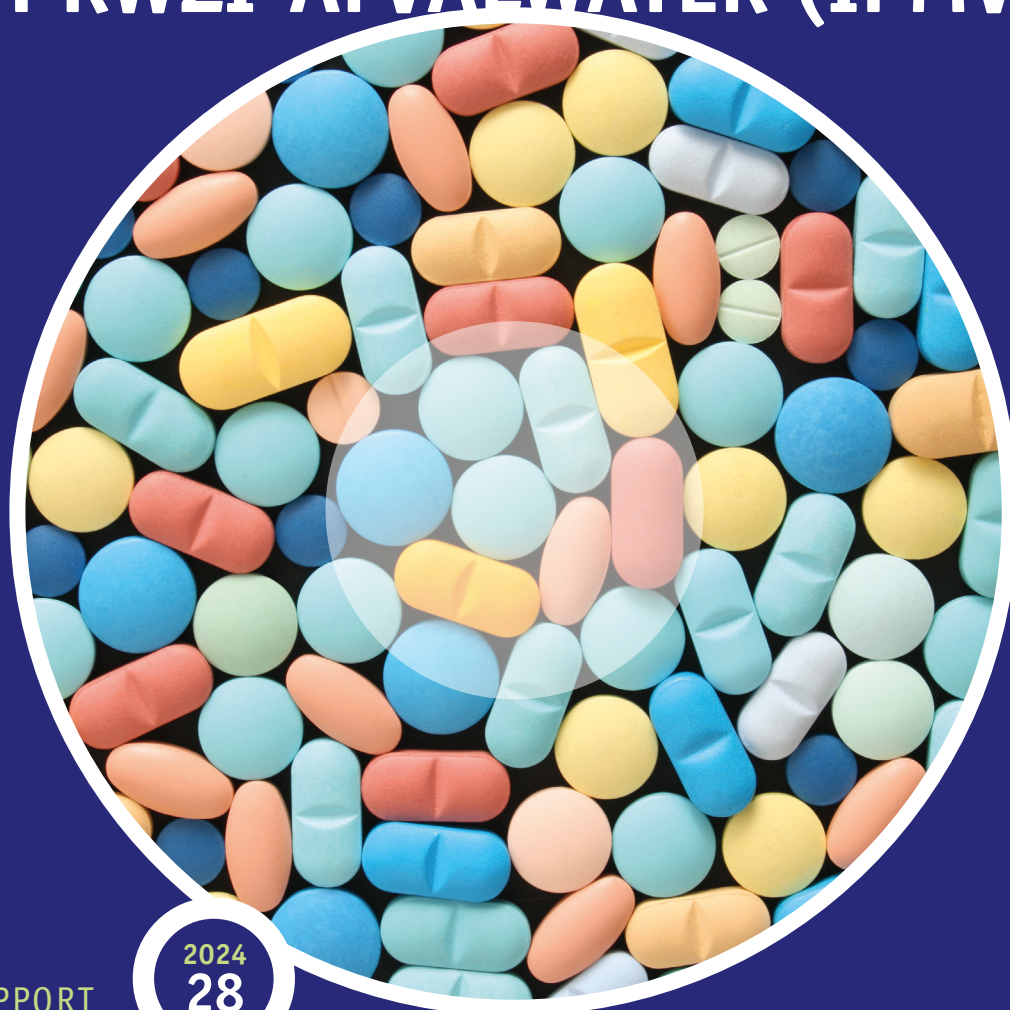


EVALUATIE INNOVATIEPROGRAMMA MICROVERONTREINIGINGEN UIT RWZI-AFVALWATER (IPMV)



RAPPORT

2024
28

EVALUATIE INNOVATIEPROGRAMMA MICROVERONTREINIGINGEN
UIT RWZI-AFVALWATER (IPMV)

RAPPORT

2024

28

ISBN 978.94.6479.052.8



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Patricia Clevering-Loeffen – Sweco
Joost van den Bulk – TAUW
Mirit Hoek – TAUW
Nazanin Moradi – Sweco

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Andrea Aldas-Vargas – Rijkswaterstaat
Manon Bechger – Waternet
Olaf Duin – Waterschap Hollandse Delta
Maaike Hoekstra – Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Robert Kras – Waterschap Aa en Maas
Ad de Man – Waterschapsbedrijf Limburg
Maarten Nederlof – Waterschap Rijn en IJssel
Coert Petri – Waterschap Vallei en Veluwe
Gerard Rijs – Rijkswaterstaat
Ivor Rohof – Waterschap Vechtstromen.nl
Ruud Schemen – Waterschap de Dommel
Cora Uijterlinde – STOWA
Roger Vingerhoeds – Waterschap Brabantse Delta

De projectuitvoerders van alle IPMV-pilotonderzoeken zijn meerdere keren actief betrokken bij deze evaluatie.

Gedurende de looptijd van het programma was Mirabella Mulder de spin in het web van het IPMV programma.

VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2024-28
ISBN 978.94.6479.052.8

De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

TEN GELEIDE

INNOVATIEVE TECHNIEKEN OM MICROVERONTREINIGINGEN TE VERWIJDEREN OP RWZI'S ZIJN KLAAR VOOR DE PRAKTIJK.

Het Innovatieprogramma microverontreinigingen (IPMV) heeft ons geleerd dat er nieuwe kansrijke technieken beschikbaar zijn om microverontreinigingen uit rwzi effluent te verwijderen. Deze technieken bieden qua verwijderingsrendement, kosten en/of CO₂-voetafdruk voordelen ten opzichte van de referentietechnieken ozon, PACAS en GAK.

De afgelopen 5 jaar zijn binnen het IPMV een groot aantal innovatieve technieken verkend op haalbaarheid en, indien kansrijk, opgeschaald naar een pilot. In deze studie zijn de resultaten van 15 pilot onderzoeken samengevat en met elkaar vergeleken. Uit de studie komt naar voren dat de referentie technieken ozon en PACAS vanuit kosten oogpunt interessant blijven maar dat nieuwe technieken op CO₂-voetafdruk, verwijderingsrendement en/of de verwijdering van nutriënten voordelen bieden.

Het IPMV is onderdeel van de nationale programma Ketenaanpak Medicijnresten, geïnitieerd door het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Het IPMV was een vijfjarig programma dat liep van 2019 tot en met 2023. Het doel van dit programma was om de weg vrij te maken voor veelbelovende nieuwe technieken, verbeteringen van bestaande technieken of innovatieve combinaties van bestaande technieken. Op die manier krijgen waterschappen meer verwijderingstechnieken tot hun beschikking waaruit ze de beste keuze kunnen maken voor hun eigen rioolwaterzuiveringen. Naast de maatregelen die op een rwzi genomen kunnen worden om invulling te geven aan waterkwaliteitsdoelstellingen, heeft bronbeleid de voorkeur.

Het draaide in het programma vooral om het geven van antwoorden met betrekking tot deze (combinaties van) technieken, op de volgende vragen:

- Wat is het jaargemiddeld verwijderingsrendement voor geselecteerde gidsstoffen. En hoe kan dit doorvertaald worden naar de stoffen in de EU richtlijn?
- Wat is de mate waarin ecotoxicologische risico's door lozing van afvalwater op oppervlaktewater worden verminderd ten opzichte van de referentietechnieken PACAS, GAK en ozon?
- Wat zijn de kosten ten opzichte van de referentietechnieken?
- Hoe verhoudt de duurzaamheid zich ten opzichte van de referentietechnieken?

Geconcludeerd wordt dat de onderzochte innovatieve technieken voordelen bieden in vergelijking met de referentietechnieken, zowel qua verwijderingsrendement, als op kosten en duurzaamheid. Een voorbeeld hiervan is de ontwikkeling van biologische actiefkoolfiltratie (BAKF) waardoor de standtijd van granulair kool aanzienlijk verlengd wordt en microverontreinigingen biologisch afgebroken worden. Een ander voorbeeld is de ontwikkeling van nieuwe adsorbentia, zoals cyclodextrines en high-silica zeolieten als alternatief voor actief kool. Voor verschillende van de technieken liggen er nog onderzoeksvragen die in een vervolgpilot of full scale onderzoek beantwoord dienen te worden.

Bovenal is van belang om op te merken dat de keuze voor een techniek, of combinaties van technieken, altijd een situatie-specifieke afweging is. Afhankelijk van de kenmerken van de rwzi, de concentraties microverontreinigingen en de aanwezigheid van bromide, (beperkingen ten aanzien van) de netaansluiting, beschikbaar budget en duurzaamheidsdoelstellingen moet per rwzi een afweging worden gemaakt voor de optimale oplossing.

Mark van der Werf
Directeur STOWA

AFKORTINGENLIJST

AMR:	Antimicrobial resistance, antibiotica resistentie
BAKF:	Biologisch actief kool filtratie
CO ₂ :	Koolstofdioxide
DOC:	Dissolved organic carbon: opgelost anorganisch koolstof
DWA:	Droog weer afvoer of droog weer aanvoer naar een rwzi
EBCT:	Empty bed contact time
GAK:	Granulair actief kool
GER:	Gross Energy Requirement, de bruto energie-eenheid van een stof, uitgedrukt in primaire energie.
IE:	Inwonerequivalent à 150 g TZV per dag
IPMV:	Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit afvalwater
KRW:	Kader Richtlijn Water
NOM:	Natuurlijk organisch materiaal
O ₃ :	Ozon
PAK:	Poeder actief kool
PACAS:	Powdered activated carbon in activated sludge
PFAS:	Poly- en perfluoralkylstoffen
RWA:	Regen weer afvoer of regenweer aanvoer naar een rwzi
RWZI:	Rioolwaterzuiveringsinstallatie
SIMONI:	Slimme integrale monitoring
STOWA:	Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
TRL:	Technology readiness level
TZV:	Totaal zuurstofverbruik
H ₂ O ₂ :	Waterstofperoxide

SAMENVATTING

Voor u ligt het evaluatierapport van het Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit afvalwater (IPMV). Dit rapport geeft een overzicht van de resultaten van 5 jaar IPMV. Deze evaluatie vat de resultaten van de 15 pilotonderzoeken samen en vergelijkt de resultaten van de onderzoeken met elkaar. Uit de studie komt naar voren dat de referentietechnieken ozon en PACAS vanuit kosten- oogpunt interessant blijven en dat nieuwe technieken voordelen bieden op kosten, CO₂-voetafdruk, verwijderingsrendement en/of de verwijdering van nutriënten.

AANLEIDING

In Nederland zijn er vanuit de Ketenaanpak Medicijnresten initiatieven genomen om de emissie van microverontreinigingen te verminderen. Een onderdeel van deze ketenaanpak is het verbeteren van het zuiveringsrendement van rwzi's op microverontreinigingen. Hiervoor werken de betrokken partijen nauw samen om snel resultaten te behalen: het verantwoordelijke Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, de Nederlandse waterschappen, de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer STOWA (het kenniscentrum van de waterschappen), kennisinstellingen en het bedrijfsleven.

Waterschappen nemen maatregelen en er wordt praktijkgericht innovatief onderzoek uitgevoerd. Het Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit afvalwater (IPMV) speelt hierbij een belangrijke rol. Het IPMV-programma is een vijfjarig programma dat liep van 1 januari 2019 tot en met 31 december 2023. Het doel van dit programma was om snel de weg vrij te maken voor veelbelovende nieuwe technieken, verbeteringen van bestaande technieken of innovatieve combinaties van bestaande technieken. Op die manier krijgen waterschappen binnen vijf tot zeven jaar meer verwijderingstechnieken tot hun beschikking waaruit ze de beste keuze kunnen maken voor hun eigen rioolwaterzuiveringen.

WERKWIJZE

Dit rapport biedt een evaluatie van de 15 pilot technologieën die binnen het IPMV onderzocht zijn. Verschillende technologieën zijn getest, waaronder poeder actief kool (PAK), granulair actief kool (GAK), overige adsorbentia (cyclodextrines en high-silica zeolieten), oxidatieve technieken zoals ozon en ultraviolet licht en waterstofperoxide (UV+H₂O₂), filtratietechnieken en combinaties van bovengenoemde technieken.

Gedurende het hele programma zijn dezelfde kosten- en CO₂-kentallen gebruikt om de onderlinge vergelijking mogelijk te maken. Deze kentallen dateren uit 2018 en zijn voor deze evaluatie geactualiseerd naar 2024. Wat betreft het verwijderingsrendement op microverontreinigingen zijn niet alleen de elf Nederlandse gidsstoffen beschouwd maar is ook een vergelijking gemaakt met de gidsstoffen uit de beoogde methodiek voor de verwijdering van microverontreinigingen uit de herziene EU-richtlijn Stedelijk afvalwater. Deze is namelijk afwijkend van het in het IPMV gebruikte protocol met gidsstoffen.

In deze evaluatie zijn alle technieken onderling vergeleken. Hiertoe is in overleg met de projectuitvoerders gezocht naar de ontwerpspecificaties die horen bij een verwijdering van meer dan 80% van zeven van de elf gidsstoffen (7/11) ten opzichte van het rwzi-influent. Door deze verwijdering eenduidig te maken, kunnen de technieken onderling vergeleken

worden op CO₂ en kosten. Dit sluit beter aan bij de nieuwe EU-richtlijn die ook 80% verwijdering beoogt (weliswaar op andere stoffen en in elk DWA monster).

De technologieën zijn onderling vergeleken op:

- het verwijderingsrendement;
- de kosten;
- CO₂-voetafdruk;
- verwijdering van ecotoxiciteit;
- verwijdering van nutriënten;
- minimalisatie bromaatvorming;
- verwijdering van antibioticaresistente, PFAS en microplastics;
- de mogelijkheden voor hergebruik van het effluent;
- Technological readiness level.

Ook is de gevoeligheid op kosten en CO₂ van een aantal parameters onderzocht en zijn conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan onder andere voor vervolgstappen zoals ontwerp.

RESULTATEN

De belangrijkste resultaten zijn samengevat in navolgende tabel. In deze tabel zijn zowel de prestaties van de referentietechnieken als de vijftien onderzochte technieken samengevat.

Rendement, CO₂-voetafdruk, indicatieve kosten, bijvangst en TRL voor de standaard 100.000 i.e rwzi, situatie 2024

Techniek	Overall jaarrendement 7/11 (%)	CO ₂ (g CO ₂ / m ³ _{rwzi-influent})	Kosten (EUR/m ³ _{rwzi-influent})	Bijvangst	TRL
Referentie PACAS	80-85	184	0,08 - 0,12		9
Referentie GAK	80-85	253	0,18 - 0,26		9
Referentie Ozon	80-85	77	0,08 - 0,12		9
PAK+doek	ca. 80	135	0,17 - 0,25	P-verwijdering mogelijk	7
PACAS Nereda	80-85	195	0,10 - 0,14		8
BODAC	ca. 80	81	0,14 - 0,22	NH ₄ verwijdering, P-verwijdering mogelijk	6-7
BioGAK	ca. 80	50	0,12 - 0,18	NH ₄ verwijdering, P-verwijdering mogelijk	6-7
O3-STEP	ca. 80	125	0,17 - 0,25	NO ₃ en P-verwijdering mogelijk	8
UpflowGAK-Carboplus	80-85	161	0,14 - 0,20	P-verwijdering mogelijk	8
UpflowGAK-Dynacarbon	80-85	187	0,20 - 0,30	P-verwijdering mogelijk	8
ZF+UV/H ₂ O ₂	75-80	574	0,68 - 1,02	NO ₃ en P-verwijdering mogelijk	5-6
O ₃ +ultrasound	85-90	74	0,08 - 0,12		5
PAK+O ₃	ca. 85	144	0,14 - 0,22		7-8
Microforce	> 80	69	0,17 - 0,25	NH ₄ verwijdering	6
Aurea (BO ₃)	ca. 85	66	0,13 - 0,19	NH ₄ verwijdering, P-verwijdering mogelijk	6
DEX-filter	80-85	135	0,19 - 0,29	Mogelijk NH ₄ , NO ₃ en P-verwijdering ²	5
AdOx	ca. 75 ¹	71	0,12 - 0,18	NH ₄ verwijdering met andere zeoliet op labschaal aangetoond	5
NF+UV/H ₂ O ₂	85-90	183	0,36 - 0,54	Hoogwaardig hergebruik effluent mogelijk, P-verwijdering	5
O ₃ +keramischeMF	ca. 80	167	0,50 - 0,76	Hoogwaardig hergebruik effluent mogelijk	6

¹ Uitgangspunt is 70% geweest voor de 100.000 i.e rwzi. Indien een groter aandeel van het totale debiet van de rwzi wordt behandeld, zal het totaal rendement ook hoger zijn. Er loopt nog onderzoek naar deze technologie.

² Nader onderzoek nodig naar mechanisme.

BESCHOUWING

De waterschappen zullen de komende jaren besluiten moeten nemen op basis van de in de nieuwe EU-richtlijn verplicht gestelde verwijdering van microverontreinigingen op bepaalde rwzi's. En elk schap zal een (eigen) keuze gaan maken welke technologie het meest passend is op basis van noodzakelijk rendement en definitie hiervan (elk monster, stofgroepen), kosten, CO₂-voetafdruk, aanvullende eisen voor N, P en hergebruik effluent, (mogelijke) individuele eisen uit de richtlijn prioritaire stoffen, risico op bromaatvorming, eisen met betrekking tot energieaansluiting, flexibiliteit, energieaansluiting, hulpstoffenverbruik, ruimtebeslag en TRL.

De in deze evaluatie genoemde ontwerputgangspunten, criteria, bijvangst en TRL-niveaus, samen met de nog verder te ontwikkelen demonstratie en full scale-praktijkervaringen zullen hier belangrijke input voor zijn.

De keuze voor een het ontwerp van een installatie voor de verwijdering van microverontreinigingen is altijd maatwerk. In de nieuwe EU-richtlijn stedelijk afvalwater is uitgegaan van een rendement van 80% in nagenoeg elk DWA monster (10 van 12 of 21 van 24 monsters) voor het verschil tussen totaal effluent en influent van de gehele rwzi. Bij deze evaluatie van het IPMV is uitgegaan van een jaarrendement van 80%, waarbij voor de rest van de rwzi (vooral de biologie) is uitgegaan van een gemiddeld rendement van 40%. In de praktijk zal het totale rendement over een rwzi afhangen van meerdere factoren, o.a.:

- Verwijderingsrendement van microverontreinigingen door de biologie in de rwzi op dat moment (seizoensafhankelijk);
- Aandeel van het rioolwater dat behandeld wordt met een technologie;
- RWA / DWA verhouding van de aanvoer;
- Ingaande concentraties aan microverontreinigingen, opgelost anorganisch koolstof (dissolved organic carbon: DOC) en zwevende stof.

De getallen in deze studie gelden daarom als een indicatie. Komende jaren zal meer bekend worden over de verwijderingsrendementen van de (combinatie-)technieken die slechts korte tijd zijn getest. Ook zal meer ervaring beschikbaar komen aan welk minimaal verwijderingsrendement elk DWA monster voldoet. De berekende kosten van de technieken zijn een momentopname en kunnen in de praktijk variëren door marktwerking, wijze van aanbesteding en locatiespecifieke omstandigheden.

In de praktijk is er voor elke rwzi een locatiespecifieke afweging nodig. Zo is het bijvoorbeeld niet altijd logisch om een PACAS-installatie te realiseren als een rwzi ook te maken krijgt met aangescherpte lozingseisen voor nutriënten. In dit geval is de volledige biologische ruimte gewenst voor een hogere stikstof-, en fosfor verwijdering. In een dergelijk geval is een nageschakelde techniek voor de verwijdering van microverontreinigingen die mogelijk ook aanvullend nutriënten verwijdert logischer. Bovendien moet een aanvullende zuiveringsstap in te passen zijn in de hydraulische lijn van een zuivering, moet er voldoende capaciteit van het elektriciteitsnet beschikbaar zijn en bepaalt de aanwezige bromideconcentratie of ozonisatie wenselijk is. Verder moet de vraag gesteld worden of het op een specifieke rwzi realistisch is om een enkelvoudige techniek toe te passen of dat een combinatietechniek misschien meer flexibiliteit kan bieden. Ook kan in de keuze het vooruitzicht van individuele norm(en) meegenomen worden die naar verwachting voor een (aantal) microverontreiniging(en) gaat gelden op basis van de EU Richtlijn prioritaire stoffen.

Als aanbeveling naar de praktijk is het vooral van belang om eerst de locatie specifieke situatie goed te kennen voordat een technologiekeuze en ontwerp wordt gemaakt. Bijvoorbeeld door het rendement van de betreffende rwzi over het gehele jaar te meten, de noodzakelijk specifieke metingen uit (laten) te voeren die noodzakelijk zijn (b.v. bromide gehalten) en in geval van technieken met een laag TRL-niveau een pilot uit te voeren.

Naast het vereiste verwijderingsrendement zijn ook de afwegingen in duurzaamheid van belang. Directe nanofiltratie komt vanuit deze studie niet meteen in beeld als kosteneffectieve techniek met een lage CO₂-voetafdruk maar de techniek is wél in staat om effluent op te werken naar een hoogwaardige kwaliteit die lokaal toegepast kan worden als proceswater of ten behoeve van verdere opwerking naar drinkwater. Met de toenemende behoefte aan schoon water kan dit een belangrijke afweging zijn.

Een ander aspect dat vanuit duurzaamheid van belang is betreft de ontwikkeling van duurzaam PAK en GAK. De ontwikkeling van met name duurzame poederkolen leidt ertoe dat de CO₂-voetafdruk van deze grondstof aanzienlijk lager kan uitvallen. Beschikbaarheid, prestaties, kosten en inzicht in de CO₂-voetafdruk van niet-fossiele PAK zijn daarvoor noodzakelijk. Uit de gevoeligheidsanalyse met niet-fossiele PAK blijkt dat de impact op de CO₂ voetafdruk heel groot kan zijn..

Tot slot is de beschikbaarheid van een voldoende grote stroomaansluiting en/of voldoende netcapaciteit een belangrijk locatiespecifiek aandachtspunt . Op het moment dat er weinig netcapaciteit beschikbaar is vallen technieken met een hoog stroomverbruik af.

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Binnen het IPMV zijn in korte tijd een groot aantal technieken ontwikkeld en dichterbij technologische volwassenheid gekomen (hogere TRL). Een aantal technieken behoeven nog nader onderzoek: Dit betreffen het DEXfilter, AdOx, NF+UV/H₂O₂, O₃+ultrasound en ZF+UV/H₂O₂. Voor deze technieken liggen er nog onderzoeksvragen of moeten er optimalisaties gedaan worden voordat deze toepasbaar zijn op een rwzi. Voor de membraantechnieken geldt dat ook.

De meeste technologieën bereikten een verwijderingsrendement van 80% of hoger op zeven van de elf Nederlandse gidsstoffen, als jaargemiddelde en gemeten over het totale influent van de rwzi.

Afhankelijk van het werkingsprincipe van de gecombineerde technieken en de gehanteerde doseringen, resulteert de combinatie al dan niet in een hogere verwijdering van meer stoffen dan de losse technologie ('breder palet'). Dit geldt alleen indien het ene werkingsprincipe andere stoffen beter verwijdert dan het andere werkingsprincipe. Diclofenac is met ozon bijvoorbeeld goed te verwijderen maar met PACAS een stuk minder efficiënt.

Of de technieken met de in deze evaluatie benoemde ontwerputgangspunten ook daadwerkelijk zullen voldoen aan de EU richtlijn is afhankelijk hoe de EU richtlijn inclusief bemonstering in de Nederlandse wetgeving wordt verankert. Verschillen tussen de IPMV uitwerking van verwijderingsrendementen en de EU richtlijn zijn onder andere een jaargemiddeld rendement in IPMV versus een minimaal rendement in elk monster bij de EU en er gelden andere gidsstoffen, waarbij niet alleen degene met het hoogste rendement meetellen (IPMV), maar er ook een verdeling tussen twee stofcategorieën is (EU). Door de verschillen

tussen het IPMV onderzoek en de methodiek voor zover nu bekend is voor de nieuwe EU richtlijn stedelijk afvalwater, wordt het minimale verwijderingsrendement in de rwzi plus de technologie van belang en hoe het 'brede palet' van de verwijderingsrendementen is over de twee stofcategorieën van de EU richtlijn. Het is aanbevolen de impact van de stofcategorieën en regelruimte om te anticiperen op de minimale rendementen mee te nemen in de multi-criteria-afweging van de techniekkeuze.

De kosten van de onderzochte technieken voor de verwijdering van micro verontreinigingen lopen uiteen. Voor de meeste technieken liggen de indicatief ingeschatte kosten tussen de 10 en 25 cent per m³ rwzi influent voor technieken met poederkool, GAK en/of ozon en bij een schaalgrootte van 100.000 i.e.. Membraantechnieken (NF+UV/H₂O₂ en O₃+keramische MF) hebben een hoger kostenplaatje maar bieden de mogelijkheid om rwzi effluent hoogwaardig her te gebruiken als bijvoorbeeld industriewater. De nieuwe adsorbentia cyclodextrines en high-silica zeolieten vereisen meer onderzoek voordat de kosten en verwijderingsrendementen vastgesteld kunnen worden.

Combinatietechnieken bieden meer flexibiliteit in het voldoen aan de gestelde lozingseisen doordat er aan meerdere knoppen gedraaid kan worden. Op het moment dat het verwijderingsrendement in de biologie laag is kan daardoor makkelijker voldaan worden aan het vereiste rendement. Hier hangt initieel echter wel een prijskaartje aan; de combinatietechnieken zijn qua stichtingskosten duurder dan een stand-alone techniek. PACAS heeft de laagste stichtingskosten en, samen met ozon, de laagste kosten per m³. Qua jaarlijkse kosten vallen de combinatietechnieken op basis van ozon en actief kool niet veel duurder uit dan de stand-alone technieken.

De CO₂-voetafdruk per m³ rwzi-influent zijn in kaart gebracht en liggen tussen de 50 en 200 g CO₂/m³_{rwzi-influent}. Sommige technologieën zoals ZF+ H₂O₂/UV hebben een aanzienlijk hogere CO₂-voetafdruk. Het principe van biologische actief koolfiltratie (BAKF) in de technieken BODAC, Aurea (BO₃) en het Bio-GAK biedt kansen om de CO₂-voetafdruk van de verwijdering van microverontreinigingen te reduceren. Hoewel kansrijk, dient BAKF zich in de praktijk nog te bewijzen op rwzi-schaal en op verschillende effluentsamenstellingen. In totaal hebben zeven technieken een CO₂-voetafdruk onder de 85 g CO₂/m³_{rwzi-influent} en worden als laag beschouwd. Dit zijn naast de bovengenoemde BAKF, de ozon-referentie, Microforce, AdOx en O₃+ultrasound. Indien uitgegaan wordt van Nederlandse groene stroom in plaats van grijze stroom, verschuiven acht technieken naar een CO₂-voetafdruk onder de 50 g CO₂/m³_{rwzi-influent}.

De methodeontwikkeling en meting van ecotoxiciteit is een grote meerwaarde geweest van de IPMV pilot onderzoeken. Vanwege de kosten en de doorlooptijd is per pilot onderzoek slechts een beperkt aantal ecotoxiciteit metingen uitgevoerd. De reductie in ecotoxiciteit is onderzocht aan de hand van Bio-assays en resulteert voor alle technieken in een reductie van gemiddeld 50% of meer over het totale effluent van de rwzi. Voor PACAS en GAK filters ligt het rendement rond de 50% terwijl combinatietechnieken zoals PAC-O₃, Microforce en ZF+UV/H₂O₂ een reductie tot 75% laten zien.

Voor ozon geldt dat het vereiste verwijderingsrendement op microverontreinigingen gehaald kan worden tegen relatief lage kosten en een relatief beperkte CO₂-voetafdruk. Een nadeel is dat bromaat gevormd kan worden uit aanwezig bromide. Gedurende het IPMV is veel ervaring opgedaan met de (on)mogelijkheden om bromaatvorming tegen te gaan. Naast de

ingaaende bromideconcentratie speelt de benodigde ozondosering en de wijze van inbreng een belangrijke rol in het tegengaan van bromaatvorming. Een lage ozondosering in combinatie met fijne bellen diffusors vermindert het risico op bromaatvorming sterk. De combinatie technieken met ozon in het IPMV onderzoek spelen hierop in; ze hanteren in vergelijking met stand-alone ozon een lagere ozondosering. Specifiek voor O3-STEP geldt dat in de ozon gevormd bromaat onder anoxische condities in het GAK filter gereduceerd wordt.

De ontwikkeling van BAKF (BODAC, bioGAK, Aurea (BO₃)) om microverontreinigingen vergaand te verwijderen is een belangrijke ontwikkeling binnen het IPMV. BAKF biedt de mogelijkheid om een GAK-filter toe te passen met een lage CO₂-voetafdruk en tegen lage operationele kosten, mits het GAK in de praktijk ook 15 jaar meegaat. Dit dient in de praktijk te worden vastgesteld. Afhankelijk van de specifieke rwzi kan BAKF als stand-alone of als combinatie techniek met ozon worden toegepast waarbij het ozonverbruik sterk gereduceerd wordt.

Het Microforce-concept, waarbij geen gebruikgemaakt wordt van granulair kool maar HDPE-dragermateriaal is eveneens veelbelovend doordat een laag ozonverbruik in combinatie met biologische afbraak resulteert in lage kosten per m³ en een lage CO₂-voetafdruk,

Daarnaast zijn er een aantal technieken die naast medicijnen ook andere stoffen kunnen verwijderen zoals nutriënten. Met de grote KRW-opgave ligt hier een koppelkans en kan dit een motivatie zijn om voor een specifieke (combinatie)techniek te gaan als alternatief voor en/of aanvulling op het optimaliseren van de waterlijn voor nutriëntenverwijdering.

Membraanfiltratietechnieken in combinatie met een oxidatiestap lenen zich om hoogwaardig hergebruik van effluent te combineren met de verwijdering van microverontreinigingen. Op rwzi's waar hoogwaardig hergebruik van effluent de doelstelling is kunnen dus relatief eenvoudig tegelijk ook microverontreinigingen verwijderd worden.

De gevoeligheidsanalyse laat zien dat de invloed van duurzaamheidsmaatregelen, zoals groene stroom en duurzame PAK, voor een dusdanige verbetering van de CO₂ voetafdruk zorgt voor sommige technieken, dat de onderlinge rangschikking verandert.

STOWA IN HET KORT

HOE WE WERKEN

STOWA is het kennis- en innovatiecentrum voor regionale waterbeheerders in Nederland; de waterschappen en provincies. We helpen ze met het verkrijgen van nieuwe kennis en inzichten die nodig zijn om de opgaven van de regionale waterbeheerders beter te kunnen uitvoeren. Dat doen we door kennisvragen te formuleren en te selecteren in programmacommissies. We zetten ons onderzoek uit bij een keur aan experts, adviesbureaus, instituten en universiteiten, die we begeleiden tijdens hun werk. We zorgen voor de beschikbaarstelling en verspreiding van de kennis, inzichten en antwoorden aan de gezamenlijke waterbeheerders. We stimuleren de uitwisseling van kennis en ervaringen, via bijeenkomsten, werkgroepen, excursies, conferenties en communities of practice. We werken samen met onder andere ministeries, Rijkswaterstaat, gemeenten, drinkwaterbedrijven.

WAT WE ONDERZOEKEN

Inhoudelijk richt Stowa zich op alle onderdelen van waterbeheer, van waterkering en stedelijk waterbeheer tot waterzuivering en watersystemen. Belangrijke thema's daarbij zijn klimaatadaptatie, waterveiligheid, waterkwaliteit en ecologie, energietransitie en circulaire economie.

De kennisvragen die Stowa beantwoordt liggen meestal op technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied. Onze kennis is altijd gericht op de praktijk van regionale waterbeheerders. Dat is waar we voor staan, als Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

WIE WE ZIJN

STOWA is als kennisorganisatie onafhankelijk, onpartijdig en transparant. De afnemers van onze kennis moeten erop kunnen vertrouwen dat de inhoud van onze rapporten objectief en representatief is. Alleen zo kan onze kennis worden ingezet voor beter waterbeheer en innovaties die antwoord geven op de uitdagingen van vandaag en morgen. Het is aan regionale waterbeheerders zelf te bepalen hoe ze de kennis van STOWA in de praktijk gebruiken. STOWA kan daarbij een rol spelen als adviseur, maar is geen uitvoerder of regisseur.

STOWA is een stichting die de richtlijnen volgt voor organisaties zonder winstoogmerk (RJ-640). In ons jaarverslag is daarom naast de cijfermatige jaarrekening onder meer ook een directieverslag over de stichting, haar activiteiten en kentallen opgenomen.

EVALUATIE INNOVATIEPROGRAMMA MICROVERONTREINIGINGEN UIT RWZI-AFVALWATER (IPMV)

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	AFKORTINGENLIJST	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
1.1	Aanleiding IPMV	1
1.2	Aanpak IPMV	1
1.3	Evaluatie IPMV	2
1.4	Leeswijzer	2
2	UITGANGSPUNTEN	4
2.1	Afbakening	4
2.2	Overzicht geteste technologieën	4
2.3	100.000 ie zuivering	5
2.4	Referentietechnologieën	6
2.5	Verwijdering microverontreinigingen	7
	2.5.1 IPMV en Nederlandse subsidieregeling	7
	2.5.2 EU Richtlijn	8
2.6	CO ₂ -voetafdruk	8
2.7	Kosten	9
2.8	Ecotoxicologische risico's	11
2.9	Bijvangst	11
2.10	Technology Readiness Level (TRL)	12
3	VERGELIJKING GETESTE TECHNOLOGIEËN	13
3.1	Geactualiseerde referentietechnologieën	13
3.2	15 innovatieve technologieën	15
3.3	Adsorptie aan Poeder Actiefkool (PAK)	17
	3.3.1 Werkingsprincipe en optimalisaties	17
	3.3.2 Beschrijving innovatieve technieken	18
	3.3.3 Vergelijking	19

3.4	Adsorptie aan Granulair Actiefkool (GAK)	20
3.4.1	Werkingsprincipe en optimalisaties	20
3.4.2	Beschrijving innovatieve technieken	21
3.4.3	Vergelijking	24
3.5	Adsorptie aan overige niet-fossiele materialen	27
3.5.1	Werkingsprincipe en optimalisaties	27
3.5.2	Beschrijving innovatieve technieken	28
3.5.3	Vergelijking	29
3.6	Oxidatieve technieken	30
3.6.1	Werkingsprincipe en optimalisaties	30
3.6.2	Beschrijving innovatieve technieken	31
3.6.3	Vergelijking	35
3.7	Filtratietechnieken in combinatie met oxidatie	38
3.7.1	Werkingsprincipe en optimalisaties	38
3.7.2	Beschrijving innovatieve technieken	38
3.7.3	Vergelijking	39
4	PRESTATIES TECHNOLOGIEËN	40
4.1	Kwantitatief	40
4.1.1	Verwijderingsrendementen: NL 7 van de 11 en EU 6 van de 12	40
4.1.2	CO ₂ voetafdruk	44
4.1.3	Kosten	50
4.1.4	Gevoeligheidsanalyse	54
4.2	Kwalitatief	62
4.2.1	Bio-assays: ecotoxiciteit	62
4.2.2	Bijvangst nutriënten: ammonium, nitraat en fosfaat	62
4.2.3	Minimalisatie bromaatvorming	63
4.2.4	Bijvangst antibiotica resistentie (AMR: Antimicrobial Resistance)	64
4.2.5	Bijvangst PFAS	65
4.2.6	Bijvangst microplastics	66
4.2.7	Bijvangst hergebruik effluent	67
5	TECHNOLOGY READINESS LEVEL (TRL)	68
6	BESCHOUWING, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	70
6.1	Samenvatting prestaties en TRL	70
6.2	Beschouwing	71
6.3	Conclusies	72
6.4	Aanbevelingen	73
7	REFERENTIES	75
BIJLAGE 1	IPMV STUDIES EN ONDERZOEK	77
BIJLAGE 2	STANDAARD RWZI VAN 100.000 I.E. Å 150 G TZV	78
BIJLAGE 3	ONDERBOUWING CO ₂ VOETAFDruk	81
BIJLAGE 4	CRITERIA REFERENTIETECHNIEKEN UITGANGSJAAR 2018	83
BIJLAGE 5	FACTSHEETS	84
BIJLAGE 6	VERGELIJKING VERWIJDERINGSRENDEMENT COMBINATIE TECHNIEKEN	132
BIJLAGE 7	CO ₂ -VOETAFDruk INVULBLAD	139

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING IPMV

Overall ter wereld bestaan zorgen over de aanwezigheid van microverontreinigingen in water. Deze stoffen worden steeds beter gedetecteerd en er komen constant nieuwe verontreinigende stoffen bij. Veel van deze verontreinigingen belanden in het riool en worden niet volledig verwijderd bij de rioolwaterzuivering, waardoor ze uiteindelijk in oppervlaktewater terechtkomen. Dit vormt een risico voor de volksgezondheid, drinkwaterproductie en ecologische waterkwaliteit.

In Nederland zijn er vanuit de Ketenaanpak Medicijnresten al initiatieven genomen om de emissie van microverontreinigingen te verminderen. Een onderdeel van deze ketenaanpak is het verbeteren van het zuiveringsrendement van rwzi's op microverontreinigingen. Hiervoor werken alle betrokken partijen nauw samen om snel resultaten te behalen: het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, de Nederlandse waterschappen, de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer STOWA (het kenniscentrum van de waterschappen), kennisinstellingen en het bedrijfsleven.

Waterschappen nemen maatregelen en er wordt praktijkgericht innovatief onderzoek uitgevoerd. Het Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit afvalwater (IPMV) speelt hierbij een belangrijke rol. Het IPMV-programma is een vijfjarig programma dat liep van 1 januari 2019 tot en met 31 december 2023.

1.2 AANPAK IPMV

Het doel van het IPMV was om technologieën voor de verwijdering van microverontreinigingen uit rwzi-effluent te ontwikkelen of bestaande technieken te verbeteren, die een significante verbetering kunnen geven ten opzichte van huidige bewezen technieken voor verwijdering van microverontreinigingen uit rwzi-afvalwater op het gebied van kosten, CO₂-voetafdruk of effluentkwaliteit.

Daarnaast is er aandacht voor mogelijke bijvangst, zoals een verbetering van de verwijdering van stikstof, fosfaat, PFAS en microplastics, vermindering van antibioticaresistentie en pathogenen en het hergebruik van effluent.

In 2018 is een inventarisatie uitgevoerd onder waterschappen om te bepalen welke technologieën verder onderzocht moesten worden. In 2020 zijn er nog vier technologieën toegevoegd op basis van een openbare Call for Proposals. In deze tweede call werd een hoger verwijderingsrendement gehanteerd (80% in plaats van 70% voor zeven van de elf gidsstoffen ten opzichte van rwzi-influent) en was er meer focus op een lage CO₂-voetafdruk. Het doel van het IPMV-programma was om technologieën te ontwikkelen die tegen 2027 op demonstratieschaal toegepast kunnen worden op rwzi's.

Elk project binnen het IPMV begint met een (theoretische) haalbaarheidsstudie waarin onderbouwd wordt wat de werkingsprincipes zijn, de verwachte effluentkwaliteit, de kosten en CO₂-uitstoot voor een standaard Nederlandse rwzi (met een capaciteit van 100.000 i.e.).

Als de technologie voldoende onderbouwd is en de verwachting is dat deze beter presteert dan de referentietechnologieën PACAS, ozon of granulair kool, kan er overgegaan worden naar een pilotfase. Dit resulteerde in 22 haalbaarheidsstudies en 15 pilotprojecten in de afgelopen vijf jaar.

Gedurende het IPMV zijn er andere onderzoeken toegevoegd op basis van discussies in de themabegeleidingscommissies, de overkoepelende begeleidingscommissie (BC) en de stuurgroep. Deze onderzoeken omvatten de toevoeging van PFAS- en antibioticaresistentie analyses aan de pilot onderzoeken en studies naar robuuste bemonsteringsmethode, oxidatieproducten, poederkoolmeting in rwzi-effluent, een verkenning van het vrijkomen van microverontreinigingen in vergisting en een verkenning van natuurlijke zuiveringssystemen voor de verwijdering van microverontreinigingen. Zie ook Bijlage 1.

1.3 EVALUATIE IPMV

Het IPMV-programma eindigde 31 december 2023 en is in 2024 geactualiseerd en geëvalueerd.

Gedurende het hele programma zijn dezelfde kosten- en CO₂-kentallen gebruikt, om de onderlinge vergelijking mogelijk te maken. Deze kentallen dateren uit 2018 en zijn in 2024 geactualiseerd aan de meest recente kentallen. Ook is een vergelijking met de beoogde methodiek voor de verwijdering van microverontreinigingen uit de EU-richtlijn verwerkt, deze is namelijk afwijkend van het in het IPMV gebruikte protocol met gidsstoffen.

Verder zijn alle technieken onderling vergeleken. Hiertoe is in overleg met de projectuitvoerders gezocht naar de ontwerpspecificaties die horen bij circa 80% of meer verwijdering van zeven van de elf gidsstoffen ten opzichte van het rwzi-influent. Door deze verwijdering gelijk te trekken, is de onderlinge vergelijking op CO₂ en kosten eenduidiger. Dit sluit beter aan bij de nieuwe EU-richtlijn die ook 80%, weliswaar op andere stoffen, verwijdering beoogd.

In de vergelijking is verder gekeken naar de ontwerpuitgangspunten, bijvangst, TRL en kennisvragen voor opschaling, verbetering en/of aanvullend onderzoek. Ten slotte zijn conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

1.4 LEESWIJZER

Dit rapport is geschreven om, op hoofdlijnen, een overzicht te geven van de in het IPMV onderzochte innovatieve technieken en de verschillen en overeenkomsten tussen de technieken. Deze technieken zijn relevant voor de rwzi's in Nederland die microverontreinigingen gaan verwijderen. De evaluatie is daarom voornamelijk bedoeld voor beleidsmakers, adviseurs, technologiën etc. en gaat uit van een solide basiskennis in het werkveld.

De resultaten in dit rapport zijn indicatief en helpen een beeld vormen van de verschillende technieken voor bijvoorbeeld een technologiekeuze en de bijbehorende criteria voor een multicriteria afweging. Het is belangrijk te realiseren dat de daadwerkelijke keuze voor

een techniek maatwerk en locatie specifiek beoordeeld moet worden. Daarnaast blijven de meeste technieken die beschreven zijn in dit rapport doorontwikkelen en komt er steeds meer praktijkinformatie beschikbaar die de informatie uit dit rapport zal bevestigen en detailleren of verder zal optimaliseren.

2

UITGANGSPUNTEN

2.1 AFBAKENING

Deze evaluatie gaat in op een aantal kwantitatieve en kwalitatieve aspecten die benoemd zijn in onderstaande tabel.

TABEL 2.1 ASPECTEN WAAROP DE TECHNIEKEN ZIJN VERGELEKEN

Kwalitatief/kwantitatief	Aspecten	Paragraaf in dit rapport
Kwantitatief*	Verwijderingsrendementen	4.1.1
	CO ₂ -voetafdruk	4.1.2
	Kosten	4.1.3
	Gevoeligheidsanalyse: effect van relevante kosten-en ontwerpuitgangspunten op de CO ₂ -voetafdruk en/of de kosten	4.1.4
Kwalitatief	Bio-assays: ecotoxiciteit	4.2.1
	Bijvangst nutriënten	4.2.2
	Minimalisatie bromaatvorming	4.2.3
	Bijvangst AMR	4.2.4
	Bijvangst PFAS	4.2.5
	Bijvangst microplastics	4.2.6
	Bijvangst hergebruik effluent	4.2.7

* Op basis van een 100.000 i.e. standaard rwzi, zie paragraaf 2.3

De haalbaarheidsstudies die binnen het IPMV zijn uitgevoerd die niet geleid hebben tot een pilotonderzoek (zie bijlage 1) zijn niet verder toegelicht in deze evaluatie. Ook overige waterkwaliteitsdoelen zoals voor de Kaderrichtlijn Water en projecten buiten het IPMV zijn niet meegenomen.

2.2 OVERZICHT GETESTE TECHNOLOGIEËN

De in pilotvorm geteste technologieën, die verwerkt zijn in deze evaluatie, zijn in een eerdere fase gecategoriseerd per werkingsprincipe, en betreffen:

- Poeder actief kool (PAK)
1. Poeder Actief Kool in combinatie met doekfiltratie (PAK+doek) (RWZI Vinkel)
 2. PACAS Nereda (Simpelveld)
 - Granulair actief kool (GAK)
 3. Biological Oxygen-Dosed Active Carbon (BODAC) (RWZI Emmen)
 4. Continu Bio-GAK + lucht (BioGAK+lucht) (RWZI Emmen)
 5. O3-STEP zonder N en P verwijdering (RWZI Horstermeer)
 6. Continu Upflow microGAK (UpflowGAK) (RWZI Hapert)
 - Oxidatieve technieken
 7. ZF+UV/H₂O₂ (RWZI Aarle Rixtel)
 8. O₃+Ultrasound USONiQ (RWZI Winterswijk)
 9. PAC O₃ (PAK+O₃) (RWZI Leiden)

10. O₃ biofilm (Microforce) (RWZI Walcheren)
11. Biologische voorbehandeling met O₃ (Aurea (BO₃)) (RWZI Horstermeer)
 - Alternatieve adsorptiemiddelen
12. Cyclodextrines, Dexsorb, DEXfilter (DEXfilter) (RWZI Lelystad)
13. AdOx, zeoliet met filtratie (AdOx) (Leiden-Noord)
 - Filtratie
14. Nanofiltratie met geavanceerde oxidatie (NF+UV/H₂O₂) (RWZI Asten)
15. Waterfabriek Ge(O)zond: ozon met keramische microfiltratie (O₃+keramische MF) (RWZI Wervershoof)

Deze wijze van categoriseren is gebruikt om de onderzoeken te kunnen beoordelen in de zogenaamde themabegeleidingscommissies van STOWA. Enkele technieken, zoals O3-STEP, PAK+O₃, ZF+UV/H₂O₂, NF+UV/H₂O₂, O₃+keramische MF+ en BO₃, bestaan uit een combinatie van werkingsprincipes. In deze evaluatie worden combinatie technieken daarom gecategoriseerd op de verschillende werkingsprincipes, zie hoofdstuk 3, en komen in meerdere vergelijkingen terug in hoofdstuk 3 en 4.

Meerdere technieken richten zich zowel op de verwijdering van microverontreinigingen, als op de verwijdering van N en P. Om de technieken vergelijkbaar te houden, is deze evaluatie primair gericht op de verwijdering van microverontreinigingen. Om toch enig inzicht te geven in wat het effect van de toevoeging van metaalzouten en methanol is op de ontwerp-criteria en de CO₂-voetafdruk, is deze voor het O3-STEP filter in de factsheet opgenomen en is de CO₂-voetafdruk berekend voor het O3-STEP filter inclusief N en P verwijdering.

De naamgeving in dit rapport is bij langere namen afgekort op de manier zoals hierboven tussen haakjes staat. Bij sommige technologieën is de naam geregistreerd of is een patent/octrooi aanwezig, de bijbehorende symbolen om dit te duiden (zoals ®) zijn voor de leesbaarheid van dit rapport niet vermeld.

Van elk van deze pilotonderzoeken is eerst een haalbaarheidsonderzoek uitgevoerd. Deze zijn, samen met de andere IPMV (haalbaarheid)studies, opgesomd in Bijlage 1.

2.3 100.000 IE ZUIVERING

Om de geteste technologieën onderling te kunnen vergelijken, zijn de resultaten doorvertaald naar een standaard rwzi. Voor de standaard rwzi is uitgegaan van een rwzi van 100.000 i.e. (à 150g TZV) met voorbezinking, gisting, biologische fosfaatverwijdering met aanvullende ijzerchloridedosering om aan de fosfaat effluentkwaliteit van 1,0 mg P/l te voldoen.

De kenmerken van deze rwzi zijn op basis van expert judgement afgeleid vanuit de influent-karakteristieken, prestaties en kenmerken van vergelijkbare rwzi's uit de Benchmark van de Waterschappen in 2018. Deze kenmerken zijn verder aangevuld met de destijds beschikbare gegevens in de CBS-database met betrekking tot inkoop van hulpstoffen en energie en slib-producties. Zie ook bijlage 2 voor een toelichting.

Voor de evaluatie is gebruikgemaakt van deze, bij aanvang van het IPMV gedefinieerde rwzi van 100.000 i.e.

De belangrijkste kenmerken zijn:

- | | |
|---|--------------------------------|
| • Biologische capaciteit: | 100.000 i.e. à 150 g TZV |
| • Jaaraanvoer: | 7.665.000 m ³ /jaar |
| • DWA-ontwerppiek en minimale hydraulische capaciteit van de nageschakelde behandeling: | 1.040 m ³ /h |
| • Effluentkwaliteit: | |
| N-totaal (jaargemiddeld): | ≤ 10 mg/l |
| P-totaal (jaargemiddeld): | ≤ 1 mg/l |

2.4 REFERENTIE TECHNOLOGIEËN

De uitgangspunten van de referentietechnologieën zijn geactualiseerd op basis van praktijkervaringen, die inmiddels (2024) zijn opgedaan op rwzi's in Nederland. De referentietechnologieën betreffen:

- PACAS
- Ozonisatie
- Granulair actief koolfiltratie (GAK)

Bij aanvang van het IPMV was de ozon referentie vastgesteld in combinatie met zandfiltratie, waarbij het zandfilter bedoeld was voor de biologische omzetting van toxische afbraakproducten die gevormd zouden kunnen worden bij de reactie van ozon met organische microverontreinigingen. Gedurende het IPMV is de combinatie met zandfiltratie echter losgelaten omdat ozon ook zonder een zandfilter kan voldoen aan de gestelde eisen en een zandfilter weinig bijdraagt aan de verwijdering van afbraakproducten (o.a. STOWA 2022-47 en STOWA 2022-48).

De kosten en de prestaties van de referentietechnologieën zijn geactualiseerd op basis van full-scale praktijkervaringen op de rwzi's. Hierbij zijn zowel de rwzi's geïnventariseerd waarbij een enkele techniek is gerealiseerd, als rwzi's met combinatietechnieken:

- Dinther (PACAS+ozon, Waterschap Aa en Maas)
- Groesbeek (PACAS, Waterschap Rivierenland)
- Hapert (Ozon (met peroxide), Waterschap De Dommel)
- Horstermeer (Ozon, waarbij GAK al aanwezig is, Waterschap Amstel, Gooi en Vecht)
- Houten (Ozon, Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden)
- Leiden Noord (PACAS, Hoogheemraadschap van Rijnland)
- Nieuwe Waterweg (PACAS, Hoogheemraadschap van Delfland)
- Oijen (PACAS, Waterschap Aa en Maas)
- Wervershoof (Ozon, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)
- Winterswijk (Ozon+GAK, Waterschap Rijn en IJssel)

Van de bovengenoemde zuiveringen zijn voor zover beschikbaar de verwijderingsrendementen, energie-/hulpstoffenverbruik en kosten (aanneemsom en stichtingskosten) geïnventariseerd. De resultaten van de referentietechnologieën zijn opgenomen in de factsheets in bijlage 5.

In paragraaf 3.13.1 is het geactualiseerde overzicht opgenomen voor de referentietechnologieën.

2.5 VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN

2.5.1 IPMV EN NEDERLANDSE SUBSIDIEREGELING

Het verwijderingsrendement bij het IPMV gaat uit van een rekenkundig gemiddelde van de afzonderlijke verwijderingsrendementen van 7 van de 11 gidsstoffen (zie Tabel 2.2) over de gehele RWZI. Dat wil zeggen het effluent (geloosd water) ten opzichte van het influent. Daarbij is beoogd een jaarrendement te realiseren van 70% (1e ronde IPMV) en 80% (2e ronde IPMV vanaf 2020).

De gidsstoffen en de 70% verwijdering sluiten aan bij de subsidieregeling 'stimulering verwijdering medicijnresten eerste tranche' van het Ministerie van IenW (IenW 2023). Echter, bij deze subsidieregeling geldt een minimaal verwijderingsrendement in elk monster van 70% . Op verzoek van STOWA en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat hebben de ILOW-laboratoria (de samenwerkende laboratoria van de waterschappen en Rijkswaterstaat) een gevalideerde analysemethode met prestatiekenmerken ontwikkeld voor elf gidsstoffen en acht (kandidaat)gidsstoffen, waarmee de totaalgehalten van de afzonderlijke gidsstoffen kunnen worden vastgesteld tegen acceptabele kosten. Deze analysemethode en bemonstering van het afvalwater van rioolwaterzuiveringen ten behoeve van gidsstoffen zijn onderzocht en vastgelegd in het STOWA-Rapport 'Robuuste bemonsteringsmethode voor rwzi's om verwijderingsrendementen van organische microverontreinigingen te bepalen' (STOWA 2023-45). De verkregen meetdata zijn gebruikt in 2021 voor een evaluatie van de gidsstoffen, wat heeft geleid tot een gewijzigde selectie van drie gidsstoffen in de oorspronkelijke lijst van elf gidsstoffen bij aanvang van het IPMV programma. Uit de studie blijkt namelijk dat Amisulpride, Clarithromycine en Candesartan in (te) lage concentraties aanwezig zijn in het Nederlandse influent en effluent. Daarom zijn deze stoffen niet in de meest recente lijst van elf Nederlandse gidsstoffen opgenomen (Mulder, 2021).

Voor de pilots binnen het IPMV (en de subsidieregeling) is afgesproken om wel de 19 (gids) stoffen uit het ILOW-analysepakket te laten analyseren. De reden hiervoor is dat in andere landen, en bijvoorbeeld ook in de herziene EU-richtlijn 'Behandeling van stedelijk afvalwater', deze andere stoffen wel zijn /zullen worden aangewezen als gidsstof.

TABEL 2.2

ELF GIDSSTOFFEN VOOR NEDERLAND EN TWAALF VOLGENS DE EU RICHTLIJN (2 CATEGORIEËN)

	Gidsstoffen NL*	Categorie 1 EU**	Categorie 2 EU**
1	Carbamazepine	Amisulpride	benzotriazol
2	Diclofenac	Carbamazepine	candesartan
3	hydrochloorthiazide	Citalopram	irbesartan
4	Metoprolol	Clarithromycine	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol
5	Venlafaxine	diclofenac	
6	1,2,3-benzotriazool	hydrochloorthiazide	
7	irbesartan	metoprolol	
8	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	venlafaxine	
9	gabapentine		
10	sotalol		
11	thrimethoprim		

* De aanvullende 8 stoffen volgens de 19 ILOW-analysepakket zijn amisulpride, azithromycine, candesartan, citalopram, clarithromycine, furosemide, propanolol en sulfamethoxazol

** De blauwe stoffen zijn niet meegenomen in de Nederlandse lijst van elf gidsstoffen, omdat deze over het algemeen in (te) lage concentraties aanwezig zijn in het Nederlandse influent en effluent.

Om het verwijderingsrendement over de gehele rwzi te berekenen, is voor de meeste technieken in het IPMV uitgegaan van een gemiddeld verwijderingsrendement in het actief slib van 40% voor de 7 van de 11 gidsstoffen, zie bijlage 2. Het kan zijn dat de 7 van de 11 gidsstoffen die het best verwijderd worden in de rwzi niet precies overeenkomen met de 7 van de 11 die het best verwijderd worden in de nageschakelde techniek.

2.5.2 EU RICHTLIJN

In de nieuwe Europese richtlijn voor de behandeling van stedelijk afvalwater is voorzien dat grotere rwzi's (>150.000 ie) en rwzi's die lozen op gevoelig water op termijn microverontreinigingen gaan verwijderen (o.a. EU 2024). De definitieve bemonsterings- en analyse-methode dient nog te worden vastgesteld in de Nederlandse wetgeving. STOWA heeft voor Nederland een protocol ontwikkeld (STOWA 2023-45) dat afwijkt van de bemonstering zoals opgenomen in de nieuwe EU richtlijn.

De verwijdering wordt conform het EU-voorstel berekend op basis van de rekenkundig gemiddelde verwijdering van de beschouwde stoffen in 24h- of 48h- monsters genomen op DWA dagen en op basis van concentraties. Het verwijderingsrendement dient minimaal 80% te bedragen over de gehele zuivering (in elk monster met een beperkt aantal overschrijdingen).

Het verwijderingspercentage moet conform de nieuwe Europese Richtlijn Stedelijk Afvalwater berekend worden over tenminste zes van twaalf stoffen. Hierbij dient de verhouding tussen stoffen uit Categorie 1 en Categorie 2 altijd 2:1 te zijn, zie Tabel 2.2.

In deze evaluatie is ter indicatie een inschatting gegeven van het verwijderingsrendement van de in de EU richtlijn genoemde stoffen voor de referentietechnieken en de 15 innovatieve technologieën. Hierbij is net als voor het IPMV uitgegaan van de jaargemiddelde verwijdering en niet of elk monster kan voldoen aan 80% rendement.

2.6 CO₂-VOETAFDruk

De CO₂-voetafdruk is berekend voor alle technologieën conform model "CO₂ footprint rwzi's micro's 100.000 i.e.". De CO₂-emissiefactoren die in de STOWA rapporten over de pilotinstallaties zijn gebruikt, zijn opgesteld begin 2019 op basis van de toen beschikbare informatie (2018). Dit betekent dat de CO₂-emissiefactoren in de gepubliceerde STOWA rapporten zijn gebaseerd op de situatie 2018.

Voor deze evaluatie zijn de uitgangspunten uit 2018 ten aanzien van de CO₂-voetafdruk geactualiseerd naar 2024. De getallen vanuit emissiefactoren.nl zijn de Well- to-Wheel-waarden; de uitstoot van zowel de voorketen als de directe emissies samen. Deze methode is gelijk aan de methode die wordt gehanteerd in de CO₂-prestatieladder en de Klimaatmonitor Waterschappen). In Bijlage 3 is de onderbouwing hiervan gegeven.

