



Ministerie van Infrastructuur
en Waterstaat

stowa

PILOT PAC-03



RAPPORT

2023
44

PILOT PAC-03

RAPPORT

2023
44

ISBN 978.94.6479.047.4



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

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

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Manon Bechger – Waternet
Patricia Clevering-Loeffen – SWECO
Maaïke 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 2023-44
ISBN 978.94.6479.047.4

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.
Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

TEN GELEIDE

PAC-O₃ IS EEN ZUIVERINGSCONCEPT VOOR DE VERWIJDERING VAN EEN BREED PALET MICROVERONTREINIGINGEN.

De technologieën PACAS en ozonisatie worden gecombineerd waardoor zowel de PAK-dosering als de ozondosis laag kunnen blijven. Dit vermindert enkele nadelen van beide technologieën.

Binnen het Innovatieprogramma Microverontreinigingen (IPMV) van STOWA en het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat worden diverse technologieën onderzocht voor de verwijdering van organische microverontreinigingen uit afvalwater. Hierbinnen is het PAC-O₃ concept ondergebracht in het thema 'Oxidatieve technieken'. Na positieve afronding van een haalbaarheidsstudie in 2020 is het PAC-O₃ concept nader onderzocht op pilotschaal. Op de aspecten verwijderingsrendement, kosten en duurzaamheid (CO₂-footprint) is het concept vergeleken met de referentietechnologieën PACAS, Ozonisatie + Zandfiltratie en GAK-filtratie.

Het PAC-O₃ concept is een combinatie van de technologieën PACAS en ozonisatie, twee reeds bewezen technologieën voor de verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater. De synergie die ontstaat door beide technologieën te combineren heeft voordelen die de individuele technologieën overstijgen. De basis van de synergie is het gegeven dat elke individuele microverontreiniging een andere affiniteit heeft voor adsorptie en oxidatie. Door het toepassen van één van deze twee mechanismen worden microverontreinigingen met een lage affiniteit voor het desbetreffende reactiemechanisme slecht verwijderd. In deze studie is aangetoond dat door beide reactiemechanismen toe te passen het palet aan verwijderde microverontreinigingen vergroot wordt ten opzichte van toepassing van PACAS. Ten opzichte van ozon is het palet aan verwijderde stoffen ongeveer gelijk tot iets beter. Daarnaast wordt potentieel minder bromaat gevormd door PACAS en ozonisatie te combineren vanwege de lagere ozondosis dan bij toepassing van ozon alleen. De bromaatvorming kan nog verder beperkt worden door de optimalisatie van het ozon inbrengsysteem.

Op basis van de uitkomsten van het pilotonderzoek lijkt PAC-O₃ een interessante technologie voor het verwijderen van een breed palet microverontreinigingen en het behalen van een relatief hoog rendement. De CO₂-footprint van het PAC-O₃ concept is net iets lager dan die van de referentietechnologieën. Op de schaal van een 100.000 i.e. rwzi liggen de kosten met € 0,10 per behandelde kuub water net iets hoger dan die van PACAS, maar wordt een hoger verwijderingsrendement behaald (70-75% PACAS, 75-80% PAC-O₃). De PAC-O₃ kosten en het verwijderingsrendement zijn iets lager dan die van Ozon + Zandfiltratie.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

PAC-O₃ is een technologie waarbij poederactiefkool (PAK) in het actiefslibproces gedoseerd wordt én het effluent met ozon wordt behandeld. Een afgeslankte PACAS en een afgeslankte nageschakelde ozonisatie. Door gebruik te maken van twee reactiemechanismen, adsorptie en oxidatie, kunnen beide mechanismen in minder intensieve vorm worden bedreven dan wanneer deze als individuele technologie (stand-alone) worden toegepast. In 2019-2020 is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd (STOWA 2020-23) naar het PAC-O₃ zuiveringsconcept. Hieruit volgde dat PAC-O₃ potentieel een kansrijk concept lijkt voor de verwijdering van een breed palet organische microverontreinigingen.

In navolging van de haalbaarheidsstudie zijn op rwzi Leiden-Noord van het Hoogheemraadschap van Rijnland door Royal HaskoningDHV testen op pilotschaal uitgevoerd om het PAC-O₃ concept nader te onderzoeken. De hoofddoelen van het pilotonderzoek waren 1) onderzoeken welke verwijderingsrendementen voor microverontreinigingen en breedte van het palet behaald kunnen worden, 2) vergelijken PAC-O₃ met individuele technologieën PACAS en ozonisatie qua kosten en duurzaamheid en 3) het nagaan of het concept op een Nederlandse rioolwaterzuivering in de praktijk goed functioneert. Aanvullend op de hoofddoelen zijn ook 'neveneffecten' in kaart gebracht, zoals bromaatvorming en N- en P-verwijdering.

PAK-doseringen van 5, 7,5, 10 en 12,5 mg/L en specifieke ozondoseringen tussen 0,2 en 0,7 g O₃/g DOC zijn getest. Voor de vergelijking tussen de technologieën Ozonisatie en PAC-O₃ werd de configuratie Ozonisatie (ozonisatie op de referentiestraat) enkel bij een ozondosering tussen 0,6 en 0,7 g O₃/g DOC getest.

De gemiddelde verwijdering van de 7 beste van de 11 gidsstoffen was boven de 80% bij alle PAK-doseringen gecombineerd met alle specifieke ozondoseringen. Bij de laagste specifieke ozondosering (~0,2 g O₃/g DOC) was de gemiddelde verwijdering bij PAK-doseringen van 5, 7,5, 10 en 12,5 mg/L respectievelijk 86%, 82%, 91% en 83%. Dit resultaat volstaat om te voldoen aan de doelstelling om een jaargemiddeld rendement van 70% te behalen. Het jaargemiddeld rendement is lager dan bovengenoemde rendementen vanwege het aftoppen van de PAK-dosering tijdens RWA en een bypass rondom de ozoninstallatie tijdens RWA. Op basis van de behaalde verwijderingsrendementen is de inschatting gemaakt dat een PAK-dosering van 5 mg/L en een specifieke ozondosering van 0,3 g O₃/g DOC volstaat om het gewenste rendement te behalen. Met PAC-O₃ kan een breder palet stoffen verwijderd worden dan met stand-alone PACAS. In vergelijking met stand-alone ozon wordt een vergelijkbaar palet verwijderd. Er is een doorkijk gemaakt van de prestaties van de PAC-O₃ technologie op de eisen voor microverontreinigingenverwijdering zoals opgenomen in de recent door de Europese Unie voorgestelde revisie Richtlijn Stedelijk Afvalwater.

Bij een PAK-dosering van 7,5 mg/L en specifieke ozondosering van 0,4 g O₃/g DOC is middels de bioassays microtox, daphniatox, PAH-Calux, ER-Calux, PXR-Calux, GR-Calux en P53(-S9) Calux een bepaling van biologische effecten uitgevoerd over de pilotinstallatie. De ecotoxiciteitswaarden van bijna alle bioassays namen met 64% of meer af t.o.v. de referentie (regulier rwzi-effluent) en met 48% of meer af t.o.v. stand-alone PACAS. Bij deze PAK-dosering en specifieke ozondosering waren de ecotoxiciteitswaarden van bijna alle bioassays vergelijkbaar met of iets lager dan bij een specifieke ozondosering van 0,6 g O₃/g DOC zonder

PACAS (stand-alone ozon). Naar verwachting is de reductie in ecotoxiciteitswaarde bij de voorgestelde PAC-O₃ instellingen van 5 mg PAK/L en 0,3 g O₃/g DOC ten minste 50% t.o.v. de referentie (regulier rwzi-effluent). Dit is echter niet getest.

De bromaatvorming was relatief hoog. Bij een specifieke ozondosering hoger dan 0,15 g O₃/g DOC kwam de concentratie bromaat boven de 1 µg/L uit (1,2 – 6,6 µg/L), bij een bromideconcentratie van ca. 0,3 mg/L. Dit is zeer waarschijnlijk te wijten aan het ozon-inbrengsysteem van de pilotinstallatie. DOC, stikstof en fosfor zijn niet noemenswaardig verwijderd in de pilottesten. Ditzelfde geldt voor PFAS en antibioticaresistentie.

Met de uitkomsten van het pilotonderzoek is een update gegeven aan de uitwerking van de PAC-O₃ technologie voor een 100.000 i.e. rwzi zoals die in de haalbaarheidsstudie PAC-O₃ reeds opgesteld is. Er is een ontwerp opgesteld waarbij een PAK-dosering van 5 mg/L en een specifieke ozondosering van 0,3 g O₃/g DOC zijn voorzien. Met dit ontwerp wordt voldaan aan de doelstelling om de 7 beste van de 11 gidsstoffen gemiddeld voor minimaal 70% te verwijderen. Op de parameters CO₂-footprint, kosten en verwijderingsrendement gidsstoffen is dit ontwerp van het PAC-O₃ concept vergeleken met de IPMV-referentietechnologieën PACAS, Ozon + Zandfiltratie en GAK, zie Tabel 1.

TABEL 1 VERGELIJKING PAC-03 TECHNOLOGIE MET REFERENTIE TECHNOLOGIEËN OP DE IPMV-TOETSINGSCRITERIA

	Eenheid	PACAS	Ozon + ZF	GAK	PAC-O ₃
CO ₂ -footprint per behandelde kuub ¹	g CO ₂ /m ³	122	128	325	106
CO ₂ -footprint – rwzi + nabehandeling	ton CO ₂ /jaar	2.198	1.953	3.009	1.936
Kosten per behandelde kuub ¹	€/m ³	0,05	0,17	0,26	0,10
Verwijderingsrendement gidsstoffen ²	%	70-75%	80-85%	80-85%	80-85%

De CO₂-footprint van het uitgewerkte PAC-O₃ ontwerp bestaat voornamelijk uit het verbruik van PAK, elektriciteit en zuurstof. Het aandeel PAK-dosering is ca. 51% van de totale PAC-O₃ CO₂-footprint, het aandeel ozonisatie is ca. 49%. Met dit ontwerp is de CO₂-footprint van PAC-O₃ iets lager dan de CO₂-footprints van de referentietechnologieën PACAS en Ozon + Zandfiltratie. De PAC-O₃ kosten liggen lager dan die van Ozon + Zandfiltratie. Ten opzichte van stand-alone ozon (zonder zandfiltratie) en PACAS liggen de kosten van PAC-O₃ hoger, met name omdat er zowel een PACAS- als ozoninstallatie gerealiseerd moet worden. Het verwijderingsrendement van PAC-O₃ ligt tussen dat van PACAS en Ozon + Zandfiltratie in, waarbij met PAC-O₃ een breder palet wordt verwijderd ten opzichte van PACAS en een vergelijkbaar palet ten opzichte van Ozon + Zandfiltratie.

- 1 Waarde heeft enkel betrekking op de verwijderingsstap voor microverontreinigingen, niet op de rwzi zelf. De waarde uitgedrukt per kuub behandeld debiet is berekend over het debiet van de nabehandeling. Voor PACAS 7.665.000 m³/jaar, voor Ozon + Zandfiltratie en GAK-filtratie over 5.365.000 m³/jaar en voor PAC-O₃ PACAS-aandeel over 7.665.000 m³/jaar en Ozon-aandeel over 5.365.000 m³/jaar.
- 2 Gemiddeld verwijderingsrendement voor 7 van de 11 gidsstoffen. Voor Ozon + ZF en GAK is dit het rendement over de technologie zelf, dus exclusief het rendement van de rwzi. Voor PACAS en PAC-O₃ is dit inclusief het rendement van de rwzi, maar exclusief aftopping van de PAK-dosering bij RWA en bypass nabehandeling bij RWA.

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.

PILOT PAC-03

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
	1.1 Achtergrond	1
	1.2 Technologie	1
	1.3 Doelstelling	2
2	ONDERZOEKSOPZET	3
	2.1 Onderzoekslocatie	3
	2.2 PAK-selectie	3
	2.3 Beschrijving van de pilotinstallatie	4
	2.4 Dosering van PAK en ozon	5
	2.5 Monsternamen en analyse	5
	2.5.1 Microverontreinigingen	6
	2.5.2 Target-screening	6
	2.5.3 Biologische effecten	7
	2.5.4 Bromide en bromaat	7
	2.5.5 Organische stoffen en nutriënten	7
	2.5.6 Metalen	8
	2.5.7 PFAS	8
	2.5.8 Antibiotica-resistentie	8
	2.6 Verwerking meetgegevens	9

3	RESULTATEN	10
3.1	Microverontreinigingen	10
3.1.1	PACAS	10
3.1.2	PAC-O ₃	11
3.2	Biologische effecten	17
3.3	Bromide en bromaat	19
3.4	Organische stoffen en nutriënten	20
3.5	Metalen	20
3.6	PFAS	22
3.7	Antibiotica-resistentie	23
4	INPASBAARHEID IN NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK	25
4.1	Effect op bedrijfsvoering	25
4.2	Inpassing op locatie	25
4.3	Voor welke type rwzi's geschikt	26
4.4	Modulariteit	26
5	UITWERKING OP PRAKTIJKSCHAAL EN VERGELIJKING MET REFERENTIETECHNOLOGIEËN	27
5.1	Ontwerpgrondslagen	27
5.2	CO ₂ -footprint	28
5.3	Kosten	29
5.4	Verwijderingsrendement gidsstoffen	31
5.5	Vergelijking met referentietechnologieën op IPMV-criteria	31
6	CONCLUSIES	33
7	DANKWOORD	34
8	LITERATUURLIJST	35
BIJLAGE A	SPECIFIEKE OZONDOSIS	36
BIJLAGE B	CONCENTRATIES EN VERWIJDERINGSRENDEMENTEN MICROVERONTREINIGINGEN	37
BIJLAGE C	REVISIE RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER	41
BIJLAGE D	AANVULLENDE INFORMATIE TARGET-SCREENING ANALYSE	45
BIJLAGE E	BIOLOGISCHE EFFECTEN	50
BIJLAGE F	METALEN	52
BIJLAGE G	PFAS	54
BIJLAGE H	UITGANGSPUNTEN IPMV KOSTENBEREKENINGEN	55

1

INLEIDING

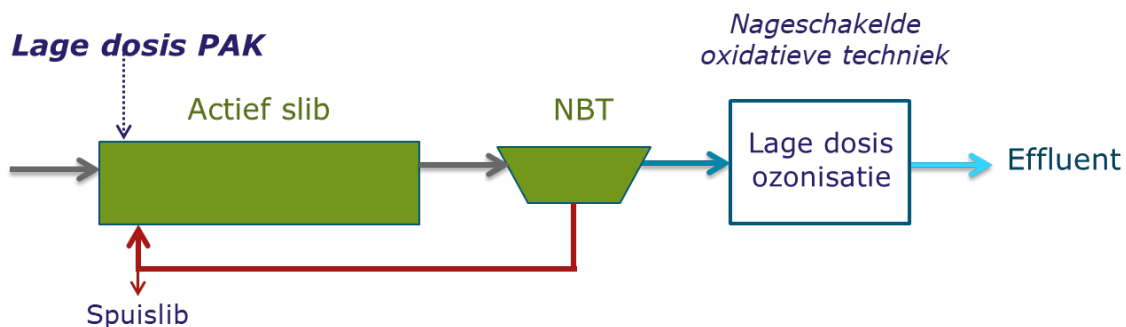
1.1 ACHTERGROND

De aanwezigheid van medicijnresten en andere organische microverontreinigingen (of opkomende stoffen) in oppervlaktewater zijn een bron van toenemende zorg. Medicijnresten hebben een negatieve invloed op de ecologische toestand en maken bovendien het oppervlaktewater minder geschikt als bron voor drinkwater. Vanuit het ministerie IenW is daarom het uitvoeringsprogramma ‘Ketenaanpak Medicijnresten uit Water’ gestart. Dit programma beoogt stappen te zetten in de gehele keten van productie, gebruik tot en met de lozing van medicijnresten via het riool en de rwzi om medicijnresten uit het milieu te houden. STOWA geeft ondersteuning aan dit programma via het Innovatieprogramma Microverontreinigingen (IPMV) uit afvalwater. In dit programma worden tal van technologieën onderzocht voor verregaande verwijdering van microverontreinigingen. Een van deze technologieën is PAC-O₃, een combinatie van de technologieën poederactiefslib (PACAS) en ozonisatie. Het onderzoek naar PAC-O₃ is ondergebracht in de IPMV-begeleidingscommissie oxidatieve technieken. Voorafgaand aan het pilotonderzoek PAC-O₃ is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd (STOWA 2020-23). Hieruit volgde dat PAC-O₃ een kansrijke technologie lijkt voor de verwijdering van een breed palet microverontreinigingen.

1.2 TECHNOLOGIE

Feitelijk is het PAC-O₃ concept een combinatie van twee technologieën; een afgeslankte PACAS en een afgeslankte nageschakelde ozonisatie (Figuur 1). Door gebruik te maken van twee reactiemechanismen, adsorptie en oxidatie, kunnen beide mechanismen in minder intensieve vorm worden bedreven dan wanneer deze als individuele technologie (stand-alone) worden toegepast. De PAK-dosering is lager dan stand-alone PACAS, de ozondosering is lager dan stand-alone ozonisatie. De lagere PAK-dosering resulteert in minder PAK verbruik en daarmee in minder af te voeren tonnen slibkoek ten opzichte van stand-alone PACAS. De lagere ozondosering resulteert in een lager zuurstof- en energieverbruik, en in een verminderde bromaatvorming ten opzichte van een stand-alone ozonisatie.

FIGUUR 1 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET PAC-O₃ CONCEPT



1.3 DOELSTELLING

In de haalbaarheidsstudie wordt de PAC-O₃ technologie beschreven als technologie waarmee enerzijds een breed palet aan microverontreinigingen verwijderd kan worden en anderzijds een hoger rendement kan worden behaald t.o.v. individuele technologieën (PACAS of ozonisatie). Daarnaast is de hypothese dat door een lagere dosering van zowel PAK als ozon aspecten zoals verhoogde slibproductie en beheersing van bromaatvorming positiever uitpakken t.o.v. individuele technologieën. Vooral dat laatste zou zeer relevant kunnen zijn gezien de uitkomsten van enkele andere onderzoeken met ozonisatie in Nederland. Het pilotonderzoek zal zich daarom voornamelijk focussen op deze bovengenoemde aspecten. Daarnaast wordt er ook ruimte geboden om overige vragen te onderzoeken. Zo zal er gekeken worden wat de effecten zijn van een lage PAK-dosering op de verwijdering van nutriënten (P en N). Het bepalen of een zandfilter na ozonisatie wel of niet noodzakelijk is valt buiten de scope van het pilotonderzoek.

De belangrijkste doelen van de pilottesten zijn als volgt:

1. Verwijdering breed palet aan microverontreinigingen
 - Breder spectrum analyseren dan de 11 gidsstoffen
2. Verhoging van het verwijderingsrendement t.o.v. van eis 70% voor 7 van 11 gidsstoffen
3. Vergelijking PAC-O₃ met individuele technologieën PACAS en ozonisatie
 - Breedte palet microverontreinigingen
 - Verwijderingsrendement microverontreinigingen (gidsstoffen en meer)
 - Kosten
 - Duurzaamheid (CO₂-footprint)
4. In kaart brengen van ‘neveneffecten’:
 - Bromaatvorming
 - Slibproductie
 - N- en P-verwijdering
5. Ervaring opdoen met de technologie in de Nederlandse afvalwatersector

Naast bovenstaande doelstellingen is in het huidige onderzoek ook gekeken naar de effectiviteit van PAC-O₃ bij het verwijderen van PFAS én PFAS-precursors, en antibiotica resistentie. Uit eerder onderzoek naar PFAS bij rwzi's (STOWA 2021-46) is naar voren gekomen dat PFAS niet of nauwelijks worden verwijderd in een rwzi. In veel gevallen is er zelfs sprake van een ogenschijnlijke toename PFAS. Onbekende (niet geanalyseerde) PFAS-precursors in het influent worden in de rwzi omgezet naar wel bekende (te analyseren) PFAS-precursors en PFAS met een korte ketenlengte (C4 – C8). Een nadere toelichting op PFAS en PFAS-precursors en hun aanwezigheid in de rwzi is te vinden in STOWA rapportages 2019-46 en 2019-47. Van oxidatieve technologieën is bekend dat deze kunnen resulteren in een afname van de antibiotica resistentie. Dit is zeer afhankelijk van het type technologie (bijv. UV-behandeling of ozonisatie) en de toegepaste dosis. In het PAC-O₃ onderzoek is de antibiotica resistentie gevolgd, niet met het doel om een bepaalde afname te behalen, maar om te volgen of er een afname plaats vindt.

Het bepalen van het effect van de PAK-dosering op de slibvolume-index (SVI) was ook een doelstelling van het pilotonderzoek. Dit effect kon echter niet onderzocht worden doordat de SVI van beide rwzi-straten al voor aanvang van de PAK-dosering sterk verschilde en per straat in tijd ook sterk verschilde door aanpassingen van afgelopen jaren aan de rwzi. Hierdoor kunnen geen conclusies worden getrokken over het effect van PAK op de SVI.

2

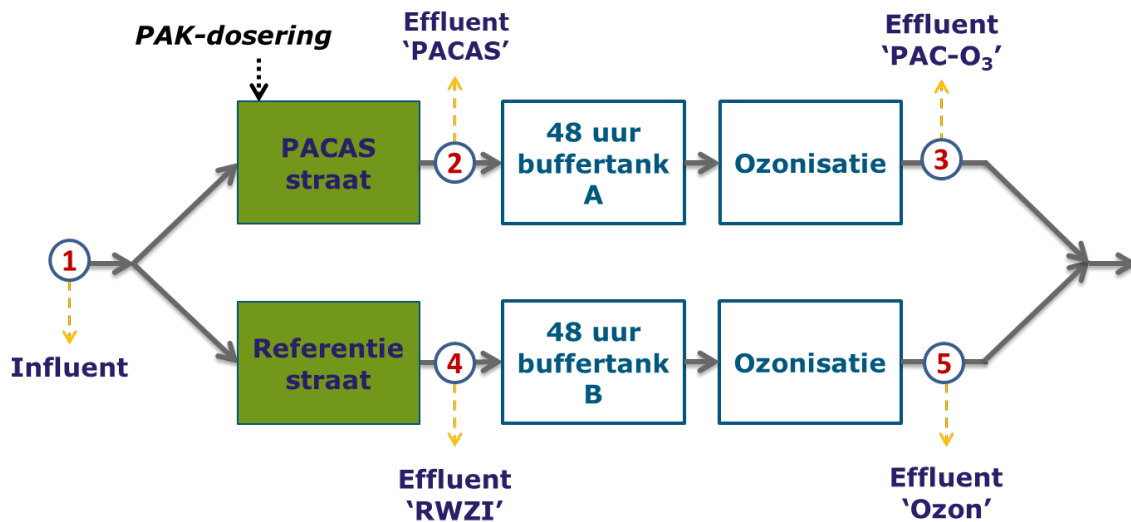
ONDERZOEKSOPZET

2.1 ONDERZOEKSLOCATIE

Het pilotonderzoek werd uitgevoerd op rwzi Leiden-Noord van het Hoogheemraadschap van Rijnland (Rijnland). Deze rwzi met een behandelingscapaciteit van circa 170.000 i.e. heeft een volledig gescheiden twee-straten principe. Elke straat bestaat uit een AT en twee nabezinktanks. Beide straten worden gevoed met hetzelfde influent, maar functioneren onafhankelijk van elkaar. Er worden geen retourstromen gemengd. Gedurende het pilotonderzoek is op één straat PAK gedoseerd. Hierdoor ontstond een 'PACAS-straat' en een 'referentiestraat'. Van beide straten is de afloop van de nabezinktank opgepakt om gedurende 48 uur tijdsproportioneel buffertanks te voeden en vervolgens ozonisetesten uit te voeren. In Figuur 2 is schematisch weergegeven dat het twee-straten principe van rwzi Leiden-Noord de mogelijkheid biedt om vergelijkend onderzoek te doen tussen onderstaande configuraties waarbij de getallen de monsternamenpunten aangeven:

- rwzi zonder aanvullende zuiveringsstap (1 t.o.v. 4)
- PACAS (1 t.o.v. 2)
- Ozonisatie (1 t.o.v. 5)
- PAC-O₃ (1 t.o.v. 3)

