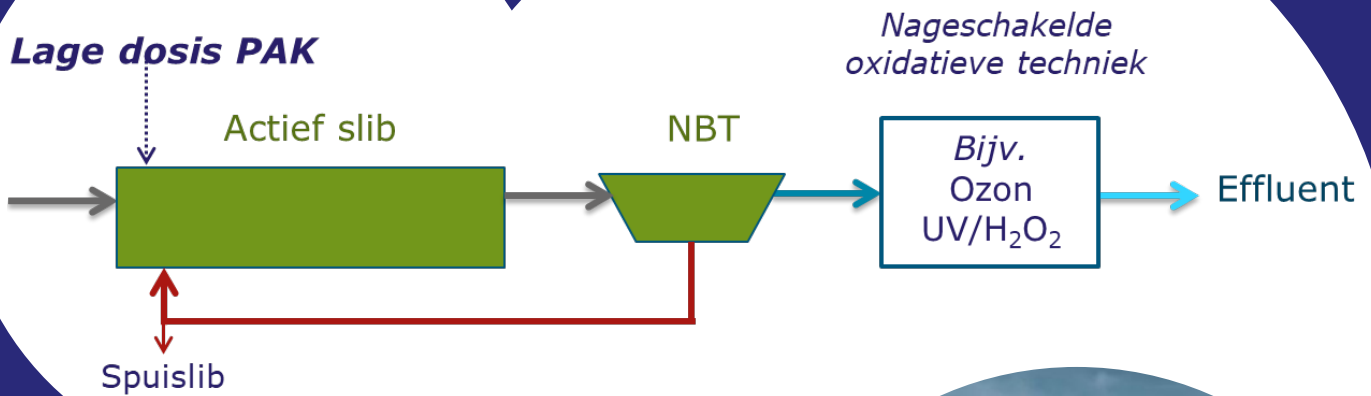




HAALBAARHEIDSTUDIE PAC-0₃ VOOR VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN OP RWZI'S



RAPPORT

2020
23



HAALBAARHEIDSSSTUDIE PAC-O₃ VOOR VERWIJDERING
VAN MICROVERONTREINIGINGEN OP RWZI'S

RAPPORT

2020

23

ISBN 978.90.5773.888.3



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Arnoud de Wilt – Royal HaskoningDHV
Els Schuman – LeAF
Paul Roeleveld – Royal HaskoningDHV

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Manon Bechger – Waternet
Patricia Clevering-Loeffen – SWECO
Maaike Hoekstra – Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Erik Knol – Hoogheemraadschap van Delfland
Robert Kras – Waterschap Aa en Maas
Joop Kruihof
Bernadette Lohmann – Waterschap Zuiderzeeland
Mirabella Mulder – Mirabella Mulder Waste Water Management
Ruud van der Neut – PWN
Gerard Rijs – Rijkswaterstaat
Maarten Schaafsma – Waterschap Rijn en IJssel
Ruud Schemen – Waterschap de Dommel
Cora Uijterlinde – STOWA
Marlies Verhoeven – Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden
Amanda Vierwind - SWECO

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA STOWA 2020-23
ISBN 978.90.5773.888.3

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, VEEL BELOVEND CONCEPT

PAC-O₃ is een veelbelovend concept voor de verregaande verwijdering van een breed palet microverontreinigingen. De combinatie adsorptie én oxidatie, twee verschillende reactiemechanismen, vormt een 'dubbel-barrière' principe waarmee een grotere diversiteit aan verschillende microverontreinigingen verwijderd kan worden. Daarnaast kunnen hogere verwijderingsrendementen worden behaald dan met de referentietechnieken PACAS en ozonisatie.

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

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. Door beide reactiemechanismen toe te passen wordt het palet aan te verwijderende microverontreinigingen vergroot. Dit sluit goed aan bij het doel van de 'Ketenaanpak Medicijnresten uit Water' van de rijksoverheid; *"het verminderen van de hoeveelheid medicijnresten in water"*.

Voor het opstellen van de haalbaarheidsstudie zijn lab-testen uitgevoerd en is praktijkervaring over PACAS en ozonisatie verzameld. Met de opgedane kennis is een technologisch ontwerp van het PAC-O₃ concept gemaakt, deze is vervolgens uitgewerkt in een businesscase. In vergelijking met de referentietechnologieën scoort het PAC-O₃ concept beter op de breedte van het palet aan te verwijderen microverontreinigingen en het hogere rendement dat behaald kan worden. Daarnaast is het risico op bromaatvorming minder in vergelijking met ozonisatie en is de slibproductie lager dan bij PACAS. De CO₂-footprint van het PAC-O₃ concept is gelijk aan 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 en ozonisatie voor een verwijderingsrendement van 70% op gidsstoffen. Wanneer hogere verwijderingsrendementen van 85-90% gewenst zijn stijgen de kosten tot 0,13 per behandelde kuub water.

Een volgende stap in de ontwikkeling van het PAC-O₃ concept is het uitvoeren van pilottesten. Dit onderzoek gaat in 2021 plaatsvinden op awzi Leiden-Noord. Het vervolgonderzoek op pilotschaal richt zich onder andere op het onderscheid van het PAC-O₃ concept ten opzichte van PACAS en ozonisatie. Specifiek zal de verwijdering van een brede selectie aan microverontreinigingen onderzocht worden. Daarnaast worden aspecten als bromaatvorming en slibproductie bestudeerd.

SAMENVATTING

Het PAC-O₃ concept is een zuiveringsconcept voor de verwijdering van microverontreinigingen waarbij poederactiefkool (PAK) in het actiefslibproces gedoseerd wordt én het effluent met ozon wordt behandeld. De insteek van het project was de verduurzaming van ozonisatie. Bij ozonisatie wordt de ozondosis doorgaans uitgelegd op de DOC-concentratie. De hypothese was dat door afvang van DOC middels een lage PAK-dosering een lagere ozondosis volstaat. Door het uitvoeren van lab-testen is meer inzicht gekregen in dit principe.

Met een negental verschillende type PAK zijn lab-testen uitgevoerd. In de testen is de verwijdering van DOC en microverontreinigingen onderzocht. De hoogste DOC-verwijdering was 10%. De overige PAKs verwijderden DOC tussen de 5 en 7%. Gebaseerd op de verwijderingsrendementen en de kosten zijn drie PAKs geselecteerd om ook ozontesten mee uit te voeren. Op basis van de lab-testen is geconcludeerd dat de ozondosis inderdaad verlaagd kan worden door een lage dosering van PAK aan het actiefslibproces. De verlaging van de ozondosis komt echter maar gedeeltelijk door de afvang van DOC. Belangrijker is dat ook met lage PAK-dosering een gedeelte van de microverontreinigingen wordt verwijderd. Hierdoor volstaat vervolgens een lage ozondosis om over de gehele rwzi een voldoende verwijderingsrendement te behalen.

Meerdere microverontreinigingen zijn in de lab-testen met lage PAK- en ozondosering van respectievelijk 5-10 mg PAK/l en 0,5 g O₃/g DOC volledig verwijderd. Deze hoge verwijderingspercentages tonen de potentie aan van het PAC-O₃ concept. Gesteld kan worden dat een zuiveringsrendement over de gehele zuivering van boven de 70% mogelijk is met het PAC-O₃ concept. Verwacht is dat deze 70% bereikt kan worden bij een PAK-dosering van 8 mg/l PAK en een ozondosering van 0,4 mg O₃/mg DOC. Een bijkomstig voordeel van de lage ozondosis is dat het risico op bromaatvorming afneemt ten opzichte van conventionele ozonisatie. Een ander voordeel is dat door de lage PAK-dosering de hoeveelheid af te voeren slib minder is dan bij PACAS.

In de haalbaarheidsstudie is bevonden dat de gevoeligheid voor adsorptie en oxidatie sterk verschilt per microverontreiniging. Dat wil zeggen, sommige microverontreinigingen zijn eenvoudig te oxideren en moeilijk te adsorberen, anderen zijn eenvoudig te adsorberen en moeilijk te oxideren. Door de reactiemechanismen adsorptie en oxidatie beide toe te passen wordt het palet aan verwijderde microverontreinigingen vergroot. Naar verwachting heeft dit een positief effect op de afname van de ecotoxiciteit van het te lozen effluent.

Voor de rwzi-schaalgrootte van een 100.000 i.e. zijn de CO₂-footprint en kosten uitgewerkt. De CO₂-footprint bestaat voornamelijk uit het verbruik van PAK, elektriciteit en zuurstof en is 125 g CO₂ per kuub behandeld water wanneer een 70% verwijderingsrendement van 7 van de 11 gidsstoffen wordt nagestreefd. De CO₂-footprint is daarmee vrijwel gelijk aan die van de referentietechnologieën PACAS (122 g CO₂/m³) en ozonisatie + zandfilter (128 g CO₂/m³) voor hetzelfde doeleind. Bij hogere verwijderingsrendementen van 85-90% neemt de CO₂-footprint van PAC-O₃ toe tot 198 g CO₂/m³.

De kosten per behandelde kuub afvalwater (OPEX en CAPEX) bedragen afgerond €0,10 voor het PAC-O₃ concept. Per kuub afvalwater dat door de rwzi stroomt bedragen de kosten €0,08. Wanneer hogere verwijderingsrendementen van 85-90% gewenst zijn, lopen de kosten per behandelde kuub water op tot €0,13.

In het vervolgtraject wordt het PAC-O₃ concept op pilotschaal gevalideerd, waarna op korte termijn doorgedaan kan worden naar een full-scale implementatie. Dit laatste kan ook door uitbreiding van een bestaande PACAS-installatie met een nageschakelde ozonisatiestap, of door het plaatsen van een PACAS-installatie op een rwzi waar reeds een ozonisatiestap is gerealiseerd.

