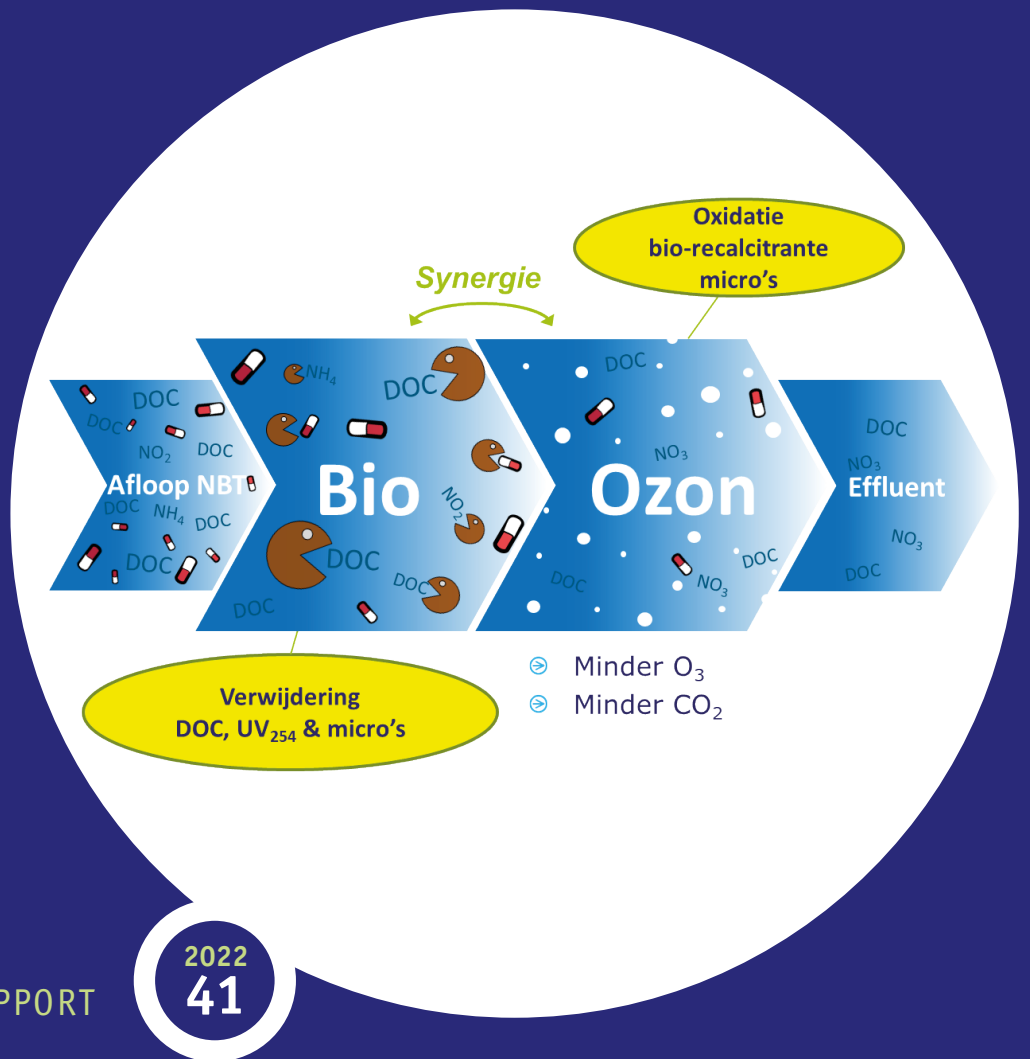




HAALBAARHEIDSTUDIE BO₃-TECHNOLOGIE



HAALBAARHEIDSSSTUDIE BO_3 -TECHNOLOGIE

RAPPORT

2022

41

ISBN 978.90.5773.988.0



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

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

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Arnoud de Wilt - Royal HaskoningDHV

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Manon Bechger – Waternet
Patricia Clevering-Loeffen – SWECO
Maaike Hoekstra – Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Erik Knol – Hoogheemraadschap van Delfland
Robert Kras – Waterschap Aa en Maas
Joop Kruithof
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

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau bv

STOWA STOWA 2022-41

ISBN 978.90.5773.988.0

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

BO₃ is een veelbelovende technologie voor de verregaande verwijdering van een breed palet microverontreinigingen uit rwzi effluent en kent een lagere CO₂-footprint dan de referentietechnologieën.

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. Ondergebracht in het thema 'Oxidatieve technieken' is de BO₃-technologie als nabehandeling voor rwzi-effluent nader uitgewerkt in een haalbaarheidsstudie. Op de aspecten verwijderingsrendement, kosten en duurzaamheid (CO₂-footprint) is de BO₃-technologie vergeleken met de referentietechnologieën PACAS, GAK-filtratie en Ozonisatie + Zandfiltratie. Daarnaast is in kaart gebracht wat eventuele plus- of minpunten zijn ten opzichte van de referentietechnologieën.

In de BO₃-technologie worden de processen biologische afbraak, filtratie en oxidatie middels ozon gecombineerd. De synergie tussen het biologisch/fysische proces en de ozonbehandeling resulteert in een verduurzaming van conventionele ozonisatie door de sterk gereduceerde ozondosis (verlaging CO₂-footprint) en de daaraan gekoppelde bromaatvorming. Door de combinatie van meerdere afbraakprocessen wordt een breder palet aan microverontreinigingen verwijderd.

Met name door de sterk gereduceerde ozondosis scoort de BO₃-technologie beter op CO₂-footprint dan de referentietechnologieën. Het energieverbruik is laag doordat in de biologische stap zowel microverontreinigingen als organisch materiaal afgebroken worden. Op het criterium verwijderingsrendement van microverontreinigingen scoort de BO₃-technologie zeer goed, een verwijderingsrendement van 70% voor 7 van de 11 gidsstoffen kan eenvoudig bereikt worden. In het onderzoek in Wageningen zijn verwijderingsrendementen van >95% aangetoond voor de gidsstoffen. De kostenraming maakt duidelijk dat de totale kosten (CAPEX en OPEX) vergelijkbaar zijn met de referentietechnologieën. Daarnaast is de verwachting dat de bromaatvorming ten opzichte van stand-alone ozonisatie lager is.

Een volgende stap in de ontwikkeling van de BO₃-technologie is het uitvoeren van pilottesten. Dit onderzoek gaat in 2022 plaatsvinden op rwzi Horstermeer. Met pilottesten kan geïverifieerd worden of de resultaten die op lab-schaal zijn behaald ook een pilotschaal behaald kunnen worden. Deze inzichten zijn nodig voor een verdere praktijk uitrol van de technologie.

De BO₃-technologie is ontwikkeld door de vakgroep Milieutechnologie van de Wageningen Universiteit in samenwerking met Royal HaskoningDHV. De voorliggende haalbaarheidsstudie is gestoeld op de uitkomsten en inzichten van het labonderzoek te Wageningen.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

De BO₃-technologie is een technologie waarbij het rwzi-effluent in een twee-staps proces wordt behandeld. De eerste stap is een biologische filtratiestap. Onder aerobe condities vindt biologische afbraak plaats van organisch materiaal (gemeten als DOC, CZV en UV₂₅₄) en een gedeelte van de microverontreinigingen. Vervolgens wordt in de tweede stap het water geozoniseerd. In deze stap worden biorecalcitrante microverontreinigingen afgebroken. Doordat een aanzienlijk gedeelte van het organisch materiaal is afgebroken in de voorafgaande biologische stap kan de ozonisatie effectiever worden uitgevoerd. Er zal minder ozon reageren met organisch materiaal omdat dit reeds verwijderd is. Daarnaast is ozon enkel nodig voor de oxidatie van een geringe selectie microverontreinigingen omdat een deel al verwijderd is.

De ontwikkeling van de BO₃-technologie is in 2016 begonnen bij de vakgroep Milieutechnologie van de Wageningen Universiteit. Vanaf 2018 is de BO₃-technologie in samenwerking tussen de Wageningen Universiteit en Royal HaskoningDHV doorontwikkeld. Op lab-schaal is de BO₃-technologie reeds uitvoerig (>4 jaar) onderzocht en is het 'proof-of-principle' aangetoond.

