoogte als een stand-alone ozonisatie proces zonder zandfilter, mits het gegeven dat MicroForce++ wel simultaan NH_4 oxideert en significant beter scoort op duurzaamheid, bromaatvorming en het verlagen van de ecotoxiciteit.

De impact op dit criterium is ook voornamelijk toe te schrijven aan de lagere ozonvraag om gidsstoffen te verwijderen en dus ook een lager energieverbruik. Door gebruik te maken van compacte en gestandaardiseerde installaties kunnen de investeringskosten laag gehouden worden.

BIOLOGISCHE EFFECTEN

Bij een dosis van 0.43 g O₃/g DOC werd een daling van alle gemeten biologische effecten (i.e. Microtox, PAH-Calux, ER-Calux, PXR-Calux, GR-Calux) waargenomen, met een gemiddelde verlaging van ca. 70%. Daphniatox en P53 Calux konden niet worden gekwantificeerd omdat de waarden van het influent reeds onder de detectiegrens lagen.

STIKSTOF EN TSS

Naast het verwijderen van gidsstoffen wordt ook simultaan ammonium geoxideerd, waarbij het zuurstof uit de ozonisatiestap wordt gerecupereerd en in het biologisch filter de nitrificatie aandrijft. Er werd aangetoond dat een verwijdering van NH_4 -N tot 80% kan worden gerealiseerd in de eerste bioreactor. Dit resultaat biedt mogelijkheden om in een volgende test de tweede reactor te gebruiken om het gevormde nitraat verder te denitrificeren.

De extra verwijdering van zwevende stoffen met MicroForce++ kon niet worden bevestigd omdat er geen kwantificeerbare concentraties aan uitspoelende deeltjes werden gemeten in het RWZI effluent gedurende de testperiode.

PRAKTISCHE INZETBAARHEID

Door het leveren van een proof of principle met deze pilottesten in een operationele omgeving werd een TRL van 7 gehaald. De praktijkervaring die werd opgedaan met deze pilot laat toe om de technologie verder te optimaliseren en op te schalen naar een robuuste en weinig storingsgevoelige installatie die volcontinu kan worden bedreven.

Het modulaire concept van MicroForce++ zorgt voor een hoge inzetbaarheid op de hotspot RWZI's in Nederland. MicroForce++ heeft als doel een gestandaardiseerde waterbehandelings-technologie 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 hydraulische verblijftijd in het biologische systeem en de intelligente ozondosering.

10

SUGGESTIES VOOR VERDER ONDERZOEK

Als suggesties voor verder onderzoek is het interessant om de financiële en duurzaamheid gerelateerde voordelen van MicroForce++ verder in kaart te brengen met betrekking tot de verwijdering van totaal-stikstof. In dit onderzoek werd geconcludeerd dat een nitrificatieproces succesvol kan worden gerealiseerd in de eerste bioreactor. Nu kan de tweede bioreactor worden omgebouwd tot een denitrificerend, reducerend filter zodoende het gevormde nitraat verder te denitrificeren. Op die manier kan verder worden onderzocht of MicroForce++ niet alleen een oplossing kan bieden voor de nakende nieuwe wetgeving rond Stedelijk Afvalwater, maar tegelijk ook voor de objectieven die worden omschreven in de Kaderrichtlijn Water rond emissies van nutriënten.

De biologische filters moeten verder worden geoptimaliseerd om kortsluitstromen te vermijden en tegelijk de reactoren zo compact mogelijk te houden. Het testen van andere duurzame alternatieven als dragermateriaal voor de biofilm, met een hogere oppervlaktedichtheid of andere fysicochemische karakteristieken, kan hierin een belangrijke rol spelen.

Het bedrijven van de twee bioreactoren onder verschillende redoxomstandigheden om een totaal-N verwijdering te realiseren kan mogelijks ook een positief effect hebben op de verwijdering van een breder pallet aan organische microverontreinigingen. Er wordt namelijk verwacht dat de biofilm die gedijt onder aerobe omstandigheden (BR1) andere microverontreinigingen zal afbreken dan de biofilm die gedijt onder anaerobe omstandigheden (BR2). Mogelijks is het interessant om in een vervolgonderzoek ook een brede bibliotheekscreening van OMV op te nemen om dit in kaart te brengen, alsook een herhaling te doen van de biologische effectmetingen.

11

REFERENTIES

Gerrity, D., Rosario-Ortiz, F. L., & Wert, E. C. (2018). Application of ozone in water and wastewater treatment. In M. I. Stefan, *Advanced Oxidation Processes for Water Treatment: Fundamentals and Applications* (pp. 123-140). London, UK: IWA Publishing.

Mainardis, M. B. (2020). Evaluation of ozonation applicability to pulp and paper streams for a sustainable wastewater treatment. *Journal of Clean Production*, 258, 120781.

