



Ministerie van Infrastructuur  
en Waterstaat

stowa

# PILOTONDERZOEK BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE



RAPPORT

2023  
48

PILOTONDERZOEK  $\text{BO}_3$ -TECHNOLOGIE

RAPPORT

2023

48

ISBN 978.94.6479.024.5



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

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

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

# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Laura Piai – Royal HaskoningDHV  
Arnoud de Wilt - Royal HaskoningDHV

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Manon Bechger – Waternet  
Patricia Clevering-Loeffen – SWECO  
Koen van Gijn – Waterschap Rijn en IJssel  
Maaike Hoekstra – Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Robert Kras – Waterschap Aa en Maas  
Krisjan van Laarhoven – Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard  
Bernadette Lohmann – Waterschap Zuiderzeeland  
Kevin van de Merlen - PureBlue  
Mirabella Mulder – Mirabella Mulder Waste Water Management  
Ruud van der Neut – PWN  
Gerard Rijs – Rijkswaterstaat  
Nelis de Rouck - PureBlue  
Maarten Schaafsma – Waterschap Rijn en IJssel  
Ruud Schemen – Waterschap de Dommel  
Cora Uijterlinde – STOWA  
Marlies Verhoeven – Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden  
Amanda Vierwind - SWECO

VORMGEVING Buro Vormvast  
STOWA STOWA 2023-48  
ISBN 978.94.6479.036.8

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

**BO<sub>3</sub>, een combinatie van biologische actiefkoolfiltratie en ozon, is een duurzame technologie voor de verregaande verwijdering van microverontreinigingen uit rwzi effluent.**

**In het pilotonderzoek is een nageschakeld verwijderingsrendement van 90% behaald voor de 7 beste van de 11 gidsstoffen en 80% voor een breed palet microverontreinigingen (alle 11 gidsstoffen). Hierbij is de concentratie bromaat onder de huidige kwaliteitseis voor bromaat in oppervlaktewater gebleven. Ten opzichte van de referentietechnologieën is de CO<sub>2</sub>-footprint een factor 2 tot 4 lager en zijn de kosten vergelijkbaar.**

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 haalbaarheidsstudie voor BO3 is het onderzoek vervolgd met pilottesten op de rwzi Horstermeer.

De BO<sub>3</sub>-technologie is een combinatie van twee processen biologische actiefkoolfiltratie (BAKF) en ozonisatie. Hierdoor worden in de BO<sub>3</sub> de afbraakprocessen biologische degradatie en chemische oxidatie middels ozon gecombineerd. Het proces resulteert in een verduurzaming van conventionele ozonisatie door de sterk gereduceerde ozondosis (verlaging CO<sub>2</sub>-footprint) en het daaraan gekoppelde beperktere risico op bromaatvorming. Door de combinatie van meerdere afbraakprocessen wordt een breed palet aan microverontreinigingen verwijderd.

Op het IPMV-criterium 'Verwijderingsrendement van microverontreinigingen' scoort de BO<sub>3</sub>-technologie zeer goed. Een nageschakeld verwijderingsrendement van 90% is behaald voor de 7 beste van de 11 gidsstoffen en 80% voor een breed palet microverontreinigingen (alle 11 gidsstoffen). De concentratie bromaat is hierbij onder de 1 µg/L gebleven, terwijl de CO<sub>2</sub>-footprint slechts 49 tot 56 g CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> rwzi debiet bedroeg en de kosten relatief laag waren met 0,09 tot 0,10 €/m<sup>3</sup> rwzi debiet. De totale kosten (CAPEX en OPEX) zijn vergelijkbaar met die van de referentietechnologieën Ozon+Zandfiltratie, PACAS en GAK-filtratie, terwijl de CO<sub>2</sub>-footprint bijna 2 tot 4 keer lager is ten opzichte van de referentietechnologieën. Het relatief lage energieverbruik resulteert ook in een laag geïnstalleerd elektrisch vermogen, een voordeel in tijden van overbelaste elektriciteitsnetwerken.

Met de opgedane inzichten tijdens de pilottesten de BO<sub>3</sub>-technologie klaar voor de uitrol op volledige praktijkschaal.

Joost Buntsma  
Directeur STOWA

# SAMENVATTING

De BO<sub>3</sub>-technologie is een technologie waarbij het rwzi-effluent in een twee-staps proces wordt behandeld. De eerste stap betreft een biologische actiefkoolfiltratie (BAKF) waarin vermoedelijk een continu samenspel tussen adsorptie, desorptie en biologische afbraakprocessen plaatsvindt, ook wel bioregeneratie genoemd. Onder aerobe condities vindt gedeeltelijke biologische afbraak plaats van organisch materiaal (gemeten als DOC en UV<sub>254</sub>), nitriet, ammonium en meerdere microverontreinigingen. Vervolgens wordt in de tweede stap van de BO<sub>3</sub>-technologie het water geozoniseerd. In deze stap worden biorecalcitrante microverontreinigingen afgebroken. Doordat een aanzienlijk gedeelte van het organisch materiaal en het nitriet is verwijderd in de voorafgaande biologische stap kan de ozonisatie effectiever worden uitgevoerd. Er zal minder ozon reageren met organisch materiaal en nitriet omdat dit reeds verwijderd is. Daarnaast is ozon enkel nodig voor de oxidatie van een geringe selectie microverontreinigingen omdat een deel al verwijderd is. Dit resulteert in een lage dosering van ozon en daarmee mogelijk lage bromaatvorming.

De ontwikkeling van de BO<sub>3</sub>-technologie is in 2016 begonnen bij de vakgroep Milieutechnologie van de Wageningen Universiteit. Vanaf 2018 is de BO<sub>3</sub>-technologie in samenwerking tussen de Wageningen Universiteit en Royal HaskoningDHV doorontwikkeld. Op lab-schaal is de BO<sub>3</sub>-technologie reeds uitvoerig (>5 jaar) onderzocht en is het 'proof-of-principle' aangetoond. De Wageningen Universiteit en Royal HaskoningDHV hebben gezamenlijk het intellectueel eigendom van de BO<sub>3</sub>-technologie vastgelegd.

In het onderzoek aan de Wageningen Universiteit zijn drie verschillende slib-op-drager processen getest als biologische zuiveringsstap vóór de ozonisatiestap; moving bed bioreactor, biologische actiefkoolfiltratie (BAKF) en zandfiltratie. De BAKF resulteerde in de beste resultaten waarop besloten is in de doorontwikkeling van de BO<sub>3</sub>-technologie te werken met de combinatie van BAKF en ozonisatie. In het labonderzoek is reeds aangetoond dat de granulair actiefkool in het filterbed van de BAKF volledig verzadigd was en reactivatie van de actiefkool niet nodig is waardoor op operationele kosten en duurzaamheid (CO<sub>2</sub>-footprint) een aanzienlijke winst behaald wordt. De BAKF in de BO<sub>3</sub>-technologie is vrijwel identiek aan de zogenoemde BODAC-technologie die ook binnen het IPMV wordt onderzocht. Beide maken gebruik van granulair actiefkool als dragermateriaal en berusten op aerobe biologische afbraakprocessen.

Op basis van de positieve lab-resultaten is binnen het STOWA IPMV een haalbaarheidsstudie naar de BO<sub>3</sub>-technologie uitgevoerd. Na uitwerking van de doorkijk naar een 100.000 i.e. rwzi is door de STOWA begeleidingscommissie groen licht gegeven voor pilottesten. Van november 2022 tot april 2023 is het BO<sub>3</sub> pilotonderzoek uitgevoerd op rwzi Horstermeer waarbij gekeken is of de resultaten van het labonderzoek ook op een relevante praktijkschaal behaald kunnen worden.

Het pilotonderzoek heeft zich met name geconcentreerd op het effect van de empty bed contact time (EBCT) in de BAKF, een maat voor de hydraulische verblijftijd, en de ozondosering op het te behalen verwijderingsrendement voor microverontreinigingen. EBCTs van 22, 30 en 60 minuten en specifieke ozondoseringen van ca. 0,1, 0,2 en 0,4 g O<sub>3</sub>/g DOC zijn getest. Op basis van de pilotresultaten zijn er twee ontwerpen uitgewerkt. Ontwerp 1 met een EBCT van 22 minuten en specifieke ozondosering van 0,2 g O<sub>3</sub>/g DOC. Ontwerp 2 met

een EBCT van 30 minuten en specifieke ozondosering van 0,3 g  $\text{O}_3$ /g DOC. Het behaalde verwijderingsrendement voor 7 van de 11 gidsstoffen is voor ontwerp 1 en 2 respectievelijk 85% en 90% over de  $\text{BO}_3$ -technologie, exclusief het rendement van de rwzi. Er is een doorkijk gemaakt van de prestaties van de  $\text{BO}_3$ -technologie op de eisen voor microverontreinigingenverwijdering zoals opgenomen in de recent door de Europese Unie voorgestelde herziening Richtlijn Stedelijk Afvalwater.

Naast de 7 best verwijderde van de 11 gidsstoffen is ook de verwijdering van een breder palet aan stoffen onderzocht. Op de analyse van 30 verschillende geneesmiddelen, waaronder alle 19 (kandidaat)gidsstoffen, is waargenomen dat een breed palet aan stoffen verwijderd wordt met de  $\text{BO}_3$ -technologie. 19 van de 30 onderzochte stoffen zijn voor meer dan 80% verwijderd, slechts 4 stoffen minder dan 50%, exclusief het rendement van de rwzi. Over de BAKF is voor sommige gidsstoffen een negatief verwijderingsrendement waargenomen, mogelijk door desorptie van de kool. Door toepassing van ozonisatie wordt dit omgezet in een positief verwijderingsrendement. De combinatie van BAKF en ozonisatie is daarom zeer cruciaal voor het behalen van een hoog rendement voor een breed palet stoffen. Bij toepassing van enkel de BAKF wordt een significant aantal microverontreinigingen *niet* verwijderd. Slechts 8 van de 30 onderzochte stoffen wordt voor meer dan 80% verwijderd, terwijl 15 stoffen minder dan 50% worden verwijderd, exclusief het rendement van de rwzi.

Net als in de labtesten is ook in het pilotonderzoek de verwijdering van organisch materiaal over de BAKF waargenomen. De DOC-concentratie nam met 5-30% af, de UV-absorptie bij 254 nm met 20-40%. In de BAKF zijn de in het rwzi-effluent aanwezige ammonium (ca. 1 mg N/L) en nitriet (ca. 0,3 mg N/L) vrijwel volledig genitrificeerd tot nitraat. De verwijdering van ammonium is een positieve bijvangst voor rwzi's die lozen op gevoelig oppervlaktewater. De verwijdering van nitriet verlaagt de ozondosis omdat nitriet een ozonafvanger is. Middels biologische effectmetingen (bioassays) is geconstateerd dat de gemiddelde ecotoxiciteit door de  $\text{BO}_3$ -behandeling met meer dan 50% is afgenomen.

Met de uitkomsten van het pilotonderzoek is een update gegeven aan de uitwerking van de  $\text{BO}_3$ -technologie voor een 100.000 i.e. rwzi zoals die in de haalbaarheidsstudie  $\text{BO}_3$  reeds opgesteld is. Hiervoor zijn twee  $\text{BO}_3$ -ontwerpen uitgewerkt. Op basis van de twee ontwerpen zijn nauwkeuriger inschattingen gemaakt voor het energieverbruik (0,056 – 0,069 kWh/m<sup>3</sup>), het spoelwatervolume (0,5% - 1% van behandeld debiet) en het ruimtebeslag (250 – 400 m<sup>2</sup>). Met deze opgedane kennis zijn de  $\text{CO}_2$ -footprint en kostenraming bijgewerkt.

Op de parameters verwijderingsrendement gidsstoffen,  $\text{CO}_2$ -footprint en kosten is de  $\text{BO}_3$ -technologie vergeleken met de IPMV-referentietechnologieën PACAS, Ozon + zandfiltratie en GAK-filtratie (Tabel 1). Conform IPMV-richtlijnen zijn de kosten gebaseerd op prijspeil 2018, deze zijn daardoor niet actueel.

**TABEL 1** VERGELIJKING BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE MET DE REFERENTIE-TECHNOLOGIEËN VAN HET IPMV

Parameter	Eenheid	PACAS	Ozon + ZF	GAK-filtratie	BO <sub>3</sub> <sup>1</sup>
Verwijderingsrendement gidsstoffen <sup>2,3</sup>	%	70-75%	80-85%	80-85%	84 - 87%
CO <sub>2</sub> -footprint – nabehandeling	g CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	122	128	325	70 - 81
CO <sub>2</sub> -footprint – rwzi + nabehandeling	ton CO <sub>2</sub> /jaar	2.198	1.953	3.009	1.641 – 1.699
Kosten <sup>4</sup>	€/m <sup>3</sup>	0,05	0,17	0,26	0,13 - 0,15

Het verwijderingsrendement van de BO<sub>3</sub>-technologie is hoger dan dat van de referentietechnologieën en betreft ook een breder palet aan microverontreinigingen. Tevens is in de pilot-testen aangetoond dat de concentratie bromaat voor de twee uitgewerkte ontwerpen onder de 1 µg/L kan blijven.

Met name op CO<sub>2</sub>-footprint scoort de BO<sub>3</sub>-technologie aanzienlijk beter dan de referenties. Dit komt door de afwezigheid van actiefkool dosering of reactivatie en de zeer lage ozondosis. De CO<sub>2</sub>-footprint is bijna een factor 2 tot 4 lager dan die van de referentietechnologieën. Door de lage ozondosis is het energieverbruik laag waardoor ook het geïnstalleerd elektrisch vermogen laag is, dit is een voordeel in tijden van overbelaste elektriciteitsnetwerken.

De kosten van de BO<sub>3</sub>-technologie per kuub nageschakeld debiet zijn met 0,13 tot 0,15 €/m<sup>3</sup> vergelijkbaar met de referentietechnologie Ozon+Zandfiltratie. Merk op, per kuub rwzi debiet zijn de kosten een fractie lager, 0,09 tot 0,10 €/m<sup>3</sup>. Doordat de BO<sub>3</sub>-technologie uit twee processtappen bestaat zijn de investeringskosten hoger dan die van een stand-alone technologie (bijv. ozonisatie). Een belangrijk kenmerk van de BO<sub>3</sub>-technologie is dat de verbruiken (o.a. elektriciteit en zuurstof) laag zijn en er geen reactivatie van actiefkool nodig is. Hierdoor zijn de operationele kosten laag en daarmee is de impact van stijgende energie- en grondstofprijzen beperkt.

De pilottesten kunnen als succesvol bestempeld worden. De belangrijkste onderzoeksvragen zijn beantwoord en de technologie is op een praktijkrelevante schaal succesvol bedreven. De BO<sub>3</sub>-technologie is hiermee in een hoger stadium van volwassenheid gekomen en klaar voor de uitrol op volledige praktijkschaal.

- 1 De BO<sub>3</sub> uitwerking conform ontwerp 1 en ontwerp 2
- 2 Verwijderingsrendement methode voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen: benzotriazool, carbamazepine, diclofenac, irbesartan, gabapentine, metropolol, hydrochlorothiazide, mengsel van 4- en 5-methylbenzotriazool, sotalol, trimethoprim en venlafaxine in elk 24h of 48h debiets- of tijdsproportioneel monster, waarbij rekening is gehouden met verblijftijd van het water in de rioolwaterzuivering. Hierbij is het rendement bepaald op basis van het totale effluent (nageschakelde behandeling inclusief bypass) ten opzichte van het influent van de rwzi
- 3 Voor een rwzi met een rendement van 40% voor 7 van de 11 gidsstoffen, zoals aangenomen in het IPMV, en een nabehandelingcapaciteit van 85% van het jaardebiet is het theoretisch maximaal te behalen verwijderingsrendement gelimiteerd tot 91% over de gehele rwzi (influent t.o.v. effluent), zelfs bij een volledige verwijdering (100%) in de nabehandeling.
- 4 Kosten per kuub behandeld water in de nabehandeling

# 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.*



# PILOTONDERZOEK BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
	INHOUD	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
	1.1 Achtergrond	1
	1.2 Technologie	2
	1.3 Doelstelling	3
<b>2</b>	<b>ONDERZOEKSOPZET</b>	<b>4</b>
	2.1 Onderzoekslocatie	4
	2.2 Beschrijving van de pilotinstallatie	5
	2.3 Testperioden	6
	2.4 Monsternamen en analyse	7
	2.5 Verwerking meetgegevens	8
<b>3</b>	<b>RESULTATEN</b>	<b>10</b>
	3.1 Temperatuur	10
	3.2 Werkelijke specifieke ozondoseringen	10
	3.3 Microverontreinigingen	11
	3.3.1 van de 11 gidsstoffen	12
	3.3.2 van de 11 gidsstoffen	14
	3.3.3 (kandidaat)gidsstoffen	16
	3.3.4 Breed palet	17
	3.4 Organische stoffen	18
	3.4.1 UV-absorptie bij 254 nm	18
	3.4.2 Opgelost organisch materiaal (DOC)	20

3.5	Nutriënten	22
3.5.1	Stikstof	22
3.5.2	Fosfor	23
3.6	Biologische effecten	23
3.7	Bromide en bromaat	24
3.8	Effect van zuurstofconcentratie	26
4	INPASBAARHEID IN DE NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK	28
4.1	Effect op bedrijfsvoering	28
4.2	Inpassing op de locatie	29
4.3	Modulariteit	30
4.4	Voor welke type rwzi's geschikt	30
5	UITWERKING OP PRAKTIJKSCHAAL EN VERGELIJKING MET REFERENTIE-TECHNOLOGIEËN	31
5.1	Ontwerpgrondslagen	31
5.2	$\text{CO}_2$ -footprint	33
5.3	Kosten	35
5.4	Verwijderingsrendement gidsstoffen	36
5.4.1	Verwijdering over enkel de $\text{BO}_3$ -technologie	36
5.4.2	Verwijdering over de rwzi met de $\text{BO}_3$ -technologie	38
5.5	Vergelijking met referentietechnologieën op IPMV-criteria	40
6	CONCLUSIES	41
7	DANKWOORD	44
8	LITERATUURLIJST	45
BIJLAGE A	BEREKENING VAN VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN OP TWEE VERSCHILLENDE WIJZE	46
BIJLAGE B	HERZIENING RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER	48
BIJLAGE C	VERWIJDERING VAN ALLE 11 INDIVIDUELE GIDSSTOFFEN	51
BIJLAGE D	EFFECT VAN ZUURSTOF OP $\Delta\text{UVA}_{254}$ EN UV-T	52
BIJLAGE E	UITGANGSPUNTEN IPMV KOSTENBEREKENINGEN	54

# 1

## INLEIDING

### 1.1 ACHTERGROND

Bij ozonisatie van afvalwater voor de verwijdering van microverontreinigingen is de benodigde ozondosering recht evenredig met het totaal van de in het water aanwezige hoeveelheid organisch materiaal, gemeten als DOC. Hoe meer organisch materiaal aanwezig is, hoe meer ozon nodig is om dezelfde hoeveelheid microverontreinigingen te oxideren. Daarnaast dient de ozondosering ook afgestemd te worden op de concentratie nitriet in het te behandelen water. Nitriet reageert snel met ozon tot nitraat en is daarmee een zogenaamde 'ozonafvanger'.

In Zwitserland zijn goede ervaringen opgedaan met de ozonisatie van afvalwater, sinds enkele jaren wordt daar ozonisatie op een aantal rwzi's toegepast. In 2022 is ook in Nederland de eerste ozoninstallatie gerealiseerd en volgen er vanaf 2023 nog meer. Bij (pilot)testen met Nederlands afvalwater bleek echter dat de in Nederland benodigde ozondosering (en daarmee energieverbruik) aanzienlijk hoger was dan in Zwitserland. Dit komt doordat de hoeveelheid DOC in Nederland circa tweemaal hoger is dan in Zwitsers afvalwater.

Om de ozonisatietechnologie voor rwzi-effluenten met relatief hoge DOC-concentraties, zoals in Nederland veel voorkomen, te verduurzamen is aangevangen met de ontwikkeling van de  $\text{BO}_3$ -technologie. Het doel hierbij was om door afvang van DOC de benodigde absolute ozoninbreng te kunnen verlagen en daarmee een lager energieverbruik te bewerkstelligen. Aanvullend kan het energieverbruik verder verlaagd worden door ook nitriet om te zetten tot nitraat voorafgaand aan de ozonisatie.

De ontwikkeling van de  $\text{BO}_3$ -technologie is in 2016 begonnen bij de vakgroep Milieutechnologie van de Wageningen Universiteit. Vanaf 2018 is de  $\text{BO}_3$ -technologie in samenwerking tussen de Wageningen Universiteit en Royal HaskoningDHV doorontwikkeld richting toepassing op praktijkschaal. De Wageningen Universiteit en Royal HaskoningDHV hebben als gezamenlijke uitvinders samen het patent op de  $\text{BO}_3$ -technologie aangevraagd.

In het onderzoek aan de Wageningen Universiteit zijn drie verschillende slib-op-drager processen getest als biologische zuiveringsstap vóór de ozonisatiestap; moving bed bioreactor, BAKF en zandfiltratie. De BAKF resulteerde in de beste resultaten waarop besloten is in de doorontwikkeling van de  $\text{BO}_3$ -technologie te werken met de combinatie van BAKF en ozonisatie. In het labonderzoek is reeds aangetoond dat de granulair actiefkool in het filterbed van de BAKF volledig verzadigd was en reactivatie van de actiefkool niet nodig is waardoor op operationele kosten en duurzaamheid ( $\text{CO}_2$ -footprint) een aanzienlijke winst behaald wordt.

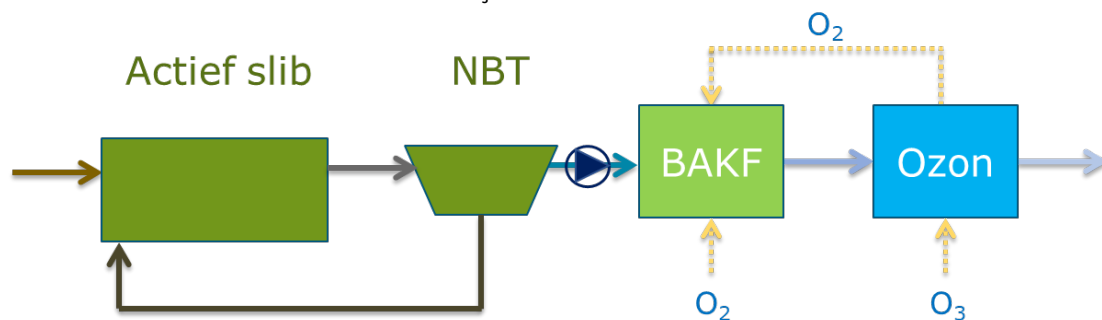
Onder supervisie van de STOWA begeleidingscommissie Oxidatieve Technieken is een haalbaarheidsstudie van de  $\text{BO}_3$ -technologie uitgevoerd (STOWA 2022-41). Op basis van de haalbaarheidsstudie is groen licht gegeven voor het testen van de  $\text{BO}_3$ -technologie op pilotschaal. Voorliggende rapportage beschrijft de opzet, resultaten en conclusies van deze pilottesten.

## 1.2 TECHNOLOGIE

De BO<sub>3</sub> technologie is een 2-stapsproces bestaande uit respectievelijk biologische actiefkoolfiltratie (BAKF) en ozon behandeling voor verregaande verwijdering van microverontreinigingen en reductie van ecotoxiciteit. In de eerste stap, de BAKF, worden in een aerob milieu organische componenten biologisch (gedeeltelijk) afgebroken. Dit betreft zowel de (gedeeltelijke) afbraak van DOC als van een selectie medicijnresten. Door deze afbraak volstaat een lage ozondosering in de tweede stap voor de oxidatie van bio-recalcitrante componenten. De verwijdering in de BAKF van organisch materiaal en microverontreinigingen is vermoedelijk een samenspel van adsorptie, desorptie en biologische afbraakprocessen, ofwel bioregeneratie van de actiefkool in de BAKF. Synergie tussen de biologisch/fysische processen in de BAKF en de ozonbehandeling is de kern van de BO<sub>3</sub> technologie. Deze synergie resulteert in een verduurzaming van conventionele ozonisatie door de sterk gereduceerde ozondosis (verlaging CO<sub>2</sub>-footprint), de daaraan gekoppelde gereduceerde kans op bromaatvorming, én het bredere palet aan microverontreinigingen dat verwijderd kan worden.

De BO<sub>3</sub> technologie is een nageschakelde technologie. Afhankelijk van de configuratie van de rwzi wordt de BO<sub>3</sub>-technologie gevoed met de afloop van de biologische hoofdzuivering, dit is typisch de afloop nabezinktank of afloop Nereda®-buffer. In het geval er sprake is van nageschakelde nutriëntenverwijdering op de rwzi kan de BO<sub>3</sub>-technologie ook gevoed worden met de afloop van de nutriëntenverwijdering.

FIGUUR 1 PROCESSHEMA MOGELIJKE INPASSING BO<sub>3</sub> TECHNOLOGIE OP RWZI



In Figuur 1 is een mogelijke inpassing van de BO<sub>3</sub> technologie op een rwzi schematisch weergegeven. De afloop van een nabezinktank wordt gevoed aan de BAKF, hiervoor is een pompfase voorzien. Vervolgens doorstroomt het afvalwater de ozoninstallatie waarna het als effluent geloosd kan worden. Voor de productie van ozon is zuurstof nodig. Doorgaans wordt hiervoor pure zuurstof aangewend. Deze wordt door een leverancier aangeleverd of op locatie geproduceerd. Alternatief kan ozon ook direct uit buitenlucht worden geproduceerd. In tegenstelling tot de meeste filtratietechnieken op rwzi effluent vindt in de biologische processen van de BO<sub>3</sub> technologie geen dosering van C-bron of metaalzout plaats. Hierdoor is de slibproductie zeer gering.

Bij (conventionele) ozonisatie vindt de ozondosering doorgaans plaats o.b.v. DOC-concentratie en/of UVA<sub>254</sub> (mate van aromaticiteit). De verwijdering van deze parameters in de BAKF resulteert in een navenante verlaging van de benodigde ozoninbreng. Doordat er gelijktijdig ook microverontreinigingen worden afgebroken in de BAKF neemt daarnaast ook de vereiste specifieke ozondosering (g O<sub>3</sub>/g DOC) af. Beide mechanismen tezamen zorgen voor een gereduceerde absolute inbreng van ozon. Hierdoor nemen zuurstof- en elektriciteitsverbruik alsook benodigde ozongeneratorcapaciteit af en wordt de CO<sub>2</sub>-footprint kleiner. De lage ozoninbreng verlaagd de kans op bromaatvorming (STOWA 2022-46 en 2022-47).