TABEL 2.3 CO₂-KENTALLEN 2018 EN 2024

Parameter	Eenheid	IPMV 2018	Actualisatie 2024
Elektriciteit	kg CO ₂ / kWh	0,53 ¹	0,536 ^{3,4}
Aardgas	kg CO ₂ / Nm ³ aardgas	1,79 ¹	2,134 ³
Diesel	kg CO ₂ / kg diesel	2,21 ¹	3,256 ³
Warmte	kg CO ₂ / GJ warmte	64,9 ¹	74,1 ^{3,5}
Transport	kg CO ₂ / ton*km transport slib	0,13 ¹	0,105 ^{3,6}
Slibeindverwerking	kg CO ₂ / kg ontwaterd slib	0,05 ²	0,05 ⁷
Gewapend beton	kg CO ₂ / m ³ gewapend beton	133 ¹	329 ⁸
Omrekeningsfactor hulpstoffen	kg CO ₂ /Gj primair	58,84 ¹	67,28 ³
Hulpstoffen (zie bijlage 3):			
Actief kool	kg CO ₂ / kg	9,60	11,06
Actief kool geregenereerd	kg CO ₂ / kg	2,52	2,90
Actief kool biologische oorsprong	kg CO ₂ / kg	3,94	4,52
Waterstofperoxide (50%)	kg CO ₂ / kg	1,21	1,53
Zuurstof, vloeibaar	kg CO ₂ / kg	0,42	0,59
Polymeer, kationisch, vloeibaar (100% actief)	kg CO ₂ / kg	3,90	4,49

¹ Emissiefactoren 2018² Gemiddelde op basis van milieujaarverslagen GMB, SNB en HVC 2017³ Emissiefactoren 2024 Lijst emissiefactoren | CO₂ emissiefactoren⁴ Grijs: 0,536 (Deze factor geeft een gemiddelde CO₂ emissie van grijze stroom weer, incl. de voorketenemissies). In de gevoeligheidsanalyse wordt voor Groene Nederlandse stroom: 0 kg CO₂/kWh gebruikt.⁵ Klimaatmonitor verslagjaar 2022: primaire energie van warmte is 1,1 GJ_{primair}/GJ_{warmte}⁶ CO₂ emissie coëfficiënt transport met vrachtwagen > 20 ton plus aanhanger (ladingscapaciteit 28 ton)⁷ Uitgegaan van dezelfde waarde als 2018⁸ milieu impact totale LCA van Doorgaand Gewapend beton C30/37 CEM III (<https://milieudatabase.nl/nl/rapporten-tool/report/33/>)

2.7 KOSTEN

De kosten in het IPMV zijn tot nu toe berekend op basis van prijspeil 2018 om een onderlinge vergelijking van technologieën mogelijk te maken. Sinds 2018 zijn de kosten gestegen, waardoor actualisatie van de kosten noodzakelijk is. Om een reëel beeld te geven van de daadwerkelijke kosten van technieken voor de verwijdering van microverontreinigingen zijn in deze evaluatie de totale stichtingskosten gehanteerd.

Voor deze evaluatie zijn de stichtingskosten verhoogd aan de hand van de Infra-index GWW. In vergelijking met 2018 is deze index met zo'n 38% toegenomen (januari 2024). Alle kosten zijn berekend inclusief btw. Subsidies en andere bijdragen zijn niet meegenomen in de berekening. Sommige technologieën vallen onder een patent of octrooi, waardoor hier aanvullende kosten voor gerekend (kunnen) worden. Deze kosten zijn niet meegenomen in de kostenberekeningen.

Voor de actualisatie van de in 2018 geraamde stichtingskosten is eveneens rekening gehouden met de stichtingskosten van referentieprojecten die in de periode 2018 – 2024 gerealiseerd zijn (PAK, GAK, ozon en combinaties). Indien de kosten van referentieprojecten sterk afwijken van de geactualiseerde stichtingskosten dan zijn de kosten van referentieprojecten als leidend beschouwd.

Daarnaast is ook de manier van aanbesteding van invloed op de stichtingskosten. Er kan gekozen worden voor een aanpak met een bouwteam waarin waterschap, adviseur, aannemer en technologie leverancier komen tot een ontwerp en realisatie of voor een aanpak waarbij op basis van uitgangspunten opgesteld door het waterschap de technologie leveranciers een aanbieding uitbrengen. Hier wordt in de gevoeligheidsanalyse op ingegaan.

In Tabel 2.4 tot en met Tabel 2.6 zijn de geactualiseerde kengetallen opgenomen. Hiertoe zijn bij de betrokken waterschappen en uitvoerders actuele prijzen geïnventariseerd voor personeel, energie en toeslagstoffen.

TABEL 2.4 TOESLAGFACTOREN VAN KALE BOUWKOSTEN NAAR STICHTINGSKOSTEN

Parameter	Waarde	Toelichting
Aannemerskosten	25%	Over kale stichtingskosten voor civiele, werktuigbouwkundige, elektrotechnische en procesautomatisering werkzaamheden. Deze opslag bestaat uit kosten voor de aannemer om het werk uit te voeren, zoals algemene bouwplaatskosten, uitvoeringskosten, algemene kosten, winst en risico.
Onvolledigheid	25%	Over de kale stichtingskosten inclusief aannemerskosten rekening houden met een onvolledigheidsfactor
Stichtingskosten	80%	Deze bestaat uit kosten voor btw, onvoorzien, engineering, projectmanagement, directievoering, verzekeringen, tijdelijke voorzieningen tijdens ombouw en opstart, opleiding en communicatie.

*Dit betekent (1,25*1,25*1,8) totaal een factor 2,81 om van kale bouwkosten naar stichtingskosten te gaan.

TABEL 2.5 BEREKENING JAARLIJKSE KOSTEN

Parameter	Waarde	Eenheid
Kapitaalslasten lineaire afschrijving		
- Civiel	30	jaar
- Werktuigbouw (W)	15	jaar
- Elektrotechnisch (E)	15	jaar
- Procesautomatisering (PA)	5	jaar
Rente	4	%
Onderhoudskosten		
- Civiel	0,5	% van bouwkosten
- W/E/PA	3	% van bouwkosten

TABEL 2.6 OPERATIONELE KOSTEN (INCLUSIEF BTW)

Parameter	Eenheid	IPMV 2018	Actualisatie 2024
Personeelskosten	per FTE/j	€ 50.000	€ 80.000
Elektriciteit	per kWh	€ 0,10	€ 0,20
Polymeer	per kg ingekocht product (50%actief)	€ 3,00	€ 3,00
Zuivere zuurstof	per kg	€ 0,20	€ 0,19
IJzerchloride en aluminiumchloride	per ton (40% w/w)	€ 120	€ 300
Poedervormig actief kool	per kg	€ 2,00	€ 2,75
Granulair actief kool	per m ³	€ 1.200	€ 1.350 *
Gereactiveerd granulair actief kool	per m ³	€ 500	€ 900
Methanol	per ton (100% w/w)	€ 355	€ 550
Productie spoelwater	per m ³	€ 0,04	€ 0,04
Verwerking spoelwater op rwzi	per m ³	€ 0,01	€ 0,01
Slibafvoer	per ton ds	€ 600	€ 600
NaOH (membraan proces)	per kg (50% w/w)	€ 0,225	€ 0,37
NaOCl (membraan proces)	per kg (15% w/w)	€ 0,4	€ 0,55
Citroenzuur (membraan proces)	per kg (50% w/w)	€ 1,7	€ 2,35
Antiscalants (membraan proces)	per kg	€ 1,2	€ 1,66
H ₂ O ₂	per kg (50% w/w)	€ 0,5	€ 0,69
DEXSORB middel	per ton	€ 10.000	€ 13.800
Geregenereerd DEXSORB middel	per ton	€ 6.000	€ 8.280
Afvoeren dexsorb	per ton	€ 1.000	€ 1.380
Zeoliet	per kg	€ 27	€ 25

* € 3.000 /ton en 450 kg/m³

De kostenramingen zijn bedrijfseconomische ramingen, wat betekent dat marktwerking niet is meegenomen. Marktwerking kan er echter voor zorgen dat de werkelijke kosten straks aanzienlijk afwijken van de raming. Dit hangt in de praktijk samen met de conjunctuur: in tijden van hoogconjunctuur vallen inschrijvingen vaak hoger uit dan de raming (bijvoorbeeld wanneer er relatief veel werk op de markt is of grondstofprijzen hoog liggen), in tijden van laagconjunctuur juist lager. Het niet inschatten van het markteffect kan bijvoorbeeld leiden tot inschrijvingen die (aanzienlijk) hoger zijn dan de begroting of de gestelde plafondprijs.

De indexering over de afgelopen zes jaar was ordegrrootte 6% per jaar. Het lijkt realistisch dat de indexering de komende jaren doorzet op basis van de huidige signalen uit de markt:

- De investeringen in de afvalwater en drinkwatersector lopen significant op in de komende jaren. Voor rwzi's is dit bijvoorbeeld door maatregelen ten behoeve van KRW-opgave in het oppervlaktewater, verwijdering van medicijnresten en de maatregelen in het kader van de nieuwe EU-Richtlijn.
- Er is een schaarste aan bepaalde grondstoffen.
- Er is een schaarste aan technisch opgeleide mensen.

2.8 ECOTOXICOLOGISCHE RISICO'S

Naast hiervoor genoemde criteria geldt dat de zuiveringsprestatie een reductie moet bewerkstelligen van ecotoxicologische risico's. Hierbij is een reductie beoogd van minimaal 50% reductie van ecotoxicologische risico's voor het watermilieu door lozing van rwzi-effluent.

In de 'Handreiking voor het uitvoeren van biologische effectmonitoring bij vergaande zuivering van RWZI-effluenten' (Ecofide, 2023) is de manier beschreven waarop de biologische effectmonitoring op het (vergaand gezuiverde) RWZI-effluent moet worden uitgevoerd en op welke wijze interpretatie van de resultaten dient plaats te vinden om zo een betrouwbare vergelijking van de verschillende demonstratieprojecten mogelijk te maken.

De conclusies in deze handreiking zijn getrokken op basis van een evaluatie van meetresultaten van 13 waterbeheerders en enkele andere onderzoeken die gebruik maakten van de methode uit een eerdere versie van de handreiking. Op basis van deze metingen is de handreiking uit 2020 aangepast naar de meest recente versie uit 2023.

2.9 BIJVANGST

De pilotonderzoeken hebben zich met name gericht op de verwijdering van microverontreinigingen. Bij sommige technologieën is er sprake of vermoeden van 'bijvangst'; zij verwijderen ook andere stoffen:

- N-totaal
- Ammonium
- P-totaal
- Microplastics
- *E. coli* e.a. (desinfectie)
- PFAS
- Antibioticaresistentie

Bij sommige pilotonderzoeken was het mogelijk de bijvangst te onderzoeken, zie paragraaf 0. Naar de verwijdering van PFAS en Antibioticaresistentie is aanvullend onderzoek gedaan. In deze evaluatie is een samenvatting van deze bevindingen opgenomen (zie paragraaf 4.2.4 en 4.2.5) en in de STOWA rapporten (2024-29 en 2024-30) zijn de resultaten uitgebreider beschreven.

Een andere 'bijvangst' kan het mogelijk hergebruiken van effluent zijn. Sommige technieken zijn met het oog hierop onderzocht. Echter, in dit rapport zijn alleen de resultaten van deze technologieën primair gericht op de verwijdering van microverontreinigingen beschreven en vergeleken. De technieken waar effluent hoogwaardig hergebruikt kan worden hebben vaak een veel hogere CO₂-voetafdruk en veel hogere kosten dan technieken die uitsluitend op de verwijdering van microverontreinigingen gericht zijn. Het voordeel van schoner effluent is niet uit te drukken in kosten en/of CO₂-voetafdruk omdat de toepassing afhankelijk is van omgevingsfactoren.

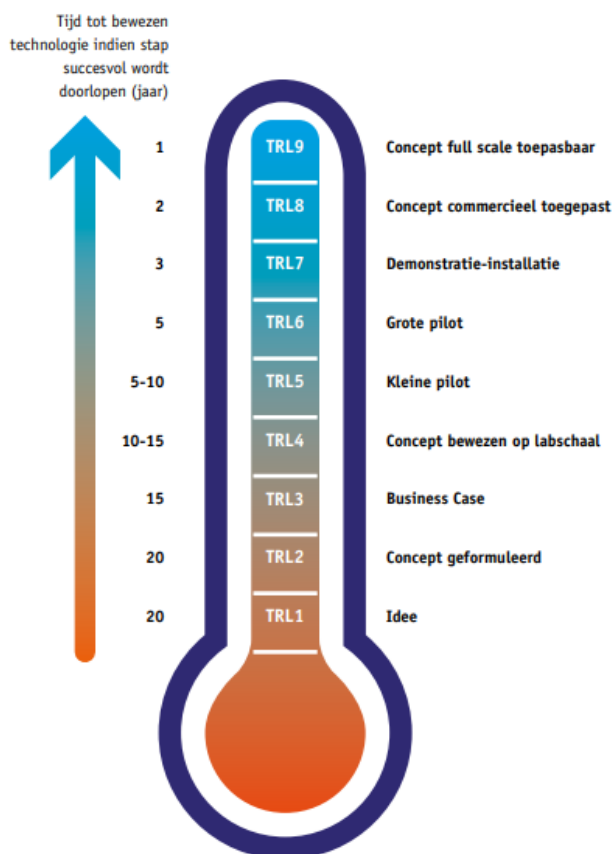
2.10 TECHNOLOGY READINESS LEVEL (TRL)

Dit innovatieprogramma beoogt technieken/technologieën te onderzoeken die in 2027 op demonstratieschaal kunnen worden toegepast. Dit betekent dat de Technology Readiness Level (TRL) van de techniek/technologie in 2027, minimaal een waarde van 7 moet hebben (zie Figuur 21).

Onder demonstratieschaal wordt in dit innovatieprogramma verstaan: een full scale-toepassing voor zuiveringen kleiner dan 25.000 i.e. Voor zuiveringen groter dan 25.000 i.e. dient minimaal één straat van minimaal 25.000 i.e. te worden omgebouwd.

FIGUUR 2.1

TECHNOLOGY READINESS LEVELS



3

VERGELIJKING GETESTE TECHNOLOGIEËN

3.1 GEACTUALISEERDE REFERENTIE-TECHNOLOGIEËN

Om de innovatieve technologieën te kunnen vergelijken met de huidige praktijk, zijn drie technieken als referentietechnieken gesteld. Deze zijn reeds op praktijk schaal toegepast in Nederland of in Europa:

- PACAS, ofwel: Powder Activated Carbon in Active Sludge. Hierbij wordt actief-poederkool gedoseerd in de bestaande actief-slibtanks van een rwzi en samen met de daar aan gebonden microverontreinigingen met het slib afgevoerd naar de slibeindverwerking.
- Ozonisatie. Hierbij worden microverontreinigingen afgebroken tot intermediairen door het doseren van ozon (O_3).
- GAK, ofwel: Granulair Actief Koelfiltratie. Hierbij worden microverontreinigingen gebonden aan granulair actief kool in een filter.

De referenties van PACAS, ozon en GAK zijn in deze actualisatie in 2024 aangepast ten opzichte van de referenties zoals gedefinieerd in 2018:

- PACAS: belangrijkste verschil is dat de PAK-dosering (fossiel) is verhoogd van 15 naar 20 mg/l, zodat het oorspronkelijke verwijderingsrendement van 70-75% nu hoger is dan 80% (gebaseerd op STOWA 2018-02, STOWA 2023-02). Hiermee is het verwijderingsrendement van PACAS vergelijkbaar met de andere twee referentie technieken (zie paragraaf 1.3). De absolute verbetering van de ontwatering is verlaagd van 1,19 naar 1%-punt en het specifieke energieverbruik is verlaagd van 12 naar 9 W/m³ behandeld influent op basis van de full scale ervaringen in Nederland.
- Ozon: de specifieke ozondosering is aangepast van 0,7 naar 0,6 g O_3 /g DOC (o.a. STOWA 2022-48) en de contacttijd verkort van 25 naar 20 minuten (o.a. Ozoninstallatie op RWZI Houten).
- GAK: Spoelwater was 10% van influentdebiet in 2018. Dit percentage is nodig als ook nutriënten worden verwijderd in het filter. Dit is geen uitgangspunt voor de referentie, waardoor in de actualisatie het spoelwater is verlaagd naar 1%.

Destijds is de referentie voor GAK opgesteld aan de hand van ervaringen met het 1-STEP filter Horstermeer en de ontwerputgangspunten die in Zwitserland worden gehanteerd. Er is geen full scale of demo schaal GAK in Nederland in bedrijf en is het dus niet mogelijk deze referentie te actualiseren op basis van meer recente ervaringsgetallen (met uitzondering van het spoelwaterdebiet). In paragraaf 3.4 wordt hier verder bij stilgestaan.

In de volgende paragrafen worden deze technologieën nader toegelicht. De belangrijkste ontwerputgangspunten van de referenties voor de vergelijking zijn weergegeven in Tabel 3.1.

TABEL 3.1

ONTWERPUITGANGSPUNTEN REFERENTIETECHNIKEN GERICHT OP DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN¹

Onderwerp	Eenheid	Waarde
PACAS		
PAK-dosering	mg PAK/l influent	20
Dosering gemaximaliseerd	-	2x DWA
Gestelde PAK dosering op % van het jaardebiet	%	80
Ds% na ontwatering, met : zonder PAK	%ds	22,1 : 21,1
PE dosering, met : zonder PAK	g PEactief/kg ds	16 : 18
Energieverbruik overig ^{2,3}	W/m ³ behandeld	9
GAK		
% jaardebiet behandeld	%	70
Contacttijd (Empty Bed Contact Time, EBCT)	Minuten	30
Hydraulische belasting	m/uur	8
Spoelwater	% van inkomend debiet	1
Standtijd kool	maanden	6
Energieverbruik overig ²	W/ m ³ behandeld	0,9
Ozonisatie		
% jaardebiet behandeld	%	70
Ozondosering	g O ₃ /g DOC	0,6
Contacttijd	Minuten	20
Inbrengmethode	-	diffusors
Energieverbruik ozonproductie	kWh/kg O ₃	10
Energieverbruik overig ²	W/ m ³ behandeld	30

¹ Gebaseerd op uitgangspunten voor de referentietechnieken uit 2018 (Mulder, 2022) en geactualiseerd in 2024 op basis van recente praktijkervaringen in Nederland en expert judgement

² Energieverbruik exclusief het oppompen van effluent naar de nabehandeling en de productie van verdunningswater voor aanmaak PAK voor PACAS

³ Dezelfde waarde is ook gebruikt voor de berekening van het overige energieverbruik voor de technologieën met ozon. De waarde van 30 W/m³ behandeld is nu onafhankelijk van de benodigde ozondosering gesteld. Op basis van praktijkervaring met lagere ozondoseringen en het ontwerp voor de specifieke rwzi, kan de werkelijke waarde wijzigen.

In Tabel 3.2 is het geactualiseerde overzicht opgenomen voor de referentietechnologieën. Het overzicht op basis van kentallen uit 2018 is opgenomen in bijlage 3.

TABEL 3.2 **CRITERIA REFERENTIE-TECHNIEKEN (UPDATE 2024)**

Onderwerp	Eenheid	PACAS	Ozon	GAK ⁴
CO ₂ -voetafdruk				
CO ₂ -voetafdruk verwijdering micro's	g CO ₂ /m ³ behandeld ¹	184	109	361
CO ₂ -voetafdruk verwijdering micro's	g CO ₂ /m ³ rwzi-influent	184	77	253
Kosten ⁵				
Jaarlijkse kosten	€/m ³ behandeld ¹	0,10	0,10	0,31
Jaarlijkse kosten	€/m ³ rwzi-influent	0,10	0,07	0,22
Verwijderingsrendement gidsstoffen Min 1enW ²				
Rendement technologie	%	80-85	80-90	80-90
Rendement inclusief rwzi ³	%	80-85	80-85	80-85

¹ Per m³ behandeld rioolwater oftewel de totale kosten of CO₂-emissie van de inzet van de aanvullende technologie gedeeld door het aantal behandelde m³. Voor PACAS geldt dat al het binnenkomende rioolwater wordt behandeld (technologie geïntegreerd in actief slib systeem). Voor nageschakelde technologie (Ozon en GAK-filter) geldt dat te allen tijde minimaal de dagelijks droogweer piek, oftewel de DWA-ontwerppiek, moet worden behandeld en 70% (dan moet het rendement in de stroom die je behandelt ook hoog zijn) van het jaarvolume.

² Gemiddeld verwijderingsrendement voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen benzotriazool, carbamazepine, diclofenac, irbesartan, gabapentine, metropolol, hydrochloorthiazide, mengsel van 4- en 5-methylbenzotriazool, sotalol, trimethoprim en venlafaxine in elk 24h of 48h debiets- of tijdsproportioneel monster, waarbij rekening is gehouden met 24 uur verblijftijd van het water in de rioolwaterzuivering. Deze 11 gidsstoffen zijn gekozen om de effectiviteit van een zuiveringstechniek voor aanvullende verwijdering van microverontreinigingen uit rwzi-afvalwater te monitoren en hebben geen relatie met eventuele milieubezwaarlijkheid.

³ Hierbij is uitgegaan van een gemiddeld verwijderingsrendement in het actief slib van 40% voor de 7 van de 11 gidsstoffen.

⁴ Exclusief verwijdering nutriënten.

⁵ Jaarlijkse kosten: kapitaallasten + exploitatiekosten

3.2 15 INNOVATIEVE TECHNOLOGIEËN

De 15 technologieën worden in de volgende paragrafen beschreven en onderling vergeleken. Hiervoor zijn de technieken onderverdeeld in hun werkingsprincipes. Deze sluiten in beginsel aan bij de vijf BC's van het IPMV. Een aantal technieken valt onder meerdere werkingsprincipes en wordt op meerdere momenten met verschillende andere technologieën vergeleken. Voorbeeld is PAK+O₃, die zowel bij adsorptie aan PAK als bij oxidatieve technieken aan bod komt. De uitleg voor de plaatsing onder de werkingsprincipes is nader toegelicht in paragrafen 3.3.1, 3.4.1, 3.5.1, 3.6.1 en 3.7.1.

TABEL 3.3 ONDERVERDELING TECHNOLOGIEËN IN WERKINGSPRINCIPE TEN BEHOEVE VAN ONDERLINGE VERGELIJKING.

Werkingsprincipe en technologie	Subcategorie	Opmerking
1. Adsorptie aan Poeder Actiefkool (PAK)		
PAK+doek		
PACAS Nereda		
PAK+O ₃		tevens opgenomen als oxidatieve techniek
2. Adsorptie aan Granulair Actiefkool (GAK)		
O3-STEP zonder N en P verwijdering*	niet belucht	tevens opgenomen als oxidatieve techniek
Continue upflow GAK	niet belucht	
BODAC	belucht	
Bio-GAK + lucht	belucht	
Aurea (BO ₃)	belucht	tevens opgenomen als oxidatieve techniek
3. Adsorptie aan overige niet-fossiele materialen		
DEXfilter		
AdOx		
4. Oxidatieve technieken		
ZF+UV/H ₂ O ₂		
O ₃ +Ultrasound		
O3-STEP zonder N en P verwijdering*	combinatie van oxidatie en actief kool	tevens opgenomen als GAK techniek
PAK+O ₃	combinatie van oxidatie en actief kool	tevens opgenomen als PAK techniek
Microforce	combinatie van oxidatie en biologische afbraak	
Aurea (BO ₃)	combinatie van oxidatie en biologische afbraak, belucht GAK	tevens opgenomen als GAK techniek
NF+H ₂ O ₂	combinatie van oxidatie en filtratie	tevens opgenomen als filtratie techniek
O ₃ +keramischeMF	combinatie van oxidatie en filtratie	tevens opgenomen als filtratie techniek
5. Filtratietechnieken in combinatie met oxidatie		
NF+H ₂ O ₂		tevens opgenomen als oxidatieve techniek
O ₃ +keramischeMF		tevens opgenomen als oxidatieve techniek

* In de factsheet voor O3-STEP is de situatie inclusief N en P verwijdering gegeven, net als bij de CO₂ voetafdruk

Alle technologieën zijn in de vijfjarige periode van het IPMV gestegen in TRL niveau. De meeste zijn zover dat ze op demonstratieschaal of full-scale kunnen worden uitgevoerd. Voor vijf technologieën is aanvullend pilotonderzoek gedefinieerd, wat betekent dat de ontwerpuitgangspunten, het energieverbruik, het rendement, de CO₂-voetafdruk en/of de kosten die in dit rapport en de factsheets staan, nog in ontwikkeling zijn. In hoofdstuk 5 wordt (voor deze technologieën) verder ingegaan op de TRL en kennisvragen voor verbetering, opschaaling, werking en kennisvragen voor verder pilotonderzoek.

Op een aantal punten is in de actualisatieslag in 2024 een aantal algemene principes verwerkt. De daadwerkwerkelijke invulling is locatie-, organisatie- en uitvoeringsvorm-specifiek. Dit gaat om bijvoorbeeld;

- FTE inzet: Hiervoor is 0,5 FTE aangenomen bij een enkelvoudige technologie en 1 FTE bij een combinatietechnologie.
- Opvoerhoogte is 8 m, tenzij hoger is aangegeven (BODAC, bioGAK+lucht, upflowGAK). Voor PACAS is geen opvoerhoogte meegenomen en bij NF+UV/H₂O₂ omdat hier geen/weinig opvoerhoogte nodig is. Sommige technologieën zijn bewust zo ontworpen dat ze een lage opvoerhoogte zullen hebben, deze worden door deze aanpak iets benadeeld. In de gevoeligheidsanalyse is inzicht gegeven in de bandbreedte tussen een hele lage opvoerhoogte van 2 m en de voor de berekeningen gebruikte opvoerhoogte van 8 m. De daadwerkelijk benodigde opvoerhoogte is naast de uitvoeringsvorm van de technologie, zeer locatie specifiek.

3.3 ADSORPTIE AAN POEDER ACTIEFKOOL (PAK)

3.3.1 WERKINGSPRINCIPE EN OPTIMALISATIES

Het doseren van actiefkool in poedervorm is een beproefde, kosteneffectieve methode om microverontreinigingen te verwijderen. De verwijdering vindt plaats via adsorptie (binding) van verontreinigingen aan het poederactiefkool. De verzadigde kool wordt verbrand samen met het zuiveringslib. In Duitsland en Zwitserland wordt poederactiefkool al op meer dan 20 rwzi's full-scale ingezet om microverontreinigingen vergaand uit afvalwater van rwzi's te verwijderen. Dat kan in speciale tanks achter de bestaande zuivering, maar ook door het direct te doseren in de actiefslibtanks (PACAS).

De referentie van PAK betreft het PACAS proces waarbij poederkool in de biologie gedoseerd wordt. Om te komen tot de doelstelling van 80% verwijdering van microverontreinigingen is een dosering van 20 mg PAK/l influent noodzakelijk.

Binnen het IPMV zijn de volgende optimalisaties van de PACAS-technologie onderzocht:

- PAK+Doek
- PACAS Nereda
- PAK+O₃

Bijna 50% van de CO₂-voetafdruk van PACAS komt voor rekening van het doseren van PAK, wat niet hergebruikt kan worden. Belangrijk thema binnen dit werkingsprincipe is dan ook het verkrijgen van een lagere CO₂-voetafdruk door minder verbruik van (fossiele) actiefkool of kool te gebruiken met een lagere voetafdruk.

Om die reden was de doelstelling voor PAK+Doek en PAK+O₃ om het PAK verbruik te reduceren waarbij het rendement gelijk blijft met als doel een lagere CO₂-voetafdruk en dus betere score op duurzaamheid. Bij PAK+Doek is de nageschakelde PAK dosering efficiënter dan de toevoeging van PAK aan het actief slib, omdat de organische componenten in het effluent lager zijn dan in de actiefslib tank. Voor PAK+O₃ geldt dat dit een combinatie techniek is, waarbij ook door ozonisatie microverontreinigingen worden verwijderd. Bij PACAS Nereda was de doelstelling om de haalbaarheid van PACAS te toetsen bij Nereda (korrelslib).

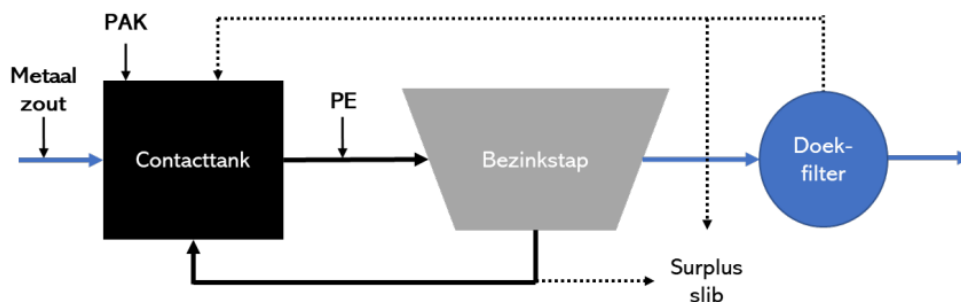
Een uitgebreide beschrijving van de bovengenoemde technieken is opgenomen in de factsheets in bijlage 5. Navolgend worden de technieken op hoofdlijnen beschreven en vergeleken.

Binnen het thema van PAK zijn in het IPMV alternatieven voor fossiele PAK bekeken en onderzocht. Ook is gekeken wat de invloed is van poederkool op de hoeveelheid af te voeren slib en de samenstelling ervan en in hoeverre dat consequenties heeft voor de slibgisting en verdere slibverwerking. Tenslotte is onderzoek gedaan naar de mate waarin poederkooldeeltjes in het rwzi-effluent terechtkomen en de effecten hiervan. De (resultaten van) deze onderzoeken zijn benoemd in bijlage 1 en zijn niet verder beschreven in dit hoofdstuk.

3.3.2 BESCHRIJVING INNOVATIEVE TECHNIEKEN

PAK+DOEK

FIGUUR 3.1 **BLOKSCHEMA PAK+DOEK**

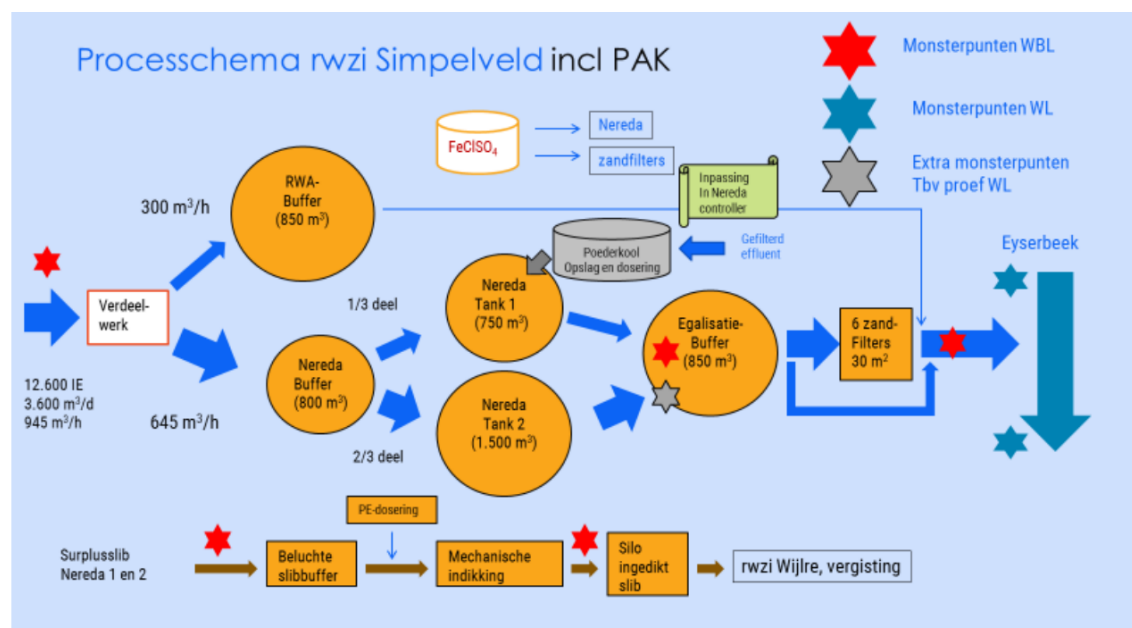


PAK + Doekfiltratie is een technologie waarbij poederactiefkool (PAK) wordt gedoseerd aan het effluent van een rwzi en middels een bezink- en doekfiltratiestap wordt afgescheiden van het afvalwater. Gelijk aan andere adsorptietechnologieën worden microverontreinigingen uit het afvalwater verwijderd door adsorptie aan actiefkool. De dosering van coagulant (metaalzout) zorgt voor een verregaande verwijdering van fosfor en een betere bezinking/afscheiding van het PAK..

Beoogde voordelen ten opzichte van de referentie zijn een verlaagde PAK dosering en verregaande P-verwijdering. Met name door het lagere verbruik van PAK in vergelijking met PACAS scoort de PAK + Doekfiltratie technologie beter op CO₂-voetafdruk dan PACAS. Voor de technologie zijn PE- en metaalzoutdoseringen nodig.

PACAS NEREDA

FIGUUR 3.2 **BLOKSCHEMA PACAS NEREDA (O.B.V. SITUATIE PILOT OP RWZI SIMPELVELD)**

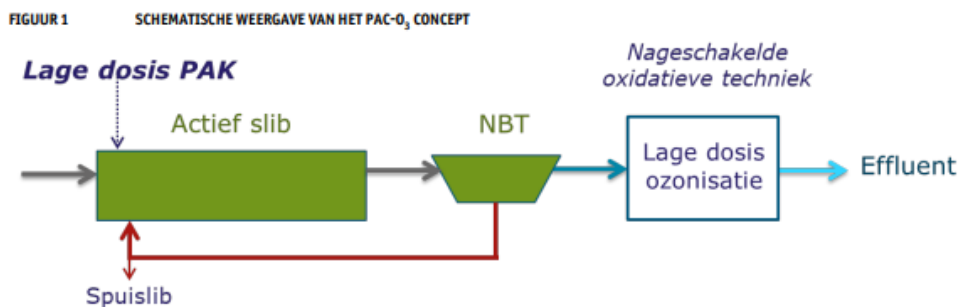


Poederkooldosering verbetert de verwijdering van microverontreinigingen en is een relatief eenvoudige maatregel om medicijnresten in een continu belast actief slibstelsysteem te verwijderen. Bij PACAS Nereda wordt poederkool gedoseerd in een korrelslibreator (Nereda) in plaats van een conventioneel actief slibstelsysteem. De medicijnresten worden gebonden aan de poederkool en worden daarna samen met het spuislib uit de Nereda afgevoerd via de reguliere slibroute (gisting, ontwatering, droging en verbranding).

PAK+O₃

FIGUUR 3.3

BLOKSCHEMA PAK+O₃



PAK+O₃ is een technologie waarbij poederactiefkool (PAK) in het actiefslibproces gedoseerd wordt én het effluent met ozon wordt behandeld. Een PACAS met lagere dosering en een nageschakelde ozonisatie met een lage specifieke ozon dosis. 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.

Beoogde voordelen zijn een lagere PAK dosering dan PACAS, lagere bromaatvorming en een breder palet aan verwijderde stoffen.

3.3.3 VERGELIJKING

In Tabel 3.4 zijn de belangrijkste kenmerken van de verschillende PAK technieken samengevat. Hierin is ook de referentie PAK opgenomen uitgaande van een dosering van 20 mg PAK/l. In de tabel is te zien dat PACAS Nereda zeer vergelijkbaar is met de referentiesituatie. Grootste verschil is dat dezelfde PAK dosering in een kortere tijd plaats moet vinden en de opvoerhoogte van het PAK 6 m is; dit heeft effect op de te realiseren installatie en het energieverbruik van de PAK doseerinstallatie. De combinatie technieken PAK+Doek en PAK+O₃ vereisen met respectievelijk 10 en 7,5 mg PAK/l een aanzienlijk lagere PAK dosering dan de dosering van de referentie PACAS (20 mg/l). Daar tegenover staat, naast de extra procesonderdelen bij PAK+Doek, aanvullend een dosering van PE en FeCl₃ waardoor de uiteindelijke slibproductie van PAK+Doek hoger uitvalt dan de PACAS referentie en PACAS Nereda. Bijkomend voordeel van de aanvullende FeCl₃ dosering is dat aanvullend P verwijderd kan worden. Bij PAK+O₃ is naast de extra procesonderdelen, aanvullend een ozonverbruik vereist.

TABEL 3.4 SPECIFIEKE ONTWERPUITGANGSPUNTEN ADSORPTIE AAN ACTIEF KOOL

Parameter	Eenheid	PACAS referentie	PAK+Doek	PACAS Nereda	PAK+O ₃
PAK-technologie					
Doseerlocatie	Waterlijn/ nageschakeld	Waterlijn	Nageschakeld	Waterlijn	Waterlijn
Behandeld debiet	%	100	70	100	100 (PAK) 70 (O ₃)
PAK dosering **	mg/l	20	10	20	7,5
HRT adsorptie fase	minuten	-	30	-	-
Lamellen oppervlaktebelasting	m ³ /m ² /uur	-	2,5-4	-	-
Doekfilter	m ³ /m ² /uur	-	8	-	-
Overige doseringen					
Fe dosering	mg Fe/l	-	5	-	-
PE dosering	mg PE _{actief} /l	-	0,4	-	-
O ₃ -deel					
Contacttijd O ₃ reactor	minuten	-	-	-	15
O ₃ dosering	g O ₃ /g DOC	-	-	-	0,05
Sliblijn					
Slibproductie**	kg ds/m ³ _{behandeld}	0,016	0,025	0,016	0,006
PE verbruik ontwatering	g PE _{actief} /kg ds	16	18	16	17
Eind ds%	%DS	22,1	21,6	22,1	21,6
Energieverbruik					
Totaal	kWh/ m ³ _{behandeld}	0,009	0,063	0,030	0,145***
Technologie excl opvoeren en spoelwater	kWh/ m ³ _{behandeld}	0,009	0,018	0,030	0,110***
Opvoeren 8 m	kWh/ m ³ _{behandeld}	-	0,035	-	0,035
Spoelwater	kWh/ m ³ _{behandeld}	-	0,010	-	-

* Dosering bij 80% verwijdering op 7 van de 11 gidsstoffen ten opzichte van rwzi-influent

** Bij PACAS (referentie, PACAS Nereda en PAK+O₃) is dosering gemaximaliseerd naar 2x DWA, waardoor de vermelde dosering op 80% van het jaardebiet plaatsvindt.

*** Specifiek verbruik is berekend met het debiet van de nageschakelde technologie: 5.365.500 m³/j.

3.4 ADSORPTIE AAN GRANULAIR ACTIEFKOOL (GAK)

3.4.1 WERKINGSPRINCIPE EN OPTIMALISATIES

Granulair actief kool (GAK) bestaat in tegenstelling tot poederactiefkool (PAK) uit korrels. Deze korrels zorgen in een koolfilter dat achter een bestaande zuivering wordt geplaatst, voor adsorptie van microverontreinigingen. Er is geen aanvullende filtratiestap nodig om het granulaire kool te scheiden van het behandelde water, zoals bij nageschakelde PAK dosering wél het geval is. Bovendien is het mogelijk om het verzadigde GAK te regenereren, wat bij PAK niet mogelijk is. Een ander verschil is dat op het granulaire kool tegelijkertijd bacteriën kunnen groeien, die microverontreinigingen afbreken. Ook kan de verwijdering van macroverontreinigingen zoals fosfaat en stikstof worden gestimuleerd door aanvullend chemicaliën te doseren op het GAK filter. Het is echter niet bekend in hoeverre dit een belemmering vormt voor de adsorptiecapaciteit van de kool.

In Nederland is op rwzi Horstermeer voor het eerst een full scale granulair actiefkool filter gebouwd, een filter dat in één stap zowel fosfaat, stikstof als microverontreinigingen verwijdert door toevoeging van methanol en metaalzouten. Vandaar de naam '1- STEP filter'. In de praktijk blijkt dat het 1- STEP filter effectief is voor micro- en macroverontreinigingen. Maar de standtijd voor verwijdering van microverontreinigingen is kort; al na drie maanden neemt het verwijderingsrendement voor microverontreinigingen sterk af, hoewel er nog steeds vergaand nutriënten worden verwijderd. Dit maakt de exploitatie van de technologie relatief duur, omdat de kool relatief snel moet worden geregenereerd. Het binnen het IPMV

onderzochte O3-STEP filter combineert een lage ozondosering met een 1-STEP filter waardoor de standtijd van het actief kool wordt verlengd.

De uitdaging binnen dit thema is vooral om de werking van de filters voor microverontreinigingen te verbeteren, dan wel de standtijd van het GAK te verlengen. Hierdoor dalen de kosten en wordt de effectiviteit van deze techniek verhoogd. Dit heeft binnen het IPMV vorm gekregen door optimalisaties te verkennen zoals opwaarts doorstroomde filters met (micro) GAK en actief beluchte biologisch bedreven GAK filters (Biologisch actiefkool filtratie, BAKF).

Afhankelijk van de uitvoeringsvorm is een contacttijd (EBCT) van 30 tot 60 minuten vereist om te komen tot 80% verwijdering van microverontreinigingen bij een standtijd van circa 1 jaar. Binnen het IPMV zijn de volgende optimalisaties van het GAK-concept onderzocht die grofweg opgedeeld kunnen worden in de categorie niet beluchte filters en beluchte filters:

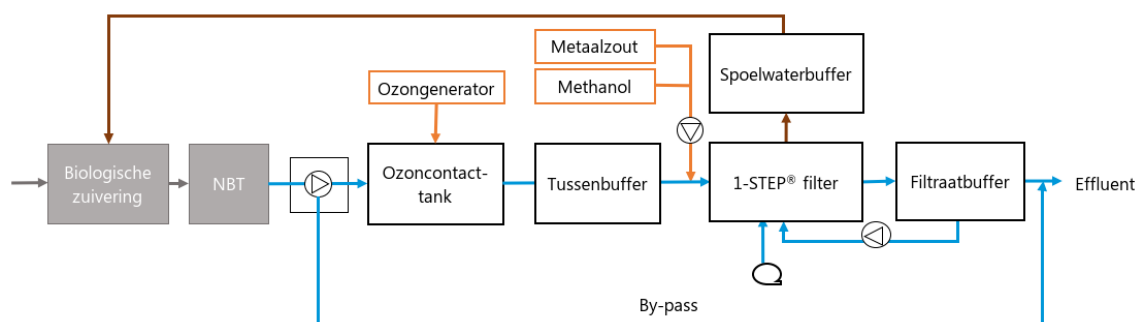
- O3-STEP (niet belucht)
- Continue upflow GAK (niet belucht)
- BODAC (belucht)
- Continue Bio-GAK + lucht (belucht)
- Aurea (BO_3) (belucht)

Een uitgebreide beschrijving van de bovengenoemde technieken is opgenomen in de factsheets in bijlage 5. Navolgend worden de technieken op hoofdlijnen beschreven.

3.4.2 BESCHRIJVING INNOVATIEVE TECHNIEKEN

O3-STEP

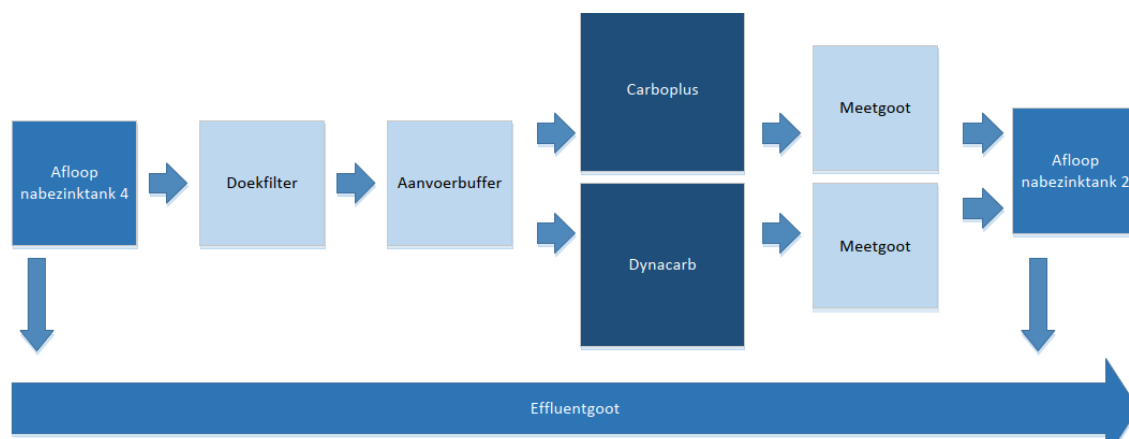
FIGUUR 3.4 BLOKSCHEMA O3-STEP



Het O3-STEP filter is een doorontwikkeling van de bestaande 1-STEP filter technologie, waar nazuivering via vastbedfiltratie met granulair actiefkool als filter- en adsorptiemedium plaatsvindt. In het 1-STEP filter vinden verschillende processen plaats: adsorptie aan het GAK, biologische afbraak, denitrificatie, fosfaatverwijdering door coagulatie en flocculatie, en filtratie. Bij het O3-STEP filter is voorafgaand aan het 1-STEP filter een ozonisatiestap toegevoegd om organische (micro-) verontreinigingen, o.a. medicijnresten, gedeeltelijk te oxideren. De beoogde voordelen t.o.v. de referentie zijn een hoger en breder verwijderingsrendement van microverontreinigingen (zie ook bijlage 6), verhoging van de standtijd van het actiefkool, het beperken van bromaatvorming en een vergelijkbare (of iets betere) CO_2 -voetafdruk en kostenindicatie. Een interessante les uit het pilotonderzoek is dat eventueel gevormd bromaat in het denitrificerende GAK filter onder anoxische condities afgebroken wordt (zie paragraaf 4.2.3).

CONTINUE UPFLOW GAK

FIGUUR 3.5 BLOKSCHEMA UPFLOW GAK



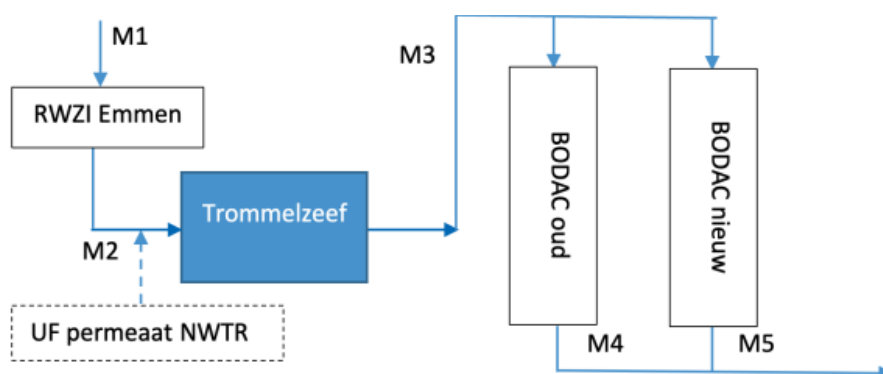
In tegenstelling tot het conventionele GAK-filter wordt het Upflow-GAK-filter van onder naar boven doorstroomd. Door de opwaartse stroming is het actief kool in beweging met als resultaat beter contact tussen actief kool en het water.

Er zijn binnen het IPMV twee verschillende upflow GAK-filters getest, namelijk het Carboplus en het Dynacarbon systeem. Het Carboplus systeem is een gefluïdiseerd bed actief kool filter, waar meerdere malen per week, afhankelijk van de behandelde hoeveelheid (afval) water, vers actief kool wordt toegevoegd en beladen kool wordt onttrokken. Hierdoor kan het filter continu worden bedreven. De Dynacarbon is een moving bed reactor, waar actief kool in wordt gebracht dat met een mammoetpomp continu wordt gewassen. De GAK wordt vervangen op het moment dat de adsorptiecapaciteit van de actief kool te ver teruggelopen is om effectief microverontreinigingen te verwijderen.

Het beoogde voordeel van deze techniek t.o.v. referentie GAK is dat door het betere contact tussen actief kool en het water goede verwijderingsrendementen worden gehaald met een lagere CO₂-voetafdruk, zeker als de verse kool zoveel mogelijk vervangen wordt door geregenereerde kool.

BODAC

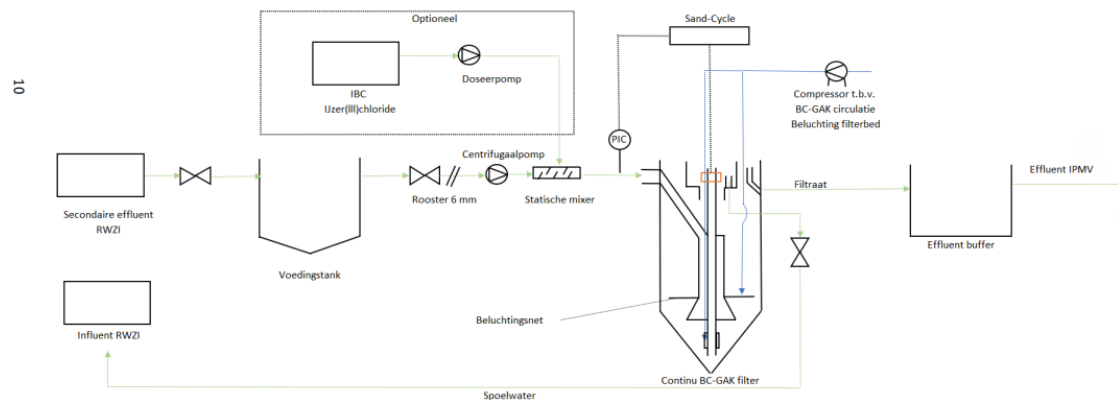
FIGUUR 3.6 BLOKSCHEMA BODAC (O.B.V. SITUATIE PILOT OP RWZI EMMEN)



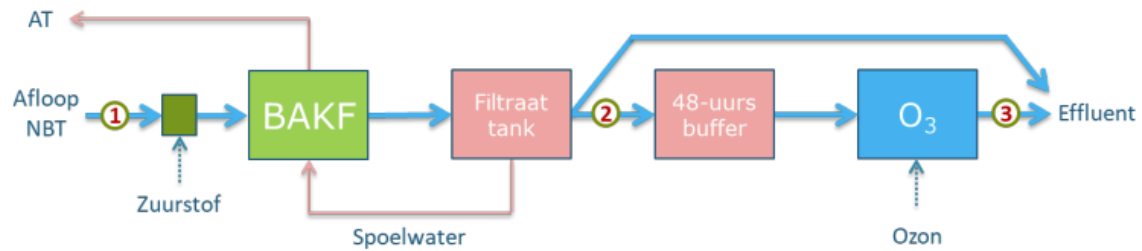
De pilot BODAC -installatie bestaat uit twee (actief kool) parallel opgestelde filtratiestappen met ontwerpverblijftijden (empty bed contact time, EBCT) van 16 tot 32 minuten. Het ene filter is gevuld met reeds verzadigde BODAC GAK (BODAC oud), terwijl het andere filter gevuld is met vers GAK. Aan het influent van beide filtratiestappen wordt zuurstof gedoseerd om aerobe omstandigheden in de BODAC-filters te creëren. De zuurstofdosing is nodig om te voldoen aan de zuurstofvraag tijdens de biologische filtratie. Bij biologische actief koolfiltratie ontwikkelt zich een biofilm op het actief kool, waardoor biologische afbraak (biodegradatie) en adsorptie van microverontreinigingen hand in hand gaan. Door biodegradatie worden geadsorbeerde microverontreinigingen afgebroken wat leidt tot bioregeneratie van de actieve kool waardoor een deel van de adsorptiecapaciteit van de GAK in stand gehouden wordt. Het beoogde voordeel t.o.v. van de referentie GAK is dat hiermee minder GAK verbruikt wordt.

CONTINUE BIO-GAK + LUCHT

FIGUUR 3.7 BLOKSCHEMA BIO-GAK + LUCHT



Dit concept, een combinatie van BODAC en upflow GAK, betreft een continue bedreven opwaarts doorstroomt GAK-filter wat actief belucht wordt. Net als in het BODAC-concept gaan adsorptie en biologische omzetting op en rond het filtermedium hand in hand. In de pilot is het concept van continufiltratie met een filtervulling van vers granulair actief kool onderzocht voor de verwijdering van microverontreinigingen. Door middel van het beluchten van het filter wordt de groei van bacteriën bevorderd die in staat zijn om microverontreinigingen om te zetten. De standtijd van het kool wordt hierdoor verlengd (beoogd voordeel). Voordat het effluent wordt gevoed aan de reactor vindt voorbehandeling plaats door middel van een trommelzeef (van BODAC).

AUREA (BO₃)**FIGUUR 3.8 BLOKSCHEMA AUREA (BO₃) PILOTINSTALLATIE, DE NUMMERS 1 T/M 3 GEVEN DE MONSTERNAMEPUNTEN WEER**

De 48-uurs buffer in Figuur 3.8 heeft enkel betrekking op de pilot-installatie en is geen onderdeel van een praktijkinstallatie.

De Aurea technologie is een 2-stapsproces bestaande uit respectievelijk biologische actiefkoolfiltratie (BAKF) en ozon behandeling voor verregaande verwijdering van microverontreinigingen en reductie van ecotoxiciteit. In de eerste stap, de BAKF, worden in een aerob milieu organische componenten biologisch (gedeeltelijk) afgebroken. Dit betreft zowel de (gedeeltelijke) afbraak van DOC als van een selectie medicijnresten. Door deze afbraak volstaat een lage ozondosering in de tweede stap voor de oxidatie van bio-recalcitrante componenten. Deze lagere ozondosering heeft naast het voordeel van een verlaging van de CO₂-voetafdruk ook een veel beperkter risico op bromaatvorming (beoogde voordeel). Daarnaast wordt beoogd dat door de combinatie van meerdere verwijderingsprocessen een breder palet aan microverontreinigingen verwijderd dan alleen BAKF (gebleken is echter dat dit palet niet breder is dan alleen ozonbehandeling, zie ook bijlage 6).

3.4.3 VERGELIJKING**GAK, NIET BELUCHT**

In onderstaande tabel is een samenvatting opgenomen van de belangrijkste kenmerken van de niet beluchte GAK technieken en is een vergelijking gemaakt met referentie GAK. O3-STEP betreft een combinatietechniek waarbij een GAK filter voorafgegaan wordt door ozon. Qua zuiveringsrendement is er voor alle technieken vanuit gegaan dat minimaal voldaan wordt aan 80% verwijdering van 7 van de 11 gidsstoffen over de gehele rwzi.

De referentie GAK en de O3-STEP pilot hebben gedraaid op de rwzi Horstermeer terwijl beide upflow GAK pilots gedraaid hebben op de rwzi Hapert. Wat opvalt is dat de referentie GAK op jaarbasis een aanzienlijk groter GAK verbruik heeft dan de overige GAK technieken (meer dan een factor 2). Dit verschil wordt veroorzaakt door de wijze waarop de referentie GAK is berekend (EBCT 30 minuten en standtijd 6 maanden) en de prestaties van de pilots. Wat verder opvalt is dat CarboPlus een aanzienlijk kleinere GAK korrel toepast en een veel kleiner filtervolume heeft dan de overige technieken. Op jaarbasis is het GAK verbruik van het CarboPlus systeem echter gelijk aan dat van het DynaCarbon filter. Een belangrijk verschil tussen het CarboPlus systeem en de overige GAK filters is dat er bij het CarboPlus systeem continue vers GAK toegevoegd wordt, dit geeft nog optimalisatie mogelijkheden in perioden dat de verwijdering in de biologie hoger of juist minder hoog is waardoor minder/meer kool gedoseerd hoeft te worden.

Als uitgangspunt voor de berekening van het verwijderingsrendement van niet beluchte GAK filters is uitgegaan van een parallel bedrijf met meerdere filters waarvan de vullingen

afzonderlijk van elkaar vervangen worden. Hierdoor wordt gerekend met een gemiddeld verwijderingsrendement over de verschillende filters.

Tot slot is te zien dat het O3-STEP systeem het laagste jaarlijkse GAK verbruik oplevert in combinatie met een lage ozondosering. Daarbij biedt dit systeem mogelijkheden om ook N (NO₃) en P effectief af te vangen door metaalzout en methanol toe te voegen aan het filter. Voor O3-STEP geldt verder dat de aangenomen standtijd van >35.000 bedvolumes in de praktijk hoger uit zou kunnen vallen. Net als bij beluchte GAK filters zou ook bij O3-STEP zonder N en P verwijdering sprake kunnen zijn van bioregeneratie maar dat moet in de praktijk nader onderzocht worden.

TABEL 3.5 SPECIFIEKE ONTWERPUITGANGSPUNTEN ADSORPTIE AAN GRANULAIR ACTIEF KOOL (ONBELUCHT)

Aspect	Eenheid	Referentie GAK	O3-STEP	UpflowGAK-CarboPlus	UpflowGAK-DynaCarbon
Pilot	Rwzi	Horstermeer	Horstermeer	Hapert	Hapert
Type filter	-	Downflow	Downflow	Upflow	Upflow
Type GAK	-	GAK 612 WFD	GAK 612 WFD	Cyclecarb 305, Chemviron ¹	Cyclecarb 401, Chemviron
EBCT bij gemiddeld debiet	min	17	17	10	28
Behandeld debiet	%	80	70	80	80
Standtijd GAK	Bedvolumina	<10.000	>35.000	- ²	15.000
GAK dosering	mg/l			30	
O ₃ dosering	g O ₃ /g DOC	-	0,4 ³	-	-
FeCl ₃	mol Fe ₃₊ /mol P		0 – 4 ³		
Methanol (99,8%)	kg/d		... ³ , 225 ⁴		
Slibproductie ⁵	g/m ³	-	-	-	-
Energieverbruik	kWh/m ³		0,12 – 0,13 ³	0,048	0,108
Verwijderings-rendement 7/11 incl rwzi	%	80-85	80-85	80-85	80-85
Verwijdering nutriënten	-	-	N+P ⁴	-	-

¹ Micro grains

² continue toevoer vers GAK

³ zonder en met FeCl₃+methanol dosering

⁴ 4 g methanol/g NOx-N +1,2 g methanol/g O₂

⁵ Slibproductie gebaseerd op biologische groei. De afvang van drogestof is afhankelijk van de concentratie onopgeloste bestanddelen in het effluent en is niet meegenomen in de slibproductie.