FIGUUR 2 SCHEMATISCHE WEERGAVE OPZET PAC-O₃ ONDERZOEK, IN CIJFERS DE MONSTERNAMENPUNTEN VOOR DE DIVERSE CONFIGURATIES



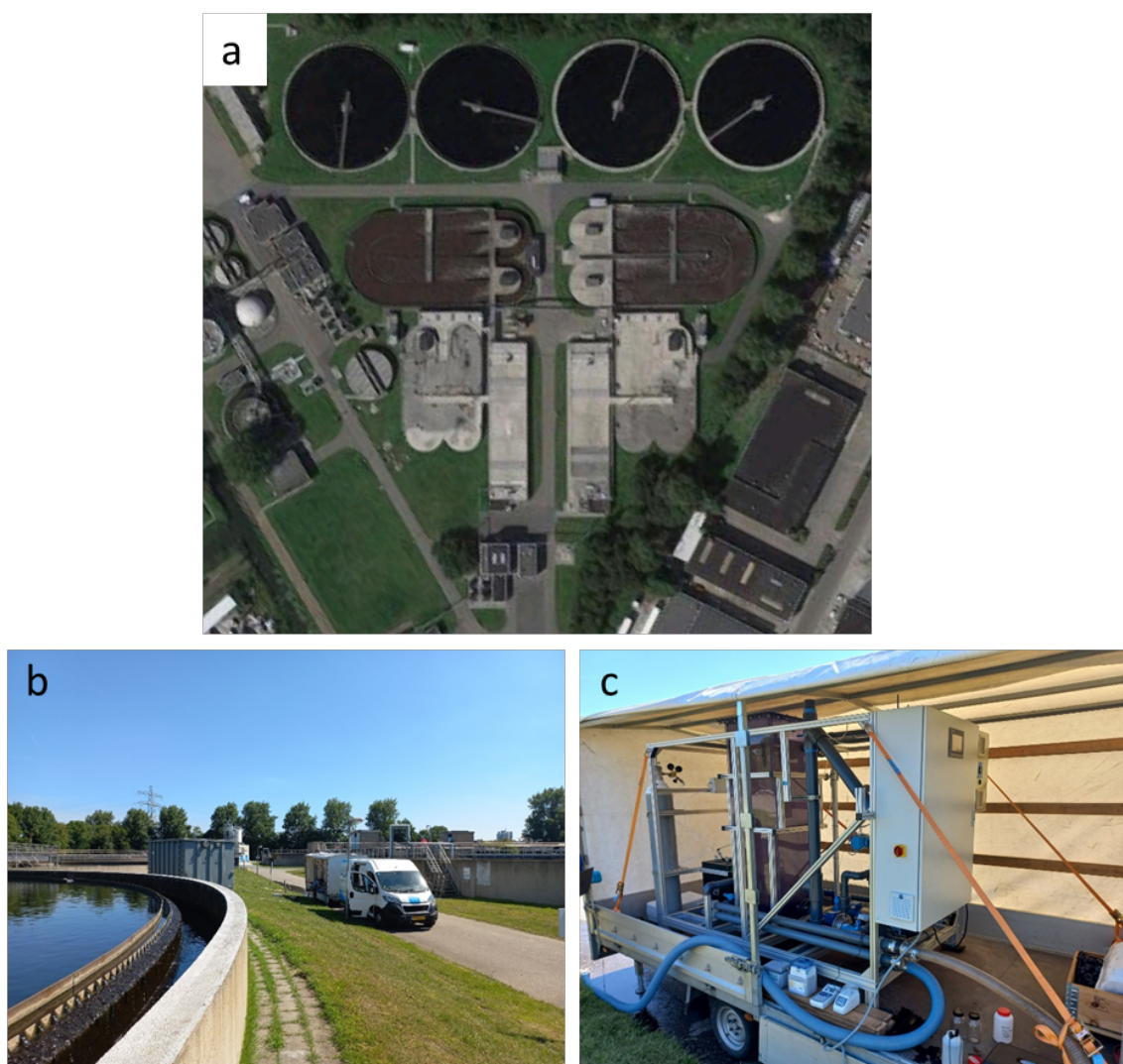
2.2 PAK-SELECTIE

Rijnland heeft vóór de start van de pilot een traject doorlopen voor de selectie van het type PAK voor de PACAS-installatie op rwzi Leiden-Noord. In de selectieprocedure is de Pulssorb WP235 van Chemviron als beste naar voren gekomen. Het PAC-O₃ onderzoek is dus uitgevoerd met deze PAK. Dit is dezelfde PAK die ook in het STOWA PACAS onderzoek op rwzi Papendrecht is gebruikt (STOWA 2018-02). Het gehele PAC-O₃ onderzoek is uitgevoerd met dezelfde batch Pulssorb WP235.

2.3 BESCHRIJVING VAN DE PILOTINSTALLATIE

Voor de dosering van PAK in de PAK-straat is de full-scale PAK-doseerunit op rwzi Leiden-Noord gebruikt. Hiermee wordt op basis van een 'conventionele PACAS' configuratie PAK in het actiefslibproces gebracht. Voor ozonisatie is een mobiele pilotinstallatie van PureBlue gebruikt waarmee een debiet van ca. 5 m³/uur werd behandeld. De afloop nabezinktank van zowel de PACAS-straat als de referentiestraat zijn gedurende 48-uur tijdsproportioneel opgevangen in buffertanks, respectievelijk buffertank A en buffertank B (zie Figuur 2). Op deze wijze werd uit beide straten parallel een hoeveelheid water gebufferd dat als dezelfde batch afvalwater de rwzi is binnengekomen en door het actiefslibstelsysteem met PAK (buffertank A) of zonder PAK (buffertank B) behandeld is (Figuur 3). Monsternamepunten 2 en 4 zijn hierdoor goed met elkaar vergelijkbaar. Vanuit de twee buffertanks werd de ozoninstallatie gevoed.

FIGUUR 3 A) OVERZICHT RWZI LEIDEN-NOORD MET 2 PARALLELE STRATEN, PACAS (RECHTS) EN REFERENTIE, ZONDER PAK (LINKS), B) NABEZINKTANK PACAS-STRAAT, BUFFERTANK A EN OZON PILOT EN C) DE OZON PILOT



2.4 DOSERING VAN PAK EN OZON

Verschillende PAK-doseringen in relatie tot diverse ozondoses zijn getest. De volgende PAK-doseringen zijn getest:

- 5 mg/L
- 7,5 mg/L
- 10 mg/L
- 12,5 mg/L

De PAK-doseringen zijn in oplopende volgorde na elkaar getest. Hiermee is uitgesloten dat er te veel PAK in het actiefslibstelsysteem aanwezig was van een vorige dosering. Na het instellen van een nieuwe dosering is telkens een periode van ongeveer 4 weken (ruim één slibleeftijd) aangehouden als stabilisatieperiode, behalve tussen testdag 3 en 4, waar i.v.m. praktische mogelijkheden een stabilisatieperiode van 3 weken is aangehouden. De regeling van de PAK-dosering is aangehouden zoals Rijnland deze ook gebruikt. In deze regeling wordt PAK proportioneel gedoseerd aan het influentdebiet tot een maximum van circa 2x DWA.

De ozontesten zijn uitgevoerd tussen 15 juni en 13 oktober 2022. Testen hebben alleen plaatsgevonden wanneer er in de week voorafgaand aan de testdag DWA-omstandigheden waren. Op het water uit buffertank A (PACAS-straat) zijn drie ozondoses getest: A, B en C met specifieke ozondoses van respectievelijk circa 0,2-0,3, 0,4-0,5 en 0,6-0,7 g O₃/g DOC. Voor de vergelijking tussen de technologieën Ozonisatie en PAC-O₃ is de configuratie Ozonisatie (ozonisatie op de referentiestraat) enkel bij een specifieke ozondosis van circa 0,6-0,7 g O₃/g DOC getest, omdat bij lagere doses het verwijderingsrendement voor 7 van de 11 gidsstoffen mogelijk onder de 70% zou liggen. Deze dosis volstaat ook voor het beantwoorden van de doelen 1, 2 en 3. De specifieke ozondosis is afgestemd op de gemiddelde DOC-concentratie in de afloop van de nabezinktank op DWA dagen (zie 2.5.4). De daadwerkelijke ozondoses zijn achteraf berekend op basis van ozonoverdracht en de DOC en nitriet concentraties (Tabel 2, voor gedetailleerde berekening zie Bijlage A, Tabel 15). Het geozoniseerde water (de afloop van de ozonreactor) is afgevoerd naar de terreinriolering van de rwzi.

TABEL 2 DATUM EN PAK-DOSERING EN SPECIFIEKE OZONDOSIS PER TESTDAG

Test dag	Datum	PAK dosering (mg/L)	Daadwerkelijke specifieke ozondosis (g O ₃ /g DOC)			
			PAC-O ₃ A	PAC-O ₃ B	PAC-O ₃ C	O ₃
1	15 jun	5,0	0,25	0,44	0,62	0,56
2	25 aug	7,5	0,24	0,41	0,58	0,60
3	22 sep	10,0	0,27	0,45	0,71	0,70
4	13 okt	12,5	0,14	0,33	0,50	0,47

2.5 MONSTERNAME EN ANALYSE

Zoals in Figuur 2 aangegeven zijn er totaal 5 monsternamenpunten:

1. Influent
2. Effluent PACAS
3. Effluent PAC-O₃
4. Effluent RWZI
5. Effluent Ozon

Voor monsternamepunten 1, 2 en 4 was een monsternamekast aanwezig waarmee 48-uurs debietsproportionele monsters genomen werden. Uitgaande van een HRT van het actiefslibstelsysteem bij DWA van circa 24 uur werd monsternamekast 1 (influent) 24 uur voorafgaand aan de monsternamekasten op punten 2 en 4 aangezet. Dit is conform de instructies voor monstername vanuit het IPMV en ministerie van I&W.

Gedurende de 48-uur dat de monsternamekasten 2 en 4 draaien zijn de buffertanks tijdsproportioneel gevoed. Zodoende bevatten buffertanks A en B nagenoeg dezelfde watersamenstelling als respectievelijk monsternamekasten 2 en 4.

Monsternamepunten 3 en 5 (afloop ozonisatie) zijn via steekmonsters bemonsterd. Voor deze monsternamepunten volstaan steekmonsters omdat de 48-uurs buffertank continue gemengd is waardoor er geen bezinking optrad. De ozoninstallatie is dus met een homogene waterstroom gevoed.

Voor de bepaling van de microverontreinigingenverwijdering, DOC, bromide, bromaat, nitriet en andere N fracties en P fracties is het monsternameschema conform Tabel 3 aangehouden.

TABEL 3 MONSTERNAMESHEMA MICROVERONTREINIGINGEN, DOC, BROMIDE, BROMAAT, STIKSTOF EN FOSFOR

Punt	Influent	Referentie	PACAS	PAC-O ₃	O ₃
DOC	X	X	X	-	-
N&P	X	X	X	-	-
Micro's	X	X	X	X	X
Bromide & bromaat	-	X	X	X	X

2.5.1 MICROVERONTREINIGINGEN

De focus van het PAC-O₃ onderzoek lag op het verwijderen van een breed palet microverontreinigingen (doel 1) én op het behalen van een hoog verwijderingsrendement van de gidsstoffen (doel 2). Om deze redenen werd gebruik gemaakt twee analysepakketten van Aquon voor meting van microverontreinigingen. Het eerste pakket omvatte de analyse van totaal 34 microverontreinigingen. Het tweede pakket omvatte de analyse van totaal 29 microverontreinigingen, waaronder alle 19 (kandidaat) gidsstoffen. De twee analysepakketten hebben een mate van overlap, het eerste analysepakket bevatte 17 microverontreinigingen die niet overlaptten met het tweede analysepakket.

2.5.2 TARGET-SCREENING

Aanvullend op de analyse van microverontreinigingen zijn ook target-screening analyses uitgevoerd. Deze analyse bestaat uit een screeningsanalyse naar organische microverontreinigingen en daaropvolgende vergelijking met een screeningsbibliotheek met daarin ca. 2000 (organische) stoffen. Er wordt in deze analyse niet gekeken naar stoffen of kenmerken die zich niet in de bibliotheek bevinden (non-target screening). De target-screening is uitgevoerd bij het Waterlaboratorium. De resultaten zijn kwantitatief in de relatieve zin maar niet kwantitatief in de absolute zin, d.w.z. het verwijderingsrendement kan worden bepaald door de zuiveringsstappen heen, maar er kunnen geen concentraties worden bepaald. De target-screening is uitgevoerd bij alle PAK-doses behalve 5 mg/L en voor alle configuraties (Twezi zonder aanvullende zuiveringsstap, PACAS, Ozonisatie en PAC-O₃. Voor configuratie PAC-O₃ zijn de volgende PAK-doseringen en specifieke ozondoses geanalyseerd met de target-screening methode:

- 7,5 mg PAK/L en 0,41 g O₃/g DOC
- 10 mg PAK/L en 0,27 g O₃/g DOC
- 10 mg PAK/L en 0,71 g O₃/g DOC
- 12,5 mg PAK/L en 0,14 g O₃/g DOC

2.5.3 BIOLOGISCHE EFFECTEN

Voor de bepaling van de biologische effecten (ecotoxiciteit) is de methodiek uit “*Handreiking biologische effectmonitoring RWZI-effluent v07*” aangehouden. De volgende testen zoals voorgeschreven voor een oxidatieve techniek zijn uitgevoerd door BioDetection Systems B.V.:

- Microtox (*Metabolisme bacteriën*)
- Daphniatox (*Watervlooien immobiliteit*)
- PAH-Calux (*PAH activiteit*)
- ER-Calux (*Oestrogene activiteit*)
- PXR-Calux (*Xenobiotische signalerings activiteit*)
- GR-Calux (*Glucocorticoïde activiteit*)
- P53-Calux (*Genotoxisch effecten*)

Vanwege de hoge kosten zijn de biologische effectmetingen op één instelling (één PAK-dosering en één ozondosis) uitgevoerd: PAK-dosering van 7,5 mg/l en een specifieke ozondosis van 0,41 g O₃/g DOC in de PAK-straat en een specifieke ozondosis van 0,60 g O₃/g DOC in de referentiestraat. De meting werd uitgevoerd op de monsternamenpunten 2, 3, 4 en 5. Hierdoor werd inzicht verkregen in de biologische effecten op het rwzi-effluent (4), het PACAS-effluent (2), het PAC-O₃ effluent (3) en het ozonisatie effluent (5). Op basis hiervan is de eventuele verandering in ecotoxiciteit bepaald t.o.v. het effluent zonder nabehandeling én kan een vergelijking tussen PACAS, PAC-O₃ en ozonisatie worden gemaakt.

2.5.4 BROMIDE EN BROMAAT

Tijdens het PAC-O₃ pilotonderzoek zijn zowel de concentratie bromide als bromaat in de oploop en afloop van de ozonreactor bepaald voor elke ozontest. Bromide en bromaat zijn geanalyseerd door Aquon.

2.5.5 ORGANISCHE STOFFEN EN NUTRIËNTEN

Voorafgaand aan de PAC-O₃ testen zijn de DOC- en nitrietconcentratie meerdere keren bepaald in de afloop van de nabezinktank op DWA dagen. De gemiddelde DOC- en nitrietconcentratie die uit deze meetcampagne volgden is gebruikt als uitgangspunt voor de specifieke ozondosering tijdens de PAC-O₃ pilottesten. Na afloop van een ozontest werden de DOC- en nitrietconcentratie behorende bij die ozontest bepaald zodat achteraf de daadwerkelijke specifieke ozondosis berekend kon worden.

Volgens het schema in Tabel 3 is de afloop van beide nabezinktanks bemonsterd voor de analyse van stikstof en fosfor om te onderzoeken of er een verschil is tussen beide straten. Voor de bepaling van de N-verwijdering zijn de volgende N-fracties gemeten; Kjeldahl (ongefilterd), ammonium (gefiltreerd), nitraat (gefiltreerd) en nitriet (gefiltreerd). Voor de P-verwijdering is Totaal fosfor (gefiltreerd én ongefiltreerd) gemeten. De analyses van organische stoffen en nutriënten zijn uitgevoerd door Aquon.

2.5.6 METALEN

Zware metalen zijn geanalyseerd in op alle testdagen met uitzondering van de eerste testdag (PAK-dosering 5 mg/L). De metingen zijn uitgevoerd door het Waterlaboratorium. Voor de configuratie PAC-O₃ (monsternamepunt 3) zijn monsters van de volgende PAK-doseringen en specifieke ozondoses voor de analyse van metalen genomen:

- 7,5 mg PAK/L en 0,41 g O₃/g DOC
- 10 mg PAK/L en 0,27 g O₃/g DOC
- 10 mg PAK/L en 0,71 g O₃/g DOC
- 12,5 mg PAK/L en 0,14 g O₃/g DOC

2.5.7 PFAS

Monsternamepunten 2, 3, en 4 zijn bemonsterd voor de analyse van PFAS én PFAS-precursors volgens het schema in Tabel 4. Monsters voor PFAS zijn genomen door IMD en geanalyseerd door KWR.

TABEL 4 MONSTERSHEMA PFAS ÉN PFAS-PRECURSORS

PAK-dosering	O ₃ -dosis	Straat	Monsternamepunt				
			1	2	3	4	5
10 - 12,5	A: 0,14-0,27 B: 0,33-0,45	PAK		X	X		
0	-	Referentie				X	

Monsternamepunt 4 (Referentie) dient als referentie voor de PACAS-sstraat. Er zijn drie verschillende analysetechnieken aangewend voor de analyse van PFAS en PFAS-precursors:

- Het standaard PFAS-analysepakket: 30 verschillende stoffen (stabiele PFAS zoals de bekende stoffen PFOS en PFOA, enkele vervangers daarvan en enkele precursors);
- Analyse van enkele eerder nog nauwelijks onderzochte PFAS met een zeer korte koolstofketen (<C4);
- De TOP-analyse of Totaal Oxideerbare Precursor analyse: een screeningsmethode om een inschatting van de totaal aanwezige precursors (zonder dat bekend is welke stoffen het precies zijn).

2.5.8 ANTIBIOTICA-RESISTENTIE

Monsters voor antibiotica-resistentie zijn genomen door IMD en geanalyseerd door KWR. Er zijn diverse antibioticaresistente bacteriën (AMR), waarvan CPE (Carbapenamse-producerende *enterobacteriaceae*) bacteriën en ESBL (Extended spectrum *beta-lactamases*) bacteriën de meeste bekende en voorkomende zijn. De combinatie van de CPE- en ESBL-analyse geeft een goede indicatie van de aanwezigheid van darmbacteriën, die ongevoelig (resistent) zijn voor sommige antibiotica. CPE-bacteriën worden niet altijd aangetroffen in rwzi-effluent en de analyse hiervan is duur. Daarom is in dit project analyse van ESBL-analyse uitgevoerd.

De analyse van *E. coli* bacteriën is eenvoudiger en goedkoper dan antibiotica resistente bacteriën (ESBL). Voor rioolwater wordt een verband tussen de aanwezigheid van *E. coli* en ESBL verwacht. Als blijkt dat deze relatie inderdaad bestaat dan zou kunnen worden volstaan met alleen analyse van *E. coli*: als er geen *E.coli* aanwezig is zullen AMR ook niet aanwezig zijn. *E. coli* is in deze studie met 2 verschillende analysemethoden uitgevoerd: de standaard methode voor (drink)water (LSA-methode) en een methode die mogelijk beter geschikt is in sterk vervuild water (NBX-methode).

Als er antibioticaresistente bacteriën worden aangetroffen, kunnen er ook antibioticaresistente genen worden aangetroffen. De relatie hiertussen in rwzi-effluent is nog niet duidelijk. Wel zijn er aanwijzingen dat vergaande oxidatie van rwzi-effluent leidt tot meer antibioticaresistente genen. Daarom is ook de analyse van (20 geselecteerde) genen meegenomen.

Er zijn monsters genomen op 4 verschillende monsterpunten op testdag 3 (10 mg PAK/L) en 4 (12,5 mg PAK/L):

- Effluent referentie
- Effluent PACAS
- Effluent PAC-O₃ B (0,55 g O₃/g DOC, testdag 3)
- Effluent PAC-O₃ A (0,14 g O₃/g DOC, testdag 4)

2.6 VERWERKING MEETGEGEVENS

Voor alle metingen waar de concentratie in het influent (monsternamepunt 1) onder de rapportagegrens lag, is geen verwijderingsrendement berekend. Indien de concentratie op monsternamepunten 2, 3, 4 of 5 onder de rapportagegrens lag én de concentratie in het influent boven de rapportagegrens lag, is voor desbetreffende monsternamepunt, respectievelijk 2, 3, 4 of 5, conform koepelvoorschrift 2021-15 gerekend met de rapportagegrens.

3

RESULTATEN

3.1 MICROVERONTREINIGINGEN

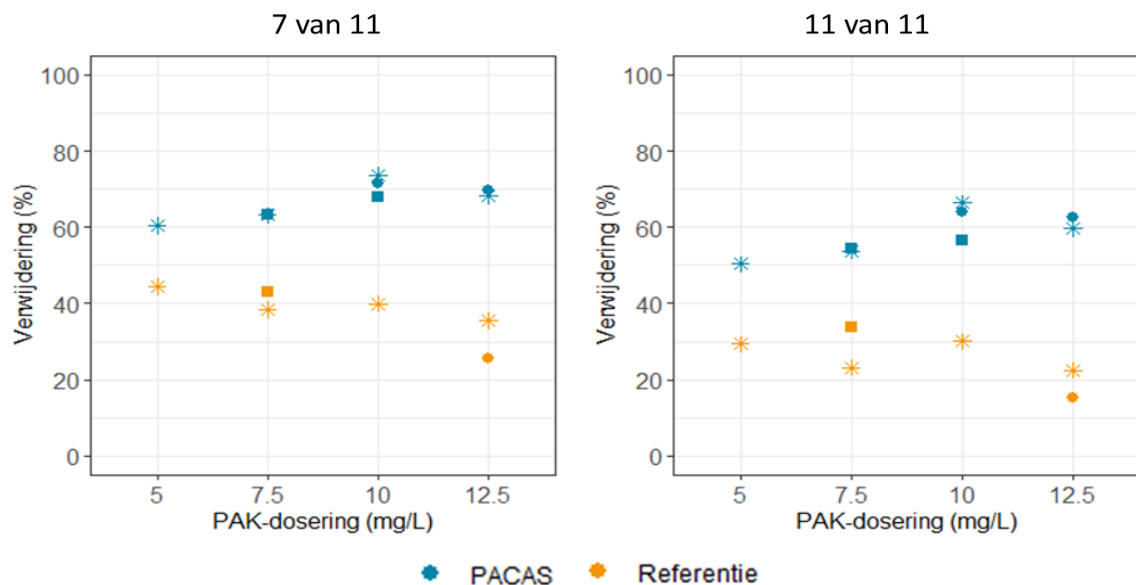
Alle gidsstoffen zijn op alle bemonsterde dagen boven de rapportagegrens in het influent aangetroffen. Drie kandidaat gidsstoffen (azitromycine, claritromycine en furosemide) zijn in het influent één of meer keren onder de rapportagegrens aangetroffen. Voor die keren is géén verwijderingsrendement berekend. Meerdere microverontreinigingen zijn in monsternamepunten 2, 3, 4 of 5 niet boven de rapportagegrens aangetroffen. Alle gepresenteerde verwijderingsrendementen van microverontreinigingen zijn berekend t.o.v. het influent.

3.1.1 PACAS

Gedurende de gehele pilotperiode zijn er totaal 8 dagen geweest waarop het verwijderingsrendement van microverontreinigingen over zowel de PACAS- als de referentiestraat bepaald is. Dit heeft plaatsgevonden bij de volgende PAK-doseringen: 1x 5 mg/L, 2x 7,5 mg/L, 3x 10 mg/L en 2x 12,5 mg/L. Op 4 van deze 8 dagen zijn ozontesten uitgevoerd, de zogenaamde ozontestdagen. De overige 4 dagen maakten deel uit van het reguliere bemonsteringsprogramma van Rijnland. Op deze dagen zijn geen ozontesten uitgevoerd. Alle testdagen vonden plaats onder DWA-condities.

Het gemiddelde verwijderingsrendement van de 7 beste van de 11 gidsstoffen in de referentiestraat lag tussen 26 en 44% (Figuur 4). In de PACAS-straat is het verwijderingsrendement altijd >37% hoger dan in de referentiestraat. Vanaf een PAK-dosering van 10 mg/L, zijn de verwijderingsrendementen tussen de 68% en 73% (Figuur 4). Het gemiddelde verwijderingsrendement van alle 11 gidsstoffen ligt onder de 70% bij alle PAK-doseringen op alle gemeten dagen (Figuur 4).