De verwijdering van ammonium en nitriet zijn een belangrijke bijkomstigheid van de  $\text{BO}_3$ -technologie. Door de aerobe condities in de BAKF worden zowel ammonium als nitriet genitrificeerd tot nitraat. De verwijdering van ammonium heeft een positief effect op het ontvangend oppervlaktewater. Immers, ammonium kan een direct toxisch effect hebben op het aquatisch milieu en het resulteert in een verlaagde zuurstofconcentratie wat nadelig is voor de oppervlaktewaterkwaliteit. Nitriet is een ozonafvanger, de verwijdering daarvan resulteert in een verlaagde ozondosis en de bijbehorende positieve effecten daarvan.

### 1.3 DOELSTELLING

De belangrijkste doelen van de  $\text{BO}_3$  pilottesten zijn als volgt;

1. Te behalen verwijderingsrendementen voor gidsstoffen bepalen;
  - Het effect van de EBCT5 in de BAKF op het rendement;
  - Het effect van de ozondosis in de ozonbehandeling op het rendement.
2. Afname van de biologische effecten na behandeling bepalen;
3. Invloed van de zuurstofconcentratie op de prestaties van de BAKF onderzoeken;
4. Bromaatvorming bepalen;
5. Bijvangst stikstof en fosfor bepalen
6. Ervaring opdoen met de technologie in een praktijksituatie.

5 Empty Bed Contact Time, een aanduiding voor de hydraulische verblijftijd in een filterinstallatie.

# 2

## ONDERZOEKSOPZET

### 2.1 ONDERZOEKSLOCATIE

Het pilootonderzoek naar het  $\text{BO}_3$ -technologie is uitgevoerd op rwzi Horstermeer van Waternet. Rwwi Horstermeer (Figuur 2) is gebouwd in 1985 en is toentertijd ontworpen voor de verwijdering van CZV in combinatie met nitrificatie; begin jaren negentig is hier denitrificatie aan toegevoegd. In 2012-2013 is de rwwi volledig gerenoveerd en is er biologische capaciteit toegevoegd om op biologische wijze fosfaat te verwijderen (Bio-P) en vergaande stikstofverwijdering te realiseren. De rwwi behandelt het afvalwater van Naarden-Bussum, Hilversum West, gemeente Wijdemeren, 's Graveland, Loosdrecht en Nederhorst den Berg. Rwwi Horstermeer heeft een ontwerpcapaciteit van 5.000 m<sup>3</sup>/u bij RWA en 1.550 m<sup>3</sup>/u bij DWA, en heeft een biologische capaciteit van 150.000 i.e. (à 150 g TZV/dag).

FIGUUR 2 RWZI HORSTERMEER



Het afvalwater stroomt via de persleidingen het ontvangstwerk in vanwaar het naar de rooster-goedverwijdering gaat. Het water stroomt vervolgens via het verdeelwerk naar de voorbezinktanks waarin de vaste bestanddelen door middel van zwaartekracht bezinken. Aan het water in de voorbezinktanks kan een ijzerzout worden toegevoegd om fosfaat te verwijderen via coagulatie. De afloop van de voorbezinktanks stroomt naar de actiefslibtank voorzien van bellenbeluchting waar slib (bacteriën) het afvalwater zuiveren. Door toevoeging van zuurstof vindt nitrificatie plaats en wordt organisch materiaal afgebroken. In de afloop van de actiefslibtank wordt een metaalzout gedoseerd om aanvullend op de bio-P verwijdering fosfaat te verwijderen. De scheiding tussen actiefslib en water vindt plaats in de nabezinktanks; het slib wordt via een retourslibgemaal teruggevoerd naar de actiefslibtanks. Het overschot (surplusslib) gaat naar de slibverwerking en het merendeel van de afloop van de nabezink-

tanks wordt behandeld in het 1-STEP® filter. De afloop en de by-pass van het 1-STEP® worden via het effluentemaal geloosd in de Horstermeerpolder. De gemiddelde waterkwaliteit van het influent en effluent van rwzi Horstermeer is weergegeven in Tabel 2

TABEL 2 SAMENSTELLING INFLUENT EN EFFLUENT RWZI HORSTERMEER

	Influent <sup>1</sup>	Afloop NBTs <sup>2</sup>	Effluent <sup>1</sup>
	rwzi Horstermeer gemiddelde van 2018 -2021 (mg/L)		
CZV	592	30	28
N-totaal	61	7,9	4,0
NO <sub>x</sub> -N	-	4,7 <sup>3</sup>	1,8
P-totaal	7,5	0,4	0,21
PO <sub>4</sub> -P	-	0,15	0,05
DOC		8,6	
Zwevende stof	309	8,2	4,2

<sup>1</sup>: gebaseerd op 61 metingen per jaar

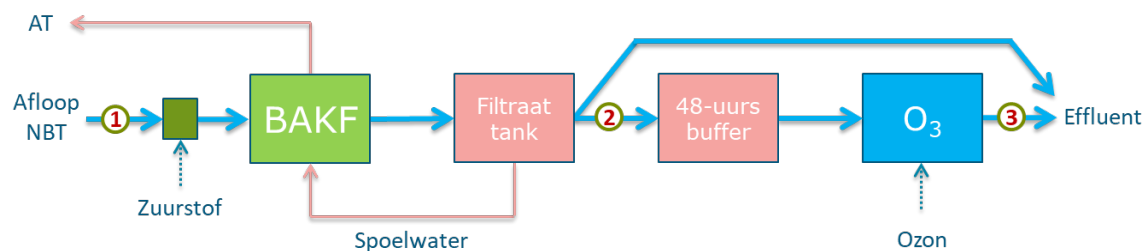
<sup>2</sup>: gebaseerd op 30 metingen per jaar

<sup>3</sup>: nitrietconcentraties zijn gegeven in paragraaf 3.5.1

## 2.2 BESCHRIJVING VAN DE PILOTINSTALLATIE

De BO<sub>3</sub>-pilotinstallatie is opgesteld op rwzi Horstermeer nabij de effluentput waar alle voorzieningen voorhanden zijn om het pilotonderzoek uit te kunnen voeren. In Figuur 3 is het processchema van de pilotinstallatie schematisch weergegeven.

FIGUUR 3 SCHEMATISCHE WEERGAVE BO<sub>3</sub>-PILOTINSTALLATIE, DE NUMMERS 1 T/M 3 GEVEN DE MONSTERNAMPUNTEN WEER



Uit een kelder werd de afloop van de nabezinktanks (ANBT) opgepompt om de pilot te voeden. De pilot is bedreven op een hydraulisch debiet tussen de 0,8 en 2,2 m<sup>3</sup>/uur. Met een Pressure Swing Adsorption (PSA) unit is ter plekke zuurstofrijk gas geproduceerd (zuurstofconcentratie van ca. 93%). Deze gasstroom is toegevoegd aan de ANBT zodat een concentratie opgeloste zuurstof (DO) bereikt werd rond de 45 mg/L. Aan het einde van de pilottesten is het DO-setpoint verlaagd tot eerst ca. 20 mg/L en daarna ca. 10 mg/L om het effect van DO op de verwijdering van microverontreinigingen te onderzoeken. Het zuurstofrijke water is gevoed aan de BAKF. De afloop van de BAKF is opgevangen in een filtraattank. Het dragermateriaal waarmee de BAKF gevuld is was granulair actiefkool (GAK), dit lag als filterbed in de reactor. De GAK was afkomstig uit het BODAC-proces van de NieuWater UltraPuurWaterfabriek te Emmen. Deze GAK wordt al ca. 13 jaar gebruikt voor de nabehandeling van rwzi-effluent, en is dus volledig verzadigd met microverontreinigingen en organisch materiaal. In de UltraPuurWaterfabriek is de GAK continue bedreven onder volledig aerobe condities (5 – 15 mg O<sub>2</sub>/L) waardoor er een specifieke microbiële populatie op de GAK aanwezig is. De BAKF is gevuld met ca. 0,8 m<sup>3</sup> GAK. Middels druk/niveau-metingen is de mate van verstopping van het filterbed gemeten. Op een in te stellen waterpeil in de reactor schakelt hierdoor de terugspoeling van het filterbed in. Uit de filtraattank werd spoelwater onttrokken om het filterbed te doorstromen.

Vuil spoelwater is via de terreinriolering afgevoerd naar de hoofdzuivering van de RWZI. De overstort van de filtraattank is afgevoerd naar de effluentverzamelput van de RWZI. De BAKF is gedurende het gehele pilotonderzoek continue bedreven.

De ozonisatiestap is periodiek bedreven. Hiervoor is een mobiele ozoninstallatie aangewend van PureBlue. In de 48-uur voorafgaand aan een ozontestdag is een buffertank tijdsproportioneel gevuld met de afloop van de BAKF. Doordat het aanvoerdebiet van de BAKF constant was betreft de inhoud van de buffertank dus een 48-uurs debietsproportioneel watervolume. De buffertank was uitgerust met een menger om de inhoud homogeen te houden. Op een ozontestdag is vanuit de 48-uursbuffer de mobiele ozoninstallatie gevoed. De ozoninstallatie bestond uit een cilinder pure zuurstof, een ozongenerator, een ozonreactor van ca.  $1 \text{ m}^3$  en een afgas ozondestructor. In overleg met PureBlue is gekozen voor een fijne bellen diffusor inbrengsysteem voor ozongas omdat dit de kans op bromaatvorming verminderd ten opzichte van alternatieve systemen als een venturi injectiesysteem. De ozoninstallatie is bedreven bij een debiet van ca.  $7 \text{ m}^3/\text{uur}$ . Per testdag zijn er drie specifieke ozondoseringen getest, ca. 0,1, 0,2 en  $0,4 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$ . De ozondosis is afgestemd op de DOC-concentratie in de 48-uursbuffer. Doordat nitriet effectief in de BAKF wordt verwijderd lag de nitrietconcentratie in de oploop van de ozoninstallatie vrijwel altijd onder meetbereik. Hierdoor was het niet nodig de ozondosering te corrigeren voor afvang van ozon door nitriet. Elke testdag werd begonnen met het ozonsetpoint behorende bij de laagste specifieke ozondosering en geëindigd met de hoogste specifieke ozondosering. Monsters van het geozoniseerde water werden pas genomen nadat de ozongenerator stabiel draaide op zijn ozonsetpoint en er daarna minstens 5 hydraulische verblijftijden in de ozonreactor waren verstreken. Dit om een zo representatief mogelijk monster te hebben met een zo goed mogelijke benadering van de gewenste specifieke ozondosering. De ozonconcentratie is in zowel de gasaanvoer als het afgas continue gemeten om de daadwerkelijke ozonoverdracht van gas naar water te kunnen bepalen. Het geozoniseerde water (de afloop van de ozonreactor) is afgevoerd naar de terreinriolering van de RWZI.

### 2.3 TESTPERIODEN

Eind oktober 2022 is begonnen met de pilottesten. De BAKF is gevuld met GAK en de installatie is in bedrijf genomen. Een periode van ruim twee maanden is uitgetrokken om de BAKF in te werken, dat wil zeggen als adaptatieperiode voor de micro-organismen op de GAK en om ervaring op te doen met de bedrijfsvoering van de pilotinstallatie. In deze periode is de BAKF bedreven bij empty bed contact times (EBCTs) van 60 en 30 minuten. In de inwerkperiode zijn geen ozontesten uitgevoerd.

Vanaf januari 2023 is begonnen met het uitvoeren van ozontesten op ozontestdagen. In totaal zijn er 5 ozontestdagen uitgevoerd. Gestreefd is om de ozontestdagen plaats te laten vinden op dagen wanneer er de voorafgaande dagen sprake was van DWA zodat de concentraties microverontreinigingen (gidsstoffen) voldoende hoog zijn. Testdagen 2, 3 en 4 zijn volledig DWA (ca.  $1 \times \text{DWA}$ ). Op testdagen 1 en 5 was sprake van (lichte) regenval voorafgaand aan de testdag (ca.  $1,5 \times \text{DWA}$ ). De concentraties gidsstoffen waren echter op die twee dagen ruim boven de rapportagegrens.

De EBCT van de BAKF en de ozondosis in de ozonisatiestap zijn de twee belangrijkste parameters die onderzocht zijn. In Tabel 3 is weergegeven welke instellingen voorzien zijn om te testen. In de lab-testen aan de Wageningen Universiteit zijn bij deze instellingen praktijkrelevante resultaten bereikt, deze vormen daarmee het uitgangspunt voor de pilottesten.



TABEL 3

SCHEMA OZONTESTDAGEN

Ozontestdag Nr.	EBCT Minuten	Ozondosis <sup>6</sup> g DOC/g $\text{O}_3$	Datum
1	60	0,1 - 0,2 - 0,4	19/01/2023
2	30	0,1 - 0,2 - 0,4	02/02/2023
3	22	0,1 - 0,2 - 0,4	16/02/2023
4	30	0,1 - 0,2 - 0,4	02/03/2023
5	22	0,1 - 0,2 - 0,4	16/03/2023

In voorafgaande lab-testen is gebleken dat voor de overgang van de ene EBCT naar de andere een stabilisatieperiode van enkele dagen voldoende is. In de inwerkperiode van de pilot-testen is dit nogmaals bevestigd. Het zekere voor het onzekere nemende is een periode van minimaal 2 weken aangehouden tussen de ozontestdagen waarbij direct na de ozontestdag de EBCT aangepast is voor de volgende ozontestdag. Gedurende de gehele pilottesten is de UV-meting gevolgd, hiermee is na te gaan hoe snel de BAKF stabiliseert na een EBCT-wisseling.

Gedurende de ozontestdagen is de BAKF bedreven bij een concentratie opgelost zuurstof in de oploop van de BAKF van ca. 45 mg/L. Deze instelling is gekozen omdat tijdens het onderzoek aan de Wageningen Universiteit eenzelfde zuurstofconcentratie aangehouden werd. Nadat de ozontestdagen van het pilotonderzoek afgerond waren is aanvullend onderzoek uitgevoerd naar het effect van lagere zuurstofconcentraties op de prestaties van de BAKF.

## 2.4 MONSTERNAME EN ANALYSE

Het pilotonderzoek heeft zich geconcentreerd op de  $\text{BO}_3$ -technologie zelf. Er zijn daarom enkel monsters genomen van de pilotinstallatie. Er zijn geen monsters genomen van het influent van rwzi Horstermeer voor het pilotonderzoek.

De pilotinstallatie was voorzien van drie monsternamepunten:

1. Oploop van de pilot - 'Oploop BAKF';
2. Afloop filtraattank - 'Afloop BAKF';
3. Afloop van de ozonreactor - 'Afloop  $\text{BO}_3$ '.

Monsternamepunten 1 en 2 waren uitgerust met een monsternamekast om verzamelmonsters te nemen gedurende een 48-uurs bemonstering. De 48-uursbuffer werd gedurende 48-uur gevuld vanuit de filtraattank waar ook het monster voor monsternamepunt 2 werd genomen. Hierdoor had de inhoud van de buffertank eenzelfde samenstelling als het verzamelmonster op monsternamepunt 2. Doordat de ozoninstallatie gevoed is vanuit de buffertank volstond het om in de afloop van de ozonreactor steekmonsters te nemen. Door de 48-uurs buffering in de buffertank representeren de steekmonsters 48-uursmonsters.

Op elke ozontestdag zijn monsters genomen op alle drie de monsternamepunten. In Tabel 4 is aangegeven welke analyses uitgevoerd zijn op de diverse monsternamepunten.

<sup>6</sup> Ozondosis o.b.v. concentratie DOC in de afloop van de BAKF

TABEL 4 ANALYSEPLAN INCLUSIEF MONSTERNAMEPUNTEN

	Monsternamepunt 1 Oploop Pilot	Monsternamepunt 2 Afloop filtraattank	Monsternamepunt 3 Afloop ozon
Aantal monsters per monsternamepunt	1	1	3
Gidsstoffen	X	X	X
Medicijnresten breed pakket <sup>7</sup>	X	X	X
DOC	X	X	
UV <sub>254</sub>	X	X	X
Stikstof ( $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_2$ en $\text{NO}_3^-$ )	X	X	
Fosfor (P-totaal en $\text{PO}_4^{3-}$ )	X	X	
Bromide	X	X	
Bromaat			X
Biologische effecten <sup>8</sup>	X	X	X

Gidsstoffen en medicijnresten, en DOC op de ozontestdagen, zijn geanalyseerd door Aqualysis. De analyses van bromide en bromaat zijn uitgevoerd door Aqualab-Zuid. De biologische effectmetingen zijn uitgevoerd door BioDetectionSystems conform de handreiking Biologische Effectmetingen. De metingen naar stikstof en fosfor zijn op locatie uitgevoerd met Hach-Lange kuvettentesten. DOC-metingen op andere dagen dan de ozontestdagen zijn ook met Hach-Lange kuvettentesten uitgevoerd. De UV<sub>254</sub> metingen zijn verricht met de in de pilotinstallatie permanent aanwezige UV-sensoren in de oploop en afloop van de BAKF. Voor de UV<sub>254</sub> meting van de afloop ozonreactor is de UV-sensor in de afloop BAKF tijdelijk losgekoppeld en gebruikt.

## 2.5 VERWERKING MEETGEGEVENS

Het is sporadisch voorgekomen dat concentraties van enkele kandidaatgidsstoffen (azitromycine, candesartan en furosemide) in de oploop van de pilot onder de rapportagegrens lagen. In dat geval is er geen verwijderingsrendement berekend.

Het is regelmatig voorgekomen dat concentraties van (kandidaat)gidsstoffen of medicijnresten in de afloop van de BAKF ('Afloop BAKF') of in de afloop van de pilot ('Afloop  $\text{BO}_3$ ') onder de rapportagegrens lagen. Voorgeschreven (koepelvoorschrift) is om in die gevallen de rapportagegrens zelf als concentratie aan te houden of via de Volkert-Bakker methode een concentratie te berekenen. De dataset van het pilotonderzoek is te gering om Volkert-Bakker toe te passen. Conform het koepelvoorschrift dient dus met de rapportagegrens zelf gerekend te worden. Het koepelvoorschrift is afgestemd op influent versus effluent van een rwzi en op stoffen die goed meetbaar zijn en in relatief hoge concentraties voorkomen zoals de gidsstoffen. In het  $\text{BO}_3$  pilotonderzoek wordt een nageschakelde technologie onderzocht en is naar een breder palet stoffen gekeken dan de gidsstoffen. Het startpunt van het pilotonderzoek is dus het bestaande effluent van de rwzi waarin concentraties al lager liggen. Doordat de concentraties laag zijn in de oploop van de pilot en met enige regelmaat onder de rapportagegrens liggen in de afloop is het maximaal rekenkundig te berekenen verwijderingsrendement beperkt. Dit geldt met name wanneer gekeken wordt naar een individuele stof. Ter illustratie is het voorbeeld van de gidsstof trimethoprim gegeven. Op testdag 4 was de concentratie in de oploop van de pilot 0,23  $\mu\text{g/L}$ , in de afloop lag de concentratie onder de rapportagegrens van 0,01  $\mu\text{g/L}$ . Wanneer gerekend wordt met de rapportagegrens als concentratie (dus 0,01  $\mu\text{g/L}$ ) is het maximaal te berekenen rekenkundig verwijderingsrendement

<sup>7</sup> Tweemaal (op ozontestdagen 2 en 4) is op een bredere selectie aan medicijnresten geanalyseerd.

<sup>8</sup> Eenmalig (op ozontestdag 2) zijn biologische-effectmetingen uitgevoerd conform 'Handreiking voor uitvoeren van biologische effectmonitoring bij vergaande zuivering van rwzi-effluenten'.

95,6%. Wanneer er bijvoorbeeld gerekend wordt met de arbitrair gekozen helft van de rapportagegrens als concentratie (dus 0,005  $\mu\text{g/L}$ ) is het maximaal te berekenen rekenkundig verwijderingsrendement 97,8%. Dit voorbeeld toont aan dat de berekeningswijze van het verwijderingsrendement voor individuele stoffen relevant is.

Voor het bepalen van een gemiddeld verwijderingsrendement van een selectie stoffen (bijvoorbeeld 7 van de 11 gidsstoffen of alle 19 (kandidaat)gidsstoffen) is het verschil minder groot tussen rekenen met de rapportagegrens (koepelvoorschrift) of bijvoorbeeld de helft van de rapportagegrens dan voor individuele stoffen. In Bijlage A is uiteengezet wat het verschil is op de resultaten van de  $\text{BO}_3$ -pilot wanneer het koepelvoorschrift of de helft van de rapportagegrens wordt aangehouden. In de rapportage is het koepelvoorschrift aangehouden.

Voor stikstof, fosfor en bromaat zijn geen rendementen berekend maar absolute concentraties weergegeven. Wanneer een meetwaarde onder de ondergrens van de meet- of rapportagegrens lag, is de meet- of rapportagegrens zelf als waarde toegekend. In de oploop van de pilot is het voor de concentraties van ammonium en nitriet een enkele keer voorgekomen dat de meetwaardes boven de bovengrens van de meetmethode lagen, respectievelijk 2 mg  $\text{NH}_4$ -N/L en 0,6 mg  $\text{NO}_2$ -N/L. Wanneer een meetwaarde boven de bovengrens van de meetmethode lag is het meetpunt vanwege de lage betrouwbaarheid weggelaten.

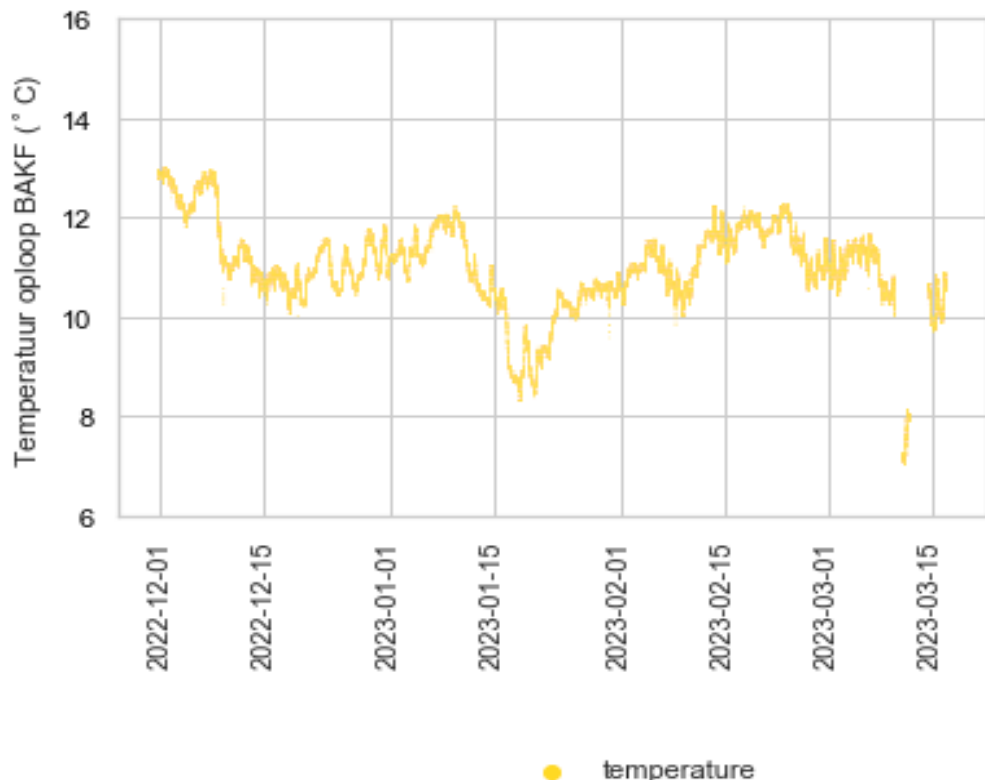
# 3

## RESULTATEN

### 3.1 TEMPERATUUR

De pilottesten vonden plaats in de winterperiode 2022/2023. In Figuur 4 is de temperatuur weergegeven van het afvalwater dat in de BO<sub>3</sub>-pilotinstallatie werd behandeld. De gemiddelde temperatuur was gedurende de gehele pilotperiode 11°C. De verwijdering van organisch materiaal en microverontreinigingen in de BAKF verloopt voornamelijk via biologische processen. Deze biologische processen zijn onderdeel van de bioregeneratie van de actiefkool, het samenspel tussen adsorptie, desorptie en biologische afbraak. In het algemeen geldt voor biologische processen in de afvalwaterzuivering dat deze beter verlopen bij afvalwatertemperaturen die in de zomerperiode voorkomen (17-22°C). De BO<sub>3</sub>-pilotresultaten in voorliggende rapportage representeren dus een accuraat beeld voor een winterperiode, maar vermoedelijk een onderschatting voor de prestaties in een zomerperiode en jaargemiddelde.

FIGUUR 4 TEMPERATUUR VAN HET AFVALWATER IN DE BO<sub>3</sub>-PILOTINSTALLATIE (10-3 EN 13-3 GEEN MEETDATA I.V.M. STORING)



### 3.2 WERKELIJKE SPECIFIEKE OZONDOSERINGEN

Elke ozontestdag is ernaar gestreefd om de volgende drie specifieke ozondoseringen te testen: 0,1, 0,2 en 0,4 g O<sub>3</sub>/g DOC. Doordat de concentraties DOC en nitriet pas achteraf bepaald worden en de ozonoverdracht van de gasfase naar de waterfase per testdag licht verschilt kan pas achteraf de daadwerkelijke specifieke ozondosering bepaald worden. In Tabel 5 zijn de

daadwerkelijke specifieke ozondoseringen in de laatste kolom weergegeven. Alle vermelde doseringen zijn uitgedrukt op basis van afvalwatersamenstelling in de afloop van de BAKF.

TABEL 5 OVERZICHT VAN DE TOEGEPASTE OZONDOSERINGEN OP DE VIJF OZONTESTDAGEN

Ozontestdag	Gewenste specifieke ozondosis (g $\text{O}_3$ /g DOC)	Nitriet concentratie (mg-N/L)	DOC concentratie (mg/L)	Daadwerkelijke specifieke ozondosis (g $\text{O}_3$ /g DOC)
1	0,4	< 0,015	4,2	0,57
1	0,2	< 0,015	4,2	0,38
1	0,1	< 0,015	4,2	0,27
2	0,4	< 0,015	9,6	0,34
2	0,2	< 0,015	9,6	0,17
2	0,1	< 0,015	9,6	0,14
3	0,4	< 0,015	11,4	0,41
3	0,2	< 0,015	11,4	0,20
3	0,1	< 0,015	11,4	0,11
4	0,4	< 0,015	12,0	0,45
4	0,2	< 0,015	12,0	0,22
4	0,1	< 0,015	12,0	0,12
5	0,4	0,090	8,2	0,26
5	0,2	0,090	8,2	0,13
5	0,1	0,090	8,2	0,05

Voor de overzichtelijkheid zijn de doseringen per testdag aangeduid als '0,1', '0,2' en '0,4' voor respectievelijk ca. 0,1, 0,2 en 0,4 g  $\text{O}_3$ /g DOC. Deze wijze van aanduiding is aangehouden in het vervolg van de rapportage.

