

PROOF OF CONCEPT EN LABORATORIUM- ONDERZOEK VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN UIT RWZI-EFFLUENT MET HET 03-STEP® FILTER



RAPPORT

2018

67

PROOF OF CONCEPT EN LABORATORIUMONDERZOEK
VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN UIT
RWZI-EFFLUENT MET HET O3-STEP® FILTER

RAPPORT

2018

67

ISBN 978.90.5773.826.5



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

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

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEUR(S) C.Y. de Jong - Witteveen+Bos
A.F. van Nieuwenhuijzen - Witteveen+Bos
A. Dekker - voorheen Witteveen+Bos
T.K. Liu - Witteveen+Bos, voorheen TU Delft
S.J.S. de Smet - TU Delft, voorheen Witteveen+Bos

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

J.P. van der Hoek - TU Delft / Waternet
S.G.J. Heijman - TU Delft
L.C. Rietveld - TU Delft
R. van der Aa - Waternet
M. Bechger - Waternet
N. Boelee - Nijhuis Industries
F. Groot - Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
M. Verhoeven - Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden
F. Visser - Waterschap Vallei en Veluwe
O. Helsen - Hoogheemraadschap van Delfland
B. Martijn - PWN-T
E. Staal - Cabot Norit
R. de Graaf - voorheen Cabot Norit
G.B.J. Rijs - Rijkswaterstaat
C. A. Uijterlinde - STOWA
M. Mulder - Mirabella Mulder Waste Water Management

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA STOWA 2018-67
ISBN 978.90.5773.826.5

COPYRIGHT Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

DISCLAIMER Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

TEN GELEIDE

Het O3-STEP® filterconcept is een veelbelovend concept om op grotere zuiveringen in één compacte zuiveringsstap nutriënten, zwevende stof én microverontreinigingen vergaand te verwijderen door de combinatie van ozonoxidatie en adsorptie aan actief kool.

De actuele technische, maatschappelijke en bestuurlijke aandacht voor de aanwezigheid van geneesmiddelen en andere (organische) microverontreinigingen in oppervlaktewater, grondwater en drinkwater vraagt om extra stappen op de waterzuiveringen. In 2017 is het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat gestart met de Ketenaanpak Medicijnresten uit Water. Vanuit de STOWA zijn recent een aantal onderzoeken afgerond, waaronder de 'Landelijke Hotspot Analyse Geneesmiddelen rwzi's' en de 'Verkenning technologische mogelijkheden voor verwijdering van geneesmiddelen uit afvalwater'. Een techniek die op korte termijn toepasbaar kan zijn is de combinatie van ozon met adsorptie aan actiefkool, het zogenaamde O3-STEP® filterconcept. Dit concept kan op grotere zuiveringen in één compacte nageschakelde zuiveringsstap nutriënten, zwevende stof én microverontreinigingen vergaand te verwijderen.

In dit project zijn op basis van het O3-STEP® filter een viertal concepten ontwikkeld met als doel een vergaande verwijdering van een bredere range aan microverontreinigingen met behoud van een vergaande nutriënten- en zwevende stofverwijdering. Dit rapport behandelt de theorie en beschikbare praktijkgegevens gerelateerd aan ozonoxidatie en actiefkool adsorptie, op basis waarvan de vier concepten zijn ontwikkeld. Hiervan zijn effectiviteit, kosten en duurzaamheid in kaart gebracht om het meest kansrijke concept vast te stellen. Dit concept is vervolgens op laboratoriumschaal getoetst.

In deze proof-of-principle testen is aangetoond dat de combinatie van ozonoxidatie en actiefkoolfiltratie inderdaad een bredere range microverontreinigingen verwijdert. De resultaten van dit traject zijn voldoende veelbelovend als basis voor vervolgonderzoek. Dit vervolg onderzoek zal zich kunnen richten op de volledige integratie van beide technieken in volcontinue bedrijfsvoering om gedurende langere periode de combinatie van nutriënten- én microverontreinigingenverwijdering aan te tonen.

Ir. Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

INTRODUCTIE

De aanwezigheid van microverontreinigingen in oppervlaktewater, grondwater en drinkwater wordt in toenemende mate als probleem gezien. Het streven om de aanwezigheid van deze stoffen in het watersysteem terug te dringen krijgt steeds meer bestuurlijke aandacht. Het rwzi-effluent, dat geloosd wordt op oppervlaktewater, is een belangrijke bron van de aanwezige microverontreinigingen en nutriënten in het oppervlaktewater. Omdat zowel microverontreinigingen als nutriënten aanpassingen vergen van het zuiveringsproces, kunnen maatregelen voor verwijdering van beide stofgroepen worden gecombineerd in één kosteneffectieve en doelmatige nageschakelde zuiveringsstap.

Dit rapport beschrijft een literatuurstudie en de daarop volgende laboratoriumtesten naar de mogelijkheden van zuiveringssystemen met GAC¹-filtratie in combinatie met voorgeschakelde ozonbehandeling om microverontreinigingen én nutriënten op een (kosten)effectieve wijze uit effluent te verwijderen. In dit onderzoek zijn vier zuiveringsconcepten ontwikkeld, die gebruik maken van ozondosering en GAC-filtratie, gecombineerd met chemische fosfaatverwijdering en biologische stikstofverwijdering. De volgende concepten zijn beschouwd:

- 1 O3-STEP® filter met externe (= buiten de rwzi-locatie) thermische regeneratie van de kool;
- 2 O3-STEP® filter met externe thermische regeneratie, met voorgeschakeld zandfilter voor nutriëntenverwijdering;
- 3 O3-STEP® filter met on-site regeneratie met O₃ (= buiten het 1-STEP® filter, op de rwzi-locatie);
- 4 O3-STEP® filter met in-situ (= in het 1-STEP® filter) regeneratie met O₃.

EFFECTIVITEIT

Het O3-STEP® filter concept verwijdert een breed spectrum aan microverontreinigingen, zwevende stof en nutriënten door de combinatie oxidatie, adsorptie en biologische omzetting van microverontreinigingen, naast precipitatie van fosfaat en denitrificatie van nitraat gecombineerd met filtratie. De bestaande praktijkervaringen met de verschillende deelprocessen, het inventarisatieonderzoek en het laboratoriumonderzoek levert een proof-of-principle voor een integraal O3-STEP® filter proces op zowel technische als technologische aspecten. De vier in dit rapport uitgewerkte concepten leveren naar verwachting een vergelijkbare effluentkwaliteit, maar onderscheiden zich door de zuiveringsconfiguraties en regeneratiemethoden.

KOSTEN

Concept 1, het O3-STEP® filter met externe thermische regeneratie, heeft de laagste kosten en heeft, op basis van de schaalgroottes van de Nederlandse rwzi's de voorkeur. Het O3-STEP® filter met voorgeschakeld zandfilter (concept 2) is niet kosteneffectief, omdat de extra investering niet wordt terugverdiend door de besparing in de verbruikskosten van de actieve kool. Concept 3, een O3-STEP® filter met on-site regeneratie van de verzadigde kool met O₃, wordt pas vanaf een schaal van 300.000 i.e. concurrerend met concept 1, op dit moment zijn er 20 tot 25 zuiveringen in Nederland van dit formaat, die naar verwachting niet allemaal zowel nutriënten als microverontreinigingen moeten verwijderen. Concept 4, een O3-STEP® filter met O₃-regeneratie van de kool in de GAC filters, is duurder dan concept 3 wegens de benodigde extra filters en de ozonbestendige uitvoering van de filters.

1 GAC = granular activated carbon, ofwel actieve kool in korrelvorm

De 'all in'-kosten van het O3-STEP® filter (concept 1) bedragen 0,21-0,25 EUR per m³ behandeld rwzi-effluent voor installaties vanaf 300.000 i.e. zuiveringscapaciteit en 0,25-0,32 EUR per m³ vanaf 100.000 i.e.. Er zijn in Nederland 90 tot 100 zuiveringen van circa 100.000 i.e. of groter. De totale jaarlijkse kosten bestaan voor het grootste deel uit kapitaalkosten. Deze werken het sterkste door bij kleinere schaalgrootte, waardoor de kosten per m³ bij 20.000 i.e. tweemaal zo hoog zijn dan bij een installatie met een capaciteit van 100.000 i.e.

Het O3-STEP® filter concept heeft lagere totale kosten dan alleen GAC-filtratie, omdat ozon een deel van de organische stoffen afbreekt die anders aan de kool zouden adsorberen, zodat de standtijd van het GAC verlengd wordt. De O3-STEP® filter concepten hebben hogere kosten dan ozonisatie + zandfiltratie of PAC²⁺ zandfiltratie. Daar staat een betere effluentkwaliteit tegenover, door de extra fosfaat- en nitraatverwijdering bij het O3-STEP® filter, daarnaast is in de dagelijkse praktijk van het 1-STEP® filter te zien dat het filter fluctuaties in effluentsamenstelling vanuit de zuivering verminderd, waardoor het een stabielere effluentkwaliteit oplevert. Het kostenverschil verdwijnt vrijwel geheel als de nutriëntenverwijdering bij de O3-STEP® filter concepten wordt weggelaten, waardoor het allemaal O₃-GAC filtersystemen worden.

De regeneratiekosten van GAC hebben een aanzienlijk aandeel in de OPEX-posten. Efficiënte uitvoeringen van thermische regeneratie, of alternatieve methoden zoals regeneratie met ozon of biologische regeneratie, kunnen mogelijk tot kostenbesparingen leiden. Alternatieve methoden kunnen ook uit oogpunt van duurzaamheid voordelen bieden, in de vorm van een lager verbruik aan energie en hulpstoffen, minder transport van actieve kool, lagere emissie naar de omgeving of een lagere reststoffenproductie.

VERVOLG

Aanbevolen wordt om binnen de het programma gewijd aan microverontreinigingen van STOWA het O3-STEP® filter concept voor de verwijdering van microverontreinigingen en nutriënten uit effluent door te ontwikkelen. De huidige studie laat zien dat het O3-STEP® filter het beste tot zijn recht komt op relatief grotere zuiveringen, circa 100.000 i.e. of groter. In Nederland zijn dit er 90 tot 100, waarvan circa een kwart meer dan 300.000 i.e. behandelt. Hiervan hebben niet alle zuiveringen te kampen met zowel nutriënten als microverontreinigingen, de huidige inschatting is dat het O3-STEP® filterconcept in Nederland toepasbaar is op tussen 10% en 20% van deze grotere zuiveringen, wat neerkomt op 10 tot 20 zuiveringen.

Op basis van de uitgevoerde haalbaarheidsstudie en proof-of-principle-onderzoek worden enkele essentiële aanbevelingen gedaan om de ontwikkeling van een (kosten)effectief zuiveringsconcept voor de verwijdering van microverontreinigingen en nutriënten uit water uit de afloop van de nabezinktank op korte termijn mogelijk te maken.

Het proof-of-principle van het O3-STEP® filter concept is in het kader van dit onderzoek uitgevoerd. Vervolgonderzoek is gewenst om het concept onder praktijkcondities te bevestigen. Concept 1, met thermische regeneratie van de verzadigde kool, kan hiervoor als basis worden gekozen. Het voorgestelde vervolgonderzoek geeft inzicht in de effectiviteit van het O3-STEP® filter proces, in de belangrijkste ontwerpparameters en mogelijke (kosten)optimalisaties. Dit onderzoek geeft antwoorden op nog openstaande onderzoeksvragen over het O3-STEP® filter: het effect van ozon op de denitrificatie en de werkelijke standtijd van het actieve kool als ook de regeneratie van het kool na verzadiging. Tevens kunnen de uitkomsten worden gebruikt

2 PAC = powdered activated carbon, ofwel actieve kool in poedervorm gedoseerd in het actiefslibproces of gedoseerd in secundair effluent in combinatie met zandfiltratie

als basis voor de verdere optimalisatie en opschaling van het concept tot volledige praktijk-schaal.

Het onderzoek wordt bij voorkeur uitgevoerd in afstemming met het de recent afgeronde en nog lopende demonstratieonderzoeken zoals Ozon+Zandfiltratie bij het project Zoetwaterfabriek rwzi De Grootte Lucht (Hoogheemraadschap van Delfland), het PACAS-poederkoolproject bij het Schone MaasWater-project van de Maas-waterschappen en Evides en het Gozond Waterproject op rwzi Wervershoof (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en PWN-T), ook dient het binnen het huidige STOWA programma “geneesmiddelen uit afvalwater” afgestemd te worden.

Omdat de haalbaarheid van GAC-filtratie sterk afhangt van optimale regeneratie van de verzadigde actieve kool, kunnen alternatieve regeneratietechnieken, zoals biologische GAC-regeneratie, nader worden onderzocht. De regeneratietechnieken kunnen eerst op kleinere schaal getest worden met actieve kool uit de bestaande installaties. Alvorens deze alternatieve technieken nader te onderzoeken is het aan te raden de regeneratie met bestaande regeneratie/reactivatietechnieken te testen en te optimaliseren op het kool in het O3-STEP® filter.

LIJST MET DEFINITIES

1-STEP® filter	One Step Total Effluent Polishing filter
AOC	assimilable organic carbon: assimileerbare organisch koolstof
AOP	advanced oxidation process: geavanceerde oxidatieve processen
biologisch filter	filter met actief gestimuleerd biologische processen
CAPEX	capital expenditures kapitaalkosten
Ct-waarde	concentratie (C) maal tijd (t); temperatuur afhankelijke indicatie voor de mate van inactivatie van een micro-organisme
CZV	chemisch zuurstof verbruik
DOC	dissolved organic carbon: opgelost organisch koolstof
DOP	dissolved organic phosphate, opgelost fosfaat
EPA	environmental protection agency
feed-back control	dosering reguleren aan de hand van metingen in de afvoer
feed-forward control	dosering reguleren aan de hand van metingen in de aanvoer
GAC	granular activated carbon: granulair actiefkool
i.e.	inwonerequivalent op basis van 150 g zuurstof per inwoner per dag
K _{OW} -coëfficiënt	octanol-water-partitiecoëfficiënt, een maat voor de adsorptie van een stof aan actiefkool.
KRW	kaderrichtlijn water
NA	not accepted in datavalidation: deze data is verworpen tijdens de datavalidatiestap
NBT	nabezinktank
O3GAC	AC-filter met ozonoxidatie voor verwijdering van microverontreinigingen
O3-STEP® filter	1-STEP® filter met ozonvoorbehandeling gericht op de verwijdering van microverontreinigingen, zwevende stof én nutriënten
OPEX	operating expenditures, operationele kosten
ODC	organics destruction cell
PAC	powdered activated carbon: poederkool of poeder actiefkool
regeneratie	het herstellen van een werkzame stof tot de beginwaarden. Thermische regeneratie van actiefkool wordt ook wel regeneratie genoemd.
rwzi	rioolwaterzuiveringsinstallatie

secundair effluent	effluent van een (ultra) laagbelaste biologische zuivering met verdergaande N- en P-verwijdering.
tertiair effluent	effluent van nabehandeling van effluent van een (ultra) laag belaste biologische zuivering gericht vergaande verwijdering van N, P en/of microverontreinigingen
UvW	Unie van Waterschappen
VEWIN	Vereniging van drinkwaterbedrijven in Nederland

Toelichting: **water uit de afloop van de nabezinktank** is het product van de conventionele biologische zuivering van communaal afvalwater voor de verwijdering van organische componenten en nutriënten tot aan de lozingseisen. Normaliter wordt dit water effluent genoemd. Binnen dit project wordt de nabehandeling van water uit de afloop van de nabezinktank bekeken dat is gericht op de verdergaande verwijdering van microverontreinigingen en nutriënten en vormt hiermee de nageschakelde, zuiveringsstap. Binnen dit rapport wordt dit nabehandelde water **effluent** genoemd.

Toelichting: de projectnaam O3GAC *[uitgesproken als "Ozon-GAC project"]* refereert naar het gecombineerde gebruik van ozon (O₃) en granulair actiefkool (GAC) om microverontreinigingen te verwijderen uit afvalwater. De projectnaam maakt geen onderscheid tussen het O3GAC filter of het O3-STEP® filter concept. Een O3GAC filter *[uitgesproken als "Ozon-GAC filter"]* is een combinatie van ozonbehandeling en granulair actiefkoolfiltratie *zonder* nutriëntenverwijdering. Het O3GAC filterconcept richt zich uitsluitend op het verwijderen van microverontreinigingen. Het O3-STEP® filter *[uitgesproken als "Ozon-STEP filter"]* is, een *ozone-supported* 1-STEP® filter. Het 1-STEP® filter is een speciale variant van een GAC filter omdat het 1-STEP® filter in staat is om, naast microverontreinigingen, ook nutriënten en zwevende stof vergaand te verwijderen.

DE STOWA IN HET KORT

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

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

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

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

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

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

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

PROOF OF CONCEPT EN LABORATORIUMONDERZOEK VERWIJDERING MICROVERONTREI- NINGEN UIT RWZI-EFFLUENT MET HET O3-STEP® FILTER

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	LIJST MET DEFINITIES	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INTRODUCTIE	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel van dit rapport	3
1.3	Leeswijzer	3
2	THEORETISCH KADER	5
2.1	Ozondosering	5
2.1.1	Algemeen	5
2.1.2	Aanmaak, dosering en menging	7
2.1.3	Sturing en control	8
2.1.4	Bromaat	8
2.2	GAC-filtratie	8
2.2.1	Algemeen	8
2.2.2	Biologische GAC-filtratie	9
2.2.3	Reactivatie en regeneratie van actiefkool	10
2.3	Gecombineerde ozondosering en GAC-filtratie	12
2.4	Organics Destruction Cell (ODC)	13
2.5	Ontwerpparameters	15
2.6	Aandachtspunten	16

3	CONCEPTVORMING EN SELECTIE	18
3.1	Uitgangspunten en ontwerpcriteria	18
3.1.1	Samenstelling van secundair effluent	18
3.1.2	Schaalgrootte	19
3.1.3	Ontwerpdebiet en pompvermogen	19
3.1.4	Standtijd GAC	19
3.1.5	Ozondosering	20
3.1.6	Kwaliteit lozingen	20
3.1.7	Algemene kostenuitgangspunten	22
3.1.8	Ontwerpparameters conceptontwikkeling	23
3.2	Technology readiness level regeneratietechnieken	25
3.3	Conceptbeschrijving	26
3.3.1	Concept 1: O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie)	26
3.3.2	Concept 2: Zandfilter + O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie)	28
3.3.3	Concept 3: O3-STEP® filter (on-site GAC-regeneratie met ozon)	30
3.3.4	Concept 4: O3-STEP® filter (in-situ GAC-regeneratie met ozon)	31
4	KOSTENCALCULATIE EN VERGELIJKING	33
4.1	Inleiding	33
4.2	Kostenberekening concept 1: O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie)	33
4.3	Kostenberekening concept 2: Zandfilter + O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie)	34
4.4	Kostenberekening concept 3: O3-STEP® filter (on-site GAC-regeneratie met ozon)	35
4.5	Kostenberekening concept 4: O3-STEP® filter (in-situ GAC-regeneratie met ozon)	36
4.6	Vergelijking van de kosten	36
4.7	Kostenspecificaties regeneratie	39
5	GEVOELIGHEIDSANALYSE EN INTERPRETATIE	41
5.1	Algemene gevoeligheid	41
5.2	Specifieke gevoeligheid per concept	43
5.3	Uitsplitsing kostenposten	44
5.4	Vergelijking kosten met voorgaande STOWA-projecten	45
5.4.1	Aanpassing voorziening ozonbestendigheid	46
5.4.2	Kosten voor verwijdering van microverontreinigingen versus nutriënten	47
5.5	Indicatieve kwalitatieve vergelijking van alternatieven	48
5.5.1	Effluentkwaliteit - chemisch	48
5.5.2	Effluentkwaliteit - pathogenen	49
5.5.3	Effluentkwaliteit - ecotoxisch	49
5.5.4	Energie en reststoffen	49
5.5.5	Bedrijfsvoering	50
6	TUSSENCONCLUSIES CONCEPTONTWIKKELING	51
6.1	Tussenconclusie	51
6.2	Onderzoeksvragen voor praktijkonderzoek	52
7	PROOF-OF-PRINCIPLE	53
7.1	Onderzoeksvragen en -opzet	53
7.2	Methode	54
7.3	Uitgangspunten en randvoorwaarden van het onderzoek	56
7.4	Resultaten laboratoriumonderzoek	58
7.4.1	Ozon	59
7.4.2	GAC	62
7.4.3	Ozon + GAC	65

7.5	Resultaten modellering	68
7.5.1	Doorbraakcurven	68
7.5.2	Model vs. Praktijk rwzi	72
7.5.3	Samenvatting en terugblik	73
7.5.4	Bromaatvorming	74
7.6	Implicaties voor uitgangspunten	74
7.6.1	Ozondosering	74
7.6.2	Verblijftijd ozonreactor	75
7.6.3	Bedhoogte actiefkoolfilter	75
7.6.4	Standtijd actiefkoolfilter	75
8	CONCLUSIE EN AANBEVELING	77
8.1	Algemeen	77
8.2	Conclusies over het O3-STEP® filter concept	78
8.2.1	Technisch en technologisch haalbaar	78
8.2.2	Financieel concurrerend	78
8.2.3	Verwijderingsprestaties en hoogwaardige waterkwaliteit	79
8.2.4	Alternatieven voor thermische regeneratie zijn wenselijk	80
8.3	Onderzoeksvragen voor vervolgonderzoek	80
8.4	Aanbevelingen	81
8.4.1	Integrale en locatiespecifieke aanpak microverontreinigingen	81
8.4.2	Demonstratieonderzoek	81
8.4.3	Verkenning en ontwikkeling van alternatieve regeneratiemethoden	81
8.4.4	Inspelen op recente ontwikkelingen	82
9	REFERENTIES	83
BIJLAGE 1	Ozone chemistry	87
BIJLAGE 2	Invloed van menging op oxidatie & desinfectie	90
BIJLAGE 3	Berekening energieverbruik	91
BIJLAGE 4	Minutes of workshop	92
BIJLAGE 5	Ontwerp en kostenberekening concepten	99
BIJLAGE 6	Overzicht van de jaarlasten per concept bij een grootte van 100.000 i.e.	122
BIJLAGE 7	Overzicht van de kosten per m3 secundair effluent	123

1

INTRODUCTIE

1.1 AANLEIDING

De aanwezigheid van microverontreinigingen in oppervlaktewater, grondwater en drinkwater en het reduceren hiervan vanuit waterstromen krijgt recentelijk steeds meer bestuurlijke aandacht. Dit is te zien in de beleidsbrief Waterbeleid - Waterkwaliteit/zoetwater en waterketen, d.d. 25 november 2015 van Minister mw. drs. M.H. Schultz van Haegen aan de Tweede Kamer, staatsecretaris Mansveld en drinkwaterbedrijven en waterschappen [26, 60], en meer recent in de beleidsbrief Ketenaanpak medicijnresten uit water, d.d. 19 oktober 2017 van Staatssecretaris S.A.M. Dijksma aan de Tweede Kamer [44]. Naast het, naar verwachting, in de nabije toekomst invoeren van nieuwe emissie-eisen voor microverontreinigingen worden door de vertaling van de Europese kaderrichtlijn water (KRW) van oppervlaktewater naar rwzi-emissies de lozingseisen voor nutriënten nog steeds strikter. Waterschappen moeten daarom de rioolwaterzuivering steeds geavanceerder uitvoeren om dergelijke stoffen te kunnen verwijderen en ook drinkwaterbedrijven die vanuit oppervlaktewater drinkwater maken moeten in hun productie steeds meer rekening hiermee houden. Het belang van een integrale aanpak voor verwijdering van microverontreinigingen en nutriënten in de waterketen is daarbij urgent voor zowel drinkwaterbedrijven en waterschappen om de chemische en ecologische kwaliteit van het watersysteem en de drinkwaterbronnen te kunnen blijven garanderen.

AFBEELDING 1.1

NAGESCHAKELDE BEHANDELING DOOR ACTIEFKOOLFILTRATIE MET HET 1-STEP® FILTER OP RWZI HORSTERMEER (WATERNET)



Uit eerder onderzoek van STOWA [48] blijkt dat de huidige rwzi's met actief-slibsystemen aanpassingen en aanvullingen nodig hebben om een effluentkwaliteit die geschikt is om te lozen op gevoelige wateren te behalen. Dergelijke, veelal nageschakelde, systemen gericht op de vergaande verwijdering van een of meer nutriënten zijn op verschillende rwzi's in Nederland reeds toegepast, waaronder rwzi De Groote Lucht (Hoogheemraadschap van Delfland), rwzi Horstermeer (Waternet), awzi Leiden-Noord (Hoogheemraadschap van Rijnland), rwzi Amersfoort, rwzi Veenendaal (Waterschap Vallei en Veluwe), Land van Cuijk (Waterschap Aa en Maas) [47]. Op rwzi Horstermeer (zie afbeelding 1.1) wordt al actiefkoolfiltratie toegepast.

Onderzoek uitgevoerd in Nederland [47–49] en eerste praktijktoepassingen in Zwitserland en Duitsland [53] hebben aangetoond dat oxidatieve en/of adsorptieve technieken doelmatig zijn om microverontreinigingen uit de afloop van de nabezinktank te verwijderen. Hiervoor zijn verschillende uitvoeringsvormen beschikbaar die momenteel doorontwikkeld worden voor toepassing op rwzi's. In STOWA-verband lopen daarom een aantal onderzoekslijnen:

- dosering van poederkool aan actief-slibsystemen (als onderdeel van het SchoneMaasWater-project = geïntegreerd binnen de conventionele zuivering);
- nageschakelde ozonoxidatie, zandfiltratie en waterharmonica (onderdeel van de Zoetwaterfabriek rwzi De Groote Lucht, Hoogheemraadschap van Delfland = nageschakelde zuivering);
- nageschakelde ozonoxidatie met ceramische membraanfiltratie (als onderdeel van het Gozond Water-project op rwzi Wervershoof, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier = nageschakelde zuivering);
- nageschakelde granulair actiefkoolfiltratie ondersteund door ozonoxidatie (O3-STEP® filter, Waternet rwzi Horstermeer = nageschakelde zuivering).