Mirabella Mulder (2021) - Evaluatie gidsstoffen - Ten behoeve van de bijdrageregeling 'Zuivering Medicijnresten' van het Ministerie van IenW en het InnovatieProgramma Microverontreinigingen uit RWZI-afvalwater van STOWA en het Ministerie van IenW

Naumov, S., Mark, G., Jarocki, A., & Clemens, v. S. (2010). The Reactions of Nitrite Ion with Ozone in Aqueous Solution – New Experimental Data and Quantum-Chemical Considerations. *Ozone: Science & Engineering*(32), 430-434.

STOWA 2017 – 42 Landelijke hotspotanalyse geneesmiddelen RWZI's

STOWA 2021 – 15 Voorlopige werkinstructie bemonstering en chemische analyse medicijnresten in rwzi-afvalwater t.b.v. bijdrageregeling 'zuivering medicijnresten' (ienw) en innovatieprogramma 'microverontreinigingen uit rwzi-afvalwater' (stowa/ienw).

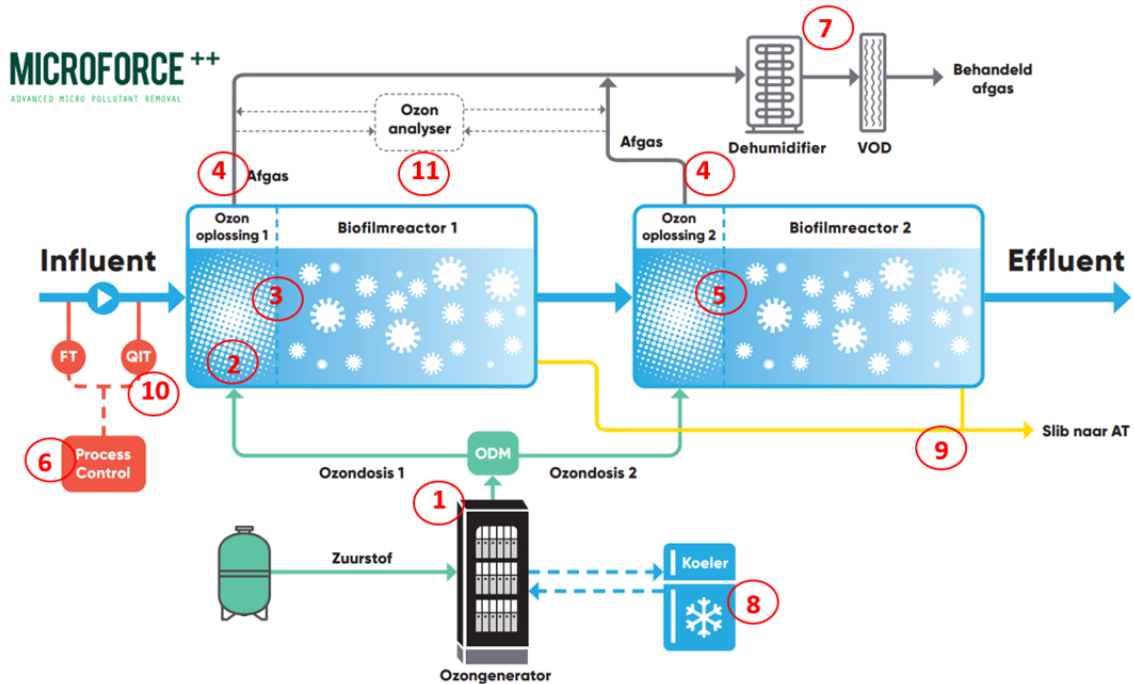
STOWA 2021 – 15 Bepaling verwijderingsrendement medicijnresten rwzi-afvalwater koepelvoorschrift en onderbouwende eindrapportage

STOWA 2022 – 14 - Haalbaarheidsstudie MicroForce++

APPENDIX A

PROCESS FLOW DIAGRAM MICROFORCE++

FIGUUR 54 PROCESS FLOW DIAGRAM MICROFORCE++ - RWZI



1. Ozon wordt opgewekt uit zuivere zuurstof in een modulaire ozongenerator en wordt nadien door een ozondistributie 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.
3. RWZI effluent komt binnen in de eerste ozon/biofilmreactor. Het inkomende water wordt direct in contact gebracht met een ozonoplossing bestaande uit ozon microbubbel (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 moet worden bewaakt.
7. Het afgas en eventueel gevormd schuim worden afgevangen in een aparte ontvochtiger; 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 (i.e. de absolute vochtigheid daalt) alvorens door een ozon destructie-module (VOD) te worden geleid voor een veilige afvoer naar buiten.
 8. De ozongenerator en de ontvochtiger 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 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.