Drie verschillende biologische processen (type slib-op-drager) zijn getest voor de B-reactor; moving bed bio reactor, biologisch actiefkoolfiltratie (BAKF) en zandfiltratie. De BAKF resulteerde in de beste resultaten. Bij een contacttijd van 20 tot 70 minuten zijn gemiddelde verwijderingsrendementen voor TOC, COD en UV₂₅₄ van respectievelijk 25-35%, 40-50% en 45-55% behaald. Ook is aangetoond dat de granulair actiefkool in de BAKF volledig verzadigd was. De waargenomen verwijdering van bovengenoemde parameters en microverontreinigingen is daardoor gerelateerd aan een biologisch afbraakproces.

De verwijdering van microverontreinigingen (o.a. gidsstoffen) is in lab-testen bepaald voor zowel het biologische proces als de gehele BO₃-technologie. Gemiddelde verwijderingsrendementen van 78% en 59% zijn behaald voor het biologisch proces bij een contacttijd van 20 minuten voor respectievelijk de 7 beste van de 11 gidsstoffen en alle 11 gidsstoffen. Voor de gehele BO₃-technologie zijn bij een contacttijd van 20 minuten en een ozondosis van 0,2 g O₃/g DOC verwijderingsrendementen van 98% en 95% behaald voor respectievelijk de 7 beste van de 11 gidsstoffen en alle 11 gidsstoffen.

Voor de schaal van een 100.000 i.e. rwzi is de BO₃-technologie nader uitgewerkt in een ontwerp en op kosten gezet. Enkele belangrijke uitkomsten hiervan zijn dat het energieverbruik wordt geschat op 0,045 kWh/m³, restanten ammonium en nitriet in de B-reactor worden omgezet tot nitraat, de totale ruimtelijke inpassing ca. 700 – 900 m² bedraagt en de technologie toepasbaar is op alle type rwzi's.

Op de parameters CO₂-footprint, kosten en verwijderingsrendement gidsstoffen is de BO₃-technologie vergeleken met de IPMV-referentietechnologieën PACAS, Ozon + zandfiltratie en GAK, zie Tabel 1.

TABEL 1

VERGELIJKING BO₃-TECHNOLOGIE MET DE REFERENTIE-TECHNOLOGIEËN VAN HET IPMV

	Eenheid	PACAS	Ozon + ZF	GAK	BO ₃
CO ₂ -footprint	kg CO ₂ /m ³	122	128	325	44 - 63
CO ₂ -footprint	ton CO ₂ /jaar	2.198	1.953	3.009	1.502 - 1.608
Kosten	€/m ³	0,05	0,17	0,26	0,11 - 0,12
Verwijderingsrendement gidsstoffen	%	70-75%	80-85%	80-85%	>95%

Met name op CO₂-footprint scoort de BO₃-technologie aanzienlijk beter dan de referenties. Dit komt door de zeer lage inbreng van ozon. De kosten zijn hoger dan PACAS maar lager dan de andere technologieën. Het verwijderingsrendement is beduidend hoger dan de referentie-technologieën en betreft ook een breder palet aan microverontreinigingen.

De huidige TRL van de BO₃-technologie is 4 (bewezen op lab-schaal). Een vervolgonderzoeksfase met pilottesten is nodig om de TRL te verhogen naar 5-6, middels pilottesten binnen het IPMV kan dit rond 2022-2023 bereikt zijn. Bij succesvolle pilottesten kan snel opgeschaald worden naar TRL 7-9 omdat ozon-installaties reeds full-scale toegepast worden en er in zijn algemeenheid veel ervaring is met het ontwerpen en realiseren van biologische filtratietechnieken.

Op basis van de uitkomsten van de haalbaarheidsstudie heeft de STOWA IPMV begeleidingscommissie Oxidatieve Technieken besloten groen licht te geven voor pilottesten als opvolging van voorliggende haalbaarheidsstudie.

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.

HAALBAARHEIDSSSTUDIE BO_3 -TECHNOLOGIE

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	BESCHRIJVING VAN DE TECHNOLOGIE	1
	1.1 Focus op BO_3 -technologie – zonder tweede B	2
2	ACHTERGROND VAN DE TECHNOLOGIE	3
3	LABONDERZOEK	4
	3.1 Opzet van het labonderzoek	4
	3.2 Verwijdering van organisch materiaal in het biologische proces	5
	3.3 Biodegradatie en adsorptie	8
	3.4 Verwijdering microverontreinigingen in het biologische proces	9
	3.5 Verwijdering microverontreinigingen in de BO_3 -configuratie	10
	3.6 Technology Readiness Level	11
4	DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN	12
5	INPASBAARHEID IN DE NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK	13
	5.1 Effect op bedrijfsvoering	13
	5.2 Inpassing op de locatie	14
	5.3 Voor welke type rwzi's geschikt	14
6	KOSTENRAMING	15

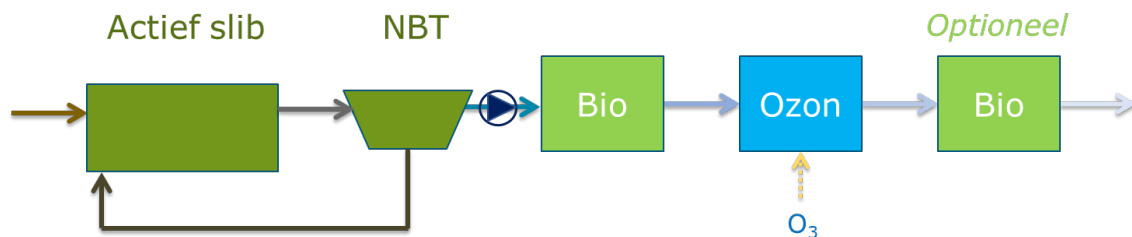
7	BEOORDELING TOETSINGSCRITERIA	17
7.1	Verwijderingsrendement microverontreinigingen	17
7.2	CO ₂ -footprint	17
7.3	Ecotoxiciteit	18
7.4	Bromaatvorming	18
7.5	Transformatieproducten	19
7.6	Vergelijking ten opzichte van referentietechniek	19
8	LITERATUURLIJST	20
BIJLAGE 1	UITGANGSPUNTEN KOSTENBEREKENINGEN	21

1

BESCHRIJVING VAN DE TECHNOLOGIE

De BO₃(B)-technologie is een 3-stapsproces bestaande uit respectievelijk biologische-, ozon- en biologische behandeling voor verregaande verwijdering van microverontreinigingen en reductie van ecotoxiciteit. Synergie tussen biologisch/fysische processen en ozonbehandeling is de kern van de BO₃(B)-technologie. Deze synergie resulteert in een verduurzaming van conventionele ozonisatie door de sterk gereduceerde ozondosis (verlaging CO₂-footprint) en de daaraan gekoppelde afwezigte tot geringe bromaatvorming, én het bredere palet aan microverontreinigingen dat wordt afgebroken.

BO₃(B)-technologie is een nageschakelde technologie voor behandeling van rwzi-effluent. In de eerste stap worden organische componenten biologisch (gedeeltelijk) afgebroken. Door deze afbraak volstaat een lage ozondosering in de tweede stap voor de oxidatie van bio-recalcitrante componenten. In de derde processtap worden eventuele afbraakproducten van de ozonisatie biologisch afgebroken. De derde processtap is optioneel en kan naar gelang eisen en/of wensen voor verwijdering van oxidatieproducten overwogen worden.

FIGUUR 1 PROCESSHEMA BO₃(B)-TECHNOLOGIE INGEPAST OP RWZI

In Figuur 1 is inpassing van de BO₃(B)-technologie op een rwzi schematisch weergegeven. Afloop van een nabezinktank wordt gevoed aan de 1e biologische reactor, hiervoor is een pompfase voorzien. Vervolgens doorstroomt het afvalwater de ozoninstallatie en optioneel ook de 2e biologische reactor waarna het als effluent geloosd kan worden. Voor ozonisatie is opslag van vloeibare zuurstof nodig. In tegenstelling tot de meest filtratietechnieken op rwzi effluent vindt in de biologische processen van de BO₃(B)-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 SUVA₂₅₄ (mate van aromaticiteit). De verwijdering van deze parameters in de 1e biologische reactor resulteert in een navenante verlaging van de benodigde ozoninbreng. Doordat er gelijktijdig ook microverontreinigingen worden afgebroken in de 1e biologische reactor neemt daarnaast ook de vereiste specifieke ozondosering (mg O₃/mg 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 CO₂-footprint kleiner. De lage ozoninbreng zorgt er verder voor dat er geen of nauwelijks bromaat gevormd wordt (STOWA 2018-46 en 2020-41).