Dit rapport gaat over deze laatste onderzoekslijn: het *ozon-supported* 1-STEP® filter ofwel O3-STEP® filter. Dit filterconcept bouwt voort op de kennis opgedaan in een serie STOWA onderzoeken. In 2005 zijn in het rapport “Verkenningen zuiveringstechnieken en KRW” een drietal zuiveringsscenario's opgesteld voor de verwijdering van rwzi-relevante KRW-stoffen [37]. Hierin zijn de drie opeenvolgende stappen van chemische fosfaatverwijdering, biologische stikstofverwijdering en actiefkoolfiltratie voorgesteld voor vergaande nutriëntenverwijdering om KRW-conform effluent te produceren.

Dit onderzoek vormde de inspiratie om van 2005 tot 2013 het 1-STEP® filter te ontwikkelen en bouwen op rwzi Horstermeer. Dit filter combineert de bovengenoemde drie stappen in 1 filterunit [50, 52]: de full-scale 1-STEP® filter blijkt langdurig zeer effectief nutriënten én zwevende stof vergaand te kunnen verwijderen. Op het gebied van microverontreinigingen laat het filter nog te wensen over: een aantal stoffen wordt niet goed adsorptief verwijderd en de standtijd van het actiefkool is aan de korte kant om het een economisch rendabel proces te maken.

In 2009 is op de awzi Leiden Zuid-West aangetoond dat voor verwijdering van microverontreinigingen uit rwzi-effluent ozonbehandeling de meer doelmatige optie is in vergelijking met bijvoorbeeld waterstofperoxide/UV omdat ozon een lagere CAPEX en OPEX met zich meebrengt en beduidend minder energie verbruikt bij gelijke verwijderingsprestaties [49]. Een nadeel aan ozon is dat niet alle stoffen goed oxidatief verwijderd worden en dat het oxidatieproducten (metaboliëten) produceert.

De in dit rapport voorgestelde combinatie van de succesvol bewezen 1-STEP® filter met een ozonvoorbehandeling komt voort uit deze gecombineerde kennis. Door de combinatie van actiefkooladsorptie in het (nutriënten verwijderende) 1-STEP® filter met ozonoxidatie kan theoretisch gezien een bredere range microverontreinigingen verwijderd worden: sommige stoffen zijn goed oxidatief te verwijderen, andere stoffen worden specifiek door adsorptie verwijderd. Door de ozonbehandeling worden meer stoffen (deels) afgebroken, waardoor de standtijd van het kool toeneemt. De afbraakproducten, die onvermijdelijk zijn bij oxidatie-technieken, worden door het actiefkoolfilter tegengehouden.

Deze combinatie van chemische oxidatie en biologische actiefkooladsorptie wordt al toegepast in de drinkwaterbereiding voor desinfectie en verwijdering van microverontreinigingen uit oppervlaktewater (o.a. Waternet-productielocatie Weesperkarspel, Waternet-productielocatie Leiduin, PWN-productielocatie Andijk, Evides-productielocatie Beerenplaat). Het O3-STEP® filter voegt hier een extra uitdaging aan toe: de vergaande chemisch-biologische nutriëntenverwijdering. De toepassing van deze gecombineerde technieken op water uit de afloop van de nabezinktank is tevens vrijwel onbekend terrein.

1.2 DOEL VAN DIT RAPPORT

Het hoofddoel van de O3-STEP® filter toepassing is het realiseren van een effectieve nabehandeling van de afloop van de nabezinktank rwzi-effluent, gericht op het verwijderen van een brede range aan microverontreinigingen zoals medicijnen, bestrijdingsmiddelen en metalen in combinatie met vergaande nutriëntenverwijdering op basis van GAC-filtratie met fysisch/chemische fosfaatverwijdering en biologische stikstofverwijdering in combinatie met voorgeschakelde ozonoxidatie.

Het doel van dit rapport is om de ontwikkeling en de haalbaarheid van het O3-STEP® filter toe te lichten op basis van literatuuronderzoek, ontwerpstudie en proof-of-principle laboratoriumtesten. Dit rapport vormt de basis voor verdergaand (demonstratie-)onderzoek en praktijktoepassing om microverontreinigingen, nutriënten en zwevende stof in één keer compact vergaand uit rwzi-effluent te verwijderen.

Op basis van literatuurgegevens zijn ontwerpparameters vastgesteld. Deze dienen als input voor de ontwerpstudie om verschillende filterconcepten met elkaar te vergelijken op basis van kosten, duurzaamheid en verwijderingsprestaties. Het meest kansrijke concept is in het proof-of-principle onderzoek uitgewerkt om daarmee het demonstratieonderzoek gericht uit te kunnen voeren.

1.3 LEESWIJZER

Dit rapport is onderverdeeld in drie delen. Het eerste deel (Hoofdstuk 2) schetst vanuit literatuur het theoretische kader van GAC-filtratie, ozondosering en de regeneratie van GAC. Ook wordt ingegaan op het combineren van technieken en wordt gekeken naar eventuele knelpunten. Het hoofdstuk eindigt met enkele ontwerpparameters van de behandelde technieken. De theorie is gehaald uit bestaande literatuur en praktijkervaringen.

Op basis van de theorie uit hoofdstuk 2 zijn in het tweede deel van dit rapport (hoofdstuk 3 tot en met 5) een aantal verschillende concepten opgesteld voor het verwijderen van microverontreinigingen en nutriënten door middel van ozondosering en GAC-filtratie. Hoofdstuk 3 geeft

de verschillende concepten weer. De voor- en nadelen van verschillende concepten worden ook in dit hoofdstuk behandeld en de varianten die potentie hebben zijn verder uitgewerkt in een ontwerp.

Vervolgens worden de kosten van de concepten met elkaar vergeleken in hoofdstuk 4, waarna in hoofdstuk 5 de gevoeligheid en interpretatie hiervan wordt bediscussieerd en een vergelijking wordt gemaakt met alternatieve verwijderingsmethoden voor microverontreinigingen.

Hoofdstuk 6 sluit het tweede deel af. In dit hoofdstuk worden de resultaten uit de conceptvorming samengevat en worden de onderzoeksvragen voor de praktijkonderzoeken opgesteld.

Het derde deel van dit rapport gaat in op het proof-of-principle onderzoek op basis van de in hoofdstuk 2-5 verkregen onderzoeksvragen. De proof-of-principle is uitgevoerd op laboratoriumschaal en focust op de vraag wat het combinatie-effect is van ozon en GAC-filtratie. De resultaten van dit laboratoriumonderzoek zijn beschreven in hoofdstuk 7. In dit hoofdstuk worden ook de implicaties op de uitgangspunten van hoofdstuk 3-5 behandeld.

Hoofdstuk 8 sluit tenslotte het rapport af. Dit hoofdstuk behandelt de conclusies van het gehele rapport. In dit hoofdstuk worden daarnaast aanbevelingen gedaan vervolgonderzoek op pilot- of demonstratieschaal. Hoofdstuk 8 kijkt tenslotte ook vooruit naar de full-scale toepassingsmogelijkheden van het O3-STEP® filter concept.

2

THEORETISCH KADER

Ozondosering en GAC-filtratie worden individueel al geruime tijd toegepast in waterzuiveringsprocessen. Zowel op drinkwaterproductielocaties als op rwzi's. Ook in de industrie worden deze technieken toegepast op proceswater en afvalwaterstromen. Nederlandse waterbedrijven zijn veelal terughoudend in de toepassing van ozonisatie. Potentiële vorming van bromaatverbindingen uit, het in oppervlaktewater voorkomende, bromide door ozonoxidatie en de mogelijke carcinogene eigenschappen die hieraan worden toegeschreven weerhouden veel waterbedrijven van de toepassing van ozonisatie. In de Nederlandse drinkwatersector wordt chemische oxidatie daarom veelal gerealiseerd door UV- of UV/H₂O₂-processen, veelal gevolgd door biologische actiefkoolfiltratie (BAKF).

In de loop van de jaren zijn verschillende individuele onderzoeken naar zowel ozondosering als GAC-filtratie gedaan; voornamelijk wetenschappelijk onderzoek (zie hoofdstuk 9, Referenties). Op het gebied van verdergaande effluentbehandeling op rwzi's geeft het pilotonderzoek op de rwzi Leiden Zuid-West [49] een goed inzicht in GAC-filtratie in combinatie met verschillende oxidatietechnieken zoals ozonisatie. Over het toepassen van een combinatie van de twee technieken op rwzi's is echter weinig bekend.

Hoewel ozondosering en GAC-filtratie afzonderlijk goed functioneren zijn ze niet in staat om het totale scala aan microverontreinigingen te verwijderen. Door combinatie van oxidatie, biologische omzetting en adsorptie wordt een breder scala aan verontreinigingen verwijderd. Daarnaast zorgt ozon ervoor dat een groter deel van de verontreinigingen biologisch afbreekbaar wordt, waardoor er meer verwijderd kan worden in een biologisch GAC-filter. Dit heeft ook een positief effect op de standtijd van het GAC.

2.1 OZONDOSERING

2.1.1 ALGEMEEN

Terwijl actiefkooladsorptie, ionenwisseling en/of bepaalde membraanprocessen (nanofiltratie, omgekeerde osmose), microverontreinigingen uit de waterfase kunnen verwijderen, wordt oxidatie veelal gebruikt voor de oxidatieve omzetting van microverontreinigingen. Organische componenten worden zodoende volledig geoxideerd en/of beter beschikbaar gemaakt voor biologische omzettingen. Hierdoor blijven er meer adsorptieplekken over in de kool, waardoor de standtijd verlengd kan worden. Ozonisatie is een bewezen en redelijk frequent toegepast oxidatieproces in industrie en (Angelsaksische) drinkwaterinstallaties. Ozondosering kan naast desinfectieproces ook toegepast worden als een (geavanceerd) oxidatieproces (AOP). AOP's zetten organische en anorganische stoffen in afvalwater om door middel van directe oxidatie via O₃ en indirecte oxidatie via hydroxyl-radicalen (·OH, ofwel OH-radicalen). In sommige gevallen wordt ozondosering gecombineerd met het doseren van waterstof peroxide (H₂O₂). Dit zorgt voor extra vorming van de gewenste OH-radicalen [35].

Ozonchemie is complex vanwege de hoge reactiviteit van het ozonmolecuul met tal van stoffen in het water.

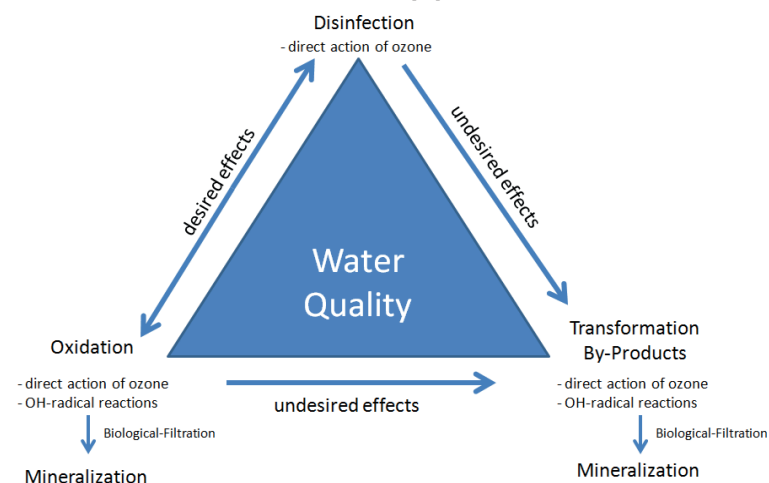
In bijlage I (Engelstalig) wordt uitgebreid ingegaan op de reacties en bijbehorende vergelijkingen van ozonchemie.

Ozon heeft als voordeel ten opzichte van PAC dat het geen (vast) residu oplevert, maar levert wel afbraakproducten in de waterfase. Deze afbraakproducten worden ook wel metabolieten genoemd. Bij de juiste dosering kan ozon ook een desinfecterende werking hebben. Dit geeft de mogelijkheid om de kwaliteit van het water nog verder te verbeteren [56].

Desinfectie door middel van ozon is afhankelijk van de Ct-waarde. De Ct-waarde is een indicatie voor de mate van inactivatie van een micro-organisme als gevolg van oxidatie. Dit is het product van de ozonconcentratie (C) en de contacttijd (t). De voor een bepaalde inactivatie benodigde Ct-waarde is temperatuurafhankelijk en verschillend per micro-organisme. Bij hoge concentraties opgelost organisch koolstof (DOC) is desinfectie lastig omdat het ozon en de ontstane OH-radicalen eerst met DOC reageren.

AFBEELDING 2.1

GEWENSTE EN ONGEWENSTE EFFECTEN VAN OZONDOSERING [61]



Omdat ozon (O_3) een zeer sterke oxidator is, reageert het relatief snel met organisch materiaal, waaronder microverontreinigingen. Deze microverontreinigingen oxideren deels via van een directe reactie met het ozon en deels indirect via complexe reacties met OH-radicalen die bij het uiteenvallen van ozon in water ontstaan. OH-radicalen zijn nog sterkere oxidatoren dan ozon (8). Microverontreinigingen die door middel van oxidatie worden afgebroken vallen uiteen in kleinere, minder schadelijke of biologisch afbreekbare moleculen [64]. Vergelijkingen van een aantal van deze reacties staan in bijlage I.

De ontstane afbraakproducten veroorzaken een toename in het biologisch afbreekbaar koolstofgehalte (AOC). Nabehandeling met een biologisch filter is essentieel om ook deze afbraakproducten uit de waterstroom te verwijderen [62]. Dit biologische filter kan zowel een GAC- als een zandfilter zijn.

Een belangrijk aandachtspunt voor ozon is het instabiele karakter en de noodzakelijkheid van goede veiligheidsmaatregelen aangezien ozon een reactieve toxische verbinding is [39]. De installaties voor ozonbehandeling moeten vervaardigd worden van corrosiebestendige

materialen zoals roestvrij staal. Ook de eventuele vorming van bromaten is ongewenst. Bromaatverbindingen ontstaan door oxidatie van, in de waterbron aanwezig, bromide. Hier wordt verder op in gegaan in paragraaf 2.1.4.

2.1.2 AANMAAK, DOSERING EN MENGING

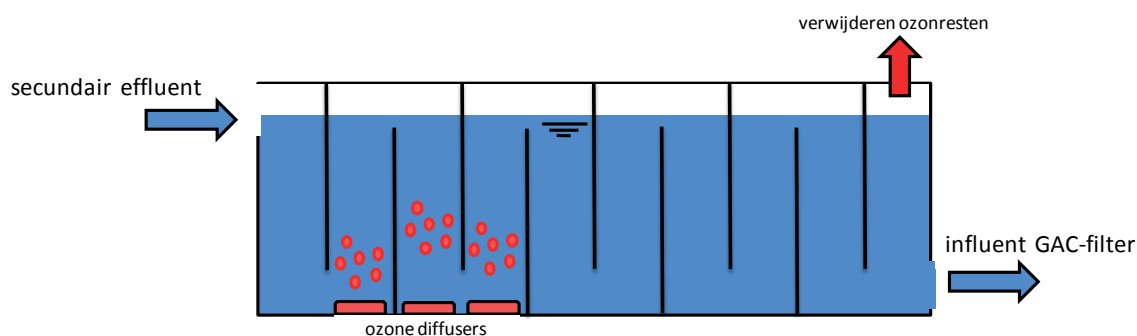
Vanwege de relatief korte halfwaardetijd (circa 3 dagen bij 20°C) wordt ozon altijd on-site geproduceerd in een ozongenerator. De meeste ozongeneratoren werken op basis van het zogenaamde 'corona-discharge'-principe. Door een hoge spanning ontleiden zuurstofmoleculen in losse atomen waarvan een aantal samen ozon (O_3) vormen en de rest weer zuurstof (O_2) vormt. Als aanvoergas kan worden gekozen voor gewone lucht of pure zuurstof. Pure zuurstof geeft een hogere concentratie ozon in het geproduceerde gas (10-15%) dan gewone lucht (2-5%). Bij menging met water wordt de halfwaardetijd van ozon nog korter; ongeveer 30 minuten bij 20°C [36].

De twee meest voorkomende systemen voor ozondosering zijn de directe dosering (afbeelding 2.2) en deelstroomdosering (afbeelding 2.3). Omdat ozon een instabiel molecuul is dat snel reageert, moet ozon snel en evenredige over het water verspreid worden door turbulente stromingscondities of menging. Bij een inefficiënte verdeling zal plaatselijk een overschot aan ozon ervoor zorgen dat er ongewenste reacties ontstaan tussen ozon en de eerder gevormde OH-radicalen. Hierbij worden minder reactieve producten gevormd [9].

Tegelijkertijd zal in minder bedeelde regio's te weinig ozon aanwezig zijn om alle verontreinigingen te oxideren. Goede verspreiding van ozon via een deelstroomsysteem kan een vermindering in ozongebruik opleveren tot 15% [32] ten opzichte van ozondosering met een beluchtingsbak.

Bij directe dosering in een zogenaamde beluchtingsbak wordt het effluent van de nabezinktank belucht met ozon waarna het in de contactkamers de tijd krijgt te reageren. Aan het eind van de bak worden eventuele ozondampen afgevoerd en gezuiverd via een ozondestructiesysteem [39].

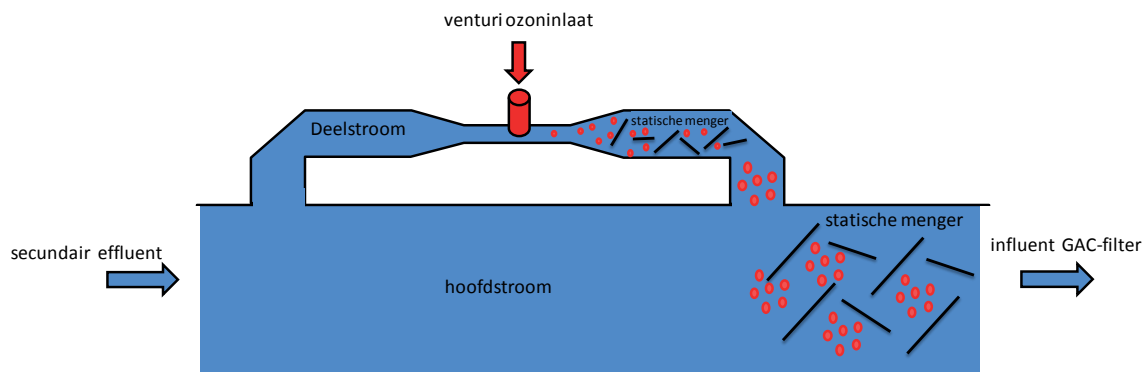
AFBEELDING 2.2 OZONDOSERING VIA BELUCHTINGSBAK



In de deelstroomdosering wordt een klein deel van de waterstroom door een aparte deelstroomleiding gepompt waarin het ozonhoudende gas wordt toegevoegd. Een statische menger verdeelt het gas evenredig over het water. Vervolgens wordt het gas-watermengsel weer bij de hoofdstroom gevoegd en volgt een tweede statische menger [32].

In bijlage II wordt het doseer- en mengaspect uitgebreider toegelicht.

AFBEELDING 2.3 OZONDOSERING VIA DEELSTROOM EN STATISCHE MENGERS



2.1.3 STURING EN CONTROL

De regulering van de ozondosering gebeurt op basis van feed-forward control, feed-back control, of een combinatie van beide [65, 69]. De metingen worden doorgaans uitgevoerd met UV-meetapparatuur. Ozon wordt ook gestuurd op aanwezige rest-ozon in effluent en in het afgas om overdosering te voorkomen. Aangezien deze methodiek relatief grof is, wordt de UV-methodiek en debiet gestuurde dosering hier aanvullend op toegepast.

Deze meetapparatuur meet de absorptie van UV-stralen van verschillende golflengtes. Op basis hiervan kan de samenstelling van het water en de daar bijhorende vereiste hoeveelheid ozon bepaald worden. In de praktijk blijkt dat bij relatief stabiele DOC-concentraties in de afloop van de nabezinktank kan worden volstaan met een debietproportionele ozondosering. Hierbij dient dan wel rekening gehouden te worden met verschillen in zowel samenstelling als hoeveelheid tussen DWA en RWA zodat in deze situaties geen onder- en overdosering optreedt.

2.1.4 BROMAAT

In bromidehoudend water kan ozonisatie ervoor zorgen dat bromaat gevormd wordt. Hiermee moet met o.a. de ozondosering rekening gehouden worden. Door minder ozon te doseren is de kans op bromaatvorming lager. Per water moet er dus uiteindelijk gekeken worden wat de optimale dosering is. Bromaatvorming is ook afhankelijk van de hoeveelheid bromide in het te behandelen water. Met labtests kan voorspeld worden wat de bromaatvorming wordt bij welke ozondosering. Bromaat die toch gevormd wordt tijdens de ozonisatie worden niet goed verwijderd in de meeste GAC filters. Of bromaat omgezet wordt hangt af van het katalytische vermogen van het GAC (het type kool) en de EBCT [8, 45]. Een biologisch actief GAC filter is beter in staat om bromaat te verwijderen. Dat bromaat niet goed verwijderd wordt is ook te zien in Waternet-productielocaties, Weesperkarspel en Leiduin waar minder dan 10% van het gevormde bromaat wordt verwijderd in de GAC filters. Bromaat is daarom wel een punt van aandacht bij het toepassen van oxidatie technieken zoals ozonisatie.

2.2 GAC-FILTRATIE

2.2.1 ALGEMEEN

Granulair Activated Carbon (GAC) filtratie, oftewel granulair actiefkoolfiltratie, wordt gebruikt bij zowel drink- als afvalwaterbehandeling. GAC wordt gebruikt voor het adsorberen van opgelost organisch materiaal waaronder microverontreinigingen, sporen van zware metalen en in het water opgeloste nutriënten zoals stikstof, en sulfide [55]. In een GAC-filter met koolstofbrondosering en biomassa kan door denitrificatie nitraat worden verwijderd.

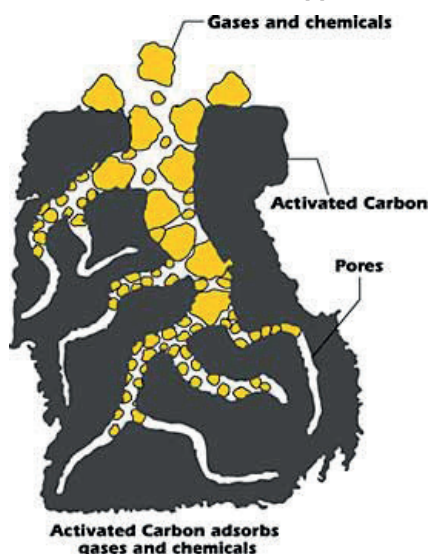
Actiefkool heeft een zeer fijne structuur met een grote hoeveelheid poriën. De verontreinigingen worden in deze poriën opgenomen. In afbeelding 2.4 is een porie van een koolstofdeeltje schematisch weergegeven.

De mate waarin specifieke verontreinigingen zich binden aan kool wordt aangegeven met de K_{OW} -coëfficiënt. Hoe hoger de K_{OW} -coëfficiënt van een verontreiniging, des te slechter oplosbaar in water en dus beter adsorbeerbaar deze verontreiniging is [14]. Het verstopt raken van de poriën, ook wel pore-blocking genoemd, is een negatief effect wat wordt veroorzaakt door microbiële deeltjes, zwevende stof en andere fijne vervuilers [14]. Deze kleine deeltjes blokkeren de poriën van de kooldeeltjes en voorkomen dat andere verontreinigingen geadsorbeerd kunnen worden.

Adsorptie aan actiefkool is een evenwichtsproces. Dit houdt in dat als het water weinig verontreinigingen bevat en het actiefkool juist veel, het proces van adsorptie verandert in desorptie (afhankelijk van type kool en soort verontreiniging) en het kool juist vervuilingen af kan staan in plaats van opneemt.

Naast adsorptie speelt de in het GAC-filter aanwezige biomassa een belangrijke rol bij het verwijderen van de microverontreinigingen en nutriënten [14]. Om nutriëntenverwijdering te stimuleren kunnen chemicaliën worden gedoseerd zoals methanol voor extra denitrificatie en metaalzouten voor fosfaatverwijdering door coagulatie [14].

AFBEELDING 2.4 PORIESTRUCTUUR GRANULAIR ACTIEFKOOL [2]



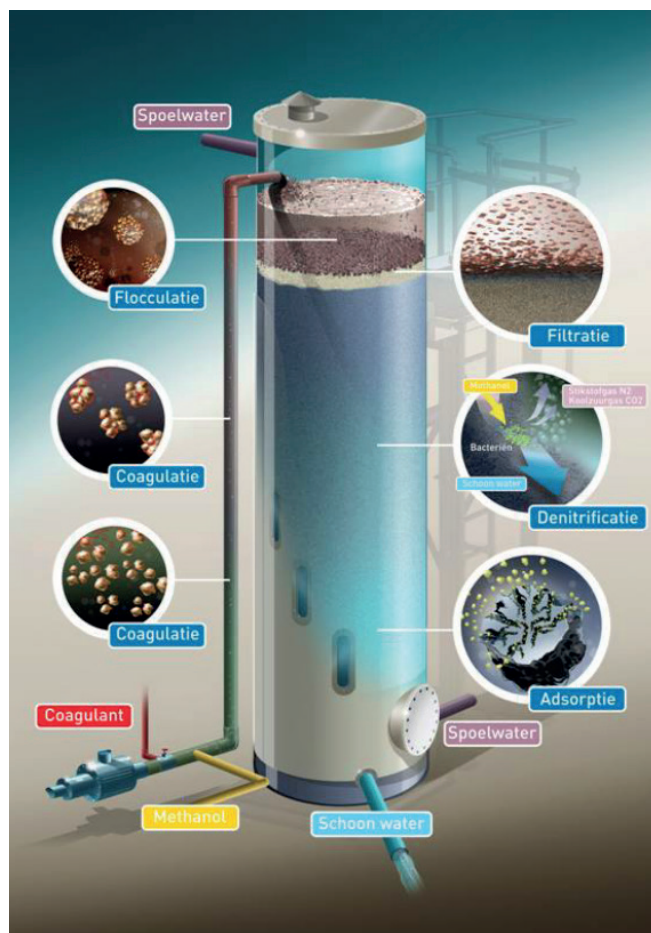
2.2.2 BIOLOGISCHE GAC-FILTRATIE

Een GAC-filter kan uitgebreid worden met biologische processen waardoor ook nutriënten (voornamelijk nitraat) en biologisch afbreekbare microverontreinigingen actief verwijderd kunnen worden. Door de verwijdering van biologisch afbreekbare verontreinigingen kan de standtijd van het GAC verlengd worden. In de drinkwatervoorziening is daarom biologische actiefkoolfiltratie gangbaar.