GAK, BELUCHT (BAKF)

In onderstaande tabel is een samenvatting opgenomen van de belangrijkste kenmerken van de beluchte GAK technieken en is een vergelijking gemaakt met referentie GAK. Beluchte GAK filters werken volgens het principe van Biologische Actief Kool Filtratie (BAKF) waarbij de biomassa rondom het GAK de microverontreinigingen afbreekt. Er is hierbij sprake van een wisselwerking tussen de adsorptie van microverontreinigingen aan het GAK en de biologische afbraak van de geadsorbeerde verontreinigingen door de aanwezige biofilm waardoor de adsorptiecapaciteit van het GAK in stand gehouden wordt (bioregeneratie). De BODAC en Aurea pilot zijn uitgevoerd met reeds verzadigd GAK wat al 13 jaar toegepast wordt in de ultrapuurwaterfabriek in Emmen. De beluchte continue Bio-GAK pilot is uitgevoerd met vers GAK en heeft ongeveer 1,5 jaar gedraaid. Ondanks dat Bio-GAK maar 1,5 jaar gedraaid heeft is te motiveren dat ook hier de vervangingsfrequentie mogelijk 15 jaar bedraagt omdat het net als BODAC en Aurea een belucht GAK-filter betreft. In de gevoeligheidsanalyse (paragraaf 4.1.4) wordt gekeken wat het effect is van uiteenlopende standtijden voor Bio-GAK.

Uit de tabel kan worden afgeleid dat het debiet dat wordt behandeld uiteenloopt van 70% tot 80% van het totale debiet van de rwzi. Voor de BODAC lijkt het logisch om ook 80%

van het totaaldebiet te behandelen omdat het vereiste rendement van 80% verwijdering over 7/11 gidsstoffen in dat geval makkelijker gehaald kan worden. Wat verder opvalt is dat de drie beluchte GAK filters bedreven worden op een relatief hoog zuurstofgehalte van >20 mg/l. De diameter van de GAK korrel van de referentie GAK is wat groter dan die van de BAKF systemen. Ook valt op dat het volume van de filters in dezelfde orde grootte ligt, tussen de 400 en 520 m³. Dit levert bij een nominale aanvoer een contacttijd (EBCT) op van meer dan 30 minuten. Daarnaast valt op dat de drie BAKF systemen een relatief lange standtijd hebben in vergelijking met de referentie GAK. De standtijd van de BAKF systemen is 30 keer zo lang als die van de referentie GAK. Voor het GAK van de BAKF systemen is een standtijd van 15 jaar aangehouden maar wellicht is dat in de praktijk nog langer (moet nog worden aangetoond). Door deze lange standtijd worden de kosten voor de vervanging van GAK sterk gereduceerd en verbetert de CO₂ voetafdruk.

Belangrijk om hier te noemen is dat op basis van de pilot resultaten aangenomen is dat BAKF geen voorfiltratie vereist en dat standtijden van 15 jaar haalbaar zijn. Dit dient in de praktijk echter nog aangetoond te worden voor verschillende soorten effluent. Op Horstermeer functioneert de BAKF zonder voorfiltratie maar op Emmen (BODAC en Bio-GAK) bleek dat voorbehandeling met b.v. een trommelfilter noodzakelijk was om te voorkomen dat er te veel materiaal in het filter kwam wat verstopping kan veroorzaken. In Aartselaar¹ (Aquafin) zijn deze filters om die reden ook in de praktijkinstallatie voorgeschakeld (O₃ + GAK). De noodzaak van voorfiltratie en de standtijd van het GAK zijn daarmee een onzekerheid en een punt voor vervolgonderzoek voor BAKF.

Een ander punt van onderzoek betreft de eventuele vergruizing en verkleefing van het GAK in het filter.

TABEL 3.6 SPECIFIEKE ONTWERPUITGANGSPUNTEN ADSORPTIE AAN GRANULAIR ACTIEF KOOL (BELUCHT) VOOR EEN 100.000 I.E. RWZI.

Aspect	Eenheid	Referentie GAK	BODAC	Continue Bio-GAK	Aurea (BO ₃)
Pilot	Rwzi	Horstermeer + ervaring Zwitserland	Emmen	Emmen	Horstermeer
Type filter	-	Downflow	Belucht, downflow	Belucht upflow	Belucht downflow
Type GAK	-	GAK 612 WFD	Norit 830P	Norit GAC 830 AF	Norit 830P
Behandeld debiet	%	80	70	80	70
Beluchting	mg O ₂ /l	Nee	20 ¹	28	20 ¹
EBCT bij gemiddeld debiet	min	17	23	37	30
Standtijd GAK	Maanden	6	180	24 – 180 ³	180
GAK verbruik	Ton/j	395 ²	12 ²	13 ²	16
O ₃ dosering	g O ₃ /g DOC	-			0,3
FeCl ₃	mol Fe ₃₊ / mol P			0 – 4 ⁴	
Slibproductie	Ton/j	-	12	14 – 220 ⁴	16
Energieverbruik	kWh/m ³	0,12-0,13	0,14	0,073	0,084
Verwijderingsprincipe	-	Adsorptie	Adsorptie + biologische afbraak	Adsorptie + biologische afbraak	Adsorptie + biologische afbraak
Verwijderings-rendement 7/11 incl rwzi	%	80-85	80	80	85
Verwijdering nutriënten	-	-	NH ₄	NH ₄ (+ P) ⁴	NH ₄

¹ Pure zuurstof

² Uitgaande van schaalgrootte 100.000 i.e. rwzi, standtijd 15 jaar bij BAKF technieken en soortelijk gewicht GAK van 450 kg/m³

³ Continue Bio-GAK is 2 jaar geleden opgestart met vers GAK. Een gelijke standtijd aan BODAC en Aurea is reëel gezien de overeenkomsten in het proces Zonder en mét FeCl₃ dosering ten behoeve van aanvullende P-verwijdering, schaalgrootte 100.000 i.e. rwzi

1 Het effluent van Aartselaar staat erom bekend veel zwevende stof te bevatten (meer dan een gemiddelde RWZI)

3.5 ADSORPTIE AAN OVERIGE NIET-FOSSIELE MATERIALEN

3.5.1 WERKINGSPRINCIPE EN OPTIMALISATIES

Binding of adsorptie van microverontreinigingen aan actief kool wordt, zoals hiervoor reeds aangegeven, nu al op praktijkschaal toegepast, vooral in het buitenland maar ook in Nederland. De rendementen zijn hoog, de kosten relatief laag. Maar het gebruikte actiefkool is doorgaans van fossiele oorsprong (steenkool of bruinkool). De uitdaging is om het actief kool duurzamer te gaan produceren (met een lagere CO₂-voetafdruk), dan wel te vervangen door alternatieve adsorptiemiddelen, zoals zeoliet of cyclodextrines

Binnen het IPMV zijn een marktverkenning en laboratoriumtesten uitgevoerd naar de beschikbaarheid en kwaliteit van niet fossiele PAK (STOWA 2020-19 en 2021-24). Hierin wordt geconcludeerd dat niet-fossiele PAK commercieel beschikbaar is en vergelijkbare verwijderingsrendementen oplevert als fossiele PAK en ook in de praktijk getest in het onderzoek Pacas Nereda en op de rwzi Groesbeek.

Voor GAK toepassing op rwzi's zijn echter weinig niet-fossiele GAK beschikbaar omdat voor GAK een harde kool vereist is waar steenkool/bruinkool een betere grondstof voor is. Het voordeel van GAK boven PAK is dat verzadigd GAK goed kan worden geregenereerd. Dit heeft een aanzienlijk lagere CO₂ footprint en kostenplaatje dan vers GAK. Bij het regenereren gaat een beperkt deel van de GAK verloren, wat aangevuld moet worden met vers GAK.

De adsorptie van microverontreinigingen aan overige niet-fossiele materialen (geen actiefkool) heeft binnen het IPMV vorm gekregen in de pilot onderzoeken naar cyclodextrines en high-silica zeolieten. Deze technieken worden in deze paragraaf vergeleken met de prestaties van GAK filters.

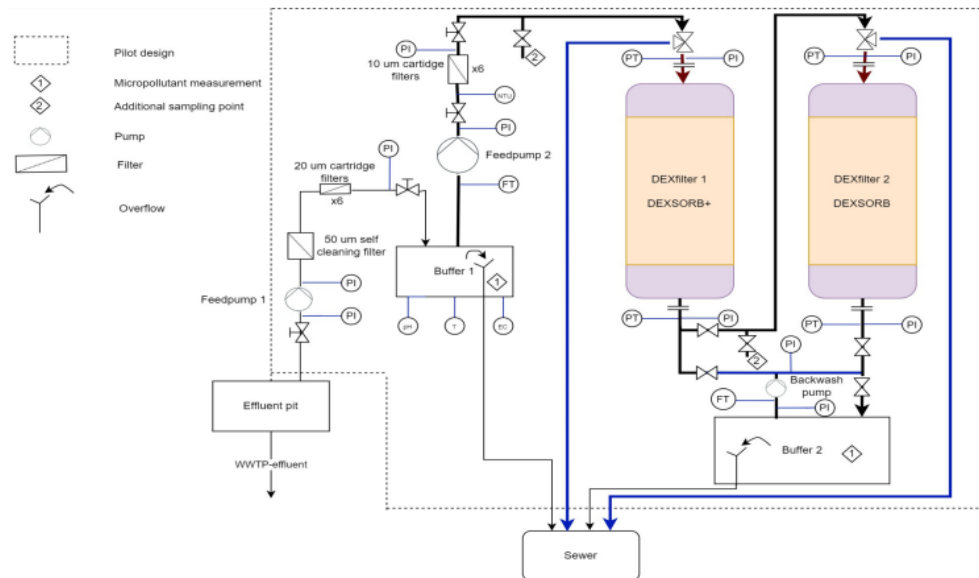
- DEX-filter (cyclodextrines)
- AdOx (high-silica zeolieten)

Een uitgebreide beschrijving van de bovengenoemde technieken is opgenomen in de factsheets in bijlage 5. Navolgend worden de technieken op hoofdlijnen beschreven.

3.5.2 BESCHRIJVING INNOVATIEVE TECHNIEKEN

DEX-FILTER

FIGUUR 3.9 BLOKSCHEMA DEX-FILTER (O.B.V. SITUATIE PILOT OP RWZI LELYSTAD)

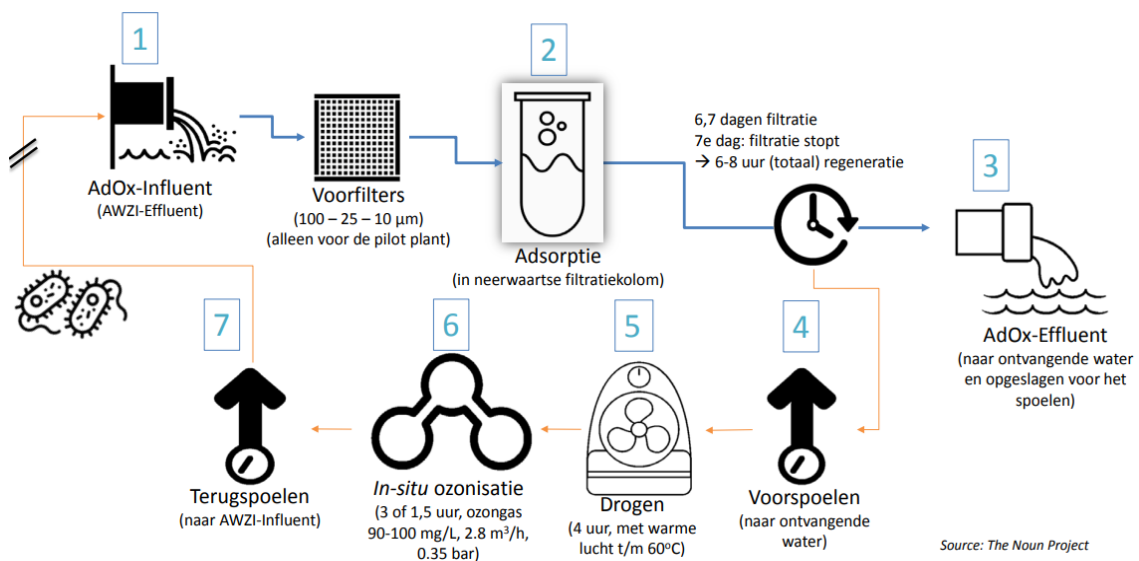


DEXSORB is de merknaam voor cyclodextrines geproduceerd door CycloPure voor toepassing in waterbehandeling. Het is afkomstig uit de luchtverfrisser industrie. Cyclodextrines zijn ringvormige moleculen, opgebouwd uit suikers. Ze vormen een soort cupjes met een positieve of negatieve lading waar de microverontreinigingen aan kunnen adsorberen door een combinatie van elektrostatische-, hydrofobe interacties en een uitsluitingsmechanisme op basis van molecuulgrootte.

Het beoogde voordeel van deze techniek is een lagere CO₂-voetafdruk. Dit omdat de adsorbens on-site kan worden geregenereerd met methanol, op kamertemperatuur.

ADOX

FIGUUR 3.10 BLOKSCHEMA ADOX (O.B.V. SITUATIE PILOT OP RWZI LEIDEN-NOORD)



Source: The Noun Project

AdOx is een adsorptie-oxidatie proces voor de verwijdering van organische microverontreinigingen. AdOx maakt gebruik van high-silica zeolieten in korrelvorm in een neerwaarts doorstroomde vastbed reactor, in deze adsorptiekolom worden microverontreinigingen uit het afvalwater geadsorbeerd. Na verzadiging van de adsorptiekolom wordt deze in-situ geregenereerd met ozongas. Met dit proces wordt een selectieve verwijdering van microverontreinigingen gerealiseerd, natuurlijk organisch materiaal (NOM) wordt niet geadsorbeerd. De beoogde voordelen van gecombineerde adsorptie met zeolieten en in-situ regeneratie met ozon zijn: geen vorming van bij- en nevenproducten zoals bromaat in het behandelde rwzi-effluent doordat geen ozon gedoseerd wordt in de hoofdstroom en weinig transportbewegingen door in-situ regeneratie. Tevens wordt geen ozon gebruikt voor oxidatie van NOM omdat NOM niet adsorbeert aan de zeolieten. Hiermee is ook het ozon verbruik laag t.o.v. ozon technieken waarbij ozon ingebracht wordt in het afvalwater.

3.5.3 VERGELIJKING

Het Dex-filter en Ad-Ox zijn twee zeer verschillende technieken. Desondanks zijn ze in onderstaande tabel naast elkaar gezet. Uit de tabel volgt dat het AdOx materiaal frequenter gereactiveerd wordt, via een in-situ ozon reiniging. Het Dex-filter wordt gereactiveerd met methanol. De geadsorbeerde verontreinigingen komen in het methanol terecht. De externe verwerking van de methanol dient in een vervolgfase verder vormgegeven te worden.

Het ontwerp van AdOx is gebaseerd op 70% van het rwzi effluent terwijl het Dex-filter 80% van het effluent behandelt. Wat verder opvalt is dat het Dex-filter een deel van de aanwezige N en P verwijdert, wat mogelijkheden biedt voor de KRW opgaven. Aanvullend onderzoek moet uitwijzen in welke mate cyclodextrines in staat zijn om aanvullend N en P te verwijderen.

Voor beide technieken liggen er nog onderzoeksvragen die beantwoord moeten worden voordat de techniek full scale toegepast kan worden op rwzi's. Voor het Dex-filter is de reactivatie van de cyclodextrines en de verdere verwerking van de methanol een aandachtspunt terwijl voor AdOx optimalere zeolieten in ontwikkeling zijn waar hogere verwijderingsrendementen op microverontreinigingen mee gehaald kunnen worden. Ook de noodzaak van een eventuele voorbehandeling moet voor beide technieken worden vastgesteld. Voor beide technieken geldt dat een langdurigere pilot nodig is om aanpassingen en optimalisaties door te voeren en te testen. Beide technieken bieden voor de langere termijn (>5 jaar) veel perspectief als alternatief voor ozon of actief kool.

TABEL 3.7 SPECIFIEKE ONTWERPUITGANGSPUNTEN OVERIGE ADSORPTIE VOOR EEN 100.000 I.E. RWZI

Aspect	Eenheid	Dex-filter	AdOx
Pilot	Rwzi	Lelystad	Leiden-Noord
Type filter	-	Zelfreinigend filter en kaarsfilter	Voorfilter
Type adsorptiemateriaal	-	Cyclodextrines	Zeolietkorrels
Behandeld debiet	%	80	70
Diameter korrels	mm	0,2 – 1,5	2-15
Volume filter	m ³	174	174
Standtijd korrels tot regeneratie	tijd	6,8 maanden	7 dagen
O ₃ dosering per m3 behandeld effluent	kg/m3		0,0077
Energieverbruik per behandelde m3	kWh/m3	0,03	0,06
Verwijderings-rendement 7/11 incl rwzi	%	80-95	79
Verwijdering nutriënten	-	N, P	-

3.6 OXIDATIEVE TECHNIEKEN

3.6.1 WERKINGSPRINCIPE EN OPTIMALISATIES

Er bestaat een scala aan zogenoemde oxidatieve zuiveringstechnieken waarmee microverontreinigingen in rwzi-afvalwater worden afgebroken. De microverontreinigingen worden hierbij afgebroken, ze blijven niet intact zoals bij adsorptie- en filtratietechnieken.

Deze afbraak betreft doorgaans geen volledige mineralisatie tot CO_2 . Typisch worden de organische microverontreinigingen geoxideerd tot zogenaamde transformatieproducten. Deze stoffen zijn in vrijwel alle gevallen niet of minder toxisch dan de microverontreinigingen waaruit ze gevormd zijn. Op een enkele uitzondering na worden transformatieproducten daarom niet geclassificeerd als ongewenst (STOWA, 2022). Bioassays, zoals beschreven bij ecotoxicologische risico's in paragrafen 2.8 en 4.2.1, geven inzicht in toxiciteit.

Naast de afbraak van organische microverontreinigingen reageert ozon (of een andere oxidator) ook met andere organische en anorganische componenten in het rwzi-effluent (de matrix) tot zogenaamde oxidatie nevenproducten. De term oxidatieproducten duidt op het totaal van transformatieproducten en oxidatie nevenproducten. Theoretisch gezien kunnen duizenden verschillende oxidatieproducten gevormd worden tijdens ozonisatie. Vele daarvan betreffen onbekende stoffen. Van de bekende oxidatie nevenproducten zijn er enkele ongewenst. Dit zijn stoffen die potentieel gevormd kunnen worden boven ecotoxicologisch relevante concentraties en/of vanwege risico's voor humane gezondheid een negatieve invloed hebben op drinkwaterbronnen. De meeste ongewenste organische oxidatie nevenproducten zijn biologisch goed afbreekbaar, bijvoorbeeld aldehyden, ketonen en carbonzuren. Enkele ongewenste anorganische nevenproducten zijn moeilijk te verwijderen, bijvoorbeeld bromaat.

Ozonisatie (het doseren van O_3) wordt het vaakst toegepast als oxidatieve techniek, vooral in het buitenland. In Nederland is op rwzi Houten in 2021 de eerste praktijkinstallatie in gebruik genomen. Op RWZI's Wervershoof (vanaf 2024), en Hapert² (vanaf eind 2024) zijn/worden ozoninstallaties gerealiseerd. Op RWZI Horstermeer (ozon vanaf 2024 voorafgaand aan het al aanwezige GAK-filter), Dinther (demo PACAS-Ozon vanaf zomer 2024) en op RWZI Winterswijk (Ozon+GAK vanaf eind 2024) zijn of worden combinatie technieken toegepast.

Naast ozonisatie kunnen andere technologieën worden toegepast voor de omzetting, bijvoorbeeld UV-licht in combinatie met waterstofperoxide.

Binnen het IPMV zijn de volgende optimalisaties van de oxidatieve en/of ozonisatie-technologieën onderzocht:

- ZF+UV/ H_2O_2
- O_3 +Ultrasound
- O3-STEP (zonder N en P verwijdering) (combinatie van oxidatie en Actief kool)
- PAK- O_3 (combinatie van oxidatie en Actief kool)
- Microforce (combinatie van oxidatie en biologische afbraak)
- Aurea (BO_3) (combinatie van oxidatie en biologische afbraak)
- Directe NF + UV/ H_2O_2 (combinatie van oxidatie met filtratie)
- O_3 +keramische MF (combinatie van oxidatie met filtratie)

2 Hierbij is in het ontwerp al rekening gehouden met dosering van waterstofperoxide

Belangrijke vragen binnen dit thema zijn of er (combinaties van) kosteneffectieve oxidatieve technieken zijn waarbij het risico op de vorming van schadelijke bijproducten veel kleiner is dan van de huidige technieken, en hoe de vorming van schadelijke bijproducten beperkt kan worden. Een voorbeeld hiervan is de omzetting van bromide naar het persistente bromaat bij ozondosering. Binnen het IPMV is een literatuurstudie naar oxidatieproducten uitgevoerd en is een technische handreiking opgesteld over oxidatieproducten bij ozonisatie en hoe deze te voorkomen/minimaliseren. Deze onderzoeken zijn benoemd in bijlage 1 en zijn niet verder uitgewerkt in deze verkenning.

De optimalisatie van de technieken met ozon binnen het IPMV zijn voornamelijk gericht op een lagere specifieke ozondosering ($\text{g O}_3/\text{g DOC}$). In de technische handreiking oxidatieproducten bij ozonisatie (STOWA 2022-48) is geconcludeerd:

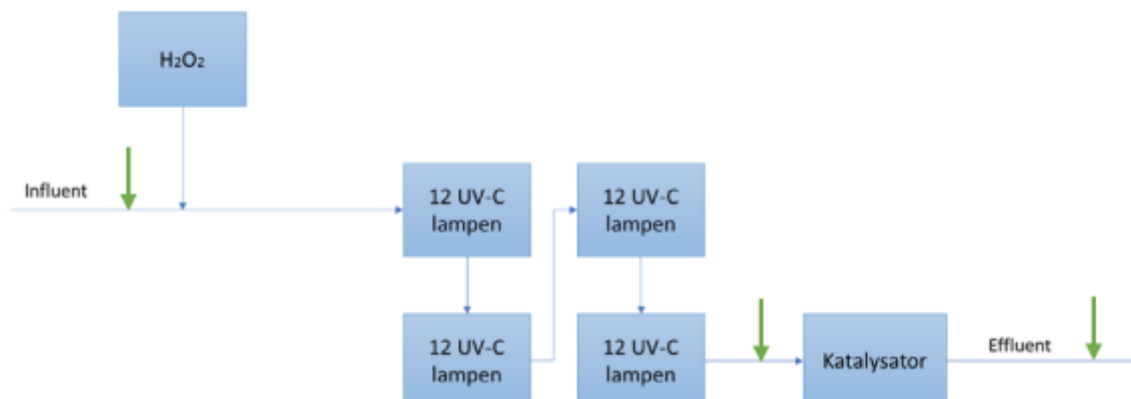
- Een relatieve ozondosering van $<0,6 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$ volstaat voor een $>80\%$ verwijdering van 7 van de 11 best verwijderde gidsstoffen.
- Nauwelijks of geen bromaat- en NDMA³-vorming bij een ozondosering van $<0,6 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$.
- Biologische effectmetingen tonen op (vrijwel) alle toxicologische eindpunten een verbetering door ozonisatie bij een ozondosering van $<0,6 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$, de bioassay P53-Calux kan mogelijk een lichte verslechtering tonen.

Een uitgebreide beschrijving van de bovengenoemde oxidatieve technieken die binnen het IPMV zijn onderzocht, is opgenomen in de factsheets in bijlage 5. Navolgend worden de technieken op hoofdlijnen beschreven en vergeleken.

3.6.2 BESCHRIJVING INNOVATIEVE TECHNIKEN

ZF+UV/H₂O

FIGUUR 3.11 BLOKSCHEMA ZF+UV/H₂O₂ (O.B.V. SITUATIE PILOT OP RWZI AARLE-RIXTEL)



Bij de oxidatieve techniek UV in combinatie met waterstofperoxide (H_2O_2) wordt eerst H_2O_2 (in overmaat) gedoseerd, waarna dit wordt bestraald door UV licht (golflengte 254 nm). Door de bestraling van H_2O_2 worden hydroxylradicalen geproduceerd. Niet alle H_2O_2 wordt verbruikt. Om te voorkomen dat het resterende H_2O_2 met het effluent op het oppervlaktewater wordt geloosd wordt het water door een katalysatorbed gevoerd. Hier wordt het resterende H_2O_2 katalytisch omgezet in H_2O en O_2 . Na het katalysatorbed wordt het water geloosd op de effluentgoot van de rwzi. Bij deze techniek treden drie reacties op, namelijk

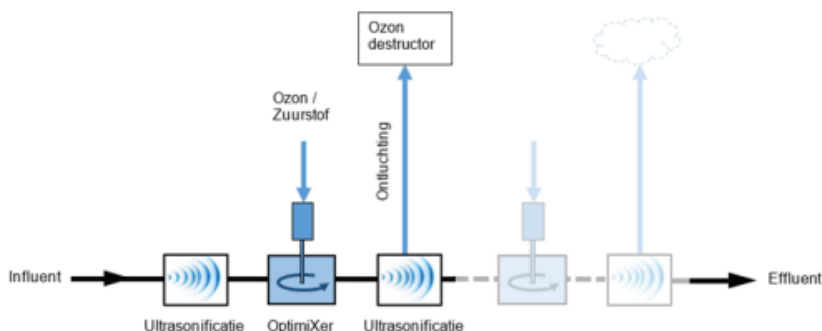
3 Nitrosamines zijn een groep ongewenste stoffen die tijdens ozonisatie gevormd kunnen worden. N-Nitrosodimethylamine (NDMA) is de bekendste stof uit deze groep, NDMA is een ZZS.

(1) fotolyse, (2) oxidatie met hydroxylradicalen en (3) oxidatie met H_2O_2 . Deze combinatie van reacties biedt voordelen. Bepaalde medicijnen zullen vooral afgebroken worden door fotolyse, terwijl andere nauwelijks gevoelig zijn voor fotolyse maar vooral door oxidatie worden omgezet. De combinatie UV en H_2O_2 is getest op de rwzi Aarle Rixtel.

Beoogde voordelen t.o.v. de referentietechnologie zijn een verhoogd verwijderingsrendement en een verbeterde SIMONI (slimme integrale monitoring, een maat voor toxiciteit) score.

O_3 +ULTRASOUND

FIGUUR 3.12

BLOKSCHEMA O_3 + ULTRASOUND

Bij O_3 +Ultrasound (USONiQ) wordt een combinatie van ozon en ultrasoon geluid toegepast. Ultrasoon geluid versterkt het ozonisatieproces op verschillende manieren:

- het losbreken van bacteriële clusters;
- het verbreken van chemische verbindingen in het celmembraan;
- het verbeteren van de vorming van vrije radicalen uit ozon;
- het verbeteren van de overdracht van ozon van de gas- naar de vloeibare fase.

Het systeem bestaat uit een roestvrijstalen, buisvormige reactor. In deze leiding vindt achtereenvolgens de toediening van ultrasound, ozon en nogmaals ultrasound plaats. In het deel dat als reactieruimte dient voor de behandeling met ultrasound zijn ultrasoundgeneratoren verdeeld over de leiding. Daarna vindt ozontoevoer plaats dicht bij een gepatenteerde mengschijf die voor optimale menging van de ingebrachte ozon zorgt. Vervolgens wordt er opnieuw ultrasound toegediend.

Beoogde voordelen ten opzichte van referentie-ozon: de ruimtelijke voetafdruk van een USONiQ installatie is beduidend kleiner dan die van een reguliere ozon installatie; bij O_3 +Ultrasound volstaan beduidend lagere verblijftijden en O_3 -doseringen om hetzelfde verwijderingsrendement te behalen als met reguliere ozon behandelingsinstallaties

O3-STEP (ZONDER N EN P VERWIJDERING) (COMBINATIE VAN OXIDATIE EN ACTIEF KOOL)

Omdat deze technologie een combinatie is van oxidatie en granulair kool is deze technologie eerder al in paragraaf 3.4 beschreven.

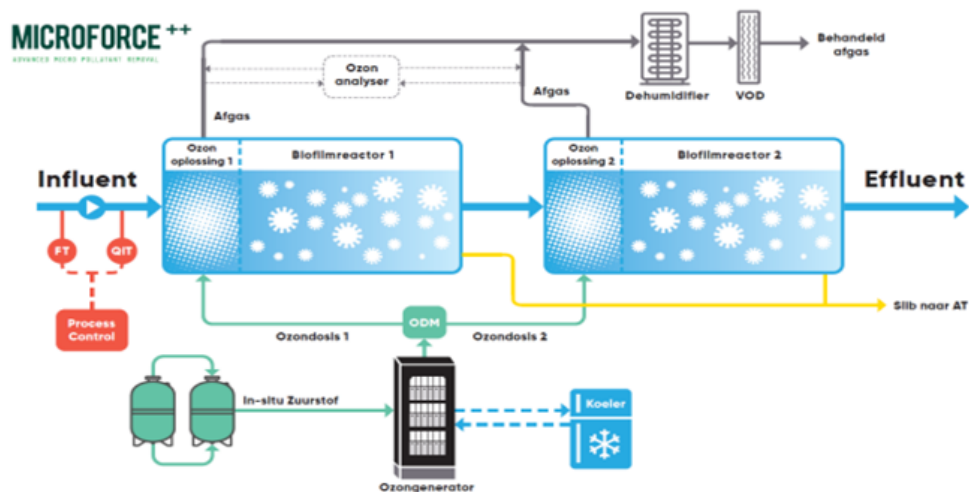
PAK-O₃ (COMBINATIE VAN OXIDATIE EN ACTIEF KOOL)

Omdat deze technologie een combinatie is van poederkool en oxidatie is deze technologie eerder al in paragraaf 3.3.2 beschreven.

MICROFORCE (COMBINATIE VAN OXIDATIE EN BIOLOGISCHE AFBRAAK)

FIGUUR 3.13

BLOKSCHEMA MICROFORCE++

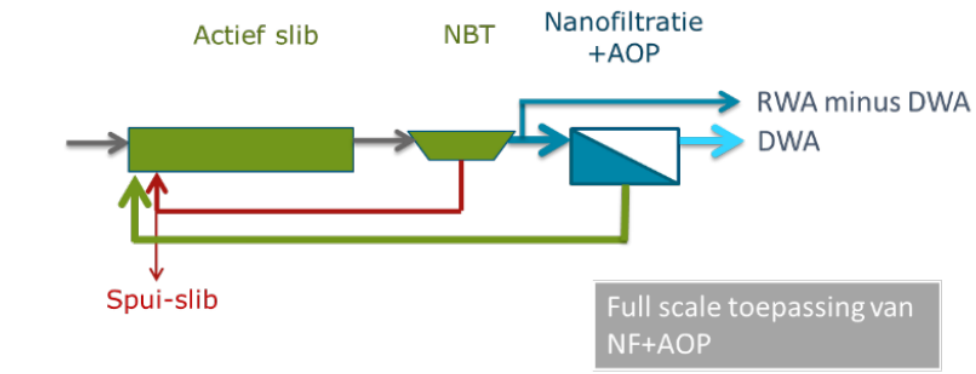


MicroForce++ staat voor ozonisatie en biologische oxidatie. Het MicroForce++ proces bestaat uit twee opeenvolgende, in serie geschakelde O₃/Bio reactoren waarbij in elke O₃/Bio reactor een specifieke ozondosis wordt gehanteerd. In iedere reactor wordt het effluent eerst behandeld met ozon in het ozoncompartiment, gevolgd door een biologische reactor met een biofilm-op-drager technologie waar verdere afbraak plaatsvindt.

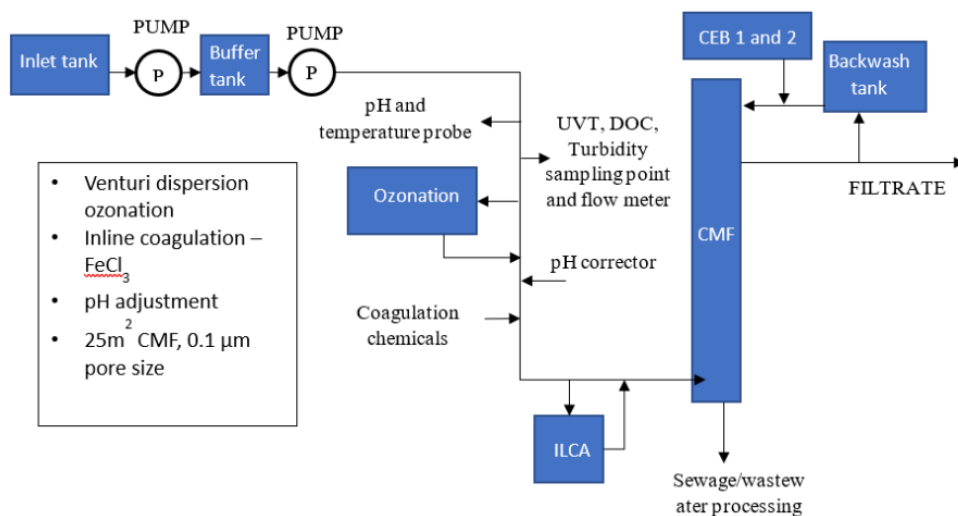
Het beoogde voordeel van deze techniek is dat door de introductie van een biologische stap de ozonvraag verlaagd wordt ten opzichte van de stand der techniek. Door de combinatie van ozon en biologie wordt ammonium verregaand omgezet.

AUREA (BO₃) (COMBINATIE VAN OXIDATIE EN BIOLOGISCHE AFBRAAK)

Omdat deze technologie een combinatie is van biologische actief kool filtratie en oxidatie is deze technologie eerder al in paragraaf 3.4.2 beschreven.

DIRECTE NANOFILTRATIE EN UV/PEROXIDE (COMBINATIE VAN OXIDATIE MET FILTRATIE)**FIGUUR 3.14 BLOKSCHEMA DIRECTE NANOFILTRATIE EN UV/PEROXIDE**

Nanofiltratie (NF) is een scheidingstechniek. NF-membranen zijn fysieke barrières met openingen in het bereik van 1 – 10 nm. Pathogenen en zwevende stof kunnen daarmee nagenoeg volledig worden afgescheiden van water. Grotere, opgeloste moleculen worden ook nagenoeg volledig afgescheiden, waaronder humuszuren en een deel van de microverontreinigingen, maar ook fosfaat en nitraat. Ammonium is een klein molecuul dat niet wordt verwijderd. De afgescheiden componenten belanden in een concentraatstroom, die eventueel kan worden nabehandeld. In vergelijking met de referentietechnieken heeft NF een grote bijvangst (beoogd voordeel). Door de absolute barrière van het membraan worden bijvoorbeeld microplastics tegengehouden en vindt er desinfectie plaats. Om het verwijderingsrendement te verhogen wordt na de NF-stap een nabehandeling met UV en waterstofperoxide geplaatst. Doordat de membranen de “kleurcomponenten” verwijderen neemt de UV-transmissie van het water aanzienlijk toe, waardoor behandeling met UV efficiënt kan plaatsvinden. Daarnaast geeft deze hybride opwerking extra robuustheid voor het leveren van bacteriologisch en chemisch betrouwbaar water op een kwaliteitsniveau dat drinkwater benadert, waardoor mogelijkheden ontstaan voor hoogwaardig hergebruik.

O₃+KERAMISCHE MICROFILTRATIE (COMBINATIE VAN OXIDATIE MET FILTRATIE)**FIGUUR 3.15 BLOKSCHEMA OZON MET KERAMISCHE MICROFILTRATIE**

In ozon met keramische microfiltratie wordt in de eerste stap via ozonisatie het water ontdaan van microverontreinigingen. Afhankelijk van de gewenste effluentkwaliteit kan deze stap worden gecombineerd met H_2O_2 dosering. Vervolgens is er een in-line coagulatie (ILCA) stap ten behoeve van een optimale keramische microfiltratie (CMF) om gesuspenderde deeltjes, microplastics en bacteriën/virussen te verwijderen. Het beoogde voordeel van deze techniek zit hem in het dusdanig zuiveren van water voor hoogwaardig hergebruik van het effluent.

3.6.3 VERGELIJKING

In Tabel 3.8 zijn de ontwerpuitgangspunten van het oxidatie gedeelte van de technieken gegeven. Hieruit blijkt dat de systemen een specifieke ozondosering hebben tussen 0,3 en 0,55 g O_3 /g DOC en dus allemaal lager zijn dan de ozon referentie met 0,6 g O_3 /g DOC.

Ook de verblijftijd in de contacttank is over het algemeen korter, tussen enkele minuten tot 15 minuten. Dit betekent een besparing op het ozonverbruik en een compactere reactorruimte. Alleen bij Microforce staat een hogere verblijftijd: dit zijn 2 reactoren met elk 15 min verblijftijd. Echter elke reactor bestaat uit een combinatie van een ozonreactor en een biologische reactor, waardoor deze waarde niet goed vergelijkbaar is. Twee technieken (O_3 + ultrasound en Microforce) hebben een eigen ozon inbrengsysteem, de andere technieken kunnen met elk soort inbrengsysteem worden uitgerust (diffusers nu vermeld in de tabel).

Het energieverbruik van ZF+UV/ H_2O_2 is met ca 0,95 kWh/m³ behandeld veruit het hoogst door het energieverbruik van de UV lampen, waarbij door de lage transmissie meer UV -lampen benodigd zijn dan vooraf beoogd. Het energieverbruik van PAK+ O_3 is met 0,15 kWh/m³ behandeld net iets hoger dan de referentie ozon (0,13 kWh/m³ behandeld) en het verbruik van de overige technologieën is met 0,10 en 0,13 kWh/ m³ behandeld net iets lager of vergelijkbaar met de referentie.

TABEL 3.8 SPECIFIEKE ONTWERPUITGANGSPUNTEN OXIDATIEVE TECHNIEKEN (OXIDATIE DEEL)

Parameter	Eenheid	Ref – O ₃	O3-STEP	ZF+UV/H ₂ O ₂	O ₃ + Ultrasound	PAC+O ₃	Microforce	Aurea (BO ₃)	NF+UV/H ₂ O ₂	O ₃ +kerMF
Oxidatie met ozon en/of H ₂ O ₂										
Specifieke nominale O ₃ dosering	g O ₃ /g DOC	0,6	0,4	-	0,55	0,5	0,43 ²	0,3	-	0,6
Contacttijd O ₃ reactor	min	20	10	-	enkele minuten	15	2x 15 ³	7,5	-	20
O ₃ inbreng ¹	-	diffusors	diffusors	-	USONiQ system	diffusors	Pureblue systeem	diffusors	-	diffusors
H ₂ O ₂	ppm	0	0	30	0	0	0	0	15	0
UV technieken										
Aantal UV-lampen	aantal/1.000.000 m ³ behandeld			156				18		
HRT UV	min			6				nb		
Doseerrange	J/m ²			15.000				6.100		
Transmissie	%			60				95		
Energieverbruik ⁴										
Totaal	kWh/ m ³ behandeld	0,13	0,12	0,95	0,13	0,15	0,11	0,08	0,39	0,20
Technologie excl opvoeren en spoelwater	kWh/ m ³ behandeld	0,096	0,078	0,092	0,097	0,110	0,068	0,047	0,39	0,146
Opvoeren 8 m	kWh/ m ³ behandeld	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0	0,035
Spoelwater	kWh/ m ³ behandeld	0	0,002	0,020	0	0	0,002	0,002	0	0,020

¹ Indien diffusors: ook andere inbrengsystemen mogelijk. Het is mogelijk dat het onderzoek met venturi is uitgevoerd, maar dat voor full scale bij voorkeur diffusors is geadviseerd.

² Totale dosering is verdeeld over 2 na elkaar geschakelde reactoren

³ 2 bioreactoren met een verblijftijd van 15 min per bioreactor (ozon+biologie)

⁴ Het energieverbruik van ozon kan in de praktijk wellicht nog wat lager uitvallen, dit moet nog blijken uit praktijkmetingen op ozon installaties

In de volgende paragrafen zijn de ontwerpuitgangspunten van de ‘andere’ werkingsprincipes van de combinatie met oxidatie gegeven; respectievelijk actief kool, biologische afbraak en filtratie.

COMBINATIE VAN OXIDATIE EN ACTIEF KOOL

Door een actief kool technologie te combineren met oxidatie, wordt niet alleen de ozon-dosering lager, zie hiervoor, maar is ook het verbruik van het PAK lager of de standtijd van het GAK langer dan bij de referentietechnologieën PACAS en GAK, zie Tabel 3.9.

TABEL 3.9 SPECIFIEKE ONTWERPUITGANGSPUNTEN OXIDATIEVE TECHNIEKEN (MET ACTIEF KOOL) 100.000 I.E.

Parameter	Eenheid	Ref - PACAS	Ref - O ₃	Ref - GAK	O3-STEP	PAK+O ₃
PACAS	0				0	
PAK-dosering-nominaal	mg/L	20	-	-	-	7,5
PAK verbruik vers ²	ton PAK/jr	123	-	-	-	46,0
Droge stof gehalte ontwaterd slib zonder PAK (en evt. extra Fe)	%ds	-	21,1	21,1	21,1	-
Droge stof gehalte ontwaterd slib met PAK (en evt. extra Fe)	%ds	22,1	-	-	-	21,6
Extra af te voeren slib ¹	kg ds/behandelde m ³	0,016	-	-	-	0,006
Granulair actief kool (GAK)						
hydraulisch belasting	m/h			8	10 tot 15	
EBCT bij DWA ontwerp piek	min			30	10	
Standtijd kool	maanden			4-6	23	
Standtijd kool	bedvolumina				>35.000	
GAK verbruik vers ²	ton GAK/jr			83,2	31,2	
GAK verbruik geregenereerd ²	ton GAK/jr			312	49,6	
Extra af te voeren slib	kg ds/behandelde m ³			0	0	
Spoelwater	% tov influent debiet			1%	1%	

¹ Aantal behandelde m³ om de afvoer van slib te berekenen voor zowel PACAS als PAK+O₃: 80% maal 7.665.000 m³/jr.

² PAK- en GAK-verbruik voor de standaard rwzi van 100.000 i.e. à 150 g TZV

COMBINATIE VAN OXIDATIE EN BIOLOGISCHE AFBRAAK

De twee technologieën Microforce en Aurea (BO₃) combineren ozonisatie met biologische afbraak. Het ontwerp van de biologische stap van beide technieken is onderling met elkaar vergeleken in Tabel 3.10.

TABEL 3.10 SPECIFIEKE ONTWERPUITGANGSPUNTEN OXIDATIEVE TECHNIEKEN (OXIDATIE DEEL)

Parameter	Eenheid	Microforce	Aurea (BO ₃)
Biologische reactor i.c.m. O ₃			
Type dragermateriaal	-	Ringetjes van HDPE, diameter 17 mm, dikte 5 mm, specifiek oppervlak 1150 m ² /m ³	GAK
Standtijd dragermateriaal	maand	1	180
Dichtheid dragermateriaal	kg/m ³	nb	400 - 500
Contacttijd biologische reactor	min	2 reactoren van ieder tussen de 7,5 en 15	20 - 35
Hoogte biologische reactor	m	2,2 - 3,5	2 - 3,5
EBCT minimaal	min	3,75	20
EBCT nominaal	min	15	30
Zuurstof setpoint oploop	mg/L	Nb	0 - 20
Slib gevormd	kg ds/behandelde m ³	0,0030	0,0030

¹ Microforce zou niet vervangen hoeven worden, Aurea (BO₃) is gelijk aan BODAC op 15 jaar gesteld, zie paragraaf 3.4.

COMBINATIE VAN OXIDATIE EN MEMBRAANFILTRATIE

De vergelijking van de twee technieken die oxidatie en filtratie combineren, is beschreven in paragraaf 3.7.3.

3.7 FILTRATIETECHNIKEN IN COMBINATIE MET OXIDATIE

3.7.1 WERKINGSPRINCIPE EN OPTIMALISATIES

Filtratietechnieken betreffen technieken waarbij microverontreinigingen op basis van molecuulgrootte uit rwzi effluent verwijderd worden. Filtratietechnieken worden in de drinkwatersector en de industrie regelmatig toegepast maar met de nabehandeling van rwzi effluent is internationaal weinig ervaring. Enkel in situaties waar drinkwater schaars is en er een noodzaak is voor de opwerking van rwzi effluent tot drinkwater of proceswater wordt membraanfiltratie toegepast. De twee geteste technieken betreffen combinatietechnieken bestaande uit een filtratiestap en oxidatie-techniek.

Nanofiltratie is een proces dat al langer wordt gebruikt bij de bereiding van drinkwater. Hierbij wordt water onder druk door een membraan geperst met zeer kleine filterporiën (tussen 1 en 10 nm). Nanofiltratie van effluent is veelbelovend voor vergaande verwijdering van microverontreinigingen, tot meer dan negentig procent. Een uitdaging is de wijze waarop de afgescheiden fractie (concentraat), waarin zich de microverontreinigingen bevinden, wordt behandeld. Bovendien is drinkwater van een geheel andere samenstelling dan gezuiverd afvalwater, waardoor de techniek niet zonder aanvullende maatregelen kan worden toegepast.

Bij microfiltratie worden alleen onopgeloste bestanddelen verwijderd. De poriegrootte is 0,1 tot 10 µm. Microfiltratie vraagt geen verdere voorbehandeling maar heeft als nadeel dat bijvoorbeeld virussen slechts gedeeltelijk tegen gehouden worden en opgeloste bestanddelen zoals microverontreinigingen helemaal niet. Daarvoor dient dus een aanvullende zuiveringstechniek te worden toegepast.

Het gezuiverde water met een zeer goede kwaliteit is aantrekkelijk om in te zetten voor andere toepassingen.

Binnen het IPMV zijn de volgende filtratietechnieken onderzocht:

- Directe nanofiltratie en UV/peroxide (NF+UV/H₂O₂)
- Ozon met keramische microfiltratie (O₃+keramischeMF)

Een uitgebreide beschrijving van de bovengenoemde filtratie technieken die binnen het IPMV zijn onderzocht, is opgenomen in de factsheets in bijlage 5. Navolgend worden de technieken op hoofdlijnen beschreven en vergeleken.

3.7.2 BESCHRIJVING INNOVATIEVE TECHNIEKEN

DIRECTE NANOFILTRATIE EN UV/PEROXIDE

Omdat deze technologie een combinatie is van oxidatie en filtratie is deze technologie eerder al in paragraaf 3.6.2 beschreven.

OZON MET KERAMISCHE MICROFILTRATIE

Omdat deze technologie een combinatie is van oxidatie en filtratie is deze technologie eerder al in paragraaf 3.6.2 beschreven.

3.7.3 VERGELIJKING

Uit het pilot onderzoek komt naar voren dat membraanfiltratie gecombineerd moet worden met andere technieken om toegepast te kunnen worden voor de verwijdering van microverontreinigingen uit rwzi effluent. In het geval van directe nanofiltratie is een voorbehandeling van coagulatie noodzakelijk om de belasting op de membranen te verminderen. Enkel keramische microfiltratie verwijdert nauwelijks microverontreinigingen waardoor een combinatie met ozondosering noodzakelijk is.

Voor directe nanofiltratie + UV/H₂O₂ is de verwerkingsroute voor concentraat nog niet uitgewerkt en nog niet meegenomen in de CO₂-voetafdruk en de kosten. Omdat concentraatverwerking een aanzienlijk effect zal hebben op de uiteindelijke kosten en CO₂-voetafdruk van de techniek is vervolgonderzoek nodig voordat de techniek voor een full scale rwzi overwogen kan worden.

Voor O₃ + keramische microfiltratie geldt dat de keramische microfiltratie nauwelijks effect heeft op de verwijdering van microverontreinigingen waardoor de meerwaarde van het systeem beperkt is. Wel biedt deze technologie, net als de nanofiltratie + UV/H₂O₂, mogelijkheden voor hoogwaardig hergebruik van effluent. Ook hier is aanvullend onderzoek nodig om het proces te optimaliseren alvorens het toegepast kan worden op een rwzi.

In onderstaande tabel zijn de kenmerken van de membraanfiltratie opgenomen. De kenmerken van de benodigde oxidatie stap zijn uitgewerkt in paragraaf 3.6.2.

TABEL 3.11 SPECIFIEKE ONTWERPUITGANGSPUNTEN FILTRATIETECHNIEKEN (FILTRATIE + OXIDATIE DEEL)

Parameter	Eenheid	Ref - O ₃	NF+UV/H ₂ O ₂	O ₃ +keramischeMF
Filtratie				
Voorfilter aanwezig	-	Nee	Ja, doekfilter 200 µm	nee
Overige voorbehandeling		nee	Cogulatie	nee
Type membranen			DNF 80	Keramisch microfilter
Membraanmateriaal			Modified PES	keramisch
Behandeld effluent	%		70	70
Recovery	%		75	-
Filtratiecyclus (filtratie/reiniging)	min/min		59/1	-
FeCl ₃ (coagulant)	mg Fe ³⁺ /L		n.v.t.	10
Type reinigingsmiddel	type		natronloog, natriumhypochloriet, citroenzuur	natronloog, natriumhypochloriet, zoutzuur, waterstofperoxide
Hoeveel reinigingsmiddel voor standaard rwzi van 100.000 i.e. à 150 g TZV	kg/j		NaOH 50%: 6.592, NaOCl 15%: 14.313, Citroenzuur 50%: 12.842	natronloog 50%: 25.245; natriumhypochloriet 15%: 11.870; zoutzuur 36%: 2.980; waterstofperoxide 50%: 7.824
Totaal Energieverbruik	kWh/ m ³ behandeld		0,39	0,20
Technologie excl. opvoeren en spoelwater	kWh/ m ³ behandeld		0,39	0,146
Opvoeren 8 m	kWh/ m ³ behandeld		-	0,035
Spoelwater	kWh/ m ³ behandeld		-	0,020

4

PRESTATIES TECHNOLOGIEËN

In dit hoofdstuk worden de prestaties van de beschouwde technieken inzichtelijk gemaakt en beschreven. Eerst wordt ingegaan op de kwantitatieve prestaties (verwijderingsrendement, CO₂-voetafdruk en kosten) vervolgens wordt ingegaan op de kwalitatieve prestaties (ecotoxiciteit, bijvangst nutriënten, minimalisatie bromaatvorming en bijvangst AMR, PFAS, microplastics en hergebruik effluent).

4.1 KWANTITATIEF

4.1.1 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN: NL 7 VAN DE 11 EN EU 6 VAN DE 12

NEDERLANDSE GIDSSTOFFEN: 7 VAN DE 11

Voor deze evaluatie zijn de ontwerpcriteria voor de technologieën zodanig gekozen dat een totaal rendement over de gehele rwzi van 80% gerealiseerd kan worden op 7 van de 11 Nederlandse gidsstoffen.

De verwijderingsrendementen uit Tabel 41 laten dan ook zien dat de meeste technologieën op of boven die 80% rendement zitten. Op basis van het criterium verwijderingsrendement 7 van de 11 is daarom zeer beperkt onderscheid te maken tussen de verschillende technieken. Enkel de verwijdering bij ZF+UV/H₂O₂ en AdOx was rond de 75%. Bij ZF+UV/H₂O₂ werd dit veroorzaakt doordat de transmissie van het effluent relatief laag was en bij AdOx doordat het onderzoek nog niet was afgerond toen het IPMV programma eindigde.

De verwijderingsrendementen in de tabel zijn gebaseerd op de pilotonderzoeken op één rwzi gedurende (meestal) een relatief korte periode. In de rapportages van de pilotonderzoeken is meer inzicht gegeven in de individuele rendementen van de stoffen en welke 7 stoffen het best verwijderd worden. In sommige pilotonderzoeken is het rendement van de rwzi waar het onderzoek plaatsvond meegenomen, maar veelal is de vertaling van het nageschatte rendement naar het totaal rendement gedaan op basis van de rekentool behorende bij STOWA 2020-06 die voor het IPMV ingevuld is voor de standaard rwzi van 100.000 i.e. à 150 g TZV, zie bijlage 2.

De komende jaren zullen meerdere demonstratie / full scale installaties in bedrijf worden genomen. Er zal daardoor steeds meer informatie beschikbaar komen over de verwijderingsrendementen van de technologieën in relatie tot hun ontwerpcriteria.

TABEL 4.1 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN (%) NEDERLANDSE EN EU GIDSSTOFFEN (INDICATIEF)

Werkingsprincipe en technologie	Aandeel behandeld t.o.v. influent	Nageschakeld rendement ² 7/11 ¹	Nageschakeld rendement ² 11	Overall jaarrendement ² 7/11 ¹	Nageschakeld rendement ²	Totaal jaarrendement ²
Gidsstoffen		Nederland	Nederland	Nederland	EU ⁶	EU ⁶
Adsorptie aan Poeder Actiefkool (PAK)						
Referentie-PACAS	100	-	-	80-85	nvt	75-85
PAK+doek	70	ca. 90	ca. 85	ca. 80	ca.85	75-80
PACAS Nereda	100	-	ca. 75 ³	80-85 (84)	nvt	75-85
PAK+O ₃	100 (PAK) 70 (O ₃)	90-95	85-90	ca. 85	85-90	ca. 80
Adsorptie aan Granulair Actiefkool (GAK)						
Referentie-GAK	70	ca. 90	nb	80-85	80-90	75-85
O3-STEP (zonder N en P verwijdering)	70	tot 95%	ca. 80	ca. 80	>80	ca. 80
upflow GAK ³	80	80-90	75-80	80-85	75-90	75-85
BODAC	70	>80	nb	ca. 80	75-85	70-80
Bio-GAK + lucht	80	80-85	70-75	ca. 80	75-85	75-80
Aurea (BO ₃)	70	ca. 90	75-80	ca. 85	80-85	75-80
Adsorptie aan overige niet-fossiele materialen						
DEX-filter ⁴	80	80-95	75-90	80-85	80-95	75-85
AdOx	70	ca. 80	ca.65	ca. 75 ⁵	75-80	70-75
Oxidatieve technieken en filtratie technieken						
Referentie-Ozon	70	ca. 90	75	80-85	80-90	75-85
ZF+UV/H ₂ O ₂	80	>90	ca. 90	75-80	80-85	ca. 75
O ₃ +Ultrasound	70	ca. 90	ca. 85	85-90	85-90	80-85
O3-STEP (zonder N en P verwijdering)	70	tot 95%	ca. 80	ca. 80	>80	ca. 80
PAK+O ₃	100 (PAK) 70 (O ₃)	90-95	85-90	ca. 85	85-90	ca. 80
Microforce	80	ca. 85	ca. 75	ca. 80	ca. 80	75-80
Aurea (BO ₃)	70	ca. 90	75-80	ca. 85	80-85	75-80
NF+UV/H ₂ O ₂	70	ca.95	ca. 85	85-90	90-95	ca. 85
O ₃ + keramischeMF	70	ca. 85	nb	ca. 80	80-90	75-85

¹ Verwijderingsrendement voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen benzotriazool, carbamazepine, diclofenac, irbesartan, gabapentine, metropolol, hydrochloorthiazide, mengsel van 4- en 5-methylbenzotriazool, sotalol, trimethoprim en venlafaxine in elk 24h of 48h debiets- of tijdsproportioneel monster, waarbij rekening is gehouden met 24 uur verblijftijd van het water in de rioolwaterzuivering. Deze 11 gidsstoffen zijn gekozen om de effectiviteit van een zuiveringstechniek voor aanvullende verwijdering van microverontreinigingen uit rwzi-afvalwater te monitoren en hebben geen relatie met eventuele milieubezwaarlijkheid.

² Het overall rendement is berekend als het rendement in het effluent van de rwzi (incl. bypass) ten opzichte van het influent. Hierbij is uitgegaan van een 40% actiefslibrendement voor de 7 van de 11 gidsstoffen. Het nageschakeld rendement is het rendement over de technologie zelf, dus de toeloop en afloop van de pilotinstallatie.

³ T.o.v. rwzi-influent

⁴ Het gemiddelde rendement van niet beluchte upflow GAK filters is hoger dan volgt uit pilot door uit te gaan van seriebedrijf en periodieke vervanging per filter. Zie ook toelichting bij paragraaf 4.4.3. Dezelfde redeneertrant is aangehouden voor het DEXfilter.

⁵ Uitgangspunt is 70% geweest voor de 100.000 ie rwzi. Bij een hoger aandeel, zal het totaal rendement ook hoger zijn. Er loopt nog onderzoek naar deze technologie.

⁶ De verwijdering bij de referentietechnieken is afkomstig van het tekstvoorstel dat voor het IPMV is voorbereid over de EU-richtlijn en op basis van de meetdata van PACAS Papendrecht (STOWA 2018-02). Voor de pilots geldt: deze rendementen zijn indicatief, want sommige waarden zijn berekend en anderen zijn afgeleid. Het jaarrendement in deze tabel is niet hetzelfde als het minimale rendement in elk monster zoals nu in de EU richtlijn is voorgesteld.

NEDERLANDSE GIDSSTOFFEN: EFFECT COMBINATIE TECHNOLOGIEËN

In bijlage 6 is een vergelijking van de verschillende losse technologieën en combinatie technologieën gegeven.