APPENDIX B

ABSOLUTE CONCENTRATIES GIDSSTOFFEN IN SP1, 2 EN 3

TABEL 16 GEMETEN ABSOLUTE CONCENTRATIE IN HET INFLUENT VAN DE PILOT (IN), HET EFFLUENT NA OR1 + BR1 EN HET EFFLUENT NA OR2 + BR2 (MF2) VOOR SP 1

(Kandidaat)gidsstof	Concentratie (µg/l)		
	IN	MF1	MF2
1,2,3-benzotriazool	2,7	2,6	2,3
carbamazepine	0,37	0,26	0,13
diclofenac	0,61	0,41	0,15
gabapentine	5	4,5	3,6
hydrochloorthiazide	2	1,7	1,4
irbesartan	1	0,89	0,81
metoprolol	2	1,7	1,5
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	0,41	0,36	0,33
sotalol	1,7	1,3	0,9
trimethoprim	0,16	0,12	0,07
venlafaxine	0,32	0,28	0,24
amisulpride	0,08	0,07	0,06
azitromycine	1,1	0,88	0,71
candesartan	0,25	0,23	0,19
citalopram	0,12	0,11	0,09
claritromycine	0,12	0,1	0,08
furosemide	0,91	0,46	0,2
propranolol	0,09	0,06	0,04
sulfamethoxazol	0,19	0,32	0,1

TABEL 17 GEMETEN ABSOLUTE CONCENTRATIE IN HET INFLUENT VAN DE PILOT (IN), HET EFFLUENT NA OR1 + BR1 EN HET EFFLUENT NA OR2 + BR2 (MF2) VOOR SP 2

(Kandidaat)gidsstof	Concentratie (µg/l)		
	IN	MF1	MF2
1,2,3-benzotriazool	2,1	1,9	1,6
carbamazepine	0,25	0,18	0,02
diclofenac	0,48	0,25	0,03
gabapentine	4,1	2,2	2,7
hydrochloorthiazide	1,3	1,1	0,74
irbesartan	0,63	0,52	0,38
metoprolol	1,3	1,1	0,78
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	0,44	0,38	0,29
sotalol	1	0,83	0,17
trimethoprim	0,17	0,13	0,01
venlafaxine	0,23	0,2	0,13
amisulpride	0,04	0,03	0,02
azitromycine	0,56	0,33	0,16
candesartan	0,31	0,26	0,18
citalopram	0,1	0,09	0,06
claritromycine	0,08	0,05	0,05
furosemide	0,6	0,2	0,2
propranolol	0,06	0,04	0,01
sulfamethoxazol	0,19	0,13	0,03

TABEL 18 GEMETEN ABSOLUTE CONCENTRATIE IN HET INFLUENT VAN DE PILOT (IN), HET EFFLUENT NA OR1 + BR1 EN HET EFFLUENT NA OR2 + BR2 (MF2) VOOR SP 3

(Kandidaat)gidsstof	Concentratie (µg/l)		
	IN	MF1	MF2
1,2,3-benzotriazool	2,8	2,4	1,6
carbamazepine	0,33	0,19	0,01
diclofenac	0,7	0,32	0,03
gabapentine	6,3	5,6	4,2
hydrochloorthiazide	1,8	1,6	0,59
irbesartan	1	0,85	0,49
metoprolol	1,7	1,5	0,72
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	0,57	0,49	0,3
sotalol	1,6	1,1	0,02
trimethoprim	0,15	0,1	0,01
venlafaxine	0,32	0,27	0,1
amisulpride	0,05	0,04	0,01
azitromycine	0,81	0,6	0,1
candesartan	0,47	0,39	0,2
citalopram	0,11	0,1	0,04
claritromycine	0,11	0,09	0,05
furosemide	0,72	0,2	0,2
propranolol	0,07	0,05	0,01
sulfamethoxazol	0,32	0,21	0,02

APPENDIX C

VERWIJDERING GIDSSTOFFEN NIEUWE EU CONCEPTWETGEVING VERSUS IPMV NEDERLAND

Door de EU is een voorstel gedaan voor een revisie van de Richtlijn Stedelijk Afvalwater¹. Hierin worden verwijderingsrendementen voorgesteld voor organische microverontreinigingen, die enigszins afwijken van de Nederlandse stoffen voor de bijdrageregeling voor demo's en het IPMV. Er is sprake van twee categorieën stoffen, zie Tabel 19. In de revisie wordt gesteld dat rwzi's groter dan 100.000 i.e. moeten zijn voorzien van een aanvullende verwijdering voor 'micropollutants' en daarnaast kleinere zuiveringen met een capaciteit van 10.000-100.000 i.e. die lozen op gevoelig oppervlaktewater vanwege risico's voor de humane gezondheid of het (water)milieu. E.e.a. dient gerealiseerd te zijn in de periode 2030-2035 voor rwzi's groter dan 100.000 i.e. en uiterlijk in 2040 voor kleinere rwzi's.

TABEL 19 DE STOFFENLIJST VAN DE VOORGESTELDE NIEUWE EUROPESE RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER IN VERGELIJKING MET DE NEDERLANDSE 7 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN.