Doordat nitriet in de BAKF vrijwel altijd tot onder meetbereik verwijderd werd is er nauwelijks sprake van ozonafvang door nitriet. Enkel op ozontestdag 5 was de concentratie nitriet in de oploop van de ozoninstallatie boven meetbereik en consumeerde nitriet vermoedelijk een deel van de ingebrachte ozon. Theoretisch is dit ca. 12%, 22% en 43% van de hoeveelheid ozon geweest voor respectievelijk de ozoninstelling 0,4, 0,2 en 0,1 g  $\text{O}_3$ /g DOC. Doordat de specifieke ozonconcentraties op ozontestdag 5 relatief laag waren is de mogelijke afvang van ozon door nitriet relatief hoog, dit geldt met name voor de specifieke ozondosering van 0,1 g  $\text{O}_3$ /g DOC.

### 3.3 MICROVERONTREINIGINGEN

De verwijdering van microverontreinigingen is op de volgende wijze uitgewerkt:

- 7 beste van de 11 gidsstoffen;
- Alle 11 gidsstoffen;
- Alle 19 (kandidaat)gidsstoffen (11 gidsstoffen plus 8 kandidaatgidsstoffen);
- Brede selectie medicijnresten.

In het pilotonderzoek is de verwijdering van microverontreinigingen over de  $\text{BO}_3$ -installatie bepaald. Het rendement van de rwzi is niet bepaald. Conform de IPMV-uitgangspunten geldt dat het gemiddelde verwijderingsrendement van de 7 best verwijderde van de 11 gidsstoffen over de gehele rwzi (effluent ten opzichte van influent) minimaal 70% dient te zijn. Dit betreft dus het verwijderingsrendement van de rwzi inclusief een eventuele aanvullende zuiveringsstap zoals  $\text{BO}_3$ . Om inzichtelijk te maken wat de prestaties zijn van de  $\text{BO}_3$ -technologie als afzonderlijke zuiveringsstap én de prestaties van de combinatie rwzi

met een  $\text{BO}_3$ -installatie zijn de verwijderingsrendementen van microverontreinigingen op twee wijzen gepresenteerd:

1. Verwijderingsrendement  $\text{BO}_3$ -technologie
2. Verwijderingsrendement rwzi +  $\text{BO}_3$ -technologie

Voor de berekening van het verwijderingsrendement van de rwzi +  $\text{BO}_3$ -technologie is de voorgeschreven STOWA tool gebruikt (STOWA 2020-06). Het verwijderingsrendement voor 7 van de 11 gidsstoffen is in STOWA 2020-06 vastgelegd. Voor 11 van de 11 gidsstoffen en alle 19 (kandidaat)gidsstoffen zijn geen verwijderingsrendementen door STOWA vastgelegd. Hiervoor zijn de onderstaande aannames aangehouden. De aannames over het verwijderingsrendement in de rwzi betreffen een conservatieve inschatting op basis van praktijkervaringen van meerdere Nederlandse rwzi's.

- Verwijderingsrendement 7/11 gidsstoffen in de rwzi = 40%
- Verwijderingsrendement 11/11 gidsstoffen in de rwzi = 20%
- Verwijderingsrendement 19 (kandidaat)gidsstoffen in de rwzi = 20%
- Capaciteit aanvullende zuiveringsstap = 85% van het jaardebiet
- By-pass aanvullende zuiveringsstap = 15% van het jaardebiet

De 85% van het jaardebiet als capaciteit van de aanvullende zuiveringsstap komt voor veel Nederlandse rwzi's en conform STOWA 2020-06 overeen met een capaciteit van ca. 1,65x DWA.

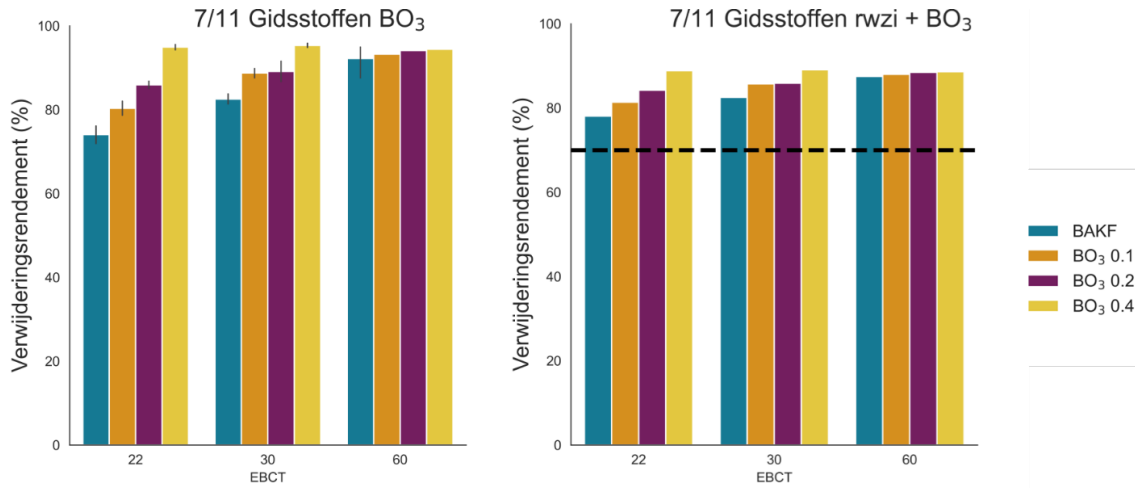
Door de Europese Unie is recentelijk (Q3 2022) een voorstel gedaan voor een herziening van de Richtlijn Stedelijk Afvalwater. Hierin is ook de verwijdering van microverontreinigingen opgenomen. De voorgestelde regeling wijkt enigszins af van de Nederlandse aanpak conform de bijdrageregeling voor demo's en het IPMV. Voor de  $\text{BO}_3$ -technologie is voor zover mogelijk een doorkijk gemaakt hoe de technologie presteert op de EU-doelstellingen voor microverontreinigingen. In deze doorkijk zijn ook de IPMV-referentietechnologieën meegenomen. De doorkijk naar de prestaties op de Richtlijn Stedelijk Afvalwater is opgenomen in Bijlage B.

### 3.3.1 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN

In Figuur 5 is het gemiddelde verwijderingsrendement voor de 7 beste van de 11 gidsstoffen gegeven. Op elke testdag lag van ten minste 3 gidsstoffen de concentratie in de afloop van de  $\text{BO}_3$  onder de rapportagegrens. Voor deze gidsstoffen is conform het koepelvoorschrift de rapportagegrens als concentratie aangehouden voor de berekening van het verwijderingsrendement. Het gevolg hiervan is dat er geen 100% verwijderingsrendement bereikt kan worden. Voor de ' $\text{BO}_3$  0,4' resultaten geldt hierdoor dat de maximaal te berekenen rekenkundig verwijderingsrendementen 95%, 98% en 97% betreffen voor respectievelijk 22, 30 en 60 minuten EBCT. De verwijderingsrendementen voor ' $\text{BO}_3$  0,4' zoals weergegeven Figuur 5 zijn 95%, 95% en 94% voor respectievelijk 22, 30 en 60 minuten EBCT. Deze verwijderingsrendementen zijn dus bijna gelijk aan de maximaal te bereiken rekenkundige rendementen.

FIGUUR 5

GEMIDDELDE VERWIJDERINGSRENDEMENT 7 VAN DE 11 BEST VERWIJDERDE GIDSSTOFFEN VOOR BO<sub>3</sub> (LINKS) EN RWZI MET BO<sub>3</sub> (RECHTS). HET VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE BO<sub>3</sub> BETREFT DE BEVINDINGEN VAN HET PILOTONDERZOEK (LINKS). HET RENDEMENT VAN DE RWZI IS NIET ONDERZOEKT IN HET PILOTONDERZOEK, DEZE IS BEPAALD CONFORM DE VOORGESCHREVEN STOWA METHODIEK (STOWA 2020-06). DE FOUTENBALKEN GEVEN DE MINIMALE EN MAXIMALE WAARDES AAN UIT HET PILOTONDERZOEK EN HEBBEN DUS ENKEL BETREKKING OP DE PRESTATIES VAN DE BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE. VOOR VERWIJDERINGSRENDEMENTEN BIJ EBCT 22 EN 30 MINUTEN N=2, BIJ EBCT 60 N=3 VOOR BAKF EN N=1 VOOR BO<sub>3</sub>



In de rechter grafiek van Figuur 5 is met de zwarte stippellijn het vereiste rendement van 70% voor 7 van de 11 gidsstoffen gegeven conform de minimale eisen van het IPMV en de Ketenaanpak Medicijnresten. Bij alle onderzochte EBCTs wordt hieraan voldaan, ook bij de laagste EBCT is een rendement van net boven de 80% al behaald met de laagste ozonodosis.

Zowel de EBCT als de ozonodosis beïnvloeden het verwijderingsrendement. Bij langere EBCT en/of een hogere ozonodosis neemt het rendement toe. Het BO<sub>3</sub>-verwijderingsrendement van de 7 van de 11 best verwijderde gidsstoffen ligt bij een EBCT van 22 minuten al boven de 70%. Bij deze EBCT én een specifieke ozonodosis van ca. 0,1 g O<sub>3</sub>/g DOC wordt een 80% rendement behaald, exclusief de verwijdering van de rwzi zelf. Inclusief de verwijdering van de rwzi zelf is het rendement bij deze instellingen ca. 81% voor 7 van de 11 gidsstoffen.

Bij een EBCT van 60 minuten en een specifieke ozonodosis van ca. 0,4 g O<sub>3</sub>/g DOC worden 6 van de 7 beste verwijderde gidsstoffen maximaal verwijderd in de BO<sub>3</sub>. Bij deze instelling lag de concentratie in de afloop van de BO<sub>3</sub> van 6 van de 7 best verwijderd gidsstoffen onder de rapportagegrens. Het verwijderingsrendement, exclusief de verwijdering van de rwzi, was hierdoor 94,5%. Dit is bijna gelijk aan het maximaal te behalen rekenkundige verwijderingsrendement van 94,8%, exclusief de verwijdering van de rwzi.

In Tabel 6 is weergegeven welke gidsstoffen de selectie uitmaakten van de 7 best verwijderde van de 11 gidsstoffen voor zowel de verwijdering over de BAKF als over de gehele BO<sub>3</sub>. Voor de BAKF betreft het in alle 7 metingen altijd precies dezelfde 7 gidsstoffen. Voor de BO<sub>3</sub> betreft het vrijwel altijd dezelfde 6 gidsstoffen. De 7<sup>e</sup> gidsstof is afhankelijk van de specifieke ozonodosis carbamazepine (bij hogere dosis) of gabapentine (bij lagere dosis).

TABEL 6

AANTAL KEREN DAT EEN GIDSSTOF BEHOORDE TOT DE 7 BEST VERWIJDERDE VAN DE 11 GIDSSTOFFEN

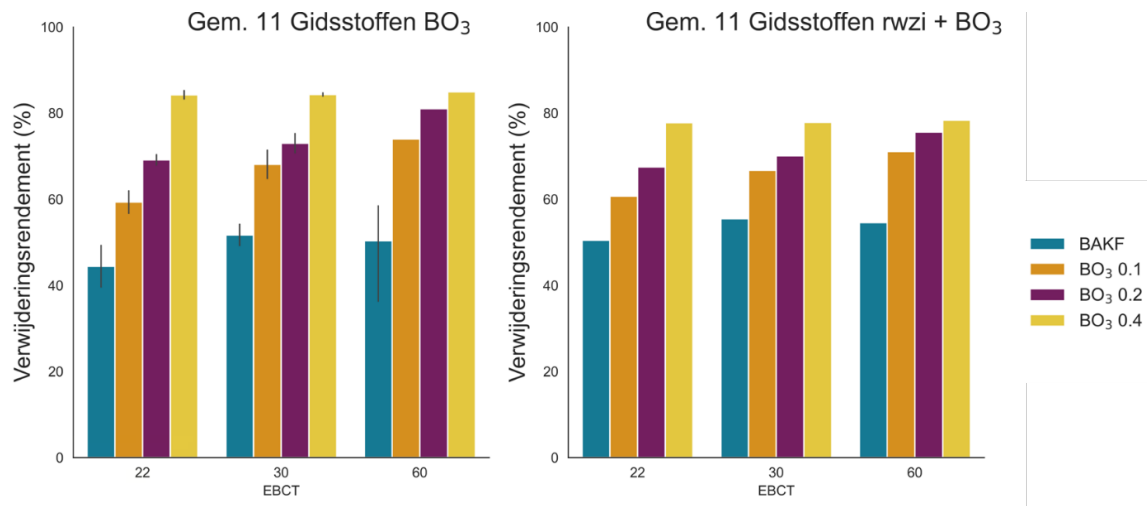
Gidsstof	BAKF	BO <sub>3</sub>	O <sub>3</sub> <sup>9</sup>
1,2,3-benzotriazool	0	0	4
Carbamazepine	0	8	15
Diclofenac	7	15	12
Gabapentine	7	8	4
Hydrochloorthiazide	7	14	6
Irbesartan	0	0	11
Metoprolol	7	15	12
Som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	0	0	5
Sotalol	7	15	12
Trimethoprim	7	15	11
Venlafaxine	7	15	10
Aantal metingen	7	15	15

### 3.3.2 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN

In Figuur 6 is het gemiddelde verwijderingsrendement van alle 11 gidsstoffen gegeven voor BO<sub>3</sub> (links) en een rwzi met BO<sub>3</sub> (rechts). Net als bij 7 van de 11 gidsstoffen geldt dat er elke testdag van het pilotonderzoek voor ten minste 3 gidsstoffen de concentratie in de afloop van de BO<sub>3</sub> onder de rapportagegrens lag. Voor de 'BO<sub>3</sub> 0,4' resultaten geldt hierdoor dat de maximaal te berekenen rekenkundige verwijderingsrendementen 98%, 98% en 96% betreffen voor respectievelijk 22, 30 en 60 minuten EBCT. De verwijderingsrendementen voor 'BO<sub>3</sub> 0,4' zoals weergegeven in Figuur 6 zijn 84%, 84% en 85% voor respectievelijk 22, 30 en 60 minuten EBCT.

FIGUUR 6

GEMIDDELDE VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN ALLE 11 GIDSSTOFFEN VOOR BO<sub>3</sub> (LINKS) EN RWZI MET BO<sub>3</sub> (RECHTS). HET VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE BO<sub>3</sub> BETREFT DE BEVINDINGEN VAN HET PILOTONDERZOEK (LINKS). HET RENDEMENT VAN DE RWZI IS NIET ONDERZOEKT IN HET PILOTONDERZOEK, DEZE IS BEPAALD CONFORM DE VOORGESCHREVEN STOWA METHODIEK (STOWA 2020-06). DE FOUTENBALKEN GEVEN DE MINIMALE EN MAXIMALE WAARDES AAN UIT HET PILOTONDERZOEK EN HEBBEN DUS ENKEL BETREKKING OP DE PRESTATIES VAN DE BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE. VOOR VERWIJDERINGSRENDEMENTEN BIJ EBCT 22 EN 30 MINUTEN N=2, BIJ EBCT 60 N=3 VOOR BAKF EN N=1 VOOR BO<sub>3</sub>



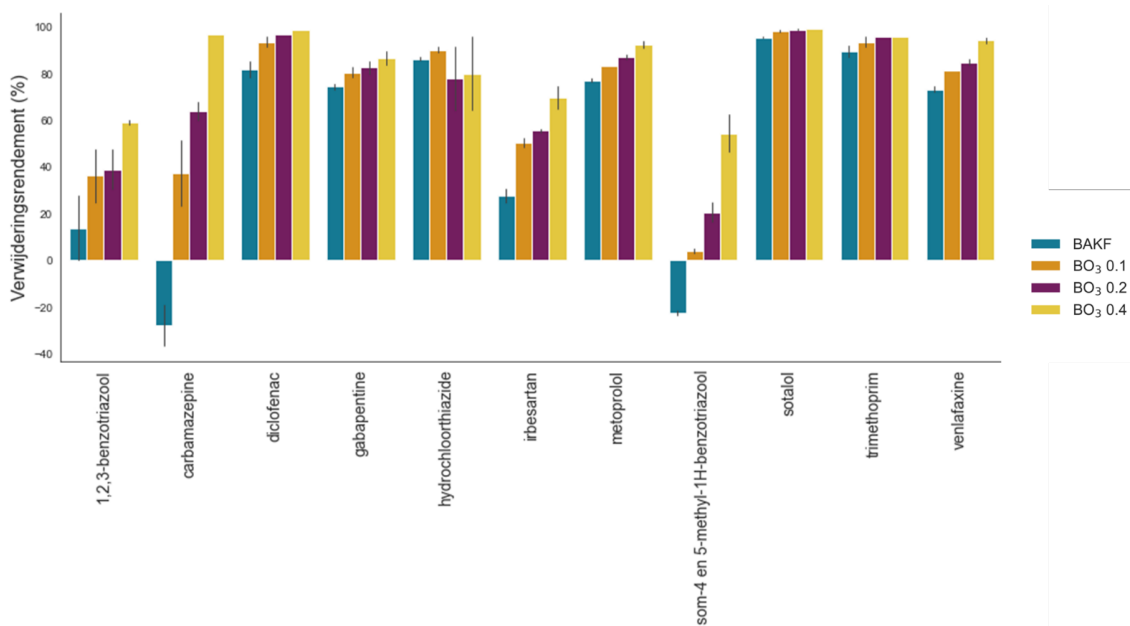
9 Afloop BO<sub>3</sub> t.o.v. afloop BAKF, op basis van stoffen die zijn aangetroffen boven de rapportagegrens in de afloop van de BAKF (6 stoffen voor testdag 1, 10 stoffen voor testdagen 4 en 5, en alle 11 gidsstoffen voor testdagen 2 en 3).



Het verwijderingsrendement van alle 11 gidsstoffen geeft een beter beeld op de breedte van het palet aan stoffen dat verwijderd wordt ten opzichte van de 7 beste van de 11 gidsstoffen. Met name het verwijderingsrendement dat met de BAKF behaald wordt ligt aanzienlijk lager. Bij geen enkele EBCT wordt een rendement van 70% meer behaald over de BAKF, inclusief en exclusief de verwijdering in de rwzi. Wanneer na de BAKF ook ozonisatie wordt toegepast, de  $\text{BO}_3$  configuratie, neemt het verwijderingsrendement toe en stijgt het rendement navenant de specifieke ozon dosering.

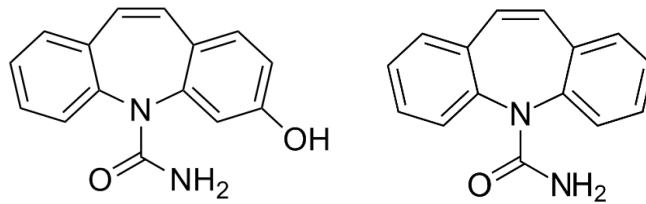
In Figuur 7 is voor alle individuele 11 gidsstoffen het verwijderingsrendement gegeven bij een EBCT van 30 minuten zoals bepaald in het pilotonderzoek, dit is exclusief de verwijdering in de rwzi. In Bijlage C Figuur 24 en Figuur 25 zijn voor de EBCTs van 60 en 22 minuten ook de verwijderingsrendementen van alle 11 individuele gidsstoffen weergegeven.

**FIGUUR 7 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VAN DE 11 INDIVIDUELE GIDSSTOFFEN BIJ EBCT 30 (TESTDAGEN 2 EN 4) EXCLUSIEF DE VERWIJDERING IN DE RWZI. DE FOUTENBALKEN GEVEN DE MINIMALE EN MAXIMALE WAARDES AAN**



Voor enkele gidsstoffen is een negatief verwijderingsrendement waargenomen over de BAKF, zowel bij een EBCT van 30 minuten alsook bij 60 en 22 minuten (zie Bijlage C). De EBCT van 60 minuten kent de grootste negatieve rendementen, waarschijnlijk veroorzaakt door een rwzi aanvoer ruim boven DWA. Het fenomeen van negatieve verwijderingsrendementen is overeenkomstig met observaties in actiefslibsystemen. In veel gevallen betreft dit de tegenovergestelde reactie van metaboliëtvorming. Een metaboliët is een stof waarvan de moleculaire structuur doorgaans grotendeels overeenkomstig is met de originele molecuulstructuur, bijvoorbeeld 3-hydroxycarbamazepine (metaboliët) en carbamazepine (originele stof), zie Figuur 8. Enkele medicijnen worden in het menselijk lichaam (deels) omgezet tot een metaboliët en als metaboliët uitgescheiden. Van biologische systemen zoals het riool en de rwzi is bekend dat gelijksoortige conversies kunnen plaatsvinden maar ook tegenovergestelde conversies, dus de terugvorming naar de originele structuur. Voor o.a. carbamazepine lijkt dit in de BAKF ook het geval te zijn.

FIGUUR 8 DE MOLECULAIRE STRUCTUUR VAN 3-HYDROXYCARBAMAZEPINE (LINKS) EN CARBAMAZEPINE (RECHTS)

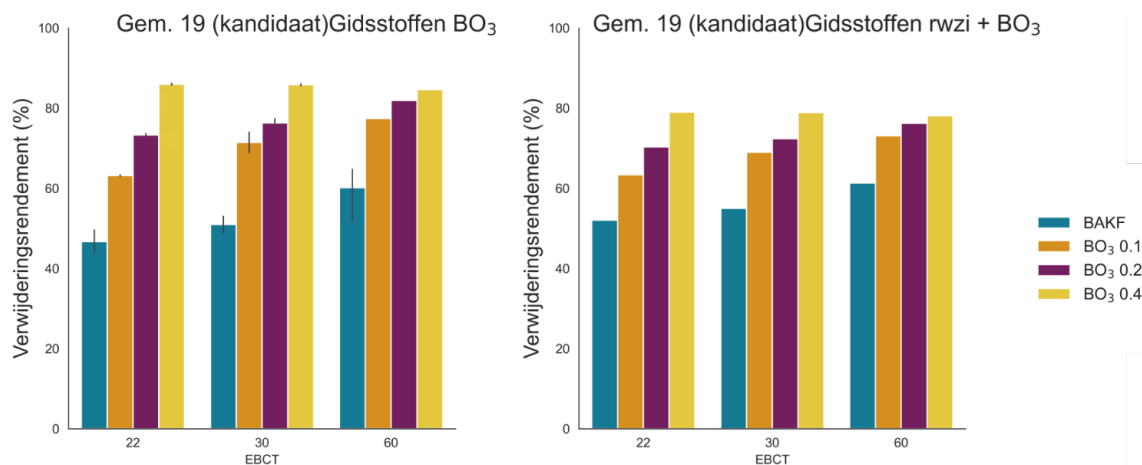


In Figuur 7 is goed zichtbaar wat het effect van BAKF en ozon is op de individuele gidsstoffen. Enkele stoffen zoals sotalol en trimethoprim worden met BAKF al verregaand verwijderd. Andere stoffen zoals 1,2,3-benzotriazool en irbesartan worden nauwelijks verwijderd. Carbamazepine en de som van 4- en 5-methyl-H1-benzotriazool worden zelfs gevormd (negatieve verwijdering). Voor alle gidsstoffen zorgt de behandeling met ozon voor een toename van het verwijderingsrendement. Voor bijvoorbeeld carbamazepine neemt het verwijderingsrendement door ozonbehandeling aanzienlijk toe van ca. -25% tot ca. 35%, 65% en 97% bij specifieke ozondoseringen van respectievelijk ca. 0,1, 0,2 en 0,4 g O<sub>3</sub>/g DOC.

### 3.3.3 (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN

In Figuur 9 is het gemiddelde verwijderingsrendement van alle 11 gidsstoffen en de 8 kandidaatgidsstoffen gegeven voor BO<sub>3</sub> (links) en een rwzi met BO<sub>3</sub> (rechts).

FIGUUR 9 GEMIDDELDE VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE 19 (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN VOOR BO<sub>3</sub> (LINKS) EN RWZI MET BO<sub>3</sub> (RECHTS). HET VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE BO<sub>3</sub> BETREFT DE BEVINDINGEN VAN HET PILOTONDERZOEK (LINKS). HET RENDEMENT VAN DE RWZI IS NIET ONDERZOEKT IN HET PILOTONDERZOEK, DEZE IS BEPAALD CONFORM DE VOORGESCHREVEN STOWA METHODIEK (STOWA 2020-06). DE FOUTENBALKEN GEVEN DE MINIMALE EN MAXIMALE WAARDES AAN UIT HET PILOTONDERZOEK EN HEBBEN DUS ENKEL BETREKKING OP DE PRESTATIES VAN DE BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE. VOOR VERWIJDERINGSRENDEMENTEN BIJ EBCT 22 EN 30 MINUTEN N=2, BIJ EBCT 60 N=3 VOOR BAKF EN N=1 VOOR BO<sub>3</sub>



Gelijk aan het verwijderingsrendement van alle 11 gidsstoffen ligt ook het verwijderingsrendement voor de 19 (kandidaat)gidsstoffen voor alleen de BAKF onder de 70%. Wanneer na de BAKF ook ozonisatie wordt toegepast, de BO<sub>3</sub> configuratie, neemt het verwijderingsrendement toe en stijgt het rendement navenant de specifieke ozondosering.

Het gemiddelde verwijderingsrendement van de 19 (kandidaat)gidsstoffen is hoger dan voor alle 11 gidsstoffen en lager dan voor de 7 beste van de 11 gidsstoffen.