Uit deze vergelijking blijkt:

- Kijkende naar de referentie ozon en de referentie PACAS blijkt dat er verschillen zijn in de verwijdering van stoffen; sommige worden beter met PACAS verwijderd en sommige juist met beter met ozon.
- PAK+O₃ is vergeleken met de referentie ozon en de referentie PACAS bij een vergelijkbaar rendement van 80-85% over 7 van de 11 gidsstoffen over de totale rwzi. Hieruit blijkt dat:
 - de stoffen die doorgaans beter met PAK en minder goed met ozon worden verwijderd, worden in de combinatie technologie beter verwijderd in vergelijking met alleen ozon. De rendementen van de individuele stoffen zijn bij PAK+O₃ echter niet noodzakelijkerwijs hoger dan met alleen PACAS.
 - Hetzelfde geldt andersom: de stoffen die doorgaans beter met ozon en minder goed met PAK worden verwijderd, worden in de combinatie technologie beter verwijderd dan met alleen PACAS.
- Bij de BODAC pilot is zowel oud als nieuw GAK onderzocht. Bij nieuw GAK is het werkingsprincipe vooral adsorptie aan het GAK en is de verwijdering van de stoffen die bij PACAS goed verwijderd worden (benzotriazool en som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool) hoger dan bij het oude GAK waarbij vooral biologische afbraak plaatsvindt.
- Aurea (BO₃) is vergeleken met de referentie ozon en BODAC bij een rendement van 80-85% over 7 van de 11 gidsstoffen over de totale rwzi. Hieruit blijkt dat:
 - BODAC (alleen BAKF) bij 7 van de 11 stoffen dezelfde stoffen verwijderd als ozon en daarnaast bij 4 stoffen een erg laag (<30) of negatief rendement hebben. Bij BODAC/BAKF bestaat het werkingsprincipe uit bioregeneratie: adsorptie én biologische afbraak.
 - Door toevoeging van ozon in de technologie Aurea (BO₃) worden meer stoffen verdergaand verwijderd en is de totale verwijdering hoger dan bij BAKF alleen.
 - Ozon alleen verwijderd juist meer stoffen met een hoger verwijderingsrendement dan Aurea (BO₃) en heeft dus een breder palet dan Aurea (BO₃); de stoffen en de verwijderingsrendementen van Aurea (BO₃) zijn voor 9 van de 11 stoffen vergelijkbaar met de referentie ozon. Uitzondering hierop is benzotriazool en som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool die een lager rendement hebben bij Aurea (BO₃).

Kortom: of een combinatie van technieken leidt tot verwijdering van een breder palet is afhankelijk van welke werkingsprincipes gecombineerd worden en of deze werkingsprincipes complementair aan elkaar zijn in de verwijdering van individuele gidsstoffen. Er kan worden geconstateerd dat de combinatie van technieken met adsorptie en oxidatie tot een hogere verwijderingsefficiëntie (>70% en >80%) leiden voor meerdere van de NL gidsstoffen, en dus een breder palet verwijderen. Wanneer biologische omzetting in een BAKF gecombineerd wordt met ozon (Aurea (BO₃)), dan laat deze een hogere verwijdering zien van meer stoffen dan alleen BAKF. Echter, de referentie van alleen ozon verwijderd meer stoffen met een hoger rendement dan de combinatie van biologie met actief kool en leidt de combinatie van technieken niet tot een breder palet.

EU-RICHTLIJN

Voor elk van de technologieën en de referenties is een inschatting gemaakt hoe het overal-verwijderingsrendement op basis van de voorgestelde stoffen en verhouding van de stofcategorieën uit de nieuwe EU-richtlijn zal zijn, zie Tabel 4.1 en Tabel 2.2. Hierbij is nadrukkelijk uitgegaan van het jaarrendement zoals gehanteerd in het IPMV en niet een minimaal rendement per monster, zoals in de EU richtlijn.

Het aangenomen actiefslibrendement van de standaard rwzi kan voor de concept EU-gidsstoffen 40% zijn, net zoals voor de Nederlandse gidsstoffen (zie Tabel 4.1). Dit is echter afhankelijk van in welke mate de concept EU-gidsstoffen daadwerkelijk voorkomen in het rioolwater. 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%) (Mulder, 2021). 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. (Mulder, 2023).

In de EU richtlijn is opgenomen dat indien van minder dan zes stoffen een voldoende hoge concentratie kan worden gemeten, de bevoegde autoriteit zo nodig andere stoffen aanwijst om het minimaal verwijderingspercentage te kunnen berekenen. Het is vooralsnog niet bekend hoe dit in de Nederlandse wetgeving wordt verankerd.

De spreiding in verwijderingsrendement in het actief slib van de concept EU-gidsstoffen lijkt groter dan de spreiding voor de Nederlandse gidsstoffen. Dit betekent ook een grotere spreiding in totaal verwijderingsrendementen over de rwzi (effluent rwzi ten opzichte van influent rwzi). Het 'EU-actiefslibrendement' 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 (zie Mulder, 2023). In Tabel 4.1 is voor de referentietechnieken uitgegaan van gidsstoffen die voldoende aanwezig zijn in Nederlandse influenten en effluenten van rwzi's: Citalopram is wel meegenomen, Amisulpride, Candesartan en Clarithromycine niet. Dit betekent dat het actiefslibrendement voor de EU stoffen op jaarbasis gemiddeld 25-35% bedraagt en de ondergrens van het jaarrendement iets lager is ingeschat (Mulder, 2023).

Dit betekent dat het daadwerkelijke rendement in het actief slib van een specifieke rwzi voor de EU stoffen een grote invloed heeft op het overall verwijderingsrendement bij de toepassing van een verwijderingstechniek voor microverontreinigingen. (influent – effluent). Bij een te laag rendement kan het noodzakelijk zijn om de ontwerpcriteria zoals gegeven in de factsheets van bijlage 5 aan te passen (bijvoorbeeld een hogere dosering).

Naast een verschil in de stoffen zijn de vooralsnog bekende verschillen met het IPMV:

- Het rendement in de EU moet in elk monster hoger zijn dan 80% en mag een bepaald aantal maal niet voldoen (Bij 24 monsters per jaar, moeten 21 monsters voldoen). Het IPMV gaat uit van een jaarrendement.
- De EU regeling gaat uit dat monsternamen onder DWA omstandigheden plaatsvindt. Dit is vergelijkbaar aan het IPMV (DWA is gedefinieerd als het debiet tot 1,2 x (gemiddelde droogweeraanvoer + standaardafwijking) of 1,3 x mediaan dagdebiet (zie STOWA

2023-45), waarbij vervolgens in het IPMV een vertaling naar het jaardebiet is gemaakt. De EU Richtlijn heeft DWA niet nader gedefinieerd. De stoffen zijn verdeeld in twee stofgroepen binnen de EU richtlijn met een bepaalde verhouding. Dit betekent dat het werkingsprincipe of de combinatie van werkingsprincipes van de toe te passen technologie invloed heeft op het verwijderingsrendement. Indien de techniek in beide categorie meerdere stoffen met een hoog rendement kan verwijderen, zal dit gunstiger zijn dan wanneer dit slechts uit een van de twee categorieën is. Dit sluit aan bij de vorige paragraaf over het effect van combinatietechnieken en bijlage 6.

In Tabel 4.1 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 en de technologieën van het IPMV. 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-stoffen en de Nederlandse gidsstoffen te duiden en kunnen zeker niet als absolute getallen worden gebruikt.

Uit Tabel 4.1 blijkt dat voor de meeste technologieën een jaarverwijdering van 75-80% verwacht wordt.

4.1.2 CO₂ VOETAFDruk

REFERENTIE-TECHNIEKEN

De CO₂ voetafdruk van de referenties voor een standaard rwzi van 100.000 i.e. zijn gegeven in Tabel 4.2. Door de aanvullende technieken neemt de CO₂-voetafdruk van de rwzi toe met 39%, 94% en 129% voor respectievelijk de referentietechnieken ozon, PACAS en GAK.

De relatieve CO₂-voetafdruk van ozon is het laagst met $109 \text{ g CO}_2/\text{m}^3_{\text{behandeld}}$ en $77 \text{ g CO}_2/\text{m}^3_{\text{rwzi-influent}}$. Daartegenover staat GAK met de hoogste relatieve CO₂-voetafdruk van respectievelijk $361 \text{ g CO}_2/\text{m}^3_{\text{behandeld}}$ en $253 \text{ g CO}_2/\text{m}^3_{\text{rwzi-influent}}$.

De CO₂-voetafdruk wordt bij ozon vooral bepaald door de grondstof (pure zuurstof) en het energieverbruik voor het genereren van O₃ uit die zuurstof en het inbrengen in het systeem. Bij PACAS is het energieverbruik slechts beperkt hoger dan enkel van de RWZI en wordt de CO₂-voetafdruk vooral bepaald door de CO₂-voetafdruk van het PAK wat gedoseerd wordt (20 mg/l). Bij GAK is elke 4-6 maanden vers of geregenereerd GAK nodig, wat de grootste oorzaak is van de hoogste CO₂-voetafdruk van de drie referenties. Ook hier is, net als bij O₃, het energieverbruik hoger dan bij PACAS; bij GAK komt dit voornamelijk door de benodigde opvoerhoogte. Zie Figuur 4.1.

TABEL 4.2 CO₂-VOETAFDruk RWZI EN REFERENTIETECHNIEKEN 100.000 IE

Parameter	eenheid	RWZI	R-f - PACAS	Ref - Ozon ¹	R-f - GAK
CO ₂ voetafdruk totaal	ton CO ₂ /jaar	1504	2912	2091	3440
% toename t.o.v. rwzi	%		94%	39%	129%
behandelde hoeveelheid	m ³ /jaar	0	7.665.000	5.365.500	5.365.500
RWZI-influent	m ³ /jaar	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000
CO ₂ voetafdruk verwijdering mi'ro's	g CO ₂ /m ³ behandeld		184	109	361
CO ₂ voetafdruk verwijdering mi'ro's	g CO ₂ /m ³ rwzi influent		184	77	253

¹ Het IPMV programma startte in 2018 met een referentie Ozon+Zandfiltratie (ZF), in deze evaluatie is de referentie aangepast naar alleen ozon. Wanneer de aanvullende uitgangspunten voor CO₂-voetafdruk toegepast worden op het ZF en de resulterende CO₂-voetafdruk van het ZF bij de huidige CO₂-voetafdruk van ozon wordt opgeteld, is de totale CO₂-voetafdruk 2.279 ton CO₂/jr en relatief gezien is deze 145 en 101 g CO₂ per m³_{behandeld} respectievelijk per m³_{rwzi-influent}

RELATIEVE CO₂-VOETAFDruk

De relatieve CO₂-voetafdruk is berekend ten opzichte van het aantal m³ dat behandeld is in de technologie (m³_{behandeld}) en ten opzichte van het totaal aantal m³ voor de hele rwzi (m³_{rwzi-influent}). Het eerste kental geeft inzicht in de voetafdruk van de technologie zelf. Bij het tweede kental wordt ook de bypass meegenomen. Dit kental geeft dus beter inzicht in de CO₂-voetafdruk voor een rwzi in zijn geheel. Zo kan bij een wisselende bypass beter een vergelijk gemaakt worden voor de rwzi als geheel.

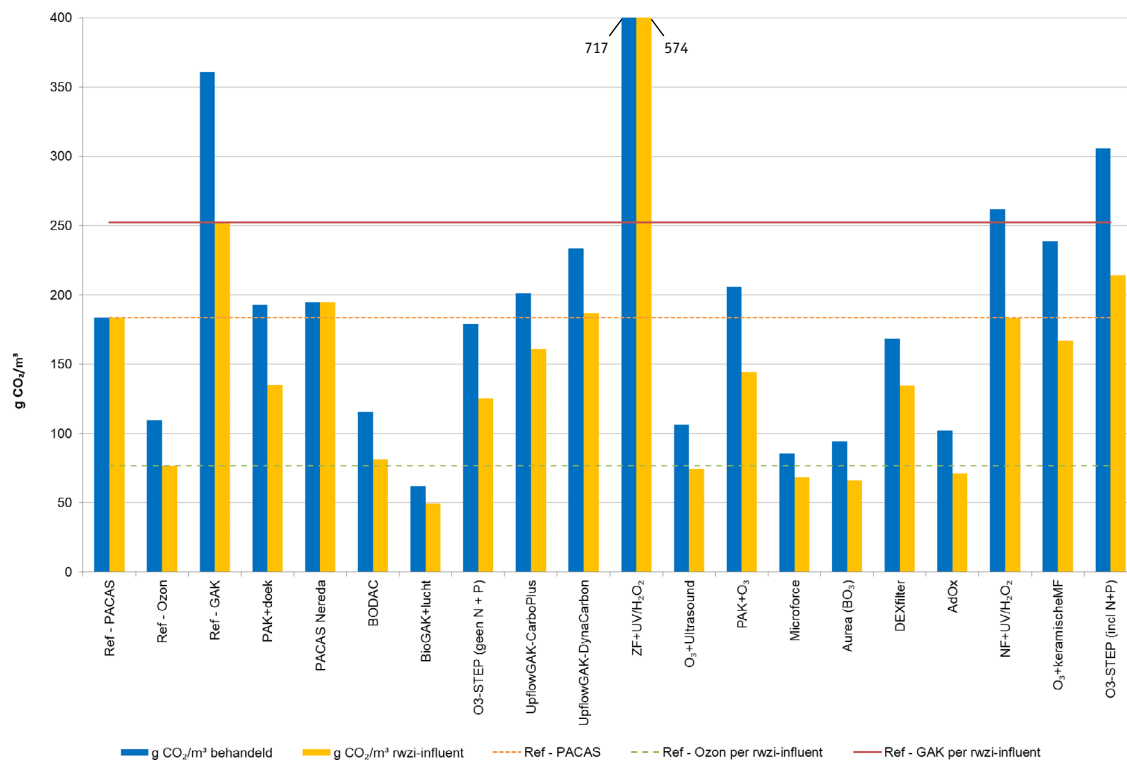
In Figuur 41 zijn deze relatieve voetafdrukken gegeven van de referenties en de vergeleken technologieën. UV/H₂O₂ inclusief ZF is voor de leesbaarheid van de tabel afgetopt. De voetafdruk voor UV/H₂O₂ inclusief ZF is namelijk met 717 g CO₂ per m³_{behandeld} en 574 g CO₂ per m³_{rwzi-influent} dermate hoog dat verschillen tussen de andere technieken niet meer goed zichtbaar worden.

Uit de grafiek blijkt dat alle andere technieken een lagere CO₂-voetafdruk hebben dan de referentie GAK (rode lijn in de grafiek). Enkele technieken, als PACAS-Nereda, upflow GAK-DynaCarbon en NF+UV/H₂O₂ hebben een iets hogere of vergelijkbare CO₂-voetafdruk als de referentie PACAS (oranje gestippelde lijn), maar de meeste technieken liggen daaronder. De meest gunstige CO₂-voetafdruk is voor bioGAK+lucht, BODAC, O₃+ultrasound, MicroForce, Aurea(BO₃) en AdOx, deze zijn lager of vergelijkbaar met de meest gunstige referentie, namelijk Ozon (groene gestippelde lijn).

Van de meest gunstige technologieën wat betreft CO₂-voetafdruk, is er voor O₃+ultrasound en AdOx aanvullend pilotonderzoek gewenst, waarna de CO₂-voetafdruk met meer zekerheid kan worden bepaald hetgeen zowel positief als negatief kan uitpakken.

Aan de rechterzijde is de CO₂-voetafdruk van O3-STEP inclusief de verwijdering van N en P toegevoegd. Het verschil met de O3-STEP zonder N en P verwijdering is de dosering van metaalzout, methanol en een hoger spoelwaterdebiet (10 in plaats van 1%). Hierdoor wordt de CO₂-voetafdruk hoger, maar blijft onder die van de referentie GAK. Met N en P verwijdering kan de O3-STEP technologie ingezet worden om strengere (bijvoorbeeld voor de KRW) effluenteisen te realiseren.

Indien de andere technologieën worden voorzien van een dosering om aanvullend P en/of N te verwijderen, zal de CO₂-voetafdruk van deze technologieën ook hoger zijn dan nu gepresenteerd in Figuur 4.1.

FIGUUR 4.1 RELATIEVE CO₂ VOETAFDRUK VAN DE TECHNOLOGIEËN TEN BEHOEVE VAN DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN*,**

* CO₂-voetafdruk van PAK+O₃ per m³_{behandeld} is gebaseerd op het 70% nageschakeld jaardebiet.

** De CO₂-voetafdruk van ZF+UV/H₂O₂ is niet weergegeven in de grafiek en is 717 en 574 g CO₂ per m³_{behandeld} respectievelijk per m³_{rwzi-influent}.

TABEL 4.3 RELATIEVE CO₂-VOETAFDRUK EN TECHNOLOGIEËN

Relatieve CO ₂ -voetafdruk	Technologie
<85 g CO ₂ /m ³ _{rwzi-influent}	Referentie Ozon BODAC Bio-GAK + lucht Aurea (BO ₃) AdOx O ₃ +Ultrasound Microforce
85-120 g CO ₂ /m ³ _{rwzi-influent}	-
120-160 g CO ₂ /m ³ _{rwzi-influent}	PAK+doek PAK+O ₃ O3-STEP (zonder N en P verwijdering) DEXfilter
160-200 g CO ₂ /m ³ _{rwzi-influent}	Referentie PACAS PACAS Nereda Upflow GAK NF+UV/H ₂ O ₂ O ₃ +keramischeMF
>200 g CO ₂ /m ³ _{rwzi-influent}	Referentie GAK ZF+UV/H ₂ O ₂ O3-STEP (met N en P verwijdering)

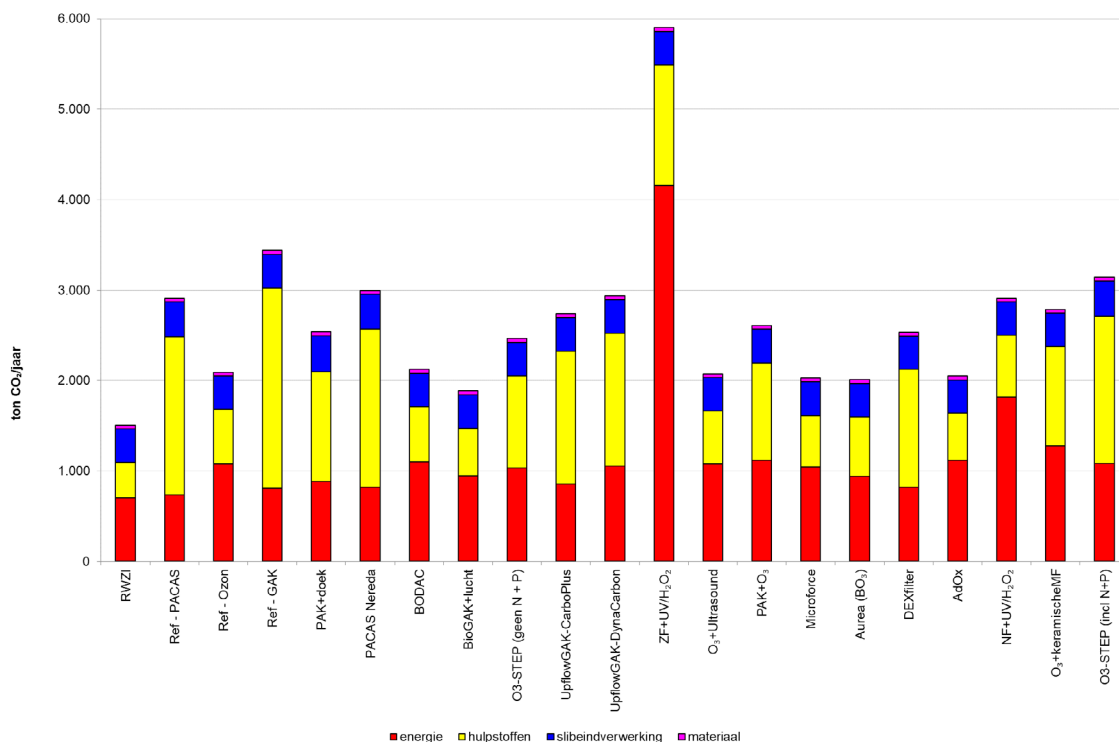
ABSOLUTE CO₂-VOETAFDRUK EN OPBOUW VAN DE VOETAFDRUK

In Figuur 4.2 zijn de CO₂-voetafdrucken van de verschillende technieken voor de standaard rwzi van 100.000 i.e. à 150 g TZV weergegeven, onderverdeeld in energie, hulpstoffen, slib-eindverwerking en materiaal. De CO₂-voetafdruk voor slib-eindverwerking en materiaal is zeer vergelijkbaar. De verschillen zijn vooral zichtbaar in de CO₂-voetafdruk voor energie en hulpstoffen. Dit verschil kan belangrijk zijn in de keuze voor een technologie op een speci-

fieke locatie, bijvoorbeeld door netcongestie of ambities om het gebruik van hulpstoffen te minimaliseren.

In Figuur 4.3 tot en met Figuur 4.6 wordt per werkingsprincipe verder op de CO₂-voetafdruk voor energie en hulpstoffen ingegaan.

FIGUUR 4.2 TOTALE CO₂-VOETAFDruk VOOR DE GEHELE RWZI INCLUSIEF DE TECHNOLOGIEËN TEN BEHOEVE VAN DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN (STANDAARD RWZI VAN 100.000 I.E. A 150 G TZV)



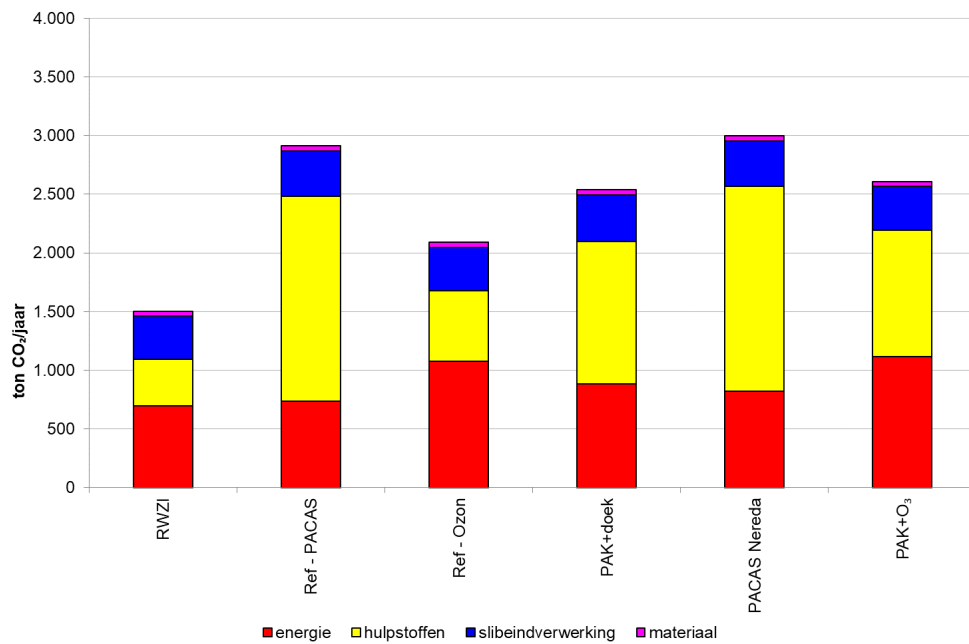
TECHNOLOGIEËN MET PAK

Wanneer gekeken wordt naar de technieken met adsorptie aan PAK (zie Figuur 43), blijkt dat de met de referentie PACAS vergelijkbare technologie PACAS-Nereda een iets hogere CO₂-voetafdruk heeft. Dit wordt veroorzaakt door een hoger energieverbruik omdat de PAK in een kortere tijd gedoseerd moet worden en hoger opgevoerd wordt dan bij een reguliere zuiveringsinstallatie. Het ingeschatte energieverbruik lijkt nu vrij hoog en de praktijk zal straks uitwijzen wat het werkelijke verschil met een 'normale' PACAS installatie is.

De combinatie technieken PAK+doek en PAK+O₃ hebben beide een totale CO₂-voetafdruk die lager is dan de referentietechniek PACAS en hoger dan de referentietechniek ozon. PAK+O₃ heeft zuurstof nodig als hulpstof, maar omdat de PAK dosering met 7,5 mg/l meer dan de helft lager is dan bij PACAS, is overall het aandeel van hulpstoffen bij beide technologieën lager dan de referentie PACAS. Ook bij PAK+doek is met 10 mg/l de PAK dosering lager dan die van PACAS. Wel hebben de combinatie technieken extra elektriciteit nodig voor het opvoeren van het effluent, de PAK+doek voor het bedienen van het doekfilter en de PAK-O₃ ook voor het ozondeel van de technologie.

FIGUUR 4.3

TOTALE CO₂-VOETAFDRIJF VOOR DE GEHELE RWZI INCLUSIEF DE TECHNOLOGIEËN TEN BEHOEVE VAN DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN MET GEBRUIK VAN PAK (STANDAARD RWZI VAN 100.000 I.E. A 150 G TZV)



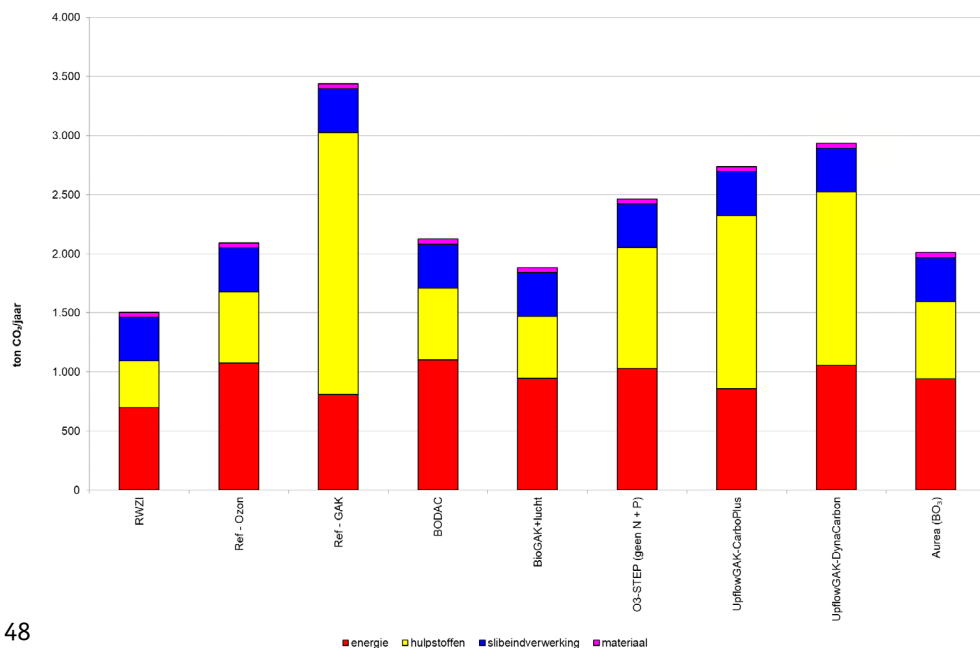
TECHNOLOGIEËN MET GAK

Wanneer de adsorptie aan GAK technieken worden vergeleken (Figuur 4.4) blijkt dat het energie aandeel in de voetafdruk van CarboPlus vergelijkbaar is met GAK en dat voor alle andere technieken deze hoger is. Dit wordt onder andere veroorzaakt door extra opvoerhoogte of -druk, zoals bij BODAC, bioGAK+lucht en DynaCarbon, of voor het produceren en inbrengen van ozon, zoals bij O3-STEP, MicroForce en Aurea (BO₃).

De standtijd van het GAK is bij alle technieken langer dan bij de GAK referentie en de contacttijd (EBCT) is korter, wat resulteert in een reductie van meer dan 90% van het jaarlijkse GAK verbruik voor de beluchte GAK filters en ongeveer 40-70% bij de onbeluchte GAK filters. Zie ook bij de specifieke ontwerpuitgangspunten voor de GAK technieken in paragraaf 3.4.3.

FIGUUR 4.4

TOTALE CO₂-VOETAFDRIJF VOOR DE GEHELE RWZI INCLUSIEF DE TECHNOLOGIEËN TEN BEHOEVE VAN DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN MET GEBRUIK VAN GAK (STANDAARD RWZI VAN 100.000 I.E. A 150 G TZV)



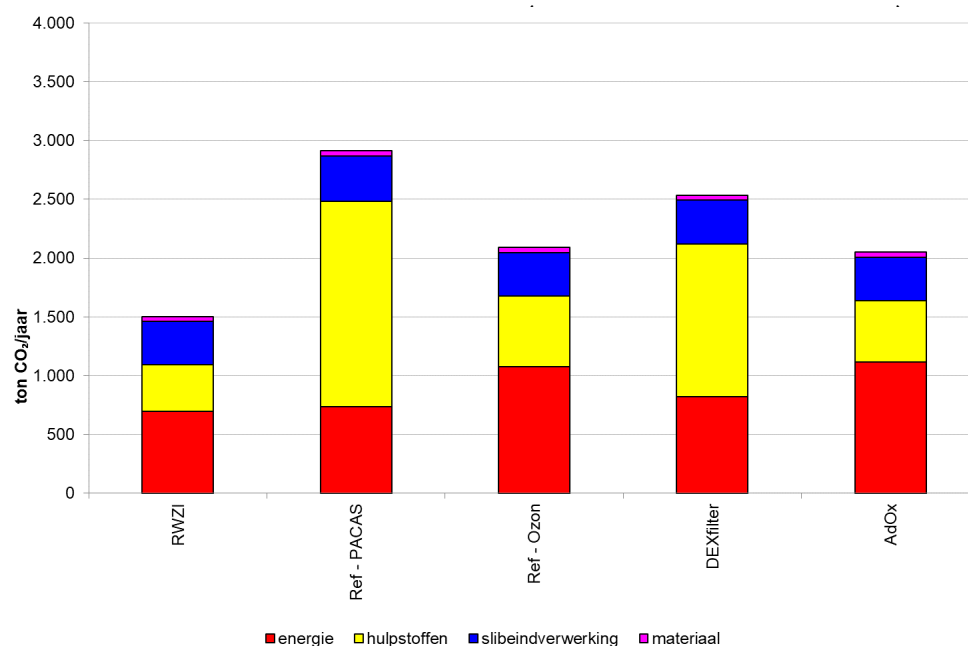
TECHNOLOGIEËN OVERIGE ADSORPTIE

Bij de technologieën die gebruik maken van overige adsorptie materiaal (zie Figuur 4.5), is de CO₂-voetafdruk van het Dexorb (DEXfilter) en het zeoliet (AdOx) berekend. Het Dexorb resulteert in een 1/3 lagere voetafdruk voor hulpstoffen dan PACAS, terwijl het zeoliet resulteert in een reductie van bijna 95%. Dexorb is commercieel beschikbaar, terwijl het granulair zeoliet voor AdOx speciaal voor de IPMV pilot is gemaakt. Daarbij vindt regeneratie van Dexorb buiten de rwzi plaats, waardoor de voetafdruk voor het regenereren is meegerekend bij hulpstoffen. Daartegenover staat dat de regeneratie bij AdOx op de rwzi gebeurt met ozon, waardoor de regeneratie vooral tot uiting komt in het energieverbruik.

Voor beide technologieën geldt dat aanvullend pilotonderzoek gewenst is, waarna de CO₂-voetafdruk met meer zekerheid kan worden bepaald en nog zowel positief als negatief kan ontwikkelen, zie hoofdstuk 5.

FIGUUR 4.5

TOTALE CO₂-VOETAFDRIJK VOOR DE GEHELE RWZI INCLUSIEF DE TECHNOLOGIEËN TEN BEHOEVE VAN DE VERWIJDERING VAN



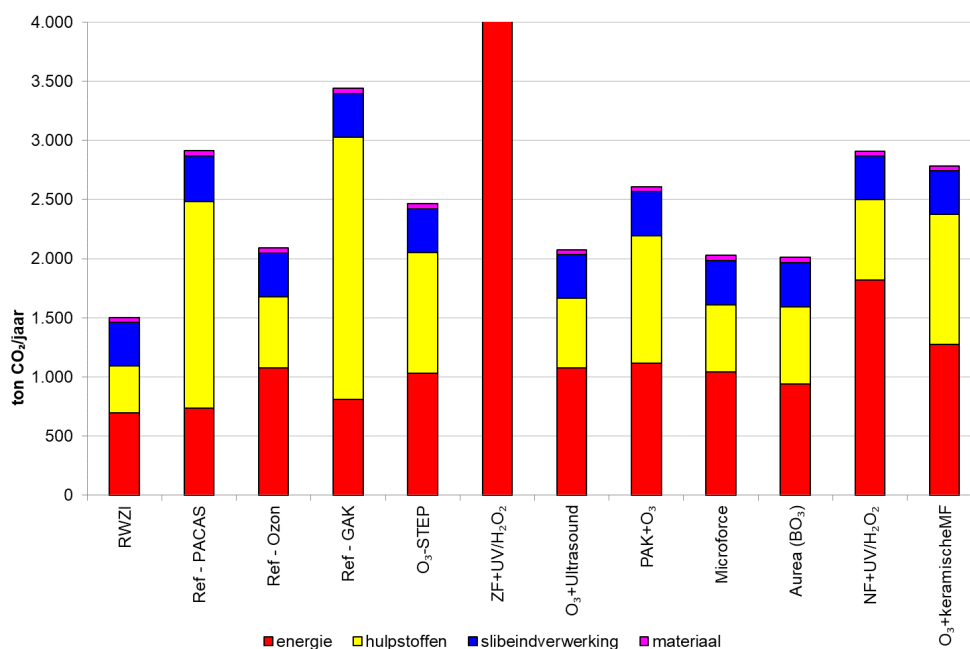
OXIDATIEVE TECHNOLOGIEËN

De opbouw van de CO₂-voetafdruk van de oxidatieve technieken is gegeven in Figuur 4.6. Het valt op dat ondanks het vergelijkbare of lagere specifieke ozonverbruik (zie Tabel 3.8) het aandeel voor hulpstoffen alleen voor microforce en O₃+ultrasound lager is. De andere technieken zijn combinatietechnieken en hebben actief kool of andere hulpstoffen nodig. Het lagere energieverbruik gerelateerd aan de lagere specifieke ozondosering wordt gecompenseerd met het energieverbruik van de andere techniek in de combinatie. Het energieverbruik is met name door het gelijkstellen van de minimale opvoerhoogte (8 m) redelijk vergelijkbaar met ozon.

Uitzondering is, zoals eerder aangegeven, ZF+UV/H₂O₂, met een fors hoger energieverbruik. Ook het energieverbruik van NF+UV/H₂O₂ is ongeveer 40% hoger en het energieverbruik van O₃+keramischeMF is iets meer dan 30% hoger dan van de referentie ozon. Daartegenover staat voor zowel NF+UV/H₂O als voor O₃+keramischeMF een betere effluentkwaliteit, zie paragraaf 4.2.4, 4.2.6 en 4.2.7.

FIGUUR 4.6

CO₂ TOTALE CO₂-VOETAFDruk VOOR DE GEHELE RWZI INCLUSIEF DE TECHNOLOGIEËN TEN BEHOEVE VAN DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN MET GEBRUIK VAN OXIDATIEVE TECHNIEKEN (EN FILTRATIETECHNIEKEN) (STANDAARD RWZI VAN 100.000 I.E. A 150 G TZV) *



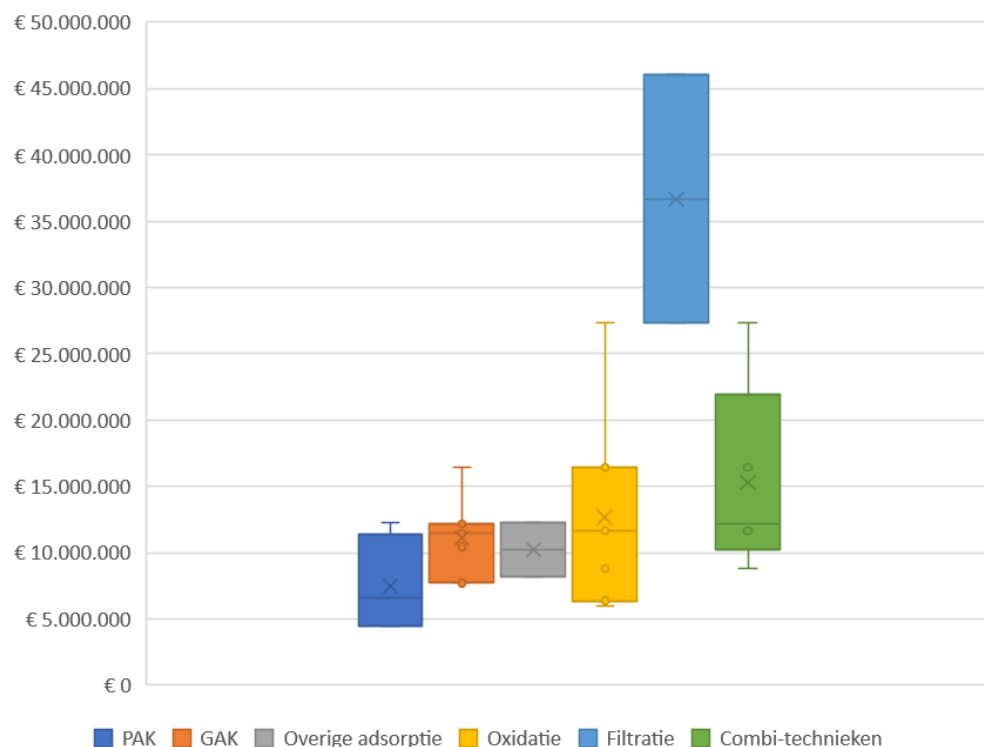
* Voor de leesbaarheid van de figuur zijn de CO₂ verbruiken voor ZF+ UV/H₂O₂ niet volledig zichtbaar. De CO₂ verbruiken voor energie, hulpstoffen, slibeindverwerking en materiaal zijn respectievelijk 4.157, 1.330, 369 en 44 ton CO₂/jaar.

4.1.3 KOSTEN

De stichtingskosten geraamd met kentallen uit 2018, zoals gerapporteerd in de pilot rapportages (zie bijlage 1), zijn op basis van de inflatie vermenigvuldigd met een factor 1,38 om te komen tot geactualiseerde stichtingskosten voor deze evaluatie (2024). Daarnaast zijn sommige kosten ook aangepast om tot een verwijderingspercentage van 80% i.p.v. 70% te komen. Om te toetsen in welke mate deze kosten een reëel beeld geven van de feitelijke stichtingskosten die waterschappen in de praktijk terug zien zijn de kosten van referentieprojecten opgevraagd. De kosten van deze referentietechnieken zijn weergegeven in Tabel 3.2. Uit de pilotstudies voor een 100.000 i.e. zuivering en ook uit de inmiddels gerealiseerde projecten is opgevallen dat er grote verschillen zitten in onder andere de kosten van PACAS technieken. Zo kunnen de stichtingskosten ver uiteenlopen afhankelijk van de wijze van aanbesteden, hier is een correctie voor gemaakt in de stichtingskosten van alle PACAS technieken.

FIGUUR 4.7

STICHTINGSKOSTEN PER TYPE TECHNOLOGIE (INCL. BTW) VOOR EEN 100.000 I.E. RWZI



Bovenstaand figuur geeft een beeld van de stichtingskosten van alle beschouwde technieken. De technieken zijn verdeeld in categorieën zoals in Tabel 3.3 beschreven, de filtratietechnieken zijn hier niet opgenomen binnen de categorie oxidatie maar komen alleen terug bij filtratie. Kosten zijn van veel factoren afhankelijk en deze kosten moeten dan ook niet als absolute cijfers gezien worden, maar dit geeft een beeld voor de vergelijking. Hierom worden de kosten weergegeven als ranges.

Het is duidelijk dat de stichtingskosten van filtratietechnieken aanzienlijk hoger zijn, deze worden meestal niet specifiek voor het verwijderen van microverontreinigingen toegepast maar leveren ook andere voordelen, zie ook hoofdstuk 3.6. NB: Voor ozon in combinatie met keramische microfiltratie geldt dat de actualisatie van de stichtingskosten een te hoge inschatting heeft opgeleverd. Recente referentieprojecten laten zien dat actuele stichtingskosten lager uitvallen. Vanwege de doorlooptijd van dit project kon deze informatie echter niet meer in dit rapport meegenomen worden. Voor vervolgonderzoek wordt aanbevolen de stichtingskosten van ozon in combinatie met keramische microfiltratie te actualiseren op basis van recent gerealiseerde projecten.

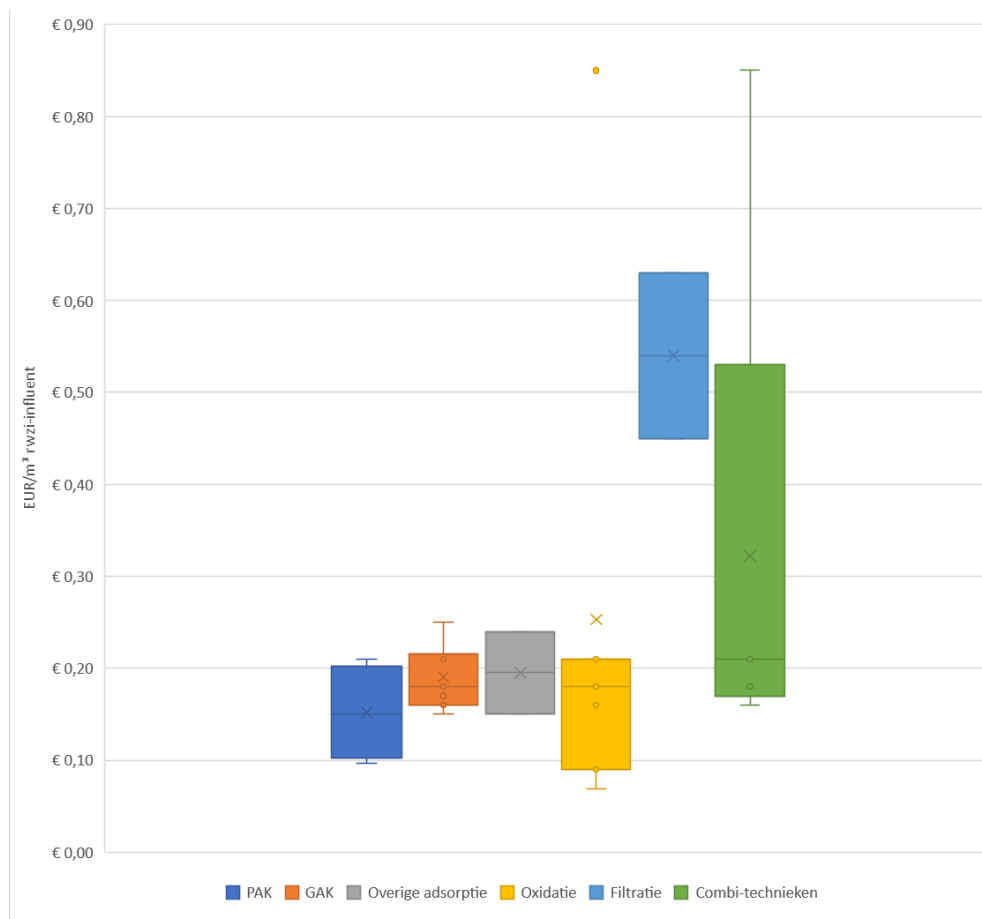
Voor PAK-technieken ligt de range tussen de 4 en 12 miljoen waarbij de referentie PACAS aan de onderkant zit. Voor de GAK-technieken ligt de range tussen de 7,5 en 12 miljoen. Referentie GAK heeft stichtingskosten van zo'n 10 miljoen. Onder oxidatie vallen behoorlijk veel technieken. De stichtingskosten van referentie ozon zijn circa 6 miljoen, de onderkant van de range. Combinatietechnieken zijn al snel aanzienlijk duurder tot zo'n 16 miljoen met een uitschieter naar boven voor UV + H₂O₂.

De jaarlijkse kosten (kapitaallasten + exploitatiekosten) zijn voor zover mogelijk gekoppeld aan de verbruiken, zoals elektriciteit en hulpstoffen, welke terugkomen in de factsheets (Bijlage 5). Indien een specifiek verbruik niet beschikbaar is, zijn de betreffende exploita-

tiekosten uit de pilot studies gebruikt en aangepast naar de kostenkengetallen van 2024. Vanuit deze kosten zijn de kosten per m³ behandeld effluent en per m³ van de gehele rwzi bepaald. Zoals hiervoor al genoemd zijn kosten van veel factoren afhankelijk (uitvoeringsvorm, manier van ramen, manier van aanbesteden). Het geeft dan ook geen correct beeld om per techniek de kosten per kubieke meter te vergelijken. Wel zitten er in de verschillende type technieken grote overeenkomsten. Navolgend worden daarom ranges weergegeven van ordegroottes waaraan gedacht moet worden voor de verschillende type technieken.

FIGUUR 4.8

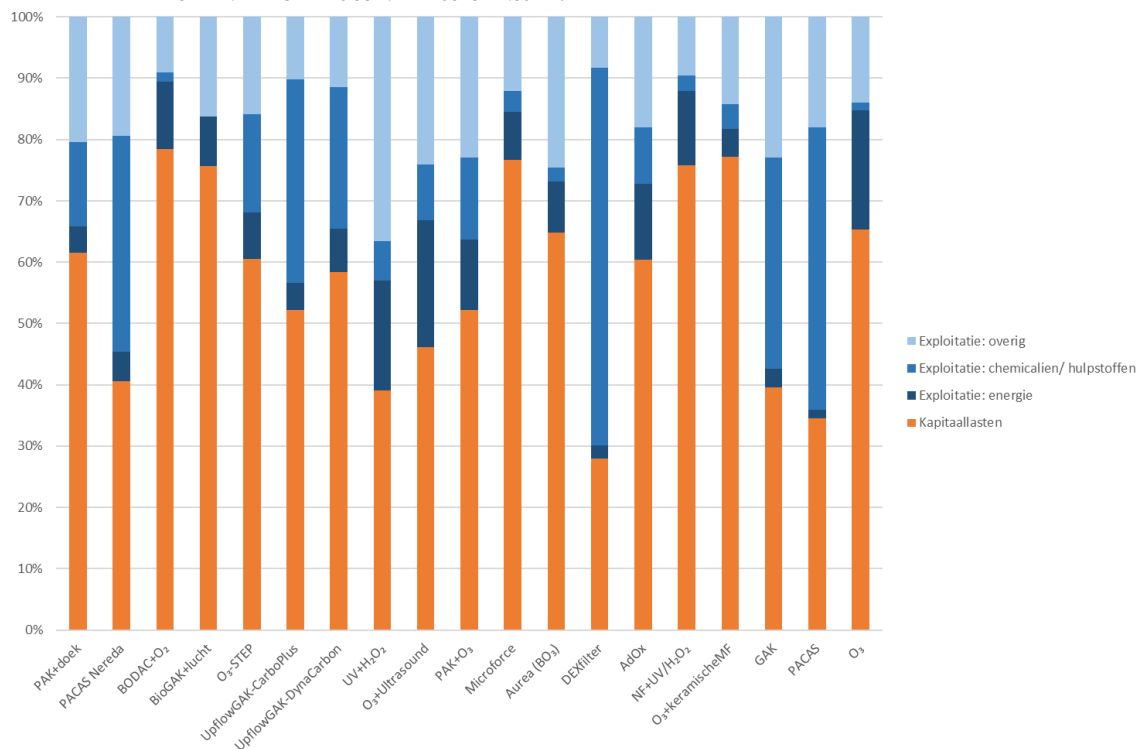
JAARLIJKE KOSTEN IN EUR/M³ RWZI INFLUENT (INCL. BTW, PRIJSPEIL 2024) VOOR EEN 100.000 I.E. RWZI



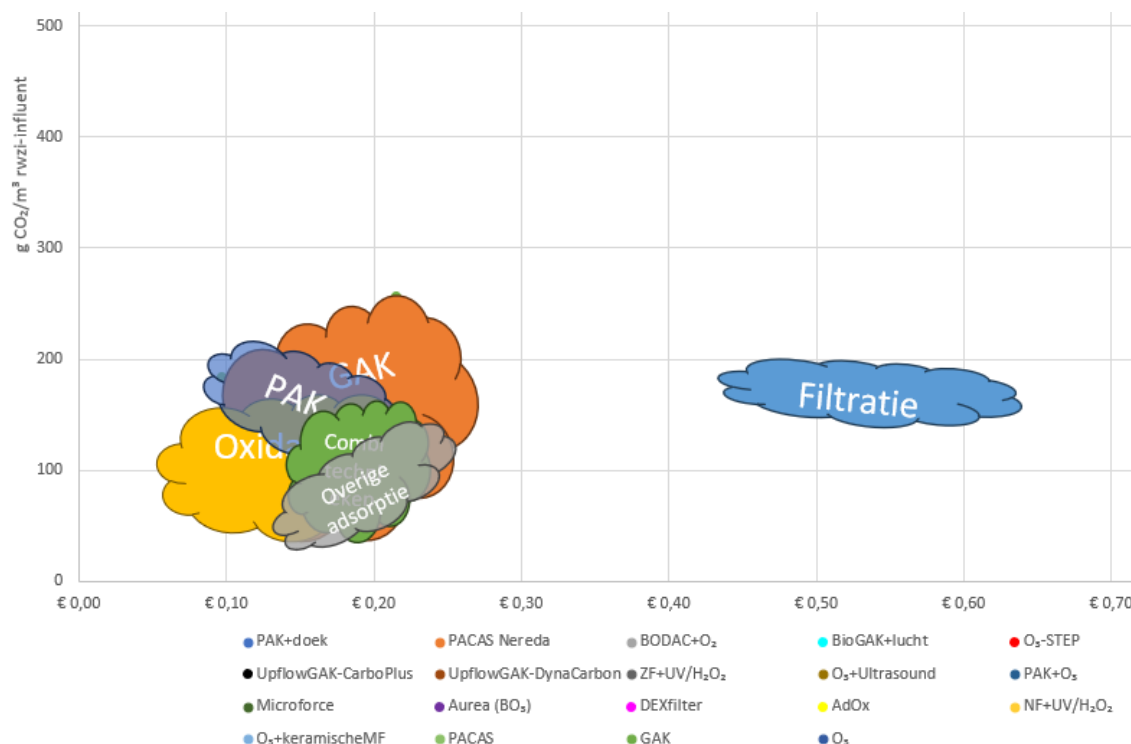
De technieken zijn ook hier onderverdeeld in dezelfde categorieën als in Figuur 4.7. Het valt op dat de kosten van PAK, GAK, overige adsorptie en oxidatie technieken relatief laag zijn, onder de 25 cent per m³ rwzi influent. Specifiek voor het DEX-filter geldt dat de geactualiseerde kosten van het adsorptiemateriaal (cyclodextrines) mogelijk te hoog zijn ingeschat in deze evaluatie. Aanbevolen wordt om in een vervolgonderzoek de kosten van de cyclodextrines te actualiseren op basis van de actuele bulkprijs. PAK en oxidatie hebben technieken met de laagste kosten, hieronder vallen ook de referenties. Binnen de categorie oxidatie vallen veel verschillende technieken, dit is ook terug te zien in de grote spreiding. Het overgrote deel zit echter ook in dezelfde ordegrootte als PAK en GAK. Duidelijk blijkt dat filtratietechnieken een stuk duurder zijn (45 tot meer dan 60 cent per m³). De combinatie technieken (ook meegenomen in de andere categorieën) liggen qua prijs wat meer aan de bovenkant van de ranges van de verschillende categorieën. De grote spreiding in de figuur (groene balk) komt met name door de hogere kosten van de combinatie technieken met filtratie, aangezien de meeste combinatie technieken rond de 20 cent per m³ zijn.

De jaarlijkse kosten kunnen worden opgesplitst in kapitaallasten en exploitatiekosten. Een procentuele verdeling van kapitaallasten en exploitatiekosten per techniek is opgenomen in Figuur 4.9. Dit geeft een beeld van de kostenopbouw per techniek. De exploitatiekosten kunnen bovendien worden opgesplitst in energie, chemicaliën/hulpstoffen en overig. Zo is ook te zien welke technieken bijvoorbeeld gevoelig zijn voor grote wijzigingen in chemicaliën/hulpstofprijzen of prijzen/ beschikbaarheid van energie/elektriciteit, zie Figuur 4.9.

FIGUUR 4.9 JAARLIJKSE KOSTEN VERDEELD IN KAPITAALLASTEN EN EXPLOITATIEKOSTEN. LET OP: DE VERDELING IS PERCENTUEEL PER TECHNIEK EN ZEGT NIETS OVER DE ABSOLUTE KOSTEN.



Wanneer de CO₂-voetafdruk en kosten per m³ rwzi influent tegen elkaar worden uitgezet wordt het overzicht van Figuur 4.10 verkregen. Eén punt valt buiten de grafiek, ZF+H₂O₂ + UV, vanwege de veel hogere CO₂-voetafdruk van 574 gram CO₂/m³ rwzi influent, vergeleken met de andere technieken. GAK, PAK, oxidatie en overige adsorptietechnieken liggen allemaal bij elkaar in de buurt, waarbij de grootste variatie in GAK technieken zit. Filtratietechnieken zijn een stuk duurder maar de CO₂-voetafdruk van deze technieken ligt wel in dezelfde orde-grootte als de andere technieken. Daarbij moet ook worden vermeld dat de wolken van filtratietechnieken en overige adsorptie nog wat kunnen wijzigen. Deze technieken hebben nog een lagere TRL.

FIGUUR 4.10 RELATIE CO₂-VOETAFDruk EN KOSTEN PER M³ RWZI INFLUENT

4.1.4 GEVOELIGHEIDSANALYSE

Op basis van de ervaringen die de afgelopen jaren zijn opgedaan met de verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater in Nederland, is gebleken dat er drie belangrijke gevoeligheden met betrekking tot de kosten zijn. Deze zijn in deze gevoeligheidsanalyse verkend:

- De prijs van actief kool.
- De elektriciteitsprijs.
- De spreiding in stichtingskosten: +/-30%.

Voor de CO₂ voetafdruk, zijn de belangrijkste verschillen zichtbaar in energie en hulpstoffen. Voor deze onderdelen zijn de CO₂ kentallen gebaseerd op een fossiele herkomst. Veel waterschappen kopen groene stroom in, of duurzamere stroom dan fossiel. Ook is er getest met duurzamere poederkolen in het IPMV programma. Daarom zijn de CO₂-voetafdrukken doorgerekend met:

- Groene Nederlandse stroom.
- Duurzamere PAK.

Zie Tabel 23 voor de gebruikte CO₂-kentallen.

Daarnaast zijn voor deze evaluatie alle nageschakelde technieken doorgerekend met een opvoerhoogte van 8 m. Ook is, voor de onderlinge vergelijkbaarheid, de standtijd van het GAK bij BODAC, bioGAK+lucht en Aurea (BO₃) verlengd naar 15 jaar, terwijl alleen BODAC nu bijna 15 jaar in bedrijf is. Dit heeft zowel impact op de kosten als op de CO₂-voetafdruk.

PRIJS ACTIEF KOOL

De afgelopen 5 jaar is de prijs van actief kool fors gestegen en uiteindelijk ook weer iets gedaald. De prijs voor een geschikte PAK is bijvoorbeeld ca. € 4,- per kg geweest in 2023 en is inmiddels weer gedaald tot € 2,75- per kg. De kosten in 2018 en de geactualiseerde kosten

voor 2024 zijn opgenomen in Tabel 4.4. De toename voor de kosten voor GAK en PAK sinds de start van het IPMV in 2018 is 13-80%. Het moment van inkopen is hierbij bepalend, omdat op dat moment de prijs voor een bepaalde periode vast is gelegd. In de tabel is voor de verschillende types actief kool een gevoeligheid geformuleerd.

TABEL 4.4 GEHANTEERDE PRIJS ACTIEF KOOL (INCLUSIEF BTW)

Parameter	Eenheid	IPMV 2018	Actualisatie 2024	Toename 2024 t.o.v. 2018	Gevoeligheid t.o.v. 2024
Poedervormig actief kool	per kg	€ 2,00	€ 2,75	38%	+50%
Granulair actief kool	per m ³	€ 1.200	€ 1.350 ¹	13%	+25%
Gereactiveerd granulair actief kool	per m ³	€ 500	€ 900	80%	+50%

¹ € 3.000 /ton en 450 kg/m³

Vanwege de forse kostenstijging afgelopen jaren en het belang van het moment van inkopen wordt in deze gevoeligheidsanalyse gekeken wat het effect is van eventuele toename van de prijs van actief kool op de jaarlijkse kosten van de verschillende technieken per m³ rwzi influent van de totale (100.000 i.e.) rwzi (Tabel 4.5). De technieken waar dit effect op heeft zijn alle PAK en GAK technieken (PACAS referentie, PAK + doek, PACAS Nereda, PAK+O₃, GAK referentie, O3-STEP, UpflowGAK-CarboPlus, UpflowGAK-DynaCarbon, BODAC, BioGAK+lucht, Aurea (BO₃)). In absolute zin heeft de kostenstijging het grootste effect op de GAK referentie techniek en het minst op BODAC, BioGAK+lucht en Aurea. Uitgedrukt in percentage van de jaarlijkse kosten is ook het effect op de GAK referentie het grootst evenals op de PACAS referentie. Ook heeft de kostenstijging een relatief grote invloed op PACAS Nereda en UpflowGAK-CarboPlus. Dit wordt veroorzaakt door het relatief hoge actief kool verbruik van deze technieken.