Categorie 1 EU	Categorie 2 EU	Gidsstoffen NL
amisulpride	benzotriazol	carbamazepine
carbamazepine	candesartan	diclofenac
citalopram	irbesartan	hydrochloorthiazide
clarithromycine	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	metoprolol
diclofenac		venlafaxine
hydrochloorthiazide		1,2,3-benzotriazol
metoprolol		irbesartan
venlafaxine		som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol
		gabapentine
		sotalol
		thrimethoprim

Het verwijderingspercentage moet conform de nieuwe concept Europese Richtlijn Stedelijk Afvalwater berekend worden over tenminste 6 van de 12 stoffen. Hierbij dient de verhouding tussen stoffen uit Categorie 1 en Categorie 2 altijd 2:1 te zijn. Hiermee zijn de volgende combinaties mogelijk:

- 6 stoffen: 4 stoffen uit categorie 1 en 2 stoffen uit categorie 2
- 9 stoffen: 6 stoffen uit categorie 1 en 3 stoffen uit categorie 2
- 12 stoffen: 8 stoffen uit categorie 1 en 4 stoffen uit categorie 2

De verwijdering wordt conform het concept EU-voorstel berekend op basis van de gemiddelde verwijdering van de beschouwde stoffen in elk 24h- of 48h-monster op basis van concentraties. Het verwijderingsrendement dient minimaal 80% te bedragen. Volgens de Nederlandse richtlijnen van het Ministerie van IenW dient het verwijderingsrendement berekend te worden over 7 van de 11 gidsstoffen. De verwijdering wordt berekend

¹ Proposal for a revised Urban Wastewater Treatment Directive (europa.eu)

op dezelfde manier. Hierbij geldt een minimaal verwijderingsrendement in elk monster van 70%.

Op basis van de concept EU-gidsstoffen is een inschatting gemaakt van de verwijderingsrendementen die te behalen zijn met de referentietechnologieën ozonisatie, PACAS en Granulair Actief Koolfiltratie (GAK-filtratie) voor de standaard rwzi van het IPMV, zie Tabel 13. Deze zijn gelijk voor de concept EU-gidsstoffen en de Nederlandse gidsstoffen voor de nageschakelde verwijderingsrendementen van ozonisatie en gak-filtratie. Voor de toepassing van PACAS betekent het voldoen aan de 80% EU-norm dat de PAK-dosering naar verwachting verhoogd moet worden naar 20 mg/l in plaats van 15 mg/l. Voor alle referentie technologieën geldt dat de gekozen gidsstoffen anders zijn voor de EU-methode dan voor de Nederlandse methode.

Het aangenomen actiefslibrendement van de standaard rwzi kan voor de concept EU-gidsstoffen 40% zijn, net zoals voor de Nederlandse gidsstoffen². Dit is echter afhankelijk van in welke mate de concept EU-gidsstoffen daadwerkelijk voorkomen. De concept EU-gidsstoffen Amisulpride, Candesartan en Clarithromycine komen over het algemeen in onvoldoende mate voor in Nederlandse influenten en effluenten van rwzi's. Dit is ook de reden waarom deze niet zijn opgenomen als gidsstof in Nederland. De concept EU-gidsstof Citalopram komt wel voldoende voor, maar is afgefallen als Nederlandse gidsstof vanwege een mogelijk te hoog verwijderingsrendement door het actiefslib (>50%)³. Voorgaande betekent niet dat de stoffen Amisulpride, Candesartan en Clarithromycine helemaal niet voorkomen in Nederlandse rwzi influenten en effluenten. Of dit het geval is hangt af van de specifieke rwzi.

De grotere spreiding in actiefslibrendementen op basis van de concept EU-gidsstoffen betekenen ook een grotere spreiding in overall verwijderingsrendementen over de rwzi (effluent rwzi ten opzichte van influent rwzi). Het 'EU actief slib rendement' is afhankelijk van de stoffen die aanwezig zijn in het influent van de rwzi en kan terugzakken naar 25% in plaats van 40% indien niet alle EU gidsstoffen aanwezig zijn. In Tabel 13 is uitgegaan van gidsstoffen die voldoende aanwezig zijn in Nederlandse influenten en effluenten van rwzi's: Citalopram is wel meegenomen, Amisulpride, Candesartan en Clarithromycine niet. Dit betekent dat het actiefslibrendement 25-35% bedraagt. Bij deze tegenvallende actiefslib rendementen is een nageschakeld rendement van 80% onvoldoende om het overall rendement van 80% te behalen: het overall rendement zal dan circa 75% bedragen.

In Tabel 20 Zijn de verwijderingsrendementen weergegeven op basis van de concept EU gidsstoffen en Nederlandse gidsstoffen voor de uitgewerkte standaard rwzi van 100.000 i.e. voor de referentietechnologieën ozonisatie, PACAS en Granulair Actief Kool (GAK) filtratie⁴ in vergelijking met de technologie in dit rapport. De informatie in deze tabel is gebaseerd op expert judgement en eerste resultaten van pilotinstallaties en actiefslibinstallaties in Nederland en dient daarom alleen als grove indicatie om het verschil tussen de concept EU-wetgeving en de Nederlandse richtlijnen te duiden en kunnen zeker niet als absolute getallen worden gebruikt.