DE STOWA IN HET KORT

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

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

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

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

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

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

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

HAALBAARHEIDSTUDIE PAC-O₃ VOOR VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN OP RWZI'S

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
1.1	Doelstelling	1
2	HET PAC-O₃ CONCEPT	2
2.1	Ontwikkeling van het PAC-O ₃ concept	2
2.2	De technologieën binnen het PAC-O ₃ concept	2
2.3	Achtergrond van het PAC-O ₃ concept	3
2.3.1	Twee reactiemechanismen	3
2.3.2	Verwijdering microverontreinigingen	5
2.3.3	DOC	5
2.3.4	Bromaat	6
2.3.5	Slibproductie	6
2.4	Technology Readiness Level	6
2.5	Literatuurstudie	6
3	LAB-TESTEN	7
3.1	Materialen en Methoden	7
3.2	Resultaten verwijdering DOC en TOC	8
3.3	Resultaten verwijdering microverontreinigingen	9
3.4	Discussie	11

4	DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN EN JAARLIJKSE VERBRUIKEN	13
5	INPASBAARHEID IN NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK	15
5.1	Effect op bedrijfsvoering	15
5.2	Inpassing op locatie	15
5.3	Voor welke type rwzi's geschikt	16
6	JAARLIJKSE KOSTEN	17
7	BEOORDELING OP TOETSINGSCRITERIA	19
7.1	Verwijderingsrendement microverontreinigingen	19
7.2	CO ₂ -footprint	19
7.3	Ecotoxiciteit	20
7.4	Jaarlijkse kosten	20
7.5	Vergelijking ten opzichte van referentietechnieken	20
8	VERVOLG PAC-O₃ PROJECT	22
8.1	Onderzoeksvragen	22
8.2	Uitvoeringsvorm	22
9	LITERATUURLIJST	23
BIJLAGE 1	UITGANGSPUNTEN TOETSINGSCRITERIA	24
BIJLAGE 2	UITGANGSPUNTEN KOSTENBEREKENINGEN	25

1

INLEIDING

Voorliggende haalbaarheidsstudie is geschreven in het kader van de 1^e tranche van het Innovatieprogramma *Microverontreinigingen uit afvalwater* vanuit het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en STOWA. Binnen het Innovatieprogramma is het PAC-O₃ project ingedeeld in het cluster 'oxidatieve technieken'. De inhoud van de rapportage is in de vorm van presentaties in 4 vergaderingen gedeeld en bediscussieerd met de begeleidingscommissie van het cluster oxidatieve technieken.

De rapportage is opgesteld conform de *Richtlijnen haalbaarheidsstudie onderzoeksprogramma microverontreinigingen uit afvalwater* zoals door STOWA verstrekt op 17 januari 2019.

De begeleidingscommissie oxidatieve technieken heeft het PAC-O₃ concept o.b.v. de presentaties en voorliggende rapportage beoordeeld.

1.1 DOELSTELLING

Conform de bovengenoemde richtlijnen is het doel van deze haalbaarheidsstudie om te beoordelen of het zinvol is om met het PAC-O₃ concept een vervolgfase in te gaan. Voor doorgang naar een vervolgfase dient het PAC-O₃ concept verbetering op te leveren ten opzichte van een huidig bewezen techniek voor de verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater (PACAS, ozon+zandfiltratie, en GAK-filtratie). De verbetering kan getoetst worden aan één of meerdere van de volgende aspecten:

- Verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater, o.b.v. gidsstoffen Ministerie IenW¹
- CO₂-footprint
- Kosten
- Vermindering ecotoxicologische risico's voor lozing van rwzi-effluent in het aquatisch milieu.

De primaire referentietechniek waarmee het PAC-O₃ concept wordt vergeleken is ozon+zandfiltratie, vanwege de indeling in het cluster oxidatieve technieken. Op enkele deelaspecten is ook een vergelijking met PACAS gegeven.

¹ 4- en 5-methylbenzotriazool, Benzotriazole, Carbamazepine, Clarithromycine, Diclofenac, Hydrochloorthiazide, Metoprolol, Propranolol, Sotalol, Sulfamethoxazole en Trimethoprim

2

HET PAC-O₃ CONCEPT

Het PAC-O₃ concept is gebaseerd op zowel adsorptie als oxidatie. In de biologische zuivering wordt een lage dosis poederactiefkool (PAK) gedoseerd voor de afvang van goed adsorbeerbare microverontreinigingen. In een nageschakelde oxidatieve stap (bijv. ozonisatie) worden vervolgens goed oxideerbare microverontreinigingen verwijderd. Door de dosering van PAK worden naast goed adsorbeerbare microverontreinigingen ook TOC en DOC in geringe mate geabsorbeerd. Hierdoor kan de oxidatieve stap efficiënter bedreven worden.

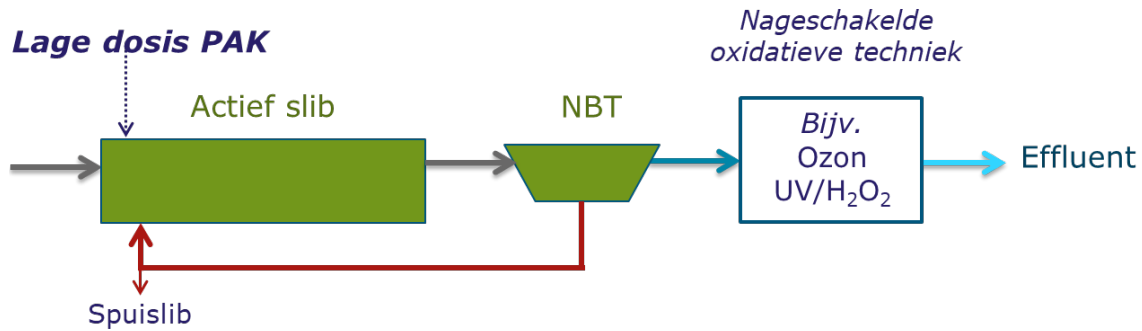
2.1 ONTWIKKELING VAN HET PAC-O₃ CONCEPT

Bij aanvang van het PAC-O₃ project lag de focus van het concept initieel meer op de verwijdering van TOC en DOC door PAK en minder op de verwijdering van microverontreinigingen door PAK. Beide mechanismen zijn wel reeds voorafgaand aan de studie benoemd en ook in de lab-testen onderzocht. Met name door de TOC en DOC verlaging door PAK en minder door de afvang van microverontreinigingen door PAK zou de oxidatieve stap efficiënter bedreven kunnen worden. Door voortschrijdend inzicht op basis van de uitkomsten van de lab-testen is de focus van het werkingsprincipe van deze combinatietechnologie verschoven. Dit is gebeurd binnen de originele technologische kaders waarbinnen het project gestart is. De technieken en daarmee de werking van het concept zijn daarbij onveranderd gebleven.

2.2 DE TECHNOLOGIEËN BINNEN HET PAC-O₃ CONCEPT

In het PAC-O₃ onderzoek is de oxidatieve stap ingevuld als ozontechnologie omdat dit een bewezen technologie is voor full-scale installaties. Verwacht wordt dat wanneer andere oxidatieve technieken een TRL 9 bereiken deze in het PAC-O₃ concept mogelijk uitgewisseld kunnen worden voor de ozontechnologie.

Feitelijk is het PAC-O₃ concept een combinatie van twee technologieën; 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. 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 tot geen bromaatvorming ten opzichte van een stand-alone ozonisatie.

FIGUUR 1 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET PAC-O₃ CONCEPT

In Figuur 1 is een schematische weergave van het PAC-O₃ concept gegeven. Het bestaat uit een PAK-doseerinstallatie waarmee PAK in het actiefslibproces wordt gedoseerd en een nageschakelde ozoninstallatie waarmee het effluent van de rwzi wordt behandeld.

De PAK-doseerinstallatie en het doseerpunt zijn gelijk aan de PACAS-installatie zoals beschreven in STOWA 2018-02. De PAK-dosering en het type PAK kunnen verschillen van PACAS. De aanvullende verwijdering van gidsstoffen om tot het gewenste verwijderingsrendement van 70% te komen moet bij PACAS volledig door de dosering van PAK worden bewerkstelligd. Hiervoor is een type PAK nodig met een hoge affiniteit voor meerdere microverontreinigingen en een dosering van circa 15 mg/L. Voor de PAC-O₃ technologie is volstaat vermoedelijk een lagere PAK-dosering en mogelijk ook een ander type PAK. Immers vooral slecht oxideerbare microverontreinigingen dienen middels de PAK-dosering uit het afvalwater te worden verwijderd. De overige microverontreinigingen worden door de nageschakelde oxidatie verwijderd.

De nageschakelde ozontechnologie kan in verschillende vormen (diverse ozon-injectiesystemen en contacttijden) uitgevoerd worden zoals ook beschreven in STOWA 2018-46. De ozontechnologie bestaat uit een opslagtank voor vloeibare zuurstof, een ozongenerator met bijbehorende meet- en regelapparatuur, een injectiesysteem, een contacttank en een restozondestructor.

Optimalisatie van het zuiveringsproces kan gezocht worden in het samenspel tussen PAK-dosering, PAK-type en ozondosering. Door aan deze knoppen te draaien is te spelen met verwijderingsrendementen, bromaatvorming en slibproductie.