FIGUUR 4 GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN GIDSSTOFFEN IN PACAS EN REFERENTIE STRATEN BIJ VERSCHILLENDE PAK-DOSERINGEN OP EEN DWA DAG (DUS EXCLUSIEF AFTOPPING VAN DE PAK-DOSERING BIJ RWA EN BYPASS NABEHANDELING BIJ RWA). OZONTESTDAGEN ZIJN AANGEDUID MET HET STER

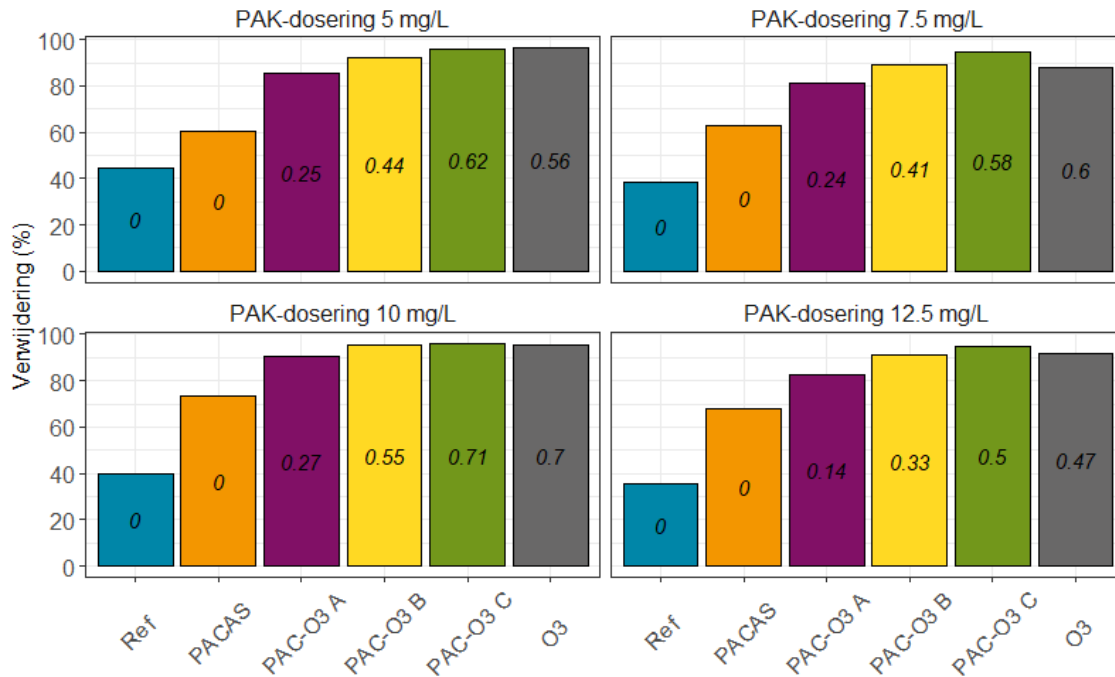


3.1.2 PAC-O₃

3.1.2.1 7 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN

In Figuur 5 zijn de verwijderingsrendementen voor de 7 best verwijderde van de 11 gidsstoffen per afzonderlijke ozontestdag weergegeven. Elke ozontestdag is uitgevoerd bij een andere PAK-dosering. De verwijderingsrendementen zijn gegeven ten opzichte van het influent van de rwzi. Alle metingen zijn uitgevoerd onder DWA-condities.

FIGUUR 5 GEMIDDELTE VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VOOR 7 BESTE VAN 11 GIDSSTOFFEN OVER DE 4 OZONTESTDAGEN BIJ VERSCHILLENDE PAK-DOSERINGEN OP EEN DWA DAG (DUS EXCLUSIEF AFTOPPING VAN DE PAK-DOSERING BIJ RWA EN BYPASS NABEHANDELING BIJ RWA). CURSIEVE CIJFERS GEVEN DE REËLE SPECIFIEKE OZONDOSIS WEER, GECORRIGEERD VOOR DE DOC- EN NITRIETCONCENTRATIE EN OZONOVERDRACHT



Voor PAC-O₃ lag het gemiddelde verwijderingsrendement voor 7 van de 11 gidsstoffen altijd boven de 80% bij alle onderzochte ozondoses (Figuur 5). Hiermee kan voldaan worden aan de doelstelling om een rendement van 70% te behalen over de gehele rwzi. Dit rendement is lager vanwege een aftopping van de PAK-dosering bij RWA en een bypass rondom de nageschakelde ozoninstallatie tijdens RWA. Voor de stand-alone ozon behandeling lag het gemiddelde verwijderingsrendement voor de 7 beste van de 11 gidsstoffen ook altijd boven de 80%.

De 7 best verwijderde gidsstoffen varieerden per meetdag (Tabel 5). Per type behandeling zijn het meestal dezelfde stoffen die tot de 7 best verwijderde gidsstoffen hoorden.

TABEL 5 AANTAL KEREN DAT EEN GIDSSTOFFEN IN DE TOP 7 VAN BEST VERWIJDERDE GIDSSTOFFEN VOORKOMT. DONKERBLAUWE GEMARKEERDE CELLEN GEVEN STOFFEN AAN DIE VAAK BIJ DE TOP 7 HOREN

Gidsstof	Referentie	PACAS	PAC-O3	O3
Berekend verwijderingsrendement	7x	8x	12x	4x
1,2,3-benzotriazool	5	8	3	0
Carbamazepine	0	4	11	4
Diclofenac	2	1	12	4
Gabapentine	6	7	1	0
Hydrochloorthiazide	5	2	10	4
Irbesartan	6	0	0	1
Metoprolol	6	8	12	3
Som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	0	8	5	0
Sotalol	6	8	12	4
Trimethoprim	6	8	11	4
Venlafaxine	0	2	7	4

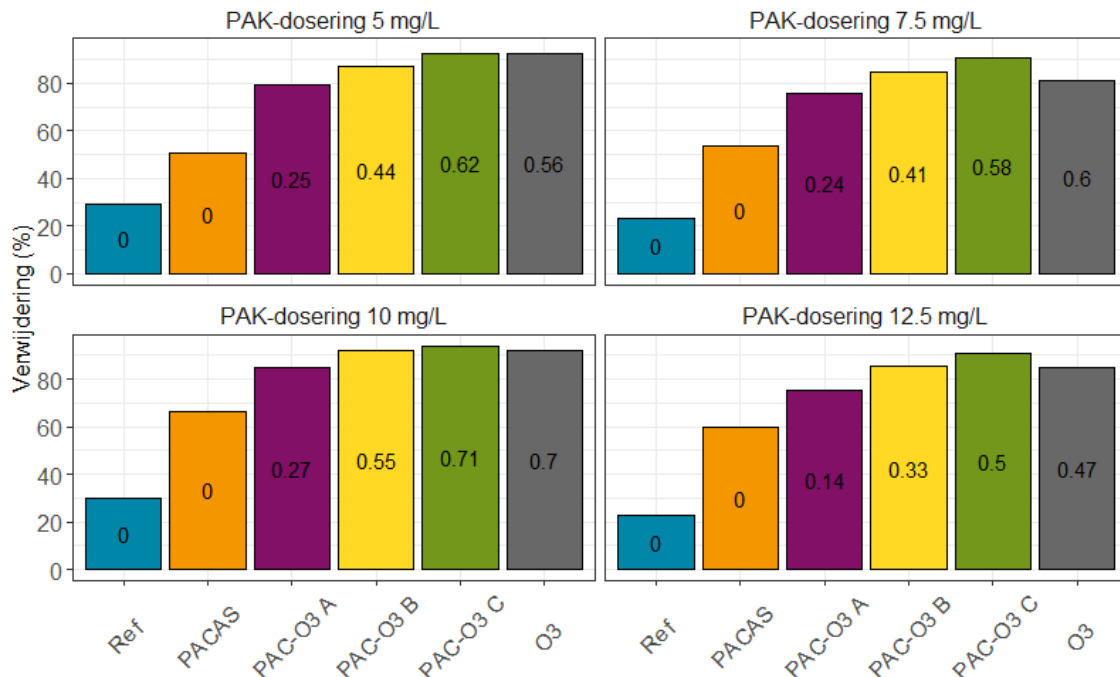
Door de Europese Unie is recentelijk (Q3 2022) een voorstel gedaan voor een revisie van de Richtlijn Stedelijk Afvalwater. Hierin is ook de verwijdering van microverontreinigingen opgenomen. De voorgestelde regeling wijkt enigszins af van de Nederlandse aanpak conform de bijdrageregeling voor demo's en het IPMV. Voor PAC-O₃ 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 Richtlijn Stedelijk Afvalwater is opgenomen in Bijlage C.

3.1.2.2 11 GIDSSTOFFEN

In Figuur 6 zijn de verwijderingsrendementen voor alle 11 gidsstoffen per afzonderlijke ozontestdag weergegeven. Het gemiddelde verwijderingsrendement voor alle 11 gidsstoffen bij DWA was hoger dan 75% voor zowel alle PAC-O₃ als stand-alone ozon behandelingen. In Bijlage B (Tabel 16 en Tabel 17) zijn voor alle individuele (kandidaat)gidsstoffen de gemeten concentraties en berekende verwijderingsrendementen gegeven.

FIGUUR 6

GEMIDDELTE VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VAN 11 GIDSSTOFFEN OVER DE 4 OZON TESTDAGEN BIJ VERSCHILLENDE PAK-DOSERINGEN OP EEN DWA DAG (DUS EXCLUSIEF AFTOPPING VAN DE PAK-DOSERING BIJ RWA EN BYPASS NABEHANDELING BIJ RWA). CURSIEVE CIJFERS GEVEN DE REËLE SPECIFIEKE OZONDOSIS GECORRIGEERD VOOR DOC EN NITRIET CONCENTRATIE EN O₃ OVERDRACHT



Wat opvalt in de analyse van de 11 gidsstoffen is dat in de pilottesten de PAK-dosering een gering effect heeft op het verwijderingsrendement. Dit schommelt tussen de 50 en 60% voor de PAK-doseringen van 5, 7,5, 10 en 12,5 mg/L waarbij er geen eenduidige trend waarneembaar is tussen rendement en dosering, zie Figuur 6. Voor de ozondosering is dit anders. Een hogere ozondosering resulteert bij alle onderzochte instellingen in een hoger rendement.

In Tabel 6 is het verwijderingsrendement voor alle individuele 11 gidsstoffen weergegeven. Hierbij is geen onderscheidt gemaakt in de PAK-dosering omdat deze zoals hierboven beschreven slechts een gering effect heeft op het verwijderingsrendement van de pilottesten. In Tabel 6 is te zien dat bijna alle gidsstoffen voor minder dan 70% zijn verwijderd met alleen PACAS. Een combinatie van PACAS en ozon, zelfs met een lage ozondosering (PAC-O₃ A, 0,14 – 0,27 g O₃/g DOC) verwijdert bijna alle gidsstoffen, behalve irbesatan, voor meer dan 70%. Hoe hoger de ozondosering, hoe meer gidsstoffen er verwijderd worden met een hoger rendement. Stand-alone ozon verwijderd ook alle 11 gidsstoffen met een rendement > 70%. De combinatie van een lage PAK-dosering en een lage ozondosering resulteert in de verwijdering van een breder palet stoffen t.o.v. PACAS, maar minder breed t.o.v. stand-alone ozon. Als de PAC-O₃ ozondosering wordt verhoogd naar 0,33-0,55 g O₃/g DOC, is het verwijderingsrendement van de individuele gidsstoffen vergelijkbaar met dat van stand-alone ozon.

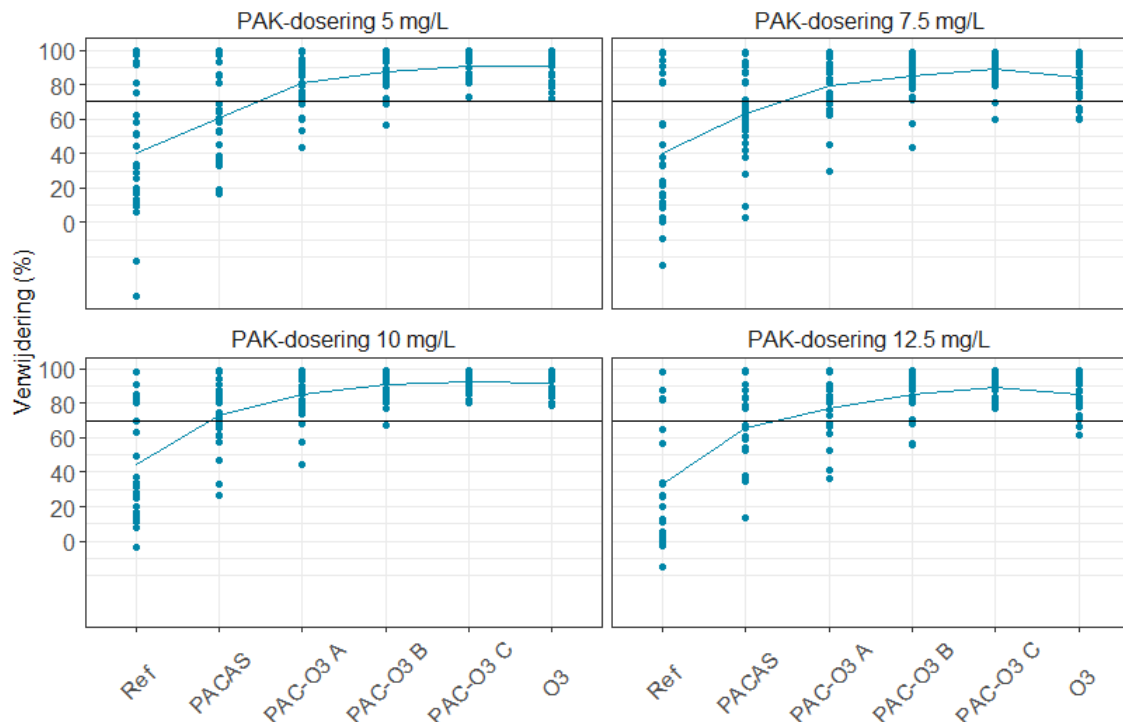
TABEL 6 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VAN INDIVIDUELE GIDSSTOFFEN ONDER DWA-CONDITIES (DUS EXCLUSIEF AFTOPPING VAN DE PAK-DOSERING BIJ RWA EN BYPASS NABEHANDELING BIJ RWA). VOOR PACAS EN PAC-O₃ ZIJN DE RENDEMENTEN GEGEVEN ALS GEMIDDELDE VAN DE RENDEMENTEN BIJ DE PAK-DOSERINGEN 5, 7,5, 10 EN 12,5. SPECIFIEKE OZONDOSERING BIJ ELKE INSTELLING ZIJN: PAC-O₃ A - 0,14-0,27 G O₃/G DOC; PAC-O₃ B - 0,33-0,45 G O₃/G DOC; PAC-O₃ - C: 0,50-0,71 G O₃/G DOC; O₃: 0,47-0,70 G O₃/G DOC

Gidsstof	Referentie	PACAS	PAC-O ₃ A	PAC-O ₃ B	PAC-O ₃ C	O ₃
1,2,3-benzotriazool	32%	62%	75%	82%	89%	77%
carbamazepine	-8%	42%	83%	96%	98%	95%
diclofenac	13%	43%	88%	95%	95%	95%
gabapentine	60%	62%	72%	78%	84%	81%
hydrochloorthiazide	16%	53%	75%	87%	94%	91%
irbesartan	30%	39%	61%	74%	83%	82%
metoprolol	32%	74%	84%	90%	96%	87%
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	7%	62%	76%	84%	90%	77%
sotalol	18%	56%	93%	99%	99%	99%
trimethoprim	87%	92%	92%	92%	92%	92%
venlafaxine	2%	47%	70%	84%	93%	88%

3.1.2.3 BREED SPECTRUM

Naast de 11 gidsstoffen zijn per ozontestdag ook de 8 kandidaat gidsstoffen en een brede selectie microverontreinigingen geanalyseerd³. Hiermee is in totaal per ozontestdag voor 22 tot 28 individuele stoffen een verwijderingsrendement bepaald, zie Figuur 7. Dit geeft een beeld over de breedte van het spectrum aan stoffen dat verwijderd wordt.

FIGUUR 7 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN ALLE GEMETEN STOFFEN. ELKE DATAPUNT STAAT VOOR EEN INDIVIDUELE STOF. DE BLAUWE KROMMENDE LIJN GEEFT DE GEMIDDELDE VERWIJDERING WEER, DE ZWARTE HORIZONTALE LIJN GEEFT HET 70% VERWIJDERINGSRENDEMENT WEER. SPECIFIEKE OZONDOSSES BIJ ELKE INSTELLING ZIJN: PAC-O₃ A - 0,14-0,27 G O₃/G DOC; PAC-O₃ B - 0,33-0,45 G O₃/G DOC; PAC-O₃ - C: 0,50-0,71 G O₃/G DOC; O₃: 0,47-0,70 G O₃/G DOC



³ Geanalyseerde stoffen naast de 19 (kandidaat)gidsstoffen: atenolol, ciprofloxacine, clozapine, ibuprofen, lidocaine, metformine, naproxen, oxazepam en oxyapurinol

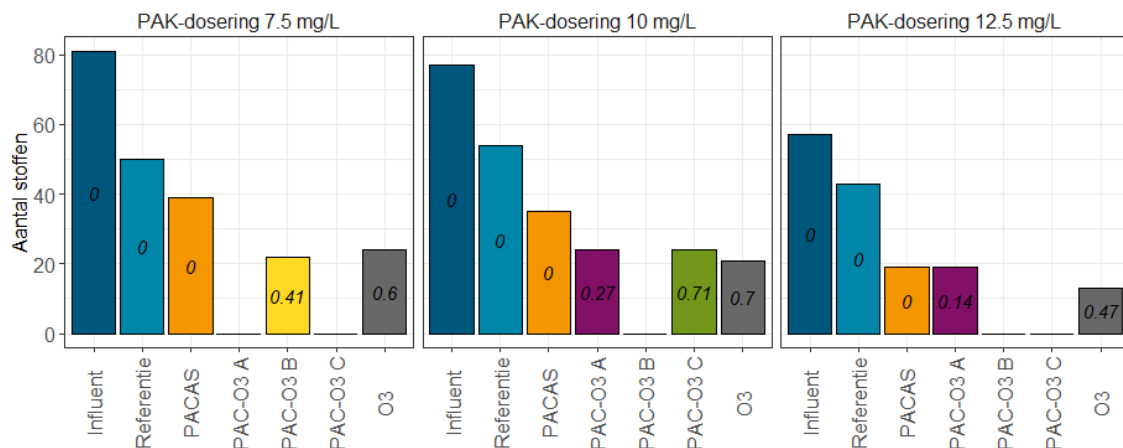
Hoe intensiever de PAC-O₃ behandeling (hogere PAK-dosering en/of hogere specifieke ozondosis), hoe meer stoffen er voor meer dan 70% verwijderd zijn. Bij PAC-O₃ A (laagste specifieke ozondosis, 0,14 – 0,25 g O₃/g DOC) zijn 3 tot 6 stoffen voor minder dan 70% verwijderd. Bij PAC-O₃ B (middelste specifieke ozondosis, 0,33 – 0,45 g O₃/g DOC) en stand-alone ozon zijn slechts 1 tot 2 stoffen minder dan 70% verwijderd. Bij PAC-O₃ C (hoogste specifieke ozondosis, 0,50 – 0,71 g O₃/g DOC) zijn op testdag 2 na (PAK-dosering 7,5 mg/L) alle stoffen voor meer dan 70% verwijderd. Met PAC-O₃ kunnen dus meer stoffen verwijderd worden dan met PACAS. Ten opzichte van stand-alone ozon is er geen groot verschil, met PAC-O₃ kunnen iets meer stoffen verwijderd mits de specifieke ozondosering van PAC-O₃ boven de 0,3 g O₃/g DOC is.

3.1.2.4 TARGET-SCREENING ANALYSE

Op drie ozontestdagen zijn diverse monsters geanalyseerd in een target-screening analyse. Deze analyse is met name uitgevoerd om een beeld te krijgen of een combinatietechnologie zoals PAC-O₃ een breder spectrum aan stoffen verwijderd dan een enkele technologie zoals PACAS of ozon. Dit beeld kan gevormd worden door te kijken naar het aantal aangetroffen stoffen in de diverse monsters. De target-screening methode kent beperkingen voor het bepalen van verwijderingsrendementen, hiervoor is een doel analyse zoals de analyse van (kandidaat)gidsstoffen een veel beter instrument.

De gebruikte target-screening methode bevatte een screeningsbibliotheek waarmee ca. 2.000 stoffen geïdentificeerd kunnen worden. Het maximaal aantal aangetroffen stoffen tijdens het pilotonderzoek betrof 80 van deze 2.000 stoffen. Deze 80 stoffen zijn aangetroffen in een monster van het influent op testdag 2 (zie Figuur 8).

FIGUUR 8 AANTAL AANGETROFFEN STOFFEN PER MONSTER PER PAK-DOSERING MET DE TARGET-SCREENING ANALYSE. CURSIEVE CIJFERS GEVEN DE REËLE SPECIFIEKE OZONDOSIS GECORRIGEERD VOOR DOC EN NITRIET CONCENTRATIE EN O₃ OVERDRACHT. DE TARGET-SCREENING IS NIET UITGEVOERD VOOR ALLE PAC-O₃ INSTELLINGEN, WANNEER ER GEEN ANALYSE IS UITGEVOERD IS ER EEN BALK MET WAARDE '0' WEERGEGEVEN

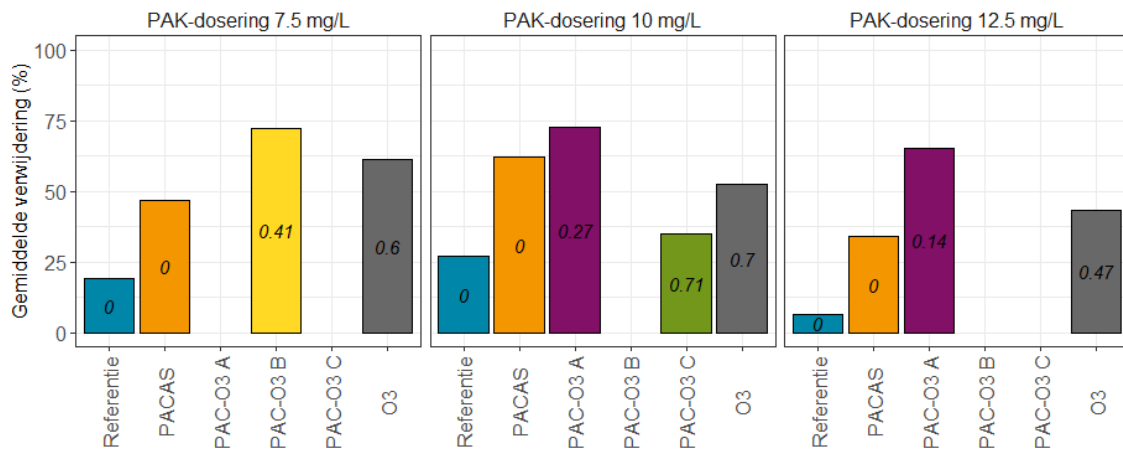


Er is een duidelijke trend waarneembaar in het aantal stoffen dat aangetroffen wordt in de verschillende monsters. In aflopende volgorde van meeste stoffen naar minste stoffen per een monster is de volgende trend waargenomen: Influent > Effluent Referentie > PACAS > PAC-O₃ (Figuur 8). Een uitzondering hierop is waargenomen bij de hoogste PAK-dosering (12,5 mg/L), waar het aantal stoffen in het PACAS-monster gelijk is aan die van het PAC-O₃ monster. Voor de meeste ozontestdagen geldt dat het aantal stoffen in de monsters van PAC-O3 en stand-alone ozon ongeveer gelijk is. PAC-O3 en stand-alone ozon resulteren dus in ongeveer

evenveel stoffen die nog in het water aanwezig zijn. Bij PACAS blijven er veel meer stoffen in het water aanwezig.

Ondanks dat de target-screening analyse beperkt is in het bepalen van verwijderingsrendementen zijn waar mogelijk wel verwijderingsrendementen berekend, zie Figuur 9. Een belangrijk verschil tussen de target-screening analyse en een doel analyse zoals de analyse van (kandidaat)gidsstoffen, is dat er geen meetgrens bepaald kan worden in de target-screening analyse. Zonder een meetgrens kunnen verwijderingsrendementen overschat worden als een stof wel aanwezig is in het influent maar niet in het effluent. Dan zou een 100% verwijderingsrendement kunnen worden berekend, zonder dat de stof daadwerkelijk 100% is verwijderd. Door het ontbreken van een meetgrens kan in tegenstelling tot de verwerking van de gidsstofresultaten niet gerekend worden met de helft van de meetgrens om toch een verwijderingsrendement te kunnen bepalen. Om overschatting van het verwijderingsrendement te voorkomen zijn geen verwijderingsrendementen bepaald voor stoffen die niet in het effluent zijn aangetroffen. Deze aanpak leidt wel tot een lager gemiddeld verwijderingsrendement dan met de doel analyse, gezien de hogere verwijderingsrendementen zijn niet meegenomen. Een vergelijking van de verwijderingsrendementen van (kandidaat)gidsstoffen berekend op basis van beide methoden (doel en target-screening analyse) is weergegeven in Bijlage D (Figuur 23 en Tabel 21).