TABEL 4.5 GEVOELIGHEIDSANALYSE KOSTENSTIJGING ACTIEF KOOL (+50% PAK, +25% GAK, + 50% GEREACTIVEERD GAK) OP TOTALE JAARLIJKSE KOSTEN

Technieken	Kostenstijging (eur/ m ³ rwzi)	Percentuele kostenstijging op totale jaartijkse kosten
PACAS referentie	€ 0,02	23 %
PAK + doek	€ 0,01	5 %
PACAS Nereda	€ 0,02	18 %
PAK + O ₃	€ 0,01	5 %
GAK referentie	€ 0,05	23 %
O3-STEP (zonder N en P verwijdering)	€ 0,01	5 %
UpflowGAK-CarboPlus	€ 0,02	13 %
UpflowGAK-DynaCarbon	€ 0,02	9 %
BODAC	€ 0,001	1 %
BioGAK+lucht	€ 0,002	1 %
Aurea (BO ₃)	€ 0,002	1 %

ELEKTRICITEITSPRIJS

De afgelopen 5 jaar heeft de prijs van elektriciteit fors gefluctueerd. De toename van de elektriciteitsprijs sinds de start van het IPMV in 2018 is gemiddeld circa 100% (Tabel 4.6). Het moment van inkopen is hierbij echter bepalend, omdat op dat moment de prijs voor een bepaalde periode vast wordt gelegd. In de gevoeligheid wordt daarom gekeken wat het betekent als de prijs met 50% stijgt of daalt t.o.v. 2024.

TABEL 4.6 GEHANTEERDE PRIJS ELEKTRICITEIT (INCLUSIEF BTW)

Parameter	Eenheid	IPMV 2018	Actualisatie 2024	Toename 2024 t.o.v. 2018
Elektriciteit	per kWh	€ 0,10	€ 0,20	100%

Bij alle beschouwde technieken wordt elektriciteit in meer of mindere mate gebruikt. Deze gevoeligheid heeft dus op alle technieken een effect. Het grootste effect is te zien bij de technieken die in absolute (in totale euro's) en relatieve (t.o.v. totale kosten van techniek) zin het meest elektriciteit gebruiken. Dit zijn ZF+UV/H₂O₂, O₃ + Ultrasound en O₃ referentie.

TABEL 4.7 GEVOELIGHEIDSANALYSE EFFECT KWH PRIJS (+/- 50%) OP TOTALE JAARLIJKSE KOSTEN

Technieken	Kostenstijging (eur/ m ³ rwzi)	Percentuele kostenstijging op totale jaarlijkse kosten
PAK + doek	+/- € 0,00....	+/- 2 %
PACAS Nereda	+/- € 0,00...	+/- 2 %
BODAC + O ₂	+/- € 0,01	+/- 6 %
BioGAK+lucht	+/- € 0,01	+/- 4 %
O3-STEP (zonder N en P verwijdering)	+/- € 0,01	+/- 4 %
UpflowGAK-CarboPlus	+/- € 0,00	+/- 2 %
UpflowGAK-DynaCarbon	+/- € 0,01	+/- 4 %
ZF+UV/H ₂ O ₂	+/- € 0,08	+/- 9 %
O ₃ +Ultrasound	+/- € 0,01	+/- 10 %
PAK + O ₃	+/- € 0,01	+/- 6 %
Microforce	+/- € 0,01	+/- 4 %
Aurea (BO ₃)	+/- € 0,01	+/- 4 %
DEXfilter	+/- € 0,00	+/- 1 %
AdOx	+/- € 0,01	+/- 6 %
NF+UV/H ₂ O ₂	+/- € 0,03	+/- 6 %
O ₃ +keramische MF	+/- € 0,01	+/- 2 %
GAK referentie	+/- € 0,00	+/- 2 %
PACAS referentie	+/- € 0,00	+/- 1 %
O ₃ referentie	+/- € 0,01	+/- 10 %

STICHTINGSKOSTEN

De wijze van aanbesteden kan een groot effect hebben op de uiteindelijke stichtingskosten. Voor de toepassing van nieuwe technieken heeft een bouwteam de voorkeur maar voor bewezen technieken kan overwogen worden om ze (deels) turn-key aan te besteden. Naast de aanbestedingsvorm is er sowieso een grote onzekerheid over de stichtingskosten van technieken voor de verwijdering van microverontreinigingen. Afhankelijk van de specifieke kenmerken van een rwzi, de wensen/eisen van het waterschap en de omstandigheden in de markt kunnen de prijzen sterk variëren. Om deze reden is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij is gekeken wat het effect is van 30% lagere en 30% hogere stichtingskosten. Deze 30% is indicatief gekozen en heeft als doel om het effect van fluctuaties in de stichtingskosten inzichtelijk te maken.

In Figuur 4.9 is te zien dat de stichtingskosten bij een aantal technieken veel zwaarder meewegen in de totale jaarlijkse kosten dan bij andere technieken. Zo wegen de stichtingskosten (als kapitaallasten) relatief veel mee bij BODAC, BioGAK+lucht, Microforce, NF+UV/H₂O₂ en O₃+keramischeMF. In tegenstelling tot DEXfilter, referentie GAK, referentie PACAS, ZF+UV/H₂O₂ en PACAS Nereda waar de kapitaallasten relatief laag zijn ten opzichte van de totaal jaarlijkse kosten en daarmee het effect op stichtingskosten beperkter is. Tabel 4.8 laat dit effect zien.

TABEL 4.8

GEVOELIGHEIDSANALYSE EFFECT +/- 30% VERANDERING STICHTINGSKOSTEN OP JAARLIJKE KOSTEN

Technieken	Kostenstijging/daling (eur/ m ³ rwzi)	Percentuele kostenstijging/daling op totale jaarlijkse kosten
PAK + doek	+/- € 0,04	+/- 18 %
PACAS Nereda	+/- € 0,02	+/- 12 %
BODAC + O ₂	+/- € 0,04	+/- 24 %
BioGAK+lucht	+/- € 0,03	+/- 23 %
O3-STEP (zonder N en P verwijdering)	+/- € 0,04	+/- 18 %
UpflowGAK-CarboPlus	+/- € 0,03	+/- 16 %
UpflowGAK-DynaCarbon	+/- € 0,04	+/- 18 %
ZF+UV/H ₂ O ₂	+/- € 0,10	+/- 12 %
O ₃ +Ultrasound	+/- € 0,01	+/- 14 %
PAK + O ₃	+/- € 0,03	+/- 16 %
Microforce	+/- € 0,05	+/- 23 %
Aurea (BO ₃)	+/- € 0,03	+/- 21 %
DEXfilter	+/- € 0,02	+/- 8 %
AdOx	+/- € 0,03	+/- 22 %
NF+UV/H ₂ O ₂	+/- € 0,10	+/- 23 %
O ₃ +keramischeMF	+/- € 0,14	+/- 23 %
GAK referentie	+/- € 0,04	+/- 19 %
PACAS referentie	+/- € 0,01	+/- 10 %
O ₃ referentie	+/- € 0,01	+/- 15 %

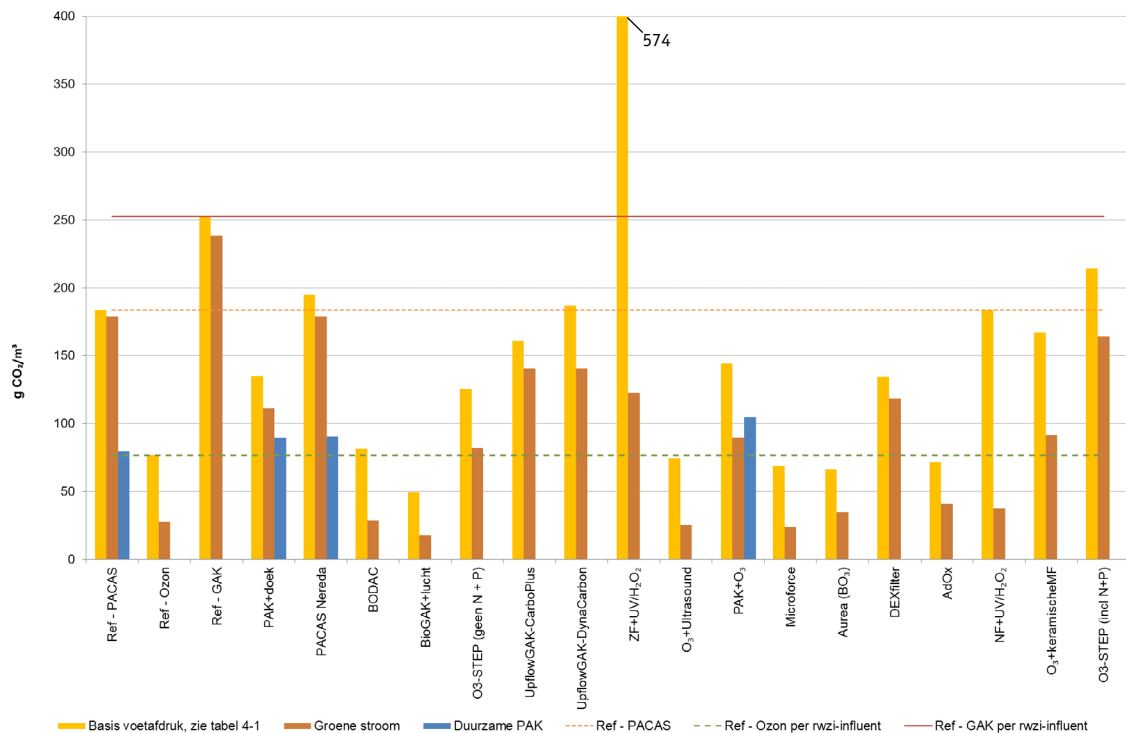
GROENE STROOM

Het CO₂ kental voor Nederlands groene stroom is 0 kg CO₂/kWh in plaats van 0,536 kg CO₂/kWh voor grijze stroom (zie Tabel 2.3). In Figuur 4.11 is weergegeven hoe de CO₂-voetafdruk van de technieken verandert als alleen het kental voor CO₂ wijzigt van 0,536 naar 0 kgCO₂/kWh. In Tabel 4.9 is de onderverdeling in lagere en hogere CO₂-voetafdrukken gegeven.

Hieruit blijkt dat het effect van deze wijziging het grootst is op de technieken waarbij de CO₂-voetafdruk vooral gebaseerd is op het elektriciteitsverbruik. De voetafdruk van de technieken ZF+UV/H₂O₂ en NF+UV/H₂O₂ daalt met 80%, waardoor de voetafdruk van NF+UV/H₂O₂ vergelijkbaar wordt met technologieën die sowieso een lage CO₂-voetafdruk hadden (zie Tabel 4.9).

De CO₂-voetafdruk van de referentie-ozon, BODAC, bioGAK+lucht, O₃+ultrasound, Microforce daalt met 65% vooral als gevolg van het elektriciteitsverbruik voor opvoeren en ozoniseren. De voetafdruk van O3-STEP met N en P verwijdering was lager dan de GAK referentie en daalt bij groene stroom onder de CO₂-voetafdruk van de twee PACAS technieken.

Het effect van groene stroom inkoop is het kleinst bij de PACAS technologieën (referentie: -3% en Nereda: -6%).

FIGUUR 4.11 GEVOELIGHEID GROENE STROOM EN DUURZAMERE PAK OP DE CO₂-VOETAFDruk*

* De gele balken (basis voetafdruk) zijn gelijk aan de gele balken in Figuur 41 en betreffen de situatie met grijze stroom en fossiele PAK.

TABEL 4.9 RELATIEVE CO₂-VOETAFDruk EN GEVOELIGHEID GROENE STROOM EN DUURZAMERE PAK

Relatieve CO ₂ -voetafdruk	Basis CO ₂ -voetafdruk, zie paragraaf 2.6	Groene stroom	Duurzame PAK
<50 g CO ₂ /m ³ _{rwzi-influent}		Referentie Ozon BODAC Bio-GAK + lucht O ₃ +Ultrasound Microforce Aurea (BO ₃) AdOx NF+UV/H ₂ O ₂	
<85 g CO ₂ /m ³ _{rwzi-influent}	Referentie Ozon BODAC Bio-GAK + lucht Aurea (BO ₃) AdOx O ₃ +Ultrasound Microforce	O3-STEP (zonder N en P verwijdering)	Referentie PACAS Referentie Ozon BODAC Bio-GAK + lucht Aurea (BO ₃) AdOx O ₃ +Ultrasound Microforce
85-120 g CO ₂ /m ³ _{rwzi-influent}		PAK+doek PAK+O ₃ DEXfilter O ₃ +keramischeMF	PAK+doek PACAS Nereda PAK+O ₃
120-160 g CO ₂ /m ³ _{rwzi-influent}	PAK+doek PAK+O ₃ O3-STEP (zonder N en P verwijdering) DEXfilter	PACAS Nereda Upflow GAK ZF+UV/H ₂ O ₂	O3-STEP (zonder N en P verwijdering) DEXfilter

Relatieve CO ₂ -voetafdruk	Basis CO ₂ -voetafdruk, zie paragraaf 2.6	Groene stroom	Duurzame PAK
160-200 g CO ₂ /m ³ _{rwzi-influent}	Referentie PACAS PACAS Nereda Upflow GAK NF+UV/H ₂ O ₂ O ₃ +keramischeMF	Referentie PACAS O3-STEP (met N en P verwijdering)	Referentie PACAS Upflow GAK NF+UV/H ₂ O ₂ O ₃ +keramischeMF
>200 g CO ₂ /m ³ _{rwzi-influent}	Referentie GAK ZF+UV/H ₂ O ₂ O3-STEP (met N en P verwijdering)	Referentie GAK	Referentie GAK ZF+UV/H ₂ O ₂ O3-STEP (met N en P verwijdering)

DUURZAMERE PAK

Het CO₂ kental voor duurzame poederactief kool (biologische oorsprong) is met 4,54 kg CO₂/kg 41% van 11,06 kg CO₂/kg (zie Tabel 23) (STOWA 2020-19 en STOWA 2021-24). Uitgangspunt is dat het specifieke verbruik van actief kool niet veranderd. In Figuur 4.11 is het effect weergegeven op de CO₂-voetafdruk van de vier PAK technieken als duurzame actief kool wordt toegepast. In Tabel 4.9 is de onderverdeling in lagere en hogere CO₂-voetafdrukken gegeven.

In tegenstelling tot de gevoeligheid voor groene stroom, neemt de CO₂-voetafdruk van de referentie PACAS en PACAS Nereda af met circa 55% en komt daarmee in de buurt van de technieken met een lage CO₂-voetafdruk (Tabel 4.9). De gevoeligheid voor PAK in de CO₂-voetafdruk is voor deze technieken zeer groot, waardoor het vanuit duurzaamheids-oogpunt voor deze technieken bijzonder interessant is om duurzamere kolen toe te passen.

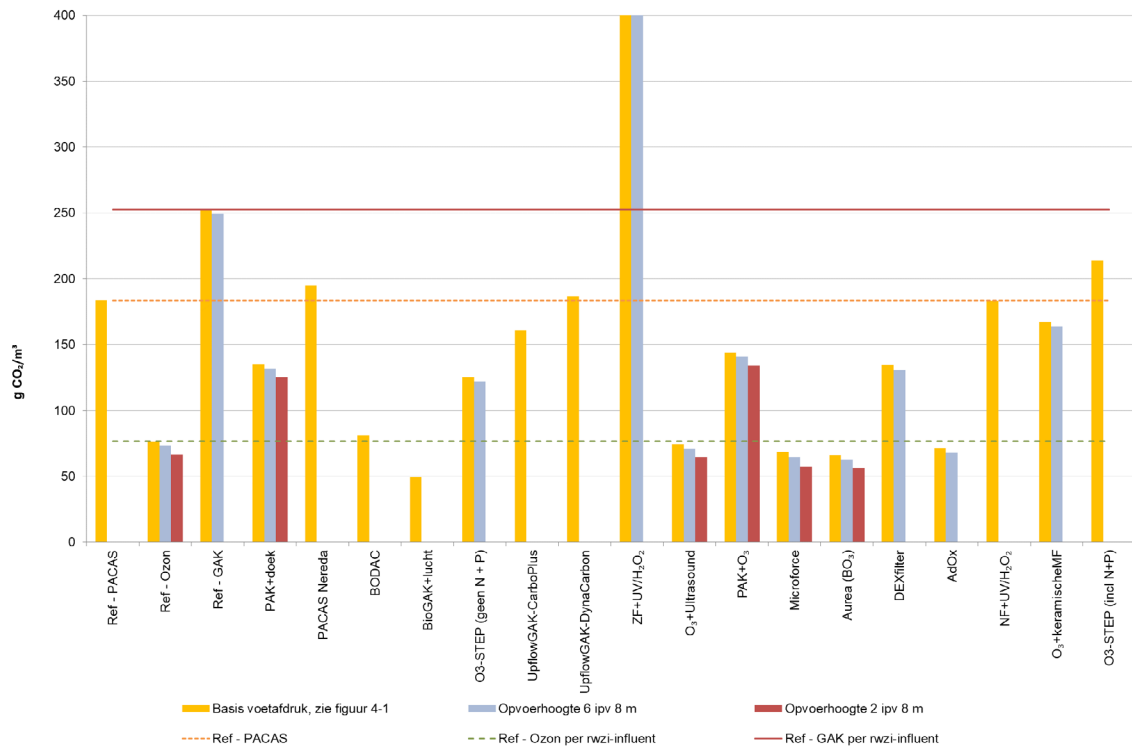
Voor de combinatietechnieken PAK+doek en PAK+O₃ is de afname van de CO₂ voetafdruk 25-35%.

OPVOERHOOGTE 8 VERSUS 2 M

De opvoerhoogte in deze evaluatie is voor alle nageschakelde technieken op 8 m gesteld, tenzij hoger is aangegeven (BODAC, bioGAK+lucht, upflowGAK). Bij de referentie PACAS, PACAS Nereda en NF+UV/H₂O₂ is geen opvoerhoogte meegenomen.

Sommige technologieën zijn bewust zo ontworpen dat ze een lage opvoerhoogte zullen hebben, deze worden door deze aanpak iets benadeeld. Daarnaast kunnen keuzes, zoals de uitvoeringsvorm van de ozontechnologie, en de locatie specifieke eigenschappen aanleiding zijn voor een lagere opvoerhoogte.

In deze gevoeligheidsanalyse is inzicht gegeven in de bandbreedte tussen een hele lage opvoerhoogte van 2 m en de voor de berekeningen gebruikte opvoerhoogte van 8 m, zie Figuur 4.12. Het zal niet voor alle technologieën mogelijk zijn de opvoerhoogte te hanteren, in deze gevoeligheid is uitgegaan van de ozontechnologieën. Voor deze en de anderen is ook het verschil in CO₂-voetafdruk berekend bij een opvoerhoogte van 6 m.

FIGUUR 4.12 GEVOELIGHEID VERLAGING OPVOERHOOGTE NAAR 6 EN 2 METER OP DE CO₂-VOETAFDruk*

* De voetafdruk voor ZF+UV/H₂O₂ is in de grafiek afgetoet voor de leesbaarheid van de figuur, de basis voetafdruk is 574 g CO₂/m³_{rwzi-influent} en bij een opvoerhoogte van 6 m is deze 570 g CO₂/m³_{rwzi-influent}

Het verlagen van de opvoerhoogte van 8 naar 2 m geeft voor de referentie ozon, O₃+ultrasound, Microforce en Aurea (BO₃) een ongeveer 15% lagere CO₂-voetafdruk. De technologieën met een hogere 'basis' voetafdruk (PAK+doek en PAK+O₃) geeft dit een verlaging van 7%. Het verlagen van de opvoerhoogte van 8 naar 6 m geeft voor de technologieën een verlaging van 1 tot 5% op de CO₂-voetafdruk.

Ook heeft dit effect op de jaarlijkse kosten van deze technieken. Dit effect is wel wat lager, tussen de 2 en 4%, zie ook Tabel 4.10.

TABEL 4.10 GEVOELIGHEIDSANALYSE EFFECT VERLAGING OPVOERHOOGTE VAN 8 NAAR 2 M OP JAARLIJKSE KOSTEN

Technieken	Percentuele kostenverlaging op totale jaarlijkse kosten
PAK + doek	2 %
O ₃ +Ultrasound	4 %
PAK + O ₃	2 %
Microforce	2 %
Aurea (BO ₃)	2 %
O ₃ referentie	5 %

STANDTIJD GAK

De Aurea (BO₃) pilot is uitgevoerd met reeds verzadigd GAK wat al 13 jaar toegepast wordt in de ultrapuurwaterfabriek (BODAC) in Emmen. De beluchte continue Bio-GAK pilot is uitgevoerd met vers GAK en heeft ongeveer 1,5 jaar gedraaid. Ondanks dat Bio-GAK slechts 1,5 jaar gedraaid heeft, is het aannemelijk dat ook hier de vervangingsfrequentie 15 jaar bedraagt omdat het net als BODAC en Aurea (BO₃) een belucht GAK-filter betreft. In deze evaluatie is daarom uitgegaan van 15 jaar standtijd. Ook voor O3-STEP is de standtijd een interessant

punt van vervolgonderzoek. Het effect van de specifieke condities in dit filter op de standtijd moet in de praktijk worden vastgesteld.

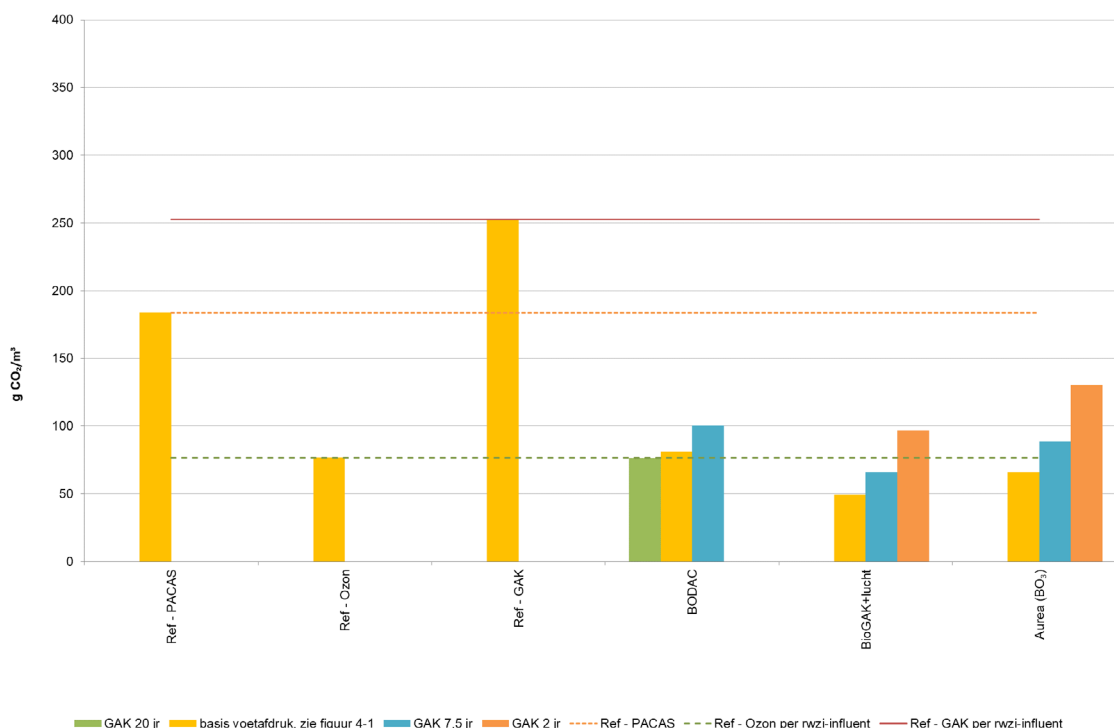
In het STOWA rapport over de pilot is rekening gehouden met een standtijd van 1,5 jaar voor bioGAK+lucht. Ook voor een nieuw op te starten BODAC en Aurea (BO_3) is het onzeker hoe de prestaties van deze technologieën zijn in het begin met vers GAK en hoe lang het duurt voordat het filter biologisch optimaal werkt. Gezien het voorfilter bij de BODAC is het meest aannemelijk dat deze technologie een langere standtijd kan hanteren. Daarom is voor bioGAK+lucht en Aurea (BO_3) in deze gevoeligheidsanalyse gerekend met 2 en 7,5 jaar standtijd, waarbij respectievelijk met een combinatie van vers en geregenereerd kool en met uitsluitend vers GAK is gerekend. Voor de BODAC is alleen de 7,5 jaar met vers GAK doorge-rekend.

In Figuur 4.13 zijn de resultaten weergegeven, waarbij de gele balk de basis CO_2 -voetafdruk uit paragraaf 4.1.2 is bij 15 jaar standtijd. Het verhogen van de standtijd naar 20 jaar bij BODAC resulteert in een ongeveer 5% lagere CO_2 -voetafdruk, terwijl halvering van de standtijd (naar 7,5 jaar) een ongeveer 25% hogere CO_2 -voetafdruk oplevert. Bij bioGAK+lucht en Aurea (BO_3) resulteert een halvering van de standtijd (van 15 naar 7,5 jaar) in een toename van de CO_2 footprint van ongeveer 1/3, terwijl een standtijd van 2 jaar ongeveer een verdubbeling van de CO_2 -voetafdruk tot gevolg heeft.

De CO_2 -voetafdruk van de technologieën zijn erg gevoelig voor de standtijd van het GAK, waardoor het van belang is dit goed mee te nemen in de afweging bij de technologiekeuze voor een specifieke rwzi. Ook is het wenselijk hier praktijkervaring mee op te bouwen, zodat meer zekerheid ontstaat over de standtijd van het GAK.

Voor de standtijd van het GAK in de O3-STEP is uitgegaan van 2 jaar. Ook hier is het mogelijk dat de standtijd korter of langer is dan deze uitgangswaarde. Op basis van bovenstaande, kan worden aangenomen dat ook de CO_2 -voetafdruk van O3-STEP erg gevoelig is voor de standtijd.

FIGUUR 4.13 GEVOELIGHEID LANGERE EN KORTERE STANDTIJD VAN HET GAK OP DE CO_2 -VOETAFDruk



Ook heeft dit effect op de kosten van deze technieken. Als de standtijd tegenvalt en meer richting de 2 jaar zit is er een kostenstijging van zo'n 20% (Tabel 4.11).

TABEL 4.11 GEVOELIGHEIDSANALYSE EFFECT LANGERE EN KORTERE STANDTIJD VAN HET GAK OP DE JAARLIJKSE KOSTEN

Technieken	Standtijd	BODAC+O ₂	BioGAK+lucht	Aurea (BO ₃)
Percentuele kostenverlaging op totale jaarlijkse kosten	20 jaar	-1 %		
Percentuele kostenverhoging op totale jaarlijkse kosten	7,5 jaar	+3 %	+3 %	+4 %
Percentuele kostenverhoging op totale jaarlijkse kosten	2 jaar		+20 %	+23 %

4.2 KWALITATIEF

4.2.1 BIO-ASSAYS: ECOTOXICITEIT

De methodeontwikkeling en meting van ecotoxiciteit is een grote meerwaarde geweest van de IPMV pilot onderzoeken. Vanwege de kosten en de doorlooptijd is per pilot onderzoek slechts een beperkt aantal ecotoxiciteit metingen uitgevoerd.

De reductie in ecotoxiciteit is onderzocht aan de hand van Bio-assays en resulteert voor alle technieken in een reductie van gemiddeld 50% of meer over het totale effluent van de rwzi. Voor PACAS en GAK filters ligt het rendement rond de 50% terwijl combinatietechnieken zoals PAC-O₃, Microforce en ZF+UV/H₂O₂ een reductie tot 75% laten zien.

4.2.2 BIJVANGST NUTRIËNTEN: AMMONIUM, NITRAAT EN FOSFAAT

In Tabel 4.12 is af te leiden welke technieken naast microverontreinigingen ook nutriënten verwijderen. Hierbij geldt;

- Op de koolkorrels kunnen bacteriën groeien die geadsorbeerde microverontreinigingen (zie paragraaf 3.4.1), bromaat (zie paragraaf 4.2.3) en nutriënten (zie hieronder) kunnen verwijderen.
- Ammonium wordt (gedeeltelijk) genitrificeerd in nageschakelde beluchte filtersystemen BODAC, BioGAK+lucht, Aurea(BO₃) en Microforce.
- Het O₃-STEP kan als denitrificerend en defosfaterend systeem worden gerealiseerd door het doseren van methanol en metaalzout. Dit is nu niet meegenomen in de kosten en de relatieve CO₂ voetafdruk is opgenomen in Figuur 4.1.
- Fosfaat wordt automatisch verwijderd bij PAK+doek doordat coagulatie met metaalzout noodzakelijk is voor de afscheiding van PAK. Indien metaalzouten in de waterlijn worden gedoseerd ten behoeve van P-verwijdering, kunnen deze worden verminderd, zodat netto de P-verwijdering gelijk blijft. Als de situatie gelijk blijft in de waterlijn, zal door de technologie aanvullende P-verwijdering plaatsvinden.
- Fosfaat kan aanvullend worden verwijderd bij alle nageschakelde GAK filters. Dit is nu niet meegenomen in de CO₂-voetafdruk en de kosten.
- P die gebonden is aan droge stof wordt afgevangen in alle systemen waar droge stof afgevangen wordt, zoals de GAK en filtratie systemen.

TABEL 4.12 ONDERVERDELING TECHNOLOGIEËN IN WERKINGSPRINCIPE TEN BEHOEVE VAN ONDERLINGE VERGELIJKING¹

Werkingsprincipe en technologie	Ammonium	Nitraat	Fosfaat ²	Opmerkingen
Adsorptie aan Poeder Actiefkool (PAK)				
PAK +Doek	-	-	x (-)	() bij FeCl ₃ dosering
PACAS Nereda	-	-	-	
PAK+O ₃	-	-	-	
Adsorptie aan Granulair Actiefkool (GAK)				
O ₃ -STEP (zonder N en P verwijdering)	-	-(x ¹)	-(x ¹)	() bij FeCl ₃ en methanol dosering
Continue upflow GAK	-	-	-(x ¹)	() bij FeCl ₃ dosering
BODAC	x	-	-(x ¹)	() bij FeCl ₃ dosering
Continue Bio-GAK + lucht	x	-	-(x ¹)	() bij FeCl ₃ dosering
Aurea (BO ₃)	x	-	-(x ¹)	() bij FeCl ₃ dosering
Adsorptie aan overige niet-fossiele materialen				
DEX-filter	-(x ¹)	-(x ¹)	-(x ¹)	() nader onderzoek nodig naar mechanisme
AdOx	-(x ¹)	-	-	() andere zeolietstelling ³
Oxidatieve technieken en filtratie technieken				
ZF+UV/H ₂ O ₂	-	-(x ¹)	-(x ¹)	() bij FeCl ₃ en methanol dosering op het zandfilter
O ₃ + Ultrasound	-	-	-	-
O ₃ -STEP (zonder N en P verwijdering)	-	-(x ¹)	-(x ¹)	() bij FeCl ₃ en methanol dosering
PAK-O ₃	-	-	-	
Microforce	x	-	-	
Aurea (BO ₃)	x	-	-(x ¹)	() bij FeCl ₃ dosering
NF en UV/H ₂ O ₂	-	-	x	
O ₃ + keramische MF	-	-	-	

¹ X = verwijderd in de technologie, - = niet verwijderd in de technologie, () = mogelijk/eventueel te verwijderen, in de kolom 'opmerkingen' is uitgelegd wat hiervoor nodig is.

² Aanvullende P verwijdering door doseren van metaalzouten in de waterlijn is in theorie overal mogelijk en is niet meegenomen als bijvangst in deze tabel.

³ Buiten de IPMV pilot om is op labschaal onderzoek gedaan met een andere, tijdens de pilot niet beschikbare, zeoliet. Deze kan zowel sulfamethoxazol als ammonium verwijderen (zie Doekhi-Bennani, 2021).

4.2.3 MINIMALISATIE BROMAATVORMING

Uit de pilotonderzoeken met ozonisatie technieken in het IPMV zijn lage bromaat concentraties in het effluent van de pilots gevonden. Dit is ook het geval bij zeer hoge ingaande bromide concentraties (zoals ca. 1,5-2 mg bromide/l op RWZI Walcheren bij de pilot van Microforce) of na kunstmatig toevoegen van bromide om de vorming van bromaat te kunnen beoordelen (ca. 1 mg bromide/l bij de O₃+ultrasound pilot op RWZI Winterswijk).

De specifieke ozondoseringen in de pilot installaties lag tussen 0,3 en 0,55 g O₃/g DOC. De resultaten uit de pilots sluiten daarom aan bij de uitkomsten van de technische handreiking oxidatieproducten bij ozonisatie (STOWA 2022-48). Hierin staat beschreven dat er bij een specifieke ozondosering van < 0,6 g O₃/g DOC nauwelijks of geen bromaatvorming wordt verwacht.

Naast de ingaande bromideconcentratie speelt de benodigde ozondosering en de wijze van doseren een belangrijke rol in het tegengaan van bromaatvorming. De ingaande bromide concentratie is niet of beperkt beïnvloedbaar. Een lage ozondosering in combinatie met een fijne bellen diffusors vermindert het risico op bromaatvorming sterk. De specifieke ozondosering is afhankelijk van de gekozen technologie en het benodigde verwijderingsrendement. De wijze van doseren kan over het algemeen vrij gekozen worden, waardoor hier nog optimalisatie mogelijk is.

Bij de O3-STEP pilot is een verwijdering van bromaat gesignaleerd in het nageschakelde GAK filter onder anoxische condities tot concentraties onder de rapportagegrens van de meting. Bij een ozondosering van 0,4 g O₃/g DOC en een ingaande bromideconcentratie van 0,1 tot 1 mg/l in de O3-STEP lag de bromaatconcentratie in de afloop van de ozon in de range van onder de rapportagegrens bij de lagere bromideconcentraties tot 2,3 µg/l bij de hogere bromideconcentraties.

4.2.4 BIJVANGST ANTIBIOTICA RESISTENTIE (AMR: ANTIMICROBIAL RESISTANCE)

Het veelvuldig gebruik van antibiotica in de gezondheidszorg en in de veehouderij leidt tot de ontwikkeling van bacteriën die niet meer op antibiotica reageren. Deze bacteriën noemen we antibioticaresistent. Resistente bacteriën zijn onder andere aanwezig bij patiënten in ziekenhuizen, bij de algemene bevolking, bij vee en bij huisdieren. Gevoelige organismen kunnen door mutatie ongevoelig worden voor bepaalde stoffen door genetische informatie, coderend voor resistentie, in hun DNA op te nemen. Genoverdracht vindt vaak plaats in systemen met hoge dichtheden van micro-organismen, waar de kans hoger is dat geschikte organismen dicht bij elkaar komen. Antibioticaresistente bacteriën komen daardoor ook voor in rioolwater. Rioolwaterzuiveringsinstallaties zijn onvoldoende in staat om deze te verwijderen, waardoor rwzi- effluenten een belangrijke bron zijn van antibioticaresistente bacteriën en genen in het oppervlaktewater. Geavanceerde zuiveringstechnieken kunnen resistente bacteriën en genen mogelijk (gedeeltelijk) verwijderen.

Dit is relevant omdat mensen kunnen worden blootgesteld aan antibioticaresistente bacteriën in met effluent verontreinigd oppervlaktewater, zoals tijdens recreatie, irrigatie of via voedsel.

Een aantal technieken die binnen de IMPV zijn onderzocht hebben de potentie om antibiotica resistente bacteriën en/of genen te verwijderen. Of dit ook daadwerkelijk gebeurt is onderzocht door middel van een monitoringcampagne. Hierbij is aangesloten bij de monitoring op de diverse pilots van het IPMV en demonstratie installaties van het versnellingsprogramma. In deze monitoringscampagne is de verwijdering van een antibiotica resistente bacterie (Extended Spectrum Beta-lactase producerende bacteriën: ESBL) en een selectie van resistente genen onderzocht. Daarnaast is bekeken of de verwijdering van *Escherichia coli* een indicator kan zijn voor de verwijdering van ESBL-bacteriën. De resultaten zijn hieronder kort samengevat, meer details zijn gerapporteerd in het onderzoeksrapport 'Verwijdering van antibioticaresistentie bij vergaande zuiveringstechnieken' (STOWA 2024-30).

De resultaten van de meetcampagne moeten als indicatief beschouwd worden en kunnen niet een op een naar andere locaties doorvertaald worden: er zijn maar een beperkt aantal locaties bemonsterd en het aantal herhalingen per techniek en/of instelling is beperkt: de rwzi's zijn 1 tot 10 keer bemonsterd, elke instelling maximaal 2 keer. Daarnaast kan de aanwezigheid van antibiotica resistentie sterk verschillen per tijdseenheid, afhankelijk van de bron van deze bacteriën en genen.

Uit de resultaten kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- In alle rwzi-effluenten komen zowel ESBL bacteriën als resistentiegenen voor.
- *E. coli* aantallen zijn ongeveer 2 log-eenheden hoger dan de ESBL-bacteriën. Dit verschil van 2-logeenheden blijft nagenoeg gelijk na behandeling. Hierdoor kan geconcludeerd worden dat de verwijdering van *E.coli* een goede indicator is voor de verwijdering van ESBL-bacteriën.

- De technieken gebaseerd op adsorptie (PAK, GAK en overige materialen) verwijderen nagenoeg geen ESBL en resistentiegenen.
- Bij oxidatieve technieken (ozon) is er afhankelijk van de contacttijd en gebruikte dosis enige verwijdering van ESBL (0,5 tot 3 log) en resistentie genen. Een hogere ozondosering geeft een hogere mate van verwijdering, maar het beeld is niet eenduidig. Microforce lijkt een iets hogere verwijdering te hebben dan de andere technieken met ozon.
- De filtratietechnieken, AdOx en DEX-filter verwijderen nagenoeg geen ESBL-bacteriën en resistente genen.
- Nanofiltratie is veelbelovend en verwijdert nagenoeg alle ESBL- bacteriën. Het effect van de nageschakelde UV/H₂O₂ is onduidelijk, maar lijkt wel nog een effect te hebben op de verwijdering van de resistentie genen.
- De bevindingen bevestigen de verwachtingen ten aanzien van de technieken.

Aanbevolen wordt om bij de keuze voor een vergaande zuiveringstechniek naast alle andere factoren ook de effectiviteit van de verwijdering van antibioticaresistentie (zowel bacteriën als genen) mee te wegen. Daarnaast is het van belang dat het gehele rwzi-effluent wordt behandeld met deze techniek: bij een deelbehandeling zal een verwijdering van enkele log-eenheden te niet worden gedaan door de hoge aantallen ESBL in de onbehandelde stroom.

Om de bevindingen uit dit onderzoek te verifiëren is uitgebreidere monitoring van de verschillende technieken wenselijk.

4.2.5 BIJVANGST PFAS

PFAS staat voor poly- en perfluoralkylstoffen. Het is een verzamelnaam voor een groep van duizenden door de mens gemaakte gefluoreerde verbindingen. Onderzoek naar PFAS concentreerde zich tot voor kort vooral op enkele selecte groepen van volledig gefluoreerde PFAS, waaronder de bekende stoffen PFOS en PFOA. Deze PFAS zijn zeer persistent, mobiel en nauwelijks biologisch afbreekbaar, en ze worden overal in het milieu gevonden. Een belangrijke bevinding uit STOWA onderzoek naar PFAS bij rwzi's (STOWA 2021-46) is dat op de meeste rwzi's er méér stabiele PFAS (zoals PFOS en PFOA) de rwzi uit gaan dan dat er binnenkomen. De verklaring hiervoor is de aanwezigheid van bekende en onbekende afbreekbare PFAS, zogeheten 'precursors', in het influent. Deze (meestal niet geanalyseerde) precursors worden in de rwzi omgezet naar stabiele (wel geanalyseerde) PFAS. Daarnaast werd geconstateerd dat PFAS met een zeer korte ketenlengte, zoals TFA, meer aandacht verdienen in toekomstige meetcampagnes.

In principe hebben alle technieken die binnen het IPMV zijn onderzocht de potentie om PFAS en/of PFAS-precursors te verwijderen. Of dit ook daadwerkelijk gebeurt is onderzocht door middel van een monitoringcampagne. Hierbij is aangesloten bij de monitoring ten behoeve van antibioticaresistente bacteriën en genen op de diverse pilots van het IPMV en demonstratieinstallaties van het versnellingsprogramma. Naast standaard PFAS analyses zijn ook twee relatief nieuwe analysemethoden ingezet: analyse van zeer korte ketens en een screeningsmethode voor totaal precursors, de TOP-analyse. De resultaten zijn hieronder kort samengevat, meer details zijn gerapporteerd in het onderzoeksrapport 'Verwijdering van PFAS bij vergaande zuiveringstechnieken' (STOWA 2024-29).

De resultaten van de meetcampagne moeten als indicatief beschouwd worden en kunnen niet een op een naar andere locaties doorvertaald worden: er zijn maar een beperkt aantal locaties bemonsterd en het aantal herhalingen per techniek en/of instelling is beperkt: de

rwzi's zijn 1 tot 10 keer bemonsterd, elke instelling maximaal 2 keer. Elke rwzi verschilt in de mate van belasting met PFAS en welke typen PFAS binnenkomen. Deze verschillen worden de 'fingerprint' genoemd en zijn van belang om de effectiviteit van vergaande zuiveringstechnieken te kunnen beoordelen en om de conclusies te kunnen doorvertalen naar andere locaties. Wat er niet in komt kan er immers ook niet uitgehaald worden.

Uit de resultaten kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- De concentraties PFAS totaal (30 stoffen) in regulier effluent van de onderzochte rwzi's lopen uiteen van 12 tot 92 ng PFAS(30)/l. Dit valt binnen normale ranges voor rwzi effluent.
- De onderzochte rwzi's blijken allen laag tot matig belast met PFAS (1,2 tot 6,8 mg/IE/jaar).
- Na vergaande zuivering zijn de gehalten PFAS totaal 1,5 tot 96 ng PFAS(30)/l.
- De meeste vergaande zuiveringstechnieken verwijderen geen PFAS.
- Bij sommige technieken nemen de concentraties zelfs toe, vooral als PFAS precursors in het reguliere effluent aanwezig zijn.
- De filtratietechnieken - nanofiltratie, AdOx en DEX-filter - verwijderen PFAS in enige mate, nanofiltratie met fijne membranen is het meest veelbelovend.
- Het effect van oxidatieve technieken is niet altijd eenduidig: er is ofwel een afname, geen effect of een toename van de concentraties. De eventuele toenames of afnames blijven gering.
- De bevindingen bevestigen de verwachtingen ten aanzien van de technieken.
- Van de zeer korte ketens werden alleen de allerkortste, TFA en TFMS, aangetroffen. De TFA concentraties variëren van 430 tot 2400 ng/l en zijn hiermee fors hoger dan de overige PFAS (maximaal 40 ng/l). De TFMS concentraties variëren van 4,5 tot 46 ng/l.
- Geen van de technieken is in staat TFA te verwijderen, ook niet de adsorptie- en filtratie technieken die wel andere PFAS verwijderen. Bij ozonisatie lijkt er – afhankelijk van wat er aan stoffen binnen komt – een geringe toename in concentratie mogelijk.
- De TOP-analyses geven aan dat er op alle rwzi's precursors aanwezig zijn, maar op sommige meer dan op andere, soms fors meer.
- Diverse adsorptietechnieken verwijderen PFAS precursors. De verwijdering van PFAS precursors bij oxidatieve technieken is wisselend.
- Bij de demonstratie installaties met oxidatieve technieken (ozon in Houten en Ge(o)zond in Werverhoof) is sprake van een toename van PFAS in de vergaande zuivering. Dit lijkt te worden veroorzaakt door onbekende PFAS precursors in het reguliere effluent.

Aanbevolen wordt om bij de keuze voor een vergaande zuiveringstechniek naast alle andere factoren ook de aanwezigheid van PFAS en PFAS precursors mee te wegen. Met name indien veel precursors aanwezig zijn is de keuze voor een oxidatieve techniek minder voor de hand liggend. Om de bevindingen uit dit onderzoek te verifiëren is uitgebreidere monitoring van de verschillende technieken wenselijk.

4.2.6 BIJVANGST MICROPLASTICS

Dit is geen onderwerp van onderzoek geweest in het IPMV programma en dus niet onderzocht in de pilots.

Wel wordt bij de technologieën NF+UV/H₂O₂ en O₃+keramischeMF aangenomen dat microplastics de membranen die hier gebruikt worden niet kunnen passeren.

4.2.7 BIJVANGST HERGEBRUIK EFFLUENT

Membraanfiltratie is zeer geschikt voor het opwerken van rwzi effluent naar een kwaliteit die geschikt is voor hoogwaardige toepassingen. Afhankelijk van de poriegrootte houdt het fysieke membraan immers alle grotere verontreinigingen tegen. Membraanfiltratie is daardoor geschikt voor het opwerken van rwzi effluent naar industriewater of als voorbehandelingsstap voor de productie van drinkwater. Hiermee onderscheidt het zich van de andere technieken die in het IPMV getest zijn.

Door membraanfiltratie zoals UF of KMF te combineren met ozon of UV/ H_2O_2 ontstaat een combinatietechniek waarmee ook microverontreinigingen tot zeer lage concentraties verwijderd kunnen worden. De verwijdering van microverontreinigingen bij membraanfiltratie moet daarom vooral gezien worden als een bijvangst bij de hoogwaardige toepassing van rwzi effluent.

5

TECHNOLOGY READINESS LEVEL (TRL)

Gedurende het IPMV programma zijn de onderzochte technologieën verhoogd in hun TRL niveau door het pilotonderzoek.

De TRL van de technologieën eind 2023 kan onderverdeeld worden in:

- Technologieën die nu of binnen enkele jaren op demonstratie- of volledige schaal van een rwzi toegepast kunnen worden en waarbij vooral verbeterings- en opschalingsvraagstukken aan de orde zijn, zie Tabel 5.1.
- Technologieën die nog verder onderzoek behoeven, omdat er naast de verbeterings- en opschalingsvraagstukken ook nog kennisvragen over de werking zijn die binnen het IPMV programma niet (meer) aan bod zijn gekomen. Onder andere door problemen met de pilotinstallaties van AdOX en DEXfilter en door tijdgebrek in de O₃+Ultrasound pilot. Deze technologieën zijn benoemd in Tabel 5.2.

TABEL 5.1 TRL EN KENNISVRAGEN VOOR VERBETERING/OPSCHALING

Werkingsprincipe en technologie	TRL	Kenisvragen verbetering/opschaling
Adsorptie aan Poeder Actiefkool (PAK)		
Referentie-PACAS	9	
PAK+doek	7	Hoe functioneert de technologie bij een verhoogde slibbelasting i.c.m. een verhoogde hydraulische belasting. Is er een alternatief voor de benodigde PE-dosering (voor goede slib/water scheiding)
PACAS Nereda	8	Aandachtspunten: - Kooleigenschappen en kwaliteitscontroles - Beschikbaarheid van duurzame kool - Onzekerheid over de te nemen noodzakelijke ATEX-maatregelen bij opslag en dosering op de RWZI - Nauwkeurige metingen van uitspoeling van poederkool in het effluent - bij gebruik van effluent : Beschikbaarheid over de hele dag en filtratie
PAK+O ₃	7-8	Optimale combi van PAK- en ozondosering voor EU doel (80%), minimalisatie bromaatvorming, kosten en duurzaamheid.
Adsorptie aan Poeder Actiefkool (GAK)		
Referentie-GAK	9	
O3-STEP (zonder N en P verwijdering)	8	Uitgebreide monitoring en optimalisatie in de full-scale toepassing kunnen leiden tot een verdere verlenging van de standtijd met als resultaat lagere operationele kosten en een kleinere CO ₂ -voetafdruk, meer inzicht in bromaatvorming/ verwijdering in de O3-STEP en vergaande nutriëntenverwijdering
Continue upflow GAK	8	Voor de Carbopius installatie verder onderzoek naar spoelwatergebruik, functioneren automatische kooldosering en impact andere rwzi locatie. Voor de Dynacarbon de benodigde voorbehandeling verder onderzoeken, de verblijftijd en standtijd kool.
BODAC	6-7	De drukfiltratie en zuurstofdosering hebben een significant effect op de kosten van de toepassing van BODAC. Voor de toepassing als nabehandeling van RWZI Emmen is een zuurstofdosering nodig, door hoge ammoniumconcentraties in het effluent. Bij andere zuiveringen waar lagere concentraties in het RWZI effluent aanwezig zijn kan de dosering van alleen lucht voldoende zijn. Vanuit dit project wordt geadviseerd hier verder naar te kijken en waar mogelijk de manier van zuurstof doseren verder te optimaliseren. Daarnaast wordt er in een vervolgstudie ervaring opgedaan met ijzerdosering in de aanvoer naar het filter zodat fosfaat gebonden en afgevangen wordt in het filter. Middels deze 'ad-on' is BODAC in staat om gelijktijdig te nitrificeren, te defosfateren en breekt het ook medicijnresten af.
Continue Bio-GAK + lucht	6-7	In proefonderzoek wordt de verdere ontwikkeling van micro-verwijdering onderzocht samen met het verlengen van de standtijd van het GAK.
Aurea (BO ₃)	6	Levensduur/standtijd GAK, noodzaak/effect eventuele voorbehandeling, optimale O ₃ dosering, % spoelwater

Werkingsprincipe en technologie	TRL	Kennisvragen verbetering/opschaling
Oxidatieve technieken en filtratie technieken		
Referentie-Ozon	9	
O3-STEP (zonder N en P verwijdering)	8	Zie boven
PAK+O ₃	7-8	Zie boven
Microforce	6	Standtijd dragermateriaal, verwijdering stikstof
Aurea (BO ₃)	6	Zie boven
O ₃ +keramischeMF	6	Plaats en hoeveelheid H ₂ O ₂ inbreng i.r.t. ozon dispersiesystemen m.b.t. bromaat mitigatie en hydroxyl omzetting van microverontreinigingen. Prestatie bij RWA condities (troebelheid)

TABEL 5.2 TRL EN KENNISVRAGEN OVER WERKING, KENNISVRAGEN VOOR NIEUWE PILOT

Werkingsprincipe en technologie	TRL	Kennisvragen werking, kennisvragen voor nieuwe pilot
Adsorptie aan overige niet-fossiele materialen		
DEXfilter	5	Concept heeft nog kinderziektes zoals terugspoeling, externe regeneratie bestaat nog niet, Dextorb nog duur. Hydraulische optimalisatie van het systeem zodat verkleefing voorkomen wordt, het filtermateriaal niet uitspoelt bij terugspoelen en de standtijd verlengd wordt tot minimaal 20.000 BV
AdOx	5	De eerste pilot was de proof-of-principle, langdurige pilot nodig voor stabiele operatie alvorens over te gaan tot demo-schaal. Onderzoek naar: - Het verwijderingspercentage bij langdurige adsorptie-regeneratie cycli. - Sterkte van de korrels bij langdurige gebruik. - Optimalisatie regeneratieproces. - Verdere ontwikkeling van (multi-type) zeolietkorrels/ - Verbeteren droging vóór regeneratie, - Efficiënter gebruik ozon door recirculatie, - Afstemmen standtijd zeolietkolom vs. EBCT.
Oxidatieve technieken en filtratie technieken		
ZF+UV/H ₂ O ₂	5-6	Op dit moment is het energieverbruik te hoog, in het vervolgonderzoek blijkt dat bij enkele optimalisaties het verwijderingsrendement en energieverbruik kan worden verbeterd. Om deze reden is aanvullend onderzoek nodig naar mogelijkheden ter verdere verlaging van het energieverbruik, zoals energiezuinige UV-lampen, effectievere voorbehandeling, optimale reactorconfiguratie, herkomst lage UV-transmissie.
O3+Ultrasound	5	Grote pilot heeft geen doorgang gevonden, wel gewenst om energieverbruik te meten en een duurttest uit te voeren bij wisselen debiet
NF+UV/H ₂ O ₂	5	NF en UV/H ₂ O ₂ zijn los al full-scale toegepast in drinkwaterbereiding, maar nog niet op rwzi effluent. Hoe omgaan met het concentraat?

6

BESCHOUWING, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 SAMENVATTING PRESTATIES EN TRL

De resultaten uit hoofdstuk 4 en 5 zijn samengevat in Tabel 6.1. Hier worden alle technieken inclusief de referenties op een rij gezet met daarbij het rendement van 7 van de 11 gidsstoffen over de hele rwzi, de CO₂-voetafdruk per m³ over de hele rwzi, de kosten per m³ over de hele rwzi als bandbreedte, bijvangst (verwijdering van nutriënten) en de TRL.

Let op: de bandbreedte in de tabel geeft een indicatie van de kosten per m³ over het totale influent van de standaard 100.000 i.e. rwzi. In de praktijk kunnen kosten hoger uitvallen door locatie- of project specifieke omstandigheden.

TABEL 6.1 SAMENVATTENDE TABEL MET RENDEMENT, CO₂-VOETAFDruk, INDICATIEVE KOSTEN, BIJVANGST EN TRL VOOR 100.000 I.E. RWZI, SITUATIE 2024

Techniek	Overall rendement 7/11 (%)	CO ₂ (g CO ₂ / m ³ _{rwzi-influent})	Kosten (EUR/m ³ _{rwzi-influent})	Bijvangst ³	TRL
Referentie PACAS	80-85	184	0,08 - 0,12		9
Referentie GAK	80-85	253	0,18 - 0,26		9
Referentie Ozon	80-85	77	0,08 - 0,12		9
PAK+doek	ca. 80	135	0,17 - 0,25	P-verwijdering mogelijk	7
PACAS Nereda	80-85 (84)	195	0,10 - 0,14		8
BODAC	ca. 80	81	0,14 - 0,22	NH ₄ verwijdering, P-verwijdering mogelijk	6-7
BioGAK	ca. 80	50	0,12 - 0,18	NH ₄ verwijdering, P-verwijdering mogelijk	6-7
O3-STEP (zonder N+P verwijdering)	ca. 80	125	0,17 - 0,25	NO ₃ en P-verwijdering mogelijk	8
UpflowGAK-CarboPlus	80-85	161	0,14 - 0,20	P-verwijdering mogelijk	8
UpflowGAK-Dynacarbon	80-85	187	0,20 - 0,30	P-verwijdering mogelijk	8
ZF+UV/H ₂ O ₂	75-80	574	0,68 - 1,02	NO ₃ en P-verwijdering mogelijk	5-6
O ₃ +ultrasound	85-90	74	0,08 - 0,12		5
PAK+O ₃	ca. 85	144	0,14 - 0,22		7-8
Microforce	> 80	69	0,17 - 0,25	NH ₄ verwijdering	6
Aurea (BO ₃)	ca. 85	66	0,13 - 0,19	NH ₄ verwijdering, P verwijdering mogelijk	6
DEX-filter	80-85	135	0,19 - 0,29	Mogelijk NH ₄ , NO ₃ en P-verwijdering ²	5
AdOx	ca. 75 ¹	71	0,12 - 0,18		5
NF+UV/H ₂ O ₂	85-90	183	0,36 - 0,54	Hoogwaardig hergebruik effluent mogelijk, P-verwijdering	5
O ₃ +keramischeMF	ca. 80	167	0,50 - 0,76	Hoogwaardig hergebruik effluent mogelijk	6

¹ Uitgangspunt is 70% geweest voor de 100.000 i.e. rwzi. Indien een groter aandeel van het totale debiet van de rwzi wordt behandeld, zal het totaal rendement ook hoger zijn. Er loopt nog onderzoek naar deze technologie.

² Nader onderzoek nodig naar mechanisme.

³ Bijvangst op nutriënten is soms als 'mogelijk' benoemd, hiermee wordt bedoeld: door het toevoegen van chemicaliën op de nageschakelde techniek. Het doseren van (aanvullende) metaalzouten op de waterlijn is hier nadrukkelijk buiten beschouwing gelaten, het betreft enkel het doseren van metaalzouten op de nageschakelde techniek om zo een verdergaande P-verwijdering te realiseren.

6.2 BESCHOUWING

In deze evaluatie is getracht om de afzonderlijke technieken op een zo eerlijk mogelijke manier naast elkaar te zetten waarbij recht wordt gedaan aan de onderlinge verschillen. Hiervoor is gebruik gemaakt van de resultaten van de pilot installaties en informatie uit recent gerealiseerde referentieprojecten. Om inzicht te geven in het effect van enkele belangrijke parameters zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd.

Dit gezegd hebbende is de keuze voor, en het ontwerp van, een installatie voor de verwijdering van microverontreinigingen altijd maatwerk. Zowel in de bijdrageregeling als in de nieuwe EU richtlijn stedelijk afvalwater is uitgegaan van een rendement van 80% in elk monster voor het verschil tussen totaal effluent en influent (70% in 1^e tranche van de bijdrageregeling). Voor de berekening van het verwijderingsrendement is binnen het IPMV uitgegaan van een jaargemiddeldgemiddeld rendement. Deze is op 80% gesteld voor deze evaluatie en gaat uit van een jaargemiddeld rendement van de rwzi zelf van 40%. In de praktijk zal het totale rendement over een rwzi afhangen van meerdere factoren, o.a.:

- Rendement in rwzi op dat moment (seizoensafhankelijk)
- Aandeel van het rioolwater dat behandeld wordt met een technologie
- RWA/DWA verhouding van het influent en definitie van DWA (bemonstering tijdens DWA)
- Ingaande concentraties aan microverontreinigingen, DOC en zwevende stof.
- In hoeverre de 7 van de 11 gidsstoffen die het best verwijderd worden in de rwzi overeenkomen met die van de nageschakelde techniek.

De getallen in deze studie gelden daarom slechts als een indicatie. Komende jaren zal er meer bekend worden over de verwijderingsrendementen van de (combinatie-)technieken, die tot nu toe gedurende korte tijd zijn getest full scale in Nederland of via pilotonderzoek in het IPMV. De uiteindelijk behaalde verwijderingsrendementen kunnen meevallen, maar ook tegenvallen.

De berekende kosten van de technieken zijn een momentopname en kunnen in de praktijk variëren door marktwerking, wijze van aanbesteding en locatiespecifieke omstandigheden.