Afbeelding 2.5 geeft een voorbeeld van een biologisch actief GAC-filter. Dit filter is op basis van het 1-STEP® filter-principe [50] uitgevoerd: een GAC-filtervariant waarbij P-verwijdering, N-verwijdering en verwijdering van microverontreinigingen in één zuiveringssysteem gecombineerd worden.

AFBEELDING 2.5

BIOLOGISCHE GAC-TOEPASSING IN HET 1-STEP® FILTERCONCEPT ZOALS GEREALISEERD OP RWZI HORSTERMEER (WATERNET) [50]



2.2.3 REACTIVATIE EN REGENERATIE VAN ACTIEFKOOL

Na verloop van tijd raken de koolkorrels uit een GAC-filter verzadigd en moeten ze vervangen of gereactiveerd/geregenereerd worden. Na hoeveel tijd dit nodig is, is afhankelijk van factoren zoals de hoeveelheid organisch materiaal en microverontreinigingen in het voedingswater, het type kool wat is gebruikt, welke hulpmiddelen aan het filter worden toegevoegd, de contacttijd van het filter en het beoogde zuiveringsrendement.

De productie van actiefkool is relatief kostenintensief, circa EUR 1.200 per m³ [52] en aan de afvoer en de verwerking van gebruikt kool zijn ook kosten verbonden. Daarom wordt (een deel van) de actiefkool vaak hergebruikt. Dit kan door de kool te regenereren of reactiveren, waarbij de vervuilingen weer van het kool worden afgehaald. Voor de regeneratie of reactivatie van actiefkool zijn meerdere technieken beschikbaar die grofweg op te delen zijn in drie groepen: thermische reactivatie en chemische en biologische regeneratie. Een vierde, nieuwe methode is gebaseerd op elektrische pulsen en kan omschreven worden als elektrochemische regeneratie. Alleen het thermisch regenereren wordt genoemd omdat het activeren van de kool ook op hoge temperaturen gebeurt. De effectiviteit van de reactivatie- of regeneratietechniek bepaalt de kwaliteit van de gereactiveerde/geregenereerde kool. Wanneer niet alle microverontreinigingen van de kool verwijderd kunnen worden zal het absorptievermogen van de kool voor die stoffen verminderen en minder goed werken. In de rest van deze paragraaf worden de vier regeneratie- en regeneratiemethoden verder uitgelegd.

THERMISCH

De meest voorkomende methode is thermische regeneratie. Hierbij worden aan de kooldeeltjes vastzittende verontreinigingen weggebrand. Dit gebeurt door middel van infrarood-, wervelbed-, etage- of draaiovens [16]. In Europa zijn draaiovens en etageovens de meest gebruikte methode. Nadeel hierbij is dat de kool uit het filter gehaald moet worden en naar ovens op een externe locatie getransporteerd moet worden. Daarnaast zorgen de benodigde hoge temperaturen voor een groot energieverbruik en gaat er altijd een percentage van het kool verloren door verbranding. Onderzoek van Álvarez et al [3] wees uit dat bij 100% regeneratie van de kool ongeveer 15% van de kool wordt weggebrand. De kosten van thermische regeneratie van actiefkool zijn circa 500-600 EUR/m³ [49, 50]. Bijlage III bevat details over de opbouw van deze kosten. Deze kosten zijn onder ander afhankelijk van de transportkosten. De kwaliteit van vers en gereactiveerd GAC is vanwege het belang in de specifieke behandelingskosten en de brede range van praktijkgegevens een onderdeel van de gevoeligheidsanalyse.

CHEMISCH

Chemische regeneratie maakt gebruik van desorptie en/of decompositie. Bij desorptie worden de verontreinigingen van het adsorbens, de kool, verwijderd door specifieke (doorgaans dure) oplosmiddelen toe te voegen, met als nadeel dat de verontreinigingen vervolgens in dit oplosmiddel zitten wat ook weer verwerkt moet worden. Bij decompositie, worden oxiderende chemicaliën toegevoegd aan de actiefkool waardoor de aan de kool gebonden verontreinigingen oxideren. Welke verontreinigingen dit zijn hangt af van de chemicaliën die gebruikt worden voor de oxidatie en de stoffen die op het GAC gebonden zijn.

Eén van de methoden voor chemische regeneratie is regeneratie door middel van ozon. Over regeneratie met ozon is nog maar beperkte kennis beschikbaar. Ozon als regeneratiemiddel is toegepast in de textielindustrie [24] en voor het verwijderen van fenol uit actiefkool [3]. Fenol wordt vaker gebruikt bij onderzoeken naar regeneratie omdat het representatief is voor de oxidatie van een vrij breed scala aan verontreinigingen. Uit beide onderzoeken komt naar voren dat uitdagingen zitten in het vinden van de juiste dosering van ozon. Alvares [3] vond een optimale regeneratie tijd van 40-60 minuten afhankelijk van het type GAC, waarbij de monsters voor 75% geregenereerd waren bij een ozon dosering van 0,26-0,42 gO₃/g GAC. Te weinig zorgt voor een te geringe regeneratie terwijl een overvloed aan ozon het absorptievermogen van de actiefkool negatief kan beïnvloeden door vorming van zuurstofgroepen op het oppervlak van de kooldeeltjes of het afnemen van het oppervlak [3, 57].

Binnen dit project worden de mogelijkheden van ozonregeneratie verder onderzocht. Voordelen van regeneratie met ozon zijn dat het on-site en zelfs in-situ zou kunnen worden uitgevoerd en daardoor transportkosten en de daarmee gemoeide CO₂-emissie worden voorkomen. Ook gaat er (bijna) geen kool verloren bij ozonregeneratie. Nadelig zijn de noodzakelijke extra maatregelen om het GAC-filter corrosiebestendig te maken vanwege het gebruik van ozon. Dit is mogelijk door installatieonderdelen te coaten of te voorzien van ozonbestendige materialen.

BIOLOGISCH

Biologische regeneratie wordt op industriële schaal nog niet of nauwelijks toegepast. Deze manier van regenereren is vaak tijdrovend en vereist biologisch afbreekbare verontreinigingen [3]. Recente ontwikkelingen in inzichten en technieken hebben echter een impuls gegeven aan de aandacht voor biologische regeneratie. Het kweken van specifieke biomassa voor verschillende soorten verontreinigingen kan de huidige rendementen een stuk verbe-

teren. Het is al mogelijk om de kool voor 57% biologisch te regenereren [46]. Door middel van een goede indeling en bedrijfsvoering van zuiveringsinstallaties hoeven ook de lange regeneratietijden (weken tot maanden) geen bezwaar te vormen, mits er voldoende ruimte is op de zuivering. Als obstakels die toepassing van deze techniek nog verhinderen overwonnen kunnen worden, is biologische regeneratie een veelbelovende techniek die aanzienlijk minder energie verbruikt en veel duurzamer is dan de huidige methode [46].

ELEKTROCHEMISCH - ORGANICS DESTRUCTION CELL

Bij elektrochemische regeneratie wordt de stroom door een elektrochemische cel geleid (anode of kathode) met daarin kool of grafiet. Verschillende mechanismen zorgen hierbij voor desorptie van de verontreinigingen. De in de elektrode opgewekte ionen veranderen lokaal de pH-waarde wat leidt tot desorptie van sommige organische verontreinigingen. Directe reacties tussen geadsorbeerde moleculen en de opgewekte ionen vormen nieuwe moleculen met een lagere KOW-waarde die vervolgens loslaten van het kool/grafiet. Tenslotte wordt het overgrote deel van de verontreinigingen verwijderd via directe oxidatie [28, 30].

Een belangrijke eigenschap van elektrochemische regeneratie is dat de benodigde hoeveelheid stroom direct gekoppeld is aan het chemisch zuurstofverbruik (CZV). Dit houdt in dat hoe lager de concentratie CZV in het water, des te hoger het rendement van deze techniek is ten opzichte van andere regeneratiemethoden [7].

Het rendement van deze techniek is bij gewone GAC-korrels niet hoog (tot 15%) omdat desorptie als gevolg van pH-verandering hier het hoofdproces is [3]. Directe oxidatie vanuit de poriën van de actiefkool verloopt moeizaam [7]. Ook neemt het adsorberende vermogen van het GAC licht af na elke regeneratie [28, 30]. Medewerkers van het Britse bedrijf Arvia ontwikkelden een alternatief voor de reguliere GAC-korrel, genaamd Nyex™ [5]. Met deze grafietkorrels is continue elektrochemische regeneratie mogelijk. Het niet-poreuze karakter van Nyex (GAC heeft een 1.000 maal groter oppervlak) zorgt voor een makkelijkere oxidatie van de vervuiling door middel van de elektrische stroom. De zogenaamde organics destruction cell (ODC) regeneert enkel op basis van oxidatie waardoor ook minder vervuilingen in het water terugkeren, zoals bij desorptie het geval is. Een verder uitleg van de ODC is gegeven in paragraaf 2.4.

2.3 GECOMBINEERDE OZONDOSERING EN GAC-FILTRATIE

Ozondosering en GAC-filtratie zijn individueel effectieve methoden om microverontreinigingen om te zetten en te verwijderen. Gecombineerd geven deze technieken in potentie een nog betere verwijdering. Ze vullen elkaar aan en zijn in sommige gevallen versterkend [59]. Ozonisatie oxideert microverontreinigingen en zorgt ervoor dat lastig biologisch afbreekbaar organisch materiaal wordt afgebroken in kleinere moleculen die beter biologisch worden omgezet. In een biologisch GAC-filter kunnen deze stoffen vervolgens verder worden afgebroken. Daarnaast adsorbeert GAC metalen en verontreinigingen die niet geoxideerd zijn in het ozonisatieproces. Zo zorgt ozonisatie voor een lagere vuilbelasting van het actiefkool en het langzaam biologische GAC-filter zorgt voor een verdere verwijdering van microverontreinigingen en bijproducten van de oxidatie [67]. Zo worden diclofenac, sulfamethoxazol en acetyl-sulfamethoxazol minder goed verwijderd door poederkooldosering of GAC-filtratie alleen, maar door ozon worden deze stoffen vrijwel helemaal omgezet [50, 52, 66, 67]. Benzotriazole, methyl-benzotriazol en metoprolol worden juist weer minder goed afgebroken door ozon, maar wel goed door biologisch actieve GAC-filtratie verwijderd [52, 66, 67]. Zo zorgt de combi-

natie van ozonisatie en GAC filtratie voor een verwijdering van een breder scala aan microverontreinigingen dan ozon of GAC alleen. In combinatie met biologische GAC filtratie zal het een om een nog breder scala gaan aangezien biologisch beschikbare afbraakproducten van de ozonisatie, die niet altijd goed door het GAC opgenomen kunnen worden, voor een groot deel door de biologie verwijderd kunnen worden.

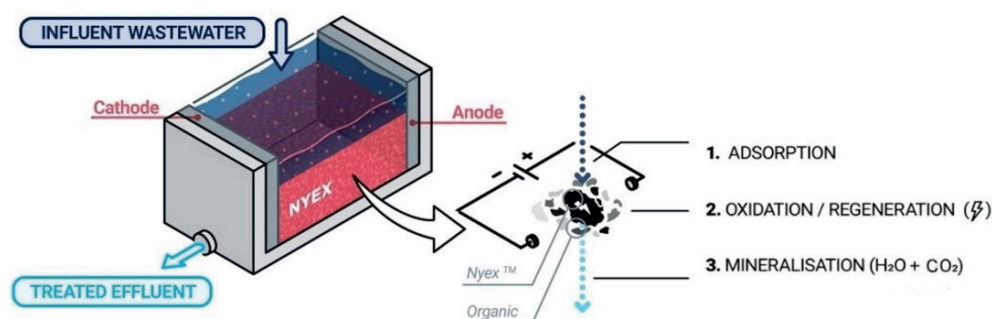
In de textielindustrie zijn tests uitgevoerd met de combinatie van ozon en GAC in één tank, in dit systeem werkt het GAC als katalysator in het ozonisatieproces. Tegelijkertijd wordt door de continue ozonaanvoer het GAC voortdurend geregenereerd, zie hiervoor referenties [24, 57]. In de metingen kwam het katalyserende effect van het GAC duidelijk naar voren, maar de precieze werking ervan werd in de beschrijving van het onderzoek niet verklaard. In het geval dat GAC en ozon in dezelfde tank worden gecombineerd is een combinatie met biomassa geen optie tenzij het mogelijk is een tank zodanig te ontwerpen dat de biomassa niet aangestast wordt door het ozon.

In het geval van gecombineerde ozondosering en GAC-filtratie ligt een systeem voor de hand waarbij de ozongenerator die voor de ozonisatie wordt gebruikt, ook meteen het benodigde ozon kan produceren voor chemische regeneratie van het GAC (zie 2.2.3). Een concept voor deze gecombineerde nabehandeling van rwzi effluent en regeneratie bestaat voor zover bekend nog niet en verdient verder onderzoek wanneer het economisch haalbaar blijkt. De uitdaging bij deze vorm is de verdeling van het ozon over het GAC-bed zodat het geheel geregenereerd kan worden.

2.4 ORGANICS DESTRUCTION CELL (ODC)

In de studie naar alternatieve oxidatief ondersteunde actiefkoolconcepten voor vergaande behandeling van afloop nabezinktank is ook gekeken naar een concept met een alternatief voor ozondosering. Ozon is immers een reactief gas en het gebruik ervan brengt relatief dure (veiligheids)maatregelen met zich mee. In deze zoektocht is een nieuwe, potentieel interessante, techniek ontdekt: de Organics Destruction Cell (ODC). Deze technologie is ook al omschreven in STOWA 2017-36 [12]³. De organics destruction cell is een alternatieve methode om organisch materiaal te oxideren. De ODC is een filter waarin continu microverontreinigingen elektrochemisch worden geoxideerd. Afbeelding 2.6 laat de schematische weergave van de ODC zien. Het filterbed bestaat uit een speciaal voor de ODC ontwikkeld adsorbens, Nyex™, een niet-poreus, elektriciteit geleidend grafiet-materiaal.

AFBEELDING 2.6 ARVIA ORGANICS DESTRUCTION CELL (ODC™) [5]



3 Sinds de publicatie van STOWA rapport 2017-36 heeft de STOWA nieuwe informatie ontvangen van ARVIA over de ODC. Het voorliggende rapport bevat daarom afwijkende gegevens van STOWA 2017-36. De omschrijvingen en getallen in het huidige rapport zijn zodoende leidend.

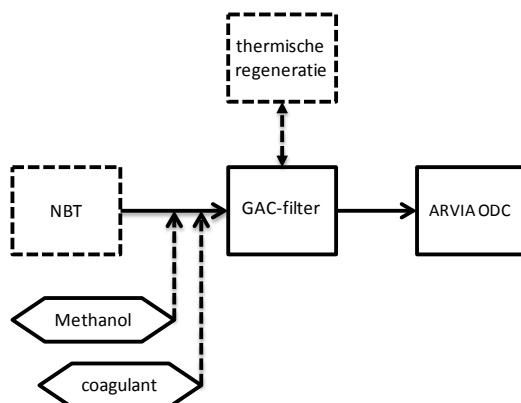
ARVIA, het bedrijf dat de ODC ontwikkelt, heeft een factsheet opgesteld over de ODC-unit aan de hand van de in dit rapport gebruikte ontwerpuitgangspunten. Deze waarden zijn gebruikt om de technische en economische haalbaarheid van dit concept te toetsen. De belangrijkste variabele in de ODC blijkt het energieverbruik. Dit is omdat het energieverbruik direct gekoppeld is aan de CZV-vracht in het aanvoerwater. De specifieke energieconsumptie in kWh/kg CZV is: 3-20 kWh/kg CZV [5]. Deze range is sterk afhankelijk van de samenstelling van het afvalwater. De hoeveelheid energie per kg CZV heeft een vrij brede range omdat de benodigde energie die nodig is voor oxidatie verschilt per organische stof. Moeilijk oxideerbare stoffen vergen relatief meer energie. Een van de pilot-installaties van Arvia verbruikte gemiddeld 1.3 kWh/m³ behandeld water (range van 1 tot 3 kWh/m³), daarnaast worden nog ontwikkelingen in de techniek doorgevoerd om de energieconsumptie terug te dringen, waarmee ze <1 kWh/m³ hopen te behalen.

Om de toch al hoge energiebehoefte van ODC zo laag mogelijk te houden wordt de afstand tussen twee elektroden zo klein mogelijk gehouden. Concreet houdt dit in dat de inhoud van één ODC unit niet zo groot is. Om de hoeveelheden water die horen bij rwzi's van 300.000 i.e. of meer te behandelen zijn dus veel units en oppervlakte nodig. Wanneer de ODC direct op de afloop nabezinktank wordt toegepast resulteert dit in meer dan 3000 m² ODC bij een schaalgrootte 300.000 i.e. [5]. Belangrijk om hierbij in acht te nemen is dat het niet de hoeveelheid water is die de benodigde oppervlakte bepaald, maar de hoeveelheid CZV in het water. Eenzelfde hoeveelheid water met de helft aan CZV kan dus met de helft van de oppervlakte aan units behandeld worden.

Een nadeel van continue regeneratie is dat er geen levende biomassa in het filter aanwezig kan zijn. Hierdoor wordt stikstof niet verwijderd bij de ODC-methode. Hiervoor zou dan een aparte stap moeten worden toegevoegd. Ook is chemische fosfaatverwijdering tot op heden niet toegepast in een ODC-unit, zo meldt ARVIA. Dit betekent dat een voorbehandeling bij toepassing van ODC vereist is waarna vervolgens de microverontreinigingen die nog aanwezig zijn uit het water worden geoxideerd. Vanuit dit gezichtspunt is een potentieel interessant zuiveringsconcept mogelijk waarbij een biologisch GAC-filter wordt gevolgd door de ODC. Een deel van het CZV is dan voor de ODC uit het water verwijderd. Tevens kan het GAC-filter gebruikt worden om de nutriënten uit de afloop nabezinktank te verwijderen.

Afbeelding 2.7 geeft een schematisch overzicht van dit concept weer waarbij GAC filtratie met chemische fosfaatverwijdering en biologische nitraat verwijdering wordt gevolgd door de ODC.

AFBEELDING 2.7 CONCEPT GAC+ODC



In vergelijking met andere concepten blijkt het GAC+ODC-concept echter een zeer hoog energieverbruik te hebben met bijna een factor 10 hoger dan bij de andere concepten zonder de ODC maar op basis van ozonisatie zoals beschreven in hoofdstuk 3.3 op pagina 26). Hier tegenover staat dat er geen ozon nodig is en dus geen ozongenerator, ozoncontactor, zuurstof en bijbehorende opslag.

Ook moet in acht worden genomen dat anders dan bij ozondosering, de ODC, tot 100% van de CZV verwijderd. Ook komen er geen gevaarlijke chemicaliën zoals ozon kijken bij het oxidatieproces [51].

Naast het GAC+ODC-concept, biologische GAC filtratie gevolgd door de ODC, is ook de mogelijkheid verkend om alleen het ODC-principe te gebruiken voor de nabehandeling van NBT-effluent. ARVIA heeft aangegeven dat de ODC zelf geen fosfaat en stikstof verwijdert en dat chemische P- en biologische nitraatverwijdering niet toegepast is in een ODC. De combinatie van chemicaliëndosering direct gevolgd door de ODC is een niet-bewezen concept. De vraag is dan ook of deze configuratie wel in staat is om een gewenste reductie van fosfaat en stikstof te realiseren. De bij coagulatie gevormde vlokken zullen door het filter worden tegengehouden en hebben een negatieve invloed op de elektrochemische oxidatie.

Uit de door ARVIA geleverde informatie komt naar voren dat zij niet verwachten dat denitrificatie in de ODC een succes zal zijn. Ook is de verwachting dat de in het filter opgevangen deeltjes die ontstaan na coagulatie een negatief effect zullen hebben op het oxidatie proces. Daarnaast heeft de huidige generatie ODC's geen terugspoelfunctie, hetgeen wel nodig is als er deeltjes in het filter worden opgevangen.

Gezien de eis voor dit onderzoek om zowel microverontreinigingen als nutriënten te verwijderen kan op basis van deze gegevens geconcludeerd worden dat dit (nog) niet mogelijk is met enkel chemicaliëndosering en de ODC. Biologische GAC-filtratie gevolgd door de ODC is vooralsnog te duur, vanwege de grote aantal units en het bijkomend energieverbruik, voor het behandelen van secundair effluent. Om deze reden is dit concept in dit rapport verder buiten beschouwing gelaten. De ontwikkeling van de ODC dient echter wel in de gaten te worden gehouden aangezien het een veelbelovende techniek is.

2.5 ONTWERPPARAMETERS

Tabellen 2.1 t/m 2.3 tonen de ontwerpparameters voor GAC-filtratie en -regeneratie, 1-STEP® filter (GAC-filtratie gecombineerd met nitraat- en fosfaatverwijdering) en ozondosering. Deze ontwerpparameters bieden een inzicht in de gangbare dimensionering van de verschillende systemen. De waarden moeten met zorg en in afstemming met de referenties worden gebruikt omdat deze mogelijk gelden voor andere toepassingen, afmeting en specifieke watersamenstelling.

In hoofdstuk 3 zijn de keuzes voor de gebruikte uitgangspunten en ontwerpcriteria toegelicht. Aan de hand van deze uitgangspunten, criteria, expert-judgement en relevante referentieprojecten zijn uiteindelijk de definitieve ontwerpparameters per concept gekozen waarmee een schetsontwerp is opgesteld en de kostenanalyse is uitgevoerd.

TABEL 2.1 ONTWERPPARAMETERS OZONDOSERING VOOR SECUNDAIR EFFLUENT [49, 52]

Parameter	Eenheid	Waarde
ozondosering	mg/l	1 - 15
contacttijd	minuten	4 - 40 ¹⁾

¹⁾ verwijdering restozone vereist een contacttijd van ca. 5 minuten

TABEL 2.2 ONTWERPPARAMETERS GAC-FILTER VOOR BEHANDELING VAN SECUNDAIR EFFLUENT OP EEN RWZI [49, 51]

Parameter	Eenheid	Waarde
filtratiesnelheid	m/h	10 - 15
korrelgrootte (diameter)	mm	0,6 - 3
bedhoogte	m	3,8
Empty Bed Contact Time	min	10 - 25
standtijd in bedvolumes ¹⁾	m ³ /m ³	2.000 - 20.000
dichtheid actiefkoolkorrels	kg/m ³	350 - 550

¹⁾ De standtijd is een begrip dat niet eenduidig is aangezien het adsorptieproces stofspecifiek is

TABEL 2.3 ONTWERPPARAMETERS 1-STEP® FILTER [50, 52]

Parameter	Eenheid	Waarde
filtratiesnelheid	m/h	8 - 12
korrelgrootte (diameter)	mm	1,70 - 3,35
bedhoogte	m	1,50
Empty Bed Contact Time	min	9
standtijd ¹⁾	d	200 - 400
bovenwaterstand	m	1,8
doseerverhouding methanol/NO _x -N	g/g	4,5
doseerverhouding Me/PO ₄ -P	mol/mol	4
G-waarde initiële menging	1/s	400
verblijftijd flocculatiezone	sec	432

¹⁾ De standtijd is een begrip dat niet eenduidig is aangezien het adsorptieproces stofspecifiek is

2.6 AANDACHTSPUNTEN

Ozondosering in combinatie met GAC-filtratie als nageschakelde zuivering bij de communale afvalwaterzuivering is een relatief onbekend concept. Bij de combinatie van deze technieken zijn vooraf de volgende aandachtspunten geïdentificeerd:

- negatieve gevolgen van overvloedige hoeveelheid organisch materiaal (DOC) op de efficiëntie van het gecombineerde proces; bij grote hoeveelheden opgelost organisch materiaal in het voedingswater (de afloop van de NBT) van de ozonreactor zal een groot deel van ozon ‘verspild’ worden aan andere organische stoffen dan microverontreinigingen. Ozonisatie van dit organisch materiaal maakt het makkelijker afbreekbaar met als mogelijk gevolg een sterke toename van de biomassa, en verstopping van de GAC-filters [59]. In combinatie met biologische nitraatverwijdering wordt verwacht dat dit nadeel minder groot is. Het biologisch afbreekbare materiaal kan dan worden gebruikt bij de denitrificatie;
- gevoeligheid van het systeem voor grote variaties van het voedingswater (secundair effluent); zowel in kwaliteit als kwantiteit is er ten opzichte van bijvoorbeeld drinkwaterfaciliteiten een veel grotere variatie in de aanvoer van voedingswater (rwa/dwa-verhouding). Daardoor kan de benodigde hoeveelheid ozon fluctueren per moment. Een mogelijke oplossing hiervoor is om gebruik te maken van feed-back en/of feed-forward control waarbij in het voedingswater (secundair effluent) en afloopwater metingen worden verricht om de juiste ozondosering te bepalen [64];

- overmatige zuurstofvorming en afstand tussen ozondosering en GAC-filter; ozon beïnvloedt de werking van GAC op verschillende manieren. Als het ozon niet is gereageerd voordat dit in het GAC-filter komt, zal het ozon de (anoxische) biologische activiteit in het filter beperken. Ozondosering zorgt immers voor zuurstofoververzadiging van het water. Zuurstof verdringt nitraat als elektronenacceptor waardoor de denitrificatie minder goed verloopt en/of het methanolverbruik voor denitrificatie verhoogt. Dit laatste hangt echter weer af van de mate waarin goed biologisch afbreekbaar organisch materiaal ontstaat door ozonisatie. Ontluchtings/ontgassingssystemen zouden dit kunnen verhelpen maar zorgen voor een extra investering;
- tegenstrijdige invloeden procescondities; omdat ozon en GAC-filtratie beiden hun eigen ideale procescondities hebben, zou het kunnen voorkomen dat een aanpassing van deze condities ten gunste van het ene proces, negatieve invloed op het andere proces heeft. Testen in de praktijk zullen uiteindelijk uit moeten wijzen wat het beste evenwicht is om beide processen zo goed mogelijk op elkaar aan te laten sluiten.