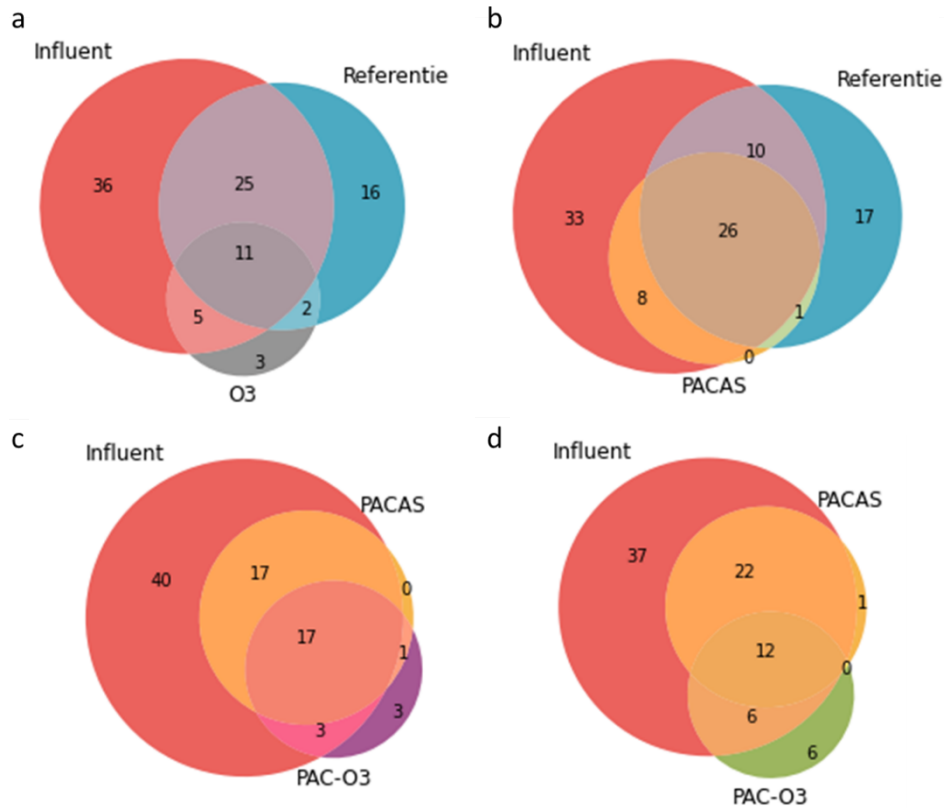
FIGUUR 9 GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT OP BASIS VAN PIEKOPPERVLAKTE IN TARGET-SCREENING ANALYSE. HET RENDEMENT IS ALLEEN BEREKEND WANNEER EEN STOF AANGETROFFEN IS ZOWEL HET INFLUENT ALS HET EFFLUENT OM OVERSCHATTING TE VOORKOMEN. CURSIEVE CIJFERS GEVEN DE REËLE SPECIFIEKE OZONDOSIS WEER, GECORRIGEERD VOOR DE DOC- EN NITRIETCONCENTRATIE EN OZONOVERDRACHT



Niet alle stoffen die in het effluent voorkomen komen ook in het influent voor, er kunnen nieuwe stoffen gevormd worden. Deze zijn bijvoorbeeld transformatie producten die ontstaan bij ozonisatie of biologische afbraak. Ook kan het zijn dat door de verschillen in watermatrix tussen influent en effluent sommige stoffen beter meetbaar zijn in effluent. In Figuur 10 is voor testdag 3 het aantal stoffen weergegeven dat is aangetroffen per monster en de overlap tussen de aangetroffen stoffen bij de diverse behandelingen. Het aantal stoffen aangetroffen per monster en de overlap tussen de monsters op testdagen 2 en 4 is weergegeven in Bijlage D (Figuur 24 en Figuur 25).

FIGUUR 10

AANTAL STOFFEN AANGETROFFEN PER MONSTER EN OVERLAP TUSSEN MONSTERS O.B.V. TARGET-SCREENING ANALYSE OP TESTDAG 3, A) O₃ SPECIFIEKE OZONDOSIS 0,70 G O₃/G DOC; B) PACAS PAK-DOSERING 10 MG/L; C) PAC-O₃ PAK-DOSERING 10 MG/L EN SPECIFIEKE OZONDOSIS 0,27 G O₃/G DOC; D) PAC-O₃ PAK-DOSERING 10 MG/L EN SPECIFIEKE OZONDOSIS 0,71 G O₃/G DOC. DE KLEUREN HEBBEN GEEN SPECIFIEKE BETEKENIS, DEZE DIENEN ENKEL OM HET ONDERSCHIED EN DE OVERLAP TUSSEN DE STOFGROEPEN AAN TE DUIDEN



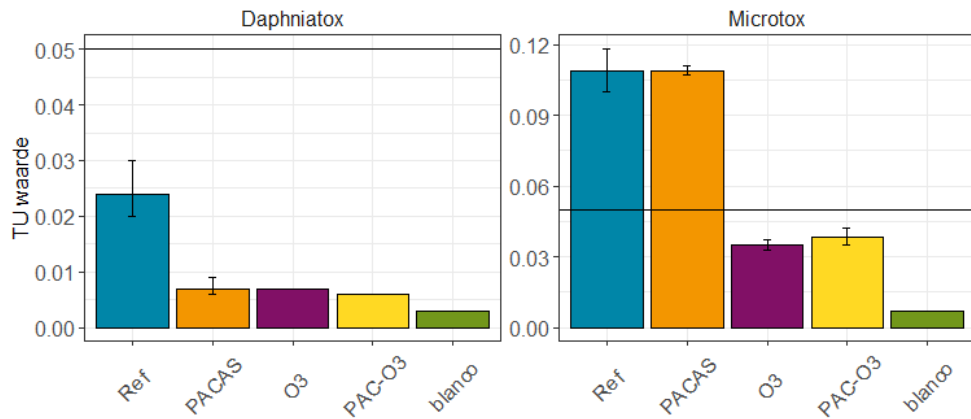
De afloop van de referentie straat bevatte op testdag 3 18 stoffen die niet aanwezig waren in het rwzi influent. De afloop van de PACAS-sstraat bevatte 1 stof die niet aanwezig was in het rwzi influent. Deze ene stof was ook in de afloop van de referentiestraat aanwezig. Geozoniseerde monsters (stand-alone Ozon en PAC-O₃) bevatte tussen de 4 en 6 stoffen die niet aanwezig waren in het influent. Dat kan betekenen dat er relatief weinig nieuwe stoffen tijdens de ozon behandeling gevormd worden.

3.2 BIOLOGISCHE EFFECTEN

Op de tweede testdag (PAK-dosering 7,5 mg/L) zijn monsters van elk monsternamepunt exclusief het rwzi influent geanalyseerd op biologische effecten. De bemonsterde PAC-O₃ instelling was bij een specifieke ozondosis van 0,41 g O₃/g DOC. De TU-waardes voor Daphniatox en Microtox zijn weergegeven in Figuur 11. De TU-waarde is berekend als $1/EC_{f,50}$ -waarde, en de $EC_{f,50}$ -waarde is de concentratiefactor waarbij 50% effect optreedt. De TU-waarde drukt de toxiciteit uit per liter van het oorspronkelijke watermonster. Deze kan worden vergeleken met de ecologische signaleringswaarde van 0,05 (STOWA 2016-15A). Alle waardes zijn gegeven in Bijlage E (Tabel 22).

FIGUUR 11

RESULTATEN VAN DE DAPHNIATOX EN MICROTOX TESTEN. PAK-DOSERING 7,5 MG/L, PAC-O₃ SPECIFIEKE OZONDOSIS VAN 0,41 G O₃/G DOC EN STAND-ALONE OZON (O₃) SPECIFIEKE OZONDOSIS VAN 0,60 G O₃/G DOC. FOUTENBALKEN GEVEN DE 95% BETROUWBAARHEIDINTERVALLEN. ZWARTE LIJNEN GEVEN DE ECOLOGISCHE SIGNALERINGSWAARDEN

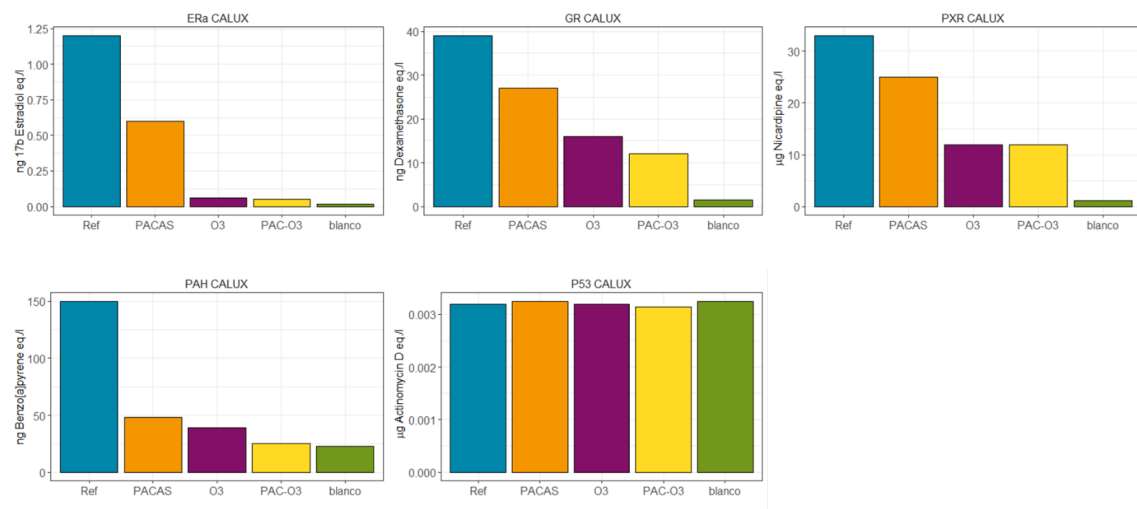


Bij de Daphniatox test zijn alle monsters inclusief referentie onder de signaleringswaarde. Toch neemt na elke behandeling stap de toxiciteit af (tussen 71 en 75%) t.o.v. de referentie straat. In de afloop van de referentie en PACAS is voor Microtox sprake van een overschrijding van de ecologische signaleringswaarde ($TU \geq 0,05$). Deze overschrijding komt niet voor in de afloop van PAC-O₃ en O₃. De toxiciteit is dus afgenomen na ozonisatie (tussen 65 en 68%). In de blanco monsters, waar geen afvalwater in zit, zijn geen effecten vastgesteld.

Met behulp van de Calux-methode zijn specifieke activiteiten gemeten. De gemeten parameters zijn oestrogene activiteit (ERa), glucocorticoïde activiteit (GR), xenobiotische signalering activiteit (PXR), polycyclisch aromatische koolwaterstoffen activiteit (PAH) en genotoxiciteit (P53). De gevonden activiteiten worden uitgedrukt in concentraties van een referentiestof per liter water. De testresultaten zijn weergegeven in Figuur 12 en in Bijlage D (Tabel 22 en Tabel 23). Voor alle tests behalve P53 is een afname te zien na behandeling met PACAS en een verdere afname na behandeling met ozon. P53 is een mutageniteitstest die toegepast wordt om vast te stellen of oxidatieve technieken oxidatieve stress veroorzaken. Het feit dat geen toename optreedt bij PAC-O₃ en O₃ monsters laat zien dat er geen hogere genotoxiciteit voorkomt na ozonisatie.

FIGUUR 12

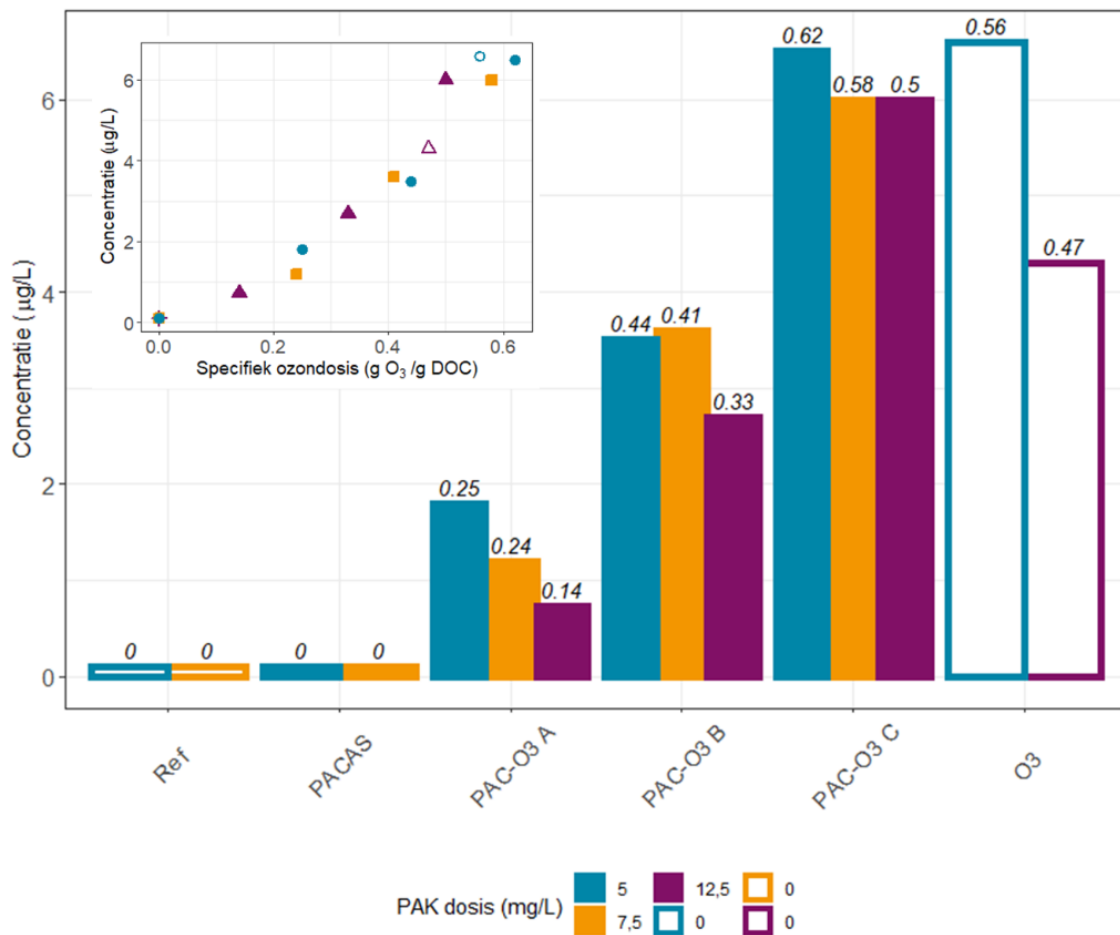
RESULTATEN CALUX-TESTEN. PAK-DOSERING 7,5 MG/L, PAC-O₃ SPECIFIEKE OZONDOSIS VAN 0,41 G O₃/G DOC EN STAND-ALONE OZON (O₃) SPECIFIEKE OZONDOSIS VAN 0,60 G O₃/G DOC



3.3 BROMIDE EN BROMAAT

In de afloop van de PACAS en referentie straten lagen de bromide concentraties tussen 0,27 en 0,32 mg/L en de bromaat concentraties lager dan de rapportagegrens (0,2 µg/L). Figuur 13 geeft de bromaat concentraties in gezoniseerde monsters weer. Er is een duidelijke positieve correlatie te zien tussen de ozondosis en bromaat concentratie. Alleen bij een specifieke ozondosis van 0,15 g O₃/g DOC was de bromaat concentratie lager dan de waterkwaliteitsnorm van 1 µg/L. De ozon pilotinstallatie was uitgerust met een venturi systeem voor de inbreng van ozon. Bekend is dat dit systeem niet ideaal is om bromaat productie te minimaliseren. Gebruik van een ander inbrengsysteem resulteert waarschijnlijk in een lagere concentratie bromaat. Ten opzichte van stand-alone ozon kan met PAC-O₃ een vergelijkbaar verwijderingsrendement voor microverontreinigingen worden behaald bij een lagere ozondosis (Figuur 5 en Figuur 6). De verwachting is dat hierdoor de bromaatvorming bij PAC-O₃ lager kan uitkomen ten opzichte van stand-alone ozonisatie wanneer gebruik wordt gemaakt van een beter inbrengsysteem voor ozon.

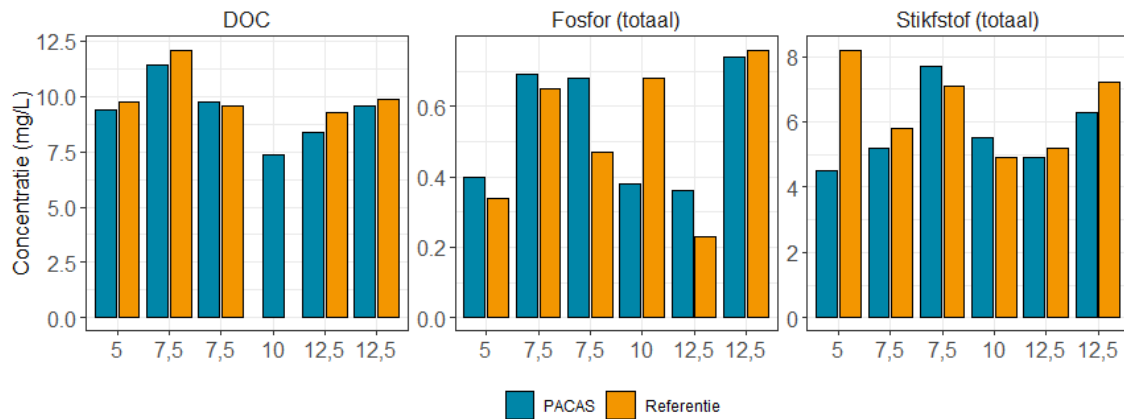
FIGUUR 13 BROMAAT CONCENTRATIES IN DE DIVERSE MONSTERS. IN HET KADER DE CORRELATIE TUSSEN BROMAATVORMING EN SPECIFIEKE OZONDOSIS. CURSIEVE CIJFERS GEVEN DE REËLE SPECIFIEKE OZONDOSIS WEER, GECORRIGEERD VOOR DE DOC- EN NITRIETCONCENTRATIE EN OZONOVERDRACHT



3.4 ORGANISCHE STOFFEN EN NUTRIËNTEN

In het pilotonderzoek is waargenomen dat PACAS weinig invloed heeft op de verwijdering van DOC, stikstof en fosfor (Figuur 14). De DOC-verwijdering door PACAS was minder dan 10% en één keer slechts 2,2% (PAK-dosering 7,5 mg/L). Voor stikstof en fosfor verschilden de concentraties na de PACAS en referentiestraat op sommige meetdagen aanzienlijk, zowel de ene als de ander kant op. Op andere dagen was er vrijwel geen verschil waarneembaar. Op de dagen dat er een verschil was waar te nemen was dit niet eenduidig te relateren aan de dosering van PAK.

FIGUUR 14 DOC, FOSFOR EN STIKSTOF CONCENTRATIES IN EFFLUENT VAN PACAS EN REFERENTIE STRATEN. WAARDE VOOR DOC VOOR REFERENTIE BIJ PAC DOSIS 10 MG/L NIET BESCHIKBAAR



3.5 METALEN

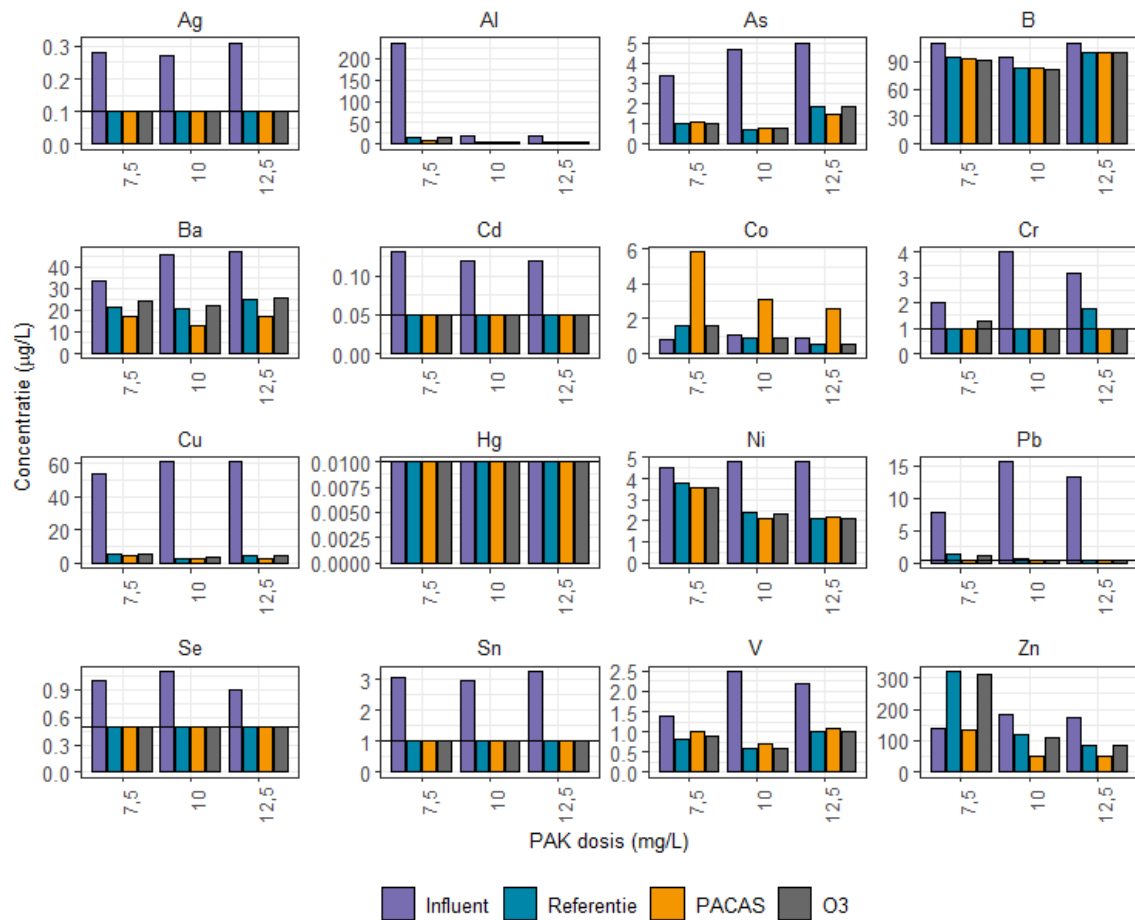
De verwijderingsrendementen van totaal metalen op rwzi Leiden-Noord (effluent referentie straat t.o.v. rwzi influent) zijn vergelijkbaar met landelijke gemiddelde rendementen voor arseen, koper, nikkel en lood en lager dan landelijke gemiddelde rendementen voor cadmium, chroom en zink (Rijkswaterstaat 2022) (Tabel 7).

TABEL 7 GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN METALEN BIJ LEIDEN-NOORD EN LANDELIJK GEMIDDELD

Metaal	Gemiddeld verwijderingsrendement referentie (%)	Standaardafwijking (n=3)	Landelijke gemiddeld verwijderingsrendement (%) (Rijkswaterstaat 2022)
Ag	65	2,5	-
Al	77	15,7	-
As	73	10,9	60
B	12	2,9	-
Ba	46	9,8	-
Cd	59	1,8	81
Co	31	18,6	-
Cr	56	16,5	87
Cu	93	2,7	93
Ni	41	21,9	59
Pb	91	8,3	96
Se	50	5,1	-
Sn	68	1,7	-
V	58	16,8	-
Zn	43	10,5	84

De behandeling met PACAS of O₃ heeft geen noemenswaardige invloed op de verwijdering van zware metalen, met uitzondering van barium. De verwijdering van barium was 46% in de referentiestraat en 61% in de PACAS-straat (Figuur 15 en Tabel 24 in Bijlage F). Kwik concentraties waren onder rapportagegrens in alle gemeten monsters. De combinatie van PACAS en O₃ (PAC-O₃ monsters) heeft ook nauwelijks effect op de verwijdering van metalen (Bijlage F, Figuur 26).

FIGUUR 15 METALEN CONCENTRATIES IN RWZI INFLUENT EN IN AFLOOP RWZI-EFFLUENT (REFERENTIE), PACAS EN O₃, IN HET GEVAL DE CONCENTRATIE ONDER DE RAPPORTAGEGREN S LAG IS AANVULLEND DE RAPPORTAGEGREN S WEERGEGEVEN ALS EEN HORIZONTALE LIJN



Opvallend is dat de concentratie kobalt toeneemt na behandeling met PACAS. De hypothese is dat het gebruikte PAK een relatief hoog gehalte aan kobalt bevatte. Oorzaak hiervan is mogelijk de herkomst van de specifieke batch PAK die ten tijde van het pilotonderzoek gedoseerd werd. Mogelijk dat de grondstof waar het PAK uit vervaardigd is kobalt bevatte, of dat het PAK (gedeeltelijk) is gemaakt uit gereactiveerde actiefkool. De waargenomen verhoogde concentratie kobalt is daarmee waarschijnlijk een bevinding die specifiek bij de gebruikte batch PAK hoort. Niet een generieke eigenschap van PAK, wel een mogelijk aandachtspunt bij het inkopen van PAK.