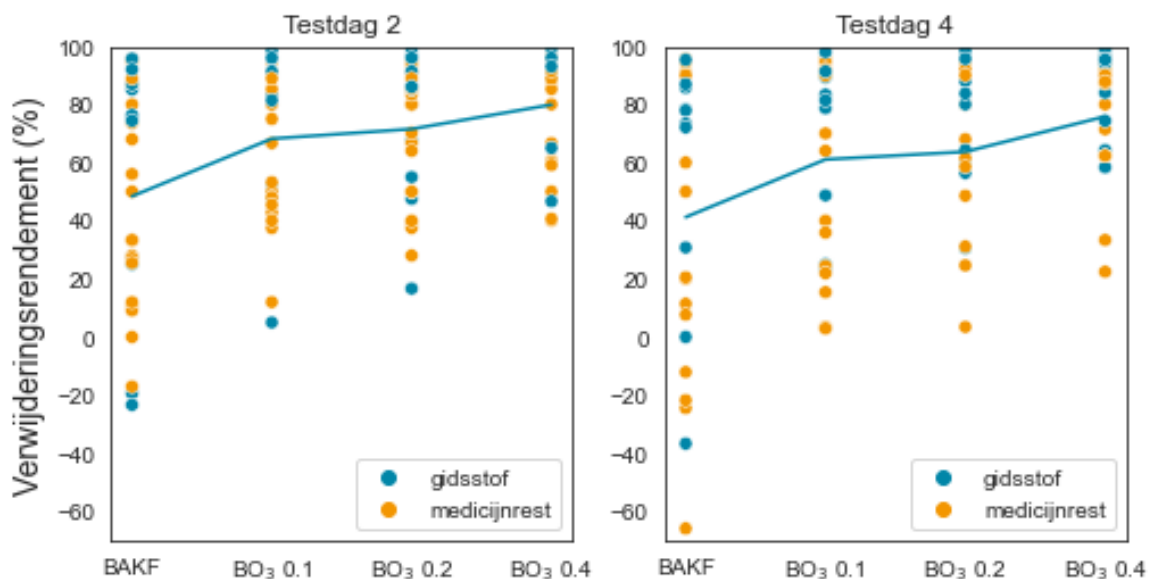
De concentraties van de 8 kandidaatgidsstoffen waren in de afloop van de BAKF en de afloop  $\text{BO}_3$  meermaals onder de rapportagegrens. Van de 7 metingen in de afloop BAKF lag de concentratie propranolol altijd onder de rapportagegrens, die van amisulpride op één keer na en die van furosemide op twee keer na. Van de 15 metingen in de afloop  $\text{BO}_3$  lagen de concentraties amisulpride, furosemide en propranolol altijd onder de rapportagegrens, die van azitromycine op één keer na en die van citalopram op ja, allevier keer na. De enige stof die in de afloop  $\text{BO}_3$  nooit onder de rapportagegrens is aangetroffen is candesartan.

Doordat veelvuldig concentraties van kandidaatgidsstoffen onder de rapportagegrens lagen is het maximaal te berekenen rekenkundig verwijderingsrendement relatief laag. Voor de 'BO<sub>3</sub> 0,4' resultaten geldt hierdoor dat de maximaal te berekenen rekenkundige verwijderingsrendementen 94%, 93% en 83% betreffen voor respectievelijk 22, 30 en 60 minuten EBCT. De verwijderingsrendementen voor 'BO<sub>3</sub> 0,4' zoals weergegeven in Figuur 9 zijn 86%, 86% en 85% voor respectievelijk 22, 30 en 60 minuten EBCT.

### 3.3.4 BREED PALET

Op een tweetal testdagen is een analyse naar een bredere selectie medicijnresten uitgevoerd. Naast de 19 (kandidaat)gidsstoffen zijn met deze methode op ozontestdagen 2 en 4 voor respectievelijk een 11-tal<sup>10</sup> en 5-tal<sup>11</sup> extra stoffen de verwijderingsrendementen bepaald. In Figuur 10 is het verwijderingsrendement van deze bredere selectie medicijnresten weergegeven.

FIGUUR 10 VERWIJDERINGSRENDEMENT OVER  $\text{BO}_3$  EXCLUSIEF VERWIJDERING IN RWZI, VAN EEN BREDERE SELECTIE MEDICIJNRESTEN BIJ EBCT 30 (LINKS TESTDAG 2, N=30, RECHTS TESTDAG 4, N=24). ELKE DATAPUNT REPRESENTEERT ÉÉN STOF. DE BLAUWE DOORGETROKKEN LIJN GEEFT HET GEMIDDELDE VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN ALLE STOFFEN AAN



In Tabel 7 is een overzicht gegeven van de verwijdering van een bredere selectie medicijnresten ingedeeld in categorieën van verwijderingsrendement.

10 2-hydroxyibuprofen, atenolol, erytromycine, gemfibrozil, jopromide, levetiracetam, losartan, metformine, naproxen, primidon en trans-10,11-dihydroxy-10,11-dihydrocarbazepine

11 atenolol, jopromide, losartan, metformine en trans-10,11-dihydroxy-10,11-dihydrocarbazepine

**TABEL 7** PERCENTAGE VAN HET AANTAL STOFFEN VERWIJDERD PER VERWIJDERINGSRENDEMENTCATEGORIE. VERWIJDERING ENKEL OVER DE  $\text{BO}_3$ , EXCLUSIEF VERWIJDERING IN RWZI. HET AANTAL STOFFEN AANGETROFFEN BOVEN DE RAPPORTAGEGREN IN DE OPLOOP VAN DE PILOT IS 30 EN 25 VOOR RESPECTIEVELIJK TESTDAG 2 EN 4.

Verwijderingsrendement	Testdag 2				Testdag 4			
	BAKF	$\text{BO}_3$ 0,1	$\text{BO}_3$ 0,2	$\text{BO}_3$ 0,4	BAKF	$\text{BO}_3$ 0,1	$\text{BO}_3$ 0,2	$\text{BO}_3$ 0,4
<50%	50%	30%	27%	13%	52%	40%	28%	12%
50-70%	7%	13%	13%	20%	4%	8%	24%	16%
70-80%	17%	10%	13%	3%	16%	8%	8%	12%
>80%	27%	47%	47%	63%	28%	44%	40%	60%

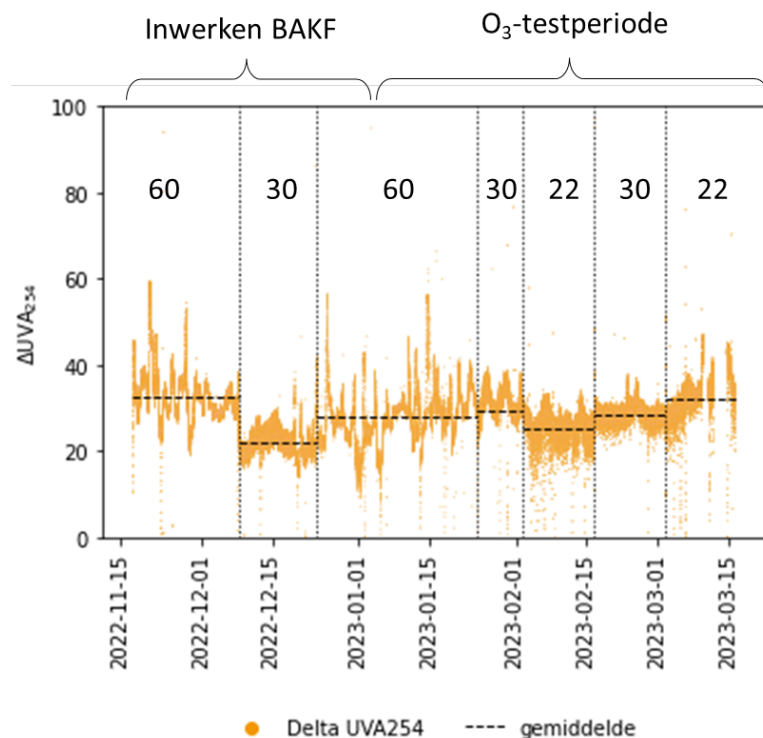
In lijn met de observaties voor de gidsstoffen is in Figuur 10 en Tabel 7 waar te nemen dat de combinatie van BAKF en ozon een breder palet aan stoffen verwijderd ten opzichte van de BAKF. Met toenemende specifieke ozondosering neemt ook voor een brede selectie stoffen het rendement toe.

### 3.4 ORGANISCHE STOFFEN

#### 3.4.1 UV-ABSORPTIE BIJ 254 NM

De pilotinstallatie was uitgerust met UV-sensoren waarmee bij een golflengte van 254 nm de UV-absorptie ( $\text{UVA}_{254}$ ) continue gemeten kon worden. Bij een golflengte van 254 nm wordt een mate van de aromatischeit van de organische stoffen in het afvalwater bepaald. Moleculen met veel dubbele bindingen, zoals aromatische ringen, kunnen met deze methode waargenomen worden. Organische stoffen in rwzi-effluent zoals humuszuren hebben een hoge mate van aromatischeit en kunnen hierdoor worden gemeten. Met de bepaling van de  $\text{UVA}_{254}$  zowel voor als na de BAKF kan de verandering in  $\text{UVA}_{254}$  berekend worden, de zogenaamde delta  $\text{UVA}_{254}$  ( $\Delta\text{UVA}_{254}$ ). Figuur 11 is de  $\Delta\text{UVA}_{254}$  over de BAKF gedurende de inwerk- en ozontestperiode weergegeven.

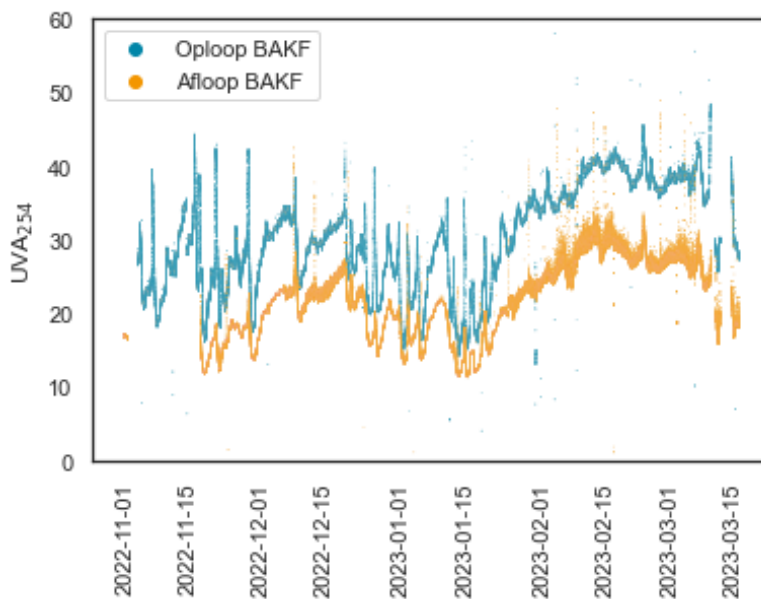
**FIGUUR 11** DELTA UV-ABSORPTIE BIJ 254 NM ( $\Delta\text{UVA}_{254}$ ) OVER DE BAKF. DE GETALLEN 22, 30 EN 60 IN DE FIGUUR GEVEN DE EBCT VAN DE BAKF IN MINUTEN AAN. DE ZWARTE STIPPELLIJNEN GEVEN DE GEMIDDELDE WAARDE VAN DE BETREFFENDE PERIODE



De GAK waarmee de BAKF gevuld is was al jaren in gebruik voor rwzi-effluent nabehandeling op de NieuWater UltraPuurWaterfabriek te Emmen. Door NieuWater werd de GAK ook onder aerobe condities bedreven waardoor bij aanvang van de pilottesten een heterotrofe microbiële populatie op de GAK aanwezig was. Het resultaat hiervan was dat direct na opstart van de BAKF de  $\Delta\text{UVA}_{254}$  op een niveau zat dat vergelijkbaar was met eerdere resultaten uit lab-testen aan de Wageningen Universiteit.

De  $\Delta\text{UVA}_{254}$  lag afhankelijk van de EBCT tussen de ca. 20% tot 35% en was relatief stabiel binnen de afzonderlijke EBCT perioden. Ervanuitgaande dat de  $\Delta\text{UVA}_{254}$  voornamelijk een resultaat is van microbiële afbraak van organisch materiaal (CZV en DOC) en gedeeltelijk van invang van zwevende stof in de BAKF is het aannemelijk dat een hogere EBCT resulteert in een grotere  $\Delta\text{UVA}_{254}$ . In Figuur 11 is dit niet eenduidig terug te zien. Dit komt zeer waarschijnlijk doordat de  $\text{UVA}_{254}$  in de oploop van de pilot niet constant was, zie Figuur 12. Bij RWA daalt de  $\text{UVA}_{254}$ , bij een langdurige droge periode zoals half januari tot eind februari 2023 neemt de  $\text{UVA}_{254}$  toe. De minimale en maximale  $\text{UVA}_{254}$  waarden in de oploop van de BAKF liggen meer dan een factor 4 uiteen. Dat betekent dat de concentraties, en mogelijk ook de fractionering, van CZV, DOC en zwevende stof in de oploop van de pilot aanzienlijk kunnen fluctueren. Deze DWA/RWA-fluctuatie in de aanvoer naar de BAKF is samen met de EBCT en mogelijk ook de temperatuur van het water waarschijnlijk de parameter die de  $\Delta\text{UVA}_{254}$  bepaald.

FIGUUR 12 UV-ABSORPTIE BIJ 254 NM IN DE OPLOOP EN AFLOOP VAN DE BAKF

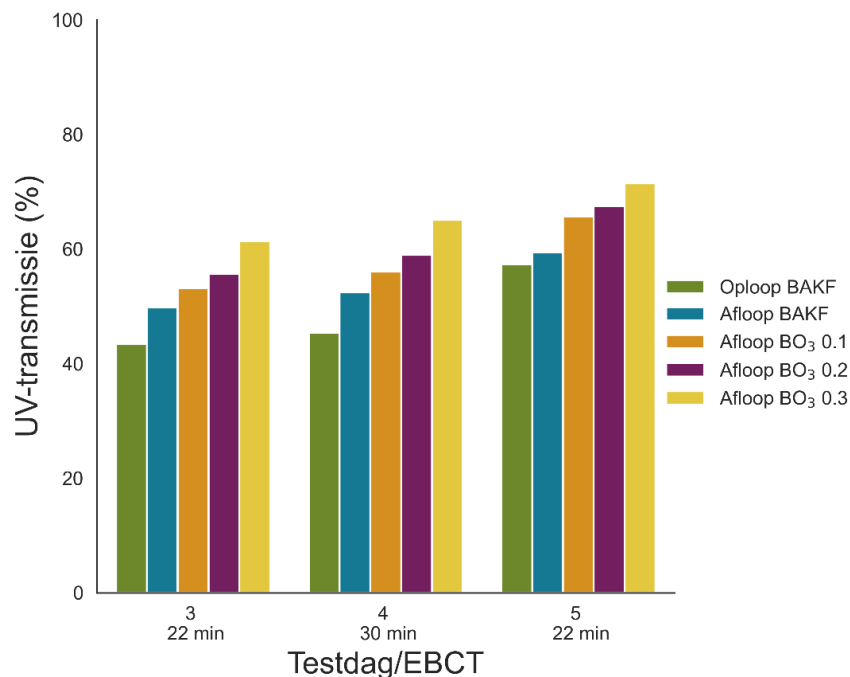


Te zien is dat de  $\text{UVA}_{254}$  in de oploop van de BAKF fluctueert over de tijd. Dit komt door de verschillen in de aanvoerpatronen van afvalwater naar de rwzi. Tijdens RWA daalt de  $\text{UVA}_{254}$  in de oploop naar lage waarden, tijdens lange periode van droogte stijgt de  $\text{UVA}_{254}$  tot maximale waarden. Dit heeft ook enig effect op de  $\Delta\text{UVA}_{254}$ . Bij een lage  $\text{UVA}_{254}$  in de oploop is de  $\Delta\text{UVA}_{254}$  kleiner, bij een hoge  $\text{UVA}_{254}$  in de oploop is de  $\Delta\text{UVA}_{254}$  groter. In een doorkijk naar de  $\text{BO}_3$ -configuratie betekent dit dat in de oploop naar de ozonisatiestap de absolute  $\text{UVA}_{254}$  laag is én dat pieken in de  $\text{UVA}_{254}$  afgevlakt worden. Hierdoor wordt de benodigde ozonvracht verlaagd én afgevlakt. Het grote voordeel van met name de afvlakking is dat er een minder groot bereik aan ozonproductiecapaciteit nodig is voor piekmomenten en daardoor de keuze voor de ozongeneratoropstelling vereenvoudigd. Met een werkbereik

van ca. 10% tot 100% kan één opgestelde ozongenerator niet omgaan met fluctuaties in benodigde ozonvracht die typisch gevraagd worden op rwzi's door fluctuaties in debieten (nachtelijke DWA uren vs. RWA), DOC-concentraties (ca. 5 tot 15 mg/L), nitrietconcentraties (ca. 0,1 tot 1 mg/L) en gewenste specifieke ozondoseringen (ca. 0,3 tot 0,8 g  $\text{O}_3$ /g DOC). Door verlaging en afvlakking van de  $\text{UVA}_{254}$  (en daarmee de DOC-concentratie) en de nitrietconcentratie zoals in de BAKF optreedt neemt de range aan benodigde ozonvracht af.

Met de aanwezige UV-sensoren is naast de  $\text{UVA}_{254}$  ook de UV-transmissie bij 254 nm bepaald ( $\text{UV-T}_{254} = 1/10^{\text{UVA}_{254}}$ ). Deze zogenaamde UV-T waarde is een mate voor de lichtdoorlatendheid (transmissie) van het water. De UV-T waarde is op alle drie de monsternamepunten bepaald en weergegeven in Figuur 13.

FIGUUR 13 DE UV-TRANSMISSIE IN DE DRIE MONSTERNAMEPUNTEN



Zowel de BAKF als de ozonisatie hebben een positief effect op de UV-T waarde. De UV-T stijgt over de gehele pilot met ca. 10 tot 20 procentpunten tot UV-T waarden van 60% tot 70%. De UV-T waarden van ca. 43% tot 57% in de oploop van de pilot (afloop nabezinktanks rwzi Horstermeer) zijn in lijn met wat eerder voor rwzi Aarle-Rixtel is gevonden (STOWA 2020-41).

### 3.4.2 OPGELOST ORGANISCH MATERIAAL (DOC)

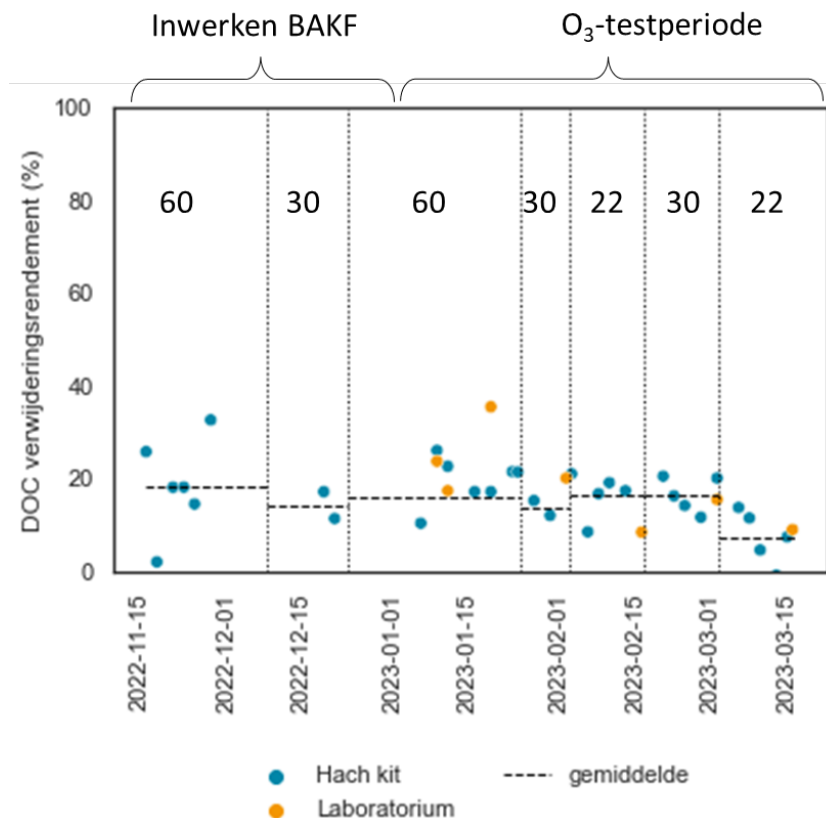
De restanten opgelost organisch materiaal in rwzi-effluent (afloop nabezinktanks) worden typisch uitgedrukt als DOC (dissolved organic carbon). DOC betreft de som van alle opgeloste organische koolstofatomen en heeft als eenheid gram C per liter. Traditioneel wordt vaak de zuurstofvraag (CZV of BZV, al dan niet gefilterd) bekeken om een beeld te krijgen over de concentratie (opgelost) organisch materiaal. De zuurstofvraag is echter een indirecte indicator van de hoeveelheid organisch materiaal. De eenheid is dan ook gram  $\text{O}_2$  per liter. Als vuistregel kan gesteld worden dat de concentratie CZV en DOC in rwzi-effluent ca. een factor 3 verschillen, 30 mg CZV/L komt overeen met ca. 10 mg DOC/L.

De ozondosering in een ozonbehandeling wordt typisch uitgedrukt als specifieke ozondosering met als eenheid g  $\text{O}_3$ /g DOC. De concentratie DOC is dus recht evenredig met de

absolute ozon dosis. De bepaling van de DOC-concentratie vereist een analyzer. Voor een continue sturing van de ozon dosering is een DOC-analyzer niet kosteneffectief (laag meetinterval en relatief hoge kosten). In de praktijk wordt een ozoninstallatie veelal uitgerust met een UV-sensor. Met deze sensor kan een indicatie van de DOC-concentratie worden verkregen vanuit de UV-adsorptie waarden van een of meerdere specifieke golflengtes. Met dezelfde sensor kan ook de  $\text{UVA}_{254}$  waarde bepaald worden. Beide kunnen als input dienen om de ozoninstallatie op aan te sturen.

In de oploop van de pilot en afloop van de BAKF is de DOC-concentratie bepaald. De bepaling is zowel op locatie met Hach-Lange kuvettentesten als bij Aqualysis uitgevoerd. Met de DOC-concentraties is de DOC-verwijdering over de BAKF berekend, zie Figuur 14.

FIGUUR 14 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DOC OVER DE BAKF



Analoog aan de  $\Delta\text{UVA}_{254}$  is ook de DOC-verwijdering afhankelijk van de EBCT in de BAKF en de concentratie en samenstelling van de DOC in de oploop van de pilot. Bij langere EBCT neemt het verwijderingsrendement toe tot wel 30%. Bij kortere EBCT is de verwijdering minder tot maar 5%. Binnen een EBCT zijn er ook verschillen te zien. Bijvoorbeeld in de eerste periode van de EBCT van 22 minuten (2023-02-01 tot 2023-02-15) is de verwijdering groter dan tijdens de tweede periode van de EBCT van 22 minuten (2023-03-01 tot 2023-03-15). Deze verschillen zijn naar alle waarschijnlijkheid vooral te verklaren door de fluctuaties in DOC-concentratie en -samenstelling van het inkomend water. Het RWA/DWA patroon evenals de prestaties van de rwzi zelf zijn hierop van grote invloed.

In Tabel 8 zijn per ozontestdag de gemiddelde waarden van de DOC-verwijdering en  $\Delta\text{UVA}_{254}$  over de BAKF gegeven.

TABEL 8

GEMIDDELDE  $\text{UVA}_{254}$  EN DOC-CONCENTRATIE IN DE OPLOOP BAKF EN GEMIDDELDE  $\Delta\text{UVA}_{254}$  EN DOC-VERWIJDERING OVER DE BAKF IN DE OZONTESTPERIODE (JANUARI – MAART) PER EBCT.

EBCT	$\text{UVA}_{254}$	DOC	$\Delta\text{UVA}_{254}$	DOC-verwijdering
min	$\text{cm}^{-1}$	mg/L	%	%
60	0,24	9,1	28	16
30	0,34	11,0	29	14
22	0,38	12,4	25	16
30	0,39	11,7	28	16
22	0,36	10,9	32	7

De  $\Delta\text{UVA}_{254}$  en DOC-verwijdering in het pilotonderzoek is relatief laag ten opzichte van de labtesten die uitgevoerd zijn aan de Wageningen Universiteit. De  $\Delta\text{UVA}_{254}$  was daar ca. 40%, 50% en 55% de DOC-verwijdering ca. 25%, 30% en 35% bij EBCTs van respectievelijk ca. 20, 40 en 80 minuten. Verklaringen hiervoor zijn onder andere het verschil in temperatuur (ca. 11°C versus ca. 20°C) en het vermoedelijke verschil in afvalwatermatrix waardoor mogelijk een andere DOC-samenstelling.

Bij de interpretatie van de  $\Delta\text{UVA}_{254}$  en DOC-verwijdering dient altijd rekening gehouden te worden met de absolute waarde van de  $\text{UVA}_{254}$  en DOC-concentratie. De pilottesten bij een EBCT van 60 minuten kenden relatief veel RWA dagen ten opzichte van de pilottesten bij EBCTs 22 en 30 minuten. Dit is terug te zien in de relatief lage  $\text{UVA}_{254}$  en DOC-concentratie bij EBCT 60 minuten. De  $\Delta\text{UVA}_{254}$  en DOC-verwijdering bij EBCT 60 minuten zijn hierdoor vrijwel gelijk aan de EBCTs van 22 en 30 minuten. Opvallend is dat in de tweede periode van de EBCT van 22 minuten de  $\Delta\text{UVA}_{254}$  relatief hoog is terwijl de DOC-verwijdering relatief laag is. Onbekend is waardoor dit is opgetreden.

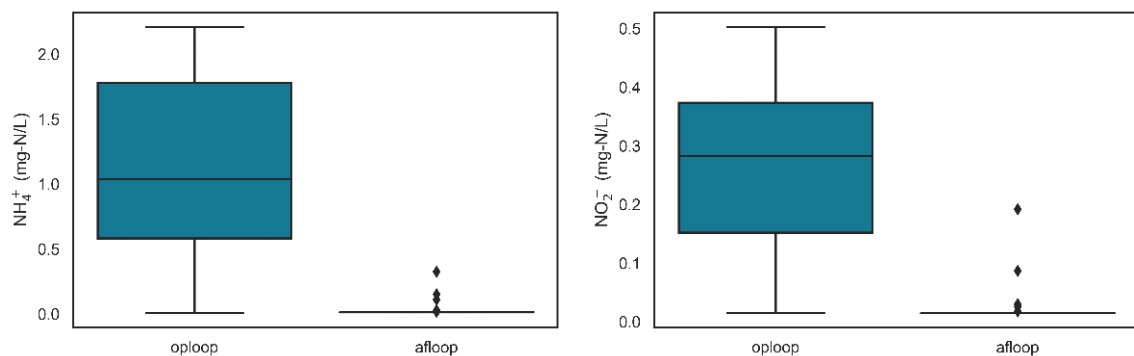
Er kan nog geen eenduidige functie opgesteld worden voor de relatie tussen EBCT en  $\Delta\text{UVA}_{254}$  of DOC-verwijdering. Een dergelijke functie zal mogelijk ook per locatie verschillen door onder andere de verschillen in watermatrix en DOC-samenstelling tussen locaties.

### 3.5 NUTRIËNTEN

#### 3.5.1 STIKSTOF

De concentraties van ammonium en nitriet in de oploop en afloop van de BAKF zijn weergegeven in Figuur 15.