- 2 Voor kenmerken van de standaard rwzi in het IPMV wordt verwezen naar Mulder, M., Berekening CO2 footprint en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit rwzi-afvalwater, versie 28 december 2022
- 3 Bron: Mulder, M., Evaluatie Gidsstoffen - Ten behoeve van de bijdragereregeling 'Zuivering Medicijnresten' van het Ministerie van IenW en het Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit RWZI-afvalwater van STOWA en het Ministerie van IenW, Definitieve versie 2, 9 juli 2021
- 4 Op basis van expert judgement Mirabella Mulder – Mirabella Mulder Waste Water Management, 4 augustus 2023

TABEL 20 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN, BEREKEND VOLGENS DE VOORGESTELDE REKENREGELS VAN DE NIEUWE EUROPESE RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER IN VERGELIJKING MET DE NEDERLANDSE SYSTEMATIEK CONFORM DE BIJDRAGEREGELING EN HET IPMV VANUIT HET MINISTERIE VAN IENW VOOR DE 7 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN

Instelling	Ozonisatie 0,7 g O₃/g DOC	PACAS 15-20 mg PAK/l	Granulair Actief Kool (GAK) EBCT (verblijftijd): 30 min; standtijd 6 maanden	MicroForce++ 0.43 g O₃/g DOC
Nageschakeld verwijderings-rendement (%)	80-90%	nvt	80-90%	83%
Overall verwijderings-rendement (%) volgens rekenregels concept EU Richtlijn Stedelijk Afvalwater dd 26/10/2022 (6 van de 12 onderverdeeld in categorieën)	75-85%	70-80%	75-85%	80%
Gekozen gidsstoffen EU (6 van de 12; verhouding van 2:1 voor aantal stoffen uit categorie 1 ten opzichte van aantal stoffen uit categorie 2)	Benzotriazol, Carbamazepine Diclofenac, Citalopram, - keuze tussen metoprolol of venlafaxine - keuze tussen irbesartan of som 4,5-methyl benzotriazol	Benzotriazol, som 4,5-methyl benzotriazol, Hydrochloor-thiazide, Metoprolol; Venlafaxine Citalopram	Benzotriazol, som 4,5-methyl benzotriazol, Hydrochloor-thiazide, Metoprolol; Venlafaxine Citalopram	Carbamazepine, Diclofenac, Venlafaxine, Amisulpride⁵ Candesartan⁶ Irbesartan
Overall verwijderings-rendement (%) volgens rekenregels bijdrageregeling Ministerie IenW en IPMV (7 van de 11)	80-85%	70-80%	80-85%	80-85%
Gekozen gidsstoffen NL (7 van de 11)	Carbamazepine, Diclofenac, Hydrochloor-thiazide, Sotalol, Metoprolol, Trimethoprim, Venlafaxine	Benzotriazole, som 4,5-methyl benzotriazol, Hydrochloor-thiazide, Sotalol, Metoprolol, Trimethoprim, Venlafaxine	Benzotriazole, som 4,5-methyl benzotriazol, Hydrochloor-thiazide, Sotalol, Metoprolol, Trimethoprim, Venlafaxine	Sotalol, Carbamazepine, Diclofenac, Trimethoprim, Venlafaxine, Hydrochloortiazide, Metoprolol

5 We merken graag op dat candesartan en amisulpride tijdens de testperiode op RWZI Walcheren tijdens iedere bemonsteringcampagne, zonder uitzonderingen, in voldoende hoge concentraties werden gedetecteerd en deze een hoger verwijderingsrendement hadden met MicroForce++ dan hydrochloortiazide en som 4,5-methyl benzotriazol, die eerstvolgend zouden moeten gekozen worden als 6 van de 12. Echter, als amisulpride en candesartan toch niet zouden mogen geselecteerd worden i.v.m. algemeen voorkomen in Nederlands RWZI effluent dan zal het overall verwijderingsrendement voor de nieuwe EU conceptwetgeving net iets lager komen te liggen.

6 Zie voetnoot 6.

APPENDIX D

CO₂ MODELBEREKENING INGEVULDFIGUUR 55 INGEVULDE WAARDES CO₂ MODEL STOWA

Onderwerp	Eenheid	Parameter per jaar		er per jaar		er per jaar	
		Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Parameter per jaar
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	7.665.000
Influent CZV	kg	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681
Influent Nkj	kg	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588
Effluent Ntot	kg	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140
Verwijderde i.e. 150 g TZV	i.e.150 g TZV	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225
Behandelde i.e. in influent 150 g TZV	i.e.150 g TZV	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
DOC effluent	mg/l	11	11	11	11	11	11
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	5.365.500
Behandelde jaarhoeveelheid nabehandeling	m ³ /jaar	5.365.500	7.665.000	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500
Geproduceerd slib	ton ontwaterd	6.100	6.192	6.100	6.100	6.100	6.212
Drogestofgehalte slib	%	21,10%	22,29%	21,10%	21,10%	21,10%	21,10%
Geproduceerd slib	ton ds	1.287	1.380	1.287	1.287	1.287	1.311
Transport vloeibaar slib	km	50	50	50	50	50	50
Transport vloeibaar slib	ton	0	0	0	0	0	0
Transport ontwaterd slib	km	100	100	100	100	100	100
Transport ontwaterd slib	ton	6.100	6.192	6.100	6.100	6.100	6.212
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	1.193.548
Inkoop aardgas	Nm ³	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710
Inkoop warmte	GJ						
<i>Inkoop brandstoffen</i>							
Diesel	kg	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000
Inkoop energie rwzi voor verwijdering micro's							
<i>Inkoop energie</i>							
Inkoop elektriciteit	kWh	0	91.104	654.531*	4.380	364.854	
Overig invloed nabehandeling op rwzi							
Opvoeren rioolwater	meter	0	0	8	8	3	
Percentage spoelwater		0%	0%	10%	10%	2%	
Gebruik spoelwater	m ³	0	0	536.550	536.550	85.848	
Afvoeren spoelwater	m ³	0	0	536.550	536.550	85.848	