2.3 ACHTERGROND VAN HET PAC-O₃ CONCEPT

2.3.1 TWEE REACTIEMECHANISMEN

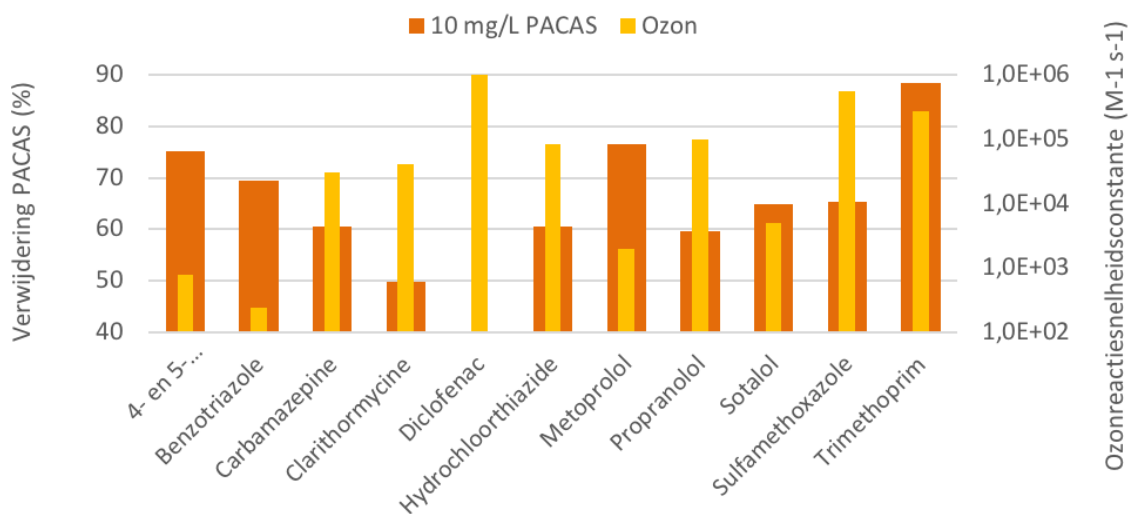
Adsorptie en oxidatie zijn twee verschillende reactiemechanismen. Adsorptie is een reactiemechanisme waarbij stoffen gebonden worden aan een adsorbent. De meest bekende adsorbent voor de adsorptie van microverontreinigingen is actiefkool. Een adsorbent breekt microverontreinigingen niet af maar hecht deze aan zichzelf. Voor de verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater met adsorptieve technieken dient na adsorptie van de microverontreiniging de adsorbent zelf van het afvalwater gescheiden te worden. Dit kan onder andere door bezinking of filtratie.

Oxidatie is een reactiemechanisme waarbij stoffen geoxideerd worden door een oxidant. Bekende voorbeelden van oxidanten voor de verwijdering van microverontreinigingen uit

afvalwater zijn ozon en OH-radicalen. Bij oxidatie van microverontreinigingen worden deze (gedeeltelijk) afgebroken. Volledige afbraak van microverontreinigingen (mineralisatie tot CO₂ en H₂O) vindt in oxidatieve processen in afvalwaterbehandeling niet plaats. Microverontreinigingen worden door oxidatie dus omgezet in zogenoemde transformatieproducten welke in de meeste gevallen minder toxisch zijn dan de originele microverontreinigingen.

De gevoeligheid voor oxidatie of adsorptie verschilt sterk per individuele microverontreiniging. Sommige microverontreinigingen zijn zeer adsorptief en kunnen eenvoudig met actiefkool verwijderd worden. Andere zijn goed oxideerbaar en worden door ozon eenvoudig afgebroken. Voor de 11 gidsstoffen zijn de gevoeligheden voor adsorptie en oxidatie weergegeven in Figuur 2.

FIGUUR 2 AFFINITEIT VAN ADSORPTIE (UITGEDRUKT ALS VERWIJDERING BIJ 10 MG/L PACAS-PRAKTIJKPROEF PAPENDRECHT) EN OXIDATIE (UITGEDRUKT ALS OZONREACTIESNELHEIDSCONSTANTE) VOOR DE 11 GIDSSTOFFEN



In Figuur 2 is de gevoeligheid voor adsorptie aan actiefkool weergegeven als verwijderingsrendement van de gidsstoffen door toevoeging van PAK zoals bepaald in de PACAS-praktijkproef op rwzi Papendrecht. De weergegeven dosering van 10 mg PAK/L is de laagst geteste dosering uit de praktijkproef. De gevoeligheid voor oxidatie is weergegeven als de ozonreactiesnelheidsconstante voor de gidsstoffen.

Figuur 2 maakt duidelijk dat de gidsstoffen 4- en 5-methylbenzotriazol, benzotriazol en metoprolol goed verwijderd worden door adsorptie aan actiefkool. De ozonreactiesnelheidsconstanten van deze gidsstoffen zijn laag ten opzichte van die van andere gidsstoffen. Voor o.a. diclofenac, sulfamethoxazole en propranolol geldt het tegenovergestelde. Daarnaast zijn enkele gidsstoffen die door beide reactiemechanismen verwijderd worden, trimethoprim wordt bijvoorbeeld zelfs zeer goed verwijderd door beide reactiemechanismen.

Uit praktijkervaring en literatuur is bekend dat ook voor andere microverontreinigingen dan de 11 gidsstoffen de gevoeligheden voor adsorptie en oxidatie sterk kunnen verschillen per stof (Kovalova 2013, Altmann 2014 en Margot 2013).

Utilisatie van beide reactiemechanismen vergroot dus het palet aan gidsstoffen en microverontreinigingen dat verwijderd kan worden. Dit geldt wanneer beide reactiemechanismen

met eenzelfde intensiteit worden bedreven als beide stand-alone technieken. De totale verwijdering zal hierdoor toenemen in zowel het aantal verwijderde stoffen alsook in de mate waarmee deze worden verwijderd. Doordat beide reactiemechanismen individueel aangestuurd kunnen worden ontstaat flexibiliteit in de te leveren prestaties. Desgewenst kunnen adsorptie en oxidatie op verschillende wijze voor diverse doeleinden op elkaar afgestemd worden.

Het verwijderen van een breed palet microverontreinigingen sluit bovendien goed aan bij het doel van De Ketenaanpak Medicijnresten uit Water van de rijksoverheid; *“het verminderen van de hoeveelheid medicijnresten in water”*.

2.3.2 VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN

Conform de richtlijnen van het Innovatieprogramma *Microverontreinigingen uit afvalwater* moet het PAC-O₃ concept een verwijdering van minimaal 70% bewerkstelligen voor 7 van de 11 gidsstoffen. Op basis van de praktijkervaring met PACAS en nageschakelde ozonisatie kan gesteld worden dat deze eis met het PAC-O₃ concept behaald kan worden. In lab-testen welke in hoofdstuk 0 beschreven staan is aangetoond dat met het PAC-O₃ concept hoge verwijderingspercentages van meer dan 70% bereikt kunnen worden.

De daadwerkelijke verwijdering van microverontreinigingen in de praktijk is afhankelijk van hoe het PAC-O₃ concept aangestuurd wordt. Doordat er zowel een aansturing op PAK-dosering als op ozon dosering mogelijk is kan er gevarieerd worden met het te behalen verwijderingsrendement.

2.3.3 DOC

De aanwezigheid in het effluent van andere verstorende organische stoffen dan de microverontreinigingen verlagen het rendement van vrijwel alle nageschakelde technieken om microverontreinigingen te verwijderen. Deze groep organische stoffen, doorgaans gemeten als DOC of TOC, bestaat uit biologisch moeilijk afbreekbare verbindingen voornamelijk van natuurlijke afkomst. In het effluent van een rwzi zijn deze stoffen in 1.000 tot 10.0000 maal hogere concentraties aanwezig dan de microverontreinigingen waar de nabehandeling voor bedoeld is. Doordat verwijderingstechnieken voor microverontreinigingen zelden exclusief werken op microverontreinigingen, gaat het rendement van deze technieken aanzienlijk omlaag door reacties met DOC en TOC i.p.v. met enkel microverontreinigingen. Hierdoor is een navenant hogere input van energie en grondstoffen nodig met als gevolg een lage kosten-effectiviteit van de verwijderingstechnieken.

In de PACAS-praktijkproef is waargenomen dat de additie van PAK in het actiefslibproces bij doseringen van 10, 15, 20 en 25 mg/l zorgt voor een verlaging van respectievelijk 15, 10, 5 en 20% van de effluent DOC concentratie. Daarmee zou een nageschakelde ozonisatie dus ook kosteneffectiever bedreven kunnen worden. Het toepassen van twee reactiemechanismen zoals in het PAC-O₃ concept zal naar verwachting naast de directe impact op de verwijdering van microverontreinigingen ook een indirect effect hebben door DOC-verlaging.

In lab-testen die in hoofdstuk 0 zijn beschreven is aangetoond dat de DOC voor 5-10% verwijderd kan worden met een laagwaardiger PAK dan in de PACAS-praktijkproef toegepast bij een lage PAK-dosering van 5-10 mg/l. Dit heeft vermoedelijk een positief effect op de nageschakelde ozonisatie.

2.3.4 BROMAAT

In de lab-testen is niet bepaald of er productie van bromaat plaatsvindt. O.b.v. literatuur (o.a. STOWA 2018-46) en praktijkervaring is wel bekend dat bij lage ozondosering er minder bromaat gevormd wordt. Recent is dit nogmaals aangetoond in de praktijktesten met ozonbehandeling van effluent op rwzi Aarle-Rixtel van waterschap Aa en Maas. In het PAC-O₃ concept is een lagere ozondosis vereist dan bij een stand-alone ozonisatie. Naar verwachting wordt er door de combinatie van adsorptie en oxidatie minder bromaat gevormd dan met stand-alone ozonisatie. Of er in het PAC-O₃ concept bromaatproductie optreedt en hoeveel dit wordt, hangt voornamelijk af van de daadwerkelijke ozondosering en de bromideconcentratie van het afvalwater en zal in de praktijk bepaald moeten worden.

2.3.5 SLIBPRODUCTIE

Conform de PACAS-technologie neemt de slibproductie toe bij implementatie van het PAC-O₃ concept. De toename is echter geringer dan bij stand-alone PACAS. De verwachte PAK-dosering voor het PAC-O₃ concept is circa 8 mg/L. Dit is een eerste inschatting op basis van de resultaten uit de lab-testen die in hoofdstuk 3 zijn beschreven. Met 8 mg/L is de PAK-dosering voor het PAC-O₃ concept veel lager dan de circa 15 mg/L aan PAK-dosering die voor stand-alone PACAS nodig is. Bij een PAK-dosering van 8 mg/l neemt de slibproductie van een rwzi met 4% toe.

2.4 TECHNOLOGY READINESS LEVEL

Het PAC-O₃ concept is gebaseerd op de combinatie van twee bestaande technologieën:

- PACAS
- Nageschakelde ozonisatie

Beide afzonderlijke technologieën zijn in Nederland op full-scale demo schaal getest (zie STOWA 2018-02 en STOWA 2018-46) en in Duitsland en/of Zwitserland full-scale geïmplementeerd, o.a. rwzi Wetzikon (PACAS) en rwzi Aken (nageschakelde ozonisatie). Derhalve hebben beide technologieën het hoogste Technology Readiness Level (TRL), namelijk TRL 9.