De hogere zink concentratie in de referentie (en dus ook na O₃ behandeling) t.o.v. de influent concentratie op de eerste testdag (7,5 mg/L PAK) kon niet worden verklaard. Dit resultaat is wel weergegeven in Figuur 15, maar niet meegenomen in de berekening van de verwijdering over de zuivering (Tabel 7).

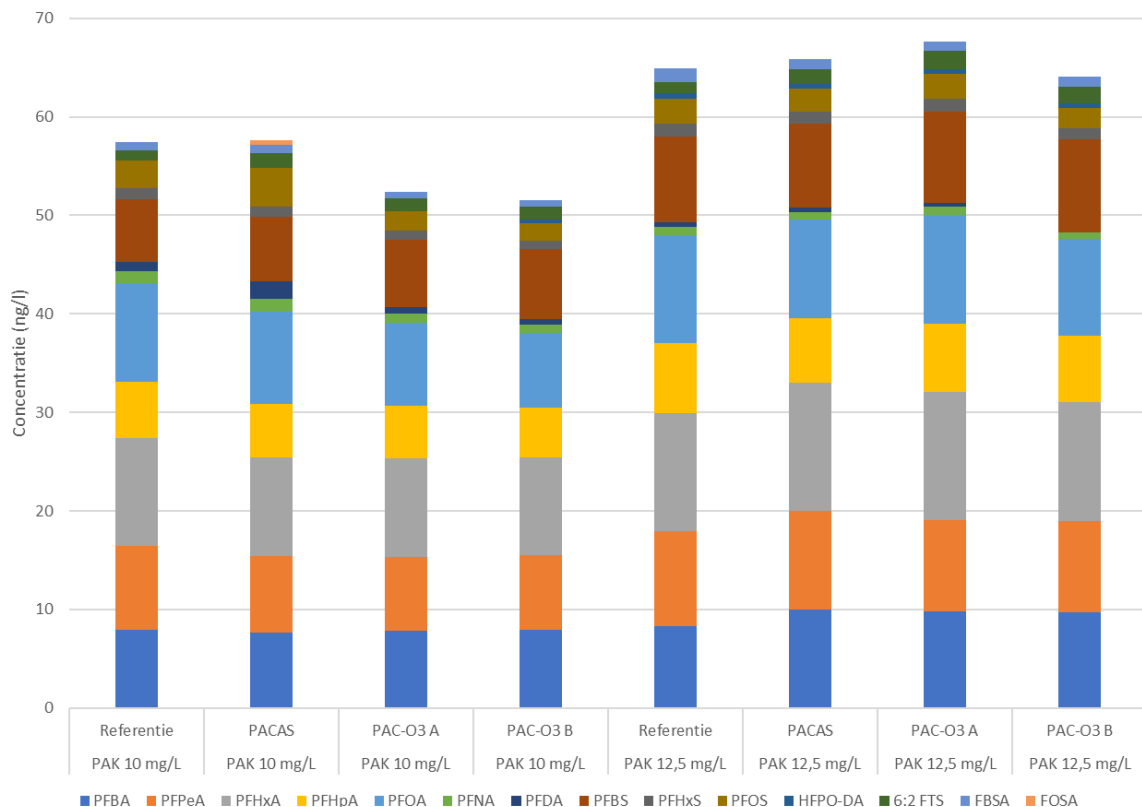
3.6 PFAS

De aangetroffen PFAS-concentraties zijn in Figuur 16 en in Bijlage G (Tabel 25) weergegeven. De behandeling met PACAS heeft géén effect op de PFAS-concentraties. Het effect van de ozonbehandeling is niet eenduidig. Bij testdag 3 (10 mg PAK/L) lijkt ozon tot een afname van PFAS te leiden. Bij testdag 4 (12,5 mg PAK/L) is er geen effect (PAC-O₃ B, 0,33 g O₃/g DOC) of zelfs sprake van een zeer kleine toename (PAC-O₃ A, 0,14 g O₃/g DOC). Wanneer naar de concentraties van individuele stoffen wordt gekeken zijn de resultaten te wisselend om gefundeerde uitspraken te doen over toe- of afname van stoffen, is er niet of nauwelijks toe- of afname óf is de concentratie te laag om iets zinnigs te kunnen zeggen.

De verwachting is dat actiefkool vooral effectief is voor PFAS met langere ketens en dat kortere ketens slecht worden verwijderd. In de resultaten is dit niet eenduidig terug te zien. Of actiefkool geschikt is voor het verwijderen van precursors is nog onduidelijk. De precursors uit het standaard analysepakket werden nauwelijks aangetroffen.

Ozon grijpt aan op dubbele koolstofbindingen, zoals aanwezig in sommige precursors. Afhankelijk van de dosering en contacttijd zou een toename van precursors en/of stabiele PFAS met kortere ketens kunnen plaatsvinden. Ook dit is niet eenduidig in de resultaten terug te zien. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat relatief lage specifieke ozondoseringen zijn gebruikt (<0,45 g O₃/g DOC).

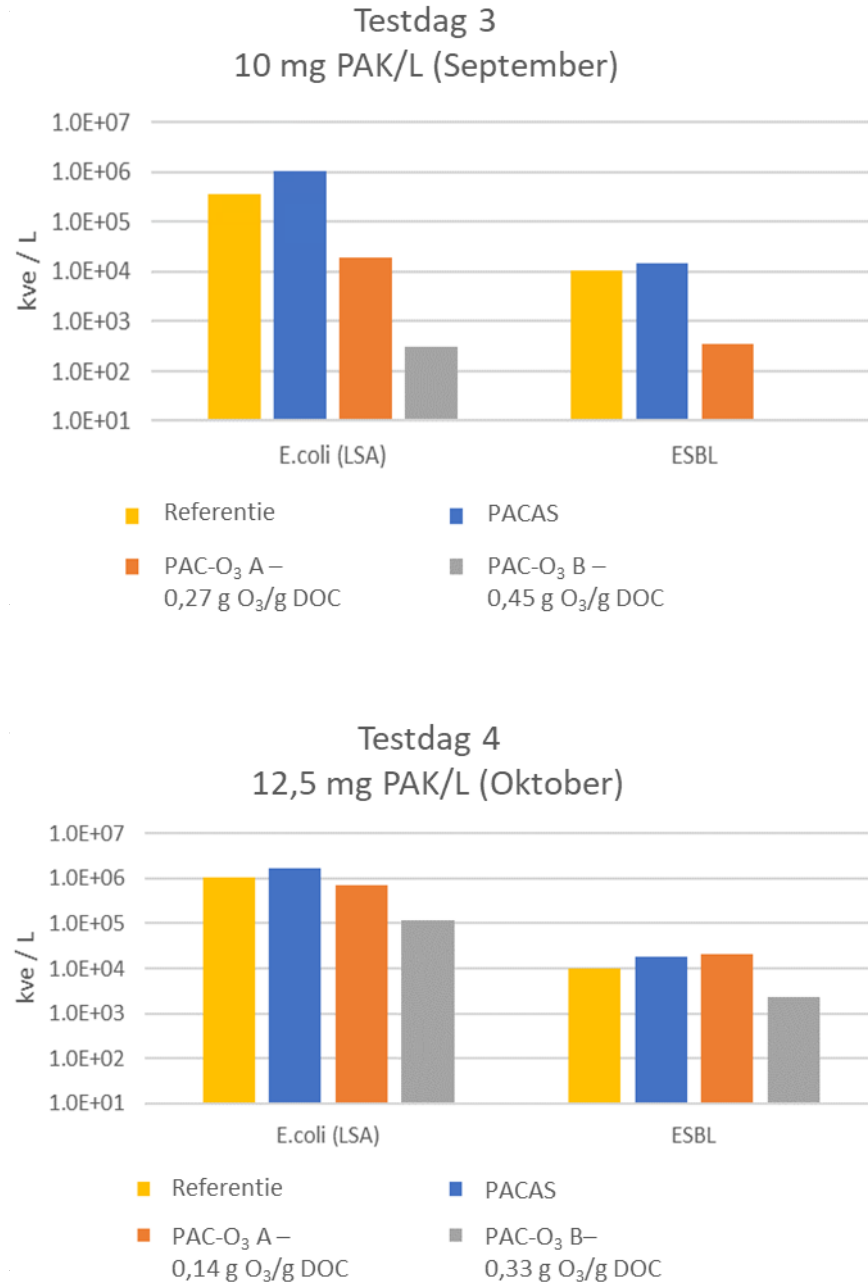
FIGUUR 16 AANGETROFFEN PFAS-CONCENTRATIES OP TESTDAGEN 3 EN 4. OZONDOSIS IN PAC-O₃ A WAS 0,27 EN 0,14 G O₃/G DOC BIJ RESPECTIEVELIJK PAK 10 EN 12,5 MG/L. OZONDOSIS IN PAC-O₃ B WAS 0,45 EN 0,33 G O₃/G DOC BIJ RESPECTIEVELIJK PAK 10 EN 12,5 MG/L



3.7 ANTIBIOTICA-RESISTENTIE

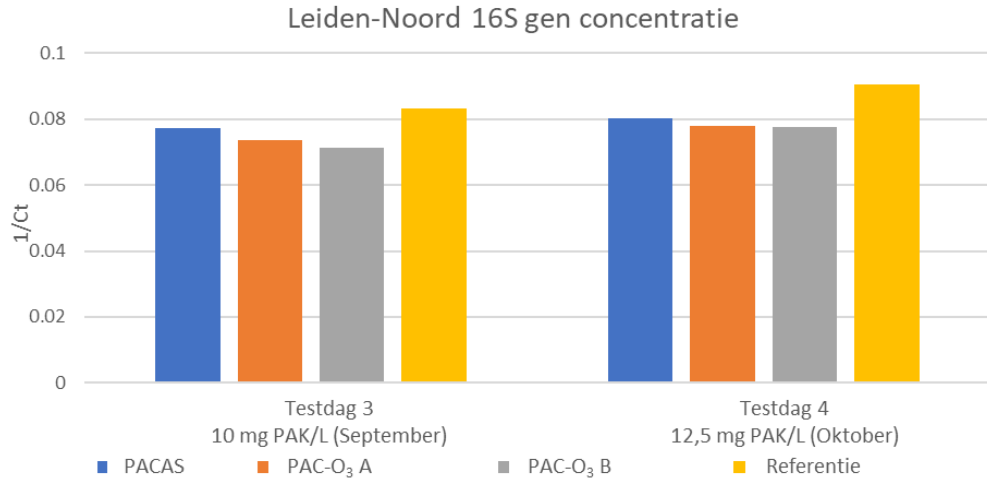
Er is een duidelijk verschil in de resultaten van testdag 3 (september) en testdag 4 (oktober) te zien in Figuur 17. In september was de verwijdering van *E. coli* en ESBL circa 3 logeenheden, terwijl deze in oktober minder dan 1 logeenheid was, hoewel de procescondities op beide dagen vergelijkbaar zijn. De dataset is onvoldoende groot om dit te verklaren. Na PACAS lijkt *E. coli* zelfs iets toe te nemen.

FIGUUR 17 *E. COLI* VERWIJDERING IN TESTDAGEN 3 EN 4



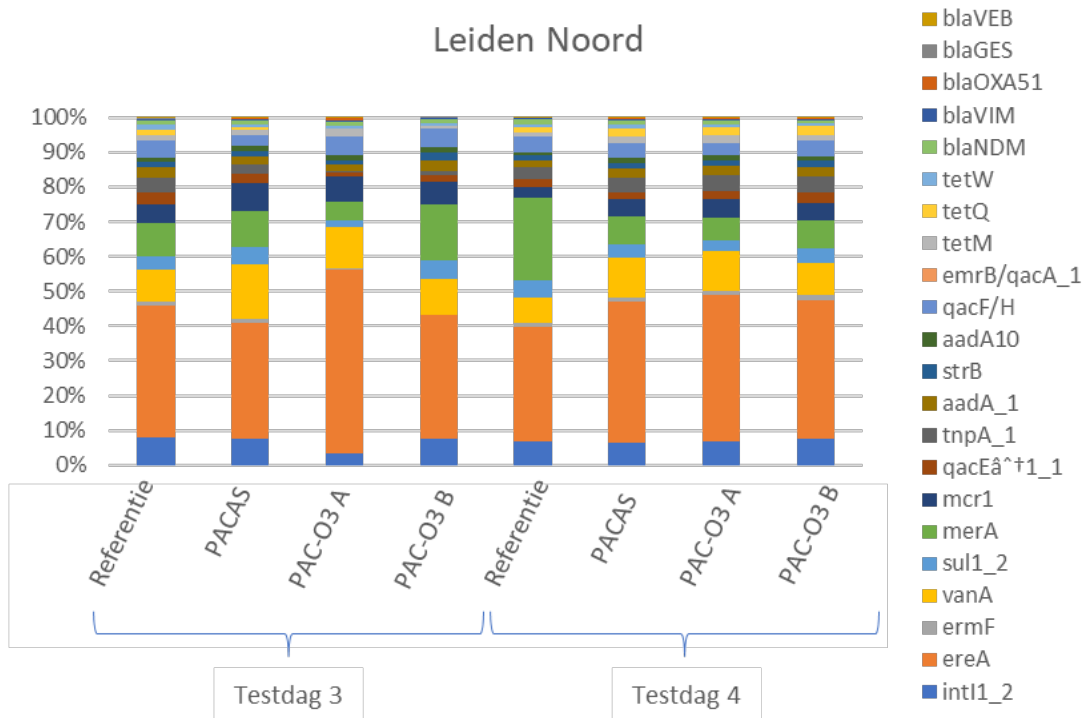
De analyse van de 16S concentratie (maat voor concentratie DNA/genen) wordt in Figuur 18 weergegeven. Er wordt geen afname gezien van een genconcentratie (16S) of het aantal resistentiegenen

FIGUUR 18 16S GEN CONCENTRATIE IN TESTDAGEN 3 EN 4. OZONDOSIS IN PAC-O₃ A WAS 0,27 AND 0,14 G O₃/G DOC IN TESTDAG 3 EN 4 RESPECTIEVELIJK. OZONDOSIS IN PAC-O₃ B WAS 0,45 AND 0,33 G O₃/G DOC IN TESTDAG 3 EN 4 RESPECTIEVELIJK



Ook het aantal (soorten) genen is bepaald (Figuur 19) en hieruit blijkt dat het aantal soorten AMR genen beperkt varieert. De verwachting was dat Ozon afhankelijk van dosis en contacttijd zowel antibioticaresistente bacteriën (ESBL) als genen zouden verwijderen en dat PACAS geen verwijdering zou geven. Deze resultaten bevestigen het beeld voor PACAS, maar we zien ook geen effect van de ozondoseringen.

FIGUUR 19 AANTAL VERSCHILLENDE ANTIBIOTICARESISTENTE GENEN IN TESTDAGEN 3 EN 4. SPECIFIEKE OZONDOSIS IN PAC-O₃ A WAS 0,27 EN 0,14 G O₃/G DOC OP RESPECTIEVELIJK TESTDAG 3 EN 4. SPECIFIEKE OZONDOSIS IN PAC-O₃ B WAS 0,45 EN 0,33 G O₃/G DOC OP RESPECTIEVELIJK TESTDAG 3 EN 4



4

INPASBAARHEID IN NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK

Hieronder is de inpasbaarheid gegeven van het PAC-O₃ concept op Nederlandse rwzi's met een schaalgrootte van 100.000 i.e. voor een jaargemiddeld verwijderingsrendement van 70-80% voor de 7 beste van de 11 gidsstoffen (PAK-dosering van 5,0 mg/L en een specifieke ozondosering van 0,3 g O₃/g DOC).

4.1 EFFECT OP BEDRIJFSVOERING

EFFLUENTKWALITEIT

De kwaliteit van het effluent zal toenemen door de afvang van microverontreinigingen. Zowel de chemische als de ecotoxicologische kwaliteit verbetert. Er zijn geen noemenswaardige effecten op CZV, N-totaal en P-totaal.

SLIBPRODUCTIE

Door de dosering van PAK aan het actiefslibstelsysteem zal de slibproductie toenemen. Bij een dosering van 5 mg/L zal er jaarlijks 33 ton droge stof additioneel slib afgevoerd moeten worden. Dit is een stijging van 2,5% op de totale slibafzet van een gemiddelde rwzi. Naar verwachting zal het percentage droge stof van het ontwaterde slib licht toenemen. Welke effecten dit heeft op de slibeindverwerking moet nog uit praktijkbevindingen gaan blijken evenals het effect op de ontwatering zoals bijvoorbeeld verminderd PE verbruik.

ENERGIEVERBRUIK

Uitgaande van een specifieke ozondosering van 0,3 g O₃/g DOC zal het energieverbruik van de rwzi toenemen met ca. 413.000 kWh per jaar. Hiervan is ca. 22% voor de PAK-dosering en 78% voor ozonisatie.

CHEMICALIËNVERBRUIK

Door dosering van PAK aan het actiefslibproces is een PAK-verbruik van 33 ton per jaar voorzien. Voor de productie van ozon is op jaarbasis 161 ton vloeibare zuurstof nodig. Mogelijk dat de verbeterde ontwatering van het actiefslib resulteert in een verlaging van het PE-gebruik tijdens slibindikking. Dit kan echter niet met zekerheid worden vastgesteld en dient nader onderzocht te worden.

4.2 INPASSING OP LOCATIE

De inpassing van het PAC-O₃ concept is vrijwel gelijk aan de inpassing van PACAS en nageschakelde ozonisatie. Voor de PAK-dosering is eenzelfde PAK-doseerinstallatie en -silo nodig als voor de PACAS. Het ruimtebeslag hiervan is ca. 25 m². Ook vereist het leidingwerk van de doseerinstallatie naar de actiefslibtank van de rwzi. De nageschakelde ozoninstallatie is qua ruimtebeslag vergelijkbaar met een stand-alone ozoninstallatie. De ozoncontacttank,

zuurstofopslag en randapparatuur zijn identiek, de ozongenerator zelf zal iets minder groot zijn. Het totale ruimtebeslag van de ozoninstallatie wordt afhankelijk van de bouwwijze op 150-300 m² geschat.

4.3 VOOR WELKE TYPE RWZI'S GESCHIKT

Het PAC-O₃ concept is toepasbaar op rwzi's met een actiefslibproces waar de wens is om microverontreinigingen te verwijderen. Aandacht moet worden besteed aan het beslag dat de PAK-dosering legt op de biologische zuiveringscapaciteit van de rwzi, deze is aanzienlijk lager dan bij stand-alone PACAS. Ook moet aandacht worden besteed aan het effect van PAK-dosering op de slib(eind)verwerking.

4.4 MODULARITEIT

Het PAC-O₃ concept is modulair in de zin dat een reeds gerealiseerde PACAS- of ozoninstallatie op een rwzi uitgebreid kan worden tot een PAC-O₃ concept. In het geval van een bestaande PACAS kan de ozoninstallatie alsnog nageschakeld worden. Bij een bestaande ozoninstallatie kan de PACAS achteraf alsnog ingepast worden.

Een andere vorm van modulariteit zit in de combinatie van de twee processtappen in het PAC-O₃ concept. Het vereiste verwijderingsrendement kan zowel met de PACAS alsook de ozoninstallatie bijgestuurd worden. Dit betekent dat er een vrijheidsgraad is in de te behalen rendementen van beide processtappen. Deze vrijheid kan ingezet worden om het gemiddelde verwijderingsrendement te verhogen, maar ook bijvoorbeeld gericht op het rendement van een specifieke probleemstof.

5

UITWERKING OP PRAKTIJSCHAAL EN VERGELIJKING MET REFERENTIETECHNOLOGIEËN

Voor de vergelijking van PAC-O₃ met de IPMV-referentietechnologieën op de IPMV-criteria verwijderingsrendement voor microverontreinigingen, CO₂-footprint en kosten is een uitwerking gemaakt van het PAC-O₃ concept op praktijkschaal. De uitwerking is conform de IPMV-richtlijnen opgesteld voor een praktijkschaal van een 100.000 i.e. rwzi.

In Tabel 8 zijn de specificaties van het te behandelen afvalwater conform STOWA IPMV-uitgangspunten gegeven.

TABEL 8 SPECIFICATIES 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 in nabehandeling	%	70%
Jaardebiet te behandelen in nabehandeling	m ³ /jaar	5.365.500
Ontwerp capaciteit nabehandeling	m ³ /uur	1.040
DOC – oploop nabehandeling	mg/L	11
NO ₂ -N – oploop nabehandeling	mg/L	0,2

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 CO₂-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 het PAC-O₃ concept op maat te maken voor een specifieke situatie. Voor onderhavige rapportage is generiek ontwerp van het PAC-O₃ concept uitgewerkt. Uiteraard zijn er ook ontwerpen te maken met hogere of lagere verwijderingsrendementen.

Het PAC-O₃ ontwerp is gedimensioneerd op de laagste getest PAK-dosering (5 mg PAK/L) en een specifieke ozondosering (0,3 g O₃/g DOC), zie Tabel 9. Met deze instellingen lijkt de doelstelling van 70% verwijdering voor de 7 beste van de 11 gidsstoffen haalbaar. Lagere PAK- en specifieke ozondoses zijn niet getest, onbekend is daarom of deze eventueel aan de doelstelling van 70% voldoen.

TABEL 9 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN VAN HET PAC-O₃ CONCEPT OP SCHAALGROOTTE 100.000 I.E. RWZI

Parameter	Eenheid	Grootheid
PAK-dosering		
Jaardebiet	m ³ /jaar	7.665.000
Aandeel behandeld jaardebiet	%	100
PAK-dosering	mg/L	5
Maximale PAK-dosering	-	2x DWA
PAK-verbruik	ton/jaar	31
Slibgehalte ontwaterd slib zonder PAK	% ds	21,1
Slibgehalte ontwaterd slib met PAK	% ds	>21,1
Extra af te voeren slib	ton ds/jaar	31
Elektriciteitsverbruik	kWh/jaar	91.104
Personele belasting	FTE	0,2
Ozoninstallatie		
Aandeel behandeld jaardebiet	%	70
Behandeld debiet	m ³ /jaar	5.365.500
Ontwerp piek aanvoer	m ³ /uur	1.040
DOC-concentratie afloop NBT	mg/L	11
Opvoerhoogte	m	6
Specifieke ozondosering	mg O ₂ /mg DOC	0,3
Minimale contacttijd	minuten	15
Contacttank	m ³	260
Zuurstofverbruik	ton O ₂ /jaar	177
Elektriciteitsverbruik (excl. opvoer water)	kWh/jaar	338.027
Personele belasting	FTE	0,2

5.2 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". De CO₂-footprint van het PAC-O₃ concept is berekend op basis van de ontwerpgrondslagen zoals gegeven in paragraaf 5.1, een PAK-dosering van 5 mg/L en een specifieke ozondosis van 0,3 g O₃/g DOC.

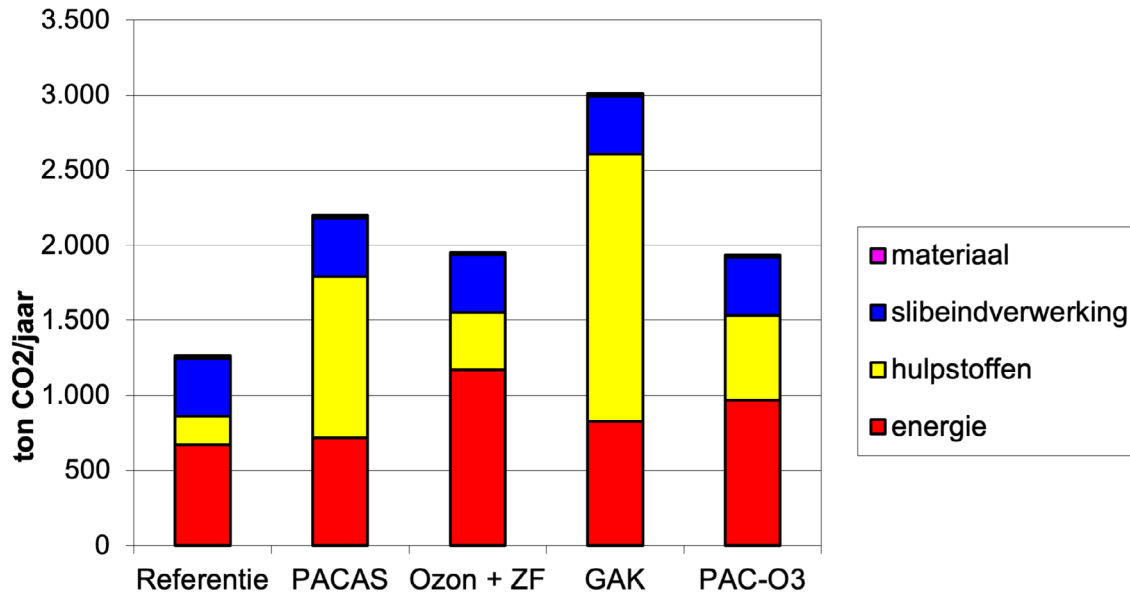
TABEL 10 CO₂-FOOTPRINT IPMV-REFERENTIETECHNOLOGIEËN EN PAC-O₃ CONCEPT VOOR EEN 100.000 I.E. SCHAAL

Parameter	Eenheid	PACAS	Ozon+ZF	GAK	PAC-O ₃
CO ₂ – totaal ⁴	ton CO ₂ /jaar	2.198	1.953	3.009	1.936
CO ₂ – enkel aanvullende stap ⁵	ton CO ₂ /jaar	933	688	1744	671
CO ₂ per kuub rwzi debiet ⁶	g CO ₂ /m ³	122	90	228	88
CO ₂ per kuub behandeld debiet ⁷	g CO ₂ /m ³	122	128	325	106

Het aandeel van de PAC-O₃ CO₂-footprint dat behoort bij de PAK-dosering is ca. 51%, het aandeel dat behoort bij de ozonisatie is ca. 49% van de totale PAC-O₃ CO₂-footprint.