FIGUUR 15 AMMONIUM CONCENTRATIE IN OPLOOP (N=23) EN AFLOOP (N=21) VAN DE BAKF (LINKS) EN NITRIET CONCENTRATIE IN OPLOOP (N=28) EN AFLOOP (N=29) VAN DE BAKF (RECHTS). AMMONIUM IN DE OPLOOP IS ÉÉN VER KEER BOVEN DE MEETGREN VAN 2 MG-N/L AANGETROFFEN (DATAPUNT WEGGELATEN) EN TWEEMAAL NET BOVEN DE MEETGREN AANGETROFFEN (CA. 2,15 MG-N/L, DATAPUNTEN BEHOUDEN). NITRIET IS ÉÉN KEER VER BOVEN DE MEETGREN VAN 0,6 MG-N/L IN DE OPLOOP AANGETROFFEN (DATAPUNT WEGGELATEN)



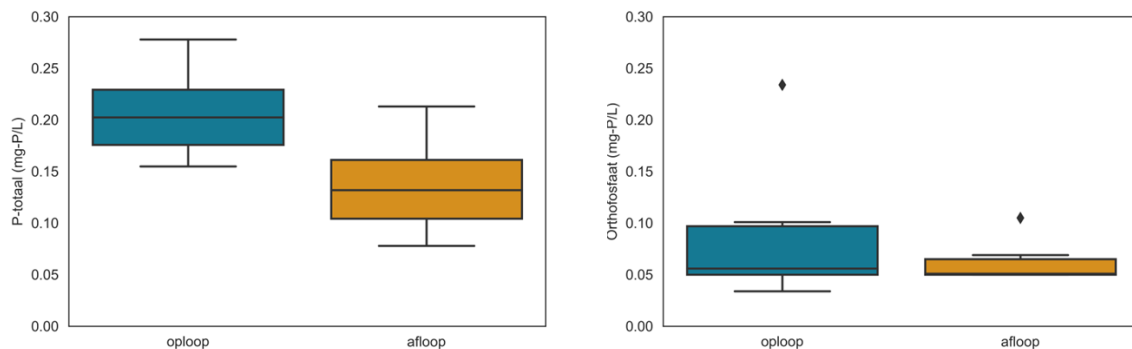


In de BAKF vindt een nagenoeg volledige nitrificatie van ammonium en nitriet plaats, de concentraties van beide stoffen in de afloop van de BAKF lag vrijwel altijd onder de meetgrens (0,015 mg NH<sub>4</sub>-N/L en 0,015 mg NO<sub>2</sub>-N/L). Door de aerobe condities in de BAKF ligt de waargenomen nitrificatie in de lijn der verwachting. Op enkele meetdagen is ook de concentratie nitraat bepaald. Hieruit bleek dat de concentratie nitraat vrijwel evenredig toeneemt met de afname van ammonium en nitriet. Doordat nitriet een ozonafvanger is reduceert de nitrificatie van nitriet in de BAKF de ozonconsumptie in het daaropvolgende ozonisatieproces.

### 3.5.2 FOSFOR

De concentratie van totaal fosfor en orthofosfaat in de oploop en afloop van de BAKF is weergegeven in Figuur 16.

FIGUUR 16 TOTAAL FOSFOR EN ORTHOFOSFAAT CONCENTRATIE IN OPLOOP (N= 10) EN AFLOOP (N= 10) VAN DE BAKF

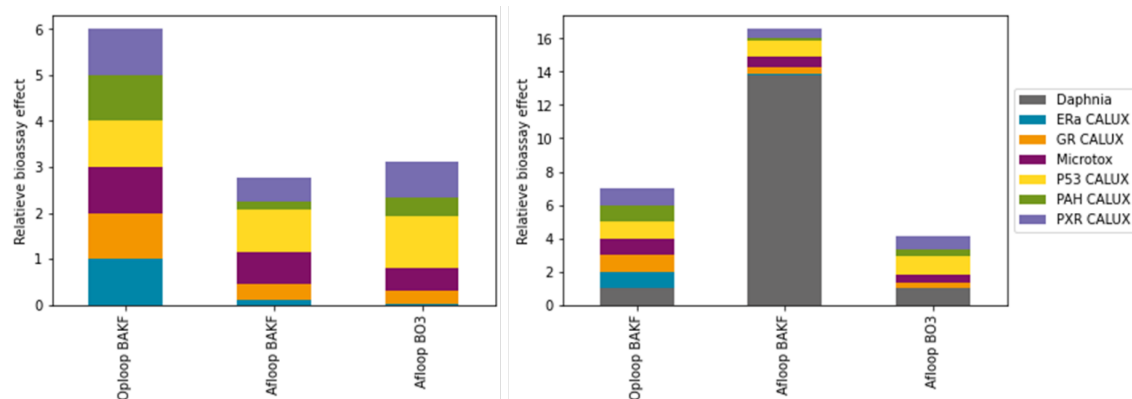


De afname van totaal fosfor was gemiddeld ca. 0,07 mg-P/L en is waarschijnlijk te verklaren door de invang van zwevende stof in de BAKF en een zeer geringe opname van fosfor door de microbiologie in de BAKF. De concentratie orthofosfaat nam ook af. Doordat deze in de afloop van de BAKF frequent onder de meetgrens (0,05 mg-P/L) lag is het lastig te behalen hoe groot deze afname was.

### 3.6 BIOLOGISCHE EFFECTEN

Eénmalig, bij een EBCT van 30 minuten en een specifieke ozondosis van ca. 0,2 g O<sub>3</sub>/g DOC (instelling ozontestdag 2 – 'BO<sub>3</sub> 0,2'), zijn conform de 'handreiking voor uitvoeren van biologische effectmonitoring bij vergaande zuivering van rwzi-effluenten' biologische effectmetingen uitgevoerd. De genormaliseerde uitkomst van de uitgevoerde biologische effectmetingen is weergegeven in Figuur 17.

FIGUUR 17 GENORMALISEERDE UITKOMSTEN BIOLOGISCHE EFFECTMETINGEN BIJ EBCT 30 MINUTEN EN SPECIFIEKE OZONDOSERING VAN CA. 0,2 G O<sub>3</sub>/G DOC EXCLUSIEF (LINKS) EN INCLUSIEF (RECHTS) DE UITKOMSTEN VAN DE DAPHNIA IMMOBILISATIETEST



Gesteld kan worden dat over de gehele pilot de biologische effecten afnemen met een ordegrrootte van ca. 50%. Voor vrijwel alle individuele metingen vindt de grootste afname in de BAKF plaats. De P53 CALUX bioassay is een indicator voor oxidatieve stress. Deze kan na een oxidatieve behandeling van het water zoals ozonisatie sterk toenemen, een ongewenst effect. Een hogere waarde na ozonisatie (afloop  $\text{BO}_3$ ) dan voor ozonisatie (afloop BAKF) zou dus mogelijk kunnen zijn. De uitkomst van de P53 CALUX bioassay toont echter geen sterke toename in oxidatieve stress in de afloop van de  $\text{BO}_3$ . Vermoedelijk is dit te relateren aan de zeer lage ozondosis waardoor (ongewenste) oxidatieve stress achterwege blijft. De uitkomsten van de *Daphnia* immobilisatietest tonen een zeer sterke toename over de BAKF en vervolgens een afname naar hetzelfde niveau als in de oploop na de gehele pilot. De consensus na discussie met experts en het laboratorium is dat de sterke toename over de BAKF waarschijnlijk een uitschieter betreft. Doordat het over slechts één meting op één testdag gaat lijkt het aannemelijker dat het een uitschieter betreft dan dat de toxiciteitscore uit de *Daphnia* immobilisatietest daadwerkelijk met een factor 10 is toegenomen.

### 3.7 BROMIDE EN BROMAAT

Elke ozontestdag is de concentratie bromide in de oploop en afloop van de BAKF gemeten, zie Tabel 9.

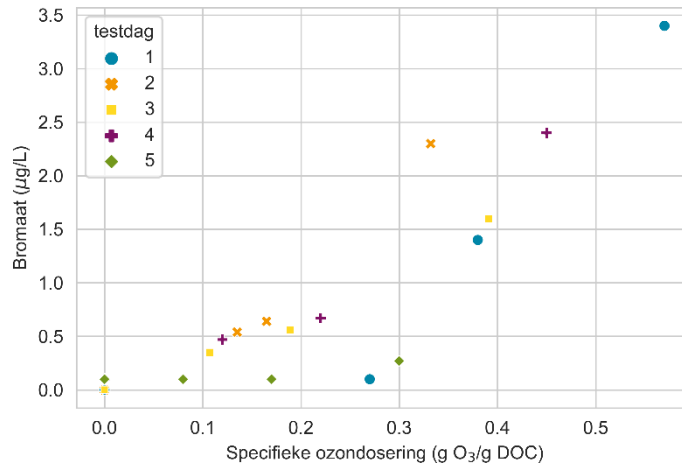
TABEL 9 CONCENTRATIE BROMIDE (MG/L) IN DE OPLOOP EN AFLOOP VAN DE BAKF OP DE OZONTESTDAGEN

Ozontestdag	Oploop BAKF	Afloop BAKF
1	0,34	0,26
2	0,68	0,59
3	0,38	0,37
4	0,39	0,40
5	0,17	0,17

De concentratie bromide lijkt niet eenduidig te veranderen over de BAKF. De concentraties in de oploop en afloop zijn overeenkomstig. Dit is volledig in lijn der verwachting omdat onder aerobe condities bromide niet omgezet wordt en het ook niet goed adsorbeert aan een (verzadigde) actiefkool. Op twee testdagen is ook de concentratie bromaat in de oploop en afloop van de BAKF bepaald. Op beide testdagen is in zowel de oploop als afloop van de BAKF geen bromaat boven de rapportagegrens (0,2  $\mu\text{g/L}$ ) aangetroffen.

Op elke ozontestdag en bij elke specifieke ozondosering is de concentratie bromaat gemeten in de afloop van de  $\text{BO}_3$ . De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 18.

FIGUUR 18

CONCENTRATIE BROMAAT ( $\mu\text{g/L}$ ) UITGEZET TEGEN DE SPECIFIEKE OZONDOSERING ( $\text{g O}_3/\text{g DOC}$ ) PER OZONTESDAG

Er is een duidelijke relatie waar te nemen tussen de specifieke ozondosering en de vorming van bromaat. Een hogere specifieke ozondosis resulteert in een hogere concentratie bromaat. Deze waarneming is ook bij andere onderzoeken met ozonisatie waargenomen (o.a. STOWA 2018-46, 2020-41 en 2022-47). Ten opzichte van deze andere onderzoeken treedt de bromaatvorming in het pilotonderzoek al bij relatief lage specifieke ozondoseringen op. De verklaring hiervoor kan in meerdere zaken gezocht worden waaronder de concentratie bromide, het ozoninbrengsysteem en de samenstelling van de watermatrix.

De bromideconcentratie op rwzi Horstermeer is met gemiddeld  $300 \mu\text{g/L}$  ten opzichte van andere Nederlandse rwzi's niet als hoog of laag te bestempelen ( $>500 \mu\text{g/L}$  is relatief hoog,  $<100 \mu\text{g/L}$  is relatief laag). De concentratie bromide lijkt dus geen voor de hand liggende reden om de waargenomen bromaatvorming te verklaren.

Ozon is ingebracht met een fijne bellen diffusor inbrengsysteem. Ten opzichte van een venturi-injectie verlaagt dit de kans op bromaatvorming. Wel betreft het een reactor op pilotschaal waardoor menging van ozon(gas) en water niet optimaal is wat de kans op bromaatvorming kan vergroten. Dit kan een (gedeeltelijke) verklaring zijn van de waargenomen bromaatvorming.

De samenstelling van de watermatrix verandert in de BAKF. Een gedeelte van het organisch materiaal (DOC en  $\text{UVA}_{254}$ ) wordt weggenomen en ammonium en nitriet worden (volledig) genitrificeerd tot nitraat. Door de verwijdering van organisch materiaal en nitriet in de BAKF zijn er tijdens de ozonisatie minder moleculen aanwezig waarmee ozon graag reageert. Dit levert enerzijds een efficiëntie op doordat ozon selectiever met microverontreinigingen kan reageren. Anderzijds, resulteert het waarschijnlijk ook in een grotere kans op zogenaamde vrije ozon, daarmee wordt bedoeld ozon die niet direct reageert met eenvoudig afbreekbare moleculen. Hoe hoger de concentratie vrije ozon hoe groter de kans op bromaatvorming. Daarnaast is vanuit kinetische modellen bekend dat ammonium een remmend effect kan hebben op de vorming van bromaat. Door de verwijdering van ammonium is dit mogelijke effect afwezig.

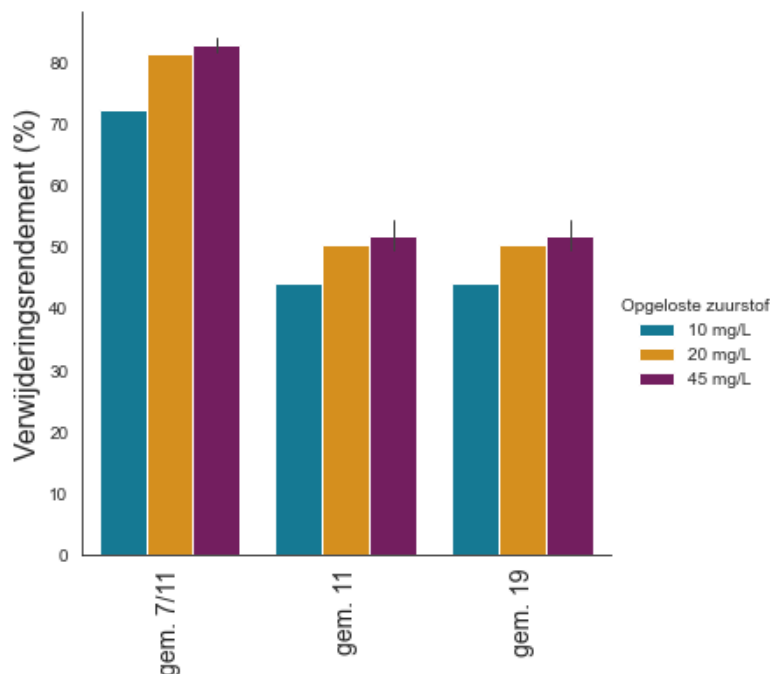
Tot specifieke ozondoseringen van ca.  $0,3 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$  lijkt de concentratie bromaat onder de  $1 \mu\text{g/L}$  te blijven en is de concentratie vrije ozon dus waarschijnlijk beperkt. Boven de  $0,3 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$  neemt vermoedelijk de concentratie vrije ozon toe waardoor concentraties bromaat boven de  $1 \mu\text{g/L}$  waargenomen zijn. Of voor een specifieke rwzi de  $\text{BO}_3$ -technologie

toepasbaar is moet blijken uit een lokale analyse van de combinatie van de concentratie bromide, het ozoninbrengsysteem, de samenstelling van de watermatrix, het  $\text{BO}_3$ -ontwerp en het lokale oppervlaktewatersysteem.

### 3.8 EFFECT VAN ZUURSTOFCONCENTRATIE

In aanvullende pilottesten na afronding van de ozontestdagen is onderzocht wat het effect is van de zuurstofconcentratie op de prestaties van de BAKF. De concentratie opgelost zuurstof in de oploop van de BAKF tijdens de ozontestdagen was ca. 45 mg/L. In twee aanvullende testen zijn zuurstofconcentraties van respectievelijk ca. 20 en 10 mg/L onderzocht. Deze twee aanvullende testen zijn uitgevoerd bij een EBCT van 30 minuten. In Figuur 19 is het effect van de zuurstofconcentratie op de verwijdering van microverontreinigingen gegeven.

**FIGUUR 19** EFFECT VAN CONCENTRATIE OPGELOSTE ZUURSTOF IN OPLOOP BAKF OP HET VERWIJDERINGSRENDEMENT OVER DE BAKF VAN MICROVERONTREINIGINGEN (GEMIDDELTE 7 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN, ALLE 11 GIDSSTOFFEN EN ALLE 19 (KANDIDAAT) GIDSSTOFFEN) BIJ EEN EBCT VAN 30 MINUTEN



Bij een zuurstofconcentratie van 10 mg/L is het verwijderingsrendement voor microverontreinigingen ca. 5 tot 10% lager dan bij 20 en 45 mg/L. Het verschil tussen 20 en 45 mg/L is niet heel eenduidig. Het verschil in verwijderingsrendementen tussen deze instellingen valt binnen de marge van variatie binnen een instelling.

Op de verwijdering van organische stoffen is het effect van de zuurstofconcentratie niet heel eenduidig, zie Tabel 10 en Bijlage D Figuur 26 en Figuur 27. Ten opzichte van de zuurstofconcentratie lijkt er een trend waarneembaar voor de DOC-verwijdering, al verschilde de DOC-concentratie wel per zuurstofconcentratietestperiode. Een vergelijkbare trend is voor de  $\Delta\text{UVA}_{254}$  niet waarneembaar. De verwijdering van nutriënten bij lagere zuurstofconcentraties is niet onderzocht.

**TABEL 10** GEMIDDELDE  $\text{UVA}_{254}$  EN DOC-CONCENTRATIE IN DE OPLOOP BAKF EN GEMIDDELDE  $\Delta\text{UVA}_{254}$  EN DOC-VERWIJDERING OVER DE BAKF BIJ VERSCHILLENDE CONCENTRATIES OPGELOSTE ZUURSTOF IN DE OPLOOP BAKF (EBCT 30 MIN)

Concentratie opgeloste zuurstof in oploop BAKF	$\text{UVA}_{254}$	DOC	$\Delta\text{UVA}_{254}$	DOC-verwijdering	Aantal DOC metingen	Aantal $\text{UVA}_{254}$ metingen
mg/L	$\text{cm}^{-1}$	mg/L	%	%	#	meetdagen
45	0,37	11,3	29	15,0	10	28
20	0,27	10,4	35	8,5	3	4
10	0,33	10,2	29	7,4	2	5

# 4

## INPASBAARHEID IN DE NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK

Hieronder is de inpasbaarheid gegeven van de  $\text{BO}_3$ -technologie op Nederlandse rwzi's met een schaalgrootte van 100.000 i.e.

### 4.1 EFFECT OP BEDRIJFSVOERING

#### SLIBPRODUCTIE

De invang van onopgeloste bestanddelen in de BAKF is de voornaamste factor die de slibproductie bepaald. Deze factor kan per rwzi aanzienlijk verschillen. Een hoge concentratie onopgeloste bestanddelen in de oploop van de  $\text{BO}_3$  resulteert in een navenant hogere slibproductie. Voor een rwzi van 100.000 i.e. en een concentratie onopgeloste bestanddelen van 7,5 mg/L in de oploop van de  $\text{BO}_3$  wordt de jaarlijkse slibproductie geschat op ca. 16 ton DS/jaar. Door de relatief arme voeding waarmee de  $\text{BO}_3$  gevoed wordt vindt er nauwelijks biomassagroei in de BAKF plaats. Deze slibproductie is zeer klein ten opzichte van de slibproductie in het actiefslibproces. Voor de meeste rwzi's zal de slibproductie voortkomend uit de invang van onopgeloste bestanddelen en biomassagroei een verwaarloosbaar klein effect hebben op de totale slibproductie van de rwzi. Bij periodieke spoeling van de BAKF, zie volgende kopje, zal het vrijgekomen slib worden geretourneerd naar het actiefslibproces.

#### SPOELWATERVERBRUIK EN WASWATERPRODUCTIE

De BAKF in het pilotonderzoek was uitgerust met een automatisch spoelprogramma dat geactiveerd werd bij een bepaalde mate van vervuiling van het filterbed in de BAKF gemeten als drukverschil. Afhankelijk van de EBCT betrof de frequentie van terugspoelen in de pilot-testen tussen de eens per 2 en 14 dagen. Dit is in lijn met GAK- en zandfilterinstallaties die bedreven worden zonder dosering van chemicaliën voor P- of N-verwijdering. Bij het terugspoelen ontstaat een waswaterstroom. Deze stroom is relatief laag in vuillast en kan teruggevoerd worden naar het actiefslibproces op de rwzi. Op basis van een spoelfrequentie van eens per 4 dagen is de waswaterstroom die hierbij ontstaat geschat op 0,5% tot 1% van het debiet van de nabehandeling. Dit heeft geen noemenswaardig effect op het functioneren van de rwzi.

#### ENERGIEVERBRUIK

Het energieverbruik van de  $\text{BO}_3$ -technologie komt voornamelijk voort uit het opvoeren van water en de ozonbehandeling van het water en betreft dus enkel elektriciteitsverbruik. Door de lage absolute ozondosering in de  $\text{BO}_3$ -technologie is het elektriciteitsverbruik en opgesteld elektrisch vermogen relatief klein, een voordeel in tijden van overbelaste elektriciteitsnetwerken. Belangrijke parameters die het elektriciteitsverbruik bepalen zijn de benodigde opvoerhoogte, de DOC-concentratie, de EBCT en de specifieke ozondosering. Voor het bepalen van het energieverbruik zijn conform de IPMV-voorschriften de volgende uitgangspunten aangehouden: een opvoerhoogte van 6 meter en een DOC-concentratie van 11 mg/L.

Het energieverbruik is voor twee BO<sub>3</sub> ontwerpen uitgewerkt. Ontwerp 1 met een EBCT van 22 minuten en specifieke ozondosering van 0,2 g O<sub>3</sub>/g DOC. Ontwerp 2 met een EBCT van 30 minuten en specifieke ozondosering van 0,3 g O<sub>3</sub>/g DOC.

Het elektriciteitsverbruik is op twee manieren bepaald. De eerste is conform het IPMV CO<sub>2</sub>-footprint model voor een standaard rwzi. Dit model bevat een ozonisatieproces inclusief mengers waarbij op basis van kengetallen een elektriciteitsverbruik is ingeschat. Conform dit model is het elektriciteitsverbruik van ontwerp 1 ca. 410.000 kWh/jaar. Omgerekend is dit is 0,076 kWh/m<sup>3</sup> behandeld water. Daarnaast is voor de IPMV standaard rwzi het elektriciteitsverbruik ook bepaald op basis van een ontwerp waarin het elektriciteitsverbruik conform specificaties van leveranciers is meegenomen. Conform deze uitwerking is het elektriciteitsverbruik van ontwerp 1 ca. 300.000 kWh/jaar. Omgerekend is dit is 0,056 kWh/m<sup>3</sup> behandeld water. Hiervan is ca. 42% gerelateerd aan het opvoeren van water en ca. 57% aan de ozonbehandeling.

Het energieverbruik van ontwerp 2 is conform het IPMV CO<sub>2</sub>-footprint model ca. 450.000 kWh/jaar. Omgerekend is dit is 0,084 kWh/m<sup>3</sup> behandeld water. Op basis van een ontwerp gebaseerd op de leveranciersspecificaties is het elektriciteitsverbruik van ontwerp 2 ca. 370.000 kWh/jaar. Omgerekend is dit is 0,069 kWh/m<sup>3</sup> behandeld water. Hiervan is ca. 34% gerelateerd aan het opvoeren van water en ca. 65% aan de ozonbehandeling.

Het totale elektriciteitsverbruik van de standard IPMV 100.000 i.e. rwzi is ca. 1.200.000 kWh/jaar. Door toepassing van de BO<sub>3</sub>-technologie uitgevoerd als ontwerp 1 neemt het verbruik met 25% tot 34% toe (ca. 300.000 tot 410.000 kWh/jaar). Door toepassing van de BO<sub>3</sub>-technologie uitgevoerd als ontwerp 2 neemt het verbruik met 31% tot 38% toe (ca. 370.000 tot 450.000 kWh/jaar).

#### **CHEMICALIËNVERBRUIK**

Net zoals bij conventionele ozonisatie is bij de BO<sub>3</sub>-technologie zuurstof vereist voor de productie van ozon. Door de verlaagde ozondosis is ook het zuurstofverbruik lager dan bij conventionele ozonisatie. Ook de BAKF dient voorzien te worden van zuurstof voor de gewenste aerobe condities. De zuurstof die vrijkomt in het afgas van de ozonbehandeling kan ingezet worden om de BAKF te voorzien van zuurstof.

#### **EFFLUENTKwaliteit**

De kwaliteit van het effluent zal toenemen door de verwijdering van microverontreinigingen. Dit is bevestigd in de uitgevoerde biologische effectmetingen waaruit is gebleken dat de ecotoxiciteit afneemt met meer dan 50%. Naast de verwijdering van microverontreinigingen heeft ook de verwijdering van ammonium, nitriet en onopgeloste bestanddelen een positief effect op de effluentkwaliteit. Met name voor kwetsbare oppervlaktewateren kan dit een waardevolle bijvangst zijn. De gereduceerde emissie van ammonium zorgt voor een verlaging van de toxische druk en zuurstofvraag, de verwijdering van onopgeloste bestanddelen resulteert in een verlaagde instroom van slib naar het oppervlaktewater.

## **4.2 INPASSING OP DE LOCATIE**

Voor de inpassing van de BO<sub>3</sub>-technologie op een rwzi dient een punt in de waterlijn gevonden te worden waar het water kan worden opgepakt. Typisch is dit in een verzamelput van de nabezinktanks, de effluentleiding of het effluentgemaal. Na behandeling in

de  $\text{BO}_3$ -installatie kan het water uitstromen via het oude lozingspunt. Om een piekaanvoer van  $1.040 \text{ m}^3/\text{uur}$  te kunnen behandelen zoals voorgeschreven bij een 100.000 i.e. rwzi is een ozonreactor van circa  $130 \text{ m}^3$  nodig (minimaal 7,5 minuten contacttijd). Afhankelijk van de uitvoeringsvorm is het oppervlak van de ozonreactor 20 tot  $60 \text{ m}^2$ . Voor de BAKF is een oppervlakte van 140 tot  $190 \text{ m}^2$  nodig bij een filterbedhoogte van 2,8 m. Het totale ruimtebeslag, inclusief opstelling zuurstoftank, filtraatbuffer, spoelbuffer en leidingwerk, wordt geschat op 250 tot  $400 \text{ m}^2$ .

### 4.3 MODULARITEIT

De  $\text{BO}_3$ -technologie is modulair in de zin dat een reeds gerealiseerde BAKF of ozoninstallatie op een rwzi uitgebreid kan worden tot een  $\text{BO}_3$ -installatie. In het geval van een bestaande BAKF kan de ozoninstallatie alsnog nageschakeld worden. Bij een bestaande ozoninstallatie kan de BAKF achteraf alsnog ingepast worden.

Van zowel de BAKF als de ozoninstallatie zijn diverse uitvoeringsvormen beschikbaar. Bekende uitvoeringsvormen van de BAKF zijn vast bed filters vergelijkbaar met vast bed zandfilters, veelal uitgevoerd als betonnen bakken, en (druk)ketels zoals veelal toegepast in drinkwaterproductie. Een keteluitvoering is zeer modulair in de zin van uitbreidbaarheid en verplaatsbaarheid. Een betonnen vast bed filter bestaat doorgaans uit meerdere filterunits, door het bijbouwen van een extra filterunit is deze uitvoeringsvorm dus ook uitbreidbaar en daarmee adaptief voor toekomstige toename in aanvoerdebiet te noemen.