De combinatie van beide technologieën is bij ons weten nog niet in een pilot, demo of full-scale getest of toegepast. In voorliggende rapportage zijn wel lab-testen beschreven over de combinatie van de technologieën. De huidige TRL is daarmee 4. Doordat beide afzonderlijke technologieën reeds een TRL 9 hebben is te verwachten dat na een succesvolle pilot- of demo-fase het PAC-O₃ concept binnen enkele jaren een TRL heeft van 9.

2.5 LITERATUURSTUDIE

In de zoektocht naar literatuur over het PAC-O₃ concept voor afvalwaterzuivering, m.a.w. het toepassen van PAK-dosering en nageschakelde ozonisatie, is bevonden dat dit concept als zodanig nog nergens is toegepast of getest. Wel zijn er vergelijkende (lab)studies uitgevoerd naar adsorptieve en oxidatieve technieken (Altmann 2014 en Margot 2013). Ook is bevonden dat in de drinkwaterbereiding het concept 'multi-barrière zuivering' toegepast wordt. Dit is een combinatie van meerdere technieken die elkaar aanvullen, zoals bijvoorbeeld adsorptie en oxidatie, met als achterliggende gedachten dat met meerdere technieken een breder palet aan contaminanten te verwijderen is.

3

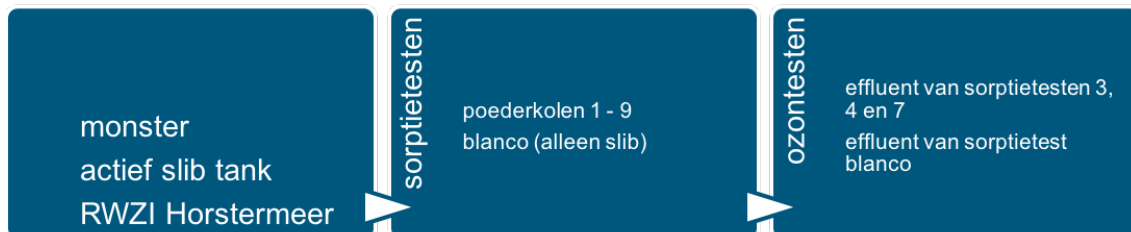
LAB-TESTEN

In dit hoofdstuk zijn de lab-testen beschreven welke door LeAF zijn uitgevoerd als aanvullend onderzoek voor het PAC-O₃ project. Bij aanvang van de lab-testen lag de focus van het PAC-O₃ concept op de verwijdering van TOC en DOC door dosering van PAK waardoor de ozonisatie effectieve uitgevoerd zou kunnen worden. Op basis van de uitkomsten van de lab-testen is de focus van het PAC-O₃ concept verlegd naar adsorptie én oxidatie van microverontreinigingen. Dit omdat door PAK-dosering de verwijdering van microverontreinigingen groter was dan verwacht en de verwijdering van TOC en DOC minder dan verwacht.

3.1 MATERIALEN EN METHODEN

In het laboratorium zijn sorptie- en ozontesten uitgevoerd met actiefslib, de schematische opzet van de lab-testen is weergegeven in *Figuur 3*.

FIGUUR 3 DIAGRAM MET UITGEVOERDE TESTEN BINNEN DE PAC-O₃ LAB-TESTEN



ACTIEFSLIB

Voor de testen is een monster genomen uit de actiefslibtank van RWZI Horstermeer op 24-7-2019 (2*10 l). Voor analyse van de vloeistoffase op t=0, is 500 ml van het slib weggezet en na 2 uur bezinking van het slib is van de bovenstaande vloeistof een monster genomen voor analyse van DOC, TOC en microverontreinigingen. Uit deze analyse volgt dat 20 van de 37 geneesmiddelen boven of op de rapportagegrens zijn aangetroffen, 5 hiervan zijn gidsstoffen. Voor 13 stoffen geldt dat ze met minimaal een factor 5 boven de rapportagegrens aanwezig waren, 4 daarvan zijn de gidsstoffen carbamazepine, claritromycine, diclofenac en sulfamethoxazole. Met deze 13 stoffen is de evaluatie van de PAC-O₃ lab-test uitgevoerd.

SORPTIETESTEN

Er zijn 9 typen PAK gebruikt voor deze testen. Een 8-tal verschillende PAKs zijn door 4 leveranciers aangeleverd als zijnde PAKs waarmee DOC en/of TOC verwijderd kan worden. Daarnaast is ook de 'PACAS-PAK' gebruikt (Pulsorb WP235 van Chemviron; de PAK die ook in het PACAS-onderzoek op RWZI Papendrecht is toegepast). De leveranciers zijn expliciet gevraagd een PAK aan te leveren voor de afvang van DOC en/of TOC en niet specifiek voor de afvang van microverontreinigingen. Hen is gevraagd naar de kosten van de PAKs en de te hanteren dosering (m.a.w. een kosten/effectiviteit afweging). De door de leveranciers geadviseerde concentraties die zijn gebruikt in de lab-testen zijn weergegeven in Tabel 1. Voor de 'PACAS-PAK'

Pulsorb WP235 heeft het projectteam de concentratie heeft bepaald o.b.v. de kosten en DOC-verwijdering zoals tijdens het PACAS-onderzoek bepaald.

TABEL 1 GESELECTEERDE POEDERKOLEN EN DE TOEGEPASTE CONCENTRATIE IN DE TESTEN

NR.	TOEGEPASTE POEDERKOLEN	CONCENTRATIE (MG/L)
1	PACAS - PULSORB WP235, CHEMVIRON CARBON	5
2	"NUMMER 2"	10
3	"NUMMER 3"	10
4	"NUMMER 4"	10
5	"NUMMER 5"	5
6	"NUMMER 6"	5
7	"NUMMER 7"	5
8	"NUMMER 8"	10
9	"NUMMER 9"	5

De testen zijn in triplo uitgevoerd in 0,5 L Schott flessen. In elke fles is 5 of 10 mg/l PAK afgewogen (zie Tabel 1), en vervolgens 0,5 L actief slib. Er is ook een blanco met alleen actief slib (zonder PAK) meegenomen. De flessen zijn weggezet op een end-over-end shaker voor 6 uur bij kamertemperatuur (de temperatuur was ong. 23-25°C). Na deze 6 uur zijn de flessen op de labtafel weggezet voor 2,5 uur zodat het slib kon bezinken, de bovenstaande vloeistof (effluent) is gebruikt voor bemonstering.

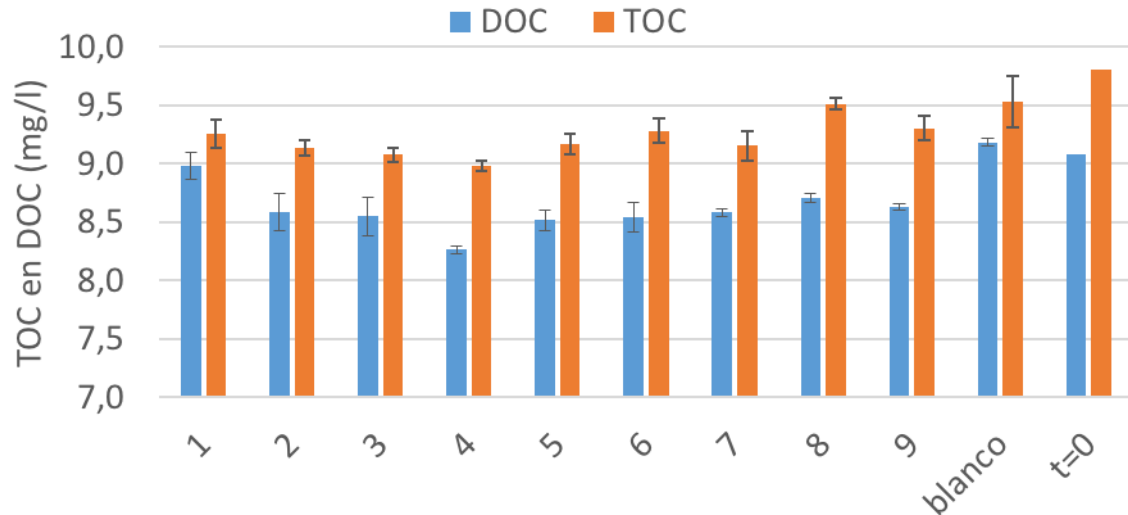
OZONTESTEN

Aan de hand van de DOC- en TOC-resultaten van de sorptietesten zijn 3 van de 9 monsters van de sorptietesten geselecteerd waarmee de ozontesten zijn uitgevoerd. Ook de blanco van de sorptietesten (het monster dat niet behandeld is met PAK) is meegenomen in de ozontesten. De ozontesten vonden plaats in batch in triplo. In een 0,2 L fles is aan elk monster (100 mL) een met water verzadigde ozonoplossing toegevoegd. De toegepaste ozonconcentratie was 0,47 gO₃/gDOC, gebaseerd op de DOC in de blanco. Dit komt neer op 4,3 mg O₃/L voor elke fles. Na de dosering van de ozon zijn de flessen kort handmatig geschud waarna nog tenminste 30 minuten is gewacht om ozon volledig te laten reageren alvorens monsters te nemen ten behoeve van DOC en microverontreinigingsanalyse.