1.1 FOCUS OP BO₃-TECHNOLOGIE – ZONDER TWEDE B

De discussie of (biologische) nabehandeling van een ozonisatiestap nodig is voor de eventuele verwijdering van oxidatieproducten valt buiten de scope van deze haalbaarheidsstudie. Deze discussie is niet specifiek voor de BO₃(B)-technologie maar juist voor een conventionele ozonisatiestap zonder (biologische) voorbehandeling zoals in de BO₃(B)-technologie voorzien. Wel kan worden gesteld dat de absolute ozoninbreng bij de BO₃(B)-technologie lager is t.o.v. conventionele ozonisatie, hierdoor is de vorming van oxidatieproducten mogelijk minder. Om verwarring te voorkomen over de wel/niet aanwezigheid van de 2e biologische reactor is de haalbaarheidsstudie vanaf dit punt volledig gericht op de configuratie BO₃. Alle gepresenteerde resultaten zoals de verwijderingsrendementen, toxiciteitsafname, CO₂-footprint en kosten zijn voor de BO₃-configuratie uitgewerkt.

2

ACHTERGROND VAN DE TECHNOLOGIE

Bij ozonisatie van afvalwater voor de verwijdering van microverontreinigingen is de benodigde dosering recht evenredig met het totaal van de in het water aanwezige hoeveelheid organisch materiaal, gemeten als DOC of TOC. Hoe meer organisch materiaal aanwezig is, hoe meer ozon nodig is om dezelfde hoeveelheid microverontreinigingen te oxideren, omdat eerst het organisch materiaal moet worden geoxideerd. In Zwitserland zijn goede ervaringen opgedaan met de ozonisatie van afvalwater. Bij 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 BO_3 -technologie. Het doel hierbij was om door afvang van DOC de benodigde absolute ozoninbreng te kunnen verlagen en daarmee en lager energieverbruik te bewerkstelligen.

De ontwikkeling van de BO_3 -technologie is in 2016 begonnen bij de vakgroep Milieutechnologie van de Wageningen Universiteit. Vanaf 2018 is de BO_3 -technologie in samenwerking tussen de Wageningen Universiteit en Royal HaskoningDHV doorontwikkeld richting toepassing op pilot/praktijkschaal. Op lab-schaal is de BO_3 -technologie reeds uitvoerig (>4 jaar) onderzocht en is het 'proof-of-principle' aangetoond (de Wilt et al., 2018).

3

LABONDERZOEK

3.1 OPZET VAN HET LABONDERZOEK

Het labonderzoek is uitgevoerd op effluent van rwzi Bennekom (genomen vóór zandfilters). Het rwzi-effluent is belucht met pure zuurstof waardoor de opgeloste zuurstofconcentratie circa 20-25 mg/l is. De TOC-concentratie¹ van het rwzi-effluent is gemiddeld 10 mg/l, de COD-concentratie ligt rond de 25 mg/l. Voor het onderzoek is de combinatie van het biologische proces en een ozonisatiestap bestudeerd alsook het biologische proces afzonderlijk. De volgende drie verschillende biologische processen (type slib-op-drager) zijn getest: Moving Bed Bio Reactor (MBBR), Biologisch Actiefkoolfiltratie (BAKF) en zandfiltratie (ZF), zie Figuur 2. De biologische reactoren zijn initieel geënt met een mix van verschillende inocula afkomstig van o.a. rwzi Bath, iwzi Moerdijk, rwzi Horstermeer en Pharmafilter Reinier de Graaf ziekenhuis. De biologische processen zijn in een continue testopstelling bedreven.

FIGUUR 2

DE DRIE OP LAB-SCHAAL ONDERZOCHE BIOLOGISCHE PROCESSEN, V.L.N.R. BAKF, MBBR EN ZF.

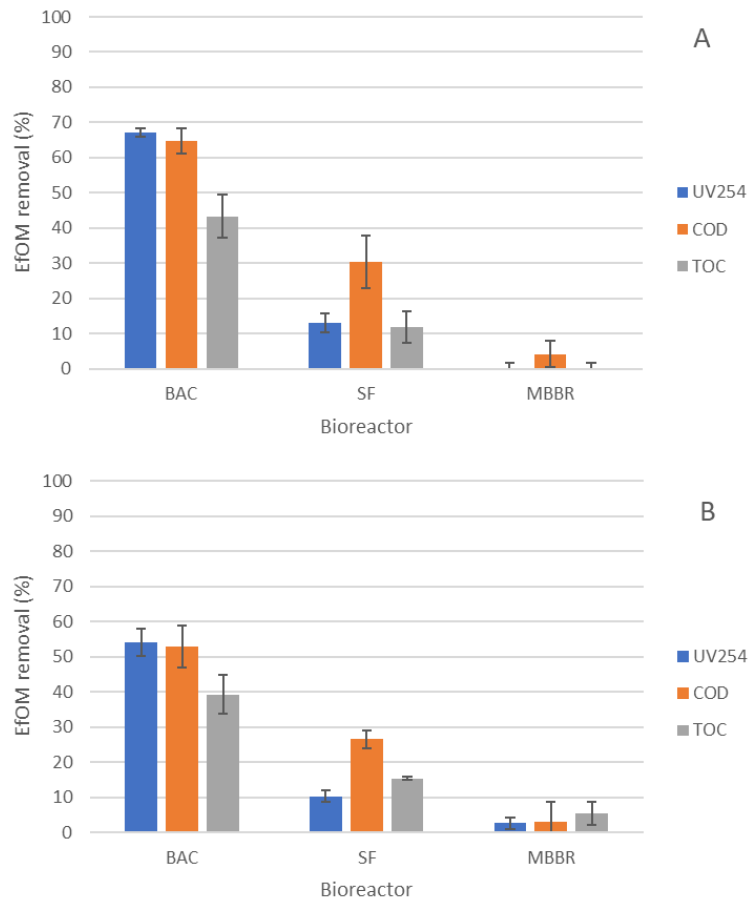


¹ Meerdere keren is bepaald dat de TOC en DOC-concentratie nagenoeg (>98%) gelijk zijn. Daar waar de benaming TOC wordt gebruikt kan de lezer ook DOC voor invullen

3.2 VERWIJDERING VAN ORGANISCH MATERIAAL IN HET BIOLOGISCHE PROCES

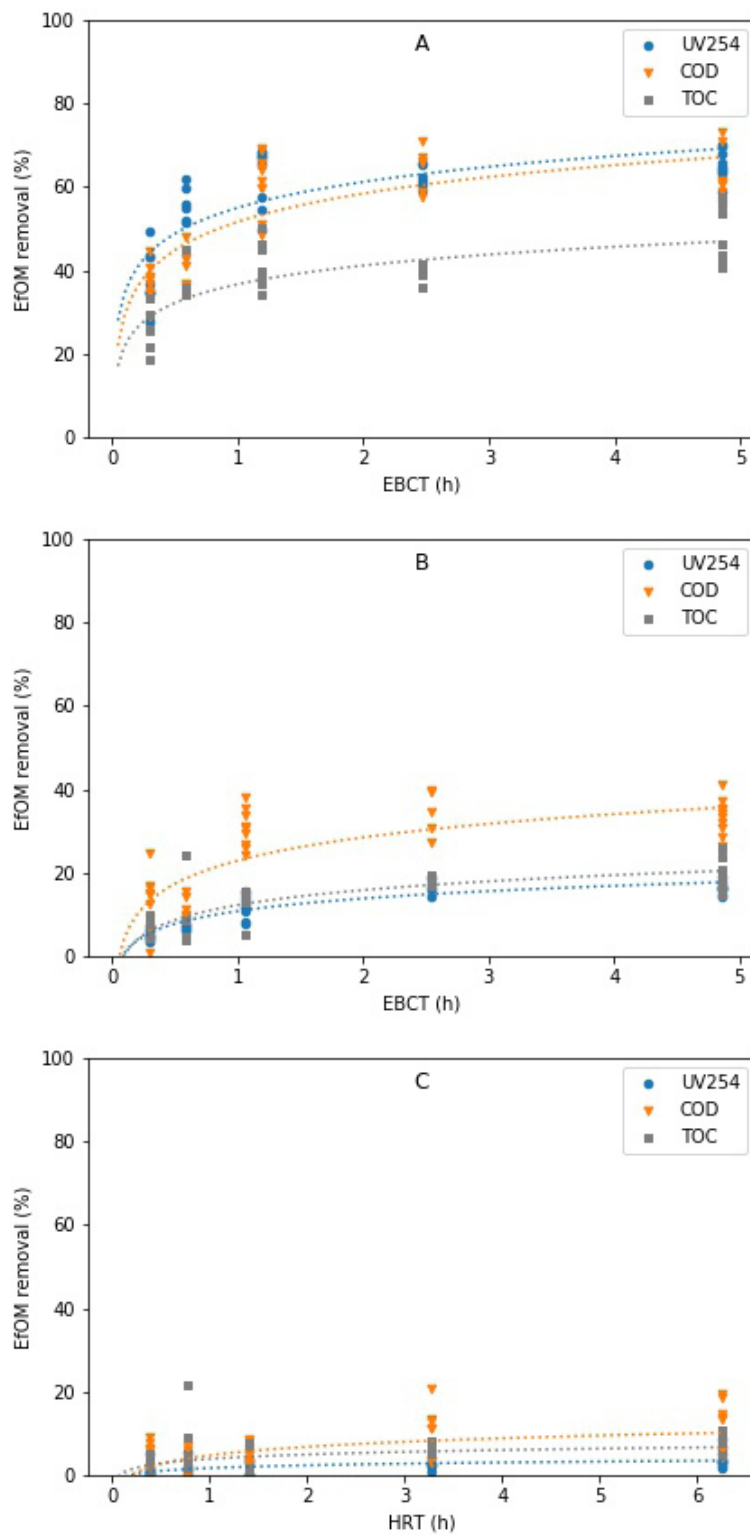
In Figuur 3 is de verwijdering van organisch materiaal in het effluent (EfOM) weergegeven, uitgedrukt als Specifieke UV Adsorptie bij 254 nm (SUVA), TOC en COD.