In de praktijk is er voor elke rwzi een locatiespecifieke afweging nodig. Het realiseren van bijvoorbeeld een PACAS-installatie draagt niet bij aan de verwijdering van nutriënten, in geval dat een rwzi ook te maken krijgt met aangescherpte lozingseisen vanuit de KRW. Bovendien moet een aanvullende zuivering in te passen zijn in de hydraulische lijn van een zuivering, de beschikbare capaciteit van het elektriciteitsnet en bromideconcentraties in het influent. Verder moet de vraag gesteld worden of het op een specifieke rwzi realistisch is om een eenvoudige techniek toe te passen of dat een combinatietechniek noodzakelijk is om te voldoen aan het vereiste verwijderingsrendement op microverontreinigingen (IPMV en EU-richtlijn). Hiervoor is onder andere inzicht nodig in de concentraties microverontreinigingen in influent en effluent, de actuele prestaties van de rwzi en de DWA/RWA verhouding.

De richtlijn prioritair stoffen wordt het komende jaar geactualiseerd, waarbij de verwachting is dat er een of meerdere medicijnresten worden genormeerd. Dit betekent dat, naast de verplichting die straks vanuit de EU richtlijn stedelijk afvalwater met een rendement over meerdere gidsstoffen, ook individuele stoffen een eigen norm gaan krijgen. Of en welke mate een verwijderingstechnologie deze stof(fen) verwijdert, zal dan mee gaan wegen in de technologiekeuze en/of de ontwerputgangspunten ervan.

Naast het vereiste verwijderingsrendement zijn ook de afwegingen in duurzaamheid van belang. Directe nanofiltratie komt vanuit deze studie niet meteen in beeld als kosteneffectieve techniek met een lage CO₂-voetafdruk maar de techniek is wél in staat om effluent op te werken naar een hoogwaardige kwaliteit die lokaal toegepast kan worden als proceswater of een verdere opwerking naar drinkwater. Met de toenemende behoefte aan schoon water kan dit een belangrijke afweging zijn.

Een ander aspect wat vanuit duurzaamheid van belang is betreft de ontwikkeling van duurzaam PAK en GAK. De ontwikkeling van met name duurzame poederkolen leidt ertoe dat de CO₂ voetafdruk van deze grondstof aanzienlijk lager uit kan vallen. Beschikbaarheid, kosten en inzicht in de CO₂ voetafdruk van niet-fossiele PAK zijn daarvoor noodzakelijk.

Een belangrijk locatie specifiek aandachtspunt is de beschikbaarheid van een voldoende grote stroomaansluiting en/of voldoende netcapaciteit. Op het moment dat er weinig netcapaciteit beschikbaar is vallen technieken met een hoog stroomverbruik af. In het geval van ozon technieken kan het energieverbruik gereduceerd worden door ozon op te wekken uit pure zuurstof.

De Waterschappen zullen de komende jaren besluiten moeten nemen op basis van de in de nieuwe EU richtlijn verplicht gestelde verwijdering van microverontreinigingen op bepaalde rwzi's. En elk schap zal een (eigen) keuze gaan maken op basis van noodzakelijk rendement, kosten, CO₂, E-aansluiting, hulpstoffenverbruik, ruimtebeslag, TRL en overige eigen ambities van het waterschap. De in deze evaluatie genoemde ontwerputgangspunten, criteria, bijvangst en TRL niveaus, samen met de nog verder te ontwikkelen demonstratie en full scale praktijkervaringen zullen hier belangrijke input voor zijn.

6.3 CONCLUSIES

Binnen het IPMV zijn in korte tijd een groot aantal technieken ontwikkeld en dichterbij technologische volwassenheid gekomen (hogere TRL). De waterschappen hebben nu echt wat te kiezen.

Een aantal technieken behoeven nog nader onderzoek: Dit betreffen het DEX-filter, AdOx, NF+UV/H₂O₂, O₃+ultrasound en ZF+UV/H₂O₂. Voor deze technieken liggen er nog onderzoeksvragen of moeten er optimalisaties gedaan worden voordat deze toepasbaar zijn op een rwzi. Voor de membraantechnieken geldt dat ook.

Het jaarrendement van 80% op 7 van de 11 gidsstoffen over de gehele rwzi kan in theorie gehaald worden met alle geteste technieken. Al hangt dit altijd samen met de kenmerken van een specifieke rwzi. Het is daarom noodzakelijk om de lokale context mee te nemen in de keuze voor een technologie.

Afhankelijk van de gecombineerde werkingsprincipes kunnen deze leiden tot een hogere verwijdering van meer stoffen ten opzichte van de losstaande technologie, dit geldt echter niet voor alle combinaties. Combinatietechnieken kunnen meer flexibiliteit bieden in het voldoen aan de gestelde lozingsseisen en/of het verlagen van de CO₂ voetafdruk, doordat er aan meerdere knoppen gedraaid kan worden. Op het moment dat het verwijderingsrendement in de biologie laag is, kan, indien het ontwerp van de technologie ruim genoeg is, daardoor makkelijker voldaan worden aan het vereiste rendement. Hier hangt echter wel

een prijskaartje aan: de combinatietechnieken zijn qua stichtingskosten duurder dan een stand-alone techniek. Daarnaast hebben specifiek de combinatietechnieken Aurea (BO₃) en Microforce een lage CO₂-voetafdruk.

Aan de andere kant, bieden stand-alone technieken verschillende voordelen; zo heeft PACAS de laagste stichtingskosten en, samen met ozon, de laagste kosten per m³. Ozon en BODAC en bio-GAK scoren het beste op CO₂-voetafdruk en zijn hierin vergelijkbaar met de hierboven genoemde combinatie technieken Aurea(BO₃) en Microforce..

Voor ozon geldt dat het vereiste verwijderingsrendement op microverontreinigingen gehaald kan worden tegen relatief lage kosten en een relatief beperkte CO₂ voetafdruk. Gedurende het IPMV is veel ervaring opgedaan met de (on)mogelijkheden om bromaatvorming tegen te gaan. Naast de ingaande bromideconcentratie speelt de benodigde ozondosering en de wijze van doseren een belangrijke rol in het tegengaan van bromaatvorming. Een lage ozondosering in combinatie met een fijne bellen diffusors vermindert het risico op bromaatvorming sterk. Specifiek voor O3-STEP geldt dat in de ozon gevormd bromaat onder anoxische condities in het GAK filter gereduceerd wordt.

De ontwikkeling van BAKF (BODAC, bioGAK+lucht en Aurea (BO₃))om microverontreinigingen vergaand te verwijderen is een belangrijke ontwikkeling binnen het IPMV. BAKF biedt de mogelijkheid om een GAK filter toe te passen met een lage CO₂ voetafdruk en tegen lage operationele kosten, mits het GAK in de praktijk ook 15 jaar mee gaat. Dit dient in de praktijk te worden vastgesteld. Afhankelijk van de specifieke rwzi kan BAKF als stand-alone (BODAC, bioGAK+lucht) of als combinatietechniek met ozon (Aurea (BO₃)) worden toegepast waarbij het ozonverbruik sterk gereduceerd wordt.

Het Microforce concept, waarbij geen gebruik gemaakt wordt van granulair kool maar HDPE-dragermateriaal, is eveneens veelbelovend doordat een laag ozonverbruik in combinatie met biologische afbraak resulteert in lage kosten per m³ en een lage CO₂ voetafdruk.

De gevoeligheidsanalyse laat zien dat de invloed van duurzaamheidsmaatregelen, zoals groene stroom en duurzame PAK, voor een dusdanige verbetering van de CO₂ voetafdruk zorgt voor sommige technieken, dat de onderlinge rangschikking verandert.

Daarnaast zijn er een aantal technieken die naast medicijnen ook andere stoffen kunnen verwijderen zoals nutriënten. Met de grote KRW-opgave ligt hier een koppelkans en kan dit een motivatie zijn om voor een specifieke (combinatie)techniek te gaan als alternatief voor en/of aanvulling op het optimaliseren van de waterlijn voor nutriënten verwijdering.

Membraanfiltratie technieken in combinatie met een oxidatie stap lenen zich om hoogwaardig hergebruik van effluent te combineren met de verwijdering van microverontreinigingen. Op rwzi's waar hoogwaardig hergebruik van effluent de doelstelling is kunnen dus relatief eenvoudig ook microverontreinigingen verwijderd worden.

6.4 AANBEVELINGEN

Elke rwzi heeft zijn eigen kenmerken en de ontwikkelde tool en werkwijze conform STOWA 2020-06 is noodzakelijk om te komen tot een passend ontwerp. DWA-patronen en RWA/DWA-factoren zijn specifiek voor een rwzi: een DWA-patroon kan meer gecompliceerd zijn

doordat er bijvoorbeeld sprake is van een zeer lang aanvoerstelsel met persleidingen en/of instroom van rioolvreemd water. Deze kenmerken bepalen ook op welke manier RWA wordt aangevoerd: in stoten zoals bij een vrijvervalsysteem het geval is of meer geleidelijk zoals bij persleidingen. Het wordt dan ook aanbevolen om voor een specifieke rwzi na te gaan welke hydraulische ontwerpcapaciteit en te behandelen jaarhoeveelheid maatgevend is.

Iedere rwzi-locatie is uniek, het is daarom aan te bevelen de keuze voor een technologie te baseren op een multicriteria afweging. Door diverse criteria (zoals kosten, CO₂, welke E-aansluiting er mogelijk is, hulpstoffen, ruimtegebruik, verwijderingsrendement, flexibiliteit, verwijdering nutriënten/andere bijvangst, individuele norm vanuit de richtlijn prioritaire stoffen, etc) af te wegen, kan worden bepaald welke techniek op dat moment de best passende is voor de betreffende locatie, en ambities en overige opgaven van het waterschap.

Als aanbeveling naar de praktijk is het vooral van belang om te monitoren om het rendement van de biologie gedurende het jaar te meten. Alleen zo kan zekerheid gekregen worden over het verwijderingsrendement jaarrond. Gedurende de winter kan het rendement van de biologie immers sterk teruglopen. Afhankelijk van de TRL van de techniek wordt aanbevolen om specifieke testen en eventueel een pilot uit te voeren voorafgaand aan realisatie.

Het DEXfilter, AdOx, NF+UV/H₂O₂, O₃+keramischeMF en ZF+UV/H₂O₂ verdienen nader onderzoek. Voor deze technieken liggen er nog onderzoeksvragen of moeten er optimalisaties gedaan worden voordat deze toepasbaar zijn op een rwzi. Specifiek voor directe nanofiltratie geldt dat deze techniek veel perspectief biedt voor de hoogwaardige toepassing van rwzi effluent.

7

REFERENTIES

De gebruikte STOWA rapportages uit het IPMV staan niet apart vermeld in deze referentielijst, maar zijn te vinden in bijlage 1.

Doekhi-Bennani, Y., Mir Leilabady, N., Fu, M., Rietveld, L. C., van der Hoek, J. P., & Heijman, S. G. J. (2021). Simultaneous removal of ammonium ions and sulfamethoxazole by ozone regenerated high silica zeolites. *Water Research*, 188, Article 116472. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116472>,

Ecofide 2023. Handreiking voor het uitvoeren van biologische effectmonitoring bij vergaande zuivering van RWZI-effluenten CONCEPT eindversie 0.8, dd 8 juni 2023.

EU 2024. Press release: Urban wastewater: Council and Parliament reach a deal on new rules for more efficient treatment and monitoring. Link: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/01/29/urban-wastewater-council-and-parliament-reach-a-deal-on-new-rules-for-more-efficient-treatment-and-monitoring/>

I&W 2023. Regeling van de Minister van Infrastructuur en Waterstaat, van 21 november 2023 IENW/BSK-2023/341953, houdende vaststelling van tijdelijke regels ter stimulering van aanvullende zuiveringstechnieken bij rioolwaterzuiveringsinstallaties (Subsidieregeling stimulering verwijdering medicijnresten eerste tranche). Link: wetten.nl - Regeling - Subsidieregeling stimulering verwijdering medicijnresten eerste tranche - BWBR0048998 (overheid.nl)

Mulder, M., 2015, Typical pattern of dry weather flow during the day to a wwtp in the Netherlands, Mirabella Mulder Waste Water Management

Mulder, M., 2021, Evaluatie van gidsstoffen Ten behoeve van de bijdrageregeling 'Zuivering Medicijnresten' van het Ministerie van IenW en het InnovatieProgramma, versie 9 juli 2021 Microverontreinigingen uit RWZI-afvalwater van STOWA en het Ministerie van IenW

Mulder, M., 2022, Berekening CO₂ voetafdruk en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit rwzi-afvalwater; Ten behoeve van de bijdrageregeling 'Zuivering Medicijnresten' van het Ministerie van IenW, d.d. 21-12-2022

Mulder, M. 2023. Paragraaf EU gidsstoffen IPMV versie 4823.docx

STOWA 2012-06, GER-waarden en milieu-impactscores productie van hulpstoffen in de waterketen

STOWA 2015-27, Verwijdering van microverontreinigingen uit effluenten van rwzi's; een vertaling van kennis en ervaring uit Duitsland en Zwitserland.

STOWA 2018-02, PACAS – poederkooldosering in actiefslib voor verwijdering van microverontreinigingen; onderzoek naar effectiviteit en efficiëntie op de RWZI Papendrecht.

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

Excel tool: 'Voorbeeldversie webtool STOWA 2020-06 standaard rwzi' ingevuld voor de IPMV standaard rwzi van 100.000 ie'

BIJLAGE 1

IPMV STUDIES EN ONDERZOEK

	rapportage haalbaarheidstudie	rapportage pilotonderzoek*
POEDER ACTIEF KOOL (PAK)		
Poeder Actief Kool in combinatie met doekfiltratie (Vinkel)	2020-21	2022-45
PACAS Nereda (Simpelveld)	2020-20	2023-02
PACAS in combinatie met doseren ijzerverbindingen	2021-37	
Duurzame alternatieven PAK voor PACAS	2020-19	
Labtesten duurzame alternatieven actief kool	2021-24	
GRANULAIR ACTIEF KOOL (GAK)		
Biological Oxygen-Dosed Active Carbon, BODAC (Emmen)	2020-46	2023-50
Continu Bio-GAC + lucht (Emmen)	2022-11	2023-51
O3-STEP (Horstermeer)	2020-18	2023-43
Continu Upflow µGAC + lucht (Hapert)	2021-36	2023-52
ARVIA	2020-17	
OXIDATIEVE TECHNIEKEN		
Ozon en UV (Aarle Rixtel)		2022-41
Ultrasound Usoniq (Winterswijk)	2020-24	2023-30
PAC O3 (Leiden)	2020-23	2023-44
Microforce; O ₃ biofilm (Walcheren)	2022-14	2023-49
B03; biologische voorbehandeling met O ₃ (Horstermeer)	2022-41	2023-48
ALTERNATIEVE ADSORPTIEMIDDELEN		
Cyclodextrines, Dextorb, Dexfilter (Lelystad)	2021-38	2023-54
AdOx, zeoliet met filtratie (Leiden-Noord)	2022-10	2023-56
Zeolieten in wasmiddelen	2022-32	
Zandfilters	2022-56	
FILTRATIE		
Pharem Filtration System	2021-59	
Nanofiltratie (Asten)	2020-22	2023-53
Waterfabriek; voorbehandeling - nanofiltratie (Wilp)		2023-47
Waterfabriek; ozon met keramische microfiltratie (Wervershoof)	2020-25	2023-46
NATUURLIJKE SYSTEMEN		
Natuurlijke systemen	2022-42	
OVERIGE STUDIES		
Metten van poederkool in effluent.	2023-32	
Literature study on oxidation products.	2022-47	
Technische handreiking oxidatieproducten bij ozonisatie.	2022-48	
Vrijkomen van microverontreinigingen bij vergisting van zuiveringsslib met PAK.	2023-31	
Effecten poederkool in slib.	2023-34	
Robuuste bemonsteringsmethode voor rwzi's om verwijderingsrendementen van organische microverontreinigingen te bepalen.	2023-45	
Verwijdering van PFAS bij vergaande zuiveringstechnieken.	2024-29	
Verwijdering van antibioticaresistentie bij vergaande zuiveringstechnieken.	2024-30	

* De lichtgroen gearceerde pilotonderzoeken zijn in deze evaluatie meegenomen

BIJLAGE 2

STANDAARD RWZI VAN 100.000 I.E. À 150 G TZV

De standaard rwzi van 100.000 i.e. à 150 g TZV is gelijkgesteld aan de oorspronkelijk voor het IPMV uitgewerkte rwzi (Mulder 2022), waardoor de standaard rwzi in 2024 gelijk is aan die bij aanvang in 2018.

Influent en effluent

Voor de vergaande verwijdering van microverontreinigingen zijn met name afvalwaterhoeveelheden en de huidige effluentkwaliteit van belang. Deze kenmerken zijn weergegeven in onderstaande tabellen.

TABEL B2-1 INFLUENTAAANVOER EN SAMENSTELLING STANDAARD RWZI

Parameter	Eenheid	
capaciteit rwzi	i.e. 150g TZV	100.000
dagdebiet (Q24)	m3/d	21.000
Jaaraanvoer	m3/j	7.665.000
DWA-piek	m3/h	900
DWA-ontwerppiek	m3/h	1.040
Minimale hydraulische capaciteit nageschakelde behandeling	m3/h	1.040
Influentvrachten		
CZV	kg/d	11.000
BZV	kg/d	4.400
Ptot	kg/d	160
Nkj	kg/d	1.000
SS	kg/d	5.200

TABEL B2-2 EFFLUENTEISEN STANDAARD RWZI

Parameter*	Eenheid	Effluenteis
Ntot (jaargemiddeld)	mg N/l	≤10
Ptot (jaargemiddeld)	mg P/l	≤1
BZV (max*)	mg/l	≤20
CZV (max*)	mg/l	≤125
Onopgeloste bestanddelen (jaargemiddeld/ max*)	mg/l	≤10/ ≤30
NH4-N (jaargemiddeld/ max*)	mg N/l	≤1,5/ ≤3
DOC (min/gemiddeld/max)	mg/l	7 / 11 / 18

* maximale waarde in elk effluentmonster

DOC

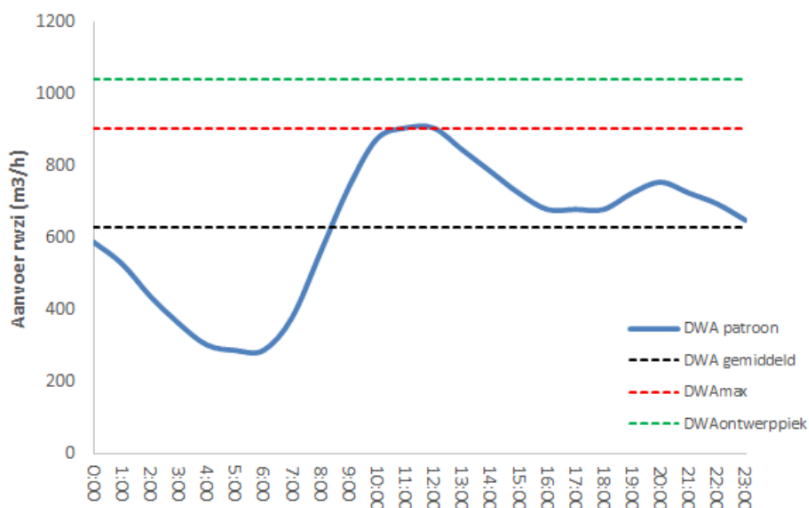
Een belangrijke parameter in de effluentkwaliteit is de opgeloste organische stof in het effluent, in het Engels DOC (Dissolved Organic Carbon). De DOC-waarde van rwzi-effluent wordt bepaald door het over een 0,45 µm filter te leiden. De fractie organische stof, die niet wordt tegengehouden door het filter wordt DOC genoemd. De DOC-gehalten in effluenten van zuiveringen in West-Europa variëren tussen 7 en 20 mg/l. DOC bestaat vooral uit biopolymeren (inclusief extracellulaire bacteriologische polymeren), eiwitten, suikers, humuszuren en andere organische opgeloste stoffen zoals microverontreinigingen. Hoe hoger de DOC-concentratie, hoe meer ozon of actiefkool gedoseerd moet worden om dezelfde verwijderingsgraad van microverontreinigingen te behalen. Op basis van gemeten DOC-waarden tot en met 2018 in effluenten van rwzi's is voor het IPMV gekozen voor een DOC-gehalte in het rwzi-effluent van 11 mg/l met een spreiding van 7 – 18 mg/l.

DWA patroon

Voor het IPMV wordt een standaard DWA-patroon gebruikt, welke is afgeleid uit STOWA 2015-27(zie Figuur B2-1). Dit DWA-patroon is afgeleid op basis van uurdebieten gemiddeld over een periode van 1-3 jaar onder DWA-omstandigheden. Dit betekent dat er op dit patroon in Figuur B2-1 een spreiding zit van circa 15%. Voor een nageschakelde installatie zou de capaciteit in ieder geval gelijk moeten zijn aan de DWA-ontwerppiek van 1.040 m³/h zoals weergegeven in Figuur B2-1.

Bij deze capaciteit kan de droogweeraanvoer te allen tijde worden behandeld. In de tijden dat het regent kan de installatie op volle capaciteit draaien en de (verdunde) aanvoer behandelen tot de DWA-ontwerppiek. Bij een RWA/DWA-verhouding van 3,5-6 komt deze aanname erop neer dat circa 70-80% van al het aangevoerde afvalwater over een jaar behandeld wordt.

FIGUUR B2-1 DWA-PATROON STANDAARD 100.000 I.E. RWZI IPMV.
E.E.A. AFGELEID VAN STOWA 2015-27

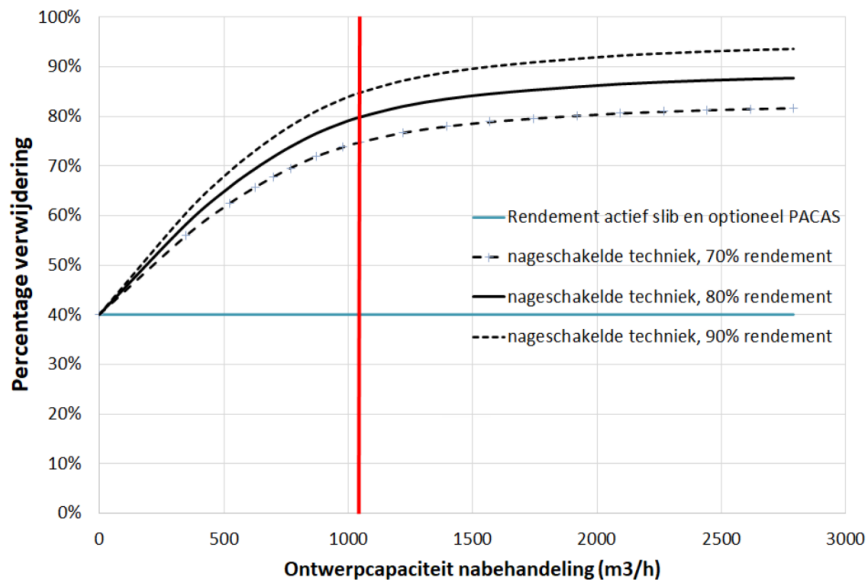


De DWA-ontwerppiek waarop de nageschakelde installatie ontworpen moet worden conform de richtlijnen van het IPMV bedraagt minimaal 1.040 m³/h (zie tabel B2-1). Met dit ontwerpdebiet kan een overall jaarrendement van 85% behaald worden bij een 90% nageschakeld rendement. Bij een (tegenvallend) nageschakeld rendement van 80%, kan een overall jaarrendement van 80% behaald worden. Deze waarden zijn berekend met de Excel-tool 'Voorbeeldversie webtool STOWA 2020-06 standaard rwzi' op basis van de IPMV rwzi.

(Mulder 2022). Let op: Hierbij is uitgegaan van een 40% actiefslibrendement voor de 7 van de 11 gidsstoffen.

FIGUUR B2-2

UITKOMSTEN VOORBEELDVERSIE WEBTOOL STOWA 2020-06 STANDAARD RWZI: DE RODE LIJN GEEFT DE KRUISPUNTEN WEER WAARBIJ EEN OVERALL JAARRENDEMENT KAN WORDEN BEHAALD VAN 80-85%: (80% BIJ 80% NAGESCHAKELD EN 85% BIJ 90% NAGESCHAKELD), OFTEWEL WELK ONTWERPDEBIET MOET WORDEN GEKOZEN (CA 1.040 M³/H)



Overige kentallen

TABEL B2-3

OVERIGE KENTALLEN STANDAARD RWZI

Parameter	Eenheid	
Inzet fossiele brandstoffen		
Inkoop aardgas	Nm ³ /j	3.710
Inkoop diesel	kg/j	16.000
Elektriciteitsverbruik beluchting	kWh/kg O ₂	3,0
Elektriciteitsverbruik slibontwatering	kWh/kg ds	0,06
Biogasproductie		
Verblijftijd gisting	dagen	20
Temperatuur gisting	°C	32
Afbraak drogestof mengsel primair en secundair slib	%	30
Specifieke gasproductie	Nm ³ /kg ds _{afgebroken}	1,1
Omzetting biogas in WKK		
Affakkelen/afblazen/verlies biogas	%	8
Elektrisch rendement WKK	%	35
Nuttig gebruik opgewekte warmte WKK	%	50

BIJLAGE 3

ONDERBOUWING CO₂ VOETAFDRUK

- De CO₂-voetafdruk van gebruikte materialen wordt gedeeld door de totale levensduur (15-30 jaar). Vele materialen hebben hierdoor een CO₂-impact van minder dan 0,1% op de totale jaarlijkse CO₂-voetafdruk van afvalwaterzuivering. Deze zijn daarom niet meegenomen. Een uitzondering hierop is gewapend beton: dit kan meer dan 1% van de CO₂-voetafdruk bepalen en is daarom meegenomen in de CO₂-voetafdrukberekening. Hiervoor is uitgegaan van de waarden conform STOWA 2015-27 voor nageschakelde behandeling.
- Voor de CO₂-emissiefactoren van chemicaliën en hulpstoffen is uitgegaan van het STOWA-rapport 2012-06. In dit rapport wordt de energetische impact van chemicaliën en hulpstoffen uitgedrukt in primaire energie. Aangezien de CO₂-voetafdruk voor chemicaliën en hulpstoffen voor meer dan 95-99% worden bepaald door fossiele energie⁴, is de CO₂-voetafdruk per eenheid berekend met de omrekeningsfactor uit Tabel 2.3.
- Gelijk aan de keuze in 2018 is uitgegaan van fossiele elektriciteit: Het inzetten van windmolens, zonnepanelen, aardwarmte, restwarmte etc. wordt niet verrekend in het model. Allereerst geldt dat duurzame energie pas met een lagere CO₂-emissie per eenheid kan worden ingezet, indien dit ook daadwerkelijk op de rwzi-locatie zelf wordt opgewekt en ingezet wordt. Papieren constructies van inkoop van groene projecten en CO₂-rechten vanuit het buitenland gelden niet. Dit betekent dat de energievraag voor behandeling van rioolwater daadwerkelijk lokaal moet worden opgewekt in Nederland. Voor de energievraag van behandeling van rioolwater is het nagenoeg nog niet haalbaar/onmogelijk om deze volledig lokaal op te wekken in Nederland. Aanvullende behandeling van verwijdering van microverontreinigingen vraagt om nog meer energie (circa 40% toename). Op basis van het feit, dat deze aanzienlijke stijging van de energievraag en het feit dat de huidige behandeling van rioolwater niet lokaal in Nederland kan worden opgewekt, is besloten om voor energiedragers als elektriciteit, aardgas, kolen, olie, benzine etc. uit te gaan van de CO₂-emissie uit fossiele bronnen.
- Bovenstaande betekent dat de energievraag van de aanvullende technologie niet mag worden verrekend met duurzame opwekking van energie. Dit geldt ook voor leveranciers van hulpstoffen en chemicaliën: verrekening van inzet van duurzame energie bij de productie hiervan is niet toegestaan.

4 De primaire energie is de bruto energie-inhoud van een stof, uitgedrukt in MJ/kg, volgens uit een impact-analyse methode. De impact-analyse methode berekent hoeveel primaire energie benodigd is voor een hoeveelheid finaal product. Hierbij wordt uitgegaan van de vorm van de oorspronkelijk gewonnen energiedrager (bijv. hout, steenkool, olie, aardgas en uranium). Het gaat om de totale primaire energie, die de productie van een stof vergt over de hele voorketen, waarbij alle energiestromen worden geteld, inclusief de chemische energie die is ingesloten in de ruwe materialen. Voor meer informatie zie STOWA 2012-16.

TABEL 7.1

GER-WAARDEN EN CO₂-EMISSIONFACTOREN HULPSTOFFEN

Parameter	Eenheid	Waarde
Actief kool	MJ/kg	164
Actief kool geregenereerd	MJ/kg	43,1
Actief kool biologische oorsprong (41% v. vers)	MJ/kg	67,2
Aluminiumchloride	MJ/kg	14,90
Aluminiumsulfaat	MJ/kg	9,40
IJzerchloride	MJ/kg	16,30
IJzerchlorosulfaat	MJ/kg	12,30
IJzersulfaat	MJ/kg	3,40
Magnesiumchloride, 54% oplossing	MJ/kg	2,10
Magnesiumchloride, anhydride	MJ/kg	23,60
Magnesiumchloride, hydraat, vaste vorm	MJ/kg	3,30
Magnesiumoxide	MJ/kg	2,80
Methanol	MJ/kg	37,6
Natriumaluminaat, oplossing 38% droge stof	MJ/kg	21,30
Natriumhypochloriet	MJ/kg	17,50
Polyaluminiumchloride	MJ/kg	19,45
Polyaluminiumsulfaat	MJ/kg	17,30
Overige metaalzouten	MJ/kg	15,70
Polyacrylamide homopolymeer, nonionisch, poeder, 99% zuiver	kg CO ₂ /kg	3,36
Polyacrylamide, anionisch, poeder 99% zuiver	kg CO ₂ /kg	3,06
Polyacrylamide, anionisch, vloeibaar, emulsie 50%	kg CO ₂ /kg	2,06
Polyacrylamide, kationisch, poeder 99% zuiver	kg CO ₂ /kg	3,56
Polyacrylamide, kationisch, vloeibaar, emulsie 50%	kg CO ₂ /kg	2,26
Waterstofperoxide (50% in H ₂ O)	MJ/kg	22,8
Zuurstof (vloeibaar)	MJ/kg	8,8

(bron: polymeren: Klimaatmonitor 2022, hulpstoffen: STOWA 2012-06)

BIJLAGE 4

CRITERIA REFERENTIETECHNIEKEN

UITGANGSJAAR 2018

TABEL 7.2 CRITERIA REFERENTIETECHNIEKEN (UITGANGSJAAR 2018)*

Onderwerp	Eenheid	PACAS	Ozon	Ozon + ZF	GAK****
CO ₂ -voetafdruk					
CO ₂ -voetafdruk verwijdering micro's	g CO ₂ /m ³ _{behandeld}	122	98	128	325
CO ₂ -voetafdruk verwijdering micro's	g CO ₂ /m ³ _{rwzi-influent*}	122	69	90	228
Kosten					
Jaarlijkse kosten	€/m ³ _{behandeld}	0,06	0,13	0,17	0,26
Jaarlijkse kosten	€/m ³ _{rwzi-influent*}	0,06	0,09	0,12	0,18
Verwijderingsrendement gidsstoffen Min I&W**					
Rendement technologie	%	70-75	80-90	80-90	80-90
Rendement inclusief rwzi ***	%	70-75	80-85	80-85	80-85

* Per m³ behandeld rioolwater oftewel de totale kosten of CO₂-emissie van de inzet van de aanvullende technologie gedeeld door het aantal behandelde m³. Voor PACAS geldt dat al het binnenkomende rioolwater wordt behandeld (technologie geïntegreerd in actief slib systeem). Voor nageschakelde technologie (Ozon, Ozon+zandfilter en GAK-filter) geldt dat te allen tijde minimaal de dagelijks droogweer piek, oftewel de DWA-ontwerppiek, moet worden behandeld en 70% (dan moet het rendement in de stroom die je behandelt ook hoog zijn) van het jaarvolume.

** Verwijderingsrendement voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen benzotriazool, carbamazepine, diclofenac, irbesartan, gabapentine, metropolol, hydrochloorthiazide, mengsel van 4- en 5-methylbenzotriazool, sotalol, trimethoprim en venlafaxine in elk 24h of 48h debiets- of tijdsproportioneel monster, waarbij rekening is gehouden met 24 uur verblijftijd van het water in de rioolwaterzuivering. Deze 11 gidsstoffen zijn gekozen om de effectiviteit van een zuiveringstechniek voor aanvullende verwijdering van microverontreinigingen uit rwzi-afvalwater te monitoren en hebben geen relatie met eventuele milieubezwaarlijkheid.

*** Hierbij is uitgegaan van een 40% actiefslibrendement voor de 7 van de 11 gidsstoffen.

**** Exclusief verwijdering nutriënten.

BIJLAGE 5

FACTSHEETS

Naam technologie: Poeder Actief Kool in combinatie met doekfiltratie	85
Naam technologie: PACAS Nereda	88
Naam technologie: Biological Oxygen-Dosed Active Carbon, BODAC	91
Naam technologie: Continu Bio-GAC + lucht	95
Naam technologie: O3-STEP	98
Naam technologie: Continu Upflow μ GAC	103
Naam technologie: UV licht met waterstofperoxide (UV + H_2O_2)	105
Naam technologie: Ozon en Ultrasound	108
Naam technologie: PAC O3	111
Naam technologie: Microforce	114
Naam technologie: Aurea (voorheen: BO_2)	117
Naam technologie: DEXfilter	120
Naam technologie: AdOx	124
Naam technologie: Directe nanofiltratie en UV/peroxide	128
Naam technologie: ozon met keramische microfiltratie	131

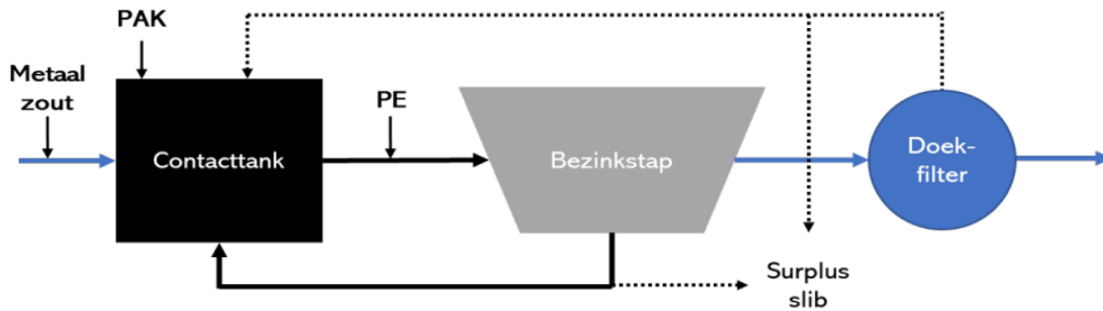
NAAM TECHNOLOGIE:POEDER ACTIEF KOOL IN COMBINATIE MET DOEFILTRATIE

Beschrijving technologie

PAK + Doekfiltratie is een technologie waarbij poederactiefkool (PAK) wordt gedoseerd aan het effluent van een rwzi en middels een bezink- en doekfiltratiestap wordt afgescheiden van het afvalwater. Gelijk aan andere adsorptietechnologieën worden microverontreinigingen uit het afvalwater verwijderd door adsorptie aan actiefkool. De dosering van coagulant zorgt voor een verregaande verwijdering van fosfor.

Beoogde voordelen t.o.v. de referentie zijn een verlaagde PAK dosering en verregaande P-verwijdering. Met name door het lagere verbruik van PAK in vergelijking met PACAS scoort de PAK + Doekfiltratie technologie beter op CO₂-footprint dan PACAS. Voor de technologie zijn PE- en metaalzoutdoseringen nodig.

Blokschema inpassing



Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	Waarde
RWZI locatie	-	Vinkel
Periode	m/jj - m/jj	04/2021-08/2021
Capaciteit pilotinstallatie	m ³ /h	tussen 1 en 5
Geteste variatie	bv dosering mg PAK/L of g O ₃ /g DOC	5, 10 en 15 mg PAK/L
Continu/batch testen	-	Continu
Wat specifieke info: bv type PAK		Norit SAE
		Super van Cabot
Uitgevoerde analyses		microverontreinigingen, stikstof en
		biologische effecten, P, Fe

Ontwerpuitgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	Waarde
poeder actief kool (PAK, nageschakeld)		
<i>PAK adsorptie stap</i>		
HRT-adsorptiefase	min	30
Opvoerhoogte	m	2
PAK-dosering	mg/L	10
Metaalzout-dosering	mg Fe ³⁺ /L	5
Metaalzout-dosering	mol Fe/mol P te verwijderen	5
PE-dosering	mg PEactief/L	0,4
Extra af te voeren slib	kg ds/behandelde m ³	0,025
<i>Bezinkstap</i>		
Bezinksnelheid PAK+metaalzout mengsel	m/uur	1,5-5
Oppervlaktebelasting lamellen (ruimtelijk)	m ³ /m ² /uur	2,5 or 4
<i>Spoelwater</i>		
Type spoelwater	-	ntb
spoelwaterdebiet	% van inkomend debiet	5

Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/behandelde m ³	0,063
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	2
Technologie	kWh/j	0,018
Energieverbruik opvoeren 8 m	kWh/j	0,035
Energieverbruik spoelwater	kWh/j	0,010
Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV		
Parameter	Eenheid	Waarde
Ontwerp technologie		
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	Pilot ontwerp 4 en 5 met PAK = 10 ipv 8 dosering
Ontwerpdebiet technologie	m ³ /h	1.040
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	5.365.500
% behandeld van jaardebiet effluent	%	70
poeder actief kool (PAK, nageschakeld)		
Opvoerhoogte	m	2
PAK-dosering-nominaal	kg/d	147
PAK-dosering-max	kg/d	221
Metaalzout-dosering	kg Fe ³⁺ /d	74
Ontwerp piek aanvoer	m ³ /uur	1.040
PAK-verbruik	ton/jaar	54
Ruimtebeslag absorptiefase	m ²	200
Ruimtebeslag bezinkfase	m ²	260-420
Doekoppervlak	m ²	130
Ruimtebeslag doekfilters	m ²	50
Volume bezinkfase	m ³	
Diepte bezinkfase	m	
Extra slibafvoer	ton ds/jaar	134
<i>Spoelwater</i>		
spoelwaterdebiet	m ³ /h	268.275
spoeltijdpercentage	%	5%
Personeel		
FTE	FTE/j	1
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/j	340.018
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	2
Technologie	kWh/j	98.571
Energieverbruik opvoeren 8 m	kWh/j	187.793
Energieverbruik spoelwater	kWh/j	53.655
Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV		
Parameter	Eenheid	actualisatie Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen		
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	92
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	ca 85
in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	ca 80
In deelstroom (EU-stoffen)	%	ca 85
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	75-80

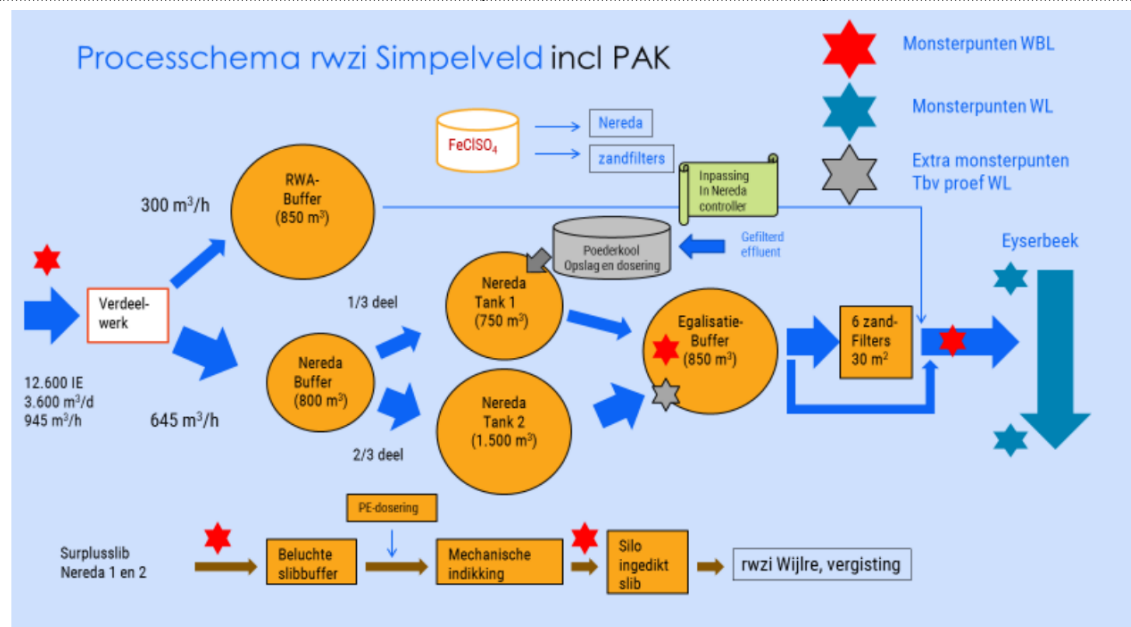
CO₂ footprint		
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m ³	193
CO ₂ footprint	gCO ₂ /totale rwzi m ³	135
Kosten (incl BTW)		
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m ³	0,24-0,36
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m ³	0,17-0,25
Eco-toxiciteit		
Eco-toxiciteit reductie	%	>50
Bijvangst		
		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Extra N-totaal verwijdering	%	neutraal
Extra P-totaal verwijdering	%	ja, afhankelijk van situatie
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-29
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	neutraal
Extra antibiotica resistente bacterien verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-30
Technology Readiness Level		
Parameter	Eenheid	Waarde
Technology Readiness Level		7
		De PAK + Doekfiltratie technologie wordt al op enkele rwzi's in Duitsland op praktijk-schaal succesvol toegepast voor de verwijdering van microverontreinigingen en verregaande verwijdering van fosfor
Kennisvragen voor opschaling		Hoe functioneert de technologie bij een verhoogde slibbelasting i.c.m. een verhoogde hydraulische belasting. Is er een alternatief voor de benodigde PE-dosering (voor goede slib/water scheiding)
Kennisvragen voor verbetering/opschaling		nvt
Kennisvragen over werking, kennisvragen voor nieuwe pilot		nvt

NAAM TECHNOLOGIE: PACAS NEREDA

Beschrijving technologie

Poederkooldosering verbetert de verwijdering van microverontreinigingen en is een relatief eenvoudige maatregel om medicijnresten in continu belaste actief slibstelsysteem te verwijderen. Bij PACAS Nereda wordt poederkool gedoseerd in een korrelslibreactor (Nereda) i.p.v. een conventioneel actief slibstelsysteem. De medicijnresten worden gebonden aan de poederkool en worden daarna samen met het spuislib uit de Nereda® afgevoerd via de reguliere slibroute (gisting, ontwatering, droging en verbranding).

Blokschema inpassing



Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	Waarde
RWZI locatie	-	Simpelveld
Periode	m/jj - m/jj	04/2021-06/2022
Voorbehandeling pilot		
Capaciteit pilotinstallatie	m³/h	215
Geteste variatie	bv dosering mg PAK/l of g O ₃ /g DOC	5, 10, 15 en 20 mg PAK/L-influent Eerst fossiele PAK getest en in de laatste maand een duurzame PAK (Acticarbone 2SW)
Continu/batch testen	-	Batch (Nereda)
Wat specifieke info: bv type PAK, O ₃ productie uit lucht/O ₂ , Bromide gehalten, DOC		Type PAK: Pulsorb WP235
Uitgevoerde analyses		medicijnresten, nutriënten, macroparameters, slibamenstelling, bio-assays, PFAS, Bromide en zware metalen

Ontwerputgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	Waarde
PACAS		
PAK-dosering-nominaal	mg/L	20
PAK-dosering-max	mg/L	20
Metaalzout-dosering	mg Fe ³⁺ /L	0
Metaalzout-dosering	mol Fe/mol P te verwijderen	0

droge stof gehalte ontwaterd slib zonder PAK (en evt. extra Fe)	%ds	6,4
droge stof gehalte ontwaterd slib met PAK (en evt. extra Fe)	%ds	nb
Extra af te voeren slib	kg ds/behandelde m ³	0,016
<i>i.c.m. Nereda</i>		
Cyclustijd	min	360
Doseertijd	min/cyclus	10
Doseerfase	-	Doseerfase circa 10 min in de 6 uur. Wordt iedere cyclus berekend (ook met RWA factor)
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie	kWh/behandelde m ³	0,030
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	0

Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

Parameter	Eenheid	Waarde
Ontwerp technologie		
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	n.v.t. *
Ontwerpdebiet technologie	m ³ /h	1.500
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	7.665.000
% behandeld van jaardebiet effluent	%	100
PACAS		
PAK-dosering-nominaal	kg/d	336
PAK-dosering-max	kg/d	416
Metaalzout-dosering	kg Fe ³⁺ /d	0
moment van toevoegen PAK in cyclus Nereda	-	Doseerfase circa 10 min in de 6 uur. Wordt iedere cyclus berekend (ook met RWA factor) ** ***
slibproductie	ton ds/j	123
Personeel		
FTE	FTE/j	0,5
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie	kWh/j	230.000
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	0

Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen		
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	nvt
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	nvt
in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	80-85 (pilot: 84)
In deelstroom (EU-stoffen)	%	nvt
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	75-85 (pilot: 85)
CO₂ footprint		
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m ³	195
CO ₂ footprint	gCO ₂ /totale rwzi m ³	195
Kosten (incl BTW)		
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m ³	0,10-0,15
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m ³	0,10-0,15
Eco-toxiciteit		
Eco-toxiciteit reductie	%	

Bijvangst		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Extra N-totaal verwijdering	%	neutraal
Extra ammonium verwijdering	%	neutraal
Extra P-totaal verwijdering	%	neutraal, evt extra metaalzout doseren
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-29
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	neutraal
Extra antibiotica resistente bacterien verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-30

Technology Readiness Level		
Parameter	Eenheid	Waarde
Technology Readiness Level		8
Kennisvragen voor opschaling		Aandachtspunten: - Kooleigenschappen en kwaliteitscontroles - Beschikbaarheid van duurzame kool - Onzekerheid over de te nemen noodzakelijke ATEX-maatregelen bij opslag en dosering op de RWZI - Nauwkeurige metingen van uitspoeling van poederkool in het effluent - bij gebruik van effluent : Beschikbaarheid over de hele dag en filtratie

* Een Nereda-installatie met een capaciteit van 100.000 IE en een gemiddeld dagdebiet van 20.800 m3/d bestaat in de basis uit 1 Nereda buffer en 2 Nereda reactoren van gelijke grootte. De Nereda reactoren worden om en om gevoed met influent en belucht. De dosering van poederkool vindt plaats aan het eind van de beluchtingsfase. Daarmee kan in principe volstaan worden met 1 poederkooldoseringsinstallatie

** Er wordt een nieuwe fase geïntroduceerd in het Nereda recept : Doseran Poederkool. Het doseren van poederkool wordt gedaan 30 minuten vóór het einde van de beluchtingsfase of als het ammoniumgehalte lager is dan 5 mg N/l. Per cyclus wordt de hoeveelheid poederkool die gedoseerd moet worden bepaald o.b.v. de gewenste doseerconcentratie (g/m3) en batchgrootte (m3).

***De cyclustijd van Nereda® wordt aangepast op basis van het aanvoerdebiet: hoe hoger de aanvoer hoe korter de cyclus. Bij een cyclustijd van 150 minuten en minder (bij RWA) wordt de PAK dosering met 15% verlaagd. Bij 2xDWA zal de dosering niet verder toenemen.

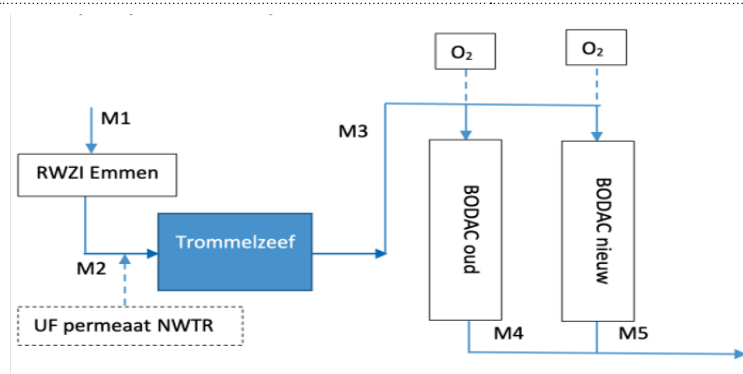
NAAM TECHNOLOGIE: BIOLOGICAL OXYGEN-DOSED ACTIVE CARBON, BODAC

Beschrijving technologie

De BODACinstallatie bestaat uit twee (actief kool) filtratiestappen in serie. Aan het influent van beide filtratiestappen wordt zuurstof gedoseerd om anaerobe omstandigheden in de BODAC-filters te voorkomen. De zuurstofdosing is nodig om te voldoen aan de zuurstofvraag tijdens de biologische filtratie. Bij biologische actief koolfiltratie ontwikkelt zich een biofilm op en in het actief kool, waardoor uiteindelijk de biodegradatie dominant wordt en, als gevolg van verzadiging van de actief kool, adsorptie nauwelijks meer een rol speelt.

Beoogd voordeel is een langere standtijd van het kool ten opzichte van de GAK-referentie

Blokschema inpassing



Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	Waarde
RWZI locatie	-	(Emmen)
Periode	m/jj - m/jj	05/2019-05/2020
Voorbehandeling pilot		trommelzeef 50 µm
Capaciteit pilotinstallatie	m³/h	5
Geteste variatie	bv dosering mg PAK/l of g O₂/g DOC	'oude' en verse actief kool
Continu/batch testen	-	Continu
Wat specifieke info: bv type PAK, O₃ productie uit lucht/O₂, Bromide gehalten, DOC		Norit 830P
Uitgevoerde analyses		Macroparameters, micro's, bacterien, bio-assays, non-target screening

Ontwerpuitgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	Waarde
Granulair actief kool (GAK)		
Zuurstofdosing	mg O₂/l	20
hydraulisch belasting	m/h	7
EBCT bij DWA ontwerp piek	min	15 -30
EBCT bij gemiddeld debiet	min	23
Verblijftijd flocculatiezone	s	n.v.t.
Benodigde bedvolume	m³	1,25
bedhoogte	m	2,5
filtratiesnelheid bij DWA ontwerp piek	m/h	5,4-10
filtratiesnelheid, gemiddeld debiet	m/h	7
type uitvoering (opwaarts/neerwaarts doorstroemd)	-	neerwaarts
GAK koolsoort	-	Norit 830P
GAK korrelgrootte (diameter)	mm	0,6-2,36
Standtijd kool	maanden	180
Standtijd kool	bedvolumina	201.206
Extra af te voeren slib	kg ds/behandelde m³	0,003

Voorfiltratie		
Type filter	-	UF of trommelzeef
Doorlaat	µm	50
<i>Spoelwater</i>		
Type spoelwater	-	Om en om met water en lucht
spoelwaterdebiet	% van inkomend debiet	1%=gemiddeld, 10%=ontwerp
frequentie voor alle filters totaal	aantal keer/uur	1x per 48 tot 72 uur
tijdsduur	min	8
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/behandelde m ³	0,14
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	22
Energieverbruik opvoerhoogte 22 m	kWh/behandelde m ³	0,10
Energieverbruik spoelwater 1%	kWh/behandelde m ³	0,002
Energieverbruik overig (o.a. trommelzeef)	kWh/behandelde m ³	0,04
Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV		
Parameter	Eenheid	Waarde
Ontwerp technologie		
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	n.v.t.
Ontwerpdebiet technologie	m ³ /h	1.040
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	5.365.500
% behandeld van jaardebiet effluent	%	70
Granulair actief kool (GAK)		
Zuurstofdosering	g O ₂ /h	20800
hydraulisch belasting	m/h	10
Benodigde bedvolume	m ³	400
bedhoogte	m	2,5
filteroppervlak	m ²	11
type uitvoering (opwaarts/neerwaarts doorstroomd)	-	neerwaarts
Aantal filters		14
Totaal filteroppervlak	m ²	160
GAK koolsoort	-	Norit 830P
GAK korrelgrootte (diameter)	mm	0,6-2,36
dosering kool	kg/d	n.v.t.
Extra slibafvoer	ton ds/jaar	16
Voorfiltratie		
Type filter	-	UF of trommelzeef
Doorlaat	µm	50
<i>Spoelwater</i>		
spoelwaterdebiet	m ³ /h	500
spoeltijdpercentage	%	0,40%
frequentie voor alle filters totaal	aantal keer/uur	1x per 6 uur
tijdsduur	min	20
Opslagtijd effluent tbv spoeling in buffertank	uur	0,5
Personeel		
FTE	FTE/j	0,5
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/j	751.000
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	22
Energieverbruik opvoerhoogte 22 m	kWh/j	516.429

Energieverbruik spoelwater 1%	kWh/j	10.731
Energieverbruik overig (o.a. trommelzeef)	kWh/j	223.840

Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen		
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	> 80
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	nb
in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	ca 80
In deelstroom (EU-stoffen)	%	75-85
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	70-80
CO₂ footprint		
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m ³	116
CO ₂ footprint	gCO ₂ /totale rwzi m ³	81
Kosten (incl BTW)		
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m ³	0,20-0,30
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m ³	0,14-0,21
Eco-toxiciteit		
Eco-toxiciteit reductie	%	50

Bijvangst		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Extra N-totaal verwijdering	%	neutraal
Extra ammonium verwijdering	%	99
Ammonium concentratie in instroom van technologie	mg N/l	2-12,5
Ammonium concentratie in uitstroom van technologie	mg N/l	0-0,36
Extra P-totaal verwijdering	%	neutraal, evt via ds afvang of extra metaalzout doseren
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-29
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	neutraal
Extra antibiotica resistente bacterien verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-30

Technology Readiness Level

Parameter	Eenheid	Waarde
Technology Readiness Level		6 tot 7
De drukfiltratie en zuurstofdoserings hebben een significant effect op de kosten van de toepassing van BODAC. Voor de toepassing als nabehandeling van RWZI Emmen is een zuurstofdoserings nodig, door hoge ammoniumconcentraties in het effluent. Bij andere zuiveringen waar lagere concentraties in het RWZI effluent aanwezig zijn kan de dosering van alleen lucht voldoende zijn. Vanuit dit project wordt geadviseerd hier verder naar te kijken en waar mogelijk de manier van zuurstof doseren verder te optimaliseren.		

Kennisvragen voor opschaling	Daarnaast wordt er in een vervolgstudie ervaring opgedaan met ijzerdosering in de aanvoer naar het filter zodat fosfaat gebonden en afgevangen wordt in het filter. Middels deze 'ad-on' is BODAC in staat om gelijktijdig te nitrificeren, te defosfateren en breekt het ook medicijnresten af.
Kennisvragen voor verbetering/opschaling	nvt
Kennisvragen over werking, kennisvragen voor nieuwe pilot	nvt

NAAM TECHNOLOGIE: CONTINU BIO-GAC + LUCHT

Beschrijving technologie

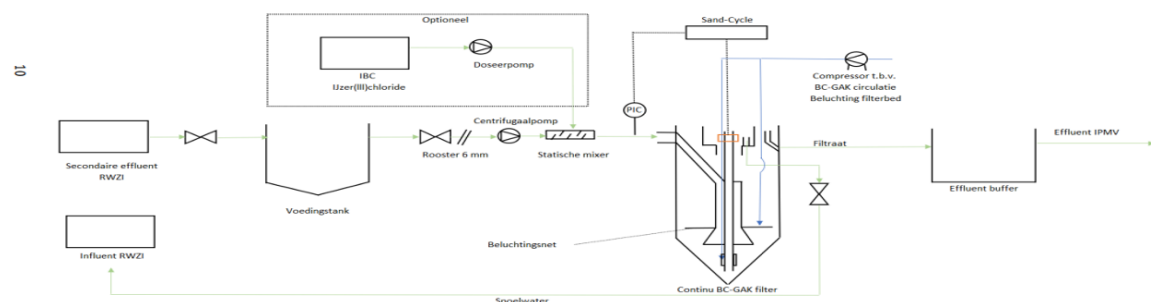
Continufiltratie blijkt in de praktijk geschikt als "bioreactor", waarbij biologische omzetting op en rond het filtermedium plaatsvindt. In de pilot is het concept van continufiltratie met een filtervulling van granulair actief kool onderzocht voor de verwijdering van microverontreinigingen. Door middel van het beluchten van het filter wordt biologische groei bevorderd, waardoor de standtijd van het kool wordt verlengd. Voordat het effluent wordt gevoed aan de reactor vindt voorbehandeling plaats door middel van een trommelzeef (van BODAC).

Beoogd voordeel is een langere standtijd van het kool ten opzichte van de GAK-referentie en de mogelijkheid om nageschakeld P te verwijderen. Dit vereist metaalzout dosering.

Ook beoogde voordelen tov referentie technologie al benoemen.