3.2 RESULTATEN VERWIJDERING DOC EN TOC

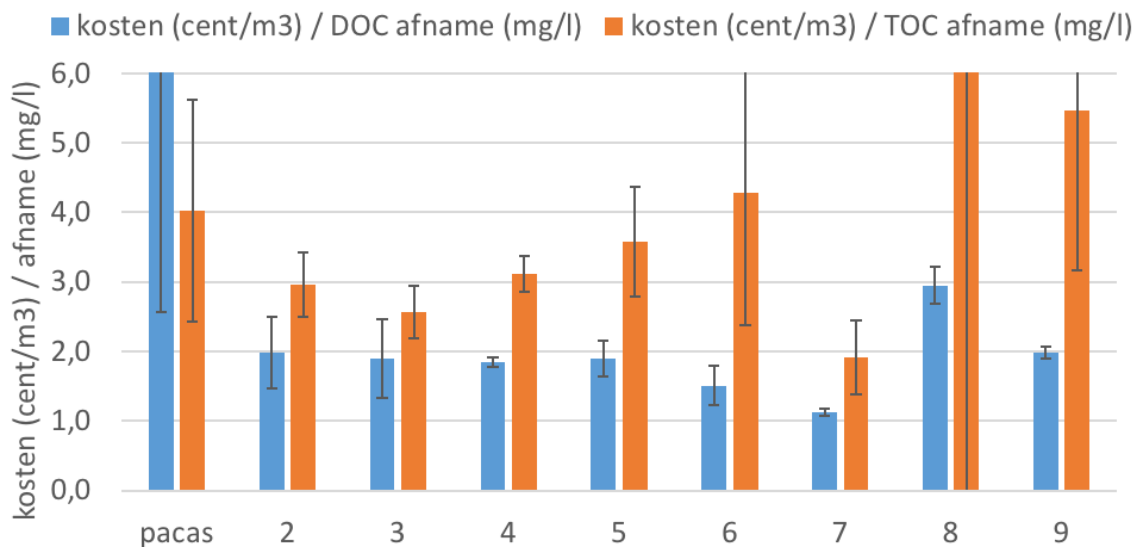
In *Figuur 4* zijn de resultaten weergegeven van de sorptietesten. De concentraties DOC en TOC na de sorptietesten zijn in alle monsters met PAK afgenomen. De hoogste DOC-verwijdering is bereikt met PAK nr. 4, deze was 10%. De overige PAKs verwijderden DOC tussen de 5 en 7%. Met de PACAS-PAK is de laagste DOC-verwijdering bereikt, slechts 2,2%. De DOC in de blanco is iets toegenomen gedurende de testen. Mogelijk dat afsterving van actief slib en/of omzetting van TOC naar DOC hier de oorzaak van is.

FIGUUR 4 DOC EN TOC CONCENTRATIES NA DE SORTTIETESTEN



In *Figuur 5* zijn de kosten in cent/m³ weergegeven per verwijderde mg/l DOC en TOC. Op basis van de kosten voor DOC en TOC afname zijn PAK nr. 3, 4 en 7 geselecteerd om de ozontesten mee uit te voeren. Duidelijk is dat de DOC verwijdering met de 'PACAS-PAK' veel duurder uitpakt dan met de andere PAKs.

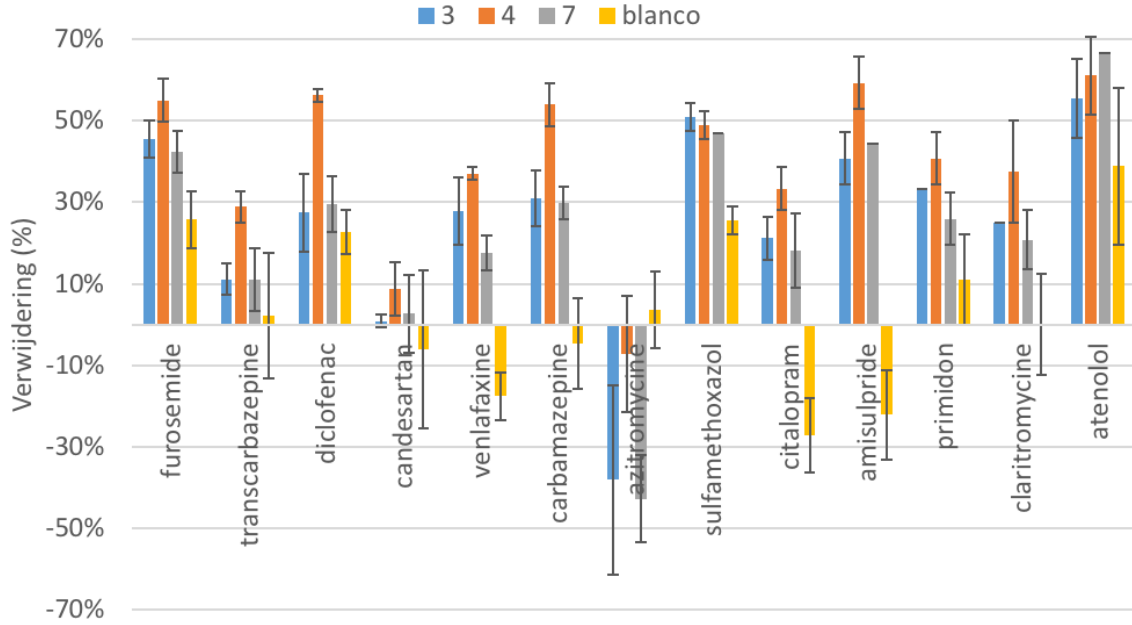
FIGUUR 5 KOSTEN VOOR DE AFNAME VAN DOC EN TOC



3.3 RESULTATEN VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN

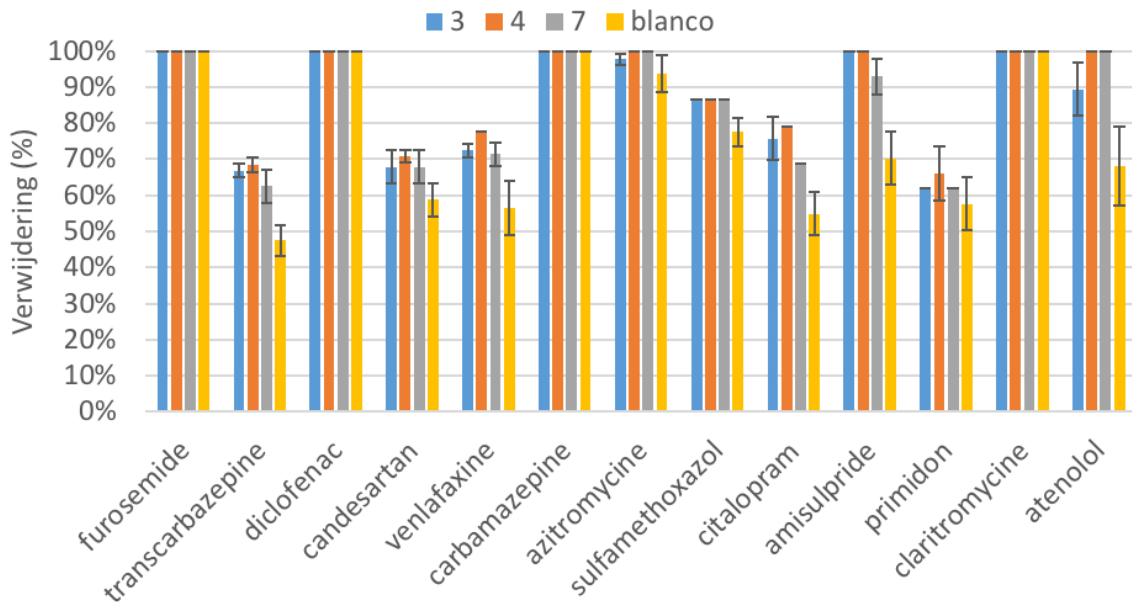
In *Figuur 6* zijn de verwijderingsrendementen weergegeven over de sorptietesten. Deze zijn berekend als de concentratie na sorptietesten ten opzichte van het afvalwater waarmee de sorptietesten ingezet zijn (t=0). De additie van PAK heeft voor vrijwel alle microverontreinigingen een positief effect op de verwijdering ervan uit het afvalwater. Enkel voor azitromycine is dit niet het geval, onduidelijk is waarom dit voor deze specifieke stof zo is.

FIGUUR 6 MICROVERONTREINIGINGENVERWIJDERINGSRENDEMENTEN IN DE SORPTIETESTEN



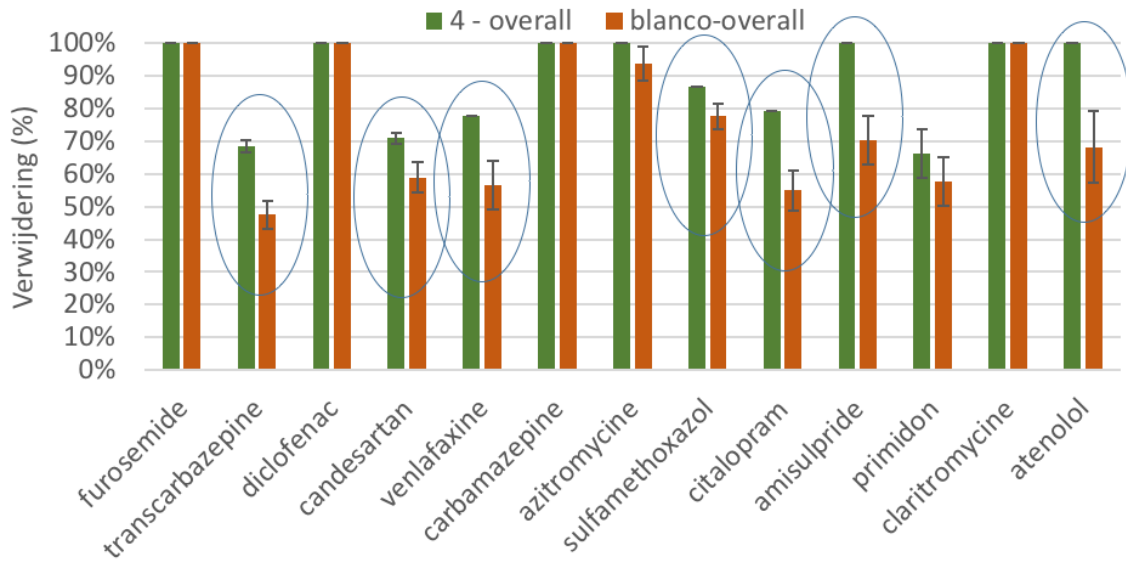
In Figuur 7 zijn de verwijderingsrendementen weergegeven over de combinatie van de sorptie- en ozontesten. Deze zijn berekend als de concentratie na ozontesten ten opzichte van het afvalwater waarmee de sorptietesten ingezet zijn ($t=0$). In Figuur 8 zijn de verschillen in verwijderingsrendement tussen PAK nr. 4 en de blanco expliciet weergegeven. Deze verschillen zijn het resultaat van wel of niet doseren van PAK ten opzichte van enkel ozoniseren.