FIGUUR 3 AFNAME VAN SUVA, COD EN TOC IN DE DRIE REACTOREN BIJ EEN EBCT VAN 1,2 UUR (BAKF EN ZF) EN HRT VAN 1,4 UUR (MBBR). BOVEN (A) DE RESULTATEN VAN HET 'MAIN EXPERIMENT', ONDER (B) DE RESULTATEN VAN DE 'REPRODUCIBILITY TEST'



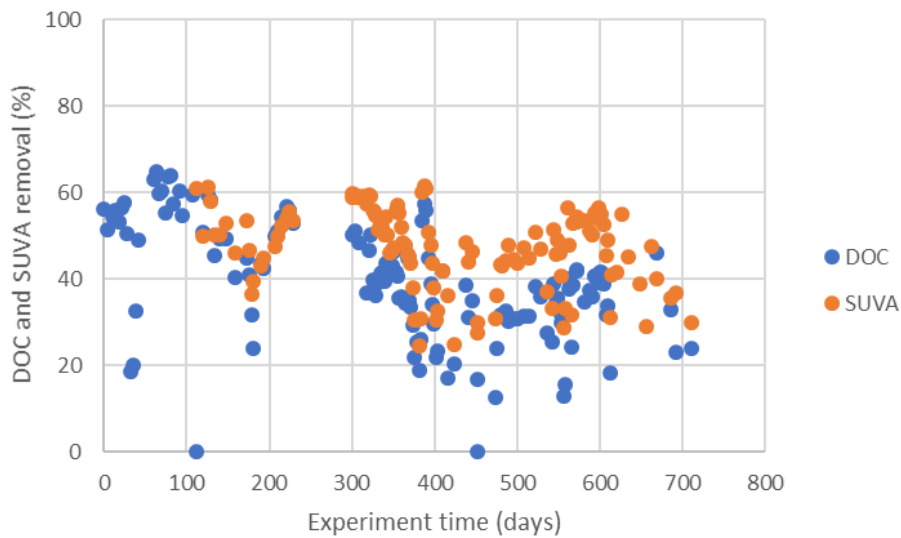
In Figuur 4 is het effect van de EBCT op de verwijdering van COD, TOC en SUVA weergegeven.

FIGUUR 4 VERWIJDERING VAN ORGANISCH MATERIAAL GEMETEN ALS TOC, COD EN UV₂₅₄ ABSORPTIE IN DE 1^E BIOLOGISCHE REACTOREN IN DE DRIE VERSCHILLENDE TYPE BIOLOGISCHE REACTOREN (A) BAKF, (B) ZFEN (C) MBBR

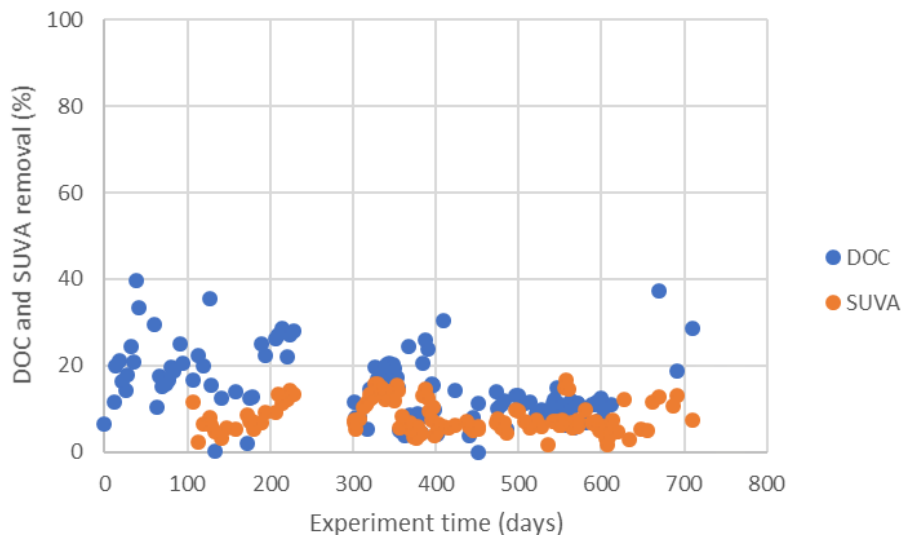


In Figuur 5 en Figuur 6 is het verloop in DOC-verwijdering en SUVA-afname over langere periode tussen 2018 en 2020 weergegeven voor respectievelijk de reactoren BAKF en zandfilter. Gedurende de weergegeven periode is de EBCT van de reactoren en de temperatuur gevarieerd als onderzoeksparameters en was de DOC-concentratie van de voeding (effluent rwzi Bennekom) niet constant. Doordat verschillende parameters onderzocht (en daarmee gevarieerd) zijn is een eenduidige conclusie over langdurige stabiliteit moeilijk te trekken. Vooralsnog lijkt het proces gedurende afgelopen 2 jaar relatief stabiel te draaien waarbij vooral de variaties in EBCT een groot effect op de verwijderingsrendementen hebben. Geconcludeerd kan worden dat door verhoging van de EBCT het verwijderingsrendement weer toeneemt ook nadat deze voorafgaand laag was tijdens een periode met een lagere EBCT.

FIGUUR 5 VERWIJDERING DOC EN AFNAME SUVA OVER DE BAKF VANAF DECEMBER 2018. VARIATIES IN VERWIJDERINGSRENDEMENTEN WORDEN HOOFDZAKELIJK VEROOORZAAKT DOOR VARIATIES IN DE ONDERZOEKSPARAMETERS EBCT EN TEMPERAATUUR



FIGUUR 6 VERWIJDERING DOC EN AFNAME SUVA OVER HET ZANDFILTER VANAF DECEMBER 2018. VARIATIES IN VERWIJDERINGSRENDEMENTEN WORDEN HOOFDZAKELIJK VEROOORZAAKT DOOR VARIATIES IN DE ONDERZOEKSPARAMETERS EBCT EN TEMPERAATUUR