Onderwerp	Eenheid		er per	Parameter	er per	er per	Parameter
			jaar	per jaar	jaar	jaar	per jaar
			<i>Variant 1</i>	<i>Variant 2</i>	<i>Variant 3</i>	<i>Variant 4</i>	<i>Variant 5</i>
Inkoop hulpstoffen		9					
Actieve kool	kg	100%		31.980		83.200	0
Actieve kool geregenereerd	kg	100%				312.000	0
Actieve kool biologische oorsprong	kg	100%					0
Aluminiumchloride, hydraatvorm	kg	40%					0
Aluminiumsulfaat, poedervorm	kg	100%					0
Antiscalants (polycarboxylaten)	kg	100%					0
Azijnzuur	kg	98%					0
Bio-ethanol	kg	100%					0
Calciumoxide (ongebluste kalk; poeder)	kg	100%					0
Citroenzuur	kg	50%					0
Glycerine uit epichloorhydrine	kg	100%					0
Glycerine uit koolzaadolie	kg	100%					0
IJzer(III)chloride	kg	40%	260.000	260.000	260.000	260.000	260.000
IJzerchloridesulfaat	kg	100%					0
Ijzersulfaat	kg	100%					0
Kalkhydraat	kg	100%					0
Kalkmelk op basis van gebluste kalk	kg	100%					0
Koolstofdioxide, vloeibaar	kg	100%					0
Magnesiumchloride	kg	54%					0
Magnesiumchloride, anhydride	kg	100%					0
Magnesiumchloride, hydraat, vaste vorm	kg	100%					0
Magnesiumoxide	kg	100%					0
Melasse uit suikerbieten	kg	100%					0
Methanol	kg	100%					0
Natriumaluminaat oplossing	kg	38%					0
Natriumchloride (zout), poedervorm	kg	100%					0
Natriumhypochloriet	kg	15%					0
Natronloog kwikcelproces	kg	50%					0
Natronloog, membraanproces	kg	50%					0
Natronloog, productiemix	kg	50%					0
Polymeer, anionisch	kg	100%					0
Polymeer, anionisch, vloeibaar	kg	100%					0
Polymeer, kationisch, poeder	kg	100%					0
Polymeer, kationisch, vloeibaar	kg	100%	23.168	22.083	23.168	23.168	23.168
Polyaluminiumchloride	kg	100%	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200
Polyaluminiumsulfaat, poeder	kg	100%					0
Waterstofperoxide	kg	50%					0
Zoutzuur, reactie propyleen en chloor	kg	36%					0
Zoutzuur uit de reactie van waterstof en chloor	kg	100%					0
Zoutzuur uit het Mannheim proces	kg	100%					0
Zuurstof (vloeibaar)	kg	100%			445.337		253.788
Zwavelzuur, vloeibaar	kg	100%					0
Materialen							
Gewapend beton	m3		3.800	3.805	4.050	4.030	4.050
Levensduur gewapend beton	jaar		30	30	30	30	30

APPENDIX E

BEREKENINGEN CO₂ FOOTPRINT**ALGEMEEN**

Gegevens	Ozon + zandfilter	MicroForce++
Flow (m ³ /h)	625	625
DOC (mg/l)	11	11
Ozone dose (g O ₃ /g DOC)	0,7	0,43
Ozone demand (g/m ³)	7,7	4,73
Ozone demand (kg/m ³)	0,0077	0,00473

ENERGIE

Energieverbruik ozon	kWh/kg O ₃	kWh/m ³
Opwekken zuurstof	0	0,000
O ₂ -> O ₃	9,93	0,047
inbrengenergie	2,99	0,014
Energieverbruik	12,92	0,061

Energieverbruik pompen & divers	Opgesteld vermogen (kW)	kWh/m ³
Energie pompen & divers	6,8	0,007

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Totaal energieverbruik	0,068	kWh/m ³
Omzettingfactor	0,53	kg CO ₂ /Kwh
CO ₂ footprint energie	35,9	g CO ₂ /m ³

SLIBVORMING

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Flow	1041	m ³ /h
CZV behandeld	7	mg/l
Ratio Slibvorming/CZV behandeld	33	%
Slib gevormd	2404,71	g DS/h
Slib gevormd	21,07	ton DS/j
Uitspoelende SS uit NBT (worst case)	10	mg SS/l
Slib gefilterd	10410	g DS/h
Slib gefilterd	91	ton DS/j
Totaal slib gevormd	12815	g DS/h
Totaal slib gevormd	112	ton DS/j