FIGUUR 7 MICROVERONTREINIGINGENVERWIJDERINGSRENDEMENT OVER DE SORPTIE- EN OZONTESTEN



FIGUUR 8

MICROVERONTREINIGINGENVERWIJDERINGSRENDEMENT OVER DE SORPTIE- EN OZONTESTEN SPECIFIEKE VERGELIJKING TUSSEN POEDERKOOL NR. 4 EN BLANCO. OMCIRKELD ZIJN DE VERSCHILLEN IN VERWIJDERINGSRENDEMENT WELKE ZIJN TOE TE SCHRIJVEN AAN DE DOSERING VAN POEDERKOOL TEN OPZICHTE VAN ENKEL OZONISATIE



De resultaten van de lab-testen na sorptie en ozonisatie laten zien dat de dosering van PAK een positief effect heeft op de verwijdering van microverontreinigingen. Van vrijwel alle microverontreinigingen is de verwijdering gestegen door PAK-dosering.

Ondanks de lage PAK- en ozondosering zijn drie van de vier gidsstoffen volledig verwijderd door de combinatie van adsorptie en oxidatie, de 4e gidsstof sulfamethoxazol is voor 87% verwijderd. Deze zeer hoge verwijderingspercentages tonen de potentie aan van het PAC-O₃ concept om gidsstoffen te verwijderen. Op basis van *Figuur 6* kan stelt worden dat de verwijdering van alle gidsstoffen toeneemt door de dosering van PAK. De volledige verwijdering van de gidsstoffen na sorptie- en ozontesten toont dat de gehanteerde doseringen mogelijk verlaagd kunnen worden voor een 70% verwijderingsrendement van gidsstoffen over de gehele rwzi.

3.4 DISCUSSIE

De resultaten van de lab-testen maken duidelijk dat hoge verwijderingsrendementen voor microverontreinigingen en de vier geteste gidsstoffen behaald kunnen worden. Rwzi's in Nederland zonder specifieke additionele technieken voor microverontreinigingen kennen een verwijderingsrendement voor gidsstoffen van circa 40%. Wanneer dit wordt aangevuld met de verwijderingsrendementen zoals in de lab-testen is aangetoond zal dit voor een 'PAC-O₃ rwzi' verder toenemen. Een eerste inschatting van deze toename is met enkele aannames te maken. Daarmee is ook de vraag te beantwoorden of aan de eis van gemiddeld 70% verwijdering van 7 van de 11 gidsstoffen kan worden voldaan. De twee te maken aannames zijn de volgende: 1) als zeer conservatief uitgangspunt wordt aangenomen dat de gidsstoffen die niet in de lab-testen zijn gemeten niet aanvullend door het PAC-O₃ concept worden verwijderd, 2) dat deze gidsstoffen voor 40% in de rwzi worden verwijderd. De verwijderingsrendementen voor de gidsstoffen over een 'PAC-O₃ rwzi' zijn op basis van de lab-testen dan als volgt:

- 3 gidsstoffen 99% (carbamazepine, claritromycine en diclofenac)
- 1 gidsstof 87% (sulfamethoxazol)
- Overige gidsstoffen 40%

Het gemiddelde verwijderingsrendement van 7 van de 11 gidsstoffen komt hiermee op 72% wat boven de gestelde eis van 70% is. Zakken de rendementen van de 4 onderzochte gidsstoffen tot 85% en wordt de aanname gedaan dat het voor de overige gidsstoffen 60% is dan neemt het gemiddelde rendement van 7 gidsstoffen toe tot 74%. Op basis van deze eerste inschatting kan derhalve worden gesteld dat een zuiveringsrendement over de gehele zuivering van boven de 70% mogelijk is met het PAC-O₃ concept. Als de verwijderingsrendementen van 3 van de 7 niet geteste gidsstoffen ver boven de 60% liggen betekent dit dat de in de lab-testen gehanteerde PAK-dosering en/of de ozondosering verlaagd kunnen worden. Deze verlaging zal een effect hebben op de kosten per kuub.

Een andere factor met grote impact op de kosten is de DOC-concentratie in het effluent. Voor effluent van rwzi Horstermeer is een DOC in deze testen bepaald van 9,1 mg/l. Veel rwzi's in Nederland kennen echter een hogere DOC. Concentraties boven de 15 mg/l zijn niet ongebruikelijk. Bij DOC-concentraties hoger dan 9,1 mg/l nemen de verbruikskosten en kapitaallasten van ozonisatie toe.

In de lab-testen is slechts voor een beperkt aantal microverontreinigingen en gidsstoffen het verwijderingsrendement bepaald. De meeste van de gemeten stoffen zijn goed verwijderd in de testen (*Figuur 8*). Hierdoor is het lastig om een duidelijke conclusie te trekken of met de combinatie van twee verschillende verwijderingsmechanismen (adsorptie en oxidatie) er een breder palet aan stoffen verwijderd kan worden. Vanuit de literatuur en praktijkervaringen is bekend dat de gevoeligheid voor adsorptie en oxidatie sterk kan verschillen per microverontreiniging (zie *Figuur 2*). De verwachting is derhalve dat bij een grotere selectie (gids)stoffen het voordeel van het PAC-O₃ concept beter zichtbaar wordt.

Onbekend is wat de effecten zijn van lage dosis PAK-dosering op slibontwatering, slibgisting en slibeindverwerking. Doordat de PAK-dosering in de lab-testen veel lager was dan in de PACAS-praktijkproef is het de vraag of er vergelijkbare effecten op de sliblijn waarneembaar zullen zijn. Vervolgonderzoek zal dit uit moeten wijzen.

4

DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN EN JAARLIJKSE VERBRUIKEN

Het PAC-O₃ concept is een combinatie van twee bewezen technieken, de dimensioneringsgrondblagen komen derhalve in grote lijnen zeer overeen met die van beide individuele technieken. De dimensioneringsgrondblagen van PACAS en nageschakelde ozonisatie zijn respectievelijk in STOWA-rapportages 2018-02 en 2018-46 vastgelegd. Op een aantal parameters wijken de dimensioneringsgrondblagen echter af doordat beide technieken in het PAC-O₃ concept in minder intensieve vorm worden uitgevoerd. De jaarlijkse verbruiken van hulpstoffen, chemicaliën en elektriciteit verschillen hierdoor van de individuele technieken. Jaardebiet en ontwerpdebet zijn overgenomen uit *Richtlijnen haalbaarheidsstudie onderzoeksprogramma microverontreinigingen uit afvalwater*.

In overleg met de BC is besloten om binnen de PAC-O₃ haalbaarheidsstudie geen nader onderzoek te doen over het wel of niet toepassen van een zandfilter na ozonisatie, dit zowel specifiek voor PAC-O₃ alsook voor nageschakelde ozonisatie in het algemeen. Het PAC-O₃ concept is vooralsnog uitgewerkt zonder zandfilter en moet derhalve vergeleken worden met een nageschakelde ozonisatie zonder zandfilter.

De dimensioneringsgrondblagen en jaarlijkse verbruiken van het PAC-O₃ concept zoals aangehouden voor de kostenberekening voor een rwzi met een belasting van 100.000 i.e. 150 g TZV zijn in Tabel 2 weergegeven.

TABEL 2

DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN PAC-O₃ CONCEPT OP RWZI MET CAPACITEIT 100.000 I.E

Parameter	Eenheid	Grootheid
<i>PAK-dosering</i>		
Jaardebiet	m ³ /jaar	7.665.000
Aandeel behandeld jaardebiet	%	100
PAK-dosering	mg/L	8
Maximale PAK-dosering	-	2x DWA
PAK-verbruik	ton/jaar	52
Slibgehalte ontwaterd slib zonder PAK	% ds	21,10
Slibgehalte ontwaterd slib met PAK	% ds	21,75
Extra af te voeren slib	ton ds/jaar	52
Extra DOC-verwijdering	%	10
Opgesteld vermogen	kW	10
Elektriciteitsverbruik	kWh/jaar	57.000
Personele belasting	FTE	0,2
<i>Ozoninstallatie</i>		
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	10
Opvoerhoogte	m	2
Ozondosering	mg O ₃ /mg DOC	0,4
Minimale contacttijd	minuten	15
Contacttank	m ³	260
Aandeel ozon in feedgas	%	9
Zuurstofverbruik	ton O ₂ /jaar	238
Opgesteld vermogen	kW	38
Elektriciteitsverbruik	kWh/jaar	376.000
Personele belasting	FTE	0,2

5

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.

5.1 EFFECT OP BEDRIJFSVOERING

EFFLUENTKWALITEIT

De kwaliteit van het effluent zal toenemen door de afvang van microverontreinigingen. Zowel de chemisch als de ecotoxicologische kwaliteit verbeterd.

SLIBPRODUCTIE

Door de dosering van PAK aan het actiefslibstelsysteem zal de slibproductie toenemen. Bij een dosering van 8 mg/L zal er jaarlijks 52 ton ds additioneel slib afgevoerd moeten worden. Dit is een stijging van 4%. Naar verwachting zal het percentage droge stof van het ontwaterde slib licht toenemen. Welke effecten dit heeft op de slibeindverwerking wordt momenteel onderzocht in een andere studie binnen het Innovatieprogramma.

ENERGIEVERBRUIK

Het energieverbruik van de rwzi zal toenemen met ca. 433.000 kWh per jaar. Hiervan is ca. 13% voor de PAK-dosering en 87% voor ozonisatie.

CHEMICALIËNVERBRUIK

Door dosering van PAK aan het actiefslibproces is een PAK-verbruik van 52 ton per jaar voorzien. Voor de productie van ozon is op jaarbasis 238 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.