Ten opzichte van een stand-alone ozonisatieproces is de ozoninstallatie bij  $\text{BO}_3$  aanzienlijk kleiner. Door de lage ozondosering volstaat ook een korte hydraulische verblijftijd. Dit biedt kansen voor modulaire bouw van de ozonreactor(en).

Een andere vorm van modulariteit zit in de combinatie van de twee processtappen in de  $\text{BO}_3$ -technologie. Het vereiste verwijderingsrendement kan zowel met de BAKF alsook de ozoninstallatie bijgestuurd worden. Dit betekent dat er een vrijheidsgraad is in de te behalen rendementen van beide processtappen. Hierdoor ontstaat een flexibiliteit in de grootte en/of aantallen van de BAKF- en ozonreactoren.

### 4.4 VOOR WELKE TYPE RWZI'S GESCHIKT

De  $\text{BO}_3$ -technologie is in principe toepasbaar op alle type rwzi's waar de wens is om microverontreinigingen te verwijderen.

De technologie kan zowel worden toegepast op rwzi's waar nog geen verwijderingsstap voor microverontreinigingen is gerealiseerd als op rwzi's waar al een BAKF of ozoninstallatie aanwezig is. In het geval van een bestaande BAKF kan de ozoninstallatie alsnog nageschakeld worden. Bij een bestaande ozoninstallatie kan de BAKF achteraf alsnog ingepast worden.

Door kenmerken als laag energie-, grondstoffen- en spoelwaterverbruik, geringe slibproductie, hoog verwijderingsrendement, breed palet stoffen verwijderd, bijkomstige verregaande verwijdering van ammonium en modulaire uitvoeringsvormen sluit de  $\text{BO}_3$ -technologie goed aan bij huidige doelstellingen van de waterschappen op thema's zoals duurzaamheid, circulariteit en doelmatigheid.



# 5

## UITWERKING OP PRAKTIJKSCHAAL EN VERGELIJKING MET REFERENTIETECHNOLOGIEËN

Voor de vergelijking van de BO<sub>3</sub>-technologie met de IPMV-referentietechnologieën op de IPMV-criteria verwijderingsrendement voor microverontreinigingen, CO<sub>2</sub>-footprint en kosten is een uitwerking gemaakt van de BO<sub>3</sub>-technologie op praktijkschaal. De uitwerking is conform de IPMV-richtlijnen opgesteld voor een praktijkschaal van een 100.000 i.e. rwzi. Het prijspeil behorend bij de IPMV-referentietechnologieën is 2018. De raming van de BO<sub>3</sub>-technologie is daar ook op afgestemd.

### 5.1 ONTWERPGRONDSLAGEN

Voor de uitwerking op een 100.000 i.e. schaalgrootte zijn er op basis van de pilottesten dimensioneringsgrondslagen ingeschat. Deze grondslagen zijn gehanteerd in de berekeningen van de inpasbaarheid in de Nederlandse zuiveringspraktijk en voor het ramen van de jaarlijkse kosten en CO<sub>2</sub>-footprint.

Afhankelijk van het te bereiken verwijderingsrendement, de selectie microverontreinigingen waar het rendement betrekking op heeft, de prestaties van de rwzi en de lokale omstandigheden van de rwzi is een ontwerp van de BO<sub>3</sub>-technologie op maat te maken voor een specifieke situatie. Voor onderhavige rapportage zijn twee generieke ontwerpen van de BO<sub>3</sub>-technologie uitgewerkt. Uiteraard zijn er ook ontwerpen te maken met hogere of lagere verwijderingsrendementen.

De volgende twee ontwerpen zijn uitgewerkt:

- Ontwerp 1 voor ca. 85% verwijderingsrendement in de BO<sub>3</sub>-installatie voor 7 van de 11 gidsstoffen, hierbij zijn een minimale EBCT van 22 minuten en een specifieke ozon-dosering van 0,2 g O<sub>3</sub>/g DOC aangehouden;
- Ontwerp 2 voor >90% verwijderingsrendement in de BO<sub>3</sub>-installatie voor 7 van de 11 gidsstoffen, hierbij zijn een minimale EBCT van 30 minuten en een specifieke ozon-dosering van 0,3 g O<sub>3</sub>/g DOC aangehouden.

In Tabel 11 zijn de specificaties van het te behandelen afvalwater conform STOWA IPMV-uitgangspunten gegeven.

TABEL 11 SPECIFICATIES TE BEHANDELEN AFVALWATER STANDARD RWZI IPMV

Parameter	Eenheid	Waarde
Capaciteit rwzi	i.e. 150 g TZV	100.000
Jaardebiet rwzi	$\text{m}^3/\text{jaar}$	7.665.000
Percentage te behandelen	%	70%
Jaardebiet te behandelen	$\text{m}^3/\text{jaar}$	5.365.500
Ontwerp capaciteit nabehandeling	$\text{m}^3/\text{uur}$	1.040
DOC – oploop nabehandeling	mg/L	11
$\text{NO}_2$ -N – oploop nabehandeling	mg/L	0,2
$\text{NH}_4$ -N – oploop nabehandeling	mg/L	1,5
Opgelost zuurstof – oploop nabehandeling	mg/L	5

In Tabel 12 en Tabel 13 zijn de geschatte dimensioneringsgrondslagen van respectievelijk de BAKF en de ozonreactor gegeven.

TABEL 12 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN BAKF

Parameter	Eenheid	Ontwerp 1	Ontwerp 2
$\text{EBCT}_{\text{minimaal}}$ (bij maximale aanvoer)	minuten	22	30
$\text{EBCT}_{\text{nominaal}}$ (bij nominale aanvoer)	minuten	26	36
Volume GAK <sup>12</sup>	$\text{m}^3$	381	520
Vervangingstermijn GAK <sup>13</sup>	jaar		15
Zuurstof setpoint oploop BAKF	mg/L		20
$\Delta\text{UVA}_{254}$	%	25%	30%
DOC-verwijdering <sup>14</sup>	%	5-20% (15%)	15-20% (20%)
$\text{NO}_2$ -omzetting	%		>95%
$\text{NO}_2$ afloop	mg/L		<0,015
$\text{NH}_4$ -omzetting	%		>95%
$\text{NH}_4$ afloop	mg/L		<0,1

TABEL 13 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN OZONREACTOR

Parameter	Eenheid	Ontwerp 1	Ontwerp 2
Contacttijd <sub>minimaal</sub> (bij maximale aanvoer)	minuten		7,5
Contacttijd <sub>nominaal</sub> (bij nominale aanvoer)	minuten		9
Specifieke ozondosering	$\text{g O}_3/\text{g DOC}$	0,20	0,30
Ozondosering	$\text{g O}_3/\text{m}^3$	1,9	2,7

- 12 Dit kan zowel verse als reeds verzadigde GAK zijn. Voor berekening van de CO<sub>2</sub>-footprint en kosten is uitgegaan van verse GAK.
- 13 De vervangingstermijn van de GAK is gebaseerd op de ervaring met BAKF in de NieuWater UltraPuurWaterfabriek te Emmen. De vervangingstermijn is ook aangehouden als afschrijvingstermijn voor de kostenberekening.
- 14 De DOC-verwijdering is weergegeven als de range zoals waargenomen in de pilottesten, de waarde tussen haakjes is gebruikt voor de ontwerpberoeeningen.

## 5.2 CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT

De CO<sub>2</sub>-footprint is gegeven in Tabel 14. De footprint is berekend op basis van het door STOWA verstrekte model “CO<sub>2</sub>-footprint rwzi’s micro’s 100.000 i.e. versie 5”.

**TABEL 14** CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT IPMV-REFERENTIE-TECHNOLOGIEËN EN BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE VOOR EEN 100.000 I.E. SCHAAL

Parameter	Eenheid	PACAS	Ozon+ZF	GAK-filtratie	BO <sub>3</sub> Ontwerp 1	BO <sub>3</sub> Ontwerp 2
CO <sub>2</sub> – totaal <sup>15</sup>	ton CO <sub>2</sub> /jaar	2.198	1.953	3.009	1.641	1.699
CO <sub>2</sub> – enkel aanvullende stap <sup>16</sup>	ton CO <sub>2</sub> /jaar	933	688	1744	376	434
CO <sub>2</sub> per kuub rwzi debiet <sup>17</sup>	g CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	122	90	228	49	56
CO <sub>2</sub> per kuub behandeld debiet <sup>18</sup>	g CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	122	128	325	70	81

De CO<sub>2</sub>-footprint in Tabel 14 is berekend op basis van een elektriciteitsverbruik conform het IPMV CO<sub>2</sub>-footprint model voor een standard rwzi. Dit model bevat een standard ozonisatieproces (diffusorsysteem met ca. 6 meter waterkolom) waarbij op basis van kengetallen een elektriciteitsverbruik is ingeschat voor BO<sub>3</sub> ontwerp 1 en 2. Door de lage ozondosis zijn voor de BO<sub>3</sub>-technologie ook andere wijze van ozonisatie mogelijk. Uit een geoptimaliseerd ontwerp gemaakt voor de 100.000 i.e. IPMV standard rwzi blijkt dat het energieverbruik hierdoor lager kan uitvallen (zie toelichting in paragraaf 4.1). De CO<sub>2</sub>-footprints van de geoptimaliseerde BO<sub>3</sub> ontwerpen 1 en 2 zijn respectievelijk, 318 en 385 ton CO<sub>2</sub>/jaar, 41 en 50 g CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> rwzi debiet en 59 en 72 g CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> behandeld debiet.

Met name het lage verbruik van actiefkool en het niet reacteren van de actiefkool bij BO<sub>3</sub> maakt een groot verschil ten opzichte van PACAS en GAK-filtratie. Bij PACAS wordt continue ca. 15 mg/L poederactiefkool aan het afvalwater gedoseerd wat zowel in kosten als CO<sub>2</sub>-footprint ongunstig is. Ook betekent een 15 mg/L PAK-dosering een toename in slibproductie (ton DS/jaar) van ca. 7,5%. Bij GAK-filtratie wordt de granulaire actiefkool ca. 2 maal per jaar uit de installatie genomen en bij de leverancier gereactiveerd. Reactivatie is een energie-intensief proces waarbij veel aardgas gebruikt wordt. Ook gaat er ca. 15% van de actiefkool verloren die na elke regeneratie aangevuld moet worden.

Ten opzichte van een standard ozonisatie (ozon + zandfilter) is met name het verbruik van elektriciteit en zuurstof veel lager in de BO<sub>3</sub>-technologie. Het elektriciteitsverbruik voor standard ozonisatie, exclusief het opvoeren van water, is ca. 0,1 kWh/m<sup>3</sup>. Voor BO<sub>3</sub> ontwerp 1 is dit inclusief 6 meter opvoeren van water ca. 0,056 en 0,076 kWh/m<sup>3</sup> voor respectievelijk een ontwerp conform het IPMV CO<sub>2</sub>-footprint model en een geoptimaliseerd ontwerp. Voor ontwerp 2 is dit inclusief 6 meter opvoeren van water ca. 0,069 en 0,084 kWh/m<sup>3</sup> voor respectievelijk een ontwerp conform het IPMV CO<sub>2</sub>-footprint model en een geoptimaliseerd ontwerp. Het verschil tussen standard ozonisatie en de BO<sub>3</sub>-technologie is het resultaat van de verwijdering van microverontreinigingen, organisch materiaal (UVA<sub>254</sub> en DOC) en nitriet in de BAKF waardoor de absolute ozondosis bij BO<sub>3</sub> een factor 3 tot 4 lager ligt dan bij standard ozonisatie. Het zuurstofverbruik is ca. een factor 2 lager bij BO<sub>3</sub> ten opzichte van standard ozonisatie.

In Figuur 20 en Figuur 21 is de opbouw van de CO<sub>2</sub>-footprint gegeven voor ontwerp 1 en ontwerp 2 van de BO<sub>3</sub>-technologie.

15 CO<sub>2</sub>-footprint van de IPMV-referentietechnologie of BO<sub>3</sub>-technologie inclusief de rwzi zelf (1.265 ton CO<sub>2</sub>/jaar)

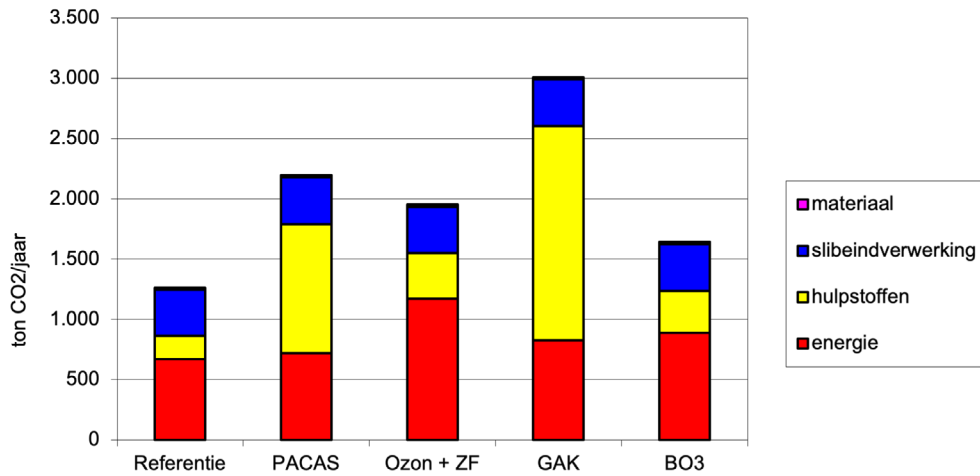
16 CO<sub>2</sub>-footprint van de IPMV-referentietechnologie of BO<sub>3</sub>-technologie exclusief de rwzi zelf

17 Enkel van de aanvullende stap berekend over het totale rwzi debiet (7.665.000 m<sup>3</sup>/jaar)

18 Enkel van de aanvullende stap berekend over het debiet van de nabehandeling (5.365.000 m<sup>3</sup>/jaar)

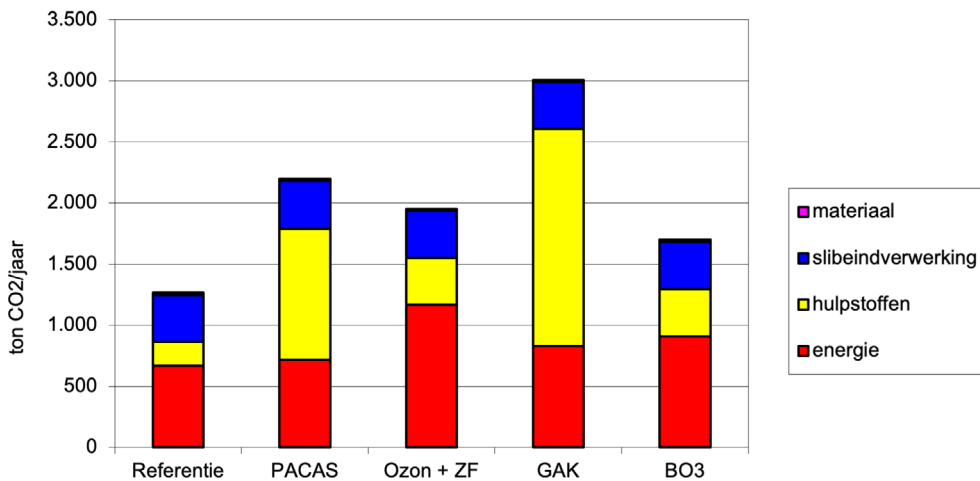
FIGUUR 20

OPBOUW VAN DE CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT VAN DE REFERENTIE RWZI ZONDER EN MET AANVULLENDE ZUIVERINGSSTAPPEN. VOOR DE BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE BETREFT HET DE CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT BEHOREND BIJ ONTWERP 1 (NAGESCHAKELD VERWIJDERINGSRENDEMENT 85% VOOR 7 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN)



FIGUUR 21

OPBOUW VAN DE CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT VAN DE REFERENTIE RWZI ZONDER EN MET AANVULLENDE ZUIVERINGSSTAPPEN. VOOR DE BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE BETREFT HET DE CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT BEHOREND BIJ ONTWERP 2 (NAGESCHAKELD VERWIJDERINGSRENDEMENT >90% VOOR 7 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN)



Ten opzichte van de referentietechnieken PACAS, ozonisatie met zandfiltratie en GAK-behandeling is de CO<sub>2</sub>-footprint van de BO<sub>3</sub>-technologie relatief laag. De lage CO<sub>2</sub>-footprint komt voornamelijk door:

- Verwijdering van DOC en nitriet in de BAKF en daardoor lagere absolute ozon dosering;
- Lage specifieke ozon dosering ten opzichte van ozonisatie met zandfiltratie;
- Geen regeneratie of dosering van actiefkool zoals bij GAK-behandeling of PACAS.

+

### 5.3 KOSTEN

De geraamde stichtingskosten, kapitaallasten en operationele kosten van de BO<sub>3</sub>-technologie voor een 100.000 i.e. schaal rwzi zijn in Tabel 15, Tabel 16 en Tabel 17 gegeven. Voor de kostenraming zijn de IPMV-uitgangspunten gehanteerd, deze zijn in Bijlage E gegeven. Het prijspeil van de kostenraming is 2018. De gepresenteerde kosten dienen derhalve geenszins voor budgetteringsdoeleinden gebruikt te worden. Wel kunnen ze ingezet worden voor de onderlinge vergelijking van technologieën die binnen het IPMV uitgewerkt zijn.

**TABEL 15** RAMING STICHTINGSKOSTEN PER DISCIPLINE BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE OP 100.000 I.E. SCHAAL

Stichtingskosten	Ontwerp 1	Ontwerp 2
Stichtingskosten C – BAKF	€ 2.850.000	€ 3.350.000
Stichtingskosten WTB – BAKF	€ 690.000	€ 820.000
Stichtingskosten E/PA – BAKF	€ 360.000	€ 420.000
Stichtingskosten GAK – BAKF	€ 460.000	€ 620.000
Stichtingskosten C – Ozon	€ 770.000	€ 810.000
Stichtingskosten WTB – Ozon	€ 2.010.000	€ 2.100.000
Stichtingskosten E/PA – Ozon	€ 650.000	€ 680.000
Investeringskosten Totaal (incl. BTW)	€ 7.790.000	€ 8.800.000

**TABEL 16** RAMING KAPITAALSLASTEN (€ PER JAAR) BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE OP 100.000 I.E. SCHAAL

Kostenpost	Ontwerp 1	Ontwerp 2
Kapitaalslasten C – BAKF	€ 140.000	€ 160.000
Kapitaalslasten WTB – BAKF	€ 60.000	€ 70.000
Kapitaalslasten E/PA – BAKF	€ 40.000	€ 50.000
Kapitaallasten GAK – BAKF	€ 40.000	€ 50.000
Kapitaalslasten C – ozonisatie	€ 40.000	€ 40.000
Kapitaalslasten WTB – ozonisatie	€ 160.000	€ 170.000
Kapitaalslasten E/PA – ozonisatie	€ 70.000	€ 80.000
Totaal (incl. BTW)	€ 550.000	€ 620.000

**TABEL 17** RAMING OPERATIONELE KOSTEN (€ PER JAAR) BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE OP 100.000 I.E. SCHAAL

Kostenpost	Ontwerp 1	Ontwerp 2
Onderhoud C – BAKF	€ 8.000	€ 9.000
Onderhoud WTB – BAKF	€ 12.000	€ 14.000
Onderhoud E/PA – BAKF	€ 6.000	€ 7.000
Onderhoud C – Ozon	€ 2.000	€ 2.000
Onderhoud WTB – Ozon	€ 33.000	€ 35.000
Onderhoud E/PA – Ozon	€ 11.000	€ 11.000
Personeel	€ 25.000	€ 25.000
Zuurstof	€ 28.000	€ 29.000
Huur LOX-tank	€ 12.000	€ 12.000
Elektriciteit	€ 29.000	€ 35.000
Slibafvoer	€ 10.000	€ 10.000
Totaal (incl. BTW)	€ 176.000	€ 189.000

De BO<sub>3</sub>-technologie is een combinatietechnologie bestaand uit twee processtappen. Hierdoor liggen de stichtingskosten hoger dan voor een 'stand alone' technologie zoals PACAS, GAK of ozonisatie. De combinatie van BAKF en ozon bij BO<sub>3</sub> resulteert echter in zeer lage verbruiken van energie- en grondstoffen (elektriciteit, zuurstof en actiefkool) waardoor de operationele kosten laag zijn. De impact van stijgende energie- en grondstofprijzen is hierdoor beperkt. Middels een berekening van de netto contante waarde kan het voordeel van lage operati-

onele kosten in combinatie met stijgende energie- en grondstofprijzen en fluctuerende rente- en inflatierisico's inzichtelijk gemaakt worden.

Conform de IPMV-richtlijnen zijn de dimensionering en kostenraming van de  $\text{BO}_3$ -technologie gebaseerd op een 100.000 i.e. rwzi waarvan 70% van het jaardebiet wordt behandeld in de aanvullende zuiveringsstap. In Tabel 18 zijn de kosten gegeven per kuub rwzi debiet en per kuub debiet van de aanvullende zuiveringsstap (70% van jaardebiet) weergegeven.

**TABEL 18** KOSTEN  $\text{BO}_3$ -TECHNOLOGIE OP EEN 100.000 I.E. SCHAAL PER KUUB RWZI DEBIET EN DEBIET VAN DE AANVULLENDE ZUIVERINGSSTAP

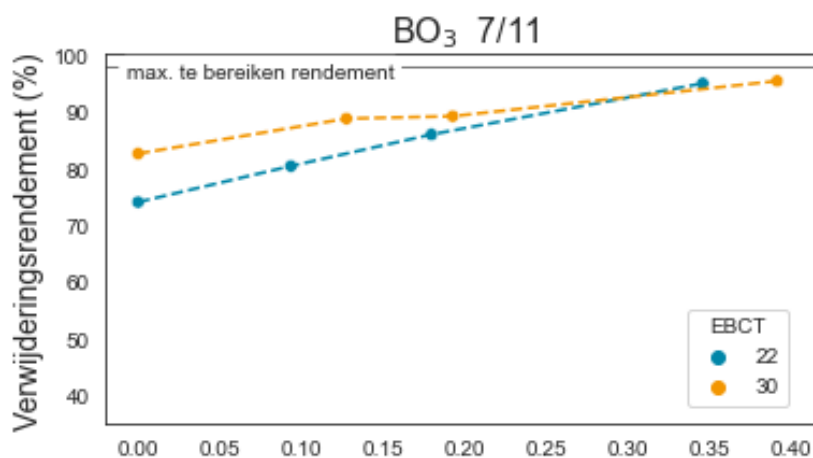
Parameter	Eenheid	Ontwerp 1	Ontwerp 2
Kosten per kuub rwzi debiet	€/m <sup>3</sup>	0,09	0,10
Kosten per kuub debiet aanvullende zuiveringstap	€/m <sup>3</sup>	0,13	0,15

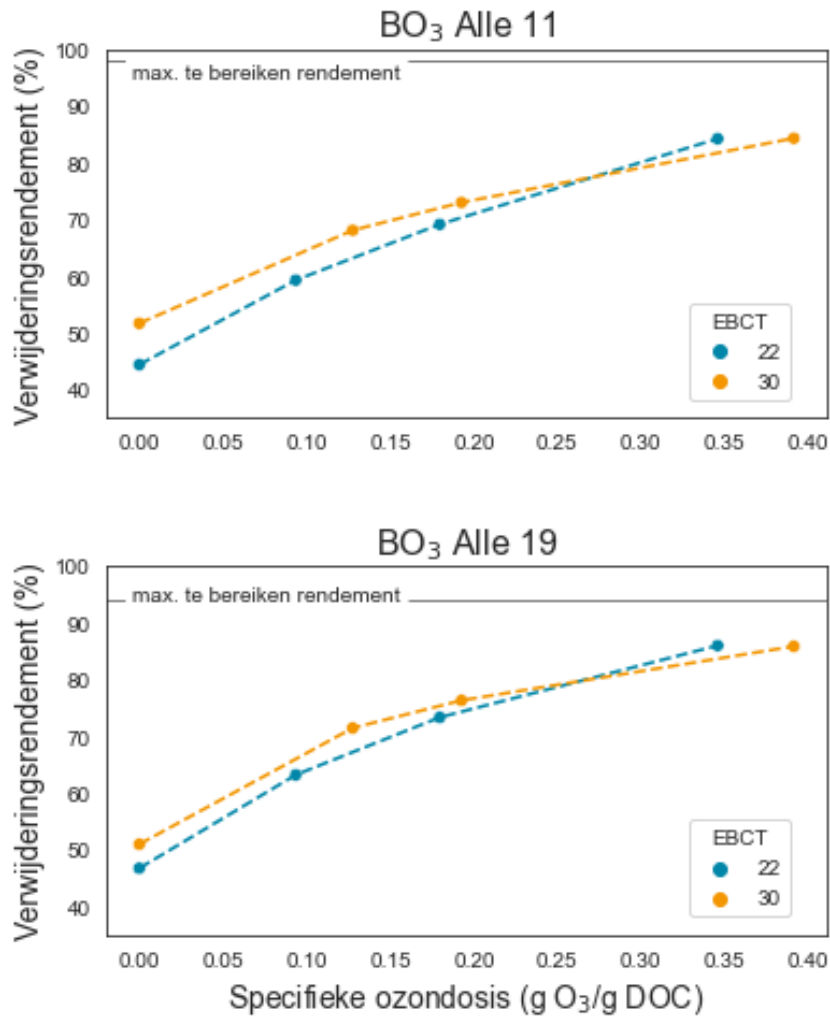
## 5.4 VERWIJDERINGSRENDEMENT GIDSSTOFFEN

### 5.4.1 VERWIJDERING OVER ENKEL DE $\text{BO}_3$ -TECHNOLOGIE

Voor  $\text{BO}_3$  ontwerpen 1 en 2 is in Figuur 22 een overzicht gegeven van de in het pilotonderzoek behaalde verwijderingsrendementen voor de  $\text{BO}_3$ -technologie voor de 7 beste van de 11 gidsstoffen (links), alle 11 gidsstoffen (midden) en alle 19 (kandidaat)gidsstoffen (rechts). Dit betreft de rendementen enkel over de  $\text{BO}_3$ -technologie, het zogenaamde nageschakelde verwijderingsrendement, dus exclusief het rendement van de rwzi zelf. De EBCT in de BAKF en de specifieke ozondosis in de ozon behandeling zijn tegen elkaar uitgezet. De punten in de figuur betreffen de waargenomen waarden, de stippellijnen enkel verbindinglijnen tussen punten. De doorgetrokken lijnen geven de maximaal te bereiken verwijderingsrendementen aan. Doordat concentraties van microverontreinigingen in de afloop van de  $\text{BO}_3$ -pilotinstallatie regelmatig onder meetbereik lagen en in dat geval de meetgrens als concentratie is aangenomen voor de berekening van het verwijderingsrendement liggen de maximaal te bereiken verwijderingsrendementen altijd onder de 100%.