3

CONCEPTVORMING EN SELECTIE

Aan de hand van het literatuuronderzoek en de STOWA-workshop Ozon-GAC met externe experts (zie bijlage IV) is er een lijst van mogelijke concepten opgesteld. Op basis van de workshop zijn vervolgens zes concepten geselecteerd waarvan er vier in dit hoofdstuk verder uitgewerkt zijn (paragraaf 3.3). De andere twee ODC-concepten zijn zoals in paragraaf 2.4 eerder beschreven afgefallen omdat ze technisch en/of financieel momenteel nog niet haalbaar blijken. Voor de uitwerking van de concepten zijn randvoorwaarden en ontwerpcriteria opgesteld in paragraaf 3.1. In paragraaf 3.2 is aan de hand van de technology readiness level en de toepasbaarheid in de communale afvalwatermarkt een keuze gemaakt voor de regeneratietechnologieën voor de verschillende concepten. Deze concepten vormen de basis voor verder (lab)onderzoek, zoals beschreven in hoofdstuk 7. De verschillende uitgangspunten en ontwerpcriteria die in dit hoofdstuk (hoofdstuk 3) zijn aangenomen op basis van referenties zijn getoetst aan de uitkomsten van het laboratoriumonderzoek. De implicaties hiervan zijn in hoofdstuk 7 nader besproken.

3.1 UITGANGSPUNTEN EN ONTWERPCRITERIA

Om de concepten te kunnen uitwerken zijn uitgangspunten en ontwerpcriteria opgesteld. Waar nodig zijn aannames gedaan op basis van referenties. De belangrijkste input voor deze uitgangspunten is het STOWA-rapport 2015-27 'Verwijdering van microverontreinigingen uit effluënten van rwzi's' [53]. Daarnaast is er voor de varianten met een GAC-filter in combinatie met chemicaliëndosering gebruik gemaakt van het STOWA-rapport 2013-35 'Monitoring 1-STEP® filter Horstermeer' [52].

3.1.1 SAMENSTELLING VAN SECUNDAIR EFFLUENT

Als uitgangspunt voor de jaargemiddelde samenstelling van het voedingswater (secundair effluent) is de gemiddelde effluentsamenstelling van Nederlandse rwzi's gehanteerd op basis van verschillende referenties:

- waarden voor te denitrificeren stikstof ($\text{NO}_x\text{-N}$) en te precipiteren fosfaat ($\text{PO}_4\text{-P}$) komen uit het STOWA-rapport 1-STEP® filter monitoring (STOWA 2013-35);
- DOC is overgenomen vanuit het STOWA-rapport Buitenlandse ervaringen (STOWA 2015-27);
- CZV en TSS zijn overgenomen uit de database van het CBS (gemiddelde van alle rwzi's in Nederland).

TABEL 3.1

SAMENSTELLING EFFLUENT RWZI (NOMINAAL)

Parameter	Eenheid	Waarde	Referentie
Chemisch Zuurstof Verbruik	g CZV/m ³	36,5	CBS statline 2013 [68]
Stikstofverbindingen als N-totaal	g N/m ³	8,3	STOWA 2013-35 [52]
Stikstofverbindingen als NO _x -N	g N/m ³	5,3	STOWA 2013-35 [52]
Fosforverbindingen als P-totaal	g P/m ³	0,7	STOWA 2013-35 [52]
Fosforverbindingen als PO ₄ -P	g P/m ³	0,3	STOWA 2013-35 [52]
DOC concentratie	g DOC/m ³	11,0	STOWA 2015-27 [53]
zwevende stof	g TSS/m ³	8,0	CBS statline 2013 [68]

3.1.2 SCHAALGROOTTE

De concepten worden uitgewerkt voor installaties met een schaalgrootte van 20.000, 100.000 en 300.000 i.e. (à 150g TZV). Dit is gelijk aan de schaalgroottes die in de internationale studie STOWA 2015-27 zijn gehanteerd [53].

3.1.3 ONTWERPDEBIET EN POMPVERMOGEN

De bijbehorende ontwerpdebieten zijn respectievelijk: 180, 900 en 2.700 m³/h:

- het ontwerpdebiet van de nabehandeling is gebaseerd op 115% van de actuele droogweeraanvoer (DWA). Hierdoor zal op jaarbasis meer dan 80% van het totale inkomende afvalwater worden behandeld;
- een gemiddelde dagaanvoertijd van 16 uur in combinatie met bovengenoemde ontwerpdebieten per uur geeft een representatief dagdebiet conform referentie STOWA 2015-27.

Pompvermogen:

- het volledige debiet inclusief spoelwater moet over een lengte van 200 meter en hoogte van 6 meter verpompt worden. Dit komt overeen met STOWA 2015-27. Bij varianten met een extra filterstap wordt een extra hoogte van 3 meter genomen voor het berekenen van het energieverbruik van de pomp.

3.1.4 STANDTIJD GAC

De standtijd van het GAC is afhankelijk van de concentratie, vrachten en het adsorptievermogen van de doelstoffen en het DOC in het voedingswater. Dit is per stof verschillend en daarom is de exacte standtijd van het GAC lastig vooraf te bepalen. De verwachting is dat ozondosering de verwijdering van microverontreinigingen zal verbeteren en de standtijd van het GAC zal verlengen. Door voorbehandeling met ozon vinden zowel adsorptie als biologische afbraak van microverontreinigingen plaats in het filter [58]. In STOWA 2015-27 wordt 12 maanden aangehouden voor de standtijd van het 1-STEP® filter. Deze standtijd staat voor sommige stoffen ter discussie. Diclofenac, een ontstekingsremmer die mogelijk als nieuwe stof op prioritaire stoffenlijst van de KRW komt, wordt bijvoorbeeld moeilijk verwijderd door GAC. Na 3 maanden moet het GAC vervangen worden om deze stof goed te kunnen blijven verwijderen wanneer er geen ozondosering voor het GAC zit. Door ozonoxidatie wordt diclofenac echter vrijwel geheel omgezet. De mogelijke afbraakproducten die biologisch afbreekbaar zijn kunnen dan vervolgens in een biologisch GAC filter omgezet worden. Hierdoor wordt het GAC minder belast en is een veel langere standtijd mogelijk [52, 53, 67]. Op basis van informatie van CABOT over de praktijktoepassing op rwzi Swindon (UK), zijn standtijden van meer dan 12 maanden mogelijk indien oxidatie wordt voorgeschakeld. In dit rapport is aangenomen dat een standtijd van 12 maanden voldoende is om microverontreinigingen goed te blijven verwijderen wanneer het biologische GAC-filter voorafgegaan wordt door ozonisatie.

3.1.5 OZONDOSERING

Voor de ozonoxidatie wordt uitgegaan van een ozondosering van 0,7g O₃ / g DOC [53]. De keuze voor een bepaald type ozon-doseersysteem hangt af van de bestaande infrastructuur van de rwzi waar het effluentpolishing toegepast gaat worden. Op sommige locaties leent de bestaande infrastructuur zich het best voor deelstroomdosering. Op andere locaties zijn beluchtingsbakken makkelijker te implementeren. Zowel qua kosten als qua effectiviteit (voor verwijdering van microverontreinigingen) zijn beide technieken vergelijkbaar. Bij de kostenraming in dit rapport is uitgegaan van beluchtingsbakken.

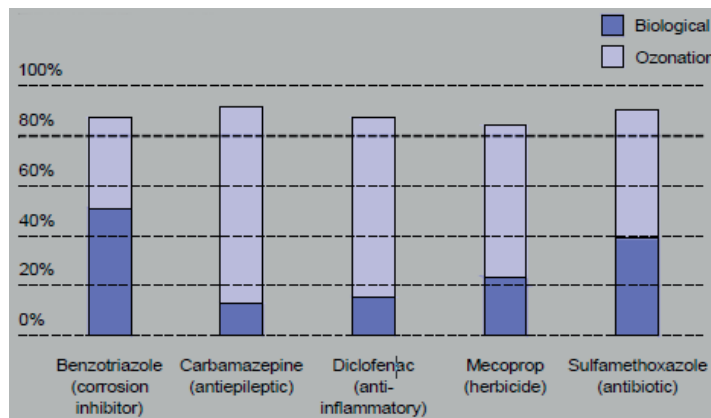
3.1.6 KWALITEIT LOZINGEN

Alle concepten zijn ontworpen om een vergelijkbare kwaliteit van het te lozen filtraat te produceren. De lozingseisen zijn op te delen in twee onderdelen, nutriënten en microverontreinigingen:

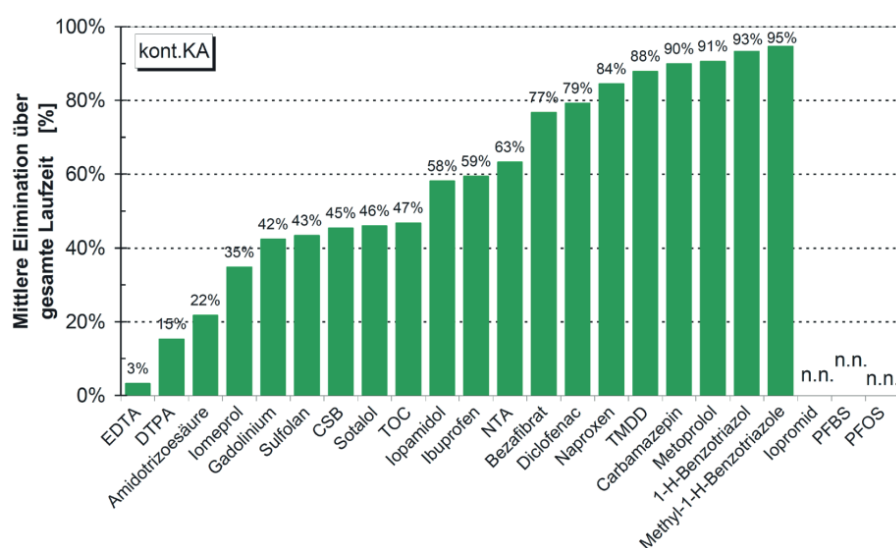
- Nutriënten; onder nutriënten vallen stikstof en fosfaat. Vanuit de KRW worden doelen gesteld een goede chemische en ecologische toestand van aquatische ecosystemen te waarborgen. Hiervoor zijn streefwaarden opgenomen voor de vracht van deze stoffen in het oppervlakte water. Deze streefwaarden geven ook richting aan de toekomstige eisen aan de kwaliteit van het effluent van een rwzi. Voor N en P zijn deze waarden [50]:
 - fosfor 0,15 mg/l;
 - stikstof 2,2 mg/l;
- microverontreinigingen; eisen omtrent microverontreinigingen zijn lastiger te formuleren. Ten eerste omdat er een enorm scala aan verschillende microverontreinigingen is welke in verschillende mate verwijderd kunnen worden. Daarnaast is de kennis over de effecten van deze microverontreinigingen in oppervlaktewater nog in ontwikkeling. Lijsten met prioritaire stoffen worden geregeld gewijzigd en maximaal toelaatbare concentraties worden dikwijls bijgesteld na nieuwe onderzoeken [53]. Om deze reden is de eis voor microverontreinigingen verwijdering minder concreet dan voor nutriënten.

In Zwitserland is de rwzi ARA Neugut de eerste 'micropollutants removal facility' [66]. Op deze locatie zijn de effecten van ozondosering in combinatie met een zandfilter uitgebreid getest. Aan de hand van vijf indicatieve stoffen werd de totale verwijdering op ruim 80% bepaald (zie afbeelding 3.1). Dit percentage ligt bij ozondosering in combinatie met een GAC-filter voor sommige stoffen aanzienlijk hoger [40, 67] doordat oxidatieve afbraak gecombineerd wordt met biologische en adsorptieve verwijdering (zie ook afbeelding 3.2 en 3.3). Zo worden atenolol, citalopram, ciprofloxacin, metoprolol, propranolol, en benzotriazole beter verwijderd door een biologisch GAC-filter na ozondosering doordat er zowel oxidatieve, adsorptie en biologische omzettingen plaatsvinden. Op basis van de gegevens van de rwzi ARA Neugut en Zhu et al (2015) [67] wordt in dit onderzoek ook uitgegaan van een verwijdering van minimaal 80 % van de totale hoeveelheid microverontreinigingen, waardoor uitgegaan wordt van een betere effluentkwaliteit dan in STOWA 2015-27 werd aangenomen voor alleen ozonisatie of GAC filtratie (zie tabel 3.2). Verwijderingsprestaties met ozonisatie kunnen hoger zijn afhankelijk van de ozondosering. Deze hoge verwijderingsprestaties zeggen echter niets over de afbraakproducten die bij ozonisatie gevormd worden. Een biologische adsorptiestap kan deze afbraakproducten verwijderen. Deze stap kan mogelijk ook met een lagere ozondosering worden gewerkt in de voorbehandeling omdat er nog een extra bescherming van de effluentkwaliteit zit in het toepassen van twee verwijderingsstappen na elkaar.

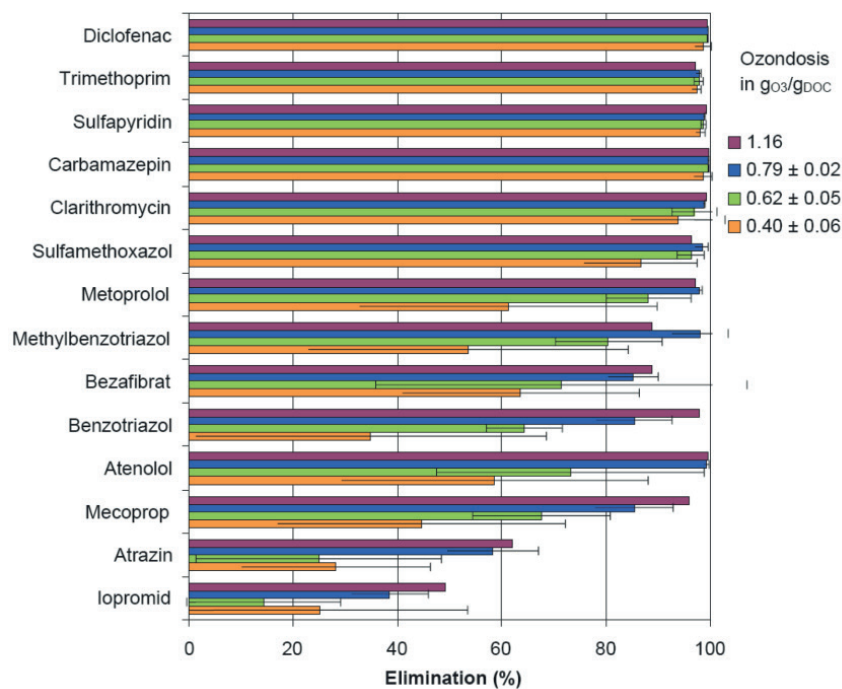
AFBEELDING 3.1 VERWIJDERING VAN 5 INDICATIEVE MICROVERONTREINIGINGEN DOOR OZONDOSERING+ZANDFILTRATIE [66]



AFBEELDING 3.2 VERWIJDERINGSPRESTATIES GAC-FILTRATIE VOOR VERSCHILLENDE MICROVERONTREINIGINGEN [53]



AFBEELDING 3.3 VERWIJDERINGSPRESTATIES OZONOXIDATIE VOOR VERSCHILLENDE MICROVERONTREINIGINGEN [53]



TABEL 3.2

VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VAN DIVERSE MICROVERONTREINIGINGEN

Stof	Ozonisatie ¹	GAC-filtratie ¹	O3-STEP® filter
Diclofenac	>80%	60-80%	>80%
Carbamezapine	30-60%	>80%	>80%
Sulmethoxasol	>80%	30-60%	>80%
Metoprolol	30-60% ²	>80%	>80%

¹⁾ Waardes zoals ze in het STOWA 2015-27 rapport zijn gebruikt

²⁾ Waarde Reungoat et al 2012 [40] en afbeelding 3.3.

3.1.7 ALGEMENE KOSTENUITGANGSPUNTEN

Om onderlinge vergelijking met alternatieve methoden mogelijk te maken zijn de uitgangspunten van de kosten overwegend gelijk aan de uitgangspunten die zijn gehanteerd in het STOWA-rapport 2015-27 [53]. De prijzen van de coagulant (PAX-214) en de methanol zijn gebaseerd op de prijzen van de 1-STEP® filter pilot [50]. De detaillering van ontwerp en de kostenramingen die in dit rapport gepresenteerd zijn, is echter groter dan in voorgaande studies.

- technische levensduur:
 - civiel: 30 jaar;
 - mechanisch, elektrisch en onvoorzien: 15 jaar;
 - procesautomatisering: 5 jaar;
- effectieve rente (rente - inflatie): 4%;
- onvolledigheid: 30%;
- opslagfactor bouwkosten naar stichtingskosten inclusief 21% btw: 65%;
- onderhoud (percentage van de bouwkosten):
 - civiel: 0,5%;
 - werktuigbouwkundig, elektrotechnisch en proces automatisering: 3%;
- personeelskosten:
 - 20.000 i.e.: EUR 25.000 (0,5 FTE);
 - 100.000 i.e.: EUR 50.000 (1 FTE);
 - 300.000 i.e.: EUR 50.000 (1 FTE);
- operationele kosten (inclusief 21% omzetbelasting):
 - vers granulair actiefkool: EUR 1.200 / m³;
 - gereactiveerd granulair actiefkool: EUR 500 / m³;
 - coagulant, PAX-214 (30±5%): EUR 260 / ton;
 - methanol (99,8%): EUR 355 / ton;
 - pure zuurstof (99,6%): EUR 200 / ton⁴;
 - elektriciteit: EUR 0,10 / kWh.

In vergelijking met de uitgangspunten die gebruikt zijn in het STOWA-rapport 2015-27 is de onvolledigheid minder groot (35% in STOWA2015-27) doordat ontwerp en kostenraming met meer detail zijn uitgewerkt. De onderhoudskosten zijn als een percentage van de bouwkosten bepaald.

Ten opzichte van STOWA2015-27 is voor de personeelskosten voor 300.000 i.e. 1 FTE in plaats van 1,5 FTE gehanteerd, omdat bij een schaalvergroting van 100.000 i.e. naar 300.000 geen extra bemensing nodig is. Voor het on-site regenereren van GAC in een aparte regeneratie tank worden extra kosten voor personeel gerekend voor het overbrengen van het GAC naar de regeneratie tank en het monitoren van het regeneratie proces. Er is vanuit gegaan dat dit

4 Prijsopgave van Lindegas geeft aan dat huidige prijzen veel lager liggen en dat per schaalgrootte de prijs ook verschilt. Het effect van veranderingen in de energieprijzen wordt meegenomen in de gevoeligheidsanalyse in hoofdstuk 5.

0,5 FTE (EUR 25.000) zal zijn ongeacht de grootte van de rwzi. Voor het in-situ regenereren van GAC in de filters is het niet nodig om het GAC over te brengen naar een andere tank en zijn er lagere personeelskosten gerekend; namelijk 0,3 FTE (EUR 15.000).

Voor de kosten van het leidingwerk is uitgegaan van de kosten van voor leidingwerk van het 1-STEP® filter voor een schaalgrootte van 100.000 i.e.. Deze kosten zijn voor inflatie gecorrigeerd en dubbel meegenomen omdat er vanuit is gegaan dat ongeveer dezelfde kosten gemaakt moeten worden voor de het leidingwerk van het ozonisatiesysteem. Dit leidingwerk bevat o.a. de leidingen van de zuurstofopslag naar de ozongenerator en van de ozongenerator naar de ozoniserietank. De kosten zijn vervolgens af- en opgeschaald naar respectievelijk 20.000 en 300.000 i.e. door middel van een factor van 0,5 en 1,5.

Voor de ozoncontactor zijn de kosten meegenomen voor de extra benodigde beton om een propstroomreactor te creëren en het ozonbestendig maken van het beton. Het luchtdicht maken van de ozoncontactor is meegenomen door middel van een factor van 25% bovenop de kosten van de reactor. Met de kosten van de ozongeneratoren zijn o.a. de kosten van het ozondoseersysteem, de koeling van de generatoren, de meetinstrumenten, het besturings-systeem en de ozondestructie meegenomen. De kosten van zuurstofopslag bevatten o.a. de plaatsingskosten en kosten van de verdampers van de vloeibare zuurstof.

Bij de grote van de funderingen is rekening gehouden met de grootte van de opslagtanks. De gebouwen van de ozongeneratoren zijn bepaald aan de hand genodigde capaciteit en de grootte van de generatoren die bij die capaciteit horen. Hiervoor is de productinformatie van de OZAT® CFV ozongeneratoren van Ozonia gebruikt [34].

3.1.8 ONTWERPPARAMETERS CONCEPTONTWIKKELING

Op basis van de typische ontwerpparameters uit paragraaf 2.5, de uitkomsten van de brainstorm met experts en ervaringen uit de praktijk, zijn ontwerpparameters gekozen voor de verschillende concepten. Tabel 3.3 geeft hier een overzicht van.

TABEL 3.3

ONTWERPPARAMETERS VOOR CONCEPTONTWIKKELING OP BASIS VAN BEHANDELING VAN 1,3 MAAL DWA

Parameter	Eenheid	Waarde
<i>ozondosering</i>		
ozondosering (nominaal)	g O ₃ / g DOC	0,7
contacttijd (nominaal)	minuten	25
zuurstofconsumptie	Nm ³ O ₂ /kgO ₃	7
energieverbruik ozongenerator	kWh/kgO ₃	10
energieverbruik koeling ozongenerator	kWh/kgO ₃	2
<i>GAC-filter</i>		
hydraulische belasting	m ³ /m ² h	10
filterbedhoogte	m	2,5
bovenwaterstand	m	1,5
empty bed contact time	min	15
standtijd	maanden	12
terugspoelwater	%	10
Energie	kWh/m ³	40
<i>chemicaliën dosering</i>		
methanol stikstof ratio	g methanol / g NOX-N	2,8
methanol zuurstof ratio	g methanol / g O ₂	0,5
coagulant (PAX 214) ratio	mol Al / mol PO ₄ -P	3,1

Parameter	Eenheid	Waarde
<i>zandfilter (conform GAC-filter)</i>		
hydraulische belasting	m ³ /m ² h	10
filterbedhoogte	m	1,5
bovenwaterstand	m	2
extra terugspoelwater	%	5

OZONISATIE

De uitgangspunten voor de ozonisatie zijn voornamelijk overgenomen uit STOWA2015-27. Voor de zuurstofconsumptie van de ozongenerator is uitgegaan van 7 Nm³O₂/kgO₃ op basis van informatie over verschillende typen ozongeneratoren [34, 38]. Daar naast zijn er factoren voor de inefficiëntie van ozonproductie (90% van de zuurstof wordt omgezet in ozon) en verbruik opgenomen (90% van de ozon reageert met DOC). Bij de energievraag van de ozoninstallatie is in tegenstelling tot STOWA 2015-27 de energievraag van de koeling van de ozongenerator meegenomen (2 kWh/kgO₃) in plaats van de factor (45 W/m³) voor overige apparaten zoals in STOWA2015-27 is opgenomen. Bij de berekening is rekening gehouden met de inefficiëntie van de ozonproductie (90%) en onvolledig verbruik in de reactor (90%) zijn percentages opgenomen.

GAC-FILTER

De dimensionering en chemicaliëndosering van het biologische GAC-filter is voornamelijk gebaseerd op de 1-STEP® filter [50, 53]. De aannames voor het energieverbruik en het terugspoelwater verbruik zijn gelijk aan het GAC filter in STOWA2015-27.

In tegenstelling tot het 1-STEP® filter waarbij de EBCT 9 minuten is en het STOWA-rapport 2015-27 waarbij wordt uitgegaan van een EBCT van 30 minuten, is er voor het ontwerp uitgegaan van den operationele EBCT van 15 minuten. Dit is gedaan op basis van literatuur en praktijkinformatie [40, 67]. Bij onderzoek bij 3 full-scale waterterugwinningsfabrieken waarbij verschillende EBCTs (9, 18 en 45 minuten) zijn getest heeft Reungoat et al. [40] gevonden dat bij een verlenging van de EBCT van 9 naar 18 minuten er een hogere verwijdering was van microverontreinigingen en verlaging van de toxiciteit met zich meebrengt. Een verdere verhoging van de EBCT wordt niet als zinnig gezien door Reungoat et al. omdat dit geen substantiële verbetering van de effluentkwaliteit oplevert. Zhu et al [67] toont in een review-artikel aan dat na ozondosering 15 min EBCT in een biologisch GAC-filter voldoende is om de meeste microverontreinigingen volledig te verwijderen. Op basis hiervan is voor een EBCT van 15 minuten gekozen.

Een EBCT van 15 minuten bij een standtijd van 12 maanden betekent dat het filter geregeneerd wordt na 35.000 bedvolumes. Bij het 1-STEP® filter zonder ozonisatie vooraf wordt het merendeel van de stoffen tot 15.000-20.000 bedvolumes verwijderd [50, 52, 53]. Door ozonisatie wordt echter de belasting op het filter flink verminderd waardoor een standtijd van 35.000 bedvolumes mogelijk is.