5.2 INPASSING OP LOCATIE

De inpassing van het PAC-O₃ concept is vrijwel gelijk aan de inpassing van PACAS en nageschakelde ozonisatie. In Figuur 1 is schematisch weergegeven hoe het PAC-O₃ concept op een rwzi kan worden ingepast. 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.

5.3 VOOR WELKE TYPE RWZI'S GESCHIKT

Het PAC-O₃ concept is in toepasbaar op alle rwzi's met een actieslibproces waar de wens is om microverontreinigingen te verwijderen. In het bijzonder is het concept geschikt voor rwzi's waar de verwijdering van een breder palet microverontreinigingen gewenst is en een hoger verwijderingsrendement dan de 70% gidsstoffennorm wordt nagestreefd.

Aandacht moet worden besteed aan het beslag dat de PAK-dosering legt op de biologische zuiveringscapaciteit van de rwzi, deze is circa 50% lager dan bij stand-alone PACAS. Ook moet aandacht worden besteed aan het effect van PAK-dosering op de slib(eind)verwerking. Beide aspecten zijn momenteel nog onvoldoende bekend en dienen nader onderzocht te worden. Een ander aandachtspunt is de bromideconcentratie van het afvalwater. Wanneer deze hoog is moet bepaald worden of de ozondosering voldoende laag kan zijn om ongewenste bromaatvorming te voorkomen en om aan de gestelde eisen te voldoen voor de verwijdering van microverontreinigingen/giddstoffen.

6

JAARLIJKSE KOSTEN

Op basis van de dimensioneringsgrondslagen en jaarlijkse verbruiken zoals gegeven in hoofdstuk 4 en conform de kostenkentalen van de richtlijnen Innovatieprogramma zijn de investeringskosten (Tabel 3) en jaarlijkse kosten (Tabel 4) uitgewerkt. Deze zijn opgesplitst in de onderdelen civiel, werktuigbouwkundig en elektrisch/proces automatisering.

TABEL 3 INVESTERINGSKOSTEN PAC-O₃ CONCEPT VOOR EEN 100.000 I.E. RWZI

Investeringskosten in €		C	WTB	E/PA
<i>PACAS installatie</i>				
Kale bouwkosten		25.000	285.000	75.000
Onvolledigheid	25%	6.250	71.250	18.750
Opslag aannemerskosten	25%	7.813	89.063	23.438
Stichtingskosten	80%	31.250	356.250	93.750
Totaal per post		70.313	801.563	210.938
Totaal				1.083.000
<i>Ozon installatie</i>				
Kale bouwkosten		377.800	549.450	127.000
Onvolledigheid	25%	94.450	137.363	31.750
Opslag aannemerskosten	25%	118.063	171.703	39.688
Stichtingskosten	80%	472.250	686.813	158.750
Totaal per post		1.062.563	1.545.328	357.188
Totaal				2.966.000
<i>PACAS-Ozon combi</i>				
PACAS installatie		70.313	801.563	210.938
Ozon installatie		1.062.563		357.188
Totaal per post		1.132.875	2.346.891	568.125
Totaal				4.048.000

TABEL 4 JAARLIJKSE KOSTEN PAC-O₃ CONCEPT VOOR EEN 100.000 I.E. RWZI

Jaarlijkse kosten	Jaarlasten €/jaar	percentueel %	per behandelde kuub €/m ³	per i.e. €/i.e.
<i>PACAS installatie</i>				
Kapitaalslasten C	€ 4.066	2%	€ 0,001	€ 0,04
Kapitaalslasten WTB	€ 72.093	32%	€ 0,009	€ 0,72
Kapitaalslasten E/PA	€ 18.972	9%	€ 0,002	€ 0,19
Onderhoud C	€ 195	0%	€ 0,000	€ 0,00
Onderhoud WTB	€ 13.359	6%	€ 0,002	€ 0,13
Onderhoud E/PA	€ 3.516	2%	€ 0,000	€ 0,04
Personeel	€ 10.000	4%	€ 0,001	€ 0,10
Kosten actiefkool	€ 67.759	30%	€ 0,009	€ 0,68
Kosten elektriciteit	€ 5.694	3%	€ 0,001	€ 0,06
Kosten extra slibafvoer	€ 31.273	14%	€ 0,004	€ 0,31
Besparing polymeer	€ -4.018	-2%	€-0,001	€-0,04
Totaal	€ 223.000	100%	€ 0,029	€ 2,23
<i>Ozon installatie</i>				
Kapitaalslasten C	€ 61.448	16%	€ 0,011	€ 0,61
Kapitaalslasten WTB	€ 138.989	36%	€ 0,026	€ 1,39
Kapitaalslasten E/PA	€ 32.126	8%	€ 0,006	€ 0,32
Onderhoud C	€ 5.313	1%	€ 0,001	€ 0,05
Onderhoud WTB	€ 46.360	12%	€ 0,009	€ 0,46
Onderhoud E/PA	€ 10.716	3%	€ 0,002	€ 0,11
Personeel	€ 10.000	3%	€ 0,002	€ 0,10
Kosten zuurstof	€ 47.693	12%	€ 0,009	€ 0,48
Kosten elektriciteit	€ 37.500	10%	€ 0,007	€ 0,38
Totaal	€ 390.200	100%	€ 0,073	€ 3,90
<i>PACAS-Ozon combi</i>				
PACAS installatie	€ 223.000		€ 0,029	€ 2,23
Ozon installatie	€ 390.200		€ 0,073	€ 3,90
Totaal	€ 613.200		€ 0,102	€ 6,13
Berekend over volledige debiet rwzi			€ 0,080	

7

BEOORDELING OP TOETSINGSCRITERIA

In dit hoofdstuk wordt het PAC-O₃ concept beoordeeld op de toetsingscriteria zoals gesteld in de richtlijnen van het Innovatieprogramma en vergeleken met de referentietechnieken. Omdat voor het PAC-O₃ concept geen zandfilter is voorzien zijn in overleg met de BC voor de referentietechniek Ozon + Zandfiltratie de kosten en CO₂-footprint ook gegeven voor enkel ozonisatie zonder zandfiltratie.

7.1 VERWIJDERINGSRENDEMENT MICROVERONTREINIGINGEN

GIDSSTOFFEN

Op basis van de praktijkervaring met PACAS en nageschakelde ozonisatie, literatuur en de inzichten vanuit de lab-testen kan gesteld worden dat de eis van een 70% verwijdering van 7 van de 11 gidsstoffen met het PAC-O₃ concept behaald kan worden. Wanneer in de toekomstige een hoger verwijderingsrendement dan 70% vereist is kan dit met het PAC-O₃ concept worden behaald door verhoging van de PAK- en/of ozondosering. Een eerste inschatting op basis van de verwijderingsrendementen bij een PAK-dosering van 15 mg/l conform PACAS en een ozondosering van 0,7 mg O₃/mg DOC is dat een rendement van 85-90% kan worden behaald.

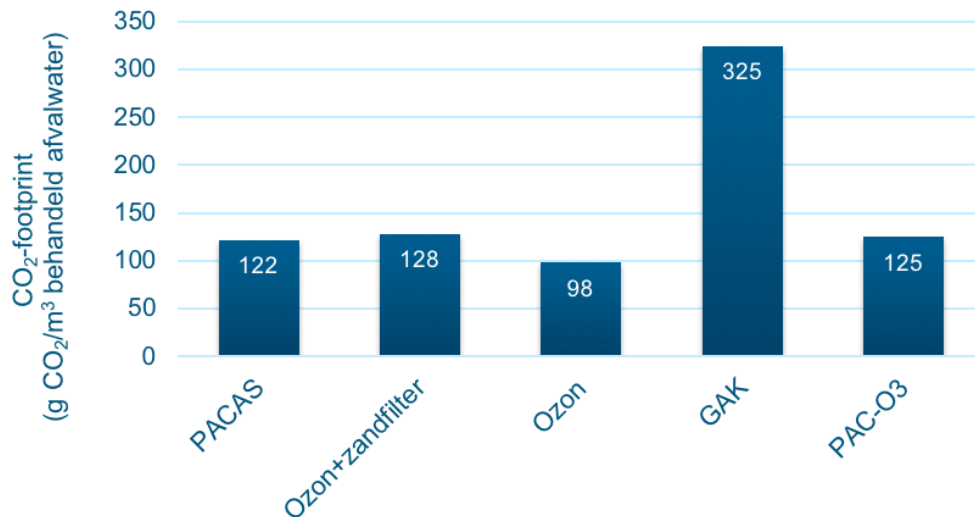
BREED PALET

De combinatie van de twee verschillende reactiemechanismen zorgt naast de verwijdering van de gidsstoffen voor de verwijdering van een breder palet microverontreinigingen dan de referentietechnieken. Op de totale reductie van de hoeveelheid microverontreinigingen naar het aquatisch milieu scoort het PAC-O₃ concept daardoor beter dan de referentietechnieken. De verwijdering van een breed palet aan microverontreinigingen is het meest onderscheidende aspect ten opzichte van de referentietechnieken.

Door de combinatie adsorptie en oxidatie is naast de verwijdering van een breed palet microverontreinigingen te verwachten dat de spreiding van de verwijderingsrendementen van de individuele gidsstoffen minder is dan bij de referentietechnieken.

7.2 CO₂-FOOTPRINT

De CO₂-footprint van het PAC-O₃ concept 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 125 g CO₂/m³, 2077 ton CO₂ per jaar, en bestaat voornamelijk uit het verbruik van PAK, elektriciteit en zuurstof. De bijdrage van de PAK-dosering en ozonisatie zijn respectievelijk 62 en 63 g CO₂/m³. In Figuur 9 is de vergelijking gegeven met andere technieken. Bij hogere verwijderingsrendementen van 85-90% neemt de CO₂-footprint toe tot 198 g CO₂/m³. Voor de referentietechniek Ozon + Zandfiltratie geldt dat de CO₂-footprint daalt naar 98 g CO₂/m³ wanneer enkel ozonisatie zonder zandfiltratie wordt beschouwd.