In Figuur 20 is de opbouw van de CO₂-footprint gegeven voor het PAC-O₃ concept.

- 4 CO₂-footprint van de IPMV-referentietechnologie of PAC-O₃ inclusief de rwzi zelf (1.265 ton CO₂/jaar)
- 5 CO₂-footprint van de IPMV-referentietechnologie of PAC-O₃ exclusief de rwzi zelf
- 6 Enkel van de aanvullende stap berekend over het totale rwzi debiet (7.665.000 m³/jaar)
- 7 Enkel van de aanvullende stap berekend over het debiet van de nabehandeling (voor PACAS 7.665.000 m³/jaar, voor Ozon + Zandfiltratie en GAK-filtratie over 5.365.000 m³/jaar en voor PAC-O₃ PACAS-aandeel over 7.665.000 m³/jaar en Ozon-aandeel over 5.365.000 m³/jaar)

FIGUUR 20 OPBOUW VAN DE CO₂-FOOTPRINT VAN DE REFERENTIE RWZI ZONDER EN MET AANVULLENDE ZUIVERINGSSTAPPEN

Ten opzichte van de referentietechnieken PACAS en ozonisatie met zandfiltratie is de CO₂-footprint van het PAC-O₃ concept lager. De PAC-dosering is lager t.o.v. PACAS, de specifieke ozondosering is lager t.o.v. Ozon + Zandfiltratie. Door beide te combineren ligt de totale PAC-O₃ CO₂-footprint lager dan die van PACAS en Ozon + Zandfiltratie. De CO₂-footprint van enkel Ozon, exclusief Zandfiltratie, ligt lager dan die van PAC-O₃.

5.3 KOSTEN

Op basis van de dimensioneringsgrondslagen zijn de investeringskosten (Tabel 11) en jaarlijkse kosten (Tabel 12) uitgewerkt. De investeringskosten zijn identiek aan de investeringskosten zoals in de PAC-O₃ haalbaarheidsstudie opgenomen, de voorziene installaties zijn immers dezelfde als destijds voorzien. Hierbij moet worden opgemerkt dat het prijspeil van de kostenraming 2018 betreft. Inmiddels is duidelijk dat de daadwerkelijke investeringskosten van zowel een PACAS-installatie als een ozoninstallatie anno 2023 aanzienlijk hoger liggen, tot wel een factor 2 á 3. De gepresenteerde investeringskosten 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. De jaarlijkse kosten zijn ten opzichte van de haalbaarheidsstudie geactualiseerd op basis van de bevindingen van het pilotonderzoek. Ook voor de jaarlijkse kosten geldt dat het prijspeil 2018 is en dat de kosten van onder andere actiefkool en elektriciteit anno 2023 aanzienlijk hoger liggen, tot wel een factor 2 á 3. Hierdoor geven de jaarlijkse kosten geen goed beeld van actuele kosten anno 2023. Voor de kostenraming zijn de IPMV-uitgangspunten gehanteerd, deze zijn gegeven in Bijlage H.

TABEL 11 **INVESTERINGSKOSTEN PAC-O₃ CONCEPT VOOR EEN 100.000 I.E. RWZI**

Investeringskosten	C	WTB	E/PA
PACAS-installatie			
Totaal per post	€ 70.313	€ 801.563	€ 210.938
Totaal		€ 1.083.000	
Ozoninstallatie			
Totaal per post	€ 1.062.563	€ 1.545.328	€ 357.188
Totaal		€ 2.966.000	
PACAS-Ozon combi			
Totaal per post	€ 1.132.875	€ 2.346.891	€ 568.125
Totaal		€ 4.048.000	

TABEL 12 **JAARLIJKSE KOSTEN PAC-O₃ CONCEPT VOOR EEN 100.000 I.E. RWZI**

Kostenpost	Jaarlasten €/jaar
PACAS installatie	
Kapitaalslasten C	€ 4.000
Kapitaalslasten WTB	€ 72.000
Kapitaalslasten E/PA	€ 19.000
Onderhoud C	€ 200
Onderhoud WTB	€ 13.000
Onderhoud E/PA	€ 4.000
Personeel	€ 10.000
Kosten actiefkool	€ 40.000
Kosten elektriciteit	€ 9.000
Kosten extra slibafvoer	€ 18.000
Sub-totaal	€ 190.000
Ozon installatie	
Kapitaalslasten C	€ 61.000
Kapitaalslasten WTB	€ 139.000
Kapitaalslasten E/PA	€ 32.000
Onderhoud C	€ 5.000
Onderhoud WTB	€ 46.000
Onderhoud E/PA	€ 11.000
Personeel	€ 10.000
Kosten zuurstof	€ 35.000
Kosten elektriciteit	€ 43.000
Sub-totaal	€ 383.000
PACAS-Ozon combi	
PACAS installatie	€ 190.000
Ozon installatie	€ 383.000
Totaal	€ 573.000

Conform de IPMV-richtlijnen zijn de dimensionering en kostenraming van PAC-O₃ gebaseerd op een 100.000 i.e. rwzi waarvan 70% van het jaardebiet wordt behandeld in de nabehandeling. Voor PAC-O₃ betekent dit dat het volledige rwzi jaardebiet onderhavig is

aan PAK-dosering. De PAK-dosering verloopt debietsproportioneel tot maximaal 2x DWA, daarboven is de PAK-dosering begrenst op de 2x DWA doseerhoeveelheid. Hierdoor wordt de volledige RWA met PAK behandeld, zei het een PAK-dosering die iets lager ligt dan 5 mg/L. In de ozonbehandeling van PAC-O₃ wordt 70% van het jaardebiet behandeld, de overige 30 wordt via een by-pass om de nabehandeling heengeleid. In Tabel 13 zijn de totale jaarlijkse kosten vertaald naar kuub rwzi debiet en kuub debiet van de aanvullende zuiveringsstap (100% voor PAK-dosering en 70% voor ozonbehandeling) weergegeven.

TABEL 13 KOSTEN PAC-O₃ CONCEPT VOOR EEN RWZI MET EEN ONTWERPCAPACITEIT VAN 100.000 I.E. SCHAAL PER M3 RWZI DEBIET EN DEBIET VAN DE NAGESCHAKELDE ZUIVERINGSSTAP

Parameter	Eenheid	
Kosten per kuub rwzi debiet	€/m ³	0,08
Kosten per kuub debiet aanvullende zuiveringstap	€/m ³	0,10

5.4 VERWIJDERINGSRENDEMENT GIDSSTOFFEN

Het te behalen verwijderingsrendement voor gidsstoffen is afhankelijk van de PAK-dosering en specifieke ozondosis. Door een van beide of beide parameters te verhogen of te verlagen is respectievelijk een hoger of lager rendement te bereiken.

Uit het pilotonderzoek blijkt dat bij een PAK-dosering van 5 mg/L en een specifieke ozondosis van 0,25 g O₃/g DOC een verwijderingsrendement van meer dan 80% op 7 van de 11 gidsstoffen behaald wordt op een DWA dag, dus exclusief de aftopping van de PAK-dosering bij RWA en een bypass rondom de ozoninstallatie tijdens RWA.

Zoals gangbaar bij nageschakelde technologieën wordt tijdens RWA een deel van het water via een by-pass om de nageschakelde installatie geleid. Voor het PAC-O₃ concept lijkt dit ook haalbaar zonder dat de doelstelling van 70% rendement voor 7 van de 11 gidsstoffen in het geding komt. Wanneer de ozoninstallatie op jaarbasis 70% van het debiet behandeld is dit vermoedelijk voldoende om de doelstelling te behalen bij de instellingen zoals voor het ontwerp aangehouden (PAK-dosering van 5 mg/L en specifieke ozondosering van 0,3 g O₃/g DOC). De PAK-dosering vindt in het actiefslibstelsysteem plaats waardoor al het inkomende water in contact komt met PAK, dus ook de 30% van het jaardebiet dat niet in de ozoninstallatie wordt behandeld. Wel geldt dat de PAK-dosering tot 2x DWA debietsproportioneel verloopt en daarboven wordt afgetopt. Bij een debiet groter dan 2x DWA wordt PAK gedoseerd in een hoeveelheid behorend bij 2x DWA.

Om het doel van 80% verwijdering volgens de EU-berekeningswijze te halen is waarschijnlijk een specifieke ozondosis hoger dan 0,3 g O₃/g DOC vereist en eventueel een hogere PAK-dosering.

5.5 VERGELIJKING MET REFERENTIETECHNOLOGIEËN OP IPMV-CRITERIA

Op basis van het pilotonderzoek is de beoordeling op de toetsingscriteria geëvalueerd. Op de toetsingscriteria is de technologie vergeleken met de referentietechnologieën PACAS, Ozon + Zandfiltratie en GAK-filtratie. In Tabel 14 is de vergelijking op de toetsingscriteria tussen het PAC-O₃ concept en de referentietechnologieën weergegeven. Deze vergelijking betreft voor PAC-O₃ de variant met een PAK-dosering van 5 mg/L en een specifieke ozondosering van 0,3 g O₃/g DOC. Voor andere doseerinstellingen gelden andere scores.

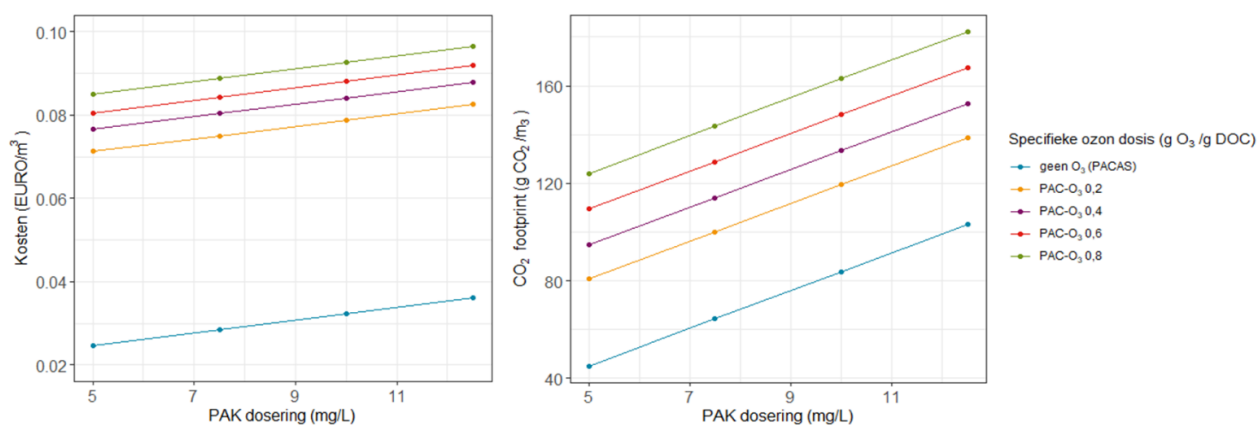
TABEL 14 VERGELIJKINGSTABEL PAC-O₃ CONCEPT TEN OPZICHTE VAN DE REFERENTIETECHNIEKEN

	Eenheid	PACAS	Ozon + ZF	GAK	PAC-O ₃
CO ₂ -footprint - nabehandeling ⁸	g CO ₂ /m ³	122	128	325	106
CO ₂ -footprint – rwzi + nabehandeling	ton CO ₂ /jaar	2.198	1.953	3.009	1.936
Kosten per behandelde kuub ⁸	€/m ³	0,05	0,17	0,26	0,10
Verwijderingsrendement gidsstoffen ⁹	%	70-75%	80-85%	80-85%	80-85%

Het PAC-O₃ concept scoort iets beter op het beoordelingscriterium CO₂-footprint. De kosten liggen tussen PACAS en Ozon + Zandfiltratie in waarbij moet worden opgemerkt dat dit kosten betreffen die horen bij prijspeil 2018. Anno 2023 zijn deze kosten verre van actueel. Voor concrete projecten zal derhalve een actuele kostenraming opgesteld moeten worden om tot een goed onderling vergelijk van technologieën en een realistische budgettering te komen. Het verwijderingsrendement van PAC-O₃ is iets hoger dan PACAS en iets lager dan Ozon + Zandfiltratie.

In Figuur 21 is voor het PAC-O₃ concept weergegeven wat de effecten van de PAK-dosering en specifieke ozondosis zijn op de kosten (links) en CO₂-footprint (rechts). Hiermee kan afgelezen worden wat de kenmerken van het PAC-O₃ concept zijn bij andere instellingen dan de 5 mg/L PAK-dosering en 0,3 g O₃/g DOC specifieke ozondosering zoals in het ontwerp aangehouden. Zowel de kosten als CO₂-footprint in Figuur 21 zijn uitgedrukt per kuub rwzi debiet, dit komt overeen met de methodiek zoals ook gebruikt voor Tabel 10 en Tabel 13. Voor Tabel 14 is een andere methodiek gebruik, zie bijbehorende voetnoot.

FIGUUR 21 KOSTEN EN CO₂ FOOTPRINT ALS FUNCTIE VAN PAK-DOSERING EN SPECIFIEKE OZONDOSIS VOLGENS DIMENSIONERINGS-GRONDSLAGEN ZOALS WEERGEGEVEN IN TABEL 9



Idem aan de kosten zoals gepresenteerd in paragraaf 5.3 zijn de kosten zoals weergegeven in Figuur 21 gebaseerd op prijspeil 2018. Anno 2023 liggen de kosten een factor 2 á 3 hoger. 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.

- 8 Waarde heeft enkel betrekking op de verwijderingsstap voor microverontreinigingen, niet op de rwzi zelf. De waarde uitgedrukt per kuub behandeld debiet is berekend over het debiet van de nabehandeling. Voor PACAS 7.665.000 m³/jaar, voor Ozon + Zandfiltratie en GAK-filtratie over 5.365.000 m³/jaar en voor PAC-O₃ PACAS-aandeel over 7.665.000 m³/jaar en Ozon-aandeel over 5.365.000 m³/jaar.
- 9 Gemiddeld verwijderingsrendement voor 7 van de 11 gidsstoffen. Voor Ozon + ZF en GAK is dit het rendement over de technologie zelf, dus exclusief het rendement van de rwzi. Voor PACAS en PAC-O₃ is dit inclusief het rendement van de rwzi, maar exclusief aftopping van de PAK-dosering bij RWA en bypass nabehandeling bij RWA.

6

CONCLUSIES

Op basis van het uitgevoerde pilotonderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken over het PAC-O₃ concept:

- Het PAC-O₃ concept is effectief voor de verwijdering van microverontreinigingen. Bij een PAK-dosering van 5 mg/L en specifieke ozondosering 0,3 g O₃/g DOC wordt een verwijderingsrendement over de gehele rwzi behaald waarmee naar verwachting voldaan kan worden aan de IPMV-eis van 70% jaargemiddelde verwijdering voor 7 van de 11 gidsstoffen.
- Hogere rendementen dan de vereiste 70% voor 7 van de 11 gidsstoffen zijn haalbaar door de PAK-dosering en/of specifieke ozondosering te verhogen. Bijvoorbeeld bij een PAK-dosering van 10 mg/L en een specifieke ozondosering van 0,55 g O₃/g DOC is over de gehele rwzi een jaargemiddeld rendement van ca. 89% behaald.
- Bij een PAK-dosering van 5 mg/L en specifieke ozondosering 0,3 g O₃/g DOC bestaat het risico dat de eis van minimaal 80% verwijderingsrendement conform de berekeningswijze van de concept EU Richtlijn Stedelijk Afvalwater niet wordt behaald. Vermoedelijk is dit wel haalbaar door de PAK-dosering te verhogen naar 7,5 mg/L en de specifieke ozondosering te verhogen naar ca. 0,5 g O₃/g DOC.
- Met PAC-O₃ kan een breder palet stoffen verwijderd worden dan met stand-alone PACAS. Ten opzichte van stand-alone ozon wordt een vergelijkbaar palet stoffen verwijderd.
- De ecotoxiciteit van het afvalwater neemt aanzienlijk af na behandeling met het PAC-O₃ concept. De responsen van de toegepaste bioassays worden gehalveerd. Bij een PAK-dosering van 7,5 mg/L en specifieke ozondosering van 0,4 g O₃/g DOC waren de ecotoxiciteitswaarden van bijna alle bioassays vergelijkbaar met of iets lager dan bij een specifieke ozondosering van 0,6 g O₃/g DOC zonder PACAS (stand-alone ozonisatie).
- In vergelijking met stand-alone ozonisatie volstaat een lagere ozondosering bij PAC-O₃ om een gelijk verwijderingsrendement te behalen. Een lagere ozondosering betekent minder kans op bromaatvorming. In het PAC-O₃ onderzoek was de bromaatvorming relatief hoog, zowel in PAC-O₃ effluent als in het stand-alone ozon effluent. Dit is zeer waarschijnlijk te wijten aan het ozon-inbrengsysteem van de pilotinstallatie.
- PAC-O₃ heeft geen noemenswaardig effect op de concentraties van DOC, stikstof en fosfor.
- Er is in het PAC-O₃ onderzoek geen verwijdering van metalen waargenomen. Wel is een verhoogde concentratie kobalt in het PACAS-effluent aangetroffen.
- PAC-O₃ resulteert niet in een noemenswaardige verwijdering van PFAS en antibioticaresistentie.
- In vergelijking met de referentietechnologieën PACAS en Ozon + Zandfiltratie heeft het PAC-O₃ concept een lagere CO₂-footprint. De kosten zijn hoger dan PACAS en lager dan Ozon + Zandfiltratie. Het verwijderingsrendement is hoger dan van PACAS en lager dan van Ozon + Zandfiltratie.

7

DANKWOORD

Dank gaat uit naar het gehele consortium 'PAC-O₃' zonder wie het pilotonderzoek niet mogelijk was geweest. Het consortium bestond uit STOWA, het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, de waterschappen Aa en Maas, Zuiderzeeland, Schieland en Krimpenerwaard, Hollandse Delta, Brabantse Delta en Rijnland, en Royal HaskoningDHV. De waterschappen en STOWA hartelijk dank voor de inhoudelijke betrokkenheid bij het pilotonderzoek en de financiële bijdrage.

Dank aan de STOWA IPMV begeleidingscommissie 'Oxidatieve technieken' voor de bezielende begeleiding van het pilotonderzoek.

In het bijzonder een woord van dank richting het Hoogheemraadschap van Rijnland (Anna Koenis, Marga van Dijk, Johan de Jong, Melvin Sonokromo, Roel van Klaveren en de overige collega's van rwzi Leiden-Noord) voor de prettige samenwerking, hulpvaardigheid en vriendelijke ontvangst op rwzi Leiden-Noord. Jullie support heeft enorm bijgedragen aan het slagen van het pilotonderzoek.

PureBlue (Kevin, Nelis en Nimmy) en Logisticon dank voor het voorzien van technisch functionele en robuuste pilotinstallaties waardoor het pilotonderzoek zeer soepel en voorspoedig verliep.

8

LITERATUURLIJST

STOWA 2020-23 - Haalbaarheidsstudie PAC-O₃ voor verwijdering van microverontreinigingen op rwzi's

STOWA 2020-41 - Pilotonderzoek vergelijking oxidatieve technieken effluent rwzi Aarle-Rixtel (IPMV)

STOWA 2021-15 - Bepaling verwijderingsrendement medicijnresten rwzi-afvalwater. Koepelvoorschrift en onderbouwende eindrapportage plus deelrapportages

STOWA 2021-46 - PFAS in influent, effluent en zuiveringsslib. Resultaten van een meetcampagne op acht rwzi's

Handreiking biologische effectmonitoring RWZI-effluent v07 3420

RIJKSWATERSTAAT - Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL) in samenwerking met CENTRAAL BUREAU VOOR DE STATISTIEK. Industriële en communale bronnen Emissieregistratie. Effluenten RWZI's (gemeten stoffen), Juli 2022.

BIJLAGE A

SPECIFIEKE OZONDOSIS

TABEL 15 GEWENSTE EN REËLE SPECIFIEKE OZONDOSIS

	PAK-dosering (mg/L)	Gewenste dosis (g O ₃ /g DOC)	O ₃ overdracht (%)	Absoluut dosis (mg O ₃ /L)	NO ₂ ⁻ concentratie (mg N/L)	O ₃ consumptie dor NO ₂ ⁻ (mg O ₃ /L)	Absoluut dosis- NO ₂ ⁻ correctie (mg O ₃ /L)	DOC (mg/L)	Reële dosis - NO ₂ ⁻ correctie (g O ₃ /g DOC)	Reële dosis - zonder NO ₂ ⁻ correctie (g O ₃ /g DOC)
PAC-O ₃ A	5	0,3	1	2,69	0,09	0,31	2,38	9,41	0,25	0,29
PAC-O ₃ B	5	0,5	0,98	4,43	0,09	0,31	4,12	9,41	0,44	0,47
PAC-O ₃ C	5	0,7	0,97	6,11	0,09	0,31	5,8	9,41	0,62	0,65
O ₃	0	0,7	0,96	6,07	0,16	0,56	5,51	9,76	0,56	0,62
PAC-O ₃ A	7,5	0,3	0,99	2,67	0,1	0,35	2,32	9,76	0,24	0,27
PAC-O ₃ B	7,5	0,5	0,98	4,39	0,1	0,35	4,04	9,76	0,41	0,45
PAC-O ₃ C	7,5	0,7	0,96	6,02	0,1	0,35	5,67	9,76	0,58	0,62
O ₃	0	0,7	0,96	6,05	0,09	0,31	5,73	9,55	0,60	0,63
PAC-O ₃ A	10	0,3	0,82	2,22	0,06	0,2	2,02	7,36	0,27	0,30
PAC-O ₃ B	10	0,5	0,95	4,26	0,06	0,2	4,05	7,36	0,55	0,58
PAC-O ₃ C	10	0,7	0,86	5,42	0,06	0,2	5,22	7,36	0,71	0,74
O ₃	0	0,7	0,87	5,48	0,09	0,3	5,18	7,36	0,7	0,74
PAC-O ₃ A	12,5	0,2	0,98	1,78	0,12	0,4	1,38	9,56	0,14	0,19
PAC-O ₃ B	12,5	0,4	0,96	3,52	0,12	0,4	3,11	9,56	0,33	0,37
PAC-O ₃ C	12,5	0,6	0,94	5,16	0,12	0,4	4,75	9,56	0,5	0,54
O ₃	0	0,6	0,99	5,1	0,15	0,52	4,59	9,85	0,47	0,52

BIJLAGE B

CONCENTRATIES EN VERWIJDERINGSRENDEMENTEN MICROVERONTREINIGINGEN

TABEL 16 CONCENTRATIE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN

PAK-dosering (mg/L)	(Kandidaat) Gidsstof	Influent	Referentie	Concentratie (µg/L)					O ₃
				PACAS	PAC-O ₃ A	PAC-O ₃ B	PAC-O ₃ C		
5	1,2,3-benzotriazool	12	6.7	5	2.9	2.1	1.2	1.7	
5	amisulpride	0.22	0.19	0.08	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	
5	azitromycine	0.76	0.32	0.24	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	
5	candesartan	0.32	0.29	0.26	0.15	0.1	0.06	0.07	
5	carbamazepine	1.8	2.2	1.5	0.27	0.02	<0.01	0.02	
5	citalopram	0.14	0.2	0.09	0.04	0.02	<0.01	<0.01	
5	claritromycine	<0.30	0.08	0.06	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	
5	diclofenac	0.75	0.56	0.41	0.05	<0.03	<0.03	<0.03	
5	furosemide	1.4	0.69	0.44	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	
5	gabapentine	4	1.5	1.4	1	0.83	0.56	0.58	
5	hydrochloorthiazide	1.8	1.5	0.99	0.44	0.2	<0.10	<0.10	
5	irbesartan	1.1	0.74	0.74	0.43	0.31	0.2	<0.02	
5	metoprolol	1.8	1.2	0.65	0.37	0.23	0.09	0.16	
5	propranolol	0.07	0.05	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
5	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	0.59	0.52	0.28	0.16	0.11	0.06	0.11	
5	sotalol	2	1.6	1.1	0.1	<0.02	<0.02	<0.02	
5	sulfamethoxazol	0.58	0.28	0.2	0.04	<0.02	<0.02	0.02	
5	trimethoprim	0.14	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
5	venlafaxine	0.35	0.33	0.22	0.11	0.06	<0.02	0.02	
7.5	1,2,3-benzotriazool	4.2	3.2	1.8	1.2	0.94	0.67	1.4	
7.5	amisulpride	0.18	0.18	0.06	0.03	<0.01	<0.01	0.01	
7.5	azitromycine	<0.50	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	
7.5	candesartan	0.33	0.32	0.3	0.18	0.14	0.1	0.13	
7.5	carbamazepine	3.2	4	2.3	1	0.35	0.04	0.39	
7.5	citalopram	0.16	0.16	0.06	0.03	0.01	<0.01	0.02	
7.5	claritromycine	<0.30	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	
7.5	diclofenac	0.64	0.58	0.37	0.11	<0.03	<0.03	<0.03	
7.5	furosemide	1.2	0.8	0.37	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	
7.5	gabapentine	4.8	2.1	1.7	1.3	1	0.84	1.2	
7.5	hydrochloorthiazide	1.8	1.5	0.84	0.45	0.29	0.11	0.3	
7.5	irbesartan	1.1	0.74	0.64	0.4	0.3	0.22	0.3	
7.5	metoprolol	1.8	1.2	0.52	0.3	0.21	0.12	0.38	