Tekst is vaak copy-paste uit paragraaf 1.2 uit STOWA rapport

Blokschema inpassing



Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	Waarde
RWZI locatie	-	Emmen
Periode	m/jj - m/jj	juni 2022 - september 2023 verlengd na afronding IPMV rapportage in overleg met de klankbordgroep (5 waterschappen)
Voorbehandeling pilot		In aanvang is gebruik gemaakt van een inline filter, later is gebruik gemaakt van een trommelzeef met maaswijdte van 50 µm maaswijdte, als voorbehandeling voor de pilot
Capaciteit pilotinstallatie	m ³ /h	3-4
Continu/batch testen	-	Continu
Wat specifieke info: bv type PAK, O ₃ productie uit lucht/O ₂ , Bromide gehalten, DOC		Norit 830
Uitgevoerde analyses		Macroparameters, micro's, bacterien, bio-assays, non-target screening

Ontwerputgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	Waarde
Granulair actief kool (GAK)		
Zuurstofdosering	mg O ₂ /l	30-50
hydraulisch belasting	m/h	5,7
EBCT bij DWA ontwerp piek	min	26
EBCT bij gemiddeld debiet	min	37
Verblijftijd flocculatiezone	s	0
Benodigde bedvolume	m ³	1,7
bedhoogte	m	3
filtratiesnelheid bij DWA ontwerp piek	m/h	7,4

filtratiesnelheid, gemiddeld debiet	m/h	4,9
type uitvoering (opwaarts/neerwaarts doorstroomd)	-	opwaarts
GAK koolsoort	-	Norit GAC 830 AF
GAK korrelgrootte (diameter)	mm	0,60-2,36
Standtijd kool	maanden	180
Standtijd kool	bedvolumina	216000
dichtheid actiefkoolkorrels	kg/m ³	400
Metaalzout-dosering	mol Fe/mol P te verwijderen	5 (alleen bij P verwijdering)
Methanol dosering	mg/l	0
Extra af te voeren slib	kg ds/behandelde m ³	0,003
Voorfiltratie		
Type filter	-	trommelzeef
Doorlaat	µm	50 micron
OB-concentratie in aanvoer	mg/l	nb
OB-concentratie in afvoer	mg/l	nb
<i>Spiegelwater</i>		
spiegelwaterdebiet	% van inkomend debiet	1%
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spiegelwater	kWh/behandelde m ³	0,073
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	10
Energieverbruik perslucht	kWh/behandelde m ³	0,029
Energieverbruik oppompen voedingswater	kWh/behandelde m ³	0,044
Energieverbruik spiegelwater	kWh/behandelde m ³	0,002

Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 i.e. a 150 g TZV

Parameter	Eenheid	Waarde
Ontwerp technologie		
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	n.v.t.
Ontwerpdebiet technologie	m ³ /h	1.040
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	6.130.000
% behandeld van jaardebiet effluent	%	80
Granulair actief kool (GAK)		
Zuurstofdosering	g O ₂ /h	28
hydraulisch belasting	m/h	7,4
Benodigde bedvolume	m ³	430
bedhoogte	m	3
filteroppervlak	m ²	140
type uitvoering (opwaarts/neerwaarts doorstroomd)	-	opwaarts
Aantal filters		3
Totaal filteroppervlak	m ²	165
GAK koolsoort	-	Norit 830
GAK korrelgrootte (diameter)	mm	0,60 - 2,36
dichtheid actiefkoolkorrels	kg/m ³	400
Metaalzout-dosering	kg Fe ³⁺ /d	0
Methanol dosering	kg/d	NVT
Extra slibafvoer	ton ds/jaar	18
Voorfiltratie		
Type filter	-	stepscreen of vergelijkbaar
Doorlaat	µm	2000
OB-concentratie in aanvoer	mg/h	10 - 20
OB-concentratie in afvoer	mg/h	5 - 15

<i>Spoelwater</i>		
spoelwaterdebiet	m³/h	50
spoeltijdpercentage	%	7,2
frequentie voor alle filters totaal	aantal keer/uur	continu
Personeel		
FTE	FTE/j	0,5
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/j	458.736
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	10
Energieverbruik perslucht	kWh/j	178.201
Energieverbruik oppompen voedingswater	kWh/j	268.275
Energieverbruik spoelwater	kWh/j	12.260
Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV		
		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen		
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	80-85
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	70-75
in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	ca 80
In deelstroom (EU-stoffen)	%	75-85
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	75-80
CO₂ footprint		
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m³	62
CO ₂ footprint	gCO ₂ /totale rwzi m³	50
Kosten (incl BTW)		
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m³	0,15-0,22
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m³	0,12-0,18
Eco-toxiciteit		
Eco-toxiciteit reductie	%	
Bijvangst		
		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Extra N-totaal verwijdering	%	neutraal
Extra ammonium verwijdering	%	40-90
Extra P-totaal verwijdering	%	neutraal, evt metaalzout doseren
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-29
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	neutraal
Extra antibiotica resistente bacterien verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-30
Technology Readiness Level		
Parameter	Eenheid	Waarde
Technology Readiness Level		6 tot 7
Kennisvragen voor opschaling		In proefonderzoek wordt de verdere ontwikkeling van micro-verwijdering onderzocht samen met het verlengen van de standtijd van het koolfilter.
Kennisvragen voor verbetering/opschaling		nvt
Kennisvragen over werking, kennisvragen voor nieuwe pilot		nvt

NAAM TECHNOLOGIE: O3-STEP

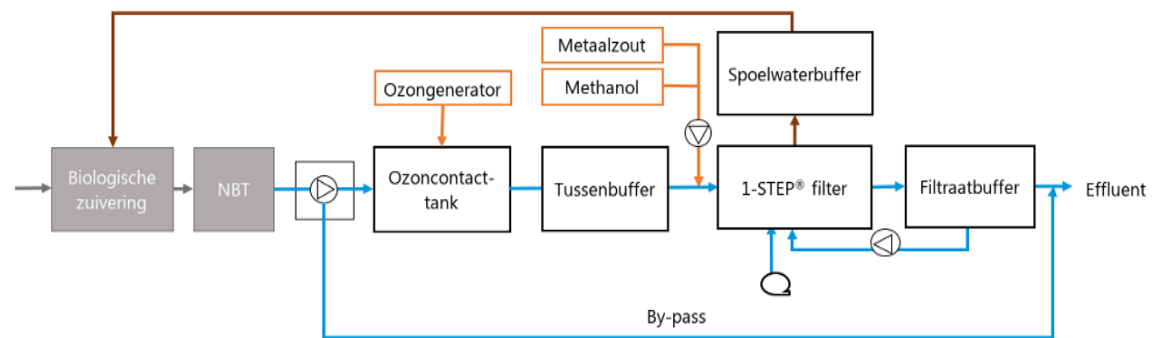
Beschrijving technologie

Het O3-STEP filter is een doorontwikkeling van de bestaande 1-STEP® filter technologie, waar nazuivering via vastbedfiltratie met granulair actiefkool als filter- en adsorptiemedium plaatsvindt. In het 1-STEP filter vinden verschillende processen plaats: adsorptie aan het GAK, biologische afbraak, denitrificatie, fosfaatverwijdering door coagulatie en flocculatie, en filtratie. Bij het O3-STEP filter is voorafgaand aan het 1-STEP filter een ozonisatiestap toegevoegd om organische (micro-) verontreinigingen, o.a. medicijnresten, gedeeltelijk te oxideren.

De beoogde voordelen t.o.v. de referentie zijn een hoger en breder verwijderingsrendement van micro's, verhoging van de standtijd van het actiefkool, het beperken van bromaatvorming en een vergelijkbare (als niet iets beter) CO2-footprint en kostenindicatie. De techniek vereist methanol- en metaalzoutdosering

Ook beoogde voordelen tov referentie technologie al benoemen. Tekst is vaak copy-paste uit paragraaf 1.2 uit STOWA rapport.

Blokschema inpassing



De inpassing zonder nutriënten (N en P) verwijdering is zonder metaalzout- en methanoldosering

Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	Waarde
RWZI locatie	-	Horstermeer
Periode	m/jj - m/jj	07/2021-10/2022
Voorbehandeling pilot		nvt
Capaciteit pilotinstallatie	m³/h	5 tot 3
Geteste variatie	bv dosering mg PAK/l of g O ₃ /g DOC	0,2-1 g O ₃ /g DOC
Continu/batch testen	-	continue
Wat specifieke info: bv type PAK, O ₃ productie uit lucht/O ₂ , Bromide gehalten, DOC		O ₃ productie uit lucht met PSA (pressure swing adsorption), GAK 612 WFD
Uitgevoerde analyses		Macroparameters, micro's, Bromide, Broomaat, bacterien, bio-assays, non-target screening, metalen

Ontwerputgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	Waarde	Waarde - ook N&P
Oxidatie met ozon en/of H₂O₂			
O ₃ dosering nominaal	gO ₃ /g DOC	0,2 / 0,4	0,2 / 0,4
O ₃ dosering nominaal (bij 11 mg DOC/l)	gO ₃ /m³	60-140	60-140
Contacttijd O ₃ reactor	min	10 - ...	10 - ...
Diepte O ₃ reactor	m	5	5
O ₃ inbreng		diffusers	diffusers
H ₂ O ₂	ppm	0	0

Granulair actief kool (GAK)			
Zuurstofdosing	mg O ₂ /l	0	0
hydraulisch belasting	m/h	10 tot 15	10 tot 15
EBCT bij DWA ontwerppiek	min	10	10
EBCT bij gemiddeld debiet	min	17	17
Verblijftijd flocculatiezone	s	432	432
Benodigde bedvolume	m ³	295	295
bedhoogte	m	2,2	2,2
filtratiesnelheid bij DWA ontwerppiek	m/h	14	14
filtratiesnelheid, gemiddeld debiet	m/h	8	8
type uitvoering (opwaarts/neerwaarts doorstroomd)	-	neerwaarts	neerwaarts
GAK koolsoort	-	GAK 612 WFD	GAK 612 WFD
GAK korrelgrootte (diameter)	mm	1,7-3,35	1,7-3,35
Standtijd kool	maanden	23	23
Standtijd kool	bedvolumina	>35000	>35000
dichtheid actiefkoolkorrels	kg/m ³	350-550	350-550
Metaalzout-dosing	mol Fe/mol P te verwijderen	nvt	1-4
Methanol dosering	mg/l	nvt	4 g methanol/g NOx-N +1,2 g methanol/g O ₂
Extra af te voeren slib	kg ds/behandelde m ³	0	0,012
Energieverbruik			
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/behandelde m ³	0,12	0,13
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	4 - 6	4 - 6
Energieverbruik specifiek onderdeel - ozon	kWh/behandelde m ³	0,048	0,048
Energieverbruik specifiek onderdeel - 1-STEP	kWh/behandelde m ³	0,030	0,030
Energieverbruik opvoeren 8 m	kWh/behandelde m ³	0,035	0,035
Energieverbruik spoelwater	kWh/behandelde m ³	0,002	0,020
Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV			
Parameter	Eenheid	Waarde	Waarde - ook N&P
Ontwerp technologie			
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	03-STEP zonder nutriënten	03-STEP met nutriënten
Ontwerpdébet technologie	m ³ /h	1040	1040
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	5365500	5365500
% behandeld van jaardebiet effluent	%	70	70
Oxidatie met ozon en/of H₂O₂			
O ₃ dosering per gram DOC	gO ₃ /g DOC	0,4	0,4
O ₃ dosering nominaal (bij 11 mg DOC/l)	gO ₃ /h	2695	2695
O ₃ dosering maximaal	gO ₃ /h	4576	4576
Volume O ₃ reactor	m ³	173	173
Diepte O ₃ reactor	m	5	5
Antal O ₃ reactoren		2	2
O ₃ productie uit		zuurstof	zuurstof
O ₂ verbruik voor O ₃ productie	ton/jaar	236	236
H ₂ O ₂ doseren	kg H ₂ O ₂ /m ³	nee	nee
Granulair actief kool (GAK)			
Zuurstofdosing	g O ₂ /h	nvt	nvt
hydraulisch belasting	m/h	10 tot 15	10 tot 15
Benodigde bedvolume	m ³	295	295
bedhoogte	m	2,2	2,2
filteroppervlak	m ²	134	134
type uitvoering (opwaarts/neerwaarts doorstroomd)	-	neerwaarts	neerwaarts

Aantal filters		4	4
GAK koolsoort	-	GAK 612 WFD	GAK 612 WFD
GAK korrelgrootte (diameter)	mm	1,7-3,35	1,7-3,35
dichtheid actiefkoolkorrels	kg/m ³	350-550	350-550
Metaalzout-dosering	kg Fe ³⁺ /d	0	140-200
Methanol dosering (99,8%)	kg/d	0	225
Extra slibafvoer	ton ds/jaar	0	64
<i>Spoelwater</i>			
spoelwaterdebiet	m ³ /h	6	60
spoeltijdpercentage	%	1	10
frequentie voor alle filters totaal	aantal keer/uur	0,019	0,188
tijdsduur	min	0	15
Personeel			
FTE	FTE/j	1	1
Energieverbruik			
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/j	617.524	714.103
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	5	5
Energieverbruik specifiek onderdeel - ozon	kWh/j	258.000	258.000
Energieverbruik specifiek onderdeel - 1-STEP	kWh/j	161.000	161.000
Energieverbruik opvoeren 8 m	kWh/j	187.793	187.793
Energieverbruik spoelwater	kWh/j	10.731	107.310

Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

		actualisatie zonder N&P	actualisatie met N&P
Parameter	Eenheid	Waarde 2024	Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen			
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	Tot 95%	Tot 95%
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	80	80
in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	80	80
In deelstroom (EU-stoffen)	%	>80	>80
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	80	80
CO ₂ footprint			
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m ³	179	306
CO ₂ footprint	gCO ₂ /totale rwzi m ³	125	214
Kosten (incl BTW)			
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m ³	0,24-0,37	niet geactualiseerd in 2024
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m ³	0,17-0,26	niet geactualiseerd in 2024
Eco-toxiciteit			
Eco-toxiciteit reductie	%	>50	>50

Bijvangst		actualisatie zonder N&P	actualisatie met N&P
Parameter	Eenheid	Waarde 2024	Waarde 2024
Extra N-totaal verwijdering	%	nihil	>70%
Extra ammonium verwijdering	%	nihil	10 - 20%
Extra P-totaal verwijdering	%	neutraal, evt via ds afvang of extra metaalzout doseren	50-80%
P-totaal concentratie in instroom van technologie	mg P/l		
Bromide concentratie in instroom van technologie	mg bromide/l	300-700	300-700
Bromaat concentratie in uitstroom van technologie	mg bromaat/l	onder detectielimiet	onder detectielimiet
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-29	zie STOWA 2024-29
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	niet gemeten	niet gemeten

Extra antibiotica resistente bacterien verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-30	zie STOWA 2024-30
Technology Readiness Level			
Parameter	Eenheid	Waarde	
Technology Readiness Level		8	
		Er is al een demo-installatie in bedrijf	
Kennisvragen voor opschaling		Uitgebreide monitoring en optimalisatie in de full-scale toepassing kunnen leiden tot een verdere verlenging van de standtijd met als resultaat lagere operationele kosten en een kleinere CO2-footprint, meer inzicht in bromaatvorming/verwijdering in de O3-step en vergaande nutriëntenverwijdering	
Kennisvragen voor verbetering/opschaling			
Kennisvragen over werking, kennisvragen voor nieuwe pilot			

NAAM TECHNOLOGIE: CONTINU UPFLOW μ GAC

Beschrijving technologie

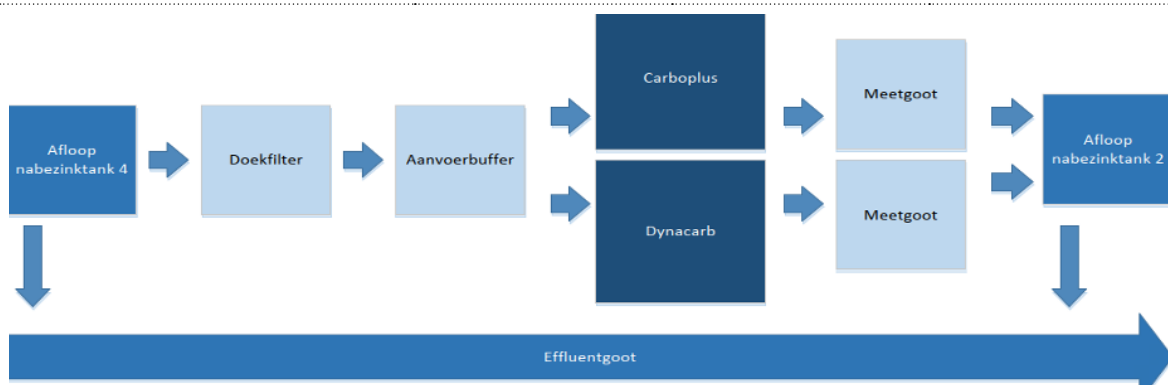
In tegenstelling tot het conventionele GAK-filter wordt het Upflow-GAK-filter van onder naar boven doorstroomd. Door de opwaartse stroming is het actief kool in beweging met als resultaat beter contact tussen actief kool en het water en geen kortsluitstromingen. Hierdoor worden goede verwijderingsrendementen gehaald met een lagere CO₂-voetafdruk, zeker als gebruik gemaakt wordt van gereactiveerde kool. Er worden twee GAK upflow filters behandeld, namelijk CarboPlus en Dynacarbon. De CarboPlus is een gefluïdiseerd bed actief kool filter, waar meerdere malen per week, afhankelijk van de behandelde hoeveelheid (afval)water, vers actief kool wordt toegevoegd en beladen kool wordt onttrokken. Hierdoor kan het filter continu worden bedreven. De Dynacarbon is een moving bed reactor, waar eenmalig actief kool in wordt gebracht dat met een mammoetpomp continu wordt gewassen. Beide pilots werden bedreven met reeds gereactiveerde kool.

Het beoogde voordeel ten opzichte van de referentie GAK is een lager GAK verbruik.

Ook beoogde voordelen tov referentie technologie al benoemen.

Tekst is vaak copy-paste uit paragraaf 1.2 uit STOWA rapport

Blokschema inpassing



Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	CarboPlus	DynaCarbon
RWZI locatie	-	(Hapert)	(Hapert)
Periode	m/jj - m/jj	02/2021-11/2021	02/2021-11/2022
Voorbehandeling pilot		Sobye doekfilter	Sobye doekfilter
Capaciteit pilotinstallatie	m ³ /h	0,25	5
Geteste variatie	bv dosering mg PAK/L of g O ₃ /g DOC	15, 18, 20, 30 mg GAK/l	5,9 - 7,7 m/u
Continu/batch testen	-	Continu	Continu
Wat specifieke info: bv type PAK, O ₃ productie uit lucht/O ₂ , Bromide gehalten, DOC		Cyclecarb 305, Chemviron	"Cyclecarb 401, Chemviron"
Uitgevoerde analyses		gidsstoffen, macroparameters, PFAS en ecotoxiciteit	gidsstoffen, macroparameters, PFAS en ecotoxiciteit

Ontwerputgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	CarboPlus	DynaCarbon
Granulair actief kool (GAK)			
Zuurstofdosering	mg O ₂ /l	nvt	nvt
hydraulisch belasting	m/h	5,3	5,9 - 7,7
EBCT bij DWA ontwerp piek	min	7 min	18 min
EBCT bij gemiddeld debiet	min	10 min	28
Benodigde bedvolume	m ³	0,028	1,6
bedhoogte	m	1,05	3
filtratiesnelheid bij DWA ontwerp piek	m/h	15	7
filtratiesnelheid, gemiddeld debiet	m/h		
type uitvoering (opwaarts/neerwaarts doorstroomd)	-	opwaarts	opwaarts
GAK koolsoort	-	Cyclecarb 305, Chemviron	Cyclecarb 401, Chemviron

GAK korrelgrootte (diameter)	mm	0,5 mm	2mm
Standtijd kool	maanden	nvt	11
Standtijd kool	bedvolumina	nvt	15000 - 25000
verhouding geregenereerd en niet-fossiel kool	%geregenereerd op totaal	80	80
dosering kool	g/m ³	20	nvt
dichtheid actiefkoolkorrels	kg/m ³	450	450
Extra af te voeren slib	kg ds/behandelde m ³	0	0
Voorfiltratie			
Type filter	-	Sobye doekfilter	Sobye doekfilter
Doorlaat	µm	500µm	500µm
<i>Spoelwater</i>			
Type spoelwater	-	bv. effluent	bv. effluent
spoelwaterdebiet	% van inkomend debiet	0,2	5
Energieverbruik			
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/behandelde m ³	0,048	0,108
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	4	6,8
Energieverbruik nabehandeling	kWh/behandelde m ³	0,003	0,020
Energieverbruik opvoeren, CarboPlus: 8m en DynaCarbon: 17,8m	kWh/behandelde m ³	0,035	0,078
Energieverbruik recirculatiepompen	kWh/behandelde m ³	0,009	0,000
Energieverbruik spoelwater, Carboplus: 0,2% en DynaCarbon: 5%	kWh/behandelde m ³	0,000	0,010
Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV			
Parameter	Eenheid	CarboPlus	DynaCarbon
Ontwerp technologie			
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	n.v.t.	n.v.t.
Ontwerpdebiet technologie	m ³ /h	1040	1040
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	6132000	6132000
% behandeld van jaardebiet effluent	%	80	80
Granulair actief kool (GAK)			
Zuurstofdosering	g O ₂ /h	nvt	nvt
hydraulisch belasting	m/h	13	6,3
Benodigde bedvolume	m ³	122	495
bedhoogte	m	3	3
filteroppervlak	m ²	81	165
type uitvoering (opwaarts/neerwaarts doorstroomd)	-	opwaarts	opwaarts
Aantal filters		4	3
GAK korrelgrootte (diameter)	mm		
dosering kool	kg/d	504	504
dichtheid actiefkoolkorrels	kg/m ³	450	450
Extra slibafvoer	ton ds/jaar	0	0
<i>Spoelwater</i>			
spoelwaterdebiet	m ³ /h	1	35
Personeel			
FTE	FTE/j	0,5	0,5
Energieverbruik			
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/j	295.317	663.879
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	4	6,8
Energieverbruik nabehandeling	kWh/j	21.189	125.029

Energieverbruik opvoeren, CarboPlus: 8m en DynaCarbon: 17,8m	kWh/j	214.620	477.530
Energieverbruik recirculatiepompen	kWh/j	57.055	0
Energieverbruik spoelwater, Carboplus: 0,2% en DynaCarbon: 5%	kWh/j	2.453	61.320

Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

		Carboplus actualisatie	DynaCarbon actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024	Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen			
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	80 - 90	80 - 90
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	77	
in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	80 - 85	80 - 85
In deelstroom (EU-stoffen)	%	70 - 90	70 - 90
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	75 - 85	75 - 85
CO ₂ footprint			
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m ³	201	234
CO ₂ footprint	gCO ₂ /totale rwzi m ³	161	187
Kosten (incl BTW)			
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m ³	0,17-0,26	0,25-0,37
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m ³	0,14-0,21	0,20-0,29
Eco-toxiciteit			
Eco-toxiciteit reductie	%		

Bijvangst		actualisatie	actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024	Waarde 2024
Extra N-totaal verwijdering	%	neutraal	neutraal
Extra ammonium verwijdering	%	neutraal	neutraal
Extra P-totaal verwijdering	%	neutraal	neutraal
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-29	zie STOWA 2024-29
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	neutraal	neutraal
Extra antibiotica resistente bacterien verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-30	zie STOWA 2024-30

Technology Readiness Level

Parameter	Eenheid	Waarde	Waarde
Technology Readiness Level		8	8
		Nog een aantal onduidelijkheden wat in een verder onderzoek moet worden uitgezocht,	Nog een aantal onduidelijkheden wat in een verder onderzoek moet worden uitgezocht,
Kennisvragen voor opschaling		Voor de Carboplus installatie verder onderzoek naar spoelwatergebruik, functioneren automatische kooldosering en impact andere rwzi locatie.	Voor de dynacarbon de benodigde voorbehandeling verder onderzoeken, de verblijftijd (en standtijd kool).
Kennisvragen voor verbetering/opschaling			
Kennisvragen over werking, kennisvragen voor nieuwe pilot			

NAAM TECHNOLOGIE: UV LICHT MET WATERSTOFFEROXIDE (UV + H₂O₂)

Beschrijving technologie

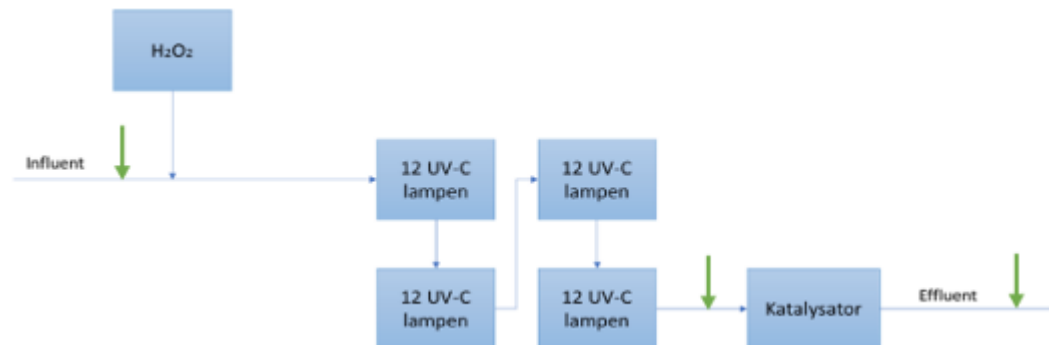
Bij de oxidatieve techniek UV in combinatie met waterstofperoxide (H₂O₂) wordt eerst H₂O₂ (in overmaat) gedoseerd waarna dit wordt bestraald door UV (254 nm). Om het resterende H₂O₂ af te breken, wordt het water door een katalysatorbed gevoerd, waarin H₂O₂ katalytisch wordt omgezet in H₂O en O₂. Na het katalysatorbed wordt het water stroomafwaarts geloosd op de effluentgoot van de rwzi. Door de bestraling van H₂O₂ worden hydroxylradicalen geproduceerd. Bij deze techniek treden drie reacties op, namelijk (1) fotolyse, (2) oxidatie met hydroxylradicalen en (3) oxidatie met H₂O₂. Bepaalde medicijnen zullen vooral afgebroken worden door fotolyse, terwijl andere nauwelijks gevoelig zijn voor fotolyse en vooral door oxidatie worden omgezet.

Beoogde voordelen t.o.v. de referentietechnologie zijn een verhoogd verwijderingsrendement en een verbeterde SIMONI score (ecotoxiciteit).

Ook beoogde voordelen tov referentie technologie al benoemen.

Tekst is vaak copy-paste uit paragraaf 1.2 uit STOWA rapport

Blokschema inpassing



Schema betreft pilotinstallatie

Bij full scale toepassing is filter vooraf nodig om UV transmissie te verbeteren, bv ZF+PAICI

Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	Waarde
RWZI locatie	-	RWZI Aarle Rixtel
Periode	m/jj - m/jj	09/2018 t/m 06/2019
Voorbehandeling pilot		
Capaciteit pilotinstallatie	m ³ /h	15 (2 reactoren met ieder 12 lampen)
Geteste variatie		UV-dosis is afhankelijk van de UV-transmissie. Getest met 30 ppm H ₂ O ₂ en resulterende UV dosis 17.000 J/m ² (bij UV-transmissie 40%) tot 11.000 J/m ² (bij UV-transmissie 60%)
Continu/batch testen	-	Continu
Wat specifieke info: bv type PAK, O ₃ productie uit lucht/O ₂ , Bromide gehalten, DOC		UV transmissie van het effluent rwzi AR is relatief laag (40%) waardoor hoge UV-dosis nodig is of de transmissie verbeteren met voorfilter (ZF in deze pilot of het andere IPMV project: NF + UV/H ₂ O ₂)
Uitgevoerde analyses		Macroparameters, Aquon pakket geneesmiddelen, gewasbeschermingsmiddelen, industriële producten, personal care products, bromide, bromaat, waterstofperoxide, Glymes, E.coli, Enterococcen, etc.

Ontwerputgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	Waarde
UV technieken met H₂O₂ inclusief voorbehandeling ter verhoging UV transmissie tot UVT = 60%		
Aantal UV-lampen	behandelde m ³ per UV lamp	9.581
HRT UV reactor/buis	min	enkele
Vermogen UV-lamp	W/lamp	550
UV dosis	J/m ²	15000

Transmissie	%	60
H ₂ O ₂ dosering	ppm	30
Zandfiltratie als voorbehandeling ter verhoging UV-transmissie		
Spoelwater (expert judgement)	% van inkomend debiet	1
Slibproductie (exclusief ZF en PAI ₂ dosering)	kg ds/behandelde m ³	0
Type filter	-	ZF + PolyAluminumChloride
Dosering PAI ₂ (range)	ppm	6-12
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/behandelde m ³	0,95
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	4-8
Energieverbruik UV-lampen	kWh/behandelde m ³	0,90
Energieverbruik opvoerhoogte 8 m	kWh/behandelde m ³	0,035
Energieverbruik ZF	kWh/behandelde m ³	0,015
Spoelwater 1% op ZF	kWh/behandelde m ³	0,002
Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV		
Parameter	Eenheid	Waarde
Ontwerp technologie		
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	voorbehandeling met ZF om transmissie te verbeteren van 40% naar 60%
Ontwerpdebiet technologie	m ³ /h	1040
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	6132000
% behandeld van jaardebiet effluent	%	80
UV technieken met H₂O₂ inclusief voorbehandeling ter verhoging UV transmissie tot UVT = 60%		
Aantal UV reactoren	aantal	20
Aantal UV-lampen (48 lampen/reactor, inschatting bij UVT=60%)	aantal	960
Totaal vermogen UV-lampen	kW	528
UV dosis	J/m ²	15000
Transmissie	%	60
H ₂ O ₂ dosering (100% H ₂ O ₂)	kg/j	183960
Citroenzuurspoeling t.b.v. reinigen UV-lampen	g/m ³	1,24
ZF		
Slibproductie (exclusief ZF en PAI ₂ dosering)	ton ds/d	0
Voorfiltratie		
Type filter	-	ZF + PolyAluminumChloride
Dosering AlCl ₃ bij 12 ppm als Al	kg AlCl ₃ /j	363.832
Personeel		
FTE	FTE/j	1
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/j	5.837.664
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	8
Energieverbruik UV-lampen	kWh/j	5.518.800
Energieverbruik opvoerhoogte 8 m	kWh/j	214.620
Energieverbruik ZF	kWh/j	91.980
Spoelwater 1% op ZF	kWh/j	12.264
Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV		
		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen		
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	>90
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	ca. 90

in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	78
In deelstroom (EU-stoffen)	%	80-85
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	ca 75
CO₂ footprint*		
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m ³	717
CO ₂ footprint	gCO ₂ /totale rwzi m ³	574
Kosten (incl BTW) *		
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m ³	0,85-1,27
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m ³	0,68-1,02
Eco-toxiciteit		
Eco-toxiciteit reductie	%	50-75

Bijvangst		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde
Extra N-totaal verwijdering	%	neutraal
Extra ammonium verwijdering	%	neutraal
Extra P-totaal verwijdering	%	neutraal
Bromide concentratie in instroom van technologie	mg bromide/l	0,5-1
Bromaat concentratie in uitstroom van technologie	µg bromaat/l	<0,2
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-29
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	2-2,5
Extra antibiotica resistente bacterien verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-30

Technology Readiness Level		
Parameter	Eenheid	Waarde
Technology Readiness Level		5 tot 6
		Op dit moment is het energieverbruik te hoog, aanvullend onderzoek is nodig naar mogelijkheden om het energieverbruik te verlagen
Kennisvragen voor verbetering/opschaling en over werking, kennisvragen voor nieuwe pilot		Ontwikkeling van energiezuinige UV-lampen, herkomst lage UV-transmissie in effluent. Onderzoek naar mogelijkheden ter verdere verlaging van het energieverbruik, zoals effectievere voorbehandeling, optimale reactorconfiguratie...etc
* Investeringskosten zijn op basis van de installatie die nodig is bij 40% transmissie, dus met 50% meer UV-lampen dan in deze factsheet is aangegeven en zonder zandfilter. In de jaarlijkse kosten en de CO ₂ voetafdruk is geen rekening gehouden met het extra slib vanuit de AlCl dosering op het zandfilter		

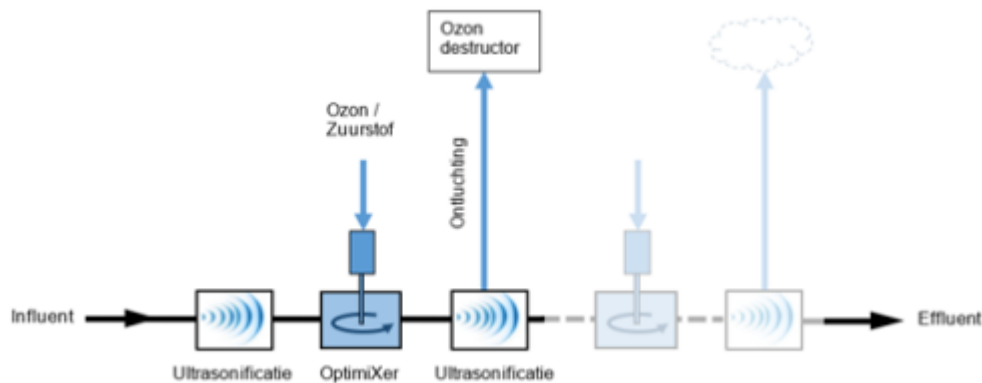
NAAM TECHNOLOGIE: OZON EN ULTRASOUND

Beschrijving technologie

Bij O₃+Ultrasound (USONiQ) wordt een combinatie van ozon en ultrasound toegepast. Ultrasoon versterkt het ozonisatieproces op verschillende manieren: het losbreken van bacteriële clusters; het verbreken van chemische verbindingen in het celmembraan; het verbeteren van de vorming van vrije radicalen uit ozon; het verbeteren van de overdracht van ozon van de gas- naar de vloeibare fase. Het systeem bestaat uit een roestvrijstalen, buisvormige reactor. In deze leiding vindt achtereenvolgens de toediening van ultrasound, ozon en ultrasound plaats. In het deel dat als reactieruimte dient voor de behandeling met ultrasound zijn ultrasoundgeneratoren verdeeld over de leiding. Daarna vindt ozontoevoer plaats dicht bij een gepatenteerde mengschijf die voor optimale menging van de ingebrachte ozon zorgt. Vervolgens wordt er opnieuw ultrasound toegediend.

Voordelen t.o.v. referenties: de footprint van een USONiQ installatie is beduidend kleiner is dan die van een reguliere ozon installatie; bij USONiQ volstaan lagere verblijftijden en O₃-doseringen om hetzelfde verwijderingsrendement te behalen als met reguliere ozon behandelingsinstallaties

Blokschema inpassing



Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	Waarde
RWZI locatie	-	winterswijk
Periode	m/jj - m/jj	13 en 14 april 2022
Voorbehandeling pilot		n.v.t.
Capaciteit pilotinstallatie	m ³ /h	1
Geteste variatie	g O ₃ /g DOC	0,16; 0,35; 0,55; 0,58 en 0,72
Continu/batch testen	-	batch
Wat specifieke info: bv type PAK, O ₃ productie uit lucht/O ₂ , Bromide gehalten, DOC		Bromide spike van 1.000 µg/l
Uitgevoerde analyses		DOC, microverontreinigingen, bromide, bromaat

Ontwerputgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	Waarde
Oxidatie met ozon en/of H₂O₂		
O ₃ dosering nominaal	gO ₃ /g DOC	0,55
O ₃ dosering nominaal (bij 11 mg DOC/l)	gO ₃ /m ³	6,05
Contacttijd O ₃ reactor	min	enkele minuten
Diepte O ₃ reactor	m	nvt
O ₃ inbreng		USONiQ system
H ₂ O ₂	ppm	0
Slib gevormd	kg ds/behandelde m ³	0
Spoelwater	% van inkomend debiet	0
Ultrasound		
Ultrasound kWh verbruik	verhouding ultrasound : O ₃ generatie	1 : 3-3,5
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/behandelde m ³	0,13

Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	0-2
Energieverbruik specifiek onderdeel	kWh verbruik ultrasound : O ₃ generatie	1 : 3-3,5
Energieverbruik O ₃ +Ultrasound	kWh/behandelde m ³	0,097
Energieverbruik opvoeren 8 m	kWh/behandelde m ³	0,035

Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

Parameter	Eenheid	Waarde
Ontwerp technologie		
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	n.v.t.
Ontwerpdebiet technologie	m ³ /h	1040
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	5365500
% behandeld van jaardebiet effluent	%	70
Oxidatie met ozon en/of H₂O₂		
O ₃ dosering per gram DOC	gO ₃ /g DOC	0,55
O ₃ dosering nominaal (bij 11 mg DOC/l)	kg O ₃ /h	4,4
O ₃ dosering maximaal	kg O ₃ /h	6,3
Volume O ₃ reactor	m ³	nb
Diepte O ₃ reactor	m	buisvormige reactor
O ₂ verbruik voor O ₃ productie	ton/jaar	325
H ₂ O ₂ doseren	kg H ₂ O ₂ /m ³	0
Ultrasound		
Ultrasound kWh verbruik	kWh/d	355
Personeel		
FTE	FTE/j	1
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/j	705.793
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	0-2
Energieverbruik O ₃ +Ultrasound	kWh/j	518.000
Energieverbruik opvoeren 8 m	kWh/j	187.793

Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

Parameter	Eenheid	actualisatie Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen		
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	92
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	86
in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	85-90
In deelstroom (EU-stoffen)	%	85-90
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	80-85
CO₂ footprint		
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m ³	106
CO ₂ footprint	gCO ₂ /totale rwzi m ³	74
Kosten (incl BTW)		
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m ³	0,10-0,015
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m ³	0,07-0,11
Eco-toxiciteit		
Eco-toxiciteit reductie	%	niet gemeten

Bijvangst

Parameter	Eenheid	actualisatie Waarde 2024
Extra N-totaal verwijdering	%	niet gemeten
Extra ammonium verwijdering	%	niet gemeten

Extra P-totaal verwijdering	%	neutraal
Bromide concentratie in instroom van technologie	mg bromide/l	1 (gespiked)
Bromaat concentratie in uitstroom van technologie	mg bromaat/l	0,004
Bromaatvorming t.o.v. bromide in instroom	%	0,4 (bij hoge spike)
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	niet gemeten
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	niet gemeten
Extra antibiotica resistente bacterien verwijdering in technologie	%	niet gemeten

Technology Readiness Level

Parameter	Eenheid	Waarde
Technology Readiness Level		5
Kennisvragen over werking, kennisvragen voor nieuwe pilot		energieverbruik, duurtest bij wisselen debiet

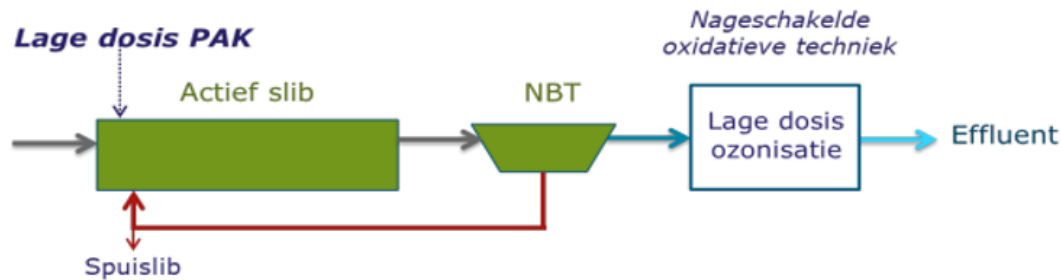
NAAM TECHNOLOGIE: PAC 03

Beschrijving technologie

PAC-03 is een technologie waarbij poederactiefkool (PAK) in het actiefslibproces gedoseerd wordt én het effluent met ozon wordt behandeld. Een PACAS met lagere dosering en een nageschakelde ozonisatie met een lage specifieke ozon dosis. 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.

Beoogde voordelen zijn een lagere PAK dosering dan PACAS, lagere bromaatvorming en een breder palet aan verwijderde stoffen.

Blokschema inpassing



Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	Waarde
RWZI locatie	-	Leiden-Noord
Periode	m/jj - m/jj	July 2024 - October 2024
Voorbehandeling pilot		n.v.t.
Capaciteit pilotinstallatie	m ³ /h	5 (ozon)
Geteste variatie	bv dosering mg PAK/l of g O ₃ /g DOC	PAK-doseringen van 5, 7,5, 10 en 12,5 mg/L en specifieke ozondoseringen tussen 0,2 en 0,7 g O ₃ /g DOC zijn getest.
Continu/batch testen	-	batch
Wat specifieke info: bv type PAK, O ₃ productie uit lucht/O ₂ , Bromide gehalten, DOC	type PAK	Pulssorb WP235
Uitgevoerde analyses		microverontreinigingen, ecotoxiciteit, bromaat, N&P, pfas, antibiotica resistentie

Ontwerputgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	Waarde
Oxidatie met ozon en/of H₂O₂		
O ₃ dosering nominaal	gO ₃ /g DOC	0,3 - 0,7
O ₃ dosering nominaal (bij 11 mg DOC/l)	gO ₃ /m ³	
Contacttijd O ₃ reactor	min	15
Diepte O ₃ reactor	m	2 - 6,5
O ₃ inbreng		alle systemen mogelijk
H ₂ O ₂	ppm	0
PACAS		
PAK-dosering-nominaal	mg/L	7,5
PAK-dosering-max	mg/L	12,5
Extra af te voeren slib	kg ds/behandelde m ³	0,006
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/behandelde m ³	0,145
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	1 - 6
Energieverbruik PAK tov 5.365.500 m ³ /jr	kWh/behandelde m ³	0,025
Energieverbruik Ozon	kWh/behandelde m ³	0,085
Energieverbruik opvoeren 8 m	kWh/behandelde m ³	0,035

Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV		
Parameter	Eenheid	Waarde
Ontwerp technologie		
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	n.v.t.
Ontwerpdebiet technologie	m ³ /h	1040
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	7665000 (PAK) 5365500 (ozon)
% behandeld van jaardebiet effluent	%	100 (PAK) en 70 (ozon)
Oxidatie met ozon en/of H₂O₂		
O ₃ dosering per gram DOC	gO ₃ /g DOC	0,5
O ₃ dosering nominaal (bij 11 mg DOC/l)	kg O ₃ /h	3,4
O ₃ dosering maximaal	kgO ₃ /h	5,7
Volume O ₃ reactor	m ³	260
Diepte O ₃ reactor	m	6
O ₃ productie uit		zuurstof
O ₂ verbruik voor O ₃ productie	ton/jaar	295
H ₂ O ₂ doseren	kg H ₂ O ₂ /m ³	0
PACAS		
PAK-dosering-nominaal	kg/d	126
PAK-dosering-max		De PAK-dosering verloopt debietsproportioneel tot maximaal 2x DWA = 80% van jaardebiet
slibproductie	ton ds/j	46
Personeel		
FTE	FTE/j	1
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/j	780.517
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	6
Energieverbruik PAK	kWh/j	136.656
Energieverbruik Ozon	kWh/j	456.068
Energieverbruik opvoeren 8 m	kWh/j	187.793
Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV		
Parameter	Eenheid	actualisatie Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen		
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	90-95
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	85-90
in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	85
In deelstroom (EU-stoffen)	%	85-90
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	80
CO₂ footprint		
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m ³	206
CO ₂ footprint	gCO ₂ /totale rwzi m ³	144
Kosten (incl BTW)		
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m ³	0,20-0,31
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m ³	0,14-0,21
Eco-toxiciteit		
Eco-toxiciteit reductie	%	65-68
Bijvangst		
Parameter	Eenheid	actualisatie Waarde 2024
Extra N-totaal verwijdering	%	neutraal
Extra ammonium verwijdering	%	neutraal

Extra P-totaal verwijdering	%	neutraal
Bromide concentratie in instroom van technologie	mg bromide/l	0,32
Bromaat concentratie in uitstroom van technologie	mg bromaat/l	0,004
Bromaatvorming t.o.v. bromide in instroom	%	1,1%
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-29
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	niet gemeten
Extra antibiotica resistente bacterien verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-30
Technology Readiness Level		
Parameter	Eenheid	Waarde
Technology Readiness Level		7-8
		Afzonderlijke technieken zijn al full scale bewezen
Kennisvragen voor opschaling		Optimale combi van PAK- en ozon- tering voor EU doel (80%), minimalisatie bromaatvorming, kosten en duurzaamheid.
Kennisvragen voor verbetering/opschaling		nvt
Kennisvragen over werking, kennisvragen voor nieuwe pilot		nvt

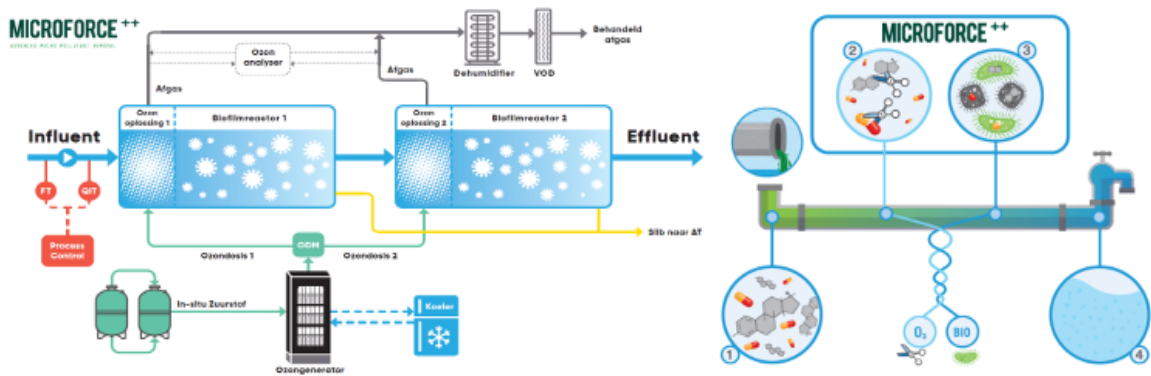
NAAM TECHNOLOGIE: MICROFORCE

Beschrijving technologie

MicroForce++ staat voor ozonisatie en biologische oxidatie. Het MicroForce++ proces bestaat uit twee opeenvolgende, in serie geschakelde O₃/Bio reactoren waarbij in elke O₃/Bio reactor een specifieke ozon dosis wordt gehanteerd. In iedere reactor wordt het effluent eerst behandeld met ozon in het ozoncompartiment, gevolgd door een biologische reactor met een biofilm-op-drager technologie waar verdere afbraak plaatsvindt.

Het beoogde voordeel van deze techniek is dat door de introductie van een biologische stap de ozonvraag verlaagd wordt ten opzichte van de stand der techniek.

Blokschema inpassing



Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	Waarde
RWZI locatie	-	Walcheren
Periode	m/jj - m/jj	42 weken
Voorbehandeling pilot		Geen voorbehandeling noodzakelijk
Capaciteit pilotinstallatie	m ³ /h	4 tot 16
Geteste variatie		O ₃ tussen 0,15 en 0,5 g O ₃ /g DOC en HRT tussen 3,75 en 15 min per reactor
Continu/batch testen	-	continu
Wat specifieke info: bv type PAK, O ₃ productie uit lucht/O ₂ , Bromide gehalten, DOC		Getest met O ₂ uit lucht, maar compatibel met LOX
Uitgevoerde analyses		

Ontwerputgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	Waarde
Oxidatie met ozon en/of H₂O₂		
O ₃ dosering nominaal	gO ₃ /g DOC	tussen de 0,25 en 0,43
O ₃ dosering nominaal (bij 11 mg DOC/l)	gO ₃ /m ³	
Contacttijd O ₃ reactor	min	15
Diepte O ₃ reactor	m	2
O ₃ inbreng		pureblue systeem
H ₂ O ₂	ppm	0
Biologische reactor i.c.m. O₃		
Type dragermateriaal	-	Ringetjes van HDPE, diameter 17 mm, dikte 5 mm, specifiek oppervlak 1150 m ² /m ³
standtijd dragermateriaal	maand	
dichtheid dragermateriaal	kg/m ³	
Contacttijd biologische reactor	min	tussen de 7,5 en 15
Hoogte biologische reactor	m	2
EBCT minimaal	min	3,75
EBCT nominaal	min	15

Zuurstof setpoint oploop	mg/L	
Slib gevormd	kg ds/behandelde m ³	0,003
Spoelwater	% van inkomend debiet	1
Metaalzout-dosering	mg Fe ³⁺ /L	0
Metaalzout-dosering	mol Fe/mol P te verwijderen	0
C-bron dosering (type vermelden)	mg/l	0
Voorfiltratie		
Type filter	-	nvt
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/behandelde m ³	0,105
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	2,5
Energieverbruik pompen en divers	kWh/behandelde m ³	0,007
Energieverbruik ozon	kWh/behandelde m ³	0,061
* Energieverbruik inbrengenergie ozon	kWh/behandelde m ³	0,014
* Energieverbruik O ₂ naar O ₃	kWh/behandelde m ³	0,047
Energieverbruik pompen 8 m	kWh/behandelde m ³	0,035
Energieverbruik spoelwater 1%	kWh/behandelde m ³	0,002
Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV		
Parameter	Eenheid	Waarde
Ontwerp technologie		
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	n.v.t.
Ontwerpdebiet technologie	m ³ /h	1047
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	6130000
% behandeld van jaardebiet effluent	%	80
Oxidatie met ozon en/of H₂O₂		
O ₃ dosering per gram DOC	gO ₃ /g DOC	0,43
O ₃ dosering nominaal (bij 11 mg DOC/l)	kgO ₃ /h	3,3
O ₃ dosering maximaal	gO ₃ /h	5,0
Volume O ₃ reactor	m ³	262
Diepte O ₃ reactor	m	2
O ₃ productie uit		zuurstof
O ₂ verbruik voor O ₃ productie	ton/jaar	290
H ₂ O ₂ doseren	kg H ₂ O ₂ /m ³	0
Biologische reactor i.c.m. O₃		
Hoogte biologische reactor	m	2
Type dragermateriaal		Ringetjes van HDPE, diameter 17 mm, dikte 5 mm, specifiek oppervlak 1150 m ² /m ³
Volume dragermateriaal	m ³	70
Contacttijd	min	15
Metaalzout-dosering	kg Fe ³⁺ /d	0
Extra slibafvoer	ton ds/jaar	18
Voorfiltratie		
Type filter	-	nvt
Personeel		
FTE	FTE/j	1
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/j	643.650
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	3
Energieverbruik pompen en divers	kWh/j	42.910
Energieverbruik ozon	kWh/j	373.930
* Energieverbruik inbrengenergie ozon	kWh/j	85.820

* Energieverbruik O ₂ naar O ₃	kWh/j	288.110
Energieverbruik pompen 8 m	kWh/j	214.550
Energieverbruik spoelwater 1%	kWh/j	12.260

Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen		
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	ca. 85
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	ca. 75
in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	ca. 80
In deelstroom (EU-stoffen)	%	ca. 80
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	75-80
CO₂ footprint		
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m ³	86
CO ₂ footprint	gCO ₂ /totale rwzi m ³	69
Kosten (incl BTW)		
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m ³	0,21-0,32
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m ³	0,17-0,26
Eco-toxiciteit		
Eco-toxiciteit reductie	%	67

Bijvangst		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Extra N-totaal verwijdering	%	NH ₄ en mogelijk NO ₂
Extra ammonium verwijdering	%	80
Extra P-totaal verwijdering	%	neutraal
Bromide concentratie in instroom van technologie	mg bromide/l	1,5-2
Bromaat concentratie in uitstroom van technologie	mg bromaat/l	0,000
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-29
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	niet gemeten
Extra antibiotica resistente bacteriën verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-30

Technology Readiness Level

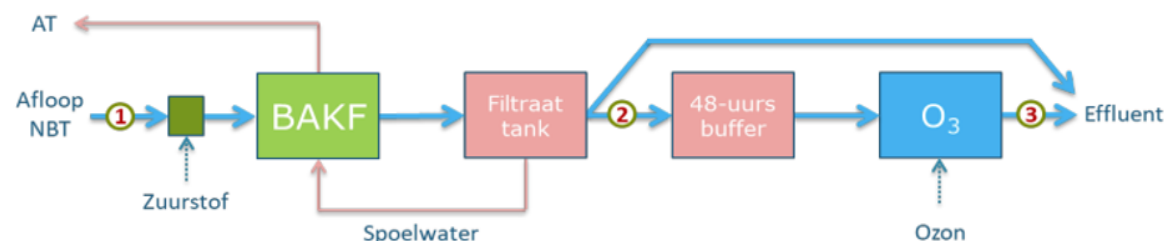
Parameter	Eenheid	Waarde
Technology Readiness Level		6
Kennisvragen voor opschaling		Standtijd dragermateriaal, verwijdering stikstof
Kennisvragen voor verbetering/opschaling		
Kennisvragen over werking, kennisvragen voor nieuwe pilot		

NAAM TECHNOLOGIE: AUREA (VOORHEEN: BO₃)

Beschrijving technologie

De BO₃ technologie is een 2-stapsproces bestaande uit respectievelijk biologische actiefkool filtratie (BAKF) en ozon behandeling voor verregaande verwijdering van microverontreinigingen en reductie van ecotoxiciteit. In de eerste stap, de BAKF, worden in een aeroob milieu organische componenten biologisch (gedeeltelijk) afgebroken. Dit betreft zowel de (gedeeltelijke) afbraak van DOC als van een selectie medicijnresten. Het beoogde voordeel van deze techniek is dat door deze afbraak een lage ozondosering in de tweede stap volstaat voor de oxidatie van bio-recalcitrante componenten.

Blokschema inpassing



Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	Waarde
RWZI locatie	-	Horstermeer
Periode	m/jj - m/jj	10-2022 t/m 4-2023
Voorbehandeling pilot		Nee, geen voorfilter
Capaciteit pilotinstallatie	m ³ /h	0,8 - 2,2
Geteste variatie	bv dosering mg PAK/l of g O ₃ /g DOC	0,1 - 0,4 g O ₃ /g DOC
Continu/batch testen	-	BAKF: continu testen O ₃ : periodieke continue testen
Wat specifieke info: bv type PAK, O ₃ productie uit lucht/O ₂ , Bromide gehalten, DOC		GAK type Norit 830P, O ₃ uit O ₂ , gem DOC ~11 mg/L, bromide max 0,68 mg/l
Uitgevoerde analyses		Micro's, UV, DOC, N/P, biologische effecten

Ontwerputgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	Waarde
Oxidatie met ozon en/of H₂O₂		
O ₃ dosering nominaal	g O ₃ /g DOC	0,2 - 0,3
O ₃ dosering nominaal (bij 11 mg DOC/l)	g O ₃ /m ³	1,9 - 2,7
Contacttijd O ₃ reactor	min	7,5 - 9
Diepte O ₃ reactor	m	2 - 6,5
O ₃ inbreng		alle systemen mogelijk
Biologische reactor i.c.m. O₃		
Type dragermateriaal	-	GAK
standtijd dragermateriaal	maand	180 - 240
dichtheid dragermateriaal	kg/m ³	400 - 500
Contacttijd biologische reactor	min	20 - 35
Hoogte biologische reactor	m	2 - 3,5
EBCT minimaal	min	20
EBCT nominaal	min	30
Zuurstof setpoint oploop	mg/L	10 - 20
Slib gevormd	kg ds/behandelde m ³	0,003
Spoelwater	% van inkomend debiet	0,5 - 1,0
Metaalzout-dosering	mg Fe ³⁺ /L	0
Metaalzout-dosering	mol Fe/mol P te verwijderen	0
C-bron dosering (type vermelden)	mg/l	0

Voorfiltratie		
Type filter	-	nvt
<i>Spoelwater</i>		
Type spoelwater	-	bv. effluent
spoelwaterdebiet	% van inkomend debiet	1
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/behandelde m ³	0,084
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	3 - 10
Energieverbruik ozongedeelte:	kWh/behandelde m ³	0,046
* Menging etc 20 W/m ³ behandeld*	kWh/behandelde m ³	0,020
* O ₃ productie 10 kWh/kg O ₃ * h	kWh/behandelde m ³	0,026
Energieverbruik BAKF (obv GAK referentie= <1W/m ³ behandeld)	kWh/behandelde m ³	0,001
Energieverbruik pompen 8 m	kWh/behandelde m ³	0,035
Energieverbruik spoelwater 1%	kWh/behandelde m ³	0,002
Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV		
Parameter	Eenheid	Waarde
Ontwerp technologie		
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	STOWA 2023-48 Ontwerp 2
Ontwerpdebiet technologie	m ³ /h	1.040
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	5.365.500
% behandeld van jaardebiet effluent	%	70
Oxidatie met ozon en/of H₂O₂		
O ₃ dosering per gram DOC	g O ₃ /g DOC	0,3
O ₃ dosering nominaal (bij 11 mg DOC/l-15% verwijdering in BAKF)	kg O ₃ /h	1,6
O ₃ dosering maximaal	g O ₃ /h	2,7
Volume O ₃ reactor	m ³	130
Diepte O ₃ reactor	m	2 - 6,5
Antal O ₃ reactoren		ntb
O ₃ productie uit		Zuurstof
O ₂ verbruik voor O ₃ productie	ton/jaar	142
H ₂ O ₂ doseren	kg H ₂ O ₂ /m ³	0
Granulair actief kool (GAK)		
Zuurstofdosering	g O ₂ /h	3120
hydraulisch belasting	m/h	5,6
Benodigde bedvolume	m ³	520
bedhoogte	m	2,8
filteroppervlak	m ²	186
type uitvoering (opwaarts/neerwaarts doorstroomd)	-	neerwaarts
Aantal filters		
Totaal filteroppervlak	m ²	186
GAK koolsoort	-	ntb
GAK korrelgrootte (diameter)	mm	ntb
dosering kool	kg/d	geen dosering
dichtheid actiefkoolkorrels	kg/m ³	450
Metaalzout-dosering	kg Fe ³⁺ /d	0
Methanol dosering	kg/d	0
Extra slibafvoer	ton ds/jaar	16
<i>Spoelwater</i>		
spoelwaterdebiet	% van inkomend debiet	1
Personeel		
FTE	FTE/j	1

Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/j	451.863
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	3 - 10
Energieverbruik ozongedeelte:	kWh/j	248.959
* Menging etc 20 W/m ³ behandeld*	kWh/j	107.310
* O3 productie 10 kWh/kg O3 * h	kWh/j	141.649
Energieverbruik BAKF (obv GAK referentie= <1W/m ³ behandeld)	kWh/j	4.380
Energieverbruik pompen 8 m	kWh/j	187.793
Energieverbruik spoelwater 1%	kWh/j	10.731
Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV		
		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen		
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	90
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	75 - 80%
in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	85
In deelstroom (EU-stoffen)	%	84
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	77-80%
CO₂ footprint		
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m ³	95
CO ₂ footprint	gCO ₂ /totale rwzi m ³	66
Kosten (incl BTW)		
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m ³	0,18-0,27
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m ³	0,13-0,19
Eco-toxiciteit		
Eco-toxiciteit reductie	%	50
Bijvangst		
		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Extra N-totaal verwijdering	%	NH ₄ en NO ₂
Extra ammonium verwijdering	%	99%
Ammonium concentratie in instroom van technologie	mg N/l	~1
Ammonium concentratie in uitstroom van technologie	mg N/l	<0,015
Extra P-totaal verwijdering	%	neutraal, evt via ds afvang
Bromide concentratie in instroom van technologie	mg bromide/l	170 - 680
Bromaat concentratie in uitstroom van technologie	mg bromaat/l	<0,1 - 0,5
Bromaatvorming t.o.v. bromide in instroom	%	<0,1%
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-29
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	niet gemeten
Extra antibiotica resistente bacterien verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-30
Technology Readiness Level		
Parameter	Eenheid	Waarde
Technology Readiness Level		6
		Afzonderlijke technieken zijn al full scale bewezen
Kennisvragen voor opschaling		Levensduur GAK, noodzaak/effect eventuele voorbehandeling, optimale O3 dosering, % spoelwater
* Lager dan verbruik bij O3 referentie (30 W/m ³ behandeld) ivm lagere specifieke O3 dosering voor Aurea (B03)		

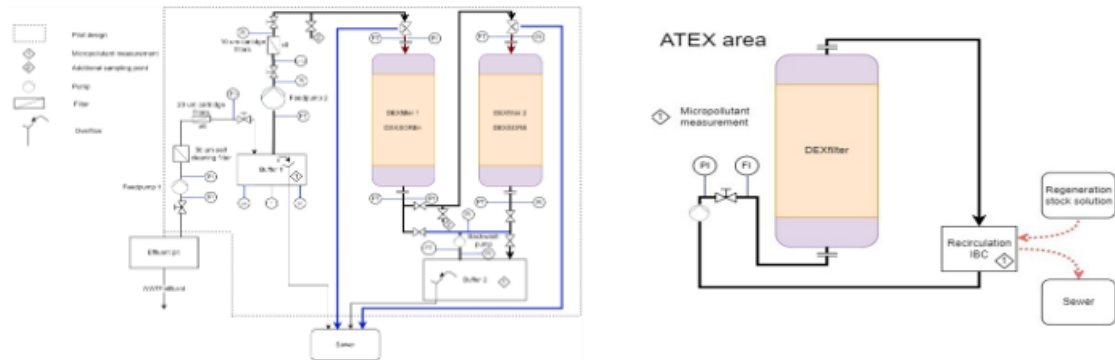
Naam technologie: DEXfilter

Beschrijving technologie

DEXSORB is de merknaam voor cyclodextrines geproduceerd door CycloPure voor toepassing in waterbehandeling. Het is afkomstig uit de luchtverfrisser industrie. Cyclodextrines bestaan uit een soort cupjes met een positieve of negatieve lading waar de microverontreinigingen aan kunnen adsorberen door een combinatie van elektrostatische-, hydrofobe interacties en een uitsluitingsmechanisme op basis van molecuulgrootte.