**FIGUUR 22** HET NAGESCHAKELD VERWIJDERINGSRENDEMENT OVER DE  $\text{BO}_3$  (EXCL. RENDEMENT RWZI) BIJ EBCTS VAN 30 EN 22 MINUTEN VOOR DE 7 BESTE VAN DE 11 GIDSSTOFFEN (LINKS), ALLE 11 GIDSSTOFFEN (MIDDEN) EN ALLE 19 (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (RECHTS) UITGEZET TEGEN DE SPECIFIEKE OZONDOSIS. DE PUNTEN IN DE FIGUUR BETREFFEN DE WAARGENOMEN WAARDEN, DE STIPPELLIJNEN DE VERBINDINGSLIJNEN TUSSEN PUNTEN. DE DOORGETROKKEN LIJN GEEFT HET MAXIMAAL TE BEREIKEN VERWIJDERINGSRENDEMENT AAN





Voor ontwerp 1 met een EBCT van 22 minuten en specifieke ozondosering van 0,2 g O<sub>3</sub>/g DOC is het verwijderingsrendement 85% voor 7 van de 11 gidsstoffen. Voor ontwerp 2 met een EBCT van 30 minuten en specifieke ozondosering van 0,3 g O<sub>3</sub>/g DOC is het verwijderingsrendement 90% voor 7 van de 11 gidsstoffen.

Met alleen de BAKF zonder ozonisatie kan een rendement van meer dan 80% behaald worden voor 7 van de 11 gidsstoffen bij een EBCT van 30 minuten. Door de combinatie van BAKF en ozonisatie (i.e. BO<sub>3</sub>-technologie) kunnen nog hogere rendementen behaald worden, deze benaderen het maximaal te behalen verwijderingsrendement.

Voor de verwijdering van een breder palet aan microverontreinigingen, bijv. alle 11 gidsstoffen of alle 19 (kandidaat)gidsstoffen, is de meerwaarde duidelijk zichtbaar van de combinatie van BAKF en ozonisatie (i.e. BO<sub>3</sub>-technologie). Met enkel de BAKF worden geen hoge verwijderingsrendementen behaald. Met de BO<sub>3</sub>-technologie neemt bij relatief lage specifieke ozondoseringen van 0,1 – 0,2 g O<sub>3</sub>/g DOC het verwijderingsrendement al aanzienlijk toe. Het theoretisch maximaal te behalen verwijderingsrendement wordt niet behaald. Zoals te zien is in Figuur 22 komt dit doordat er enkele individuele stoffen zijn die slechts tot 50 á 60% worden verwijderd.

#### 5.4.2 VERWIJDERING OVER DE RWZI MET DE $BO_3$ -TECHNOLOGIE

In Figuur 23 is voor  $BO_3$  ontwerpen 1 en 2 het verwijderingsrendement van de rwzi met de  $BO_3$ -technologie weergegeven. Hierbij is de STOWA tool 2020-06 gebruikt en zijn voor de rwzi zelf dezelfde aannames gedaan als in paragraaf 3.3, welke hieronder nogmaals zijn gegeven:

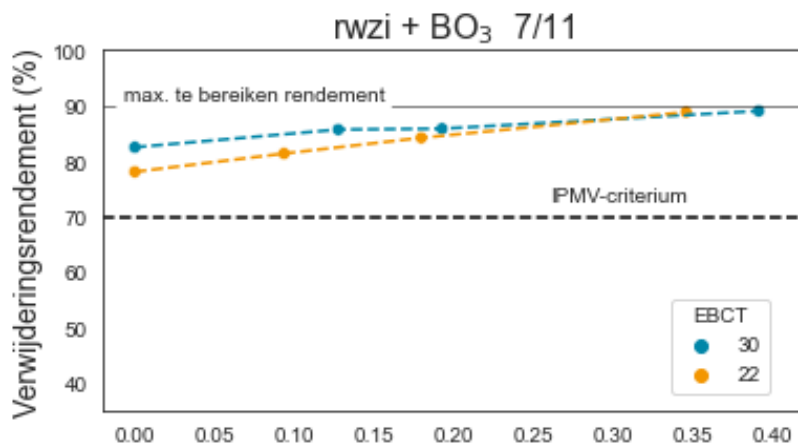
- Verwijderingsrendement 7/11 gidsstoffen in de rwzi = 40%
- Verwijderingsrendement 11/11 gidsstoffen in de rwzi = 20%
- Verwijderingsrendement 19 (kandidaat)gidsstoffen in de rwzi = 20%
- Capaciteit aanvullende zuiveringsstap = 85% van het jaardebiet
- By-pass aanvullende zuiveringsstap = 15% van het jaardebiet

De aannames over het verwijderingsrendement in de rwzi betreffen een conservatieve inschatting op basis van praktijkervaringen van meerdere Nederlandse rwzi's. De 85% van het jaardebiet als capaciteit van de aanvullende zuiveringsstap komt voor veel Nederlandse rwzi's overeen met een capaciteit van ca. 1,6x DWA.

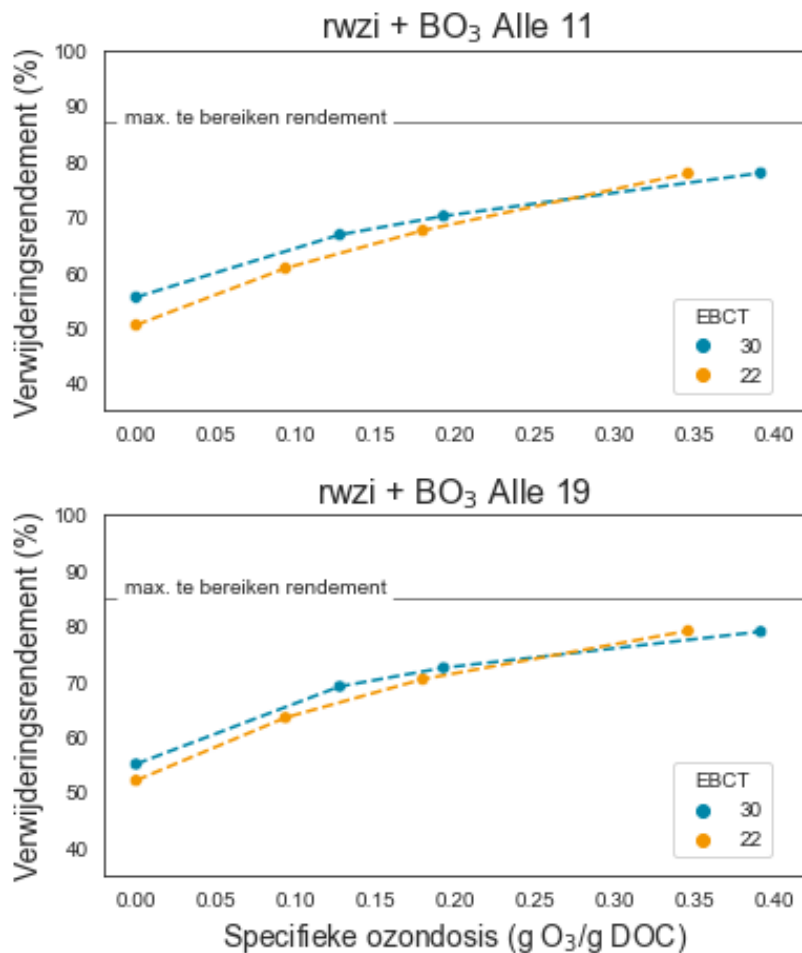
De doorgetrokken lijn in Figuur 23 geeft het maximaal te bereiken verwijderingsrendement aan. Het maximaal te bereiken verwijderingsrendement ligt altijd ruim onder de 100% doordat het verwijderingsrendement van de rwzi zelf beperkt is tot 40% voor de 7 beste van de 11 gidsstoffen en tot 20% voor alle 11 gidsstoffen en alle 19 (kandidaat)gidsstoffen, niet het volledige rwzi debiet met de  $BO_3$ -installatie wordt behandeld, en de concentraties van microverontreinigingen in de afloop van de  $BO_3$ -pilotinstallatie regelmatig onder meetbereik lagen en in dat geval de meetgrens als concentratie is aangenomen voor de berekening van het verwijderingsrendement. Voor een rwzi met een rendement van 40% en nabehandelingscapaciteit van 85% van het jaardebiet is het theoretisch maximaal te behalen verwijderingsrendement, zelfs bij een volledige verwijdering (100%) in de nabehandeling, gelimiteerd tot 91% over de gehele rwzi (influent t.o.v. effluent).

FIGUUR 23

HET VERWIJDERINGSRENDEMENT OVER DE RWZI MET  $BO_3$  PER EBCT VOOR DE 7 BESTE VAN DE 11 GIDSSTOFFEN (BOVEN), ALLE 11 GIDSSTOFFEN (MIDDEN) EN ALLE 19 (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ONDER) UITGEZET TEGEN DE SPECIFIEKE OZONDOSIS. HET VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE RWZI IS NIET ONDERZOEKT IN HET PILOTONDERZOEK, DEZE IS BEPAALD CONFORM DE VOORGESCHREVEN STOWA METHODIEK (STOWA 2020-06). HET GEHANTEERDE VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE RWZI IS 40%, 20% EN 20% VOOR RESPECTIEVELIJK DE VERWIJDERING VAN 7 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN, ALLE 11 GIDSSTOFFEN EN ALLE 19 (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN. DAARNAAST IS EEN NABEHANDELINGSCAPACITEIT VAN 85% VAN HET JAARDEBIET AANGEHOUDEN. DE DOORGETROKKEN LIJN GEEFT HET MAXIMAAL TE BEREIKEN VERWIJDERINGSRENDEMENT AAN







Bij een 40% verwijderingsrendement over de rwzi zelf en een nabehandelingscapaciteit van 85% van het jaardebiet kan gesteld worden dat in alle onderzochte  $\text{BO}_3$ -instellingen voldaan wordt aan het minimale verwijderingsrendement van 70% over de gehele rwzi. Zelfs zonder toepassing van ozonisatie is met enkel de BAKF al een rendement van 70% te behalen. Door de combinatie van BAKF en ozonisatie (i.e.  $\text{BO}_3$ -technologie) kunnen hogere rendementen behaald worden die het maximaal te behalen verwijderingsrendement benaderen.

Voor het IPMV-criterium 'verwijderingsrendement voor 7 van de 11 gidsstoffen' is met ontwerp 1 van de  $\text{BO}_3$ -technologie, een EBCT van 22 minuten en specifieke ozondosering van 0,2  $\text{g O}_3/\text{g DOC}$ , een verwijderingsrendement van ca. 84% behaald over de rwzi met  $\text{BO}_3$ -technologie. Voor ontwerp 2 met een EBCT van 30 minuten en specifieke ozondosering van 0,3  $\text{g O}_3/\text{g DOC}$  is het verwijderingsrendement over de rwzi met  $\text{BO}_3$ -technologie ca. 87% voor 7 van de 11 gidsstoffen over de gehele rwzi. Dit benadert het maximaal te bepalen rekenkundig verwijderingsrendement.

Voor de verwijdering van een breder palet aan microverontreinigingen, bijv. alle 11 gidsstoffen of alle 19 (kandidaat)gidsstoffen, is de meerwaarde duidelijk zichtbaar van de combinatie van BAKF en ozonisatie (i.e.  $\text{BO}_3$ -technologie). Met enkel de BAKF, maar inclusief de verwijdering over de rwzi, worden relatief lage verwijderingsrendementen van ca. 50% tot 55% behaald. Met de  $\text{BO}_3$ -technologie neemt bij relatief lage specifieke ozondoseringen van 0,1 – 0,2  $\text{g O}_3/\text{g DOC}$  het verwijderingsrendement al aanzienlijk toe tot ca. 70%, inclusief de verwijdering in de rwzi.

## 5.5 VERGELIJKING MET REFERENTIETECHNOLOGIEËN OP IPMV-CRITERIA

Op basis van voorgaande paragrafen waarin voor de BO<sub>3</sub>-technologie ontwerp 1 en ontwerp 2 zijn uitgewerkt kan op de IPMV-criteria verwijderingsrendement van de 7 beste van de 11 gidsstoffen over rwzi met nageschakelde technologie, CO<sub>2</sub>-footprint en kosten een vergelijk worden gemaakt tussen de BO<sub>3</sub>-technologie en de IPMV-referentietechnologieën PACAS, Ozon + zandfiltratie en GAK-filtratie, zie Tabel 19.

**TABEL 19 VERGELIJKING BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE MET DE REFERENTIETECHNOLOGIEËN VAN HET IPMV**

Parameter	Eenheid	PACAS	Ozon + ZF	GAK-filtratie	BO <sub>3</sub> <sup>19</sup>
Verwijderingsrendement gidsstoffen <sup>20 21</sup>	%	70-75%	80-85%	80-85%	84 - 87%
CO <sub>2</sub> -footprint – nabehandeling	g CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	122	128	325	70 - 81
CO <sub>2</sub> -footprint – rwzi + nabehandeling	ton CO <sub>2</sub> /jaar	2.198	1.953	3.009	1.641 – 1.699
Kosten <sup>22</sup>	€/m <sup>3</sup>	0,05	0,17	0,26	0,13 - 0,15

Met name op CO<sub>2</sub>-footprint scoort de BO<sub>3</sub>-technologie aanzienlijk beter dan de referenties. Dit komt door de afwezigheid van actiefkool dosering of reactivatie en de zeer lage inbreng van ozon. De kosten zijn hoger dan PACAS maar lager dan de andere technologieën. Het verwijderingsrendement is hoger dan de referentietechnologieën en betreft ook een breder palet aan microverontreinigingen.

De range van de BO<sub>3</sub>-kenmerken zoals in Tabel 19 vermeld betreft de kenmerken van ontwerp 1 en ontwerp 2 (respectievelijk EBCT 22 vs. 30 minuten en specifieke ozondosering 0,2 vs. 0,3 g O<sub>3</sub>/g DOC). Door de hogere EBCT en specifieke ozondosis in ontwerp 2 t.o.v. ontwerp 1 zijn zowel het verwijderingsrendement, de CO<sub>2</sub>-footprint alsook de kosten hoger in ontwerp 2. Beide ontwerpen en bijbehorende ranges sluiten goed aan bij de zuiveringspraktijk in Nederland. Door de diverse vrijheidsgraden in het ontwerp van de BO<sub>3</sub>-technologie kan ook ontworpen worden op hogere of lagere verwijderingsrendementen inclusief bijbehorende CO<sub>2</sub>-footprint en kosten.

19 De BO<sub>3</sub> uitwerking conform ontwerp 1 (linker waarde) en ontwerp 2 (rechter waarde)

20 Verwijderingsrendement methode voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen: benzotriazol, carbamazepine, diclofenac, irbesartan, gabapentine, metropolol, hydrochloorthiazide, mengsel van 4- en 5-methylbenzotriazol, sotalol, trimethoprim en venlafaxine in elk 24h of 48h debiets- of tijdsproportioneel monster, waarbij rekening is gehouden met verblijftijd van het water in de rioolwaterzuivering. Hierbij is het rendement bepaald op basis van het totale effluent (nageschakelde behandeling inclusief bypass) ten opzichte van het influent van de rwzi

21 Voor een rwzi met een rendement van 40% voor 7 van de 11 gidsstoffen en nabehandelingcapaciteit van 85% van het jaardebiet is het theoretisch maximaal te behalen verwijderingsrendement, zelfs bij een volledige verwijdering (100%) in de nabehandeling, gelimiteerd tot 91% over de gehele rwzi (influent t.o.v. effluent).

22 Kosten per kuub behandeld water in de nabehandeling

# 6

## CONCLUSIES

De pilottesten kunnen als succesvol bestempeld worden. De belangrijkste onderzoeksvragen zijn beantwoord en de technologie is op een praktijkrelevante schaal succesvol bedreven. De BO<sub>3</sub>-technologie is hiermee in een hoger stadium van volwassenheid gekomen en klaar voor de uitrol op volledige praktijkschaal.

Op basis van de uitkomsten van de BO<sub>3</sub>-pilottesten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

### VERWIJDERING 7 BESTE VAN DE 11 GIDSSTOFFEN MET DE BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE

Met de combinatie van BAKF en ozonisatie (i.e. de BO<sub>3</sub>-technologie) kunnen afhankelijk van de empty bed contact time (EBCT) van de BAKF en de specifieke ozondosering in de ozonisatiestap hoge verwijderingsrendementen voor microverontreinigingen worden behaald, zie Tabel 20. Het verwijderingsrendement voor de 7 beste van de 11 gidsstoffen over de rwzi met nageschakelde BO<sub>3</sub>-technologie benadert het maximaal te behalen rekenkundig rendement voor de betreffende testdagen. Het maximaal te behalen rekenkundig rendement varieert per testdag door variaties in influentconcentraties.

**TABEL 20** OVERZICHT VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VAN DE 7 BESTE VAN DE 11 GIDSSTOFFEN MET DE BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE. VERWIJDERING ENKEL OVER DE BO<sub>3</sub> (KOLOMMEN 3 T/M 5) EN OVER DE RWZI + BO<sub>3</sub> (LAATSTE 3 KOLOMMEN)

Parameter	Eenheid	BO <sub>3</sub>	BO <sub>3</sub>	BO <sub>3</sub>	rwzi + BO <sub>3</sub>	rwzi + BO <sub>3</sub>	rwzi + BO <sub>3</sub>
EBCT	minuten	22	30	60	22	30	60
Specifieke ozondosis	g O <sub>3</sub> /g DOC	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4
Aandeel van het jaardebiet behandeld	%	-	-	-	85%	85%	85%
Maximaal te behalen rekenkundig rendement <sup>23</sup>	%	97%	98%	95%	90%	90%	89%
Behaald verwijderingsrendement	%	85%	90%	94%	84%	87%	89%

### VERWIJDERING BREED PALET MICROVERONTREINIGINGEN MET DE BO<sub>3</sub>-TECHNOLOGIE

De analyse van een breed palet microverontreinigingen, 24 tot 30 verschillende stoffen, laat zien dat met de combinatie van BAKF en ozonisatie (i.e. de BO<sub>3</sub>-technologie) een breed palet microverontreinigingen verwijderd wordt. Van de 30 onderzochte microverontreinigingen, waaronder de 19 (kandidaat)gidsstoffen, is 63% van de stoffen verwijderd met een rendement hoger dan 80% enkel over de BO<sub>3</sub>-technologie (exclusief het rendement van de rwzi). Voor alle 11 gidsstoffen en alle 19 (kandidaat)gidsstoffen zijn verwijderingsrendementen behaald van 80% tot 85% bij een EBCT van 60 minuten, een specifieke ozondosering van ca. 0,3 g O<sub>3</sub>/g DOC en exclusief het rendement van de rwzi.

### VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN MET BAKF ZÓNDER OZONISATIE

Met BAKF zónder ozonisatie kan een bepaalde selectie microverontreinigingen verregaand verwijderd worden. Een verwijdering van 90% voor 7 van de 11 gidsstoffen is waargenomen bij een EBCT van 60 minuten zonder aanvullende ozonisatie en exclusief het rendement van

<sup>23</sup> Doordat de gidsstoffen regelmatig onder de rapportagegrens zijn aangetroffen in de afloop van de BO<sub>3</sub>-pilot is het maximaal te behalen rekenkundig verwijderingsrendement lager dan 100%, zie nader uitleg in paragrafen 2.5 en 3.3.1

de rwzi. Wanneer naar een breder palet aan stoffen wordt gekeken zoals alle 11 gidsstoffen of alle 19 (kandidaat)gidsstoffen is het verwijderingsrendement over de BAKF slechts 45% tot 55%, exclusief de rwzi. Twee van de 11 gidsstoffen wordt nauwelijks verwijderd in de BAKF (verwijdering tot ca. 30%), en twee andere gidsstoffen hebben zelfs een negatief verwijderingsrendement (toename van concentratie).

### **BROMAAT**

Tot een specifieke ozondosis van ca. 0,3 g  $\text{O}_3$ /g DOC waarbij hoge verwijderingsrendementen van ca. 80% voor het gemiddelde van alle 19 (kandidaat)gidsstoffen bereikt zijn (excl. verwijdering in rwzi) is de concentratie bromaat onder de 1  $\mu\text{g/L}$  gebleven. Bij hogere specifieke ozondoses werd meer dan 1  $\mu\text{g/L}$  bromaat gevormd. De bromaatvorming in het pilotonderzoek trad bij relatief lage specifieke ozondoseringen op. Dit heeft mogelijk te maken met de lokale watermatrix, de verandering van de watermatrix in de BAKF waaronder ammoniumverwijdering, het toegepaste ozoninbrengsysteem van de pilotinstallatie en de concentratie bromide. Of voor een specifieke situatie de  $\text{BO}_3$ -technologie toepasbaar is moet blijken uit een analyse van de combinatie van bovenstaande factoren, het  $\text{BO}_3$ -ontwerp en het lokale oppervlaktewatersysteem.

### **ECOTOXICITEIT**

De (eco)toxiciteit van het water is met meer dan 50% afgenomen na behandeling met de  $\text{BO}_3$ -technologie. De geteste biologische effectmetingen laten een reductie van het biologische effect zien.

### **ZUURSTOF**

De concentratie opgelost zuurstof heeft een effect op de prestaties van de BAKF. Bij een concentratie van 10 mg/L wordt een ca. 5 tot 10% lager verwijderingsrendement voor microverontreinigingen behaald dan bij 20 of 45 mg/L. Tussen 20 en 45 mg/L is er nauwelijks verschil in prestaties van de BAKF.

### **ORGANISCHE STOF**

In de BAKF wordt organische stof verwijderd, zowel opgeloste als onopgeloste organische stof. In het pilotonderzoek zijn een DOC-verwijdering van 5% tot 30% en een  $\Delta\text{UVA}_{254}$  van 20% tot 40% waargenomen. De UV-transmissie neemt met ca. 20% toe over de gehele  $\text{BO}_3$ .

### **AMMONIUM EN NITRIET**

Een belangrijke bijvangst van de  $\text{BO}_3$ -technologie is de nagenoeg volledige verwijdering van ammonium en nitriet in de BAKF tot veelal onder meetbereik. Ammonium is schadelijk voor het oppervlaktewater, de gemiddelde concentratie ammonium in de oploop van de pilot was ca. 1 mg N/L. Voor nitriet was dit ca. 0,3 mg N/L. Doordat nitriet een ozonafvanger is resulteert de verwijdering daarvan dus in een verlaagd ozonverbruik.

### **STURINGSPARAMETERS**

De EBCT en de specifieke ozondosering zijn de belangrijkste parameters die de verwijdering van microverontreinigingen van de  $\text{BO}_3$ -technologie bepalen. Beide parameters kunnen afzonderlijk van elkaar gekozen en bijgestuurd worden om voor elke individuele locatie het lokaal optimale resultaat te bereiken.

## TEMPERATUUR

Het pilotonderzoek is uitgevoerd in de winterperiode. De watertemperatuur lag meestal tussen de 10°C en 12°C. De uitkomsten betreffend derhalve prestaties bij wintercondities en daarmee een onderschatting van jaargemiddelde prestaties van de BO<sub>3</sub>-technologie. De invloed van temperatuur op het ozonisatieproces is gering. In de BAKF vinden diverse biologisch processen plaats die beter verlopen bij 20°C dan bij 10°C. In zomercondities zijn de prestaties van de BO<sub>3</sub>-technologie dus vermoedelijk beter.

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

Met name door de sterk gereduceerde ozonozonisatie en het niet reactiveren van de actiefkool in de BAKF is de CO<sub>2</sub>-footprint van de BO<sub>3</sub>-technologie laag. Met een CO<sub>2</sub>-footprint van 49 tot 56 g CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> rwzi debiet is de BO<sub>3</sub>-technologie bijna een factor 2 tot 4 duurzamer dan de referentietechnologieën Ozon+Zandfiltratie, PACAS en GAK-filtratie met CO<sub>2</sub>-footprints van respectievelijk 90, 122 en 228 g CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> rwzi debiet. Door de lage ozonozonisatie is het energieverbruik laag waardoor ook het geïnstalleerd elektrisch vermogen laag is, dit is een voordeel in tijden van overbelaste elektriciteitsnetwerken.

## KOSTEN

De kosten van de BO<sub>3</sub>-technologie per kuub nageschakeld debiet zijn met 0,13 tot 0,15 €/m<sup>3</sup> vergelijkbaar met de referentietechnologie Ozon+Zandfiltratie. Merk op, per kuub rwzi debiet zijn de kosten een fractie lager, 0,09 tot 0,10 €/m<sup>3</sup>. Doordat de technologie uit twee processtappen bestaat zijn de investeringskosten hoger dan die van een stand-alone technologie (bijv. ozonisatie). Een belangrijk kenmerk van de BO<sub>3</sub>-technologie is dat de verbruiken (o.a. elektriciteit en zuurstof) laag zijn en er geen reactivatie van actiefkool nodig is. Hierdoor zijn de operationele kosten laag en daarmee is de impact van stijgende energie- en grondstofprijzen beperkt.

## INPASSING IN DE PRAKTIJK

De BO<sub>3</sub>-technologie is goed inpasbaar in de Nederlandse zuiveringspraktijk. Voor een oxidatieve technologie heeft het een laag energieverbruik en is het opgesteld elektrisch vermogen laag. Het spoelwaterverbruik is met ca. 0,5 tot 1 % gering en er vindt weinig slibproductie plaats. De enige hulpstof die verbruikt wordt is pure zuurstof. Door deze kenmerken sluit de BO<sub>3</sub>-technologie goed aan bij huidige doelstellingen van de waterschappen op de thema's duurzaamheid, circulariteit en doelmatigheid (o.a. laag energieverbruik, laag grondstoffenverbruik, hoog verwijderingsrendement).

## VERGELIJKING MET IPMV-REFERENTIE-TECHNOLOGIEËN

De BO<sub>3</sub>-technologie is de meest duurzame technologie om kosteneffectief een hoog verwijderingsrendement voor een breed palet microverontreinigingen te verwijderen. In vergelijking met de IPMV-referentietechnologieën heeft de BO<sub>3</sub>-technologie een ca. 50% lagere CO<sub>2</sub>-footprint, een verwijderingsrendement dat ca. 10% hoger is en vergelijkbare kosten. Daarnaast wordt een breder palet stoffen verwijderd, is de bromaatvorming beperkt en worden ammoniumpieken afgevlakt.