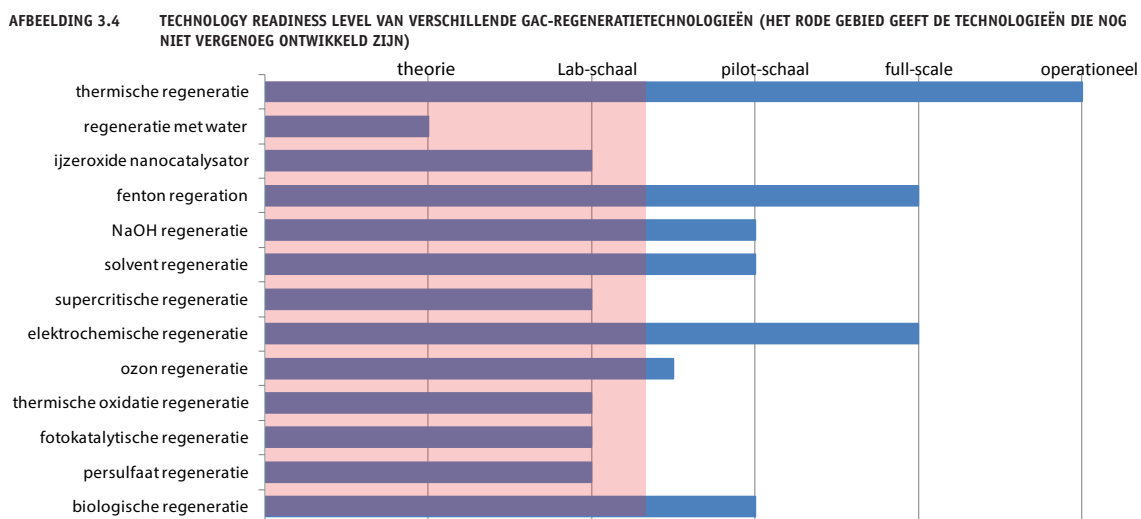
ZANDFILTER

De dimensionering van het zandfilter is gebaseerd op de het GAC-filter. Zo is dezelfde hydraulische belasting (10m/h) genomen als voor het GAC filter in deze studie. Dit is een iets lagere belasting dan in STOWA2015-27 is aangenomen.

3.2 TECHNOLOGY READINESS LEVEL REGENERATIETECHNIEKEN

Het technology readiness level geeft aan hoe ver een technologie ontwikkeld is. Grofweg kan de ontwikkeling van een technologie in 5 stappen verdeeld worden: theorie, labschaal, pilotschaal, praktijkschaal en volledig operationeel. Waarbij operationeel betekent dat de technologie al in de praktijk wordt toegepast.

De vier globale regeneratiemethoden voor GAC (thermisch, biologisch, chemisch en elektrochemisch; hoofdstuk 2.3) kunnen verder worden onderverdeeld in verschillende regeneratietechnologieën. Afbeelding 3.4 geeft een overzicht van deze technieken en wat de technology readiness level hiervan is. Alleen thermische regeneratie wordt op dit moment in de praktijk toegepast. Alle andere regeneratietechnieken zijn minder ver doorontwikkeld. Voor dit project is een van de criteria dat de regeneratietechnieken minimaal op labschaal getest zijn. Afbeelding 3.4 geeft een eerste inzicht welke technologieën voor dit onderzoek afvallen op basis van technology readiness levels van deze technologieën. De technologieën die zich geheel in het rode vlak van afbeelding 3.4 bevinden vallen af, omdat deze technologieën nog niet ver genoeg ontwikkeld zijn. Op deze technieken wordt verder niet in gegaan in dit rapport.



De overgebleven regeneratiemethoden zijn vervolgens getoetst op toepasbaarheid in de communale afvalwatermarkt, mogelijkheid om on-site of in-situ toe te passen en aansluiting bij dit project. Ook is gekeken naar kosten en effectiviteit van de technologieën.

Van de regeneratietechnieken die zijn overgebleven is solvent regeneratie, regeneratie met oplosmiddelen, de enige techniek die niet de microverontreinigingen afbreekt. Solvent regeneratie werkt alleen op basis van desorptie. Omdat de meeste oplosmiddelen zelf ook toxisch en vervuילend zijn is deze techniek niet duurzaam en valt daarom af voor dit onderzoek [43].

Biologische regeneratie is daarentegen wel duurzaam. Hiervoor zijn namelijk geen toxische oplosmiddelen nodig. Het duurt weliswaar langer dan de andere regeneratietechnieken, maar dat hoeft niet een probleem te zijn als er genoeg ruimte en tijd is voor de regeneratie. Het nadeel van deze techniek is echter dat er op dit moment niet genoeg informatie bekend is over de operationele condities om hier een goede kostenraming voor te maken. Daarom valt deze regeneratie methode voor dit onderzoek af [43, 46].

Fenton, NaOH, elektrochemisch en ozon regeneratie werken alle vier op basis van de oxidatie en (in mindere mate) door desorptie van de microverontreinigingen. Elektrochemische regeneratie, de techniek die in de organics destruction cell (ODC) wordt gebruikt, heeft als voordeel dat hiervoor geen chemicaliën nodig zijn, maar als nadeel dat door de hoge CZV concentratie in het water het een erg dure techniek wordt. Zoals ook in hoofdstuk 2.4 is uitgelegd valt elektrochemische regeneratie daarom ook af vanwege de hoge kosten.

Voor fenton, NaOH en ozon regeneratie moeten er chemicaliën bijgekocht worden. Bij fenton regeneratie is er ook nog de mogelijkheid dat de ijzer neerslaat op het GAC en de poriën verstopt. Ozon regeneratie heeft als voordeel dat er al ozon gebruikt wordt in dit concept. Hierdoor hoeft er voor deze techniek geen nieuwe, 'extra', chemicaliën aangeschaft worden. Daarnaast laat ozon regeneratie zelf geen restproducten achter zoals het geval is met fenton en NaOH regeneratie, waarbij ijzer en natrium achterblijven.

Op basis hiervan is uiteindelijk gekozen voor:

- thermische regeneratie, een bewezen techniek en geschikt als referentiemethode;
- ozonregeneratie, omdat ozon al op de hoofdstroom een rol speelt in het nabehandeling-proces. Eventuele combinatie van ozondosering op voedingswater en ozongebruik voor regeneratie wordt onderzocht.

3.3 CONCEPTBESCHRIJVING

Zoals hierboven beschreven zijn op basis van literatuuronderzoek en de workshop verschillende concepten bedacht voor het nabehandelen van NBT-effluent met ozonisatie en GAC-filtratie.

Op basis van de hierboven geschreven uitgangspunten zijn voor het O3GAC-project zijn 4 concepten in de volgende paragrafen verder uitgewerkt:

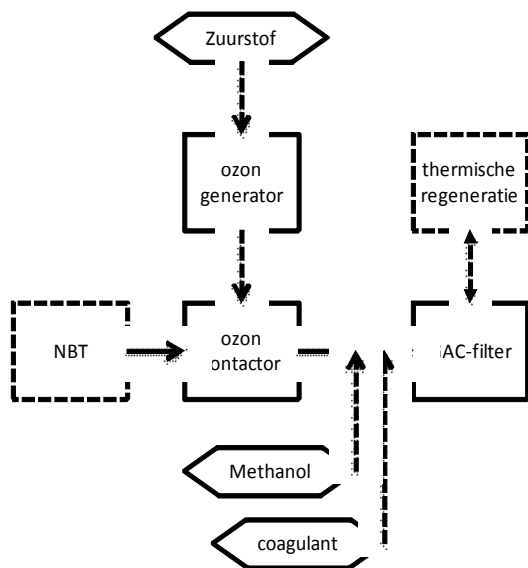
- Concept 1: O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie/thermische reactivatie);
- Concept 2: Zandfilter + O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie);
- Concept 3: O3-STEP® filter (on-site GAC-regeneratie met ozon);
- Concept 4: O3-STEP® filter (in-situ GAC-regeneratie met ozon).

3.3.1 CONCEPT 1: O3-STEP® FILTER (EXTERN THERMISCHE REGENERATIE)

Concept 1 kan gezien worden als het referentieconcept en bestaat uit een ozondosering en -contactor en een nageschakeld 1-STEP® filter met biologische activiteit en chemische fosfaatverwijdering. De regeneratie van het GAC wordt gedaan door middel van thermische regeneratie op een externe locatie. Hiervoor moet een GAC-filter buiten bedrijf gesteld worden, geleegd en weer gevuld worden en GAC moet getransporteerd worden.

Concept 1 is daarmee het basisconcept voor de alternatieve concepten. De andere concepten hebben elk een of meerdere aanpassingen in het zuiveringsproces of de regeneratiemethode ten opzichte van concept 1. Aan de hand van elk van deze aanpassingen kan per concept de invloed op het proces bepaald worden en het bijhorende kostenplaatje inzichtelijk worden gemaakt. Afbeelding 3.5 geeft een blokschema van concept 1 weer. Het effluent van de NBT wordt eerst met ozon behandeld door middel van een beluchtingsbak (de ozoncontactor). Na de ozoncontactor te hebben doorlopen worden methanol en coagulant gedoseerd. Ten slotte doorloopt het water het 1-STEP® filter waarin coagulatie en flocculatie van fosfaat, denitrificatie van nitraat en adsorptie van microverontreinigingen plaatsvindt.

AFBEELDING 3.5 CONCEPT 1: O3-STEP® FILTER (EXTERNE REGENERATIE)



Het hierboven beschreven concept 1 is uitgewerkt tot een ontwerp, waarin de verschillende onderdelen zijn doorgerekend. Tabel 3.4 geeft een overzicht van de belangrijkste elementen in dit nabehandelingsconcept. Hierbij is gekeken naar de elementen die bij de kostenraming de belangrijkste invloed zullen hebben. De tabel is onderverdeeld in twee onderdelen, ontwerp en verbruik. Ontwerpelementen zijn in hoofdstuk 4 veelal verwerkt in de CAPEX en het verbruik in de OPEX.

Om onderscheid te kunnen maken tussen het GAC wat bij de oplevering wordt aangeschaft en het GAC dat na regeneratie moet worden aangevuld, is het GAC op twee plaatsen in de tabel opgenomen. Zowel bij ontwerp als verbruik.

TABEL 3.4 ONTWERP EN VERBRUIK CONCEPT 1 : O3-STEP® FILTER (EXTERN THERMISCHE REGENERATIE)

Schaalgrootte rwzi	i.e.	20.000	100.000	300.000
<i>ontwerp</i>				
capaciteit ozongenerator	kg/u	1,8	7,0	23,2
ozon contactor	m ³	83	413	1.238
totaal GAC-filteroppervlak	m ²	20	100	300
aantal GAC-filters	#	1	4	10
GAC-volume (initieel)	m ³	50	250	750
standtijd GAC	maanden	12	12	12
<i>verbruik</i>				
vloeibare zuurstof (99,6% oplossing)	m ³ /d	0.19	0.96	2.87
methanol (99,8% oplossing)	m ³ /d	0,06	0,28	0,85
coagulant (30±5% oplossing PAX214)	m ³ /d	0,02	0,12	0,37
GAC-vervanging (aanvullen)	m ³ /j	7,5	37,5	112,5
energieverbruik (pompen en ozongenerator)	kWh/d	296	1.479	4.436

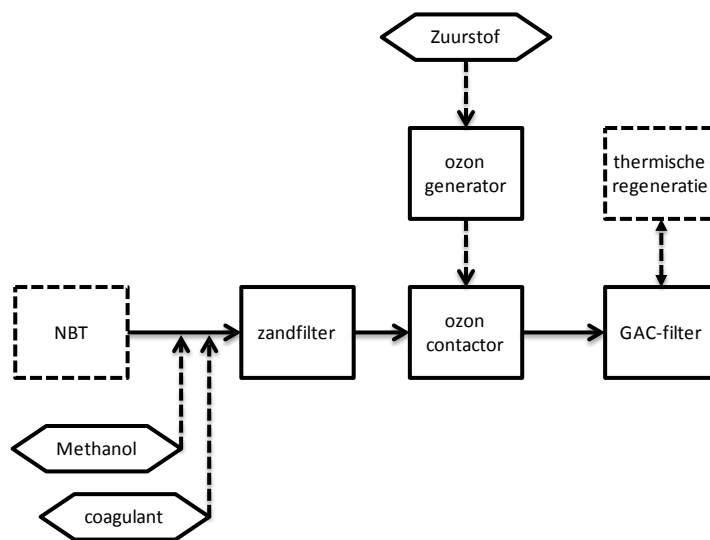
Een verdere detaillering van het ontwerp is toegelicht in bijlage IV.

3.3.2 CONCEPT 2: ZANDFILTER + O3-STEP® FILTER (EXTERN THERMISCHE REGENERATIE)

Het tweede concept heeft dezelfde opbouw als concept 1 met als verschil dat voor de ozon-dosering een zandfilter is toegevoegd (afbeelding 3.6). Het doel van een additionele zuiveringsstap voorafgaande aan de ozondosering is het verminderen van fluctuaties in de TSS- en CZV-concentratie die naar de ozondosering wordt gestuurd. Het verminderen van fluctuaties zorgt voor een lagere piekbelasting op de ozondosering en kunnen daardoor kleinere ozongeneratoren toegepast worden. Voor het verwijderen van TSS uit het effluent van de NBT kunnen verschillende technieken gebruikt worden zoals: een zandfilter, fijnzeef, flotatie (DAF), fuzzy filter of kirch-boller kaarsenfilter. Het voordeel van het gebruik van een zandfilter ten opzichte van de andere filtertechnieken is dat door biologische activiteit in het zandfilter ook opgeloste stoffen zoals, fosfaat en nitraat, CZV en DOC verwijderd kunnen worden (mits de juiste chemische condities aanwezig zijn). Een DAF kan weliswaar ook chemisch fosfaat verwijderen (door voorgaande coagulatie), maar geen nitraat. Door het verwijderen van een deel van DOC voorafgaande aan de ozonisatiestap zal het ozonverbruik dalen, wat een weer een operationele kostenbesparing met zich meebrengt. Daarom, alsmede omdat zandfilters simpel en robuust zijn is in concept 2 ervoor gekozen om een biologisch zandfilter met chemicaliëndosering voor de ozondosering te zetten. De functie van het zandfilter is daarmee het verwijderen van zwevende stof en nutriënten door middel van coagulatie, flocculatie en denitrificatie. Door de biologische activiteit in het zandfilter wordt tevens CZV/DOC verwijderd. Dit resulteert in een afname voor CZV van 30% [52]. Aangenomen wordt dat de afname van de DOC-concentratie hoger kan liggen, op circa 50%.

Bij de gevoeligheidsanalyse wordt meegenomen wat het effect is van een lagere DOC-verwijdering in het zandfilter.

AFBEELDING 3.6 CONCEPT 2: ACTIEF ZANDFILTER + O3-STEP® FILTER (EXTERN THERMISCHE REGENERATIE)



De haalbaarheid van dit concept hangt af van de vermindering van het ozongebruik en het verlengen van de standtijd van het GAC als gevolg van een lager DOC-gehalte in het effluent van het zandfilter.

De vraag is of de besparing op ozon- en regeneratiekosten hoog genoeg zijn om de kosten van een extra filter op termijn terug te verdienen. Het plaatsen van de chemicaliëndosering in het zandfilter voor ozondosering heeft potentiële voordelen en nadelen:

- potentiële voordelen:
 - methanoldosering vóór ozondosering dus geen last van eventuele oververzadiging met zuurstof;
 - GAC-filter wordt niet belast met coagulatie, flocculatie en denitrificatie. Dit leidt tot een flinke reductie in het terugspoelregime van het GAC-filter;
 - GAC-filter wordt niet belast met coagulatie, flocculatie en denitrificatie. Hierdoor zijn alle poriën beschikbaar voor adsorptie van microverontreinigingen en zijn er geen/minder concurrerende deeltjes die de poriën vullen/blokken. De standtijd van het GAC kan hierdoor potentieel verlengd worden (verdubbeling ten opzichte van concept 1 van 12 naar 24 maanden). In deze studie is dit als aanname meegenomen;
 - de concentratie aan opgeloste stoffen zoals $\text{NO}_x\text{-N}$ en $\text{PO}_4\text{-P}$ zijn lager, hierdoor worden ook mogelijke effecten van ozon op nitraatverwijdering beperkt;
- potentiële nadelen:
 - eventueel extra beschikbaar geworden stikstof en fosfaat door de ozondosering wordt niet meer verwijderd door coagulant- en methanoldosering in het GAC-filter;
 - ongewenste reacties van ozon met de chemicaliën (methanol en coagulant) van het zandfilter bij overdosering.

In tabel 3.5 is het ontwerp van concept 2 samengevat. Door het plaatsen van een zandfilter voor de ozondosering wordt het totaal aantal filters ten opzichte van concept 1 verdubbeld. Daar staat tegenover dat met een DOC-verwijdering in het zandfilter van 50% de benodigde hoeveelheid ozon ook met 50% verlaagd wordt (ozondosering is gekoppeld aan DOC-concentratie) en dat indien mogelijk kleinere ozongeneratoren gebruikt kunnen worden. Bij het ontwerp van 20.000 i.e. wordt in concept 2 geen kleinere ozongenerator gebruikt ten opzichte van concept 1 omdat de gebruikte generator op basis van informatie van de geraadpleegde leveranciers reeds de kleinste module is.

Behalve de besparing op ozon is ook de belasting op het GAC-filter aanzienlijk lager bij deze variant. Nutriëntenverwijdering is in het GAC-filter namelijk niet meer nodig en dus kan het gehele oppervlak van de GAC-korrels beschikbaar zijn voor de adsorptieve verwijdering van microverontreinigingen. Als gevolg van deze lagere belasting is de standtijd van dit GAC-filter verlengd tot 24 maanden. In de praktijk moet blijken of deze verlenging van de standtijd ook daadwerkelijk reëel is.

TABEL 3.5

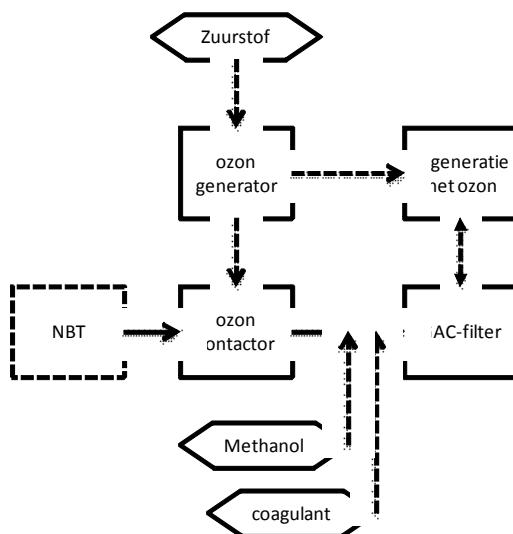
ONTWERP EN VERBRUIK CONCEPT 2: ZANDFILTER + O3-STEP® FILTER (EXTERN THERMISCHE REGENERATIE)

Schaalgrootte rwzi	i.e.	20.000	100.000	300.000
<i>ontwerp</i>				
totaal zandfilteroppervlak	m ²	20	100	310
aantal zandfilters	#	1	4	10
capaciteit ozongenerator	kg/u	1,8	3,5	11,6
ozon contactor	m ³	86	431	1.294
totaal GAC-filteroppervlak	m ²	20	100	310
aantal GAC-filters	#	1	4	10
GAC-volume (initieel)	m ³	50	250	775
standtijd GAC	maanden	24	24	24
<i>verbruik</i>				
vloeibare zuurstof (99,6%oplossing)	m ³ /d	0.10	0.48	1.44
methanol (99,8%oplossing)	m ³ /d	0,06	0,28	0,85
coagulant (30±5% oplossing PAX214)	m ³ /d	0,02	0,12	0,37
GAC-vervanging (aanvullen)	m ³ /j	3,8	18,8	58,1
energieverbruik (pompen en ozongenerator)	kWh/d	227	1.135	3.404

De detaillering van het ontwerp is verder toegelicht in bijlage IV.

3.3.3 CONCEPT 3: O3-STEP® FILTER (ON-SITE GAC-REGENERATIE MET OZON)

AFBEELDING 3.7 CONCEPT 3: O3-STEP® FILTER (ON-SITE GAC-REGENERATIE MET OZON)



Concept 3 (afbeelding 3.5) is qua waterbehandeling gelijk aan concept 1. Het verschil is dat in concept 3 het GAC niet extern maar on-site geregenereerd wordt en dat dit niet thermisch gebeurt maar door chemische regeneratie door ozondosering. Op locatie wordt beurtelings de inhoud van één GAC-filter geregenereerd. Zodra het GAC in één van de filters verzadigd is, wordt het verwisseld met het GAC dat op dat moment geregenereerd is in de regeneratietank. Om het GAC te kunnen verwisselen van plek is een derde (goedkope) opslagtank nodig. In de regeneratietank wordt het (1,75 m hoog bed) GAC door middel van ozon geregenereerd. Ter bevordering van een goede verspreiding van de ozon wordt er uitgegaan dat er een fluidized bed of vergelijkbaar wordt gerealiseerd in de regeneratietank. Wat het effect van de fluidized bed op het GAC is op bijvoorbeeld afschuren, verlies en breken van het kool is nog niet getest. Dit zou getest worden door middel van lab of kleinschalig pilotonderzoek. De benodigde hoeveelheid ozon is bepaald aan de hand van de hoeveelheid GAC die geregenereerd moet worden, op basis van gegevens uit testen op labschaal [3]. Testen op grotere schaal moeten uitwijzen of dit een goede indicatie is voor de hoeveelheid benodigd ozon en of de rendementen van de regeneratie die op labschaal zijn behaald ook in de praktijk haalbaar zijn.

Zoals hierboven beschreven is het enige verschil met concept 1 de methode van regeneratie van het GAC. In de samenvatting van tabel 3.6 is terug te zien dat het aantal filters gelijk is aan de hoeveelheid filters in concept 1 (tabel 3.4). Wel moet er één filtervolume aan GAC extra aangeschaft worden. Dit omdat als de inhoud van een filter moet worden geregenereerd het filter meteen weer gevuld moet kunnen worden met GAC, zodat deze niet te lang buiten bedrijf is. Daarnaast moet voor het regenereren on-site extra ozoncapaciteit beschikbaar zijn en dus grotere ozongeneratoren aangeschaft worden en gaat het zuurstofverbruik omhoog. De lokale regeneratietank moet ozonbestendig uitgevoerd worden en van adequate luchtbehandeling voorzien worden. Hiervoor zijn additionele kosten (inclusief 50% onzekerheidsmarge) geraamd.

De hoeveelheid ozon die nodig is voor het regenereren van het GAC is relatief hoog. Als deze hoeveelheid in korte tijd geleverd zou moeten worden, is een ozongenerator vereist met een zeer

hoge capaciteit. Om een financieel haalbaar concept te maken is gekozen voor een langdurige regeneratiecyclus waarbij dus een lagere piekdosering en een kleinere (goedkopere) ozongenerator voldoet. Daarnaast is in labtesten ook gebleken dat zeer hoge ozonconcentraties zo een sterke oxiderende werking hebben dat ook het GAC zelf wordt aangetast [4]. Dit moet zo veel mogelijk voorkomen worden.

In tabel 3.6 zijn ook de regeneratietank en hoger zuurstof- en energieverbruik (t.o.v. concept 1) opgenomen. De detaillering van het ontwerp is toegelicht in bijlage IV.

TABEL 3.6 ONTWERP EN VERBRUIK CONCEPT 3: O3-STEP® FILTER (ON-SITE GAC-REGENERATIE MET OZON)

Schaalgrootte rwzi	i.e.	20.000	100.000	300.000
<i>ontwerp</i>				
capaciteit ozongenerator (voor ozonoxidatie en GAC-regeneratie)	kg/u	3,5	13,4	36,6
ozoncontactor	m ³	83	413	1.238
regeneratie tank	m ³	60	75	90
Regeneratie tijd per filter	d	364	91	36
totaal GAC-filteroppervlak	m ²	20	100	300
aantal GAC-filters	#	1	4	10
GAC-volume (initieel)	m ³	100	313	825
standtijd GAC	maanden	12	12	12
<i>verbruik</i>				
vloeibare zuurstof (voor ozonoxidatie en GAC-regeneratie) (99,6% oplossing)	m ³ /d	0,33	1,65	4,95
methanol (99,8% oplossing)	m ³ /d	0,06	0,28	0,85
coagulant (30±5% oplossing PAX214)	m ³ /d	0,02	0,12	0,37
GAC-vervanging (aanvullen)	m ³ /j	0	0	0
energieverbruik (pompen en ozongenerator)	kWh/d	456	2.280	6.840

3.3.4 CONCEPT 4: O3-STEP® FILTER (IN-SITU GAC-REGENERATIE MET OZON)

Concept 4 (afbeelding 3.6) gaat uit van hetzelfde principe als in concept 3, regeneratie met ozon. Het verschil is dat de regeneratie in dit concept in-situ plaatsvindt (in de GAC-filters). Dit houdt in dat de GAC-filters dusdanig aangepast moeten worden zodat ze geschikt zijn om ozon in te doseren.