SPOELWATER

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Volume biofilter	100	m ³
Vullingspercentage biofilter	70%	
Totaal reactorbedvolume	70	m ³
Maximale belading	3	g DS/l
Bergingscapaciteit	210	kg DS/filter
Minimum standtijd filters	24	h
Aantal filters	2	(-)
Aantal backwashes per jaar per filter	365	(-)
Totaal Volume spoelwater per filter	36500	m ³
Totaal volume spoelwater MicroForce++	73000	m ³
Percentage spoelwater	1%	

HULPSTOFFEN

Eigenschap	Waarde	Eenheid
LOX	253788	kg

SAMENVATTING

Onderdeel	g CO ₂ /m ³
Hulpstoffen (LOX)	20
Energieverbruik	36
Slibproductie	2
Opvoerhoogte	7
Spoelwater	1
Materialen (civiel)	0
Totaal	66

APPENDIX F

OVERZICHT KOSTENBEREKENINGEN

Civiel	Permanente en/of Semi-permanente behuizing	Funderingen	€ 360.000
		Containers voor opwekken van zuurstof + ozon	
		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	€ 1.450.000
		PLC	
		HMI (touch screen)	
		Frequency drives	
	Ozon Equipment	Motor starters	
		Additional hardware	
		Ozongenerator(en) - 4 kg O ₃ /h	
		Coolingcircuit met warmtewisselaar	
		gasfilters	
		Ozone reactie tank met ozone oplosmodule	
Biofilmreactor	Mangat		
	Ontgassingskleppen		
	Control valve influent		
	Dehumidifier		
Procesautomatisering	Instrumentatie	Ozon afgas destructor	€ 180.000
		Piping en appendages	
		Tank 2 x 100 m ³	
		Dragermateriaal	
		Terugspoelmecanisme	
		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			

ONDERHOUDSKOSTEN

Onderdeel	%	Kosten (€/jaar)	Kosten (€/m ³)
Civiel	0,50%	€ 1.800,00	0,00020
E + W	3%	€ 43.500,00	0,00477
Procesautomatisering	3%	€ 5.400,00	0,00059
Totaal		€ 50.700,00	0,00926

KAPITAALSLASTEN

Onderdeel	Lasten	(€/m ³)
Civiel	€ 216.000,00	0,0013
E + W	€ 429.975,00	0,0052
Procesautomatisering	€ 14.106,94	0,0002
Totaal	€ 608.106,94	0,0067

SLIBVERWERKING

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Slibproductie	112	ton/jaar
Slibverwerkingsprijs	600	€/ton
Kosten voor slibverwerking	0,012	€/m³

PERSONEELSKOSTEN

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Operationeel beheer	20	h/week
Personeel benodigd	0,5	FTE
Kosten	50000	€/jaar
Personeelskosten	0,00457	€/m³

ENERGIEKOSTEN

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Energieconsumptie	0,089	kWh/m ³
Energieprijs	0,1	€/kWh
Energiekosten	0,0089	€/m³

SPOELWATERVERWERKING

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Grootte filterbed	100	m ³
Aantal filterbed	2	(-)
Totaalvolume filterbed	100	m ³
Standtijd filterbed	24	h
Spoelwaterverbruik	73000	m ³ /jaar
Kosten voor verwerking	0,01	€/m ³ spoelwater
Spoelwaterproductie	0,04	€/m ³ spoelwater
Spoelwater kosten	0,000667	€/m³

HULPSTOFFEN

Eigenschap	Waarde	Eenheid
LOX	253788	kg
Kostprijs LOX	0,2	€/kg
Totaal	0,00927	€/m³

SAMENVATTING OPERATIONELE KOSTEN

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Onderhoudskosten	0,00926	€/m ³
Kapitaalslasten	0,00673	€/m ³
Slibverwerking	0,01227	€/m ³
Personeelskosten	0,00457	€/m ³
Energieverbruik	0,00890	€/m ³
Spoelwaterverwerking	0,00067	€/m ³
Hulpstoffen (LOX)	0,00927	€/m ³
Totaal	0,05167	€/m ³

APPENDIX G

LIJST RWZI HOTSPOTS

Deze lijst geeft een weergave van alle 130 RWZI's die op minstens 1 maatlat vallen onder de groep die verantwoordelijk is voor 70% van de invloed, de zogenoemde hotspots. De maatlatten hier in kwestie zijn 'concentratiebijdrage bij het lozingspunt', 'invloed benedenstroomse waterkwaliteit', 'beïnvloeding drinkwaterbronnen' en 'emissie'.