# 7

## DANKWOORD

Dank gaat uit naar de betrokken onderzoekpartners Waternet, STOWA, het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Wageningen Universiteit en Royal HaskoningDHV zonder wie het  $\text{BO}_3$ -pilotonderzoek niet mogelijk was geweest. Aan alle partners dank voor de inhoudelijke betrokkenheid bij het pilotonderzoek, de financiële bijdrage en de kritische reflectie op uitkomsten en rapportage.

Dank aan de STOWA IPMV begeleidingscommissie 'Oxidatieve technieken' voor de bezie-lende begeleiding van het pilotonderzoek.

In het bijzonder een woord van dank richting Waternet (Manon, Christa, Ronald, Leen en de overige collega's van rwzi Horstermeer) voor de zeer prettige samenwerking, hulpv-aardigheid en vriendelijke ontvangst op rwzi Horstermeer. Jullie support heeft enorm bijge-dragen aan het slagen van het pilotonderzoek.

NieuWater (Gerrit en Bennie) dank voor het beschikbaar stellen van de granulaire actiefkool uit de UltraPuurWaterfabriek. Nijhuis Saur Industries (Eddy en Tuur) en PureBlue (Kevin, Nelis en Nimmy) dank voor het voorzien van technisch functionele en robuuste pilotinstal-laties waardoor het pilotonderzoek zeer soepel en voorspoedig verliep.

Last-but-not-least, grote dank aan Thomas, Steven, Merel en Wessel voor het dagelijks bedrijven van de pilot, het vergaren en uitwerken van de meetresultaten, jullie kritische blik, tomeloze inzet en positieve inbreng in het pilotteam. Moge het jullie allen goed gaan!

# 8

## LITERATUURLIJST

STOWA 2018-46 – Zoetwaterfabriek awzi de Groote Lucht: Pilotonderzoek ozonisatie en zandfiltratie

STOWA 2020-41 – Pilotonderzoek vergelijking oxidatieve technieken effluent rwzi Aarle-Rixtel

STOWA 2022-41 – Haalbaarheidsstudie  $\text{BO}_3$ -technologie

STOWA 2022-46 – Technische handreiking oxidatieproducten bij ozonisatie

STOWA 2022-47 – Literature study on oxidation products

## BIJLAGE A

# BEREKENING VAN VERWIJDERINGSRENDERMENT VAN (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN OP TWEE VERSCHILLENDE WIJZE

Zoals beschreven in paragraaf 2.5 is het veelvuldig voorgekomen dat de concentratie van een microverontreiniging in de afloop van de pilot onder de rapportagegrens lag. In dat geval is conform het koepelvoorschrift de rapportagegrens aangehouden voor het berekenen van het verwijderingsrendement. Een alternatieve methode is om de helft van de rapportagegrens aan te houden voor de rendementsberekening. In Tabel 21 is het verschil tussen beide methoden aangegeven. Het verschil tussen beide methoden is relatief klein. Voor de bepaling van het verwijderingsrendement van de 19 (kandidaat)gidsstoffen loopt het verschil echter op tot 3,8% tussen beide methoden.

**TABEL 21** RESULTATEN VAN DE  $\text{BO}_3$ -PILOT WANNEER DE RAPPORTAGEGREN (KOEPELVOORSCHRIFT) OF DE HELFT VAN DE RAPPORTAGEGREN WORDT AANGEHOUDEN VOOR DE BEREKENING VAN HET VERWIJDERINGSRENDERMENT.

Criteria	EBCT (min)	Behandeling	Verwijderingsrendement conform koepelvoorschrift (%)	Verwijderingsrendement berekend met helft van de meetgrens (%)	Vershil (%)	
Gemiddelde verwijdering 7 van de 11 gidsstoffen	22	BAKF	74,0	74,0	0,0	
	22	$\text{BO}_3$ 0,1	80,4	80,4	0,0	
	22	$\text{BO}_3$ 0,2	85,9	86,1	0,2	
	22	$\text{BO}_3$ 0,4	94,9	95,8	0,9	
	30	BAKF	82,6	82,6	0,0	
	30	$\text{BO}_3$ 0,1	88,7	88,9	0,1	
	30	$\text{BO}_3$ 0,2	89,1	90,7	1,6	
	30	$\text{BO}_3$ 0,4	95,3	96,2	0,8	
	60	BAKF	92,2	93,6	1,4	
	60	$\text{BO}_3$ 0,1	93,3	95,8	2,5	
	60	$\text{BO}_3$ 0,2	94,1	96,6	2,5	
	60	$\text{BO}_3$ 0,4	94,4	97,0	2,6	
	Gemiddelde verwijdering 11 gidsstoffen	22	BAKF	44,4	44,4	0,0
		22	$\text{BO}_3$ 0,1	59,3	59,3	0,0
22		$\text{BO}_3$ 0,2	69,2	69,3	0,1	
22		$\text{BO}_3$ 0,4	84,3	84,8	0,6	
30		BAKF	51,7	51,7	0,0	
30		$\text{BO}_3$ 0,1	68,1	68,2	0,1	
30		$\text{BO}_3$ 0,2	73,0	74,0	1,0	
30		$\text{BO}_3$ 0,4	84,3	85,7	1,3	
60		BAKF	50,4	51,2	0,9	
60		$\text{BO}_3$ 0,1	74,0	75,6	1,6	
60		$\text{BO}_3$ 0,2	81,0	82,6	1,6	
60		$\text{BO}_3$ 0,4	85,0	86,6	1,6	



Gemiddelde verwijdering	22	BAKF	46,7	47,2	0,5
19 (kandidaat)	22	$\text{BO}_3$ ,0,1	63,2	63,8	0,6
gidsstoffen	22	$\text{BO}_3$ ,0,2	73,3	74,3	1,0
	22	$\text{BO}_3$ ,0,4	86,0	87,5	1,6
	30	BAKF	51,0	53,6	2,6
	30	$\text{BO}_3$ ,0,1	71,4	72,6	1,1
	30	$\text{BO}_3$ ,0,2	76,3	78,0	1,7
	30	$\text{BO}_3$ ,0,4	85,8	88,0	2,2
	60	BAKF	60,2	62,5	2,3
	60	$\text{BO}_3$ ,0,1	77,4	81,2	3,8
	60	$\text{BO}_3$ ,0,2	81,9	85,7	3,8
	60	$\text{BO}_3$ ,0,4	84,6	88,5	3,8

---

## BIJLAGE B

# HERZIENING RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER

Door de EU is een voorstel gedaan voor een revisie van de Richtlijn Stedelijk Afvalwater<sup>24</sup>. 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 22. In de revisie wordt gesteld dat rwzi's groter dan 100.000 i.e. moeten zijn voorzien van een aanvullende verwijdering voor microverontreinigingen 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 22** 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	1,2,3-benzotriazool	Carbamazepine
Carbamazepine	Candesartan	Diclofenac
Citalopram	Irbesartan	Hydrochloorthiazide
Clarithromycine	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	Metoprolol
Diclofenac		Venlafaxine
Hydrochloorthiazide		1,2,3-benzotriazool
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 op dezelfde manier. Hierbij geldt een minimaal verwijderingsrendement in elk monster van 70%.

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

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 11. 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 gidsstoffen<sup>25</sup>. Dit is echter afhankelijk van in welke mate de concept EU-gidsstoffen daadwerkelijk voorkomen in het afvalwater. 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 afgevallen als Nederlandse gidsstof vanwege een mogelijk te hoog verwijderingsrendement door het actiefslib (>50%)<sup>26</sup>. 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 23 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.

25 Voor kenmerken van de standaard rwzi in het IPMV wordt verwezen naar Mulder, M., Berekening  $\text{CO}_2$  footprint en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit rwzi-afvalwater, versie 28 december 2022

26 Bron: Mulder, M., 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, Definitieve versie 2, 9 juli 2021

**TABEL 23 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**

	Ozon	PACAS	GAK	BO3	BO3	BO3
Instelling	0,7 g O <sub>3</sub> / g DOC	15-20 mg PAK/l	EBCT 30 min; standtijd 6 maanden	EBCT 22 min; ozondosis 0,2 g O <sub>3</sub> /g DOC	EBCT 30 min; ozondosis 0,3 g O <sub>3</sub> /g DOC	EBCT 60 min; ozondosis 0,4 g O <sub>3</sub> /g DOC
Nageschakeld verwijderingsrendement (%) op de EU-gidsstoffen (6 van de 12 onderverdeeld in categorieën)	80-90%	nvt	80-90%	76%	83,5%	92%
Overall verwijderingsrendement (%) volgens rekenregels concept EU Richtlijn Stedelijk Afvalwater dd 26/10/2022 (6 van de 12 onderverdeeld in categorieën)	75-85%	70-80%	75-85%	72-76%	77-80%	82-85%
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, Metoprolol; Venlafaxine Citalopram	Amisulpride, Citalopram, Diclofenac, Irbesartan, - keuze tussen 1,2,3-benzotriazool of candesartan - keuze tussen Hydrochloorthiazide of claritromycine	Amisulpride, Diclofenac, Irbesartan - keuze tussen 1,2,3-benzotriazool of candesartan - keuze tussen Carbamazepine, Hydrochloorthiazide, metoprolol of venlafaxine	Candesartan, Carbamazepine, Irbesartan, Diclofenac, Metoprolol, Venlafaxine
Overall verwijderingsrendement (%) volgens rekenregels bijdrageregeling Ministerie IenW en IPMV (7 van de 11)	80-85%	70-80%	80-85%	84%	86%	91%
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	Diclofenac, Hydrochloor-thiazide, Metoprolol, Sotalol, Trimethoprim, Venlafaxine - keuze tussen Carbamazepine en Gabapentine	Diclofenac, Metoprolol, Sotalol, Trimethoprim, Venlafaxine, - keuze tussen Carbamazepine, Gabapentine, Hydrochloor-thiazide	Carbamazepine, Diclofenac Hydrochloor-thiazide, Metoprolol, Sotalol, Trimethoprim, Venlafaxine

In Tabel 23 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) filtratie<sup>27</sup> in vergelijking met de BO<sub>3</sub>-technologie. 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.

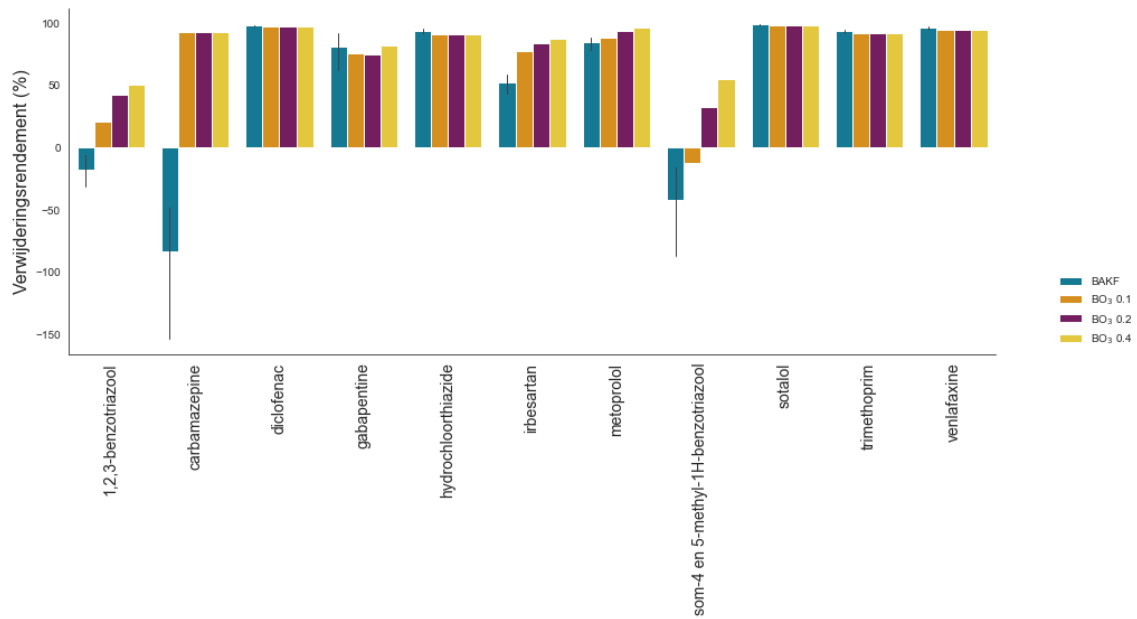
27 Op basis van expert judgement Mirabella Mulder – Mirabella Mulder Waste Water Management, 4 augustus 2023

## BIJLAGE C

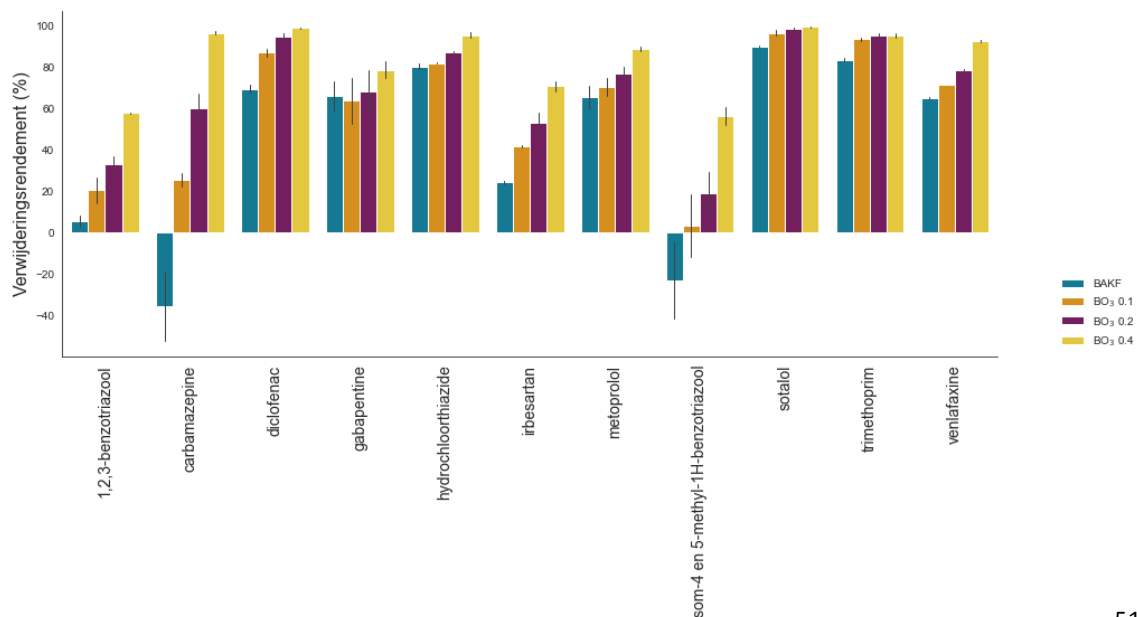
# VERWIJDERING VAN ALLE 11 INDIVIDUELE GIDSSTOFFEN

In aanvulling op paragraaf 3.3 zijn in Figuur 24 en Figuur 25 de verwijderingsrendementen van alle 11 individuele gidsstoffen gegeven bij EBCTs van respectievelijk 60 en 22 minuten.

**FIGUUR 24** VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VAN DE 11 INDIVIDUELE GIDSSTOFFEN BIJ EEN EBCT VAN 60 MINUTEN (INWERKEN BAKF EN TESTDAG 1). DE FOUTENBALKEN GEVEN DE MINIMALE EN MAXIMALE WAARDES AAN



**FIGUUR 25** VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VAN DE 11 INDIVIDUELE GIDSSTOFFEN BIJ EEN EBCT VAN 22 MINUTEN (TESTDAGEN 3 EN 5). DE FOUTENBALKEN GEVEN DE MINIMALE EN MAXIMALE WAARDES AAN

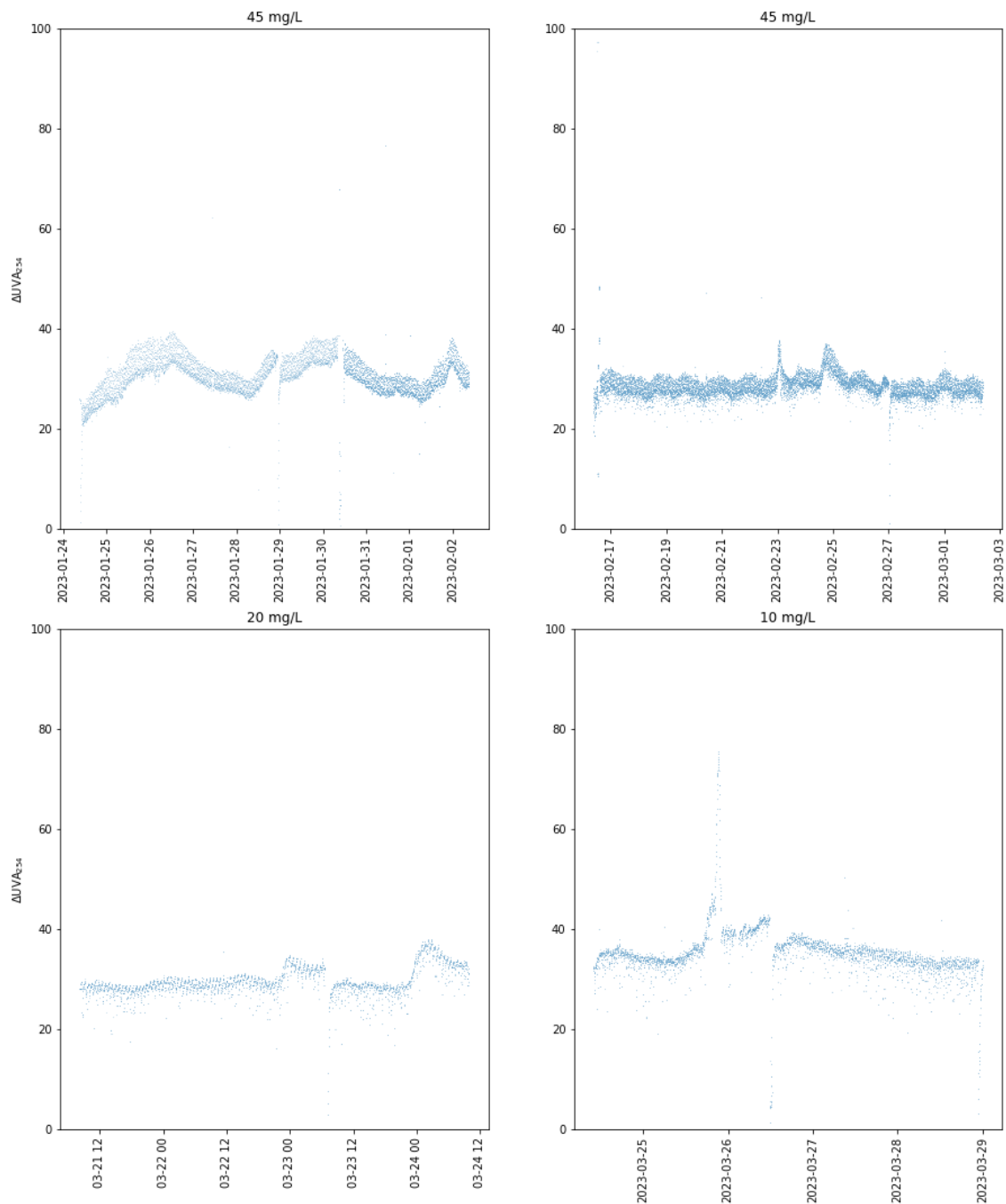


## BIJLAGE D

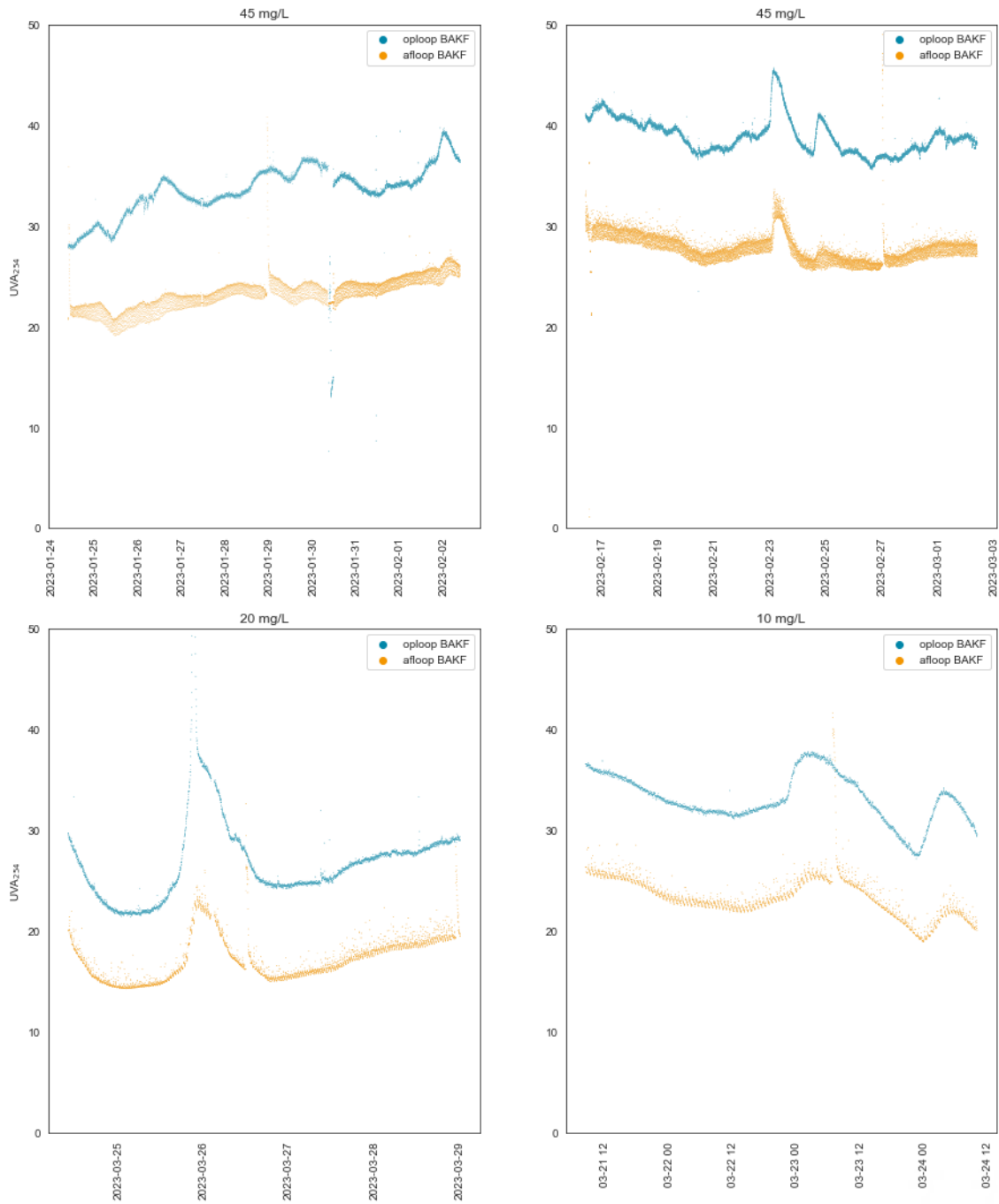
EFFECT VAN ZUURSTOF OP  $\Delta\text{UVA}_{254}$  EN UV-T

In aanvulling op paragraaf 3.8 zijn in Figuur 26 en Figuur 27 de effecten van de zuurstofconcentratie op respectievelijk de  $\Delta\text{UVA}_{254}$  en UV-T gegeven.

**FIGUUR 26** DELTA UV-ABSORPTIE BIJ 254 NM ( $\Delta\text{UVA}_{254}$ ) OVER DE BAKF TIJDENS TESTEN EFFECT VAN ZUURSTOFCONCENTRATIE. DE GETALLEN 45, 20 EN 10 IN DE FIGUUR GEVEN DE CONCENTRATIE OPGELOSTE ZUURSTOF IN DE OPLOOP VAN DE BAKF



**FIGUUR 27** UV-ABSORPTIE BIJ 254 NM IN DE OPLOOP EN AFLOOP VAN DE BAKF TIJDENS TESTEN EFFECT VAN ZUURSTOFCONCENTRATIE. DE GETALLEN 45, 20 EN 10 IN DE FIGUUR GEVEN DE CONCENTRATIE OPGELOSTE ZUURSTOF IN DE OPLOOP VAN DE BAKF



## BIJLAGE E

# UITGANGSPUNTEN IPMV

## KOSTENBEREKENINGEN

### BEREKENING INVESTERINGEN

#### *Onvolledigheid*

In de kostenberekeningen is rekening gehouden met een onvolledigheidsfactor van 25%.

#### *Aannemerskosten*

Over kale investeringskosten voor civiele, werktuigbouwkundige, elektrotechnische en procesautomatisering werkzaamheden is rekening gehouden met een opslag van 25%. Deze opslag bestaat uit kosten voor de aannemer om het werk uit te voeren, zoals algemene bouwplaatskosten, uitvoeringskosten, algemene kosten, winst en risico.

#### *Bouwkosten en stichtingskosten*

Er is een percentage van 80% aangehouden om bouwkosten naar stichtingskosten om te zetten. Deze bestaat uit kosten voor btw, onvoorzien, engineering, projectmanagement, directievoering, verzekeringen, tijdelijke voorzieningen tijdens ombouw en opstart, opleiding en communicatie.

NB naast bovengenoemde opslagen zijn geen verdere posten onvoorzien opgenomen.

### BEREKENING JAARLASTEN

Ten aanzien van de berekening van de jaarlasten zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Kapitaalslasten zijn berekend op basis van lineaire afschrijving over 30 jaar voor civiele onderdelen, 15 jaar voor werktuigbouwkundige en elektrotechnische onderdelen, 5 jaar voor procesautomatisering en een rente van 4%.
- Onderhoudskosten: 0,5% van de bouwkosten voor civiele onderdelen en 3% van de bouwkosten voor W/E/PA onderdelen.

#### Overige kosten inclusief btw

- Personeelskosten: € 50.000 per fte per jaar
- Elektriciteit: € 0,10/kWh
- PE: € 3,-/kg ingekocht product
- Zuivere zuurstof: € 0,20/kg
- IJzerchloride en Aluminiumchloride: € 120/ton 40% w/w
- Poedervormig Actief Kool: € 2,0/kg
- Granulair Actief Kool: € 1.200 /m<sup>3</sup>
- Gereactiveerd granulair actief kool: € 500 /m<sup>3</sup>
- Methanol: € 355/kg
- Slibverwerking: € 600 per ton ds (slibindikking, slibontwatering en slibeindverwerking incl. transport)
- Productie van spoelwater uit effluent: € 0,04/m<sup>3</sup>
- Verwerking spoelwater op rwzi: € 0,01/m<sup>3</sup>