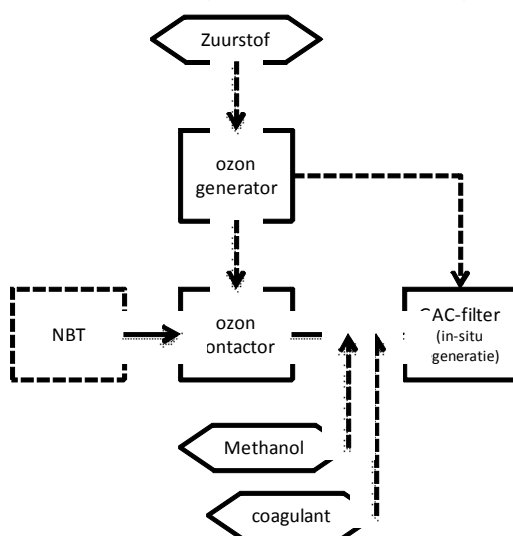
De belangrijkste aanpassingen om de GAC-filters geschikt te maken voor in-situ regeneratie zijn:

- filters moeten afsluitbaar (luchtdicht) zijn voor tijdens ozondosering;
- meetapparatuur moet geïnstalleerd worden om eventueel vrijkomend ozon te detecteren;
- de aanvoerleidingen van de perslucht moeten ozonbestendig zijn;
- luchtbehandeling voor ozonregeneratiemodus;
- de nozzels/diffusers waar de perslucht tijdens terugspoelen/ozondosering doorheen gaat moeten ozonbestendig gemaakt worden.

Evenals bij concept 3 gaat in concept 4 de capaciteit van de ozongeneratoren en het zuurstof verbruik omhoog (zie tabel 3.7). Maar er is geen externe regeneratietank en GAC-opslagtank nodig. Wel is er in vergelijking met de andere 3 concepten een extra GAC-filter nodig aangezien een filter dat geregenereerd wordt niet gebruikt kan worden. Hierdoor moet er net als bij concept 3 voor de oplevering meer GAC worden aangekocht dan in vergelijking met concept 1 en 2. Evenals bij concept 3 is de benodigde ozoncapaciteit afhankelijk van de standtijd van het GAC. Wanneer deze korter is, neemt de regeneratiefrequentie toe en is er minder tijd voor het regenereren beschikbaar, waardoor de ozon voor regeneratie in een kortere tijd verbruikt

wordt en de capaciteit van de ozongenerator hoger moet zijn. Daarnaast kunnen hoge ozonconcentratie de groepen aan de oppervlak van het GAC oxideren, waardoor stoffen minder makkelijk adsorberen aan het GAC [4].

AFBEELDING 3.8 CONCEPT4: O3-STEP® FILTER (IN-SITU GAC-REGENERATIE MET OZON)



TABEL 3.7 ONTWERP EN VERBRUIK CONCEPT 4: O3-STEP® FILTER (IN-SITU GAC-REGENERATIE MET OZON)

Schaalgrootte rwzi	i.e.	20.000	100.000	300.000
<i>ontwerp</i>				
capaciteit ozongenerator (ozonoxidatie en GAC-regeneratie)	kg/u	3,5	13.46	36.6
ozon contactor	m ³	83	413	1.238
regeneratie tijd per filter	d	364	91	36
totaal GAC-filteroppervlak	m ²	40	125	330
aantal GAC-filters ¹	#	2	5	11
GAC-volume (initieel)	m ³	100	313	825
standtijd GAC	maanden	12	12	12
<i>verbruik</i>				
vloeibare zuurstof (ozonoxidatie en GAC-regeneratie) (99,6% oplossing)	m ³ /d	0.33	1.65	4.95
methanol (99,8% oplossing)	m ³ /d	0,06	0,28	0,85
coagulant (30±5% oplossing PAX214)	m ³ /d	0,02	0,12	0,37
GAC-vervanging (aanvullen)	m ³ /j	0	0	0
energieverbruik (pompen en ozongenerator)	kWh/d	456	2.280	6.840

¹⁾ 1 filter is niet in gebruik i.v.m. regeneratie van die filter

De detaillering van het ontwerp is verder toegelicht in bijlage IV.

4

KOSTENCALCULATIE EN VERGELIJKING

4.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk zijn de stichtingskosten, CAPEX en OPEX van alle concepten uitgewerkt. Vervolgens zijn in tabel 4.6 van paragraaf 4.7 de jaarlasten van de verschillende concepten onderling vergeleken en zijn de uitkomsten toegelicht.

4.2 KOSTENBEREKENING CONCEPT 1: O3-STEP® FILTER (EXTERN THERMISCHE REGENERATIE)

Een samenvatting van de kosten van concept 1 is in tabel 4.1 weergegeven. Ondanks dat de concepten allen een aanzienlijk deel werktuigbouwkundige installaties bevatten vormen de civiele realisatiekosten nog steeds het grootste aandeel in de totale stichtingskosten.

Belangrijk om op te merken is dat de totale onderhoudskosten 25-40% van de OPEX zijn. Aangezien de onderhoudskosten gebaseerd zijn op de bouwkosten hebben de realisatiekosten ook een grote invloed op de OPEX. Het verlagen van de bouwkosten zorgt daardoor óók voor een aanzienlijke verlaging van de OPEX. Dit dubbele effect van lagere realisatiekosten is vooral van belang bij de gevoeligheidsanalyse in het volgende hoofdstuk. Na de onderhoudskosten zijn de personeelskosten de grootste lasten binnen de OPEX, gevolgd door de vloeibare zuurstof, GAC-regeneratie en energie. De chemicaliën voor denitrificatie en defosfateren vormen maar een klein deel van de OPEX (ongeveer 3%) en zijn derhalve niet significant voor de verschillen tussen de concepten.

De kosten van de aankoop van GAC zijn in concept 1 opgenomen in de OPEX. Er zijn jaarlijkse kosten voor het regenereren van het GAC en er is jaarlijks aankoop van 15% vers GAC om het verlies bij de thermische regeneratie te compenseren. Er is gerekend dat de levensduur van een GAC-filter 30 jaar is. Om ook de aanschafkosten van de eerste lading GAC mee te nemen zijn deze kosten over dezelfde periode opgedeeld. Als het initiële GAC bij de CAPEX zou worden gerekend zouden de hieraan verbonden onderhoudskosten ook toenemen wat onterecht tot hogere OPEX zou leiden.

TABEL 4.1 SAMENVATTING KOSTEN CONCEPT 1: O3-STEP® FILTER (EXTERN THERMISCHE REGENERATIE)

	Grootte	i.e.	20.000	100.000	300.000
stichtingskosten	civil	EUR	1.112.800	3.323.900	9.178.100
	werktuigbouwkundig	EUR	765.700	1.856.300	5.063.600
	elektrotechnisch	EUR	452.400	1.076.300	2.308.800
	procesautomatisch	EUR	486.200	1.059.400	1.813.500
	totaal stichtingskosten	EUR	2.817.000	7.316.000	18.364.000

	Grootte	i.e.	20.000	100.000	300.000	
CAPEX ¹	civil	EUR/jaar	62.800	190.000	534.700	
	werktuigbouwkundig	EUR/jaar	67.200	164.900	458.700	
	elektrotechnisch	EUR/jaar	39.700	95.700	209.100	
	procesautomatisch	EUR/jaar	106.600	235.200	410.400	
	totaal CAPEX jaarlasten	EUR/jaar	276.300	685.700	1.612.900	
OPEX ¹	onderhoud civil	EUR/jaar	8.500	22.200	55.700	
	onderhoud werktuigbouwkundig, elektrotechniek en procesautomatisering	EUR/jaar	51.200	133.000	333.900	
	energie	EUR/jaar	17.000	85.200	255.600	
	methanol (99,8% oplossing)	EUR/jaar	5.900	29.500	88.500	
	coagulant (30±5% oplossing PAX-214)	EUR/jaar	6.000	15.200	45.500	
	vloeibare zuurstof (99,6% oplossing)	EUR/jaar	20.000	100.000	300.100	
	huurkosten zuurstofopslag	EUR/jaar	6.500	10.200	27.600	
	vers GAC	EUR/jaar	11.000	55.000	165.000	
	geregenereerd GAC	EUR/jaar	25.000	125.000	375.000	
	personeel	EUR/jaar	25.000	50.000	50.000	
	totaal OPEX	EUR/jaar	176.100	625.300	1.696.900	
totaal jaarlasten						
CAPEX + OPEX			EUR/jaar	452.400	1.311.000	3.309.800

¹ Nieuw GAC is alleen opgenomen in de OPEX, omdat nieuw GAC steeds bijgekocht moet worden na iedere regeneratie.

4.3 KOSTENBEREKENING CONCEPT 2: ZANDFILTER + O3-STEP® FILTER (EXTERN THERMISCHE REGENERATIE)

De stichtingskosten van concept 2 zijn duidelijk hoger dan voor concept 1 doordat er een filtratiestap is toegevoegd. In concept 2 zorgt echter het extra filter voor een verlaging van het ozongebruik. Daardoor kan er een lagere capaciteit ozongenerator gebruikt worden en wordt er tevens minder energie en zuurstof door de generatoren verbruikt. In samenvattende tabel 4.2 is te zien dat de kosten voor vloeibaar zuurstof en GAC regeneratie in concept 2 allebei ongeveer de helft van de kosten van concept 1 bedragen. De besparingen op de ozonproductie en de verlenging van de standtijd van het GAC wegen echter niet op tegen de extra investerings- en bijbehorende onderhoudskosten die gepaard gaan met de (extra) zandfilters die geïnstalleerd moeten worden. Evenals bij concept 1 is bij concept 2 de aankoop van vers GAC alleen meegenomen in de OPEX.

TABEL 4.2 SAMENVATTING KOSTEN CONCEPT 2: ZANDFILTER + O3-STEP® FILTER (EXTERN THERMISCHE REGENERATIE)

	Grootte	i.e.	20.000	100.000	300.000
stichtingskosten	civil	EUR	1.717.500	5.266.400	15.431.200
	werktuigbouwkundig	EUR	920.500	2.135.900	6.012.600
	elektrotechnisch	EUR	539.600	1.318.200	3.091.400
	procesautomatisch	EUR	491.500	981.500	1.571.700
	totaal stichtingskosten	EUR	3.669.000	9.702.000	26.107.000
CAPEX ¹	civil	EUR/jaar	98.600	307.700	920.600
	werktuigbouwkundig	EUR/jaar	82.200	194.100	558.000
	elektrotechnisch	EUR/jaar	48.100	119.800	286.900
	procesautomatisch	EUR/jaar	109.600	222.700	364.300
	totaal CAPEX jaarlasten	EUR/jaar	338.500	844.300	2.129.800

	Grootte	i.e.	20.000	100.000	300.000
OPEX ¹	onderhoud civiel	EUR/jaar	11.100	29.400	79.100
	onderhoud werktuigbouwkundig, elektrotechniek en procesautomatisering	EUR/jaar	66.700	176.400	474.700
	energie	EUR/jaar	13.900	69.600	208.900
	methanol (99,8% oplossing)	EUR/jaar	5.900	29.600	88.700
	coagulant (30±5% oplossing PAX-214)	EUR/jaar	6.000	15.200	45.500
	vloeibare zuurstof (99,6% oplossing)	EUR/jaar	10.000	50.000	150.000
	huurkosten zuurstofopslag	EUR/jaar	6.500	10.200	27.600
	vers GAC	EUR/jaar	11.000	55.000	170.500
	geregenereerd GAC	EUR/jaar	12.500	62.500	193.800
	personeel	EUR/jaar	25.000	50.000	50.000
	totaal OPEX	EUR/jaar	168.600	547.900	1.488.800
totaal jaarlasten					
CAPEX + OPEX		EUR/jaar	507.100	1.392.200	3.618.600

¹ Nieuw GAC is alleen opgenomen in de OPEX, omdat nieuw GAC steeds bijgekocht moet worden na iedere regeneratie

4.4 KOSTENBEREKENING CONCEPT 3: O3-STEP® FILTER (ON-SITE GAC-REGENERATIE MET OZON)

In concept 3 worden de investeringskosten ten opzichte van concept 1 hoger omdat een regeneratietank, GAC-opslagtank en grotere ozongeneratoren geïnstalleerd moeten worden. Daarnaast is meer zuurstof nodig en is het energieverbruik hoger dan in concept 1 vanwege de hogere benodigde ozoncapaciteit in concept 3. Daar staat tegenover dat in een ideaal werkende regeneratie het GAC niet thermisch geregenereerd of bijgekocht hoeft te worden. Het GAC, dat aangeschaft wordt bij in bedrijf name van de filters is een eenmalige kostenpost en in dit concept wordt ervan uitgegaan dat er geen jaarlijks additioneel GAC nodig is. Daarom zijn deze kosten in tegenstelling tot concept 1 en 2 wel meegenomen in de bouwkosten en daarmee de CAPEX.

TABEL 4.3 SAMENVATTING KOSTEN CONCEPT 3: O3-STEP® FILTER (ON-SITE GAC-REGENERATIE MET OZON)

	Grootte	i.e.	20.000	100.000	300.000
stichtingskosten	civil	EUR	2.615.400	5.639.100	12.901.100
	werktuigbouwkundig	EUR	1.180.300	2.521.900	5.723.900
	elektrotechnisch	EUR	635.600	1.323.300	2.584.400
	procesautomatisch	EUR	518.700	1.129.600	1.857.700
	totaal stichtingskosten	EUR	4.950.000	10.614.000	23.067.000
CAPEX ¹	civil	EUR/jaar	152.400	328.500	760.900
	werktuigbouwkundig	EUR/jaar	107.000	228.500	525.000
	elektrotechnisch	EUR/jaar	57.600	119.900	237.000
	procesautomatisch	EUR/jaar	117.300	255.600	425.600
	totaal CAPEX jaarlasten	EUR/jaar	434.400	932.500	1.948.500
OPEX ¹	onderhoud civil	EUR/jaar	15.000	32.200	69.900
	onderhoud werktuigbouwkundig, elektrotechniek en procesautomatisering	EUR/jaar	90.000	193.000	419.400
	energie	EUR/jaar	24.100	120.300	360.900
	methanol (99,8% oplossing)	EUR/jaar	5.900	29.500	88.500
	coagulant (30±5% oplossing PAX-214)	EUR/jaar	6.000	29.900	89.600
	vloeibare zuurstof (99,6% oplossing)	EUR/jaar	34.500	172.300	516.900
	huurkosten zuurstofopslag	EUR/jaar	6.500	10.200	27.600
	vers GAC	EUR/jaar	0	0	0
	extern geregenereerd GAC	EUR/jaar	0	0	0
	personeel	EUR/jaar	50.000	75.000	75.000
	totaal OPEX	EUR/jaar	232.000	662.400	1.647.800
totaal jaarlasten					
CAPEX + OPEX		EUR/jaar	666.400	1.594.900	3.596.300

¹ Nieuw GAC is alleen opgenomen in de CAPEX, omdat deze eenmalig aangeschaft hoeft te worden

4.5 KOSTENBEREKENING CONCEPT 4: O3-STEP® FILTER (IN-SITU GAC-REGENERATIE MET OZON)

Bij concept 4 waarbij het GAC in de filters wordt geregenereerd is er geen regeneratietank of GAC-opslagtank nodig, zoals bij concept 3. Wel is er één extra GAC-filter nodig om in-situ regeneratie toe te kunnen passen en moeten de filters ozonbestendig zijn. Door de aanname dat de kosten voor een filter 50% hoger worden als deze ozonbestendig gemaakt moet worden, zijn de bouwkosten en daarmee de investeringskosten voor concept 4 hoger dan die van concept 1. Behalve de onderhoudskosten, die afhangen van de bouwkosten, zijn de OPEX van concept 4 gelijk aan die van concept 3. Tabel 4.4 geeft een overzicht van de kosten van concept 4.

TABEL 4.4 SAMENVATTING KOSTEN CONCEPT 4: O3-STEP® FILTER (IN-SITU GAC-REGENERATIE MET OZON)

	Grootte	i.e.	20.000	100.000	300.000
stichtingskosten	civil	EUR	2.724.700	6.141.300	15.689.500
	werktuigbouwkundig	EUR	1.237.600	2.700.100	6.555.800
	elektrotechnisch	EUR	663.000	1.411.800	2.999.100
	procesautomatisch	EUR	518.700	1.129.700	1.857.700
	totaal stichtingskosten	EUR	5.144.000	11.383.000	27.102.000
CAPEX ¹	civil	EUR/jaar	159.000	358.900	931.700
	werktuigbouwkundig	EUR/jaar	112.300	245.400	605.500
	elektrotechnisch	EUR/jaar	60.200	128.400	277.000
	procesautomatisch	EUR/jaar	117.600	256.500	428.500
	totaal CAPEX jaarlasten	EUR/jaar	449.100	989.200	2.242.600
OPEX ¹	onderhoud civil	EUR/jaar	15.585	34.495	82.130
	onderhoud werktuigbouwkundig, elektrotechniek en procesautomatisering	EUR/jaar	93.510	206.970	492.780
	energie	EUR/jaar	24.100	120.300	360.900
	methanol (99,8% oplossing)	EUR/jaar	5.900	29.500	88.500
	coagulant (30±5% oplossing PAX-214)	EUR/jaar	6.000	29.900	89.600
	vloeibare zuurstof (99,6% oplossing)	EUR/jaar	34.500	172.300	516.900
	huurkosten zuurstofopslag	EUR/jaar	6.500	10.200	27.600
	vers GAC	EUR/jaar	0	0	0
	extern geregenereerd GAC	EUR/jaar	0	0	0
	personeel	EUR/jaar	40.000	65.000	65.000
totaal OPEX		EUR/jaar	226.100	668.700	1.723.400
totaal jaarlasten					
CAPEX + OPEX		EUR/jaar	675.200	1.657.900	3.966.000

¹ Nieuw GAC is alleen opgenomen in de CAPEX, omdat deze eenmalig aangeschaft hoeft te worden

4.6 VERGELIJKING VAN DE KOSTEN

Om de kosten van de verschillende concepten beter met elkaar te kunnen vergelijken zijn deze grafisch weergegeven in afbeelding 4.1 en 4.2 en samengevat in tabel 4.5. Afbeelding 4.1 en 4.2 laten de jaarlasten zien bij een schaalgrootte van 20.000 i.e. en 300.000 i.e. Daarbij wordt opgemerkt dat de kostenkengetallen afkomstig uit dit onderzoek voor onderlinge vergelijking geschikt zijn maar niet als generieke kengetallen dienen.

In bijlage V is eenzelfde afbeelding opgenomen met de jaarlasten bij een schaalgrootte van 100.000 i.e. In de afbeeldingen zijn de CAPEX kostenposten in groentinten weergegeven. In tabel 5.4 in hoofdstuk 5 is een vergelijking van de concepten met overige toepasbare oplossingen opgenomen zoals GAC-filtratie (zonder ozondosering) en het 1-STEP® filter zoals toegepast op de rwzi Horstermeer.

In de afbeeldingen is duidelijk te zien dat de jaarlasten voor het grootste gedeelte bestaan uit de CAPEX. Hogere investeringskosten zorgen voor hogere onderhoudskosten en drukken zo dubbel op de jaarlasten. Bij elkaar opgeteld wordt 60-85% van de jaarlasten bepaald door de bouwkosten.

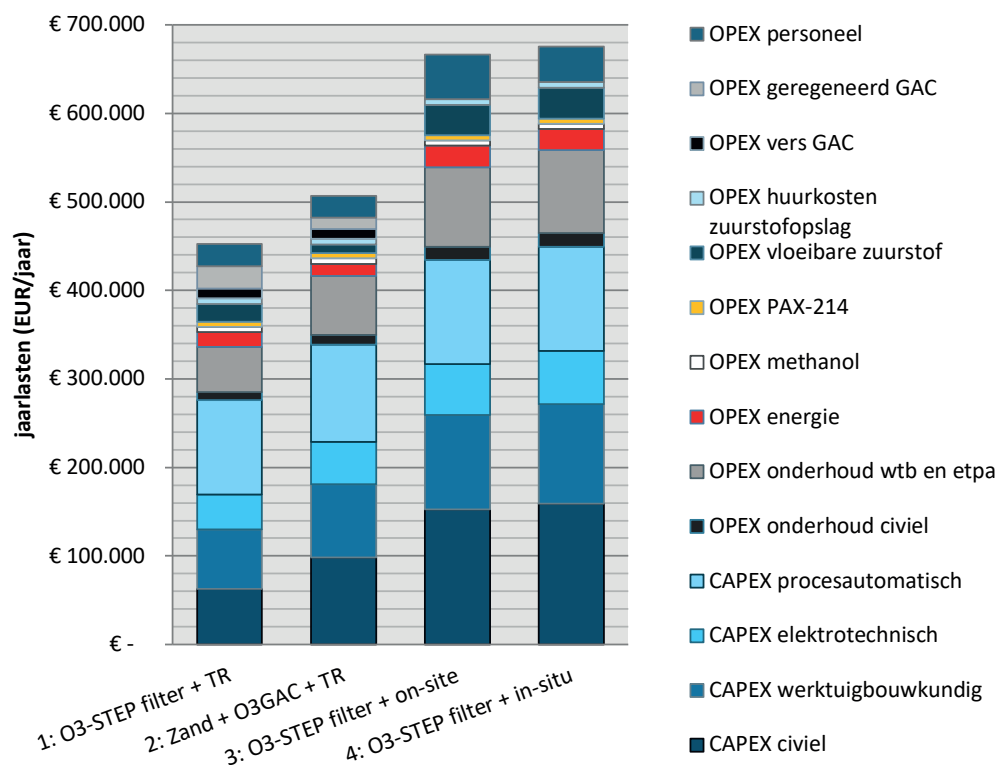
In alle gevallen leidt concept 1, ozondosering met GAC-filtratie en externe thermische GAC-regeneratie, tot de laagste jaarlijkse kosten. Bij toenemende schaalgrootte neemt het CAPEX-aandeel in de totale jaarlijkse kosten af waardoor ook de overall kostprijs per m³ secundair effluent ook dalen. Deze daling is het sterkst in de range van 20.000 tot 100.000 i.e. resulterend in halvering van de kostprijs.

De insteek van concept 2 is dat door middel van het zandfilter de CZV- en DOC-concentratie dermate lager worden dat de daaraan verbonden ozondosering en (eventueel) standtijd van het GAC-filter positief worden beïnvloedt zodat de kostenbesparing op deze onderdelen opwegen tegen de extra kosten die een zandfilter met zich meebrengt. Uit de kosten vergelijking blijkt dit echter niet het geval te zijn. De DOC-verlaging door het zandfilter verlaagt wel de energiekosten en de kosten voor ozondosering, maar dit weegt niet op tegen de onderhoudskosten en CAPEX voor extra onderdelen.

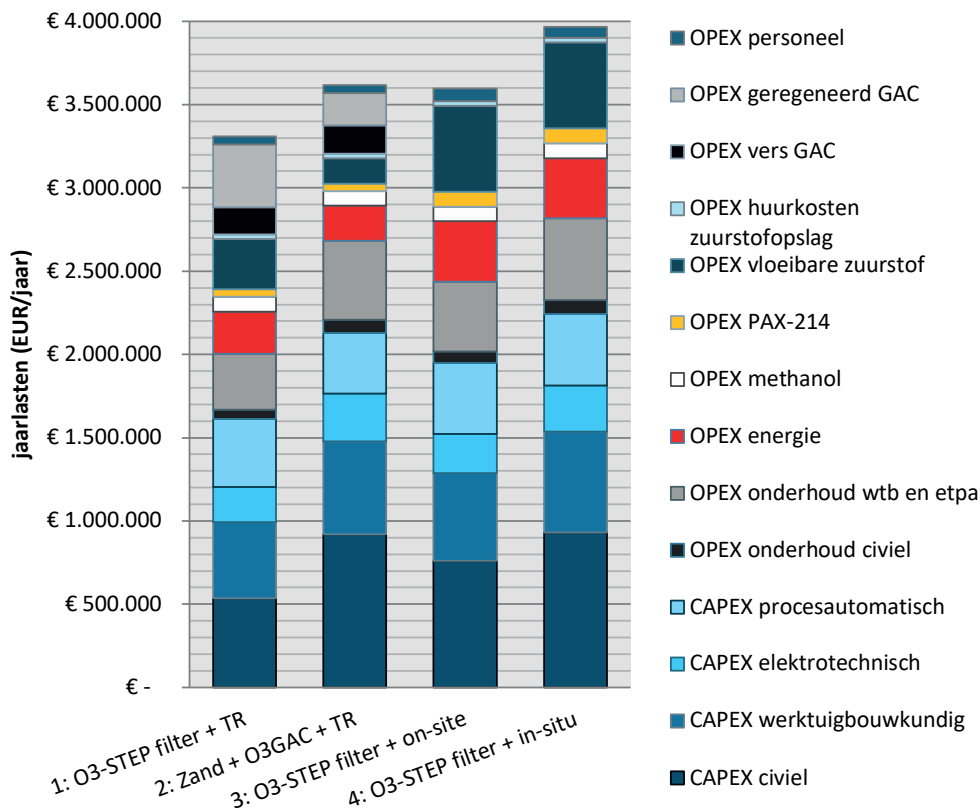
De hogere investeringskosten resulteren in hogere jaarlasten van concept 3 en 4, maar deze kosten hebben ook veruit de grootste onzekerheidsmarge. De kosten voor een ozonregeneratie-installatie en het ozonbestendig maken van GAC-filters en aanvullende luchtbehandeling voor concept 3 en 4 kunnen niet met een grote zekerheid geraamd worden omdat er voor deze elementen geen bestaande voorbeelden zijn om naar te kunnen refereren. Deze en andere onzekerheden worden verder behandeld in de gevoeligheidsanalyse in het volgende hoofdstuk.

Opvallend is dat de OPEX van concept 3 en 4 lager zijn dan bij concept 1 als de onderhoudskosten niet meegerekend worden of andersom als bij concept 3 en 4 een substantiële reductie van de bouwkosten kan worden gerealiseerd op worden overall voordeliger dan concept 1. Deze situatie is mogelijk als blijkt dat minder drastische maatregelen nodig voor corrosiepreventie met het oog op het gebruik van ozon voor de in situ regeneratie.