TABEL 21 RWZI'S DIE OP MINSTENS 1 MAATLAT WERDEN GEÏDENTIFICEERD ALS HOTSPOT ('CONCENTRATIEBIJDRAGE BIJ HET LOZINGSPUNT', 'INVLOED BENEDENSTROOMSE WATERKwalITEIT', 'BEÏNVLOEDING DRINKWATERBRONNEN' OF 'EMISSIE')

RWZI	Waterschap (afkorting)
Aarle-Rixtel	Aa en Maas
Dinther	Aa en Maas
Land Van Cuijk (Haps)	Aa en Maas
Oijen	Aa en Maas
Sint Hertogenbosch - Den Bosch	Aa en Maas
Halsteren	Brabantse Delta
Nieuwveer (Breda)	Brabantse Delta
Rijen	Brabantse Delta
Dongemond (Oosterhout)	Brabantse Delta
Eindhoven	De Dommel
Tilburg-Noord	De Dommel
Harnaschpolder	Delfland
Houtrust	Delfluent
Dokkum	Fryslan
Drachten	Fryslan
Heerenveen-Noord	Fryslan
Leeuwarden	Fryslan
OosterWolde (A+B)	Fryslan
Sloten	Fryslan
Sneek	Fryslan
Wolvega	Fryslan
Damwoude	Fryslan
Deventer	Groot Salland
Zwolle	Groot Salland
Heino	Groot Salland
De Bilt	HDSR
De Meern	HDSR
Nieuwegein	HDSR
Woerden	HDSR
Houten	HDSR
Utrecht	HDSR
Wijk bij Duurstede	HDSR
Zeist	HDSR
Leidsche Rijn	HDSR
Driebergen	HDSR
Groote Lucht	HH Delfland

RWZI	Waterschap (afkorting)
Alphen Kerk & Zanen	HH Rijnland
Noordwijk	HH Rijnland
Waddinxveen Randenburg	HH Rijnland
Beemster (ZO Beemster)	HHHNK
Beverwijk	HHHNK
Everstekeoog	HHHNK
Geestnerambacht	HHHNK
Katwoude	HHHNK
Wervershoof	HHHNK
Den Helder	HHHNK
Zaandam-Oost	HHHNK
Kralingseveer	HHSK
Nieuwkerk Ad IJssel	HHSK
Dordrecht	Hollandse Delta
Rotterdam-Dokhaven	Hollandse Delta
Zwijndrecht	Hollandse Delta
Hellevoetsluis	Hollandse Delta
Spijknise	Hollandse Delta
Assen	Hunze en Aa's
Gieten	Hunze en Aa's
Stadskanaal	Hunze en Aa's
Delfzijl	Noorderzijlvest
Eelde Hengelo	Noorderzijlvest
Garmerwolde	Noorderzijlvest
Leek	Noorderzijlvest
Marum	Noorderzijlvest
Onderdendam	Noorderzijlvest
Uithuizermeeden	Noorderzijlvest
Beilen	Reest en Wieden
Dieverbrug	Reest en Wieden
Echten	Reest en Wieden
Meppel	Reest en Wieden
Raalte	Reest en Wieden
SteenWijk	Reest en Wieden
Etten	Rijn en IJssel
Lichtenvoorde	Rijn en IJssel
Nieuwgraaf	Rijn en IJssel
Olburgen	Rijn en IJssel
Wehl	Rijn en IJssel
Zutphen	Rijn en IJssel
Gouda	Rijnland
Haarlem-Waarderpolder	Rijnland
Katwijk	Rijnland
Leiden-Noord	Rijnland
Leiden-Zuidwest	Rijnland
Zwaanshoek	Rijnland
Zwanenbrug	Rijnland
Alphen-Noord	Rijnland
Arnhem-Zuid	Rivierenland
Groesbeek-Bredeweg	Rivierenland
Weurt/Nijmegen	Rivierenland

RWZI	Waterschap (afkorting)
St Maartensdijk	Scheldestromen
Terneuzen	Scheldestromen
Walcheren	Scheldestromen
Willem Annapolder	Scheldestromen
Amersfoort	Vallei & Veluwe
Apeldoorn	Vallei & Veluwe
Bennekom	Vallei & Veluwe
Ede	Vallei & Veluwe
Epe	Vallei & Veluwe
Harderwijk	Vallei & Veluwe
Woudenberg	Vallei & Veluwe
Nijkerk	Vallei & Veluwe
Elburg	Vallei & Veluwe
Dedemsvaart	Vechtstromen
Emmen	Vechtstromen
Enschede-Glanerbrug	Vechtstromen
Enschede-West	Vechtstromen
Goor	Vechtstromen
Haaksbergen	Vechtstromen
Hengelo	Vechtstromen
Oldenzaal	Vechtstromen
Sleen	Vechtstromen
Tubbergen	Vechtstromen
Vriezenveen	Vechtstromen
Amstelveen	Waternet
Amsterdam-West	Waternet
De Ronde Venen	Waternet
Hilversum-Oost	Waternet
Uithoorn	Waternet
Westpoort	Waternet
Weesp	Waternet
Meijel	WBL
Panheel	WBL
Kaffeberg	WBL
Maastricht-Limmel	WBL
Simpelveld	WBL
Susteren	WBL
Hoensbroek	WBL
Horstermeer	WBL
Roermond	WBL
Venlo	WBL
Almere	Zuiderzeeland
Lelystad	Zuiderzeeland

*ter info: RWZI Alermo-Surpel werd op 1 van de maatlatten ook gedefinieerd als hotspot, echter werden hierover geen details over biologische capaciteit teruggevonden