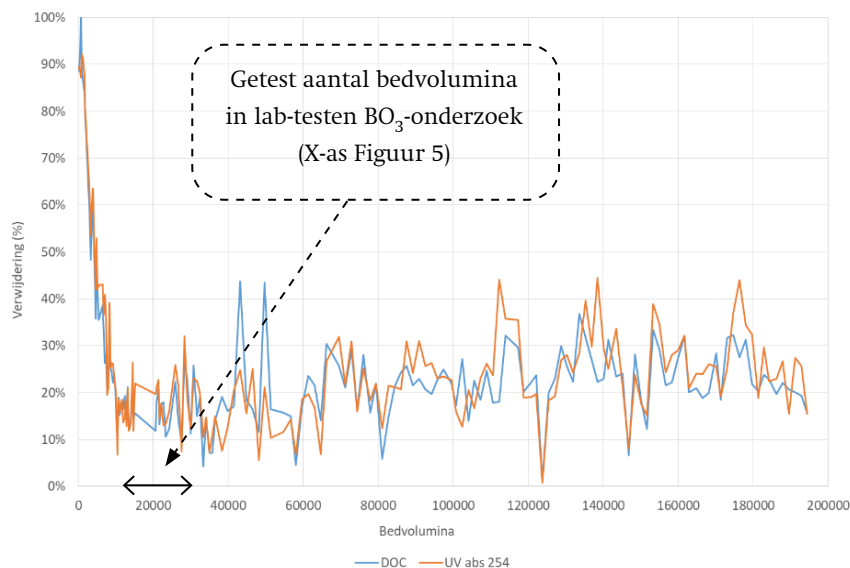
Op basis van Figuur 3 tot en met Figuur 6 kan geconcludeerd worden dat de verwijdering in de BAKF hoger is dan in het ZF. Deze uitkomst is gebruikt in de experimenten die vanaf november 2020 uitgevoerd zijn met de configuratie ' BO_3 '. De MBBR is volledig uit bedrijf genomen, het zandfilter wordt nog wel bedreven maar minder frequent gemeten.

Het dragermateriaal in de BAKF-reactor, hergebruikt GAK, is voor aanvang van de BO_3 -technologie experimenten reeds voor 38.000 bedvolumina bedreven bij Evides in drinkwaterbereiding. De DOC-concentratie van het Evides water was 2 tot 3 mg/L. Omgerekend naar een DOC-concentratie van 10 tot 11 mg/L zoals in rwzi-effluent gebruikelijk is staat dit gelijk aan circa 10.000 bedvolumina. Daarna zijn er nog circa 20.000 bedvolumina bijgekomen tijdens de lab-testen. De totale teller staat hierdoor op circa 30.000 bedvolumina.

In Figuur 7 is de verwijdering van DOC en de afname van SUVA weergegeven voor de BODAC-reactoren in de UltraPuurWaterfabriek Emmen. Hieruit kan opgemaakt worden dat het verzadigingsproces een van de GAK, en daarmee de overgang naar een BAKF-systeem, duidelijk te volgen is (afname DOC en SUVA tussen 0 en 10.000 bedvolumina). Daarna is met enige schommelingen het proces gedurende zeer lange tijd (10.000 tot 190.000 bedvolumina) stabiel.

FIGUUR 7

VERWIJDERING DOC EN AFNAME SUVA IN DE BAKF REACTOR VAN DE UPW EMMEN (BRON: H_2O 12 FEB-2020)



Wanneer het aantal bedvolumina van de BAKF (30.000) uit het BO_3 onderzoek geprojecteerd wordt op Figuur 7 kan gesteld worden dat het verzadigingspunt vóór aanvang van de BO_3 lab-testen al bereikt was. Dit wordt bevestigd door de relatief stabiele verwijderingsrendementen over de 20.000 bedvolumina in de lab-testen (Figuur 5).

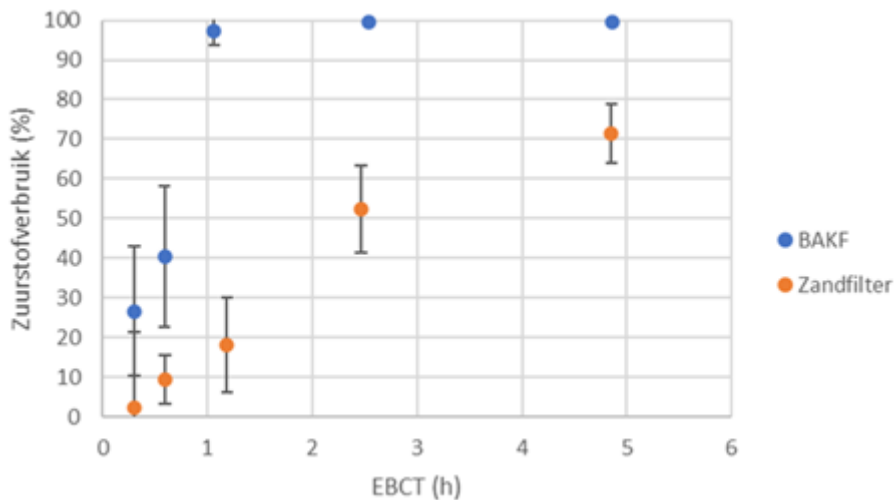
3.3 BIODEGRADATIE EN ADSORPTIE

De hypothese is dat de verwijdering die optreedt in de BAKF voortkomt uit een samenspel tussen adsorptie en biodegradatie. In de basis is GAK waarmee de BAKF gevuld is een adsorptief materiaal. Door langdurig bedrijf groeit er een microbiële populatie in de reactor. Na het bereiken van het verzadigingspunt rond 10.000 bedvolumina is het naar verwachting een combinatie van beide processen die voor de verwijdering uit de waterfase zorgt van diverse componenten zoals DOC, ammonium en microverontreinigingen. Naast de langdurige DOC-verwijdering is een tweede indicatie dat het een (gedeeltelijk) biologisch proces betreft

het zuurstofverbruik over de BAKF. In Figuur 8 is het zuurstofverbruik weergegeven voor de BAKF en het zandfilter. Het zuurstofverbruik is bepaald als het verschil in opgeloste zuurstofconcentratie voor en na de reactoren. Bij kortere hydraulische verblijftijden is het zuurstofverbruik laag. Dit komt overeen met de lage DOC-verwijdering bij een korte verblijftijd zoals te zien is in Figuur 4. Er is onvoldoende tijd voor adsorptie en/of biodegradatie. Bij langere verblijftijden neemt het zuurstofverbruik toe, evenals de DOC-verwijdering. Het zuurstofverbruik in de BAKF is consequent hoger dan in het zandfilter, ditzelfde geldt voor de DOC-verwijdering. Het zandfilter is gevuld met zand, een materiaal zonder adsorptiecapaciteit m.b.t. DOC of microverontreinigingen. De verwijdering van DOC en het zuurstofverbruik in het zandfilter lijkt dus een puur biologisch proces. DOC kan dus biologisch afgebroken worden. De verhoogde DOC-verwijdering en zuurstofverbruik in de BAKF zijn daardoor zeer waarschijnlijk ook (gedeeltelijk) gerelateerd aan biodegradatie.

FIGUUR 8

ZUURSTOFVERBRUIK VAN DE BAKF EN HET ZANDFILTER BIJ VERSCHILLENDE VERBLIJFTIJDEN



3.4 VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN IN HET BIOLOGISCHE PROCES

In Tabel 2 zijn de verwijderingspercentages van microverontreinigingen over de 3 biologische processen weergegeven. Totaal zijn er in deze fase van het onderzoek 10 gidsstoffen gemeten, de bepaling van de 11e gidsstof (sotalol) lukte helaas niet door een analytisch probleem. Voor de verwijdering van de 10 gidsstoffen ligt het gemiddelde verwijderingsrendement voor de BAKF-reactor boven de 90% (m.u.v. hydrochloorthiazide in week 1). Voor het ZF is dit 37%, voor de MBBR 16%.

TABEL 2 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN MICROVERONTREINIGINGEN OVER DE BIOLOGISCHE REACTOREN BIJ EEN EBCT VAN 1,2 UUR (BAKF EN ZF) EN HRT 1,4 UUR (MBBR). VETGEDRUKT DE GIDSSTOFFEN (10 STOFFEN).