PAK-dosering (mg/L)	(Kandidaat) Gruisstof	Influent	Referentie	PACAS	PAC-O ₃ A	PAC-O ₃ B	PAC-O ₃ C	O ₃
7.5	propranolol	0.08	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
7.5	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	0.51	0.45	0.23	0.14	0.1	0.06	0.18
7.5	sotalol	2	1.7	1	0.21	0.04	<0.02	0.02
7.5	sulfamethoxazol	0.54	0.23	0.22	0.09	0.04	<0.02	0.04
7.5	trimethoprim	0.11	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
7.5	venlafaxine	0.32	0.35	0.2	0.11	0.07	0.03	0.07
10	1,2,3-benzotriazol	3.3	1.1	2.4	0.71	0.42	0.21	0.53
10	amisulpride	0.18	0.03	0.16	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
10	azitromycine	0.96	0.13	0.14	0.12	0.11	0.11	0.11
10	candesartan	0.26	0.19	0.22	0.11	0.06	0.03	0.04
10	carbamazepine	0.44	0.15	0.38	0.02	<0.01	<0.01	<0.01
10	citalopram	0.2	0.04	0.17	0.02	<0.01	<0.01	<0.01
10	claritromycine	<0.30	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
10	diclofenac	0.47	0.25	0.39	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
10	furosemide	<1.0	0.38	0.6	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20
10	gabapentine	3.5	1.2	1.3	0.83	0.57	0.37	0.47
10	hydrochloorthiazide	1.5	0.59	1.2	0.29	<0.10	<0.10	<0.10
10	irbesartan	0.81	0.43	0.58	0.26	0.15	0.08	0.12
10	metoprolol	1.5	0.25	0.99	0.15	0.07	0.02	0.06
10	propranolol	0.08	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
10	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	0.38	0.11	0.35	0.07	0.03	<0.03	0.04
10	sotalol	1.6	0.51	1.2	0.05	<0.02	<0.02	<0.02
10	sulfamethoxazol	0.63	0.12	0.19	0.03	<0.02	<0.02	<0.02
10	trimethoprim	0.17	0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
10	venlafaxine	0.31	0.12	0.27	0.07	<0.02	<0.02	<0.02
12.5	1,2,3-benzotriazol	4.1	2.7	1.4	1.1	0.77	0.48	1.1
12.5	amisulpride	0.19	0.18	0.04	0.02	<0.01	<0.01	<0.01
12.5	azitromycine	0.8	0.1	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
12.5	candesartan	0.3	0.29	0.26	0.19	0.13	0.07	0.1
12.5	carbamazepine	0.34	0.34	0.14	0.06	<0.01	<0.01	<0.01
12.5	citalopram	0.13	0.15	0.03	0.02	0.01	<0.01	<0.01
12.5	claritromycine	<0.30	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
12.5	diclofenac	0.51	0.5	0.32	0.09	<0.03	<0.03	<0.03
12.5	furosemide	1	0.8	0.47	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20
12.5	gabapentine	3.7	1.6	1.7	1.4	1.1	0.81	0.82
12.5	hydrochloorthiazide	1.6	1.4	0.74	0.51	0.27	<0.10	0.12
12.5	irbesartan	1	0.74	0.65	0.47	0.32	0.21	0.28
12.5	metoprolol	1.5	1.1	0.32	0.23	0.15	0.06	0.26
12.5	propranolol	0.06	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
12.5	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	0.34	0.35	0.11	0.08	0.06	<0.03	0.1
12.5	sotalol	1.8	1.6	0.7	0.2	<0.02	<0.02	<0.02
12.5	sulfamethoxazol	0.59	0.21	0.13	0.06	<0.02	<0.02	0.02
12.5	trimethoprim	0.11	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
12.5	venlafaxine	0.3	0.3	0.14	0.1	0.05	<0.02	0.04

TABEL 17 VERWIJDERINGSRENDEMENT (KANDIDAAT)GIDSSOFFEN

PAK-dosering (mg/L)	(Kandidaat) Gidssstof	Referentie	PACAS	PAC-O ₃ A	PAC-O ₃ B	PAC-O ₃ C	O ₃
Verwijderingsrendement t.o.v. influent (%)							
5	1,2,3-benzotriazool	44.17	58.33	75.83	82.5	90	85.83
5	amisulpride	13.64	63.64	86.36	97.73	97.73	97.73
5	azitromycine	57.89	68.42	93.42	93.42	93.42	93.42
5	candesartan	9.38	18.75	53.12	68.75	81.25	78.12
5	carbamazepine	-22.22	16.67	85	98.89	99.72	98.89
5	citalopram	-42.86	35.71	71.43	85.71	96.43	96.43
5	claritromycine	NA	NA	NA	NA	NA	NA
5	diclofenac	25.33	45.33	93.33	98	98	98
5	furosemide	50.71	68.57	92.86	92.86	92.86	92.86
5	gabapentine	62.5	65	75	79.25	86	85.5
5	hydrochloorthiazide	16.67	45	75.56	88.89	97.22	97.22
5	irbesartan	32.73	32.73	60.91	71.82	81.82	99.09
5	metoprolol	33.33	63.89	79.44	87.22	95	91.11
5	propranolol	28.57	85.71	92.86	92.86	92.86	92.86
5	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	11.86	52.54	72.88	81.36	89.83	81.36
5	sotalol	20	45	95	99.5	99.5	99.5
5	sulfamethoxazol	51.72	65.52	93.1	98.28	98.28	96.55
5	trimethoprim	92.86	96.43	96.43	96.43	96.43	96.43
5	venlafaxine	5.71	37.14	68.57	82.86	97.14	94.29
7.5	1,2,3-benzotriazool	23.81	57.14	71.43	77.62	84.05	66.67
7.5	amisulpride	0	66.67	83.33	97.22	97.22	94.44
7.5	azitromycine	NA	NA	NA	NA	NA	NA
7.5	candesartan	3.03	9.09	45.45	57.58	69.7	60.61
7.5	carbamazepine	-25	28.13	68.75	89.06	98.75	87.81
7.5	citalopram	0	62.5	81.25	93.75	96.88	87.5
7.5	claritromycine	NA	NA	NA	NA	NA	NA
7.5	diclofenac	9.38	42.19	82.81	97.66	97.66	97.66
7.5	furosemide	33.33	69.17	91.67	91.67	91.67	91.67
7.5	gabapentine	56.25	64.58	72.92	79.17	82.5	75
7.5	hydrochloorthiazide	16.67	53.33	75	83.89	93.89	83.33
7.5	irbesartan	32.73	41.82	63.64	72.73	80	72.73
7.5	metoprolol	33.33	71.11	83.33	88.33	93.33	78.89
7.5	propranolol	37.5	93.75	93.75	93.75	93.75	93.75
7.5	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	11.76	54.9	72.55	80.39	88.24	64.71
7.5	sotalol	15	50	89.5	98	99.5	99
7.5	sulfamethoxazol	57.41	59.26	83.33	92.59	98.15	92.59
7.5	trimethoprim	90.91	95.45	95.45	95.45	95.45	95.45
7.5	venlafaxine	-9.38	37.5	65.62	78.12	90.62	78.12
10	1,2,3-benzotriazool	27.27	66.67	78.48	87.27	93.64	83.94
10	amisulpride	11.11	83.33	94.44	97.22	97.22	97.22
10	azitromycine	85.42	86.46	87.5	88.54	88.54	88.54
10	candesartan	15.38	26.92	57.69	76.92	88.46	84.62
10	carbamazepine	13.64	65.91	95.45	98.86	98.86	98.86
10	citalopram	15	80	90	97.5	97.5	97.5
10	claritromycine	NA	NA	NA	NA	NA	NA
10	diclofenac	17.02	46.81	96.81	96.81	96.81	96.81

PAK-dosering (mg/L)	(Kandidaat) Gidsstof	Referentie	PACAS	PAC-O ₃ A	PAC-O ₃ B	PAC-O ₃ C	O ₃
10	furosemide	NA	NA	NA	NA	NA	NA
10	gabapentine	62.86	65.71	76.29	83.71	89.43	86.57
10	hydrochloorthiazide	20	60.67	80.67	96.67	96.67	96.67
10	irbesartan	28.4	46.91	67.9	81.48	90.12	85.19
10	metoprolol	34	83.33	90	95.33	98.67	96
10	propranolol	37.5	93.75	93.75	93.75	93.75	93.75
10	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	7.89	71.05	81.58	92.11	96.05	89.47
10	sotalol	25	68.12	96.88	99.38	99.38	99.38
10	sulfamethoxazol	69.84	80.95	95.24	98.41	98.41	98.41
10	trimethoprim	82.35	94.12	97.06	97.06	97.06	97.06
10	venlafaxine	12.9	61.29	77.42	96.77	96.77	96.77
12.5	1,2,3-benzotriazol	34.15	65.85	73.17	81.22	88.29	73.17
12.5	amisulpride	5.26	78.95	89.47	97.37	97.37	97.37
12.5	azitromycine	87.5	93.75	93.75	93.75	93.75	93.75
12.5	candesartan	3.33	13.33	36.67	56.67	76.67	66.67
12.5	carbamazepine	0	58.82	82.35	98.53	98.53	98.53
12.5	citalopram	-15.38	76.92	84.62	92.31	96.15	96.15
12.5	claritromycine	NA	NA	NA	NA	NA	NA
12.5	diclofenac	1.96	37.25	82.35	97.06	97.06	97.06
12.5	furosemide	20	53	90	90	90	90
12.5	gabapentine	56.76	54.05	62.16	70.27	78.11	77.84
12.5	hydrochloorthiazide	12.5	53.75	68.12	83.12	96.88	92.5
12.5	irbesartan	26	35	53	68	79	72
12.5	metoprolol	26.67	78.67	84.67	90	96	82.67
12.5	propranolol	33.33	91.67	91.67	91.67	91.67	91.67
12.5	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	-2.94	67.65	76.47	82.35	95.59	70.59
12.5	sotalol	11.11	61.11	88.89	99.44	99.44	99.44
12.5	sulfamethoxazol	64.41	77.97	89.83	98.31	98.31	96.61
12.5	trimethoprim	81.82	95.45	95.45	95.45	95.45	95.45
12.5	venlafaxine	0	53.33	66.67	83.33	96.67	86.67

BIJLAGE C

REVISIE RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER

Door de EU is een voorstel gedaan voor een revisie van de Richtlijn Stedelijk Afvalwater¹⁰. 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 18. In de revisie wordt gesteld dat rwzi's groter dan 100.000 i.e. moeten zijn voorzien van een aanvullende verwijdering voor micropollutants en daarnaast kleinere zuiveringen met een capaciteit van 10.000-100.000 i.e. die lozen op gevoelig oppervlaktewater vanwege risico's voor de humane gezondheid of het (water)milieu. E.e.a. dient gerealiseerd te zijn in de periode 2030-2035 voor rwzi's groter dan 100.000 i.e. en uiterlijk in 2040 voor kleinere rwzi's.

TABEL 18 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%.

¹⁰ 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 19. 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 gidsstoffen¹¹. Dit is echter afhankelijk van in welke mate de concept EU-gidsstoffen daadwerkelijk voorkomen. De concept EU-gidsstoffen Amisulpride, Candesartan en Clarithromycine komen over het algemeen in onvoldoende mate voor in Nederlandse influenten en effluenten van rwzi's. Dit is ook de reden waarom deze niet zijn opgenomen als gidsstof in Nederland. De concept EU-gidsstof Citalopram komt wel voldoende voor, maar is afgefallen als Nederlandse gidsstof vanwege een mogelijk te hoog verwijderingsrendement door het actiefslib (>50%)¹². 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 19 is voor de referentie technologieën 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 aactiefslibrendement 25-35% bedraagt. Bij deze tegenvallende actiefslib rendementen is een nageschakeld rendement van 80% onvoldoende om het overall rendement van 80% te behalen: het overall rendement zal dan circa 75% bedragen. In het PAC-O₃ pilotonderzoek is ook voor de EU-gidsstoffen het actiefslibrendement bepaald. Derhalve is het niet nodig een aanname te doen voor het actiefslibstelsel. Het actiefslibrendement van rwzi Leiden-Noord conform de EU-richtlijn ligt tussen 7 en 41% met een gemiddeld van 23% op basis van 7 meetdagen.

11 Voor kenmerken van de standaard rwzi in het IPMV wordt verwezen naar Mulder, M., Berekening CO2 footprint en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit rwzi-afvalwater, versie 28 december 2022

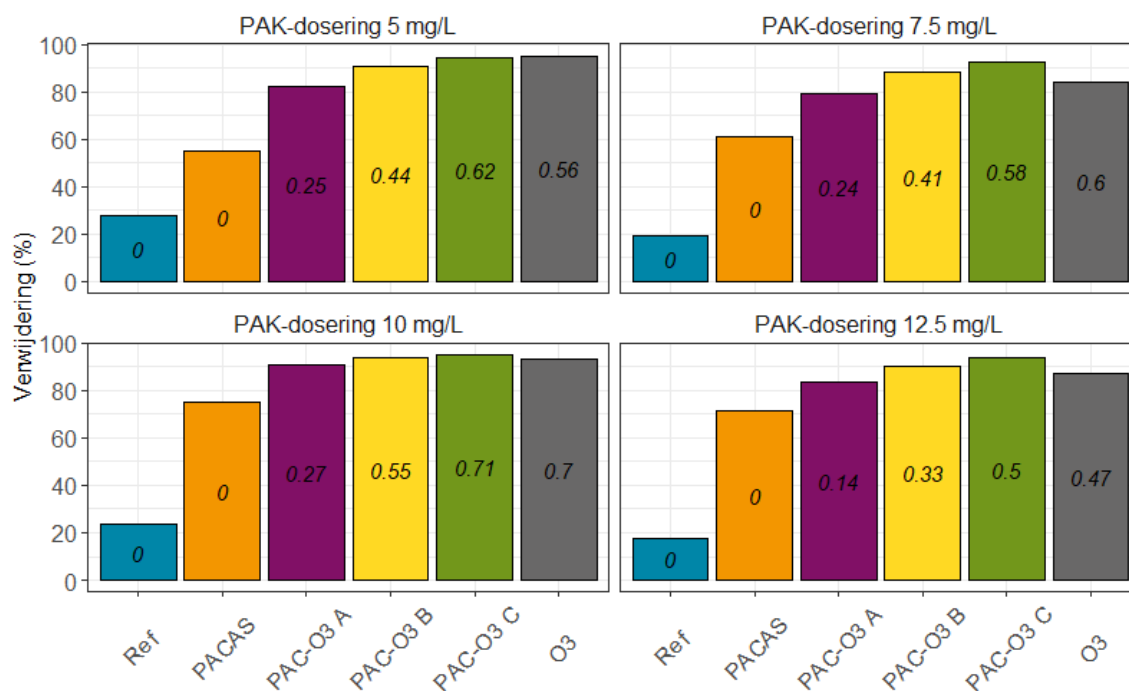
12 Bron: Mulder, M., Evaluatie Gidsstoffen - Ten behoeve van de bijdrageregeling 'Zuivering Medicijnresten' van het Ministerie van IenW en het Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit RWZI-afvalwater van STOWA en het Ministerie van IenW, Definitieve versie 2, 9 juli 2021

TABEL 19 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

	Ozonisatie	PACAS	Granulair Actief Kool (GAK)	PAC-O ₃
Instelling	0,7 g O ₃ /g DOC	15-20 mg PAK/l	EBCT (verblijftijd): 30 min; standtijd 6 maanden	
Nageschakeld verwijderings-rendement (%)	80-90%	nvt	80-90%	nvt
Overall verwijderings-rendement (%) volgens rekenregels concept EU Richtlijn Stedelijk Afvalwater dd 26/10/2022 (6 van de 12 onderverdeeld in categorieën)	80-90%	70-80%	80-90%	80%
Gekozen gidsstoffen EU (6 van de 12; verhouding van 2:1 voor aantal stoffen uit categorie 1 ten opzichte van aantal stoffen uit categorie 2)	Benzotriazol, Carbamazepine Diclofenac, Citalopram, - keuze tussen metoprolol of venlafaxine - keuze tussen irbesartan of som 4,5-methyl benzotriazol	Benzotriazol, som 4,5-methyl benzotriazol, Hydrochloor-thiazide, Metoprolol; Venlafaxine Citalopram	Benzotriazol, som 4,5-methyl benzotriazol, Hydrochloor-thiazide, Metoprolol; Venlafaxine Citalopram	Zie Tabel 20
Overall verwijderings-rendement (%) volgens rekenregels bijdrageregeling Ministerie IenW en IPMV (7 van de 11)	80-85%	70-80%	80-85%	75-80%
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	Zie Tabel 5

In Tabel 19 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 in vergelijking met PAC-O₃. 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.

FIGUUR 22 GEMIDDELDE VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VOOR 6 BESTE VAN 12 STOFFEN VOLGENS DE BEREKENINGSWIJZE VAN DE CONCEPT EU-RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER OVER DE 4 OZONTESTDAGEN BIJ VERSCHILLENDE PAK-DOSERINGEN OP EEN DWA DAG (DUS EXCLUSIEF AFTOPPING VAN DE PAK-DOSERING BIJ RWA EN BYPASS NABEHANDELING BIJ RWA). CURSIEVE CIJFERS GEVEN DE REËLE SPECIFIEKE OZONDOSIS WEER, GECORRIGEERD VOOR DE DOC- EN NITRIETCONCENTRATIE EN OZONOVERDRACHT



TABEL 20 AANTAL KEREN DIE STOFFEN IN DE TOP 6 VOORKOMEN. DONKERBLAUWE GEMARKEERDE CELLEN GEVEN AAN VAKERE VOORKOMENDE STOFFEN

Gidsstof	Referentie	PACAS	PAC-O ₃	O ₃
Berekend verwijderingsrendement	7x	8x	12x	4x
Amisulpride	3	8	12	4
Carbamazepine	0	2	11	4
Citalopram	2	7	7	2
Claritromycine	2	4	0	0
Diclofenac	6	1	10	3
Hydrochloorthiazide	5	2	2	2
Metoprolol	6	8	8	1
1,2,3-benzotriazool	6	8	10	3
Irbesartan	6	0	0	4
Som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	0	8	12	1

BIJLAGE D

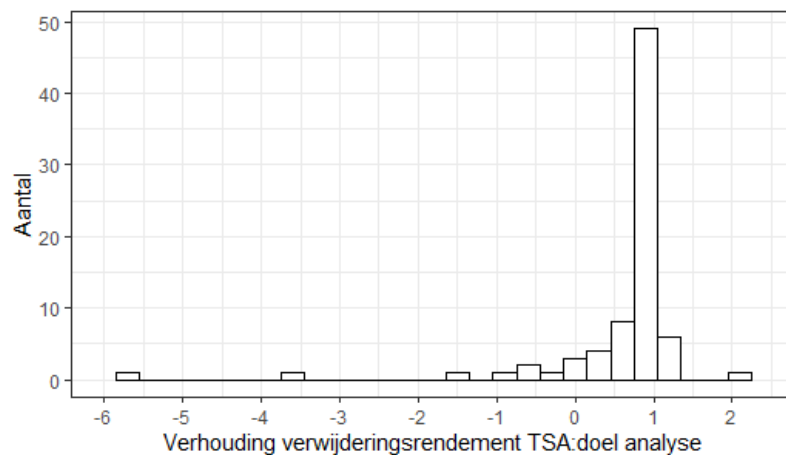
AANVULLENDE INFORMATIE TARGET-SCREENING ANALYSE

VERGELIJKING MET DOEL ANALYSE

Om vast te stellen of het verwijderingsrendement volgens de target-screening analyses (TSA) overeenkomen met de doel analyses (i.e. (kandidaat)gidsstoffen), is de verhouding tussen het verwijderingsrendement o.b.v. TSA en o.b.v. doel analyses berekend, zie Figuur 23. Hoe dichter de verhouding in de buurt van 1 is, hoe gelijkjer beide methoden zijn. Waarden tussen de 0 en 1 betekenen dat het verwijderingsrendement volgens de TSA kleiner is dan volgens de doel analyse. Waardes >1 betekenen dat het verwijderingsrendement volgens de TSA groter zijn dan volgens de doel analyse. Negatieve waarden betekenen dat bij de ene methode een verwijderingsrendement is bepaald, maar bij de andere methode een negatief verwijderingsrendement (toename van de concentratie over de behandeling) is waargenomen.

FIGUUR 23

VERGHOUING IN VERWIJDERINGSRENDEMENTEN BEREKEND O.B.V. TARGET-SCREENING ANALYSE (TSA) EN DOEL ANALYSE. WAARDES ROND 1 BETEKENEN DAT BEIDE TECHNIIEKEN OVEREENKOMEN



In Tabel 21 zijn de verwijderingsrendementen van de (kandidaat)gidsstoffen bepaald met zowel de doel analyse als de target-screening analyse weergegeven. Gesteld kan worden dat voor de meest stoffen het berekende verwijderingsrendement van beide analysemethoden overeenkomt.