AFBEELDING 4.1 OVERZICHT VAN DE JAARLASTEN PER CONCEPT BIJ EEN GROOTTE VAN 20.000 I.E.; HIERBIJ ZIJN CONCEPT 1 EN 2 MET THERMISCHE REGENERATIE EN CONCEPT 3 EN 4 MET OZONREGENERATIE



AFBEELDING 4.2 OVERZICHT VAN DE JAARLASTEN PER CONCEPT BIJ EEN GROOTTE VAN 300.000 I.E.; HIERBIJ ZIJN CONCEPT 1 EN 2 MET THERMISCHE REGENERATIE EN CONCEPT 3 EN 4 MET OZONREGENERATIE



Opschaling heeft op de kosten van concept 3 een groter effect dan concept 2 en 4. Dit komt omdat in concept 3 alleen één regeneratietank nodig is en deze relatief goedkoper wordt bij opschaling. Bij concept 2 en 4 zijn de kosten meer afhankelijk van de het benodigde filteroppervlak. Bij concept 4 worden alle filters 50% duurder als gevolg van de ozonbestendigheid en extra luchtbehandeling. Bij opschaling is meer filteroppervlak nodig die per stuk vanaf een schaalgrootte van 100.000 i.e. niet meer goedkoper worden. Hierdoor blijven concept 3 en 4 relatief duurder bij een grotere schaalgrootte dan concept 2.

TABEL 4.5 VERGELIJKEND KOSTENOVERZICHT VAN DE CONCEPTEN

Schaalgrootte rwzi	i.e.	20.000	100.000	300.000
<i>jaarlasten CAPEX</i>				
concept 1: O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie)	EUR/jaar	276.300	685.700	1.612.900
concept 2: Zandfilter + O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie)	EUR/jaar	338.500	844.300	2.129.800
concept 3: O3-STEP® filter (on-site regeneratie met ozon)	EUR/jaar	434.400	932.500	1.948.500
concept 4: O3-STEP® filter (in-situ regeneratie met ozon)	EUR/jaar	449.100	989.200	2.242.600
<i>jaarlasten OPEX</i>				
concept 1: O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie)	EUR/jaar	176.100	625.300	1.696.900
concept 2: Zandfilter + O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie)	EUR/jaar	168.600	547.900	1.488.800
concept 3: O3-STEP® filter (on-site regeneratie met ozon)	EUR/jaar	232.000	662.400	1.647.800
concept 4: O3-STEP® filter (in-situ regeneratie met ozon)	EUR/jaar	226.100	668.700	1.723.400
<i>totale jaarlasten CAPEX + OPEX</i>				
concept 1: O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie)	EUR/jaar	452.400	1.311.000	3.309.800
concept 2: Zandfilter + O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie)	EUR/jaar	507.100	1.392.200	3.618.600
concept 3: O3-STEP® filter (on-site regeneratie met ozon)	EUR/jaar	666.400	1.594.900	3.596.300
concept 4: O3-STEP® filter (in-situ regeneratie met ozon)	EUR/jaar	675.200	1.657.900	3.966.000
<i>kosten per m³ secundair effluent</i>				
concept 1: O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie)	EUR/m³	0,43	0,25	0,21
concept 2: Zandfilter + O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie)	EUR/m³	0,48	0,26	0,23
concept 3: O3-STEP® filter (on-site regeneratie met ozon)	EUR/m³	0,63	0,30	0,23
concept 4: O3-STEP® filter (in-situ regeneratie met ozon)	EUR/m³	0,64	0,32	0,25
<i>kosten per i.e.</i>				
concept 1: O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie)	EUR/i.e./jaar	22,6	13,1	11,0
concept 2: Zandfilter + O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie)	EUR/i.e./jaar	25,4	13,9	12,1
concept 3: O3-STEP® filter (on-site regeneratie met ozon)	EUR/i.e./jaar	33,3	15,9	12,0
concept 4: O3-STEP® filter (in-situ regeneratie met ozon)	EUR/i.e./jaar	33,8	16,6	13,2

De kosten per m³ behandeld secundair effluent bedragen voor het O3-STEP® filterconcept 1 bij een schaalgrootte van 300.000 i.e. EUR 0,21; per inwonerequivalent komt dit neer op circa EUR 11,- per i.e. per jaar. Deze specifieke kostenkengetallen komen overeen met de range van kosten die in het STOWA-project Een vertaling van kennis en ervaringen uit Duitsland en Zwitserland (6) gepresenteerd zijn. In hoofdstuk 5 wordt hier nader op ingegaan.

4.7 KOSTENSPECIFICATIES REGENERATIE

Voor thermisch regenereren in concept 1 en 2 is gerekend met een kostprijs van 500 EUR/m³ actiefkool (0,02 EUR/m³ behandeld secundair effluent) inclusief transport. Daarnaast moet er nieuw kool bijgekocht worden omdat circa 15% van de kool wordt verbrand tijdens thermische regeneratie (á 1.200 EUR/m³) en het oorspronkelijke GAC wordt afgeschreven over een

looptijd van 30 jaar. De vervangingskosten voor GAC komen daarmee op 220 EUR/m³ actiefkool. De totale kosten van thermische regeneratie en het bijkopen van actiefkool bij concept 1 zijn daarmee 720 EUR/m³ actiefkool (0,03 EUR/m³ behandeld effluent).

Voor regenereren van kool met ozon op locatie is extra zuurstof, elektriciteit, en bemensing nodig. Daarnaast gaan de onderhoudskosten omhoog omdat ook de bouwkosten omhoog gaan. Dit komt uit op 530 EUR/m³ actiefkool (0,03 EUR/m³ behandeld effluent) bij een concept 3 met eens schaalgrootte van 300.000 i.e. (zie Tabel 4.6).

Omdat er ook extra gebouwd moet worden komen de totale kosten voor ozonregeneratie op 1.050 EUR/m³ actiefkool (0,05 EUR/m³ behandeld effluent). Zoals te zien in tabel 4.6 zijn de kosten voor regeneratie met ozon voor meer dan de helft afhankelijk van de extra bouwkosten. Bij een kleine schaal (20.000 i.e.) zijn deze kosten relatief hoog waardoor regenereren op locatie niet rendabel is. Op grotere schaal wordt op locatie regenereren met ozon relatief goedkoper, maar is nog altijd duurder dan thermisch regenereren.

Voor het berekenen van de kosten voor regeneratie van GAC bij concept 3 en 4 is ervan uitgegaan dat dit de meerkosten zijn voor o.a. een grotere ozoninstallatie, extra zuurstof, elektriciteit, personeel en een extra regeneratie tank of duurdere GAC-filters. Anders gezegd het verschil tussen concept 1, minus de kosten voor GAC regeneratie en het bijkopen van GAC in concept 1, en concept 3 geeft de kosten voor de regeneratie in concept 3. Zo zijn ook de kosten van GAC-regeneratie in concept 4 bepaald.

TABEL 4.6 KOSTEN VOOR ACTIEFKOOL REGENERATIE UITGESPLITST

Schaalgrootte rwzi	i.e.	20.000	100.000	300.000
<i>Thermisch (concept 1)</i>				
GAC-regeneratie	EUR/m ³ GAC	500	500	500
	(EUR/m ³ sec. effluent)	(0,02)	(0,02)	(0,02)
GAC bijkopen (15% van GAC volume bijkopen + afschrijving over 30 jaar van oorspronkelijk GAC)	EUR/m ³ GAC	220	220	220
	(EUR/m ³ sec. effluent)	(0,01)	(0,01)	(0,01)
totaal	EUR/m ³ GAC	720	720	720
	(EUR/m ³ sec. effluent)	(0,03)	(0,03)	(0,03)
<i>On-site met ozon (concept 3)</i>				
regeneratie verbruik (OPEX)	EUR/m ³ GAC	1.838	810	596
	(EUR/m ³ sec. effluent)	(0,09)	(0,04)	(0,03)
regeneratie investeringen (CAPEX)	EUR/m ³ GAC	3.162	987	447
	(EUR/m ³ sec. effluent)	(0,15)	(0,05)	(0,02)
totaal	EUR/m ³ GAC	5.000	1.797	1.043
	(EUR/m ³ sec. effluent)	(0,24)	(0,09)	(0,05)
<i>On-situ met ozon (concept 4)</i>				
regeneratie verbruik (OPEX)	EUR/m ³ GAC	1.720	835	697
	(EUR/m ³ sec. effluent)	(0,08)	(0,04)	(0,03)
regeneratie investeringen (CAPEX)	EUR/m ³ GAC	3.456	1.214	840
	(EUR/m ³ effluent)	(0,16)	(0,06)	(0,04)
totaal	EUR/m ³ GAC	5.176	2.049	1.536
	(EUR/m ³ effluent)	(0,25)	(0,10)	(0,07)

5

GEVOELIGHEIDSANALYSE EN INTERPRETATIE

Voor elk concept geldt een aantal factoren met een zekere mate van onzekerheid vanwege aannames die in het ontwerp en bij de kostenraming gedaan zijn. Deze factoren zijn opgedeeld in algemene factoren (zie paragraaf 5.1) die gelden voor alle varianten en specifieke factoren (zie paragraaf 5.2) die alleen in de afzonderlijke concepten gelden.

5.1 ALGEMENE GEVOELIGHEID

1. DOC-concentratie:
 - de hoeveelheid DOC in het aanvoerwater is gekoppeld aan de benodigde hoeveelheid ozon. Hierin kan per locatie en rwzi een behoorlijke variatie in zitten. Naarmate de DOC-concentratie stijgt, neemt ook de ozondosering toe. Dit heeft op verschillende manieren invloed op de kosten:
 - lager/hoger energie verbruik voor ozongenerator;
 - minder/meer zuurstof nodig voor de productie van ozon;
 - lagere/hogere opslagcapaciteit van vloeibaar zuurstof;
 - ozongenerator met lagere/hogere capaciteit.
2. ozondosering:
 - de keuze van doseerverhouding O_3 / DOC; een hogere doseerverhouding zorgt ervoor dat er meer verontreinigingen worden geoxideerd waardoor de belasting op het GAC-filter afneemt en de standtijd toeneemt. Hier tegenover staat dat de kosten voor de ozondosering toenemen. Ook de kans op bromaatvorming neemt toe bij hogere ozonconcentraties.
3. standtijd GAC:
 - een deel van de operationele kosten (OPEX) bestaat uit de kosten voor regeneratie van actiefkool. De standtijd hiervan is daardoor belangrijk voor de kostenschatting. Deze standtijd wordt bepaald aan de hand van 'breakthrough time', de doorbraaktijd. Het moment waarop een bepaalde concentratie van een verontreiniging wordt gemeten in het effluent van de filter. Deze doorbraaktijd is echter per verontreiniging verschillend. Het moment waarop geregenereerd moet worden hangt ook af van de gekozen toelaatbare waarde van een bepaalde verontreiniging.
4. zuurstofconcentratie:
 - behalve de concentratie NO_x -N is voor de dosering van methanol ook de hoeveelheid zuurstof van belang. In het denitrificatie proces zetten bacteriën in het GAC-filter onder anoxische omstandigheden NO_x -N om in stikstofgas (N_2). Voor het groeien van deze bacteriën is een koolstofbron nodig (methanol) en een elektrondonor (NO_x). Echter, als er zuurstof

aanwezig is gebruiken de bacteriën dit als elektron donor i.p.v. $\text{NO}_x\text{-N}$. Een hogere concentratie zuurstof als gevolg van ozonisatie zorgt er dus voor dat er meer methanol gedoseerd moet worden voor het verwijderen van $\text{NO}_x\text{-N}$. Tegelijkertijd neemt de biomassa ook sneller toe doordat er meer koolstofbron wordt gedoseerd;

- uit de gevoeligheidsanalyse (Tabel 5.1) blijkt dat een hogere zuurstofconcentratie in het GAC-filter door ozonisatie maar een klein effect op de totale kosten heeft (1-3%).

5. Chemicaliëndosering voor aanvullende N- en P-verwijdering:

- Stikstof- en fosfaatgehalte.

De chemicaliëndosering wordt afgestemd op de hoeveelheid stikstof en fosfaat die in het effluent van de nabezinktank van de zuivering aanwezig is. Een afwijking van deze waarde zorgt voor andere chemicaliëndosering en dus andere kosten. Het aanvoerwater is echter het effluent van de nabezinktank, waar N en P al voor het grootste gedeelte wordt verwijderd. De concentraties zullen onder normale omstandigheden niet veel verschillen van de aangenomen waarde. Afwijkingen in stikstofconcentraties tot 15% geven geen significant verschil in kosten (<1%).

Voor fosfaat geldt dit zelf tot afwijkingen van 30%.

6. DOC-omzetting:

- de hoeveelheid DOC in het effluent van de nabezinktank van de rwzi kan net als N en P fluctueren. Daarnaast wordt de dosering van methanol ook nog beïnvloed door de omzetting van DOC naar AOC. Hoe meer AOC beschikbaar is hoe minder methanol nodig is voor denitrificatie. Ozondosering heeft dus zowel een negatieve (extra zuurstof in het water) als een positieve invloed (meer AOC) op de methanoldosering. Welk van deze twee effecten zwaarder weegt zal in de praktijk moeten blijken.

7. energieprij:

- de productiekosten van zuurstof zijn direct afhankelijk van de energieprij. Voor de elektriciteitsprijs is nu 0,10 EUR/kWh gerekend op basis van het STOWA 2015-27 rapport;
- het verlagen of verhogen van de energieprij met de helft ($\pm 0,05\text{EUR/kWh}$) levert een kostenverandering van $\pm 2\text{-}4\%$ op;
- het verlagen van de zuurstofprijs van 200 naar 100 EUR/ton levert een kostenbesparing van $2\text{-}6\%$ bij een schaalgrootte van 300.000 i.e.

8. kwaliteit GAC na reactivatie en regeneratie

- de kwaliteit van het GAC na reactivatie of regeneratie bepaald de effectiviteit van dit concept op de lange termijn. Reactivatie (met stoom) levert een GAC met vergelijkbare adsorptie waarden op. De kwaliteit na reactivatie kan contractueel vastgelegd worden. Bij regeneratie is dat sterk afhankelijk van de regeneratiemethode. Bij deze studie is er vanuit gegaan dat gereactiveert of geregenereerd kool voldoende kwaliteit heeft om microverontreinigingen tot meer dan 80% gedurende de standtijd van het GAC te verwijderen. Wanneer niet alle stoffen van het GAC verwijderd worden bij thermische behandeling is het mogelijk dat deze stoffen op de lange termijn steeds minder goed verwijderd worden. Zo is er bij het regenereren met ozon een risico dat de stoffen die op het GAC zitten niet door ozon geoxideerd kunnen worden. Dit is een belangrijke onderzoeksvraag voor het vervolgonderzoek van O3-STEP® filter aangezien het nieuw moeten kopen van GAC ($\text{à } 1.200\text{ EUR/ton}$) in plaats van regenereren ($\text{à } 500\text{-}600\text{ EUR/ton}$) de kosten voor het GAC-gebruik kan verdubbelen.

Tabel 5.1 geeft de gevoeligheidsanalyse weer als percentage van de totale kosten per i.e. per jaar. De waarden zijn berekend op basis van de mogelijke variatie in de aannamen. Er wordt aangenomen dat deze verschillen niet dusdanig groot worden dat er aanpassingen moeten worden doorgevoerd in de schaalgrootte van ozongeneratoren, ozoncontactor, chemicalienopslag en filterinhoud. Dus alleen een verandering in de aannames wordt meegenomen in deze gevoeligheidsanalyse. Tabel 5.1 geeft de bandbreedte die een verandering van de uitgangspunten heeft op de totale kosten en in procenten. Waarbij 100% de kosten zijn op basis van de uitgangspunten die in dit onderzoek (zie hoofdstuk 3 en 4) zijn gebruikt.

Variaties in DOC-concentratie van de afloop nabezinktank, de benodigde ozondosering en de standtijd van het GAC hebben de grootste impact op de ontwikkeling van overall kosten per m³ behandeld secundair effluent. Opmerkelijk hierbij is dat concept 2 de minste variatie in kostprijs vertoont. Dit is verklaarbaar door de aanvullende DOC-verwijdering in de voorgeschakelde zandfilter bij dit concept. Hier staan echter hogere bouwkosten tegenover. De gevoeligheidsanalyse laat zien dat concept 1 bij geen van de onderzochte factoren leidt een bovenmatige stijging van de kostprijs ten opzichte van de overige onderzochte concepten.

TABEL 5.1 GEVOELIGHEIDSANALYSE CONCEPTEN VOOR EEN SCHAALGROOTTE VAN 300.000 I.E. (KOSTEN PER M³ BEHANDELD SECUNDAIR EFFLUENT)

Concept	Kosten per m ³	DOC conc. (7-15 g/DOC/m ³)	Ozondosering (0,3-1,1 g O ₃ /g DOC)	Standtijd GAC (200%-50%)	Zuurstofconc. (1,5 - 10 mg O ₂ /L)	Elektriciteit (0,05-0,15 €/kWh)
1	100% (€0,21)	95% - 113% (€0,20 - €0,24)	92% - 116% (€0,19 - €0,24)	94% - 111% (€0,20 - €0,23)	100% - 102% (€0,21 - €0,21)	96% - 104% (€0,20 - €0,22)
2	100% (€0,23)	98% - 105% (€0,22 - €0,24)	96% - 107% (€0,22 - €0,24)	97% - 105% (€0,22 - €0,24)	100% - 102% (€0,23 - €0,23)	97% - 103% (€0,22 - €0,24)
3	100% (€0,23)	95% - 113% (€0,22 - €0,26)	93% - 116% (€0,21 - €0,26)	96% - 117% (€0,22 - €0,27)	100% - 101% (€0,23 - €0,23)	95% - 105% (€0,22 - €0,24)
4	100% (€0,25)	96% - 112% (€0,24 - €0,28)	94% - 114% (€0,24 - €0,29)	96% - 116% (€0,24 - €0,29)	100% - 101% (€0,25 - €0,25)	95% - 105% (€0,24 - €0,26)

5.2 SPECIFIEKE GEVOELIGHEID PER CONCEPT

Naast de gevoeligheden die voor alle concepten gelden zijn er ook gevoeligheden die specifiek zijn voor een bepaald concept. Tabel 5.2 geeft een overzicht van de bovengenoemde specifieke gevoeligheid per concept.

TABEL 5.2 OVERZICHT SPECIFIEKE GEVOELIGHEID PER CONCEPT TEN OPZICHT VAN CONCEPT 1

Concept	Gevoeligheid
1: O3-STEP® filter - extern thermische regeneratie	-
2: Zandfilter + O3-STEP® filter - extern thermische regeneratie	kostenbesparing op ozon en GAC door een zandfilter voor deze processen te plaatsen
3: O3-STEP® filter - on-site regeneratie met ozon	kosten voor een installatie voor regeneratie met ozon kosten aan ozongebruik bij regeneratie
4: O3-STEP® filter - in-situ regeneratie met ozon	kosten voor aanpassen GAC-filters voor ozondosering kosten aan ozongebruik bij regeneratie

- concept 1: O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie):
 - het referentieconcept 1 heeft geen specifieke elementen waar een gevoeligheid voor geldt die niet bij de andere concepten van toepassing is.
- concept 2: Zandfilter + O3-STEP® filter (extern thermische regeneratie):
 - in deze variant is de zandfilter een element dat onderscheidend is ten opzichte van de

andere concepten. Het idee achter het zandfilter is dat het water dat naar de ozondosering gaat nog verder gezuiverd is waardoor een besparing van ozongebruik en dus energie en zuurstof (liquid oxygen) ontstaat. Ook moet het zorgen voor een langere levensduur van het GAC-filter. De gevoeligheid zit in de mate van besparingen op ozondosering en het GAC-filter. De grootte van deze besparingen zal uiteindelijk alleen door middel van een pilot nauwkeurig bepaald kunnen worden. Voor het ontwerp van concept 2 is een DOC-verlaging van 50% als gevolg van het voorgeschakelde zandfilter aangenomen. Wanneer dit lager blijkt te zijn bijv. 30% overeenkomend met de CZV-verwijdering dan verhoogt dit de kosten van concept 2 met maximaal 9%.

- concept 3: O3-STEP® filter (on-site regeneratie met ozon):
 - het onderscheidende element is de regeneratietank on-site waarin het GAC d.m.v. ozondosering geregenereerd wordt. De kosten voor het bouwen van een dergelijke regeneratie-installatie zijn een schatting op basis van vergelijkbare systemen en hebben een relatief grote onzekerheid. Vermindering van de voorzieningskosten voor de regeneratietank van 50% levert een vermindering van 3-8% op te totale kosten;
 - ook het ozongebruik voor het regeneratieproces heeft een hoge gevoeligheid. Omdat deze techniek op full-scale nog niet is toegepast kan de hoeveelheid benodigd ozon in de praktijk verschillen van de berekende waarde.

TABEL 5.3 VERANDERING IN DE TOTALE KOSTEN BIJ HET NIET EXTRA OZONBESTENDIG MAKEN VAN DE REGENERATIE TANK IN CONCEPT 3 EN DE GAC-FILTERS IN CONCEPT 4; INDIEN REEDS ZANDFILTRATIE AANWEZIG IS ZULLEN DE KOSTEN ONGEVEER HALVEREN

Schaalgrootte rwzi		i.e.	20.000	100.000	300.000
Concept 3	ozonbestendige regeneratietank met 50% voorziening	EUR/m ³	0,63	0,30	0,23
	ozonbestendige regeneratietank met 25% voorziening	EUR/m ³	0,59	0,29	0,22
Concept 4	ozonbestendig GAC-filter met 50% voorziening	EUR/m ³	0,64	0,32	0,25
	ozonbestendig GAC-filter met 25% voorziening	EUR/m ³	0,60	0,30	0,23

¹ Bij een schaalgrootte van respectievelijk 20.000 i.e. of >100.000 i.e..

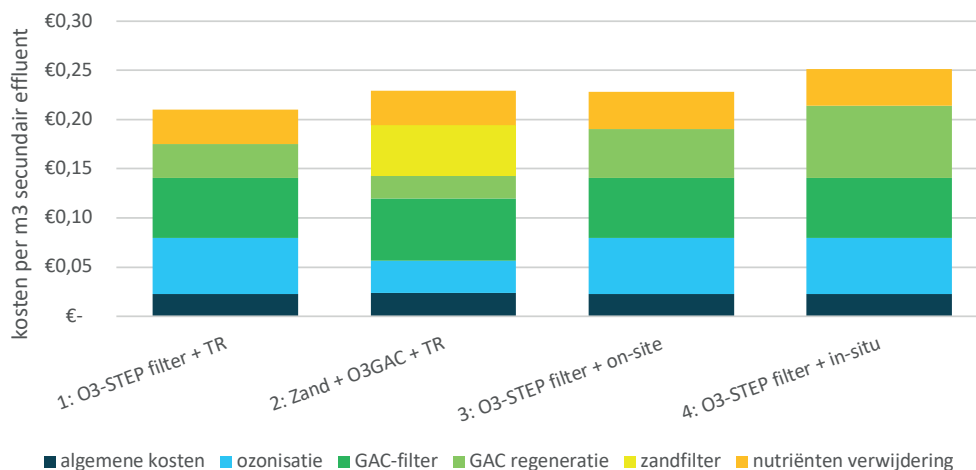
- concept 4: O3-STEP® filter (in-situ regeneratie met ozon):
 - de gevoeligheid in dit concept is vergelijkbaar met die van concept 3. Hier wordt echter geen aparte installatie voor regeneratie gebruikt maar worden de GAC-filters zodanig aangepast dat regeneratie in-situ mogelijk wordt. Er is uitgegaan dat de GAC-filters dan 50% duurder worden. Net als de regeneratietank van variant 3 zit er een relatief grote onzekerheid verbonden aan deze kostenschatting. Schommelingen van deze relatief hoge bouwkostenpost hebben - zoals eerder al uitgewerkt in paragraaf 4.6 - een dubbel effect omdat ook de operationele kosten door de onderhoudskosten worden beïnvloed omdat deze zijn gerelateerd aan de bouwkosten. Vermindering van de bouwkosten naar 25 % (i.p.v. 50%) duurder dan gewone GAC filters levert een vermindering van 7% op de totale kosten;
 - voor het ozongebruik geldt ook hetzelfde als bij variant 3. De benodigde hoeveelheid ozon kan in de praktijk afwijken van de berekende hoeveelheid.

5.3 UITSPLITSING KOSTENPOSTEN

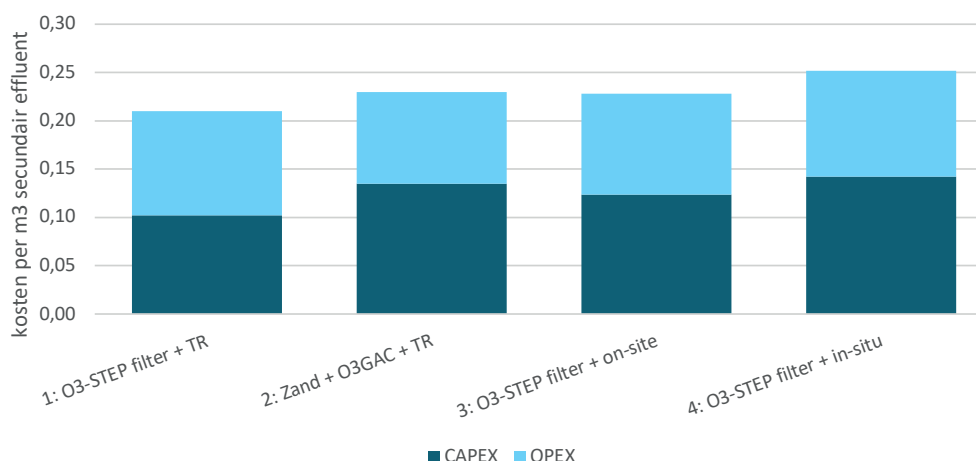
De kosten van de concepten zijn opgebouwd uit algemene kosten, kosten voor ozonisatie, GAC-filtratie, nutriënten verwijdering en GAC regeneratie. Bij concept 2 komen daar nog de kosten voor zandfiltratie bij. Afbeelding 5.1 laat de verdeling van deze kosten per onderdeel van ieder concept zien bij een schaalgrootte van 300.00 i.e.. De kosten voor nutriënten verwijdering zijn opgebouwd uit de kosten voor methanol en coagulant dosering inclusief de kosten

voor de opslag van deze chemicaliën. De kosten voor zuurstof en zuurstofopslag vallen onder ozonisatie. De kosten van de extra benodigde zuurstof voor regeneratie van GAC in concept 3 en 4 vallen onder de GAC regeneratie. De opbouw van de kosten van GAC regeneratie van concept 3 en 4 zijn in meer detail uitgewerkt in paragraaf 4.7. Afbeelding 5.2 toont de verdeling van de kosten in CAPEX en OPEX per concept. De kostenverdelingen bij een schaalgrootte van 20.000 en 100.000 i.e. zijn te vinden in Bijlage VI.