	BAKF		ZF		MBBR	
	Week 1	Week 12	Week 1	Week 12	Week 1	Week 12
Hydrochlorothiazide	53	>99	>99	>99	16	>99
Propranolol	99	98	85	87	38	42
Metoprolol	>99	>99	59	86	12	42
Caffeine	91	92	64	71	32	28
Trimethoprim	>99	>99	64	63	10	-9
Sulfamethoxazole	>99	>99	63	36	13	7
Clarithromicin	99	98	41	40	-6	20
Naproxen	>99	>99	50	9	75	54
Benzotriazole	>99	99	9	9	9	16
4 & 5 methyl benzotriazole	>99	99	4	5	8	6
Chloridazon	>99	>99	5	20	5	13
Carbamazepine	>99	>99	3	6	7	8
Diclofenac	99	97	11	3	52	14
Furosemide	94	>99	NA	23	25	68
BAM	99	94	3	-8	14	5
Desphenyl chloridazon	70	82	NA	NA	2	-6
Mecoprop	80	72	NA	11	NA	27
2,4D	33	54	10	0	NA	6

De resultaten van de BAKF zoals weergegeven in Tabel 2 zijn bereikt bij een EBCT van 1,2 uur. De (zeer) hoge verwijderingsrendementen van de BAKF laten zien dat een lagere EBCT gehanteerd kan worden voor de doelstelling van 70% verwijdering van 7 van de 11 gidsstoffen over de gehele rwzi. Immers, in de BO₃-configuratie volgt er ook nog een ozonisatiestap na het biologische proces.

3.5 VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN IN DE BO₃-CONFIGURATIE

In navolging van het onderzoek naar de biologische reactoren is ook de configuratie “BO₃” getest waarbij een ozonreactor na de biologische reactor is geplaatst. In Tabel 3 zijn de resultaten weergegeven van de BO₃-configuratie met BAKF als “B”.

TABEL 3 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VAN MICROVERONTREINIGINGEN OVER DE BO₃-CONFIGURATIE MET BAKF ALS BIOLOGISCHE REACTOR BIJ EEN EBCT VAN 0,3 UUR EN VERSCHILLENDE SPECIFIEKE OZONDOSERINGEN

Specifieke ozondosis (g O ₃ /g DOC)	-	0,2	0,4	0,6
Gemiddeld gidsstoffen	59	95	97	99
7 best verwijderde gidsstoffen	78	98	99	99

Uit de resultaten van de BO₃-configuratie blijkt dat er zeer hoge verwijderingsrendementen kunnen worden gehaald met de BO₃-technologie. De kracht van de combinatie van de beide processtappen, respectievelijk BAKF en ozonisatie, is duidelijk zichtbaar. Enkele stoffen die zonder toevoeging van ozon matig worden afgebroken zoals carbamazepine, worden door toevoeging van ozon verregaand verwijderd.

3.6 TECHNOLOGY READINESS LEVEL

De 'proof-of-principle' van de BO₃-technologie is op lab-schaal aangetoond en gepubliceerd (*de Wilt et al, 2018*), daarmee is de huidige TRL 4. Een vervolgonderzoeksfase met pilottesten is nodig om de TRL te verhogen naar 5-6, middels pilottesten binnen het IPMV kan dit rond 2022-2023 bereikt zijn. Bij succesvolle pilottesten kan snel opgeschaald worden naar TRL 7-9 omdat vergelijkbare ozon-installaties reeds full-scale toegepast worden en er in zijn algemeenheid veel ervaring is met het ontwerpen en realiseren van biologische filtratietechnieken. In 2024-2025 kan een demo-installatie (TRL 7) gerealiseerd zijn.

4

DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN

Voor de doorvertaling naar een 100.000 i.e. schaalgrootte zijn er op basis van de labtesten dimensioneringsgrondslagen geschat. Deze zijn ook gehanteerd in de berekeningen van de inpasbaarheid in de Nederlandse zuiveringspraktijk en voor het ramen van de jaarlijkse kosten.

TABEL 4 GEGEVENS TE BEHANDELEN AFVALWATER

Parameter	Eenheid	Waarde
Capaciteit rwzi	i.e. 150 g TZV	100.000
Jaardebiet rwzi	m ³ /jaar	7.665.000
Percentage te behandelen	%	70%
Jaardebiet te behandelen	m ³ /jaar	5.365.500
Ontwerp capaciteit	m ³ /h	1.040
DOC effluent rwzi	mg/l	11
NO ₂ effluent rwzi	mg N/l	0,1 – 0,2
NH ₄ effluent rwzi	mg N/l	3

TABEL 5 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN BAKF

Parameter	Eenheid	Waarde ²
EBCT	uur	0,3 – 1,2 (0,5)
Jaarlijkse aanvulling GAK	%/jaar	2,5 – 5,0% (3,75%)
Stroomsnelheid	m/uur	2 – 5 (2,5)
Benodigd reactor oppervlak	m ²	200 – 500 (400)
Hoogte reactor	m	1,5 – 6,5 (3)
DOC verwijdering bioreactor	%	20-40% (20%)
DOC afloop bioreactor	mg/l	8,8
NO ₂ -omzetting bioreactor	%	>95%
NO ₂ afloop bioreactor	mg/l	0,0
NH ₄ -omzetting bioreactor	%	>95%
NH ₄ afloop bioreactor	mg/l	<0,15

TABEL 6 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN OZONREACTOR

Parameter	Eenheid	Waarde
Contacttijd	min	15
Specifieke ozondosering	mg O ₃ /mg DOC	0,20
Ozondosering	g O ₃ /m ³	1,8

- 2 Voor meerdere parameters staan de dimensioneringsgrondslagen nog onvoldoende vast om een eenduidige waarde te geven. In het labonderzoek zijn diverse parameters gevarieerd. Daarom is gekozen om voor enkele parameters ranges aan te geven. Indien een range is aangegeven staat tussen haakjes in cursief de waarde die is toegepast voor de kostenraming.

5

INPASBAARHEID IN DE NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK

Hieronder is de inpasbaarheid gegeven van de BO_3 -technologie op Nederlandse rwzi's met een schaalgrootte van 100.000 i.e.

5.1 EFFECT OP BEDRIJFSVOERING

SLIBPRODUCTIE

Door de zeer arme voeding waarmee de 1e bioreactor gevoed wordt vindt er nauwelijks biomassagroei plaats. Hierdoor is de slibproductie in de biologische reactor zeer klein ten opzichte van de slibproductie in het actiefslibproces. Ingevangen onopgeloste bestanddelen en biomassagroei zal een verwaarloosbaar klein effect hebben op de totale slibproductie van de rwzi. Bij eventuele periodieke spoeling, zie volgende kopje, van de biologische reactor zal het vrijgekomen slib worden geretourneerd naar het actiefslibproces.

SPOELWATERVERBRUIK EN WASWATERPRODUCTIE

In het labonderzoek worden de reactoren bedreven zonder terugspoeling. Gedurende meerdere jaren onderzoek zijn de reactoren niet verstopt en heeft ook geen visueel waarneembare uitspoeling plaatsgevonden. Mogelijk dat dit komt door de lage doorstroomsnelheid waardoor ook zwevende deeltjes (deels) afgebroken worden. Vanuit de praktijk is bekend dat actiefkool- en zandfilters wel met enige regelmaat gespoeld dienen te worden. Een belangrijk verschil is dat de stroomsnelheid in actiefkool- en zandfilters typisch 10 m/ uur of meer is en daarmee een factor 4 of meer hoger ligt. Omdat de BO_3 -technologie nog niet anders dan op labschaal is onderzocht is vooralsnog aangehouden dat er in een full-scale installatie periodieke spoelingen moeten plaatsvinden. De waswaterstroom die hierbij ontstaat wordt geschat op maximaal 5% van het debiet. Op jaarbasis is dit ongeveer 270.000 m^3 . Deze stroom kan teruggevoerd worden naar het actiefslibproces op de rwzi.

ENERGIEVERBRUIK

Het energieverbruik van de rwzi zal toenemen met circa 241.000 kWh per jaar. Dit komt neer op 0,045 kWh/ m^3 behandeld water. Circa de helft hiervan wordt gebruikt voor de productie van ozon, de koeling van de ozongenerator en randapparatuur van de ozoninstallatie zoals de restozondestructor. Het opvoeren van water vraagt ook energie. Er is gerekend met een opvoerhoogte van 6 meter van het te behandelen water om de gehele BO_3 -installatie te doorstromen.

CHEMICALIËNVERBRUIK

Net zoals bij conventionele ozonisatie is bij de BO_3 -technologie zuurstof vereist voor de productie van ozon. Door de verlaagde ozondosis is ook het zuurstofverbruik lager dan bij

conventionele ozonisatie. Voor de biologische reactor is een jaarlijkse aanvulling van GAK nodig, deze ligt in de ordegrootte van 2,5 tot 5% van de totale hoeveelheid GAK.