Beoogde voordelen van deze techniek betreffen een efficiëntere verwijdering van micro verontreinigingen en een duurzamere wijze van reactivatie in vergelijking met de referentie actief kool

Blokschema inpassing



Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	Waarde
RWZI locatie	-	Lelystad
Periode	m/jj - m/jj	feb 2023 - aug 2023
Voorbehandeling pilot		zelfreinigend filter en kaarsfilter
Capaciteit pilotinstallatie	m ³ /h	0,5
Geteste variatie	bv dosering mg PAK/L of g O ₃ /g DOC	geen
Continu/batch testen	-	continue
Wat specifieke info: bv type PAK, O ₃ productie uit lucht/O ₂ , Bromide gehalten, DOC		Micro's, PFAS, ecotox
Uitgevoerde analyses		

Ontwerputgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	Waarde
Alternatieve adsorptiemiddelen		
Adsorptie stap		
Type adsorptiemateriaal		Cyclodextrines
EBCT bij DWA ontwerp piek	min	12,8
EBCT bij gemiddeld debiet	min	10
filtratiesnelheid	m/h	11
Oppervlakte per filterkolom	m ²	0,000
Standtijd	maand	4
Standtijd	bedvolumina	4000
Max diameter filter	m	0,24
filter/zeoliet bedhoogte	m	1,55
maximale bed-expansie bij terugspoelen	%	40%
hoogte geëxpandeerd filterbed	m	2,2
Gewicht adsorptiemateriaal	kg/m ³	399
Korrel diameter adsorptiemateriaal	mm	0,2 - 1,0
slibproductie	kg ds/behandelde m ³	0,005
Spoelwater		
Type spoelwater	-	gefilterd effluent

spoelwaterdebiet	% van inkomend debiet	1,00
spoeltijdpercentage	%	1,00
frequentie voor alle filters totaal	aantal keer/uur	0,006
tijdsduur	min	15
Opslagtijd effluent tbv spoeling in buffertank	uur	2
Regeneratie		
Ethanol concentratie	mg/L	67% ethanol, 5 cycli van 3 uur
Totale regeneratieduur	uur	15
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/behandelde m ³	0,033
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	~ 2
Energieverbruik DEXfilter obv GAK	kWh/behandelde m ³	0,001
Energieverbruik pompen 8 m	kWh/behandelde m ³	0,031
Energieverbruik spoelwater 1%	kWh/behandelde m ³	0,002

Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

Parameter	Eenheid	Waarde
Ontwerp technologie		
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	Dexsorb (Kolom 2)
Ontwerpdebiet technologie	m ³ /h	1040
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	6124000
% behandeld van jaardebiet effluent	%	80
Extra slibafvoer	ton ds/jaar	0
Voorfiltratie		
Type filter	-	Zelfreinigend zandfilter en kaarsenfilters (20 en 10 mu)
Doorlaat	µm	10
Alternatieve adsorptiemiddelen		
Adsorptie stap		
Type adsorptiemateriaal	-	Cyclodextrines
Diameter zeolietkolom	m	11,00
Zeoliet/filter bedhoogte	m	1,55
Totaal benodigd filteroppervlak	m ²	95
EBCT	min	10
Kolomvolume	m ³	43,4
Totaal zeoliet-/filterbedvolume	m ³	173,6
filtratiesnelheid	m/h	11
Standtijd	maand	6,8
Standtijd	bedvolumina	20000
maximale bed-expansie bij terugspoelen	%	40%
hoogte geëxpandeerd filterbed	m	2,2
Gewicht adsorptiemateriaal	kg/m ³	399
Korrel diameter adsorptiemateriaal	mm	0,2 - 1,5
slibproductie	ton ds/d	
<i>Spoelwater</i>		
spoelwaterdebiet	m ³ /h	49
spoeltijdpercentage	%	3%
frequentie voor alle filters totaal	aantal keer/uur	0,26
tijdsduur	min	10
Regeneratie		
Ethanol concentratie	mg/L	70% v/v
Ethanol dosering	kg/h	

Totale regeneratieduur	uur	
Personeel		
FTE	FTE/j	0,5
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/j	205.040
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	2,6
Energieverbruik DEXfilter obv GAK	kWh/j	4.999
Energieverbruik pompen 8 m	kWh/j	187.793
Energieverbruik spoelwater 1%	kWh/j	12.248

Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen		
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	80 - 95%
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	75 - 90%
in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	70 - 80%
In deelstroom (EU-stoffen)	%	80 - 95
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	75 - 85
CO₂ footprint		
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m ³	168
CO ₂ footprint	gCO ₂ /totale rwzi m ³	135
Kosten (incl BTW)		
Jaartijks kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m ³	0,24-0,37
Jaartijks kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m ³	0,20-0,29
Eco-toxiciteit		
Eco-toxiciteit reductie	%	

		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Extra N-totaal verwijdering	%	20 - 25%
N-totaal concentratie in instroom van technologie	mg N/l	2,0-2,5
N-totaal concentratie in uitstroom van technologie	mg N/l	1,5-2,0
Extra ammonium verwijdering	%	0,67
Ammonium concentratie in instroom van technologie	mg N/l	0,3
Ammonium concentratie in uitstroom van technologie	mg N/l	0,1
Extra P-totaal verwijdering	%	25 - 33%
P-totaal concentratie in instroom van technologie	mg P/l	0,3-0,4
P-totaal concentratie in uitstroom van technologie	mg P/l	0,2-0,3
P-ortho concentratie in instroom van technologie	mg P/l	0,1-0,2
P-ortho concentratie in uitstroom van technologie	mg P/l	0,1-0,2
Bromide concentratie in instroom van technologie	mg bromide/l	nvt
Bromaat concentratie in uitstroom van technologie	mg bromaat/l	nvt
Bromaatvorming t.o.v. bromide in instroom	%	nvt
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-29
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	neutraal
Extra antibiotica resistente bacteriën verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-30

Technology Readiness Level

Parameter	Eenheid	Waarde
Technology Readiness Level		5

	Concept heeft nog kinderziektes zoals terugspoeling, externe regeneratie bestaat nog niet, Dexsorb nog duur
Kennisvragen over werking, kennisvragen voor nieuwe pilot	Hydraulische optimalisatie van het systeem zodat verkleving voorkomen wordt, het filtermateriaal niet uitspoelt bij terugspoelen en de standtijd verlengd wordt tot minimaal 20.000 BV

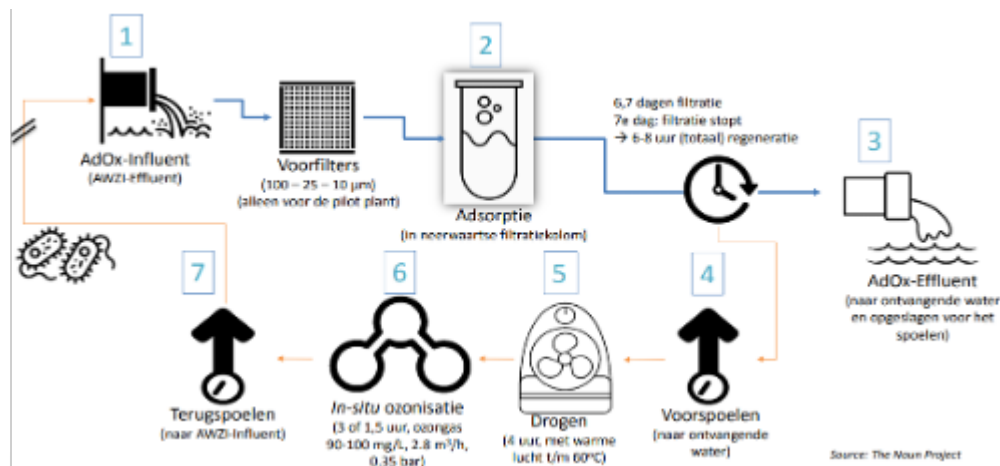
NAAM TECHNOLOGIE: ADOX

Beschrijving technologie

AdOx is een adsorptie-oxidatie proces voor de verwijdering van organische microverontreinigingen. AdOx maakt gebruik van high-silica zeolieten in korrelvorm in een neerwaarts doorstroomde vastbed reactor, in deze adsorptiekolom worden microverontreinigingen uit het afvalwater geadsorbeerd. Na verzadiging van de adsorptiekolom wordt deze in-situ geregenereerd met ozongas. Met dit proces wordt een selectieve verwijdering van microverontreinigingen gerealiseerd.

Beoogde voordelen van gecombineerde adsorptie met zeolieten en in-situ regeneratie met ozon zijn: geen vorming van bij- en nevenproducten in het behandelde rwzi-effluent doordat geen ozon gedoseerd wordt in de hoofdstroom en weinig transportbewegingen door in-situ regeneratie. Tevens wordt geen ozon gebruikt voor oxidatie van NOM omdat NOM niet adsorbeert aan de zeolieten.

Blokschema inpassing



Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	Waarde
RWZI locatie	-	Leiden-Noord
Periode	m/jj - m/jj	3/2023-6/2023
Voorbehandeling pilot		Voorfilters
Capaciteit pilotinstallatie	m³/h	0,5-1
Geteste variatie	bv dosering mg PAK/L of g O ₃ /g DOC	EBCT: 10 & 15 min; debiet: 0,5-1 m³/h
Continu/batch testen	-	continu
Wat specifieke info: bv type PAK, O ₃ productie uit lucht/O ₂ , Bromide gehalten, DOC		Adsorptie materiaal: zeolietkorrels. Productie O ₃ uit O ₂ -gas
Uitgevoerde analyses		gidsstoffen, ecotoxiciteit, bromaat, DOC, ARB, PFAS

Ontwerputgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	Waarde
Alternatieve adsorptiemiddelen		
<i>Adsorptie stap</i>		
Type adsorptiemateriaal		high-silica zeolietkorrels
EBCT bij DWA ontwerp piek	min	10
EBCT bij gemiddeld debiet	min	10-15
filtratiesnelheid	m/h	9,68
Oppervlakte per filterkolom	m²	5,12
Standtijd	dag	7
Standtijd	bedvolumina	900
Max diameter filter	m	5
filter/zeoliet bedhoogte	m	2
maximale bed-expansie bij terugspoelen	%	50

hoogte geëxpandeerd filterbed	m	3
Gewicht adsorptiemateriaal	kg/m ³	590
Korrel diameter adsorptiemateriaal	mm	2
slibproductie	kg ds/behandelde m ³	-
<i>Spoelwater</i>		
Type spoelwater	-	effluent
spoelwaterdebiet	% van inkomend debiet	4
spoeltijdpercentage	%	0,3
frequentie voor alle filters totaal		na elke 7 dagen
tijdsduur	min	2x15 (voorspoelen en naspoelen)
<i>Regeneratie</i>		
Ozongasconcentratie	mg/L	100
ozon dosering	kg/m ³ effluent treated	0,008
Ozonisatieduur	uur	1,5
Ethanol concentratie	mg/L	
Totale regeneratieduur	uur	6
<i>Drogen kolom</i>		
Temperatuur	oC	60
Luchtdebiet	m ³ lucht per keer/m ³ filtermateriaal	14
Frequentie	aantal keer/jaar	52
Duur	uur/keer	4
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/behandelde m ³	0,14
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	8
Energieverbruik 8 m opvoerhoogte tbv Adsorptie	kWh/m ³	0,04
Energieverbruik spoelwater 4%	kWh/m ³	0,01
Energieverbruik drogen in kWh obv aardgas	kWh/m ³	0,05
Energieverbruik drogen aardgas	Nm ³ /m ³	0,02
Energieverbruik ozoniseren	kWh/m ³	0,04
zeoliet productie gebruikt voor CO2 voetafdruk grondstof	kWh/m ³	0,018

Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

Parameter	Eenheid	Waarde
Ontwerp technologie		
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	n.v.t.
Ontwerpdebiet technologie	m ³ /h	1.040
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	5.365.500
% behandeld van jaardebiet effluent	%	70
Extra slibafvoer	ton ds/jaar	0
Alternatieve adsorptiemiddelen		
<i>Adsorptie stap</i>		
Type adsorptiemateriaal	-	high-silica zeoliet
Diameter zeolietkolom	m	2,29
Zeoliet/filter bedhoogte	m	2
Filteroppervlak per kolom	m ²	4,1
Totaal benodigd filteroppervlak	m ²	107,4
EBCT	min	10
Kolomvolume	m ³	12
Totaal zeoliet-/filterbedvolume	m ³	173
filtratiesnelheid	m/h	12
Standtijd	dag	7

Standtijd	bedvolumina	972
Max diameter filter	m	5
maximale bed-expansie bij terugspoelen	%	50
hoogte geëxpandeerd filterbed	m	3
Gewicht adsorptiemateriaal	kg/m ³	590
Korrel diameter adsorptiemateriaal	mm	2-15
slibproductie	ton ds/d	
<i>Spoelwater</i>		
spoelwaterdebiet	m ³ /h	12
spoeltijdpercentage	%	6,25
frequentie voor alle filters totaal		na elke 7 dagen
tijdsduur	min	2x15 (voorspoelen en naspoelen)
Opslagtijd effluent tbv spoeling in buffertank	uur	
<i>Regeneratie</i>		
Ozongasconcentratie	mg/L	100
ozon dosering	kg/h	30,04
Ozonisatieduur	uur	1,5
Benodigde O ₂ voor O ₃ generatie	ton/jaar	71,19
Ethanol concentratie	mg/L	
Ethanol dosering	kg/h	
Totale regeneratieduur	uur	6
<i>Drogen kolom</i>		
Temperatuur	oC	60
Luchtdebiet	m ³ /h/keer	13
Frequentie	aantal keer/jaar	1092
Duur	uur/keer	4
<i>Personeel</i>		
FTE	FTE/j	0,5
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/j	729.694
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	7
Energieverbruik 8 m opvoerhoogte tbv Adsorptie	kWh/j	187.793
Energieverbruik spoelwater 4%	kWh/j	42.924
Energieverbruik drogen in kWh obv aardgas	kWh/j	292.790
Energieverbruik drogen aardgas	Nm ³ /j	86.692
Energieverbruik ozoniseren	kWh/j	206.188

Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen		
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	79
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	65
in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	74
In deelstroom (EU-stoffen)	%	77
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	72
CO₂ footprint		
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m ³	102
CO ₂ footprint	gCO ₂ /totale rwzi m ³	71
Kosten (incl BTW)		
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m ³	0,18-0,26

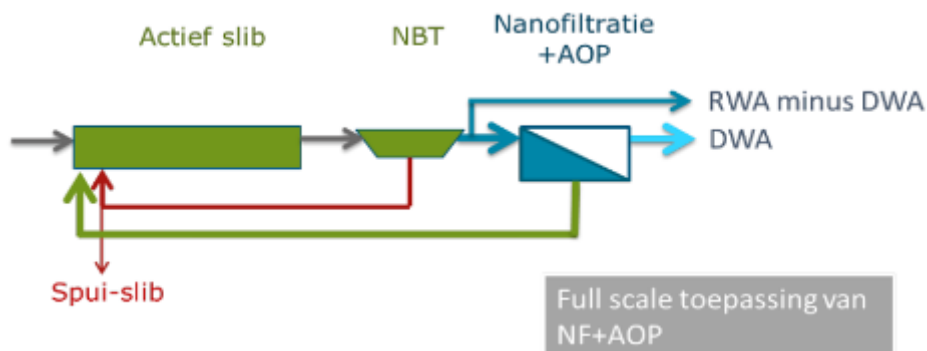
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m ³	0,12-0,19
Eco-toxiciteit		
Eco-toxiciteit reductie	%	
Bijvangst		
		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Extra N-totaal verwijdering	%	neutraal
Extra ammonium verwijdering	%	neutraal
Extra P-totaal verwijdering	%	neutraal
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-29
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	neutraal
Extra antibiotica resistente bacterien verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-30
Technology Readiness Level		
Parameter	Eenheid	Waarde
Technology Readiness Level		5
		De eerste pilot was de proof-of-principle, langdurige pilot nodig voor stabiele operatie alvorens over te gaan tot demo-schaal.
Kennismvragen over werking, kennisvragen voor nieuwe pilot		de verwijderingspercentage bij langdurige adsorptie-regeneratie cycli, sterkte van de korrels bij langdurige gebruik, optimalisatie regeneratieproces.
		verdere ontwikkeling van (multi-type) zeolietkorrels, verbeteren droging vóór regeneratie, efficiënter gebruik ozon door recirculatie, afstemmen standtijd zeolietkolom vs. EBCT.

NAAM TECHNOLOGIE: DIRECTE NANOFILTRATIE EN UV/PEROXIDE

Beschrijving technologie

Nanofiltratie (NF) is een scheidingstechniek. NF-membranen zijn fysieke barrières met openingen in het bereik van 1 – 10 nm. Pathogenen en zwevende stof kunnen daarmee nagenoeg volledig worden afgescheiden van water. Grotere opgeloste moleculen worden ook nagenoeg volledig afgescheiden, waaronder humuszuren en een deel van de microverontreinigingen. De afgescheiden componenten belanden in een concentraatstroom, die eventueel kan worden nabehandeld. In vergelijking met de referentietechnieken heeft NF een grote bijvangst. Door de absolute barrière van het membraan worden bijvoorbeeld microplastics tegengehouden en vindt er desinfectie plaats. Om het verwijderingsrendement te verhogen wordt na de NF-stap een nabehandeling met UV en waterstofperoxide geplaatst. Doordat de membranen de kleurcomponenten verwijderen neemt de transmissie van het water aanzienlijk toe, waardoor behandeling met UV efficiënt kan plaatsvinden. Daarnaast geeft deze hybride opwerking extra robuustheid voor het leveren van bacteriologisch en chemisch betrouwbaar water op een kwaliteitsniveau dat drinkwater benadert, waardoor mogelijkheden ontstaat voor hoogwaardig hergebruik. Het beoogde voordeel van deze techniek betreft de mogelijkheid tot hoogwaardig hergebruik van rwzi effluent

Blokschema inpassing



Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	Waarde
RWZI locatie	-	Asten
Periode	m/jj - m/jj	4/2021 - 10/2022
Voorbehandeling pilot		Filter t.b.v. zwevend stof verwijdering (200 µm)
Capaciteit pilotinstallatie	m³/h	ca. 1
Geteste variatie		Membranen: DNF 40, 80, 120; UV: 3.000-12.000 J/m²; H2O2: 10-20 mg/l
Continu/batch testen	-	Nanofiltratie: continu; UV/H ₂ O ₂ : enkel bij bemonstering
Wat specifieke info: bv type PAK, O ₃ productie uit lucht/O ₂ , Bromide gehalten, DOC		
Uitgevoerde analyses		Gidsstoffen, N, P, SO ₄ , CZV, Ca, Mg, ARB, PFAS, microbiologische parameters

Ontwerpuitgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	Waarde
UV technieken		
Aantal UV-lampen	aantal/behandelde m³	1,79E-5
HRT UV reactor/buis	min	nb
Totaal vermogen UV-lampen	kW/m³	0,07
Doseerrange	J/m²	6.100
Transmissie	%	95
H2O2 dosering	mg/l	15
Voorfiltratie		
Type filter	-	Amiad
Doorlaat	µm	200
OB-concentratie in aanvoer	mg/l	nb

OB-concentratie in afvoer	mg/l	nb
Filtratie t.b.v. verwijdering micro's		
Membraanmateriaal		Modified PES
Type membrane		DNF80
Doorlaat	µm	nvt
MWCO	Dalton	800
Binnendiameter membraanvezel	mm	0,7
Membraanoppervlak	m ² /m ³ /h	44
Maximale TMP	bar	6
Membraanflux	l/m ² /h	20-30
Crossflowsnelheid	m/s	0,5
Recovery	%	75
Filtratiecyclus (filtratie/reiniging)	min/min	59/1
FeCl ₃ (coagulant)	mg Fe ³⁺ /L	n.v.t.
Type reinigingsmiddel		NaOH, NaOCl, Citroenzuur
Hoeveel reinigingsmiddel/jaar	g/m ³	NaOH: 0,61, NaOCl: 0,40, Citroenzuur: 1,20
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/behandelde m ³	0,39
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	0
Energieverbruik NF + voorbehandeling	kWh/m ³	0,32
Energieverbruik UV/H ₂ O ₂	kWh/m ³	0,04-0,07

Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

Parameter	Eenheid	Waarde
Ontwerp technologie		
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	n.v.t.
Ontwerpdebiet technologie	m ³ /h	1040
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	5.365.500
% behandeld van jaardebiet effluent	%	70
UV technieken		
Aantal UV reactoren	aantal	2
Aantal UV-lampen	aantal	96
Totaal vermogen UV-lampen	kW/m ³	0,07
UV reactor/buis	m ³	
Doseerrange	J/m ²	6100
Transmissie	%	95
H2O2 dosering	mg/l	15
Extra slibafvoer	ton ds/jaar	0
Voorfiltratie		
Type filter	-	Doekfilter
Doorlaat	µm	200
OB-concentratie in aanvoer	mg/h	nb
OB-concentratie in afvoer	mg/h	nb
Filtratie t.b.v. verwijdering micro's		
Membraanmateriaal		Modified PES
Type membraan		DNF80
Doorlaat	µm	nvt
MWCO	Dalton	800
Ontwerp DWA-piek	m ³ /h	1.040
Binnendiameter membraanvezel	mm	0,7
Membraanoppervlak	m ²	46.108
Membraanoppervlak per module	m ²	50

Maximale TMP	bar	6
Membranflux	l/m ² /h	20-30
Crossflowsnelheid	m/s	0,5
Recovery	%	75
Filtratiecyclus (filtratie/reiniging)	min/min	59/1
FeCl ₃ (coagulant)	kg Fe ³⁺ /d	0
Type reinigingsmiddel		NaOH, NaOCl, Citroenzuur
Hoeveel reinigingsmiddel/jaar	kg/jaar	NaOH 50%: 6.592, NaOCl 15%: 14.313, Citroenzuur 50%: 12.842
Personeel		
FTE	FTE/j	1
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/j	2.089.069
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	0
Energieverbruik voorbehandeling	kWh/j	43.003
Energieverbruik NF	kWh/j	1.670.481
Energieverbruik UV/H2O2	kWh/j	375.585

Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen		
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	96
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	85
in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	89
In deelstroom (EU-stoffen)	%	94
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	85-87
CO₂ footprint		
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m ³	262
CO ₂ footprint	gCO ₂ /totale rwzi m ³	183
Kosten (incl BTW)		
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m ³	0,52-0,77
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m ³	0,36-0,54
Eco-toxiciteit		
Eco-toxiciteit reductie	%	

Bijvangst		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Extra N-totaal verwijdering	%	neutraal
Extra ammonium verwijdering	%	neutraal
Extra P-totaal verwijdering	%	70% (bij ca 0,15 mg/L ingaand)
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-29
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	4
Extra antibiotica resistente bacterien verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-30

Technology Readiness Level

Parameter	Eenheid	Waarde
Technology Readiness Level		5
		NF en UV/H ₂ O ₂ zijn los al full-scale toegepast in drinkwaterbereiding, maar nog niet op rwzi effluent
Kennisvragen voor verbetering/opschaling		Hoe omgaan met het concentraat?
Kennisvragen over werking, kennisvragen voor nieuwe pilot		

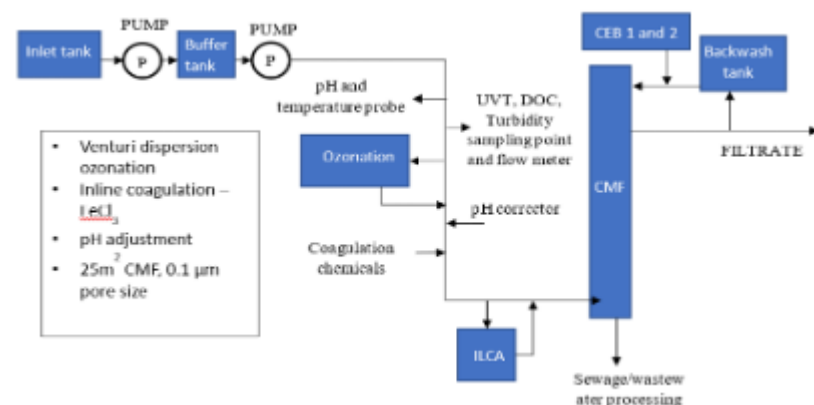
NAAM TECHNOLOGIE: OZON MET KERAMISCHE MICROFILTRATIE

Beschrijving technologie

In ozon met keramische microfiltratie wordt in de eerste stap via ozonisatie het water ontdaan van microverontreinigingen. Afhankelijk van de gewenste effluentkwaliteit kan deze stap worden gecombineerd met H2O2 dosering. Vervolgens is er een in-line coagulatie (ILCA) stap ten behoeve van een optimale keramische microfiltratie (CMF) om gesuspendeerde deeltjes, microplastics en bacteriën/virussen te verwijderen.

Het beoogde voordeel van deze techniek betreft de mogelijkheid tot hoogwaardig hergebruik van rwzi effluent

Blokschema inpassing



Pilotinstallatie zoals binnen IPMV uitgevoerd

Parameter	Eenheid	Waarde
RWZI locatie	-	Wervershoof
Periode	m/jj - m/jj	2022 (grote pilot)
Voorbehandeling pilot		nee
Capaciteit pilotinstallatie	m³/h	5
Geteste variatie	bv dosering mg PAK/L of g O ₃ /g DOC	
Continu/batch testen	-	
Wat specifieke info: bv type PAK, O ₃ productie uit lucht/O ₂ , Bromide gehalten, DOC		11 mg/L DOC, O ₃ productie uit O ₂
Uitgevoerde analyses		gidsstoffen, pH, DOC, bromaat, PFAS, ARB

Ontwerputgangspunten full scale installatie

Parameter	Eenheid	Waarde
Oxidatie met ozon en/of H₂O₂		
O ₃ dosering nominaal	gO ₃ /g DOC	0,6
O ₃ dosering nominaal (bij 11 mg DOC/L)	gO ₃ /m³	6,6
Contacttijd O ₃ reactor	min	20
Diepte O ₃ reactor	m	2-6
O ₃ inbreng		diffusers of andere
H ₂ O ₂	ppm	n.v.t.
Filtratie t.b.v. verwijdering micro's		
Membraanmateriaal		keramisch
Type membrane		keramische microfiltratie
Doorlaat	µm	0,1
MWCO	Dalton	nvt
Binnendiameter membraanvezel	mm	nvt
Membraanoppervlak	m²/m³/h	nvt
Maximale TMP	bar	2
Membraanflux	l/m²/h	nvt

Crossflowsnelheid	m/s	nvt
Recovery	%	nvt
Filtratiecyclus (filtratie/reiniging)	min/min	nvt
FeCl ₃ (coagulant)	mg Fe ³⁺ /L	10
Type reinigingsmiddel		natronloog, natriumhypochloriet, zoutzuur, waterstofperoxide
Hoeveel reinigingsmiddel/jaar	g/m ³	natronloog 50%: 4,7; natriumhypochloriet 15%: 2,2; zoutzuur 36%: 0,6; waterstofperoxide 50%: 1,5
<i>Spoelwater</i>		
spoelwaterdebiet	% van inkomend debiet	10
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/behandelde m ³	0,201
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	3 - 10
Energieverbruik coagulatie / microfiltratie	kWh/m ³	0,050
Energieverbruik ozonisatie	kWh/m ³	0,096
Energieverbruik opvoerhoogte 8 m	kWh/m ³	0,035
Energieverbruik 10% spoelwater	kWh/m ³	0,020
Ontwerp technologie voor rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV		
Parameter	Eenheid	Waarde
Ontwerp technologie		
Geselecteerde variant voor uitwerking ontwerp	-	n.v.t.
Ontwerpedebiet technologie	m ³ /h	1.040
Te behandelen jaardebiet door de technologie	m ³ /jaar	5.365.500
% behandeld van jaardebiet effluent	%	70
Oxidatie met ozon en/of H₂O₂		
O ₃ dosering per gram DOC	gO ₃ /g DOC	0,6
O ₃ dosering nominaal (bij 11 mg DOC/l)	kgO ₃ /h	4,0
O ₃ dosering maximaal	kgO ₃ /h	6,9
Volume O ₃ reactor	m ³	347
O ₃ productie uit		zuurstof
O ₂ verbruik voor O ₃ productie	ton/jaar	354
H ₂ O ₂ doseren	kg H ₂ O ₂ /m ³	0
Extra slibafvoer	ton ds/jaar	0
Filtratie t.b.v. verwijdering micro's		
Membraanmateriaal		keramisch
Type membraan		keramische microfilter
Doorlaat	µm	0,1
Maximale TMP	bar	2
FeCl ₃ (coagulant)	mg Fe/l	10
Type reinigingsmiddel		natronloog, natriumhypochloriet, zoutzuur, waterstofperoxide
Hoeveel reinigingsmiddel/jaar	kg/jaar	natronloog 50%: 25.245; natriumhypochloriet 15%: 11.870; zoutzuur 36%: 2.980; waterstofperoxide 50%: 7.824
Personeel		
FTE	FTE/j	1
Energieverbruik		
Energieverbruik totaal technologie incl. opvoeren en spoelwater	kWh/j	1.078.466
Minimale opvoerhoogte t.b.v. technologie	m	3 - 10
Energieverbruik coagulatie / microfiltratie	kWh/j	268.275
Energieverbruik ozonisatie	kWh/j	515.088

Energieverbruik opvoerhoogte 8 m	kWh/j	187.793
Energieverbruik 10% spoelwater	kWh/j	107.310

Resultaat obv IPMV criteria bij rwzi van 100.000 ie a 150 g TZV

		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Verwijderingsrendement microverontreinigingen		
in deelstroom (7/11 NL gidsstoffen)	%	86
in deelstroom (11 NL gidsstoffen)	%	
in gehele rwzi + nabehandeling (7/11 NL gidsstoffen)	%	80
In deelstroom (EU-stoffen)	%	80-90
gehele rwzi + nabehandeling (EU-stoffen)	%	75-85
CO₂ footprint		
CO ₂ footprint	gCO ₂ /behandelde m ³	239
CO ₂ footprint	gCO ₂ /m ³ rwzi	167
Kosten (incl BTW)		
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/behandelde m ³	0,71-1,07
Jaarlijkse kosten (kapitaal, onderhoud en operationeel)	€/totale rwzi m ³	0,50-0,75
Eco-toxiciteit		
Eco-toxiciteit reductie	%	

Bijvangst		actualisatie
Parameter	Eenheid	Waarde 2024
Extra N-totaal verwijdering	%	neutraal
Extra ammonium verwijdering	%	neutraal
Extra P-totaal verwijdering	%	neutraal
Bromide concentratie in instroom van technologie	mg bromide/l	
Bromaat concentratie in uitstroom van technologie	mg bromaat/l	
Bromaatvorming t.o.v. bromide in instroom	%	
Extra PFAS verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-29
Extra desinfectie in technologie (verwijdering E.Coli)	Reductiefactor als log.	3,5-4
Extra antibiotica resistente bacterien verwijdering in technologie	%	zie STOWA 2024-30

Technology Readiness Level

Parameter	Eenheid	Waarde
Technology Readiness Level		6
Kennisvragen voor verbetering/opschaling		Plaats en hoeveelheid H2O2 inbreng i.r.t. ozon dispersiesystemen m.b.t. bromaat mitigatie en hydroxyl omzetting van micro's. Prestatie bij RWA condities (troebelheid)
Kennisvragen over werking, kennisvragen voor nieuwe pilot		

BIJLAGE 6

VERGELIJKING VERWIJDERINGSRENDEMENT COMBINATIE TECHNIEKEN

ACHTERGROND

Er zijn 4 verwijdering mechanismen in de technologieën van het IPMV te onderscheiden:

- Adsorptie
- Oxidatie
- Filtratie
- Biologische afbraak

De referentie technieken PACAS, ozon en GAK maken gebruik van de eerste twee werkingsprincipes adsorptie of oxidatie. De in het IPMV onderzochte technieken maken hier ook gebruik van, of een combinatie van werkingsprincipes.

De combinatie technieken in het IPMV beogen een hogere verwijdering te behalen op meer gidsstoffen, ook wel een 'breder palet' genoemd. De beredenering hierachter is dat specifieke microverontreinigingen met het ene verwijderingsmechanisme wel verwijderd worden en met het andere niet. Door verwijderingsmechanismen te combineren kan in theorie dus een hoog verwijderingsrendement worden behaald op meer stoffen. Deze bijlage beoogt deze uitspraak te onderbouwen.

Hierbij is gebruik gemaakt van de resultaten uit de pilotstudies, eerder onderzoek naar PACAS op RWZI Papendrecht (STOWA 2018-02) en uit eerder verzamelde informatie over verwijderingsrendementen (Mulder, 2021).

REFERENTIE VERWIJDERING PACAS EN OZON

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%). 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. (Mulder, 2021)

Tabel B6-1 en B6-2 vergelijkt de verwijdering van 11 gidsstoffen met de referentietechnologieën ozon en actief kool. Hieruit kan worden geconcludeerd dat niet alle stoffen door alleen ozon of alleen PACAS even goed kunnen worden verwijderd, sommige hebben een hoge verwijdering (>90%) en anderen juist een lagere (<80%):

- 1,2,3-benzotriazol en sommige 4- en 5-methyl-1H-benzotriazolen en metoprolol worden beter verwijderd met PACAS dan met ozon.
- Diclofenac, Sulfamethoxazol en Clarithromycine worden beter verwijderd met ozon dan met PACAS.
- De verwijdering van Irbesartan is voor zowel ozon als PACAS vergelijkbaar, ongeveer 50-80%
- De resultaten van Gabapentine zijn meer onduidelijk, wanneer ook de resultaten van tabel B6-4 worden vergeleken: hier is namelijk de verwijdering in de rwzi hoog en bij PACAS laag, terwijl dit bij onderstaande twee tabellen juist slechter is bij ozon.
- De beide bronnen die gebruikt zijn om de verwijderingsrendementen bij PACAS te duiden, geven voor sommige stoffen afwijkingen van ongeveer 10% absolute verwijdering. Het gemiddelde van 11 gidsstoffen is voor PACAS Papendrecht beduidend lager dan de andere bron Mulder (2021). Deze laatste maakt onder andere gebruik van nageschakelde PAK referenties.

TABEL B6-1 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN 11 NL GIDSSTOFFEN MET REFERENTIE TECHNOLOGIEËN (OZON)*

Stof	Verwijdering in rwzi (%)	Verwijdering in rwzi (gemiddelde waarde) (%)	Verwijdering met ozon (%)	Verwijdering met ozon (gemiddelde waarde) (%)	Verwijdering over totale rwzi met ozon (gemiddeld) (%)
Benzotriazol	25-60	43	50 - 70	60	77
Carbamazepine	5-15	10	>80	90	91
Clarithromycine	30-60	45	>80	90	95
Diclofenac	10-35	23	>80	90	92
Gabapentine	30-60	45	<50 - 70	50	73
Hydrochloorthiazide	5-25	15	70 - >80	75	79
Irbesartan	5-15	10	50 - 80	65	69
Metoprolol	20-50	35	50 - 80	65	77
Som 4-,5-methylbenzotriazol	10-40	25	50 - 70	60	70
Propranolol	30-80	55	50 - 70	60	82
Sotalol	15-35	25	>80	90	93
Sulfamethoxazol	50-80	65	>80	90	97
Trimethoprim	30-80	55	>80	90	96
Venlafaxine	5-15	10	70 - >80	75	78
Rendement '7 uit 11'		40		82	86
Rendement '11'		27		74	81
Aantal stoffen > 80%		0			5
Aantal stoffen > 70%		0			9

* Bron: Mulder 2021

Legenda: groene arcering: gebruikt om beste 7 van de 11 te berekenen, cursief: gidsstof uit 2018

TABEL B6-2 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN 11 NL GIDSSTOFFEN MET REFERENTIETECHNOLOGIEËN (PAK)

Stof	Verwijdering in rwzi (%) *	Verwijdering in rwzi (gemiddelde waarde) (%) *	Verwijdering in RWZI Papendrecht (%) **	Verwijdering PACAS pilot Papendrecht bij 20 mg PAK/l (%) **	Verwijdering over totale rwzi met actief kool (gemiddeld) * (%)
Benzotriazol	25-60	43	64	89	94
Carbamazepine	5-15	10	0	80	78
Clarithromycine	30-60	45	47	67	81
Diclofenac	10-35	23	67	67	73
Gabapentine	30-60	45	nb	nb	81
Hydrochloorthiazide	5-25	15	19	79	92
Irbesartan	5-15	10	nb	nb	69
Metoprolol	20-50	35	22	83	94
Som 4-,5-methylbenzotriazol	10-40	25	16	95	93
Propranolol	30-80	55	nb	nb	82
Sotalol	15-35	25	37	85	93
Sulfamethoxazol	50-80	65	nb	nb	83
Trimethoprim	30-80	55	33	100	89
Venlafaxine	5-15	10	nb	nb	78
Rendement '7 uit 11'		40	35	87	91
Rendement '11'		27	32	74	85
Aantal stoffen > 80%		0	0	6	7
Aantal stoffen > 70%		0	0	8	10

* Bron: Mulder 2021, bij circa 15 mg PAK/l dosering

** Bron: STOWA 2018-02, voor het aantal stoffen > bepaald rendement is gebruik gemaakt van Mulder 2011 voor de ontbrekende verwijderingsrendementen

Legenda: groene arcering: gebruikt om beste 7 van de 11 te berekenen, cursief: gidsstof uit 2018

TABEL B6-3 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN EU GIDSSTOFFEN MET REFERENTIETECHNOLOGIEËN (PAK)

	Verwijdering in RWZI Papendrecht (%) **	Verwijdering PACAS pilot Papendrecht bij 20 mg PAK/l (%) **	Verwijdering over totale rwzi met actief kool (gemiddeld) * (%)
categorie 1			
amisulpride			
Carbamazepine	0%	80%	78%
citalopram			
clarithromycine	47%	67%	81%
Diclofenac	67%	67%	73%
Hydrochloorthiazide	19%	79%	92%
Metoprolol	22%	83%	94%
venlafaxine			78%
categorie 2			
1,2,3-benzotrazool	64%	89%	94%
candesartan			
irbesartan			69%
som 4- en 5- methyl-1H-benzotriazol	16%	95%	93%
2:1 gemiddelde	39%	82%	89%

* Bron: Mulder 2021, bij circa 15 mg PAK/l dosering

** Bron: STOWA 2018-02

Legenda: groene arcering: gebruikt om 2:1 gemiddelde te berekenen

Vergelijking referentie PAK en ozon combinatie technologie

In Tabel B6-4 is de combinatie van PACAS en ozon (PAK+O₃) vergeleken op basis van de pilot resultaten op RWZI Leiden-Noord. Dit is gedaan bij de beoogde dosering van 7,5 mg PAK/l en 0,5 g O₃/g DOC. De vergelijking is met de PACAS straat in de pilot met een lage dosering (7,5 mg PAK/l), de Ozonbehandeling op de niet-PACAS straat van rwzi Leiden-Noord en de referentie PACAS (20 mg PAK/l) vanuit RWZI Papendrecht, zie tabel B6-2.

De verwijdering in de PACAS straat met 7,5 mg PAK/l is met 64% (7 van de 11) beduidend lager dan de beoogde verwijdering van 80%. Eigenlijk wordt alleen Trimetoprim bijna volledig verwijderd en is het rendement op de andere stoffen ≤70%.

1,2,3-benzotriazol en sommige 4- en 5-methyl-1H-benzotriazolen worden beter verwijderd met PAK dan met ozon.

Uit de tabel kan worden geconcludeerd dat:

- Om hetzelfde verwijderingsrendement te bereiken met alleen ozon of alleen PAC, is een hogere dosering vereist dan de 'losse' onderdelen van PAK+O₃
- De verwijdering van ozon in dit onderzoek is vergelijkbaar met de referentie in tabel B6-1.
- De verwijdering van 7 van de 11 stoffen voor PACAS 20 mg/l, Ozon (0,5-0,71 mg O₃/mg DOC) en PAK+O₃ is vergelijkbaar (PACAS: 80-85%, PAC+O₃ 91% en O₃:89%) voor de situatie van 100% behandeling na PACAS (PAK+O₃) en na de rwzi (O₃).
- De gemiddelde verwijdering van alle 11 de gidsstoffen is voor ozon lager in vergelijking met de verwijdering van 7 van de 11
 - 7 Stoffen zijn inderdaad vergelijkbaar qua rendement bij ozon en PAK+O₃:
 - Door PAK+O₃ te combineren, neemt de verwijdering van Benzotrazool en som 4- en 5- methyl-1H-benzotriazol toe in vergelijking met ozon, maar is nog steeds niet zo hoog als bij de 20 mg/l PACAS referentie.
 - Metropolol ook hoger bij combinatie dan ozon en beperkt hoger dan PACAS
 - Irbesartan is hoger bij combinatietechniek dan zowel de ozon en PACAS referentie.
 - Diclofenac wordt beter verwijderd met ozon dan met PACAS, op dit punt is de PAK+O₃ dan ook hoger dan PACAS.

Op basis van deze resultaten kan voorzichtig geconstateerd worden dat de combinatie van O₃ en PACAS tot een hogere verwijderingsefficiëntie leidt voor meerdere gidsstoffen, dit alles gebaseerd op de 11 NL gidsstoffen.

TABEL B6-4 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN 11 GIDSSTOFFEN: PAK+O₃ VOOR SITUATIE BIJ 7,5 MG PAK/L EN 0,3 DOSERING VAN O₃

	PACAS Leiden Noord	PAC+O ₃ **	referentie- O ₃ **	referentie- PACAS Papendrecht
	7,5 mg PAK/l	7,5 mg/L PAK- 0,33-0,57 g O ₃ /g DOC	0,5-0,71 g O ₃ /g DOC	20 mg/L
1,2,3-benzotrazool	57	78	67	89
Carbamazepine	28	89	88	80
Diclofenac	42	98	98	67
Gabapentine	65	79	75	65 (50 – 80)*
Hydrochloortiazide	53	84	83	79
irbesartan	42	83	73	65 (50 – 80)*
Metoprolol	71	88	79	83
som 4- en 5- methyl-1H-benzotriazol	55	80	65	95
Sotalol	50	98	99	85
Trimetoprim	95	95	95	100
venlafaxine	38	78	78	75 (70 – >80)
7/11	64	91	89	87
Gemiddelde	54	86	82	74
Aantal stoffen die >80% worden verwijderd.	1	8	5	6
Aantal stoffen die >70% worden verwijderd.	2	11	9	8

* Deze stoffen zijn niet gemeten in het PACAS Papendrecht onderzoek, daarom aangevuld met de waarden uit 'toetsen wijziging gidsstoffen aan 70% reductie'. Enige voorzichtigheid is geboden bij het combineren van deze waarden .

**Verwijderingsrendementen houden geen rekening met 70% deelstroom en zijn in de praktijk dus lager wanneer het totale rendement over de rwzi wordt vergeleken.

Vergelijking BODAC- Aurea (BO₃)

Het resultaat van de verwijdering door technologieën met BAKF (BODAC) en de combinatie BAKF+ozon (Aurea (BO₃)) wordt vergeleken met de referentie ozon in tabel B6-5.

- De dosering zoals opgenomen in de factsheets in bijlage 5, gaat uit van 0,3 g O₃ /g DOC voor Aurea (BO₃). Deze dosering is niet gemeten, vandaar dat de beide omliggende waarden zijn gepresenteerd in de tabel.
- Het totale rendement over de gehele rwzi is voor ozon en Aurea (BO₃) met 80-85% net iets hoger dan voor BODAC met 80%.
- Bij BODAC bestaat het verwijderingsmechanisme het oude GAK uit bioregeneratie: adsorptie én biologische afbraak. Bij het nieuwe GAK is dit vooral adsorptie aan het GAK en is de verwijdering van de stoffen die ook bij PACAS goed verwijderd worden (zie hierboven: benzotriazool en som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool) hoger dan bij het oude GAK.
- Wat betreft BODAC kan worden geconcludeerd:
 - Het verwijderingsrendement ligt gemiddeld lager wat resulteert in een lager verwijderingsrendement op 11 van de 11 gidsstoffen dan de andere in deze bijlage bekeken technieken.
 - Door het toevoegen van ozon nemen in het geval van Aurea (BO₃) de verwijderingsrendementen toe en ook het aantal stoffen dat een hoger verwijderingsrendement heeft dan 70%.
- Wanneer BAKF en ozon met elkaar worden vergeleken:
 - Wanneer de goed verwijderbare stoffen met BODAC (sotalol en hydrochloorthiazide) worden vergeleken met de goed verwijderbare stoffen door ozon, komen deze met elkaar overeen.
 - De 7 best verwijderbare stoffen zijn gelijk aan elkaar.
 - De twee stoffen die met ozon altijd een lager rendement hebben, benzotriazool en

- som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool, hebben bij BAKF een negatief rendement.
- Enige opvallend verschil is Carbamazepine dat met ozon heel goed wordt verwijderd en bij BAKF een negatief rendement heeft.
 - Wanneer Aurea (BO₃) wordt vergeleken met de referentie ozon, kan het volgende worden geconcludeerd:
 - Het is lastig een goede inschatting te maken van de individuele stoffen bij een dosering van 0,4 g O₃/g DOC en goede conclusies op basis hiervan te trekken, dus onderstaande is indicatief en gebaseerd op het gemiddelde van de twee gepresenteerde ozondoses.
 - De verwijderingsrendementen van benzotriazool en som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool zijn bij Aurea (BO₃) duidelijk lager dan bij de referentie ozon.
 - Voor de overige stoffen is het verwijderingsrendement zeer vergelijkbaar voor Aurea (BO₃) en de referentie ozon. BAKF alleen verwijdert ongeveer 7-8 van de 11 gidsstoffen tot een gemiddelde verwijdering die ongeveer 80% is. Daarnaast is het rendement voor 3-4 stoffen erg laag (<30% en negatieve waarden). Door de toevoeging van ozon worden meer stoffen verdergaand verwijderd en is de totale verwijdering hoger dan bij BAKF alleen.
 - De verwijderingsrendementen van Aurea (BO₃) zijn voor 9 van de 11 stoffen vergelijkbaar met de referentie ozon. Uitzondering hierop is benzotriazool en som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool, waardoor geconcludeerd kan worden dat ozon alleen meer stoffen op een hoger verwijderingsrendement verwijderd en dus een breder palet heeft dan Aurea (BO₃).

TABEL B 6-5 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN 11 GIDSSTOFFEN: BODAC, AUREA (BO₃) EN REFERENTIE OZON

	BODAC verblijftijd circa 23 min*		BAKF in de Aurea pilot**	Aurea (BO ₃) **	Aurea (BO ₃) **	referentie- O ₃ ***	referentie- O ₃
	Oud GAK	Nieuw GAK		0,2 g O ₃ /g DOC	0,4 g O ₃ /g DOC	0,5-0,7 mg O ₃ /mg DOC	****
1,2,3-benzotriazool	-63	67	10	35	60	66	77
carbamazepine	-7	62	-40	60	98	88	91
diclofenac	85	80	75	95	97	97	92
gabapentine	76	70	62	65	85	75	73
hydrochloorthiazide	79	80	80	86	80	83	79
irbesartan	30	55	20	60	70	72	69
metoprolol	68	83	>60	85	90	78	77
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	-54	78	-20	20	55	64	70
sotalol	95	90	85	100	100	99	93
trimethoprim	74	80	82	100	100	98	96
venlafaxine	80	70	65	80	90	78	78
7/11	79	83	74	85,9	95	87	86
Gemiddelde 11 gidsstoffen	42	74	44	69,2	84	74	81
Aantal stoffen >80%	3	6	3	6	8	5	5
Aantal stoffen >70%	4	8	4	6	9	9	9

* In de BODAC pilot is gewerkt met het GAK dat al jaren in de installatie op RWZI Emmen aanwezig is (oud GAK) en nieuw vers GAK. In de vergelijking van de verwijderingsrendementen is alleen gekeken naar die bij oud GAK.

**Verwijderingsrendementen houden geen rekening met 70% deelstroom en zijn in de praktijk dus lager wanneer het totale rendement over de rwzi wordt vergeleken.

*** Bron: PAK+O3 pilot

**** Bron: Mulder 2021, zie ook Tabel B6-1

Conclusie

Of een combinatie van technieken leidt tot een breder palet is afhankelijk van welke werkingsprincipes gecombineerd worden en of deze werkingsprincipes complementair aan elkaar zijn in de verwijdering van individuele gidsstoffen.

Er kan worden geconstateerd dat de combinatie van technieken met adsorptie en oxidatie tot een hogere verwijderingsefficiëntie (>70% en >80%) leiden voor meerdere van de NL gidsstoffen, dus een breder palet.

Wanneer biologische omzetting in een BAKF gecombineerd wordt met ozon (Aurea (BO₃)), dan laat deze een hogere verwijdering zien van meer stoffen dan alleen BAKF. Echter, de referentie van alleen ozon verwijdert meer stoffen met een hoger rendement dan de combinatie van biologie met actief kool en leidt de combinatie van technieken niet tot een breder palet.

BIJLAGE 7

CO₂-VOETAFDruk INVULBLAD

Onderwerp	Eenheid					1	2	3	4	
		RWZI	Ref - PACAS	Ref - Ozon	Ref - GAK	PAK+doek	PACAS Nereda	BODAC	BioGAK+lucht	
Hoeveelheden										
Aanvoer rioolwater	m³	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	
Influent CZV	kg	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	
Influent Nkj	kg	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	
Effluent Ntot	kg	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	
Verwijderde i.e. 150 g TZV	i.e.150 g TZV	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	
Behandelde i.e. in influent 150 g TZV	i.e.150 g TZV	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	
DOC effluent	mg/l	11	11	11	11	11	11	11	11	
Dimensionering verwijdering micro's										
Minimale jaarhoeveelheid nabehandeling	m3/jaar	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	
Behandelde jaarhoeveelheid nabehandeling	m3/jaar	5.365.500	7.665.000	5.365.500	5.365.500	5.365.500	7.665.000	5.365.500	6.130.000	
Geproduceerd slib	ton ontwaterd slib	6.100	6.379	6.100	6.100	6.579	6.379	6.176	6.185	
Drogestofgehalte slib	%	21,1%	22,1%	21,1%	21,1%	21,6%	22,1%	21,1%	21,1%	
Geproduceerd slib	ton ds	1.287	1.410	1.287	1.287	1.421	1.410	1.303	1.305	
Transport ontwaterd slib	km	100	100	100	100	100	100	100	100	
Transport ontwaterd slib	ton	6.100	6.379	6.100	6.100	6.579	6.379	6.176	6.185	
Inkoop energie rwzi exclusief verwijdering micro's										
Inkoop energie										
Inkoop elektriciteit	kWh	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	
Inkoop aardgas	Nm³	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	
Inkoop warmte	GJ	0	0	0	0	0	0	0	0	
Inkoop brandstoffen		0	0	0	0	0	0	0	0	
Diesel	kg	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	
Inkoop energie rwzi voor verwijdering micro's										
Inkoop energie										
Inkoop elektriciteit	kWh	0	68.985	515.088	4.380	98.571	230.000	223.840	178.201	
Overig invloed nabehandeling op rwzi										
Opvoeren rioolwater	meter	0	0	8	8	8	0	22	10	
Percentage spoelwater		0%	0%	0%	1%	5%	0%	1%	1%	
Gebruik spoelwater	m³	0	0	0	53.655	268.275	0	53.655	61.300	
Afvoeren spoelwater	m³	0	0	0	53.655	268.275	0	53.655	61.300	
Inkoop hulpstoffen										
Oplossing										
Actieve kool	kg	100%	0	122.640	0	83.200	53.655	122.640	13.333	11.520
Actieve kool geregenereerd	kg	100%	0	0	0	312.000	0	0	0	0
Actieve kool biologische oorsprong	kg	100%	0	0	0	0	0	0	0	0
Aluminiumchloride, hydraatvorm	kg	40%	0	0	0	0	0	0	0	0
Citroenzuur	kg	50%	0	0	0	0	0	0	0	0
IJzer(III)chloride	kg	40%	260.000	260.000	260.000	260.000	455.076	260.000	260.000	260.000
Methanol	kg	100%	0	0	0	0	0	0	0	0
Natriumhypochloriet	kg	15%	0	0	0	0	0	0	0	0
Natronloog, membraanproces	kg	50%	0	0	0	0	0	0	0	0
Natronloog, productiemix	kg	50%	0	0	0	0	0	0	0	0
Polymeer, kationisch, vloeibaar	kg	100%	23.168	22.556	23.168	23.168	26.280	22.556	23.456	23.492
Polyaluminiumchloride	kg	100%	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200	3.200
Waterstofperoxide	kg	50%	0	0	0	0	0	0	0	0
Zoutzuur, reactie propyleen en chloor	kg	36%	0	0	0	0	0	0	0	0
Zuurstof (vloeibaar)	kg	100%	0	0	354.123	0	0	107.310	0	0
Materialen										
Gewapend beton	m³	3.800	3.875	3.900	4.030	4.000	3.875	4.030	3.800	
Levensduur gewapen beton	jaar	30	30	30	30	30	30	30	30	

5a	5b	6a	6b	7	8	9	10	11	12	13	14	15
03-STEP (geen N + P)	03-STEP (incl N+P)	UpflowGAK- CarboPlus	UpflowGAK- DynaCarbon	ZF+UV/H ₂ O ₂	O ₃ +Ultrasound	PAK+O ₃	Microforce	Aurea (BO ₃)	DEXfilter	AdOx	NF+UV/H ₂ O ₂	O ₃ +keramischeMF
7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000
3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681
359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588
52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140
97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225
100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500
5.365.500	5.365.500	6.132.000	6.132.000	6.132.000	5.365.500	5.365.500	6.130.000	5.365.500	6.124.000	5.365.500	5.365.500	5.365.500
6.100	6.403	6.100	6.100	6.100	6.100	6.172	6.185	6.176	6.100	6.100	6.100	6.100
21,1%	21,1%	21,1%	21,1%	21,1%	21,1%	21,6%	21,1%	21,1%	21,1%	21,1%	21,1%	21,1%
1.287	1.351	1.287	1.287	1.287	1.287	1.333	1.305	1.303	1.287	1.287	1.287	1.287
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
6.100	6.403	6.100	6.100	6.100	6.100	6.172	6.185	6.176	6.100	6.100	6.100	6.100
1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548
3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000
419.000	419.000	78.244	125.029	6.223.980	518.000	592.724	416.840	253.339	4.999	206.188	2.089.069	783.363
8	8	8	18	8	8	8	8	8	8	8	0	8
1%	10%	0%	5%	1%	0%	0%	1%	1%	1%	4%	0%	10%
53.655	536.550	12.264	306.600	61.320	0	0	61.300	53.655	61.240	214.620	0	536.550
53.655	536.550	12.264	306.600	61.320	0	0	61.300	53.655	61.240	214.620	0	536.550
31.200	31.200	66.226	66.226	0	0	45.990	0	15.600	9.115	7.626	0	0
49.600	49.600	117.734	117.734	0	0	0	0	0	277.278	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	909.580	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	7.604	0	0	0	0	0	0	12.842	0