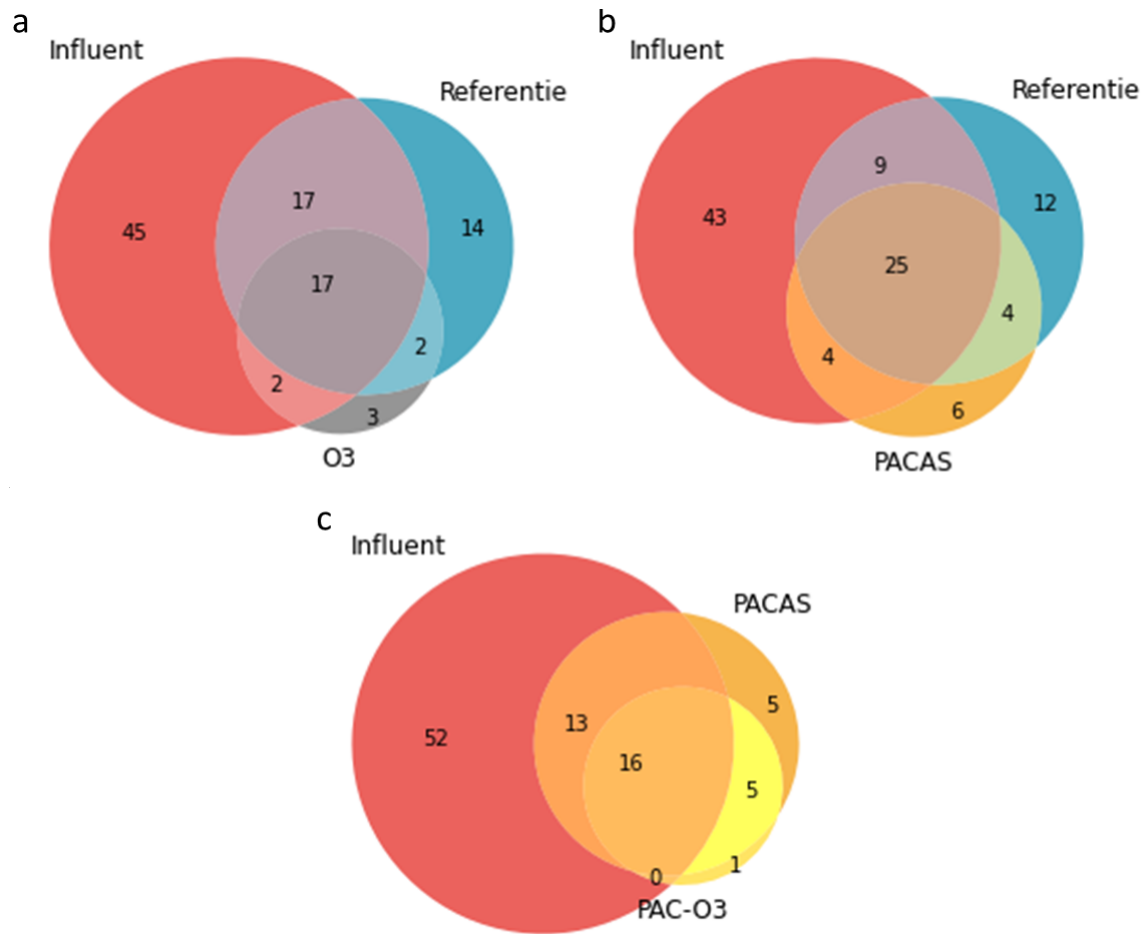
TABEL 21 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN OP BASIS VAN DOEL ANALYSE OF TARGET-SCREENING ANALYSE

Stof	PAK-dosering	Behandeling	Verwijderingsrendement doel analyse (%)	Verwijderingsrendement target-screening analyse (%)
Amisulpride	10	PACAS	83.3	74.8
Amisulpride	10	Referentie	11.1	-5.9
Amisulpride	12.5	PAC-03 A	89.5	86.9
Amisulpride	12.5	Referentie	5.3	-30.1
Amisulpride	7.5	PACAS	66.7	72.1
Amisulpride	7.5	PAC-03 B	97.2	86.8
Benzotriazole	10	03	83.9	81.0
Benzotriazole	10	PACAS	66.7	62.7
Benzotriazole	10	PAC-03 A	78.5	74.9
Benzotriazole	10	PAC-03 C	93.6	39.1
Benzotriazole	10	Referentie	27.3	20.4
Benzotriazole	12.5	03	73.2	63.4
Benzotriazole	12.5	PACAS	65.9	55.8
Benzotriazole	12.5	PAC-03 A	73.2	66.2
Benzotriazole	12.5	Referentie	34.2	14.5
Benzotriazole	7.5	03	66.7	61.4
Benzotriazole	7.5	PACAS	57.1	51.8
Benzotriazole	7.5	PAC-03 B	77.6	72.8
Benzotriazole	7.5	Referentie	23.8	16.4
Carbamazepine	10	PACAS	65.9	65.0
Carbamazepine	10	PAC-03 A	95.5	93.7
Carbamazepine	10	Referentie	13.6	17.3
Carbamazepine	12.5	PACAS	58.8	47.5
Carbamazepine	12.5	PAC-03 A	82.4	77.0
Carbamazepine	7.5	03	87.8	93.5
Carbamazepine	7.5	PACAS	28.1	60.7
Carbamazepine	7.5	PAC-03 B	89.1	93.8
Carbamazepine	7.5	Referentie	-25.0	35.8
Citalopram	10	Referentie	15.0	-56.0
Gabapentin	10	PAC-03 A	76.3	79.1
Gabapentin	10	PAC-03 C	89.4	-11.7
Gabapentin	10	Referentie	62.9	64.0
Gabapentin	12.5	PACAS	54.1	51.1
Gabapentin	7.5	03	75.0	76.3
Gabapentin	7.5	PACAS	64.6	61.7
Gabapentin	7.5	PAC-03 B	79.2	75.9
Gabapentin	7.5	Referentie	56.3	53.4
Hydrochlorothiazide	7.5	PACAS	53.3	42.3
Hydrochlorothiazide	7.5	Referentie	16.7	-12.4
Irbesartan	10	03	85.2	75.9
Irbesartan	10	PACAS	46.9	28.1
Irbesartan	10	PAC-03 A	67.9	52.8
Irbesartan	10	PAC-03 C	90.1	-6.6
Irbesartan	10	Referentie	28.4	11.7
Irbesartan	12.5	03	72.0	50.9
Irbesartan	12.5	PACAS	35.0	-1.8
Irbesartan	12.5	PAC-03 A	53.0	30.5
Irbesartan	12.5	Referentie	26.0	-22.0
Irbesartan	7.5	03	72.7	63.0

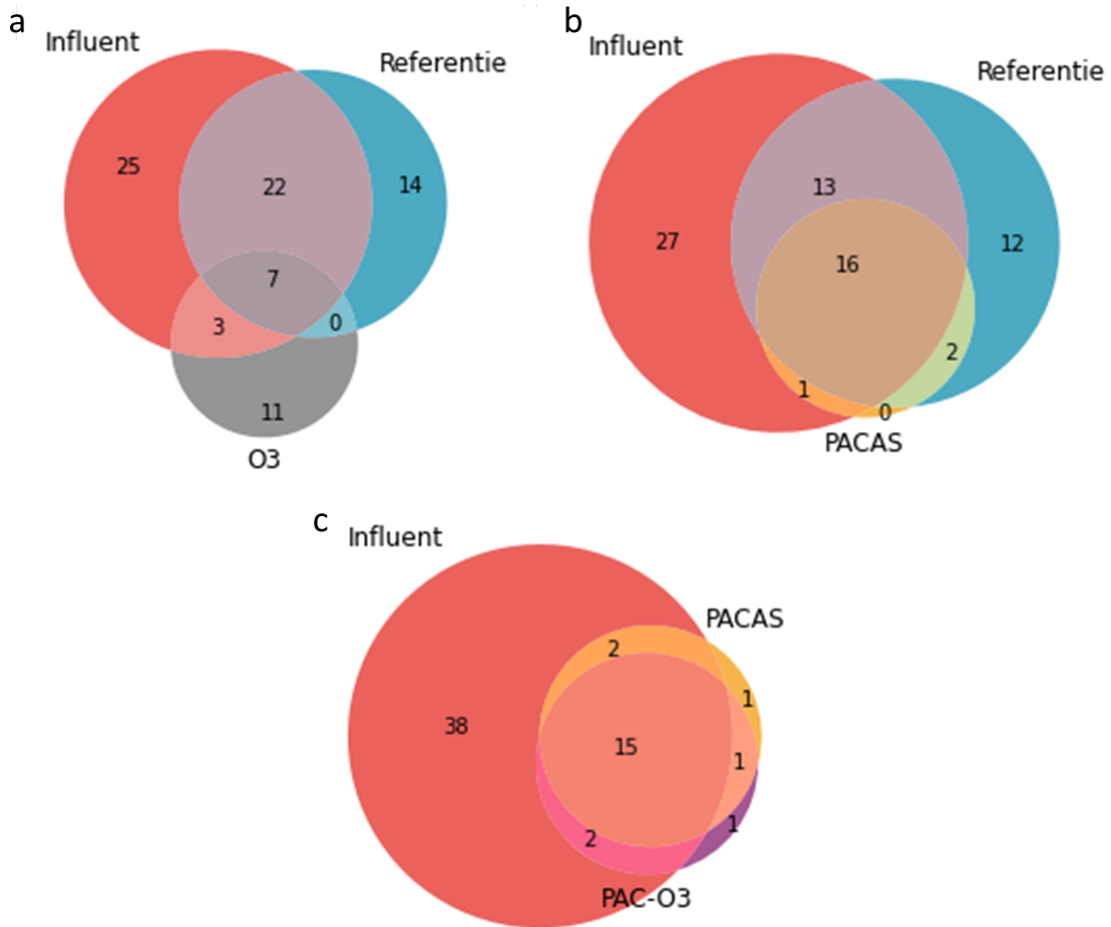
Stof	PAK-dosering	Behandeling	Verwijderingsrendement doel analyse (%)	Verwijderingsrendement target-screening analyse (%)
Irbesartan	7.5	PACAS	41.8	20.4
Irbesartan	7.5	PAC-03 B	72.7	58.0
Irbesartan	7.5	Referentie	32.7	17.8
Metoprolol	10	PACAS	83.3	82.6
Metoprolol	10	PAC-03 A	90.0	89.9
Metoprolol	10	PAC-03 C	98.7	91.0
Metoprolol	10	Referentie	34.0	35.2
Metoprolol	12.5	03	82.7	77.1
Metoprolol	12.5	PACAS	78.7	74.2
Metoprolol	12.5	PAC-03 A	84.7	79.8
Metoprolol	12.5	Referentie	26.7	5.1
Metoprolol	7.5	03	78.9	79.1
Metoprolol	7.5	PACAS	71.1	71.4
Metoprolol	7.5	PAC-03 B	88.3	87.5
Metoprolol	7.5	Referentie	33.3	36.6
Sotalol	10	PACAS	68.1	67.9
Sotalol	10	Referentie	25.0	21.3
Sotalol	12.5	PACAS	61.1	54.0
Sotalol	12.5	PAC-03 A	88.9	85.8
Sotalol	12.5	Referentie	11.1	-4.9
Sotalol	7.5	PACAS	50.0	43.9
Sotalol	7.5	Referentie	15.0	12.5
Sulfamethoxazole	10	03	98.4	97.9
Sulfamethoxazole	10	PACAS	81.0	85.0
Sulfamethoxazole	10	Referentie	69.8	73.4
Venlafaxine	10	PACAS	61.3	57.7
Venlafaxine	10	Referentie	12.9	9.2
Venlafaxine	7.5	PACAS	37.5	36.3
Venlafaxine	7.5	Referentie	-9.4	-7.4

OVERLAPPENDE STOFFEN OP TESTDAGEN 2 EN 4

FIGUUR 24 AANTAL STOFFEN AANGETROFFEN PER MONSTER EN OVERLAP TUSSEN MONSTERS O.B.V. TARGET-SCREENING ANALYSE OP TESTDAG 2, . A) O₃ SPECIFIEKE OZONDOSIS 0,60 G O₃/G DOC, B) PACAS PAK-DOSERING 7,5 MG/L C) PAC-O₃ PAK-DOSERING 7,5 MG/L EN SPECIFIEKE OZONDOSIS 0,41 G O₃/G DOC



FIGUUR 25 AANTAL STOFFEN AANGETROFFEN PER MONSTER EN OVERLAP TUSSEN MONSTERS O.B.V. TARGET-SCREENING ANALYSE IN TESTDAG 3; . A) O₃ SPECIFIEKE OZONDOSIS 0,50 G O₃/G DOC, B) PACAS PAK-DOSERING 12,5 MG/L C) PAC-O₃ PAK-DOSERING 12,5 MG/L PAK-DOSERING EN SPECIFIEKE OZONDOSIS 0,15 G O₃/G DOC



BIJLAGE E

BIOLOGISCHE EFFECTEN

De uitkomsten van de Daphniatox en Microtox testen zijn de $EC_{f,50}$, de No Effect Concentration factor ($NOEC_f$) en/of de $EC_{f,20}$. De $NOEC_f$ is de concentratiefactor die het monster kan ondergaan, waarbij er nog net geen effect optreedt. De $EC_{f,20}$ en/of $EC_{f,50}$ geeft de concentratiefactor weer waarbij respectievelijk 20% en 50% effect optreedt. Een $EC_{f,50}$ waarde van bijvoorbeeld 10 betekent dat het effect is vastgesteld op 10x geconcentreerd afvalwater. De TU-waarde is berekend als $1/EC_{f,50}$ -waarde, en de $EC_{f,50}$ -waarde is de concentratiefactor waarbij 50% effect optreedt. De TU-waarde drukt de toxiciteit uit per liter van het oorspronkelijke watermonster

TABEL 22 RESULTATEN VAN DE DAPHNIATOX EN MICROTOX TESTEN. WAARDEN TUSSEN HAAKJES GEVEN HET 95% BETROUWBAARHEIDSINTERVAL

Monster	Watervlo / Immobilititeit			Microtox / Licht afname		
	NOECf	ECf,50 ¹	TU ¹	NOECf ¹	ECf,50 ¹	TU ¹
Ref	19.8	41.2	0.0240	<8.9	9.2	0.109
	-	(33.8-50.3)	(0.020-0.030)	(2.3-3.1)	(8.5-10.0)	(0.100-0.118)
PACAS ²	77.7	135.1	0.0070	<8.7	9.2	0.109
	-	(111-157)	(0.006-0.009)	(2.3-2.4)	(9.0-9.4)	(0.107-0.111)
PAC-03 ^{2,3}	81.2	155.1	0.0060	<9.1	26.2	0.038
	-	-		(5.9-8.7)	(23.7-28.9)	(0.035-0.042)
03	80.1	152.9 -	0.0070	<9.0	28.5	0.035
	-			(6.0-7.7)	(26.8-30.3)	(0.033-0.037)
Blanco	157	>157	0.0030	>71	>71	0.007

¹: waardes tussen haakjes geven betrouwbaarheid interval aan.

²: PAK-dosering 7,5 mg/L

³: Specifieke ozondosis 0,41 gO₃/g DOC

³: Specifieke ozondosis 0,63 gO₃/g DOC

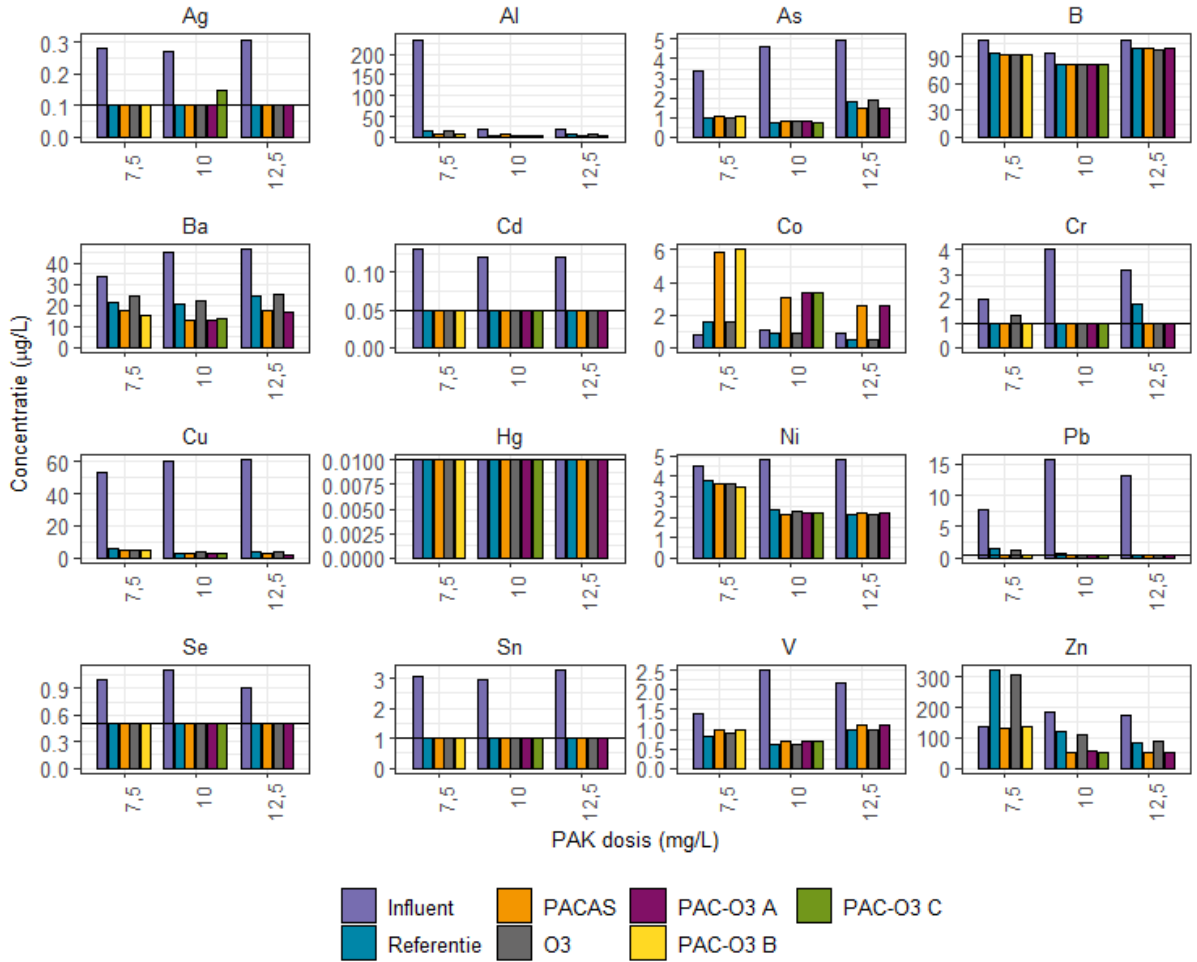
TABEL 23 RESULTATEN VAN CALUX (*IN VITRO*) TESTEN

Monster	Calux technic	Parameter	Waarde	Eenheid
Ref	PAH	Polycyclic aromatic hydrocarbons	150	ng Benzo[a]pyrene eq./l
	ERa	Estrogens	1.2	ng 17b Estradiol eq./l
	PXR	Xenobiotic sensing	33	µg Nicardipine eq./l
	GR	Glucocorticoids	39	ng Dexamethasone eq./l
	P53	P53 transcriptional activators	LOQ (<0.0064)	µg Actinomycin D eq./l
PACAS	PAH	Polycyclic aromatic hydrocarbons	48	ng Benzo[a]pyrene eq./l
	ERa	Estrogens	0.6	ng 17b Estradiol eq./l
	PXR	Xenobiotic sensing	25	µg Nicardipine eq./l
	GR	Glucocorticoids	27	ng Dexamethasone eq./l
	P53	P53 transcriptional activators	LOQ (<0.0065)	µg Actinomycin D eq./l
PAC-O ₃	PAH	Polycyclic aromatic hydrocarbons	25	ng Benzo[a]pyrene eq./l
	ERa	Estrogens	0.051	ng 17b Estradiol eq./l
	PXR	Xenobiotic sensing	12	µg Nicardipine eq./l
	GR	Glucocorticoids	12	ng Dexamethasone eq./l
	P53	P53 transcriptional activators	LOQ (<0.0063)	µg Actinomycin D eq./l
O ₃	PAH	Polycyclic aromatic hydrocarbons	39	ng Benzo[a]pyrene eq./l
	ERa	Estrogens	0.061	ng 17b Estradiol eq./l
	PXR	Xenobiotic sensing	12	µg Nicardipine eq./l
	GR	Glucocorticoids	16	ng Dexamethasone eq./l
	P53	P53 transcriptional activators	LOQ (<0.0064)	µg Actinomycin D eq./l
blanco	PAH	Polycyclic aromatic hydrocarbons	23	ng Benzo[a]pyrene eq./l
	ERa	Estrogens	LOQ (<0.035)	ng 17b Estradiol eq./l
	PXR	Xenobiotic sensing	LOQ (<2.2)	µg Nicardipine eq./l
	GR	Glucocorticoids	LOQ (<3.1)	ng Dexamethasone eq./l
	P53	P53 transcriptional activators	LOQ (<0.0065)	ug Actinomycin D eq./l

BIJLAGE F

METALEN

FIGUUR 26 METALEN CONCENTRATIES IN RWZI INFLUENT EN IN AFLOOP RWZI-EFFLUENT (REFERENTIE), PACAS EN O₃, IN HET GEVAL DE CONCENTRATIE ONDER DE RAPPORTAGEGRENZ LAG IS AANVULLEND DE RAPPORTAGEGRENZ WEERGEGEVEN ALS EEN HORIZONTALE LIJN



TABEL 24 METALEN CONCENTRATIES IN RWZI INFLUENT EN AFLOOP REFERENTIE, PACAS, PAC-O₃ A EN O₃

PAK-dosering (mg/L)	Metal	Eenheid	Influent	Referentie	PACAS	PAC-O ₃ A	PAC-O ₃ B	PAC-O ₃ C	O ₃
7.5	Al	µg/L	236	14.3	8.8		8.3		16
7.5	As	µg/L	3.4	1	1.1		1.1		1
7.5	Ba	µg/L	33.4	21.6	17.4		15.6		24.2
7.5	B	mg/l	0.11	0.094	0.093		0.092		0.092
7.5	Cd	µg/L	0.13	<0.05	<0.05		<0.05		<0.05
7.5	Cr	µg/L	2	<1.0	<1.0		<1.0		1.3
7.5	Co	µg/L	0.8	1.6	5.8		6		1.6
7.5	Cu	µg/L	53.3	5.3	4.6		5		5.1
7.5	Hg	µg/L	<0.010	<0.010	<0.010		<0.010		<0.010
7.5	Pb	µg/L	7.7	1.4	<0.5		<0.5		1.2
7.5	Ni	µg/L	4.5	3.8	3.6		3.5		3.6
7.5	Se	µg/L	1	<0.5	<0.5		<0.5		<0.5
7.5	Sn	µg/L	3.06	<1.00	<1.00		<1.00		<1.00
7.5	V	µg/L	1.4	0.8	1		1		0.9
7.5	Ag	µg/L	0.28	<0.10	<0.10		<0.10		<0.10
7.5	Zn	µg/L	139	321	133		135		309
10	Al	µg/L	20	5.2	6	3.9		4.2	4.5
10	As	µg/L	4.64	0.71	0.79	0.81		0.77	0.8
10	Ba	µg/L	45.4	20.5	12.9	13.2		13.6	22
10	B	mg/l	0.095	0.082	0.082	0.082		0.081	0.081
10	Cd	µg/L	0.12	<0.05	<0.05	<0.05		<0.05	<0.05
10	Cr	µg/L	4	<1.0	<1.0	<1.0		<1.0	<1.0
10	Co	µg/L	1.1	0.9	3.1	3.4		3.4	0.9
10	Cu	µg/L	60.5	2.8	2.5	2.9		2.5	3.3
10	Hg	µg/L	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010		<0.010	<0.010
10	Pb	µg/L	15.6	0.6	<0.5	<0.5		<0.5	0.5
10	Ni	µg/L	4.8	2.4	2.1	2.2		2.2	2.3
10	Se	µg/L	1.1	<0.5	<0.5	<0.5		<0.5	<0.5
10	Sn	µg/L	2.94	<1.00	<1.00	<1.00		<1.00	<1.00
10	V	µg/L	2.5	0.6	0.7	0.7		0.7	0.6
10	Ag	µg/L	<0.10	0.27	<0.10	<0.10		0.15	<0.10
10	Zn	µg/L	183	118	51.9	54.2		52.7	112
12.5	Al	µg/L	17.8	6.6	4.5	4			6.3
12.5	As	µg/L	4.99	1.83	1.44	1.46			1.86
12.5	Ba	µg/L	46.5	24.7	17.2	16.4			25.5
12.5	B	mg/l	0.11	0.1	0.1	0.1			0.099
12.5	Cd	µg/L	0.12	<0.05	<0.05	<0.05			<0.05
12.5	Cr	µg/L	3.2	1.8	<1.0	<1.0			<1.0
12.5	Co	µg/L	0.9	0.5	2.6	2.6			0.5
12.5	Cu	µg/L	60.8	4.1	2.4	2.2			4
12.5	Hg	µg/L	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010			<0.010
12.5	Pb	µg/L	13.2	<0.5	<0.5	<0.5			<0.5
12.5	Ni	µg/L	4.8	2.1	2.2	2.2			2.1
12.5	Se	µg/L	0.9	<0.5	<0.5	<0.5			<0.5
12.5	Sn	µg/L	3.26	<1.00	<1.00	<1.00			<1.00
12.5	V	µg/L	2.2	1	1.1	1.1			1
12.5	Ag	µg/L	0.31	<0.10	<0.10	<0.10			<0.10
12.5	Zn	µg/L	173	85.8	52.7	53.9			87.6

BIJLAGE G

PFAS

TABEL 25 AANGETROFFEN PFAS CONCENTRATIES IN TESTDAG 3 (10 MG PAK/L) EN 4 (12,5 MG PAK/L). DONKERE CELLS GEVEN AAN ANALYSERESULTAAT ONDER RAPPORTAGEGRENSEN, ALLEEN INDICATIEF TE GEBRUIKEN

Matrix	Referentie	PAK 10 mg/L			PAK 12,5 mg/L			
		PACAS	PAC-O ₃ A	PAC-O ₃ B	Referentie	PACAS	PAC-O ₃ A	PAC-O ₃ B
PFBA	7.9	7.6	7.8	7.9	8.3	10	9.8	9.7
PFPeA	8.5	7.8	7.5	7.6	9.6	10	9.3	9.3
PFHxA	11	10	10	9.9	12	13	13	12
PFHpA	5.7	5.5	5.4	5.1	7.1	6.6	6.9	6.8
PFOA	10	9.3	8.4	7.6	11	10	11	9.8
PFNA	1.2	1.3	0.96	0.81	0.83	0.74	0.84	0.68
PFDA	0.95	1.8	0.63	0.54	0.45	0.46	0.43	
PFBS	6.4	6.6	6.8	7.1	8.7	8.5	9.3	9.4
PFHxS	1.1	0.99	0.94	0.85	1.3	1.2	1.3	1.2
PFOS	2.8	3.9	2.0	1.8	2.6	2.4	2.5	2.0
HFPODA				0.42	0.48	0.45	0.49	0.49
6:2 FTS	1.0	1.5	1.3	1.3	1.2	1.5	1.8	1.7
FBSA	0.86	0.90	0.69	0.63	1.4	1.0	1.0	1.0
FOSA		0.46						

BIJLAGE H

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
- Polymeer: € 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 spoelwater: € 0,04/m³
- Verwerking spoelwater op rwzi: € 0,01/m³