EFFLUENTKWALITEIT

De kwaliteit van het effluent zal toenemen door de verwijdering van microverontreinigingen. Daarnaast zullen ook eventueel aanwezige restjes ammonium en nitriet omgezet worden in nitraat. Dit heeft een positief effect op de effluentkwaliteit. De verwachting is dat ook onopgeloste bestanddelen zoals uitgespoeld slib (deels) ingevangen worden in de 1^e biologische reactor en hierdoor niet of minder uitspoelen. Door de combinatie van bovenstaande factoren zal zowel de chemische als de ecotoxicologische waterkwaliteit verbeteren.

5.2 INPASSING OP DE LOCATIE

Voor de inpassing van de BO₃-technologie op een rwzi moet de afloop van de nabezinktank kunnen worden opgepakt. Na behandeling in de BO₃ installatie kan het water uitstromen via het oude lozingspunt. Om een piekaanvoer van 1.040 m³/uur te kunnen behandelen zoals voorgeschreven bij een 100.000 i.e. rwzi is een ozonreactor van circa 250 m³ nodig (15 minuten contacttijd). Bij een standard reactordiepte van 5 á 6 meter is het ruimtebeslag dan circa 50 m². Voor de biologische reactor is een oppervlakte van 200 tot 500 m² nodig. Het totale ruimtebeslag, inclusief opstelling zuurstoftank en leidingwerk, wordt geschat op 700 tot 900 m².

5.3 VOOR WELKE TYPE RWZI'S GESCHIKT

De BO₃-technologie is in principe toepasbaar op alle type rwzi's waar de wens is om microverontreinigingen te verwijderen en voldoende fysieke ruimte beschikbaar is.

De technologie kan zowel worden toegepast op rwzi's waar nog geen ozon-installatie aanwezig is als op rwzi's waar deze al wel gerealiseerd is. In dit laatste geval kan de 'B' stap van de BO₃-technologie alsnog ingepast worden als hiervoor de fysieke ruimte aanwezig is.

6

KOSTENRAMING

De geraamde stichtingskosten en jaarlasten van de BO₃-technologie voor een 100.000 i.e. schaal rwzi zijn in Tabel 7 en Tabel 8 gegeven. Voor de kostenraming zijn de IPMV-uitgangspunten gehanteerd, in bijlage 1 zijn deze gegeven.

TABEL 7 RAMING STICHTINGSKOSTEN PER DISCIPLINE BO₃-TECHNOLOGIE OP 100.000 I.E. SCHAAL

	C	WTB	E/PA
Bioreactor			
Stichtingskosten ³	€ 1.266.000	€ 816.000	€ 281.000
Vulling GAK	€ 624.000		
Ozon installatie			
Stichtingskosten ³	€ 702.000	€ 1.826.000	€ 589.000
Totale stichtingskosten			€ 6.104.000

³ Inclusief 25% onvolledigheid, 25% aannemerskosten en 80% om van bouwkosten naar stichtingskosten te gaan. Het totaal van opslagfactoren tussen kale bouwkosten en stichtingskosten is daarmee 2,81

TABEL 8 RAMING JAARLIJKSE KOSTEN BO₃-TECHNOLOGIE OP 100.000 I.E. SCHAAL

Kostenpost	Kosten (€/jaar)
Kapitaalslasten C - ozonisatie	€ 40.597
Kapitaalslasten WTB - ozonisatie	€ 164.190
Kapitaalslasten E/PA - ozonisatie	€ 52.965
Onderhoud C - ozonisatie	€ 2.340
Onderhoud WTB - ozonisatie	€ 36.511
Onderhoud E/PA - ozonisatie	€ 11.778
Kapitaalslasten C - bioreactor	€ 109.277
Kapitaalslasten WTB - bioreactor	€ 73.358
Kapitaalslasten E/PA - bioreactor	€ 25.296
Onderhoud C - bioreactor	€ 3.516
Onderhoud WTB - bioreactor	€ 13.594
Onderhoud E/PA - bioreactor	€ 4.688
Personeel	€ 15.000
Kosten zuurstof	€ 20.985
Huur zuurstofopslag	€ 4.950
Kosten elektriciteit	€ 24.110
Kosten waswaterbehandeling	€ 2.683
Kosten GAK-aanvulling	€ 23.400
Totaal	€ 630.000

In de gepresenteerde kostenraming is uitgegaan van het gebruik van verse GAK. Zowel voor de eenmalige vulling alsook voor de jaarlijkse bijvulling. De BO₃-technologie is op labschaal bedreven op verzadigde GAK uit een drinkwaterzuiveringsinstallatie. Deze GAK is voor de drinkwaterzuivering niet meer effectief genoeg en zou normaliter geregenereerd worden om vervolgens weer in de drinkwaterzuivering toegepast te worden. Een full-scale BO₃ installatie zou dus ook gevuld kunnen worden met verzadigde GAK uit een drinkwaterzuiveringsinstallatie of uit een ander proces. De kosten zullen hierdoor afnemen. Ter indicatie, de kosten voor verse GAK zijn conform de IPMV-richtlijnen inclusief BTW €1.200/m³, de kosten voor geregenereerde GAK zijn €500/m³. De totale investeringskosten verlagen bij gebruik van verzadigde GAK met een prijs van €500/m³ tot een bedrag van € 5.740.000, de bijbehorende jaarlasten zijn € 595.000.

De kostenraming is conform de IPMV-richtlijnen gebaseerd op een dimensionering van de BO₃-technologie waarmee 70% van het jaardebiet van de 100.000 i.e. rwzi wordt behandeld. In Tabel 9 zijn de kosten vertaald naar kuub rWZi debiet, kuub behandeld debiet en inwonerequivalenten weergegeven, allen bij gebruik van verse- en geregenereerde GAK.

TABEL 9 KOSTEN BO₃-TECHNOLOGIE PER KUB EN I.E. OP EEN 100.000 I.E. SCHAAL BIJ GEBRUIK VAN VERSE EN GEREGENEREERDE GAK

Parameter	Eenheid	Verse GAK	Geregenereerde GAK
Kosten per kuub rwzi debiet	€/m ³	0,082	0,078
Kosten per kuub behandeld debiet	€/m ³	0,117	0,111
Kosten per inwonerequivalent	€/jaar/i.e.	6,29	5,95

7

BEOORDELING TOETSINGSCRITERIA

In dit hoofdstuk wordt de BO₃-technologie beoordeeld op de toetsingscriteria behorende bij categorie 2.1 zoals gesteld in de richtlijnen van het Innovatieprogramma⁴ en vergeleken met de referentietechnieken.

7.1 VERWIJDERINGSRENDEMENT MICROVERONTREINIGINGEN

De labtesten tonen aan dat het verwijderingsrendement voor 7 van de 11 gidsstoffen over enkel de BO₃-technologie ruim boven de 95% ligt (zie Tabel 3), dit is exclusief het actiefslib-systeem. Door de dubbele-barrière configuratie van de BO₃-technologie is de breedte van het palet microverontreinigingen dat wordt verwijderd groter ten opzichte van een enkele technologie zoals bijvoorbeeld ozonisatie.

7.2 CO₂-FOOTPRINT

De CO₂-footprint is gegeven in Tabel 10. De footprint is berekend op basis van het door STOWA verstrekte model “CO₂-footprint rwzi’s micro’s 100.000 i.e. versie 5”. In de berekening van de CO₂-footprint is uitgegaan van het gebruik van verse GAK. Zowel voor de eenmalige vulling alsook voor de jaarlijkse bijvulling. Geregeneerde GAK heeft een aanzienlijk lagere CO₂-footprint dan verse GAK. Analooq aan de kostenberekening is daarom ook de CO₂-footprint gegeven bij gebruik van geregeneerde GAK.