FIGUUR 9 CO₂-FOOTPRINT VAN HET PAC-O₃ CONCEPT EN DE REFERENTIETECHNIKEN

7.3 ECOTOXICITEIT

Door zowel stand-alone PACAS als stand-alone nageschakelde ozonisatie neemt de ecotoxiciteit significant af (STOWA 2018-02 en 2018-46). Eenzelfde afname van de ecotoxiciteit is te verwachten voor het PAC-O₃ concept. Door de verwijdering van een breder palet aan microverontreinigingen is de afname van de ecotoxiciteit mogelijk zelfs nog groter.

De vorming van bromaat zal lager zijn dan bij stand-alone nageschakelde ozonisatie. Dit omdat de toegepaste ozondosering in het PAC-O₃ concept beduidend lager is. Mogelijk dat de ozondosering dermate laag is dat de vorming van bromaat überhaupt niet of slechts nauwelijks optreedt. Waar het optimum ligt tussen maximale verwijdering van microverontreinigingen en minimale vorming van bromaat moet in een vervolgfase onderzocht worden. Mogelijk dat de wijze van ozoninbreng hierop ook een effect heeft.

Verwacht wordt dat door de verminderde ozondosering er ook lagere concentraties aan potentieel toxische organische bijproducten gevormd worden. Absoluut gezien wordt er immers minder materiaal geoxideerd. Dit zou een positief effect kunnen hebben op de ecotoxiciteit van het behandelde water. Vervolgonderzoek moet uitwijzen wat de daadwerkelijke effecten zijn van de eventuele vorming van bijproducten.

7.4 JAARLIJKSE KOSTEN

De investerings- en jaarlijkse kosten van het PAC-O₃ concept voor een rwzi met een capaciteit van 100.000 i.e. zijn uitgewerkt in hoofdstuk 0. De kosten per behandelde kuub afvalwater (OPEX en CAPEX) bedragen afgerond € 0,10. Per kuub afvalwater dat door de rwzi stroomt bedragen de kosten € 0,08. Wanneer hogere verwijderingsrendementen van 85-90% gewenst zijn lopen de kosten per behandelde kuub water op tot € 0,13.

7.5 VERGELIJKING TEN OPZICHTE VAN REFERENTIETECHNIKEN

In Tabel 5 is de vergelijking gegeven op de toetsingscriteria tussen het PAC-O₃ concept en de referentietechnieken.

TABEL 5 VERGELIJKINGSTABEL PAC-O₃ CONCEPT TEN OPZICHTE VAN DE REFERENTIE-TECHNIEKEN

	Eenheid	PACAS	Ozon + ZF	Ozon	GAK	PAC-O ₃
CO ₂ -footprint ²	kg CO ₂ /m ³	122	128	98	325	125 – 198 ³
CO ₂ -footprint	ton CO ₂ /jaar	2.198	1.953	1.791	3.009	2.077 – 2.596 ³
Kosten per behandelde kuub	€/m ³	0,05	0,17	0,09	0,26	0,10 - 0,13 ³
Verwijderingsrendement gidsstoffen ⁴	%	70-75%	80-85%	80-85%	80-85%	70-75 – 85-90% ⁵
Breed palet verwijdering		-	-	-	-	+
Bromaatvorming		n.v.t.	-	-	n.v.t.	0 / + ⁶
Metaboliëtvorming		n.v.t.	-	-	n.v.t.	+ ⁷
Slibproductie	% ds	+7,6%	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	+4%

2 Per m³ behandeld afvalwater

3 Range CO₂-footprint en kosten per kuub behorende bij verwijderingsrendement van respectievelijk 70-75% en 85-90%

4 Verwijderingsrendement voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen benzotriazol, claritromycine, carbamazepine, diclofenac, metoprolol, hydrochloorthiazide, mengsel van 4- en 5-methylbenzotriazol, propranolol, sotalol, sulfamethoxazol, trimethoprim in elk 24h of 48h debiets- of tijdsproportioneel monster, waarbij rekening is gehouden met verblijftijd van het water in de rioolwaterzuivering

5 Het verwijderingsrendement kan door verhoging/verlaging van zowel de PAK-dosering en/of de ozondosering naar wens ingesteld worden, zie uitleg in paragraaf 7.1

6 Verwacht wordt dat er minder bromaatvorming optreedt dan bij stand-alone ozon, hoeveel gevormd wordt hangt van de dosering af

7 Verwacht wordt dat er minder metaboliëtvorming optreedt dan bij stand-alone ozon, hoeveel gevormd wordt hangt van de dosering af

8

VERVOLG PAC-O₃ PROJECT

De haalbaarheidsstudie naar het PAC-O₃ concept heeft een goed eerste inzicht gegeven in het PAC-O₃ concept. Onder andere de uitgevoerde lab-testen hebben ook tot nieuwe (onderzoeks) vragen en te testen hypothesen geleid. Voor de verdere ontwikkeling van het PAC-O₃ concept moeten deze vragen in een vervolgfase van het PAC-O₃ project beantwoord gaan worden.

8.1 ONDERZOEKSVRAGEN

Belangrijke vragen die naar voren zijn gekomen tijdens de haalbaarheidsstudie zijn;

- Hoe onderscheidt het PAC-O₃ concept zich ten opzichte van stand-alone ozonisatie of PACAS wanneer er naar een brede selectie microverontreinigingen gekeken wordt?
- Welke combinatie van PAK- en ozondosering is het meest optimaal voor de 70% verwijdering van 7 van de 11 gidsstoffen. Wat is daarvan het bijbehorende kostenplaatje?
- •Wat gebeurt er bij de meest optimale PAK- en ozondosering met bromaat? Kan de vorming van bromaat vermeden worden door nog lagere ozondoseringen toe te passen terwijl de microverontreinigingen nog voldoende worden verwijderd.
- Welke verwijderingsrendementen kunnen behaald worden door hogere PAK- en ozondoseringen? Wat is hiervan het effect op bromaatvorming en slibproductie, en wat is het bijbehorende kostenplaatje?
- Verschilt de verwijdering van ecotoxiciteit tussen het PAC-O₃ concept en stand-alone ozonisatie of PACAS?
- Welke type PAK past qua verwijderingsrendement van microverontreinigingen het beste bij het PAC-O₃ concept? En wat is de kosteneffectiviteit hiervan?
- Werkt het PAC-O₃ concept ook bij (nog) goedkopere PAKs dan getest in de lab-testen? Welke PAK-dosering is dan nodig, en welke effecten heeft dit op de rest van de rwzi (slibproductie, ontwatering, eindverwerking en CO₂-footprint)?
- Hoe doet het PAC-O₃ concept het op afvalwater van andere rwzi's dan van rwzi Horstermeer welke in te lab-testen is gebruikt. Met name op rwzi's met een hogere of lagere DOC-concentratie. En heeft dit effect op de vergelijking met stand-alone nageschakelde ozonisatie?

8.2 UITVOERINGSVORM

In het BC-overleg van 4 februari 2020 heeft de BC positief gereageerd op een vervolgfase voor het PAC-O₃ concept. Als mogelijke uitvoeringsvormen van een vervolgfase zijn diverse opties aan de BC voorgelegd. De meest haalbare variant is het uitvoeren van pilottesten op awzi Leiden-Noord waar medio 2021 een full-scale PACAS-installatie wordt gerealiseerd. Doordat de awzi een twee-straten principe heeft kan in het onderzoek de vergelijking worden gemaakt tussen PAC-O₃, PACAS, ozonisatie en een rwzi zonder aanvullende behandeling. De planning is om vanaf augustus 2021 met de pilottesten PAC-O₃ te beginnen.

9

LITERATUURLIJST

STOWA 2018-02 PACAS – Poederkooldosering in actiefslib voor verwijdering van microverontreinigingen – Onderzoek naar effectiviteit en efficiëntie op de rwzi Papendrecht - ISBN 978.90.5773.770.1

STOWA 2018-46 – Zoetwaterfabriek awzi de Groote Lucht: Pilotonderzoek ozonisatie en zandfiltratie - ISBN 978.90.5773.815.9

Kovalova, L., Siegrist, H., von Gunten, U., Eugster, J., Hagenbuch, M., Wittmer, A., Moser, R. en McArdell, C.S. (2013) Elimination of Micropollutants during Post-Treatment of Hospital Wastewater with Powdered Activated Carbon, Ozone, and UV – Environmental Science and Technology, Volume 47, 7899-7908

Almann, J., Ruhl ,A.K., Zietzschmann, F. en Jekel, M. (2014) Direct comparison of ozonation and adsorption onto powdered activated carbon for micropollutant removal in advanced wastewater treatment - Water Research, Volume 55, 185-193

Margot, J., Kienle, C., Magnet, A., Weil, M., Rossi, L., de Alencastro, L.F., Abegglen, C., Thonney, D., Chèvre, N., Schärer, M. en Barry, D.A. (2013) Treatment of micropollutants in municipal wastewater: ozone or powdered activated carbon? – Science of the Total Environment, Volumes 461–462, 480-498

BIJLAGE 1

UITGANGSPUNTEN TOETSINGSCRITERIA

De volgende afvalwaterhoeveelheid en -samenstelling is gehanteerd:

- Capaciteit rwzi 100.000 i.e. 150g TZV
- Dagdebiet 21.000 m³/dag
- DWA-piek 900 m³/h
- Ontwerp DWA-piek 1.040 m³/h
- Hydraulische capaciteit ozoninstallatie 1.040 m³/h
- CZV 11.000 kg/d
- BZV 4.400 kg/d
- Ptot 160 kg/d
- Nkj 1.000 kg/d
- Zwevende stof 5.200 kg/d

BIJLAGE 2

UITGANGSPUNTEN KOSTENBEREKENINGEN

BEREKENING INVESTERINGEN

Onvolledigheid

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

Aannemerskosten

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

Bouwkosten en stichtingskosten

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

NB. naast bovengenoemde opslagen zijn geen verdere posten onvoorzien opgenomen.

BEREKENING JAARLASTEN

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

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

Overige kosten inclusief btw

- Personeelskosten: € 50.000 per fte per jaar
- Elektriciteit: € 0,10/kWh
- 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