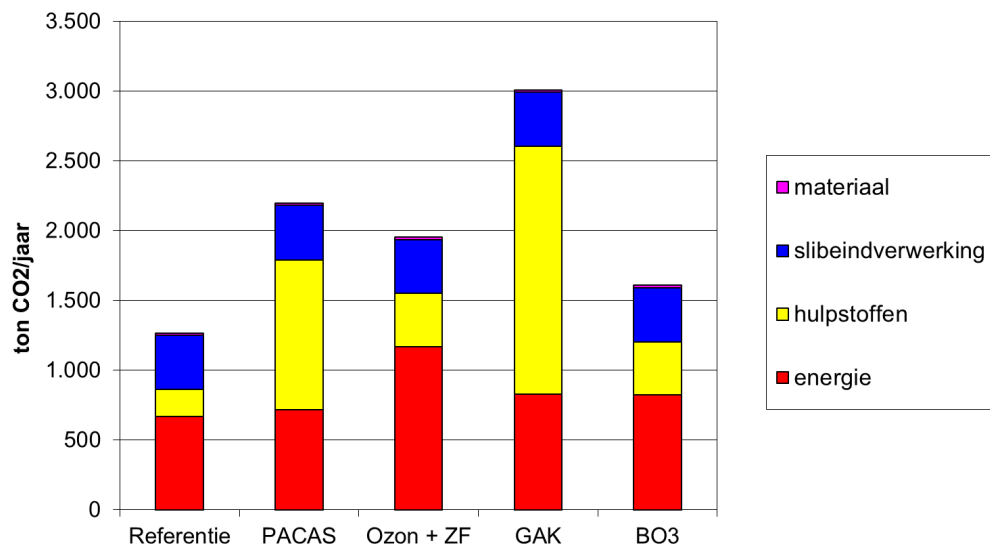
TABEL 10 CO₂-FOOTPRINT BO₃-TECHNOLOGIE VOOR EEN 100.000 I.E. SCHAAL

Parameter	Eenheid	Verse GAK	Geregeneerde GAK
CO ₂ per jaar	ton CO ₂ /jaar	339	235
CO ₂ per kuub rwzi debiet	g CO ₂ /m ³	44	31
CO ₂ per kuub behandeld debiet	g CO ₂ /m ³	63	44

In Figuur 9 is de opbouw van de CO₂-footprint gegeven. Ten opzichte van de referentietechnieken PACAS, ozonisatie met zandfiltratie en GAK-filtratie is de CO₂-footprint van de BO₃-technologie relatief laag. Dit komt voornamelijk door de verwijdering van DOC in de biologische reactor en de lage specifieke ozondosering van 0,2 g O₃/g DOC. Hierdoor is de absolute ozoninbreng zeer gering en daarmee het energieverbruik laag. Daarnaast is in vergelijking met PACAS of GAK-filtratie het verbruik van actiefkool zeer laag in de BO₃-technologie.

FIGUUR 9

OPBOUW CO₂-FOOTPRINT VAN DE REFERENTIE RWZI ZONDER EN MET AANVULLENDE ZUIVERINGSSTAPPEN WAARONDER DE BO₃-TECHNOLOGIE MET VERSE GAK



7.3 ECOTOXICITEIT

De verwachting is dat gelijk aan de referentietechnologieën PACAS en ozonisatie een afname van de ecotoxiciteit wordt bereikt met de BO₃-technologie. De daadwerkelijke reductie in ecotoxiciteit gemeten conform de handreiking biologische effectenmonitoring is naar alle waarschijnlijkheid afhankelijk van de ozondosering en het bijbehorende verwijderingsrendement van microverontreinigingen.

In labonderzoek is een eerste verkenning gemaakt naar de ecotoxiciteit reductie. Middels de bioassays Daphniatox en Microtox (beiden onderdeel van handreiking biologische effectmonitoring) en Algaetox is aangetoond dat de afloop van de BO₃-technologie niet meer toxisch is. Vanaf juli 2021 wordt onderzocht in zogenaamde ‘mesocosm’ experimenten wat het effect van de BO₃-technologie is op de ecologische waterkwaliteit. In deze experimenten worden vele kleinschalige aquatisch ecosystemen opgezet om de invloed van wel of niet behandeld water op de aquatische ecologie te volgen.

7.4 BROMAATVORMING

Tijdens het ozonisatieproces kan bromide worden omgezet tot bromaat. Uit de pilotstudie ozonisatie op rwzi Aarle-Rixtel is gebleken dat bij lage ozondoseringen tot circa 0,4 g O₃/g DOC weinig tot geen bromaatvorming optreedt (STOWA 2020-41). Doordat de BO₃-technologie zeer lage absolute ozondoseringen kent (20% DOC verwijdering in biologische reactor en specifieke ozondosering van 0,2 g O₃/g DOC) is de verwachting dat bromaatvorming slechts zeer gering zal zijn. In de reeds verrichte labonderzoeken is de bromaatvorming wegens analytische beperkingen nog niet gekwantificeerd.

7.5 TRANSFORMATIEPRODUCTEN

Bij de reactie van ozon met afvalwater ontstaan zogenoemde transformatieproducten. De voornaamste is bromaat. Daarnaast zijn er ook nog enkele (organische) transformatieproducten die gevormd worden. De vorming hiervan is afhankelijk van de absolute ozondosering. Omdat deze bij de BO₃-technologie relatief laag is wordt een geringe formatie van transformatieproducten verwacht. Nader onderzoek zal moeten aantonen of dit ook het geval is.

7.6 VERGELIJKING TEN OPZICHTE VAN REFERENTIETECHNIEK

De BO₃-technologie is ingedeeld in categorie 2 (fossiel-arm) van het IPMV. Voor deze categorie gelden de toetsingscriteria zoals weergegeven in Tabel 11. De voorgestelde technologie dient een verbetering op te leveren ten opzichte van huidige bewezen technologieën voor de verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater voor één van de aspecten CO₂-footprint, kosten of effluentkwaliteit.

TABEL 11 TOETSINGSCRITERIA IPMV CATEGORIE 2 EN PRESTATIES BO₃-TECHNOLOGIE

	Eenheid	Fossiel-arm nageschakeld	BO ₃
CO ₂ -footprint ⁵	kg CO ₂ /m ³	70	44 - 63 ⁶
Kosten ⁵	€/m ³	0,30	0,11 - 0,12 ⁶
Verwijderingsrendement gidsstoffen ⁷	%	70%	>95%

Geconcludeerd kan worden dat de BO₃-technologie voldoet aan de toetsingscriteria voor categorie 2.

In Tabel 12 is de vergelijking gegeven op de toetsingscriteria tussen de BO₃-technologie en de referentietechnieken van het IPMV.

TABEL 12 VERGELIJKING BO₃-TECHNOLOGIE MET DE REFERENTIETECHNOLOGIEËN VAN HET IPMV

	Eenheid	PACAS	Ozon + ZF	GAK	BO ₃
CO ₂ -footprint ⁵	kg CO ₂ /m ³	122	128	325	44 - 63 ⁶
CO ₂ -footprint ⁵	ton CO ₂ /jaar	2.198	1.953	3.009	1.502 - 1.608 ⁶
Kosten ⁵	€/m ³	0,05	0,17	0,26	0,11 - 0,12 ⁶
Verwijderingsrendement gidsstoffen ⁷	%	70-75%	80-85%	80-85%	>95%

5 Per m³ behandeld rioolwater oftewel de totale kosten of CO₂-emissie van de inzet van de aanvullende technologie gedeeld door het aantal behandelde m³. Voor nageschakelde technologie geldt dat minimaal 70% van het jaarvolume moet worden behandeld en de dagelijks droogweer piek (1.040 m³/uur)

6 Afhankelijk van gebruik verse GAK of geregenereerde GAK

7 Verwijderingsrendement effluent rwzi ten opzichte van influent rwzi voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen benzotriazol, clarithromycine, carbamazepine, diclofenac, metropolol, hydrochloorthiazide, mengsel van 4- en 5- methylbenzotriazol, propanolol, sotalol, sulfamethoxazol, trimethoprim in elk 24h of 48h debiets- of tijdsproportioneel monster, waarbij rekening is gehouden met verblijftijd van het rioolwater in de rwzi

8

LITERATUURLIJST

- de Wilt, A., van Gijn, K., Verhoek, T., Vergnes, A., Hoek, M., Rijnaarts, H., & Langenhoff, A. (2018). Enhanced pharmaceutical removal from water in a three step bio-ozone-bio process. *Water Research*, 138, 97–105
- STOWA 2018-46 Zoetwaterfabriek awzi de Groote Lucht: Pilotonderzoek Ozonisatie en Zandfiltratie. ISBN 978.90.5773.815.9
- STOWA 2020-41 Pilotonderzoek vergelijking oxidatieve technieken effluent rwzi Aarle-Rixtel. ISBN 978.90.5773.907.1

BIJLAGE 1

UITGANGSPUNTEN 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 /m³
- Gereactiveerd granulair actief kool: € 500 /m³
- Methanol: € 355/kg
- Slibverwerking: € 600 per ton ds (slibindikking, slibontwatering en slibeindverwerking incl. transport)
- Productie van spoelwater uit effluent: € 0,04/m³
- Verwerking spoelwater op rwzi: € 0,01/m³