AFBEELDING 5.1 KOSTENVERDELING VAN DE CONCEPTEN BIJ EEN SCHAALGROOTTE VAN 300.000 I.E.; HIERBIJ ZIJN CONCEPT 1 EN 2 MET THERMISCHE



AFBEELDING 5.2 VERDELING VAN DE KOSTEN IN EUR ALS CAPEX EN OPEX PER CONCEPT BIJ EEN SCHAALGROOTTE VAN 300.000 I.E.; HIERBIJ ZIJN CONCEPT 1 EN 2



5.4 VERGELIJKING KOSTEN MET VOORGAANDE STOWA-PROJECTEN

De specifieke all-in kosten van de O3-STEP® filter concepten liggen tussen de 0,21-0,25 EUR/m³ bij een schaalgrootte van 300.000 i.e.; dit komt per inwonerequivalent neer op circa EUR 11,- per jaar. Deze specifieke kosten komen overeen met de range van kosten die in het STOWA-project “Een vertaling van kennis en ervaringen uit Duitsland en Zwitserland” [53] gepresenteerd zijn. Het O3-STEP® filter concept is daarmee ongeveer even duur als het in STOWA2015-27 berekende concept poederkooldosering met zandfiltratie en iets duurder dan het concept ozonisatie met zandfiltratie, maar duidelijk gunstiger dan het concept met alleen GAC-filtratie bij een schaalgrootte van 100.000 i.e. en groter (zie tabel 5.4). Dat O3-STEP® filter goedkoper is dan GAC alleen is verklaarbaar doordat de standtijd van het GAC in combinatie met ozon verdubbeld is en de EBCT is gehalveerd ten opzichte van STOWA2015-27. In het STOWA-rapport 2015-27 is voor GAC-filtratie uitgegaan van volledige GAC-vervanging in plaats van GAC-regeneratie en is een standtijd van 6 maanden gehanteerd in plaats van 12

maanden voor het O3-STEP® filter. Een langere EBCT van 30 minuten is gehanteerd in plaats van 15 minuten zoals voor het O3-STEP® filter.

In vergelijking met het 1-STEP® filter (zie hiervoor STOWA2009-34) zoals gerealiseerd op de rwzi Horstermeer is het O3-STEP® filter concept duurder. Belangrijke aspecten die dit kostenverschil bepalen zijn:

1. het 1-STEP® filter zoals toegepast op rwzi Horstermeer is primair bedoeld voor TSS-filtratie en nutriëntenverwijdering (denitrificatie en chemische fosfaatverwijdering met vlok- en zwevendestofverwijdering) waarbij verwijdering van microverontreinigingen als secundaire procesactiviteit (via adsorptie en biologische omzetting) wordt meegenomen. Indien verwijdering van microverontreinigingen als primair zuiveringsdoel meegenomen zou worden in de ontwerputgangspunten dan zou het 1-STEP® filter groter (CAPEX) zijn en frequenter geregenereerd (OPEX) moeten worden (zie ook punt 3 en 4 hieronder). De kosten voor 1-STEP® filtratie zouden dan vergelijkbaar zijn met GAC-filtratie zonder ozondosering (zie tabel 5.4, GAC-filtratie (STOWA2015-27));
2. de kostenraming van het 1-STEP® filter bevat geen ozonoxidatie;
3. bij het 1-STEP® filter wordt een lagere EBCT gehanteerd (om redenen zoals onder punt 1 weergegeven); verhoging van de EBCT resulteert in een verlaging van de filtersnelheid (< 15 m/h) en een groter benodigd oppervlak filteroppervlak. Verdubbeling van de EBCT resulteert in een 100% toename van het benodigde filteroppervlak en daarmee een forse toename van de CAPEX;
4. de standtijd van actiefkool in het 1-STEP® filter op de rwzi Horstermeer is initieel afgestemd op de primaire functie van het filter (zie punt 1) en toepassing van GAC als filtermedium en dragermateriaal voor de denitrificerende biomassa (standtijd 1 tot 4 jaar). Indien de standtijd wordt afgestemd op de volledige verwijdering van microverontreinigingen (3 - 6 maanden) dan zou de regeneratiefrequentie toenemen en daarmee de OPEX stijgen tot het niveau van GAC-filtratie zonder ozondosering (zie tabel 5.4, GAC-filtratie (STOWA2015-27)).

TABEL 5.4 INDICATIEVE KOSTEN VOOR VERWIJDERING MICROVERONTREINIGING EN/OF NUTRIËNTEN PER BEHANDELDE M³ SECUNDAIR EFFLUENT ZOALS GEPRESENTEERD IN STOWA2015-27 [53], STOWA2013-35 [52], STOWA2009-34 [50] EN O3-STEP® FILTER (DIT RAPPORT), VERREKEND NAAR PRIJSPEIL 2017

Capaciteit rwzi (150 g TZV)	20.000 i.e.	100.000 i.e.	300.000 i.e.
Nutriëntenverwijdering en bijkomstige verwijdering microverontreinigingen			
1-STEP® filter ¹⁾ (STOWA2009-34)	-	EUR 0,08 - 0,11	-
Verwijdering microverontreinigingen zonder nutriëntenverwijdering			
Ozonisatie + zandfiltratie (STOWA 2015-27)	EUR 0,22	EUR 0,18	EUR 0,16
PAC+ zandfiltratie (STOWA 2015-27)	EUR 0,26	EUR 0,20	EUR 0,18
GAC-filtratie (STOWA 2015-27)	EUR 0,28	EUR 0,26	EUR 0,26
Verwijdering microverontreinigingen en nutriënten			
O3-STEP® filter (dit rapport)	EUR 0,43	EUR 0,25	EUR 0,21
O3GAC excl. nutriëntenverwijdering (dit rapport)	EUR 0,30	EUR 0,19	EUR 0,18

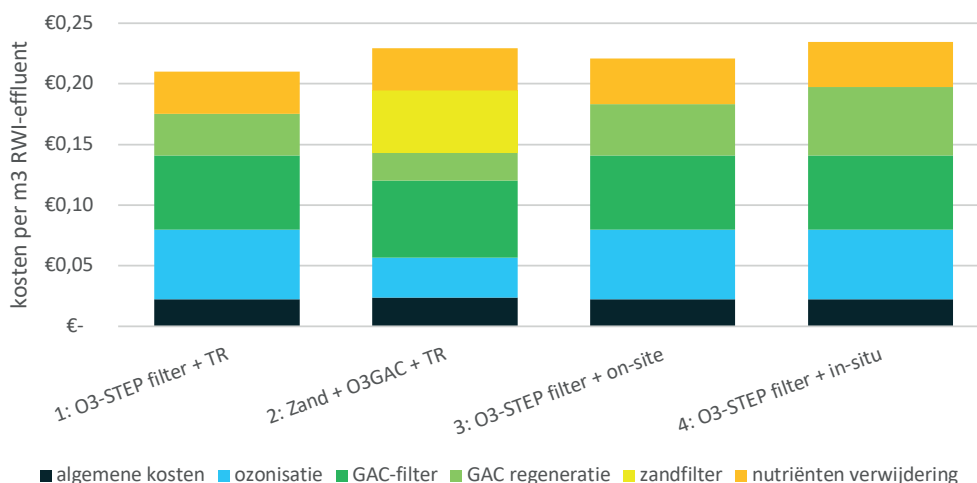
¹⁾ 1-STEP® filter met verkorte EBCT en standtijd van actiefkool van 1 tot 4 jaar (STOWA2009-34), inclusief verdergaande nutriënten verwijdering. Huidig 1-STEP® filter Horstermeer is reeds vijf jaar in bedrijf zonder regeneratie waarbij activiteit voor verwijdering microverontreinigingen na verloop van 6 maanden beperkt is

5.4.1 AANPASSING VOORZIENING OZONBESTENDIGHEID

In de kostenberekeningen zijn voor concept 3 en 4 voorzieningen opgenomen om de in-situ ozonregeneratie in een separate regeneratietank of in de GAC-filters mogelijk te maken. Deze voorziening van 50% extra bouwkosten voor tanks en filters ten opzichte van de concepten 1 en 2 is een aanzienlijke kostenpost en het is nog onzeker of deze wel nodig is. Een reductie in

de bouwkosten van de regeneratietank en het ozonbestendig maken van de GAC-filters naar 25% zorgt dat concept 3 en 4 goedkoper worden en dat concept 3 ongeveer even duur wordt als concept 1 (zie afbeelding 5.3). Echter worden de concepten niet goedkoper dan concept 1.

AFBEELDING 5.3 KOSTENVERDELING VAN DE CONCEPTEN BIJ EEN SCHAALGROOTTE VAN 300.000 I.E. EN EEN VERLAGING VAN DE BOUWKOSTEN VOOR EEN OZONBESTENDIGE REGENERATIE TANK EN GAC-FILTERS NAAR 25% EXTRA BOUWKOSTEN IN CONCEPT 3 EN 4; HIERBIJ ZIJN CONCEPT 1 EN 2 MET THERMISCHE REGENERATIE EN CONCEPT 3 EN 4 MET OZONREGENERATIE



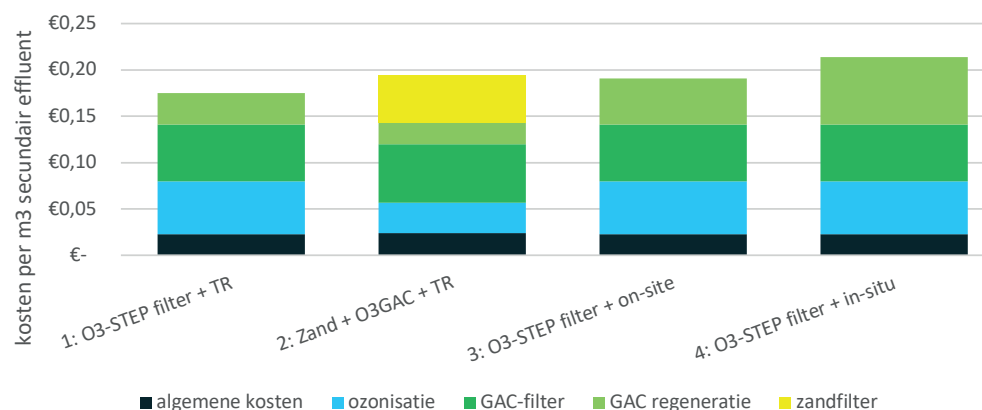
Uit afbeelding 5.3 blijkt dat concept 3 meer voordeel heeft bij grotere schaal en daarom goedkoper is dan concept 4 (300.000 i.e.). Daarmee is on-site regeneratie van GAC in een regeneratie tank de beste optie voor regeneratie van GAC met ozon. De prijs van de thermische regeneratie van GAC hangt ongeveer 40% af van de transportkosten (zie bijlage III). Wanneer de transportafstand langer is wordt thermisch regenereren ook duurder.

5.4.2 KOSTEN VOOR VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN VERSUS NUTRIËNTEN

In tegenstelling tot voorgaande STOWA-studies waar alleen gekeken is naar de verwijdering van microverontreinigingen is in dit rapport de verwijdering van microverontreinigingen én nutriënten uit secundair effluent gecombineerd (zie ook STOWA-rapport 2015-27). Bij de uitsplitsing van kostenposten (afbeelding 5.1) is te zien dat de kostenpost voor nutriëntenverwijdering gelijk is voor de verschillende concepten. De nutriëntenverwijdering draagt voor alle concepten met 0,03-0,13 EUR/m³ secundair effluent bij aan de totale kosten.

Afbeelding 5.4 toont de 'all in'-kosten van de verschillende concepten zonder extra kosten voor nutriëntenverwijdering. Zonder nutriëntenverwijdering zijn de kosten voor grootschalige ozondosering met GAC-filtratie (concept 1) ongeveer even gunstig als het concept ozonisatie met zandfiltratie en bij een schaalgrootte van 300.000 i.e. is de totale kostprijs gunstiger dan poederkooldosering en zandfiltratie zoals beschreven in STOWA-rapport 2015-27 (zie tabel 5.4) [53]. De financiële uitgangspunten die voor ozondosering van O3-STEP® filter zijn gehanteerd zijn gelijk aan de uitgangspunten van STOWA-rapport 2015 voor ozonisatie en zandfiltratie (zie hoofdstuk 3.1.5 en 3.1.8).

AFBEELDING 5.4 KOSTEN VAN DE CONCEPTEN ZONDER NUTRIËNTENVERWIJDERING BIJ 300.000 I.E.; HIERBIJ ZIJN CONCEPT 1 EN 2 MET THERMISCHE REGENERATIE EN CONCEPT 3 EN 4 MET OZONREGENERATIE



5.5 INDICATIEVE KWALITATIEVE VERGELIJKING VAN ALTERNATIEVEN

Naast de kwantitatieve beoordeling en vergelijking van de concepten is een indicatieve kwalitatieve vergelijking van alternatieven opgesteld en samengevat in tabel 5.5. Deze tabel is samengesteld op basis van berekeningen uit dit rapport (kosten), literatuur en expert judgement door het projectteam en de STOWA-begeleidingscommissie. Het concept PAC + zandfilters is daarbij gebruikt als referentie waarop voor de overige alternatieven is gekeken of deze beter of minder goed scoren ten opzichte van deze referentie. In de volgende paragrafen zijn de kwalitatieve aspecten kort toegelicht. Aangezien deze vergelijking indicatief is en de informatie niet altijd beschikbaar is, zijn enkele onderwerpen van vraagtekens voorzien. Deze aspecten vragen om meer onderzoek.

TABEL 5.5 INDICATIEVE KWALITATIEVE VERGELIJKING MET ANDERE CONCEPTEN VOOR DE NABEHANDELING VAN SECUNDAIR EFFLUENT

	PAC+ Zandfilter (referentie)	Concept 1 O3-STEP® filter	Ozon + Zandfilter	GAC-filtratie	1-STEP® filter rwzi Horstermeer
Kosten	0	-	0	-	+
Effluentkwaliteit microverontreinigingen	0	+	+/-	0	-?
Effluentkwaliteit nutriënten	0	+	0	0	+
Effluentkwaliteit pathogenen	0	+	+	0	?
Effluentkwaliteit ecotox/ames-testen	0	+/-	0/-	0	?
Energieverbruik	0	-	-	-	0
Reststoffenproductie	0	+	+	0	+
Bedrijfsvoering	0	-	-	0	0

Toelichting op de kostenverschillen is reeds gegeven in paragraaf 5.4.

5.5.1 EFFLUENTKWALITEIT - CHEMISCH

Door de combinatie van microverontreinigingen- en nutriëntenverwijdering in het O3-STEP® filter concept liggen de kosten weliswaar iets hoger dan bij de alternatieven die in STOWA 2015-27 zijn beschreven, maar is de kwaliteit van het tertiaire effluent wel beter. Dit komt niet alleen omdat nutriënten verwijderd worden tot aan de streefwaarde voor oppervlaktewater maar ook omdat door de combinatie van ozonisatie met biologische GAC-filtratie oxidatie van microverontreinigingen wordt gecombineerd met biologische omzetting en adsorptie van microverontreinigingen en restproducten. Hierdoor wordt een breder spectrum aan microverontreinigingen verwijderd dan wanneer alleen adsorptie of alleen oxidatie wordt gebruikt.

5.5.2 EFFLUENTKWALITEIT - PATHOGENEN

Door toepassing van oxidatie kan, afhankelijk van de dosering of intensiteit, desinfectie plaatsvinden doordat pathogenen geïnactiveerd en/of gedood worden. Toepassing van ozon heeft zodoende een toegevoegde waarde in het licht van zwemwaterkwaliteit en pathogene belasting van oppervlaktewater.

5.5.3 EFFLUENTKWALITEIT - ECOTOXISCH

In de kwalitatieve beoordeling is naast de chemische effluentkwaliteit ook een interpretatie van de ecotoxische effluentkwaliteit gegeven. In het onderzoek is hier geen kwantitatieve analyse voor uitgevoerd maar is algemeen onderzoek naar bioassays en Ames-testen met oxidatie van microverontreinigingen uit oppervlaktewater en glastuinbouwwater als referentie gebruikt. Met bioassays⁵ worden genotoxische en ecotoxische effecten gemeten. Voor screening op genotoxiciteit kan de Ames⁶-fluctuatietest ingezet worden. Deze test is een moderne versie van de klassieke Ames-plaattest, en wordt al geruime tijd door o.a. KWR toegepast om genotoxische verbindingen in water op te sporen. De test is gevalideerd en internationaal erkend en in staat gebleken om vorming van potentieel mutagene nevenproducten van waterbehandeling met AOP-processen aan te tonen [18, 19].

Onderzoek heeft uitgewezen dat oppervlaktewater reeds genotoxische⁷ effecten vertoont en dat na AOP-oxidatie de genotoxische effecten sterk kunnen toenemen [27], waarbij UV-oxidatie een sterker effect heeft dan ozon-oxidatie. Alleen actiefkooladsorptie versterkt de effecten niet, maar verlaagd de ecotoxiciteit van het voedingswater nauwelijks. Uit onderzoek [40, 67] op afvalwater blijkt verder dat na oxidatie nageschakelde biologische actiefkoolfiltratie door adsorptieprocessen de toxische effecten sterk beperkt (30-50%), vandaar dat geadviseerd wordt om combinaties van oxidatie en biologische actiefkoolfiltratie toe te passen.

In de kwalitatieve analyse zijn alternatieven met alleen actiefkooltoepassingen en in het bijzonder oxidatie en zonder actiefkooladsorptie lager ingeschaald dan de combinatie ozon en actiefkoolfiltratie.

5.5.4 ENERGIE EN RESTSTOFFEN

Alle alternatieven verbruiken relatief veel extra energie om aanvullende zuiveringsprocessen te realiseren. Nageschakelde technieken/zuivering omvatten extra pompenergie en oxidatietechnieken vergen extra elektriciteit (voor ozonproductie) of energie in de vorm van oxidatiemiddel. Actiefkooltoepassingen met regeneratie vragen regeneratie-energie, waarbij alternatieve regeneratietechnieken met name bedoeld zijn om energiebesparing mogelijk te maken.

De in dit rapport uitgewerkte concepten hebben op basis van de het conceptontwerp de volgende energieverbruiken. Concept 2 scoort hierbij het beste door de lange GAC-standtijd en de beperkte regeneratie-energie die daarvoor nodig is. On-site (concept 3) en in-situ (concept 4) regeneratie van GAC door O3 lijkt op basis van de huidige stand van kennis 10% energie-efficiënter dan thermische regeneratie (concept 1). Nader onderzoek naar energieverbruik is aan te bevelen. Voor een vertaling van energieverbruik en hulpstoffengebruik naar GER-waarde wordt verwezen naar STOWA2017-37 [12].

5 De Microtox® test is een bacterieel alternatief voor het testen op gewervelde vissen, uitgevoerd conform ISO 11348-3.

6 De Ames-fluctuatietest maakt zichtbaar in hoeverre er DNA-mutaties optreden in bacteriestammen (Salmonella typhimurium) na in contact te zijn geweest met het behandelde water. Kunstmatig gemuteerde bacteriën maken geen histidine meer aan en hebben een verminderd DNA-herstel.

7 Genotoxiciteit is de potentie van een stof om het DNA in de celkern te veranderen, genotoxische stoffen kunnen hierdoor ook carcinogeen (kankerverwekkend) zijn.

TABEL 5.6 INDICATIEF ENERGIEVERBRUIK PER CONCEPT BEPAALD OP BASIS VAN CONCEPTONTWERP (SCHAALGROOTTE 300.000 I.E.)

onderdeel	eenheid	concept 1: O3-STEP® filter + Thermische GAC-reactivatie	Concept 2: Zandfilter + O3-STEP® filter + Thermische GAC- reactivatie	Concept 3: O3- STEP® filter +on-site O3 GAC-regeneratie	Concept 4: O3-STEP® filter +in-situ O3 GAC-regeneratie
pompen	kWh/d	1.110	1.741	1.110	1.110
ozongenerator	kWh/d	3.326	1.663	5.730 *	5.730 *
extra koeling ozongenerator	kWh/d	665	333	1.146	1.146
GAC	kWh/d	1.901	1.901	1.901	1.901
GAC regeneratie/ reactivatie (verrekend per dag)	kWh/d	3.226	1.667	-	-
GAC transport (verrekend per dag)	kWh/d	726	375	-	-
totaal energieverbruik	kWh/jaar	3.998.000	2.834.000	3.609.000	3.609.000
specifiek energieverbruik	kWh/m³	0,23	0,16	0,21	0,21

* inclusief ozonverbruik voor GAC-regeneratie

5.5.5 BEDRIJFSVOERING

Het aspect bedrijfsvoering geeft aan of er extra personeel of hoger opgeleid personeel nodig is voor de alternatieven. Extra personeel en hoger opgeleid personeel wordt vertaald in negatieve punten in tabel 5.5. Een zandfilter is relatief eenvoudig te bedienen waardoor weinig extra personeelsinzet nodig is. Voor ozonisatie moet personeel extra opgeleid worden om hiermee te kunnen werken. Voor regenereren op locatie is er daarnaast ook nog bemensing nodig

6

TUSSENCONCLUSIES CONCEPTONTWIKKELING

Dit hoofdstuk geeft de tussenconclusies van hoofdstuk 3 tot en met 5 weer (paragraaf 6.1). Dit hoofdstuk definieert daarnaast de belangrijkste onderzoeksvragen die zo goed mogelijk beantwoord dienen te worden alvorens naar een full-scale toepassing van het O3-STEP® filter te gaan. De vragen die in dit hoofdstuk zijn opgesteld vormen de basis voor de proof-of-principle die in hoofdstuk 7 is uitgewerkt.

6.1 TUSSENCONCLUSIE

In de voorgaande hoofdstukken zijn vier zuiveringsconcepten ontwikkeld en ontworpen op basis van beschikbare literatuur, praktijkgegevens en kennis van experts. De concepten maken allen gebruik van ozondosering en GAC-filtratie, gecombineerd met chemische fosfaatverwijdering en biologische stikstofverwijdering. De verschillende uitgewerkte concepten onderscheiden zich met name door de zuiveringsconfiguraties en de reactivatie- of regeneratiemethoden. De volgende concepten zijn beschouwd:

1. O3-STEP® filter met externe (= buiten de rwzi-locatie) thermische reactivatie van de kool;
2. O3-STEP® filter met externe thermische reactivatie, met voorgeschakeld zandfilter;
3. O3-STEP® filter met on-site regeneratie met O3 (= buiten de GAC-filters, op de rwzi-locatie);
4. O3-STEP® filter met in-situ (= in de GAC-filters) regeneratie met O3.

Deze O3-STEP® filter concepten lijken alle technologisch en technisch haalbaar. De verschillende concepten leveren een onderling vergelijkbare effluentkwaliteit: naast nutriënten en zwevende stof verwijdert het O3-STEP® filter naar verwachting ook een breder spectrum aan microverontreinigingen dan alternatieve nabehandelingconcepten.

De kosten van de O3-STEP® filter concepten zijn vergelijkbaar met alternatieve end-of-pipe maatregelen op rwzi's. Deze liggen voor installaties van 300.000 i.e. tussen de 0,21 - 0,25 EUR per m³ behandeld secundair effluent, respectievelijk 11,0 tot 13,2 EUR/i.e./jaar. Voor een schaalgrootte van 100.000 i.e. liggen de kosten op circa 0,25 tot 0,32 EUR/m³; respectievelijk 13,1 - 16,6 EUR/i.e./jaar. Concept 1 is daarbij de gunstigste uitvoering van het O3-STEP® filter concept. Concept 3 wordt vergelijkbaar met concept 1 op grote schaal (> 300.000 i.e.) wanneer de realisatiekosten verdisconteerd worden met de extra voorzieningen voor ozonbestendigheid in verband met de verhoogde optredende corrosie. De concepten 2 en 4 zijn relatief duurder doordat extra filterunits nodig zijn en in geval van concept 4 de GAC-filters ozonbestendig gemaakt moeten worden. De bedragen hier zijn iets hoger dan de kosten voor ozon met GAC-nabehandeling zoals genoemd in STOWA 2015-27 (0,16-0,26 EUR/m³) en STOWA 2017-36 (0,10-0,25 EUR/m³). Beide andere rapporten gaan uit van kosten voor microverontreinigingenverwijdering, terwijl het O3-STEP® filter ook nutriëntenverwijdering bewerkstelligt.

Concept 1 vormt de basis voor de proof-of-principle omdat dit als beste concept is aangegeven. Het concept bestaat, zoals bekend, uit twee losstaand bekende en bewezen technieken, te weten ozonoxidatie en 1-STEP® filtratie. Het 1-STEP® filter heeft zich bewezen als zeer doelmatige techniek voor nutriëntenverwijdering, maar de verwijdering van microverontreinigingen laat nog te wensen over: een bredere verwijderingsrange en een langere standtijd van het kool zijn beide wenselijk. Losstaande ozonbehandeling heeft zich ook bewezen en pakt (deels) andere stoffen aan dan actiefkool. De combinatie van beide technieken is in Nederland nog niet op secundair effluent getest.

6.2 ONDERZOEKSVRAGEN VOOR PRAKTIJKONDERZOEK

Op basis van de voorgaande hoofdstukken zijn een aantal essentiële onderzoeksvragen relevant die beantwoording vereisen voor succesvolle praktijktoepassing van het O3-STEP® filter concept.

1. Wat zijn de verwijderingsprestaties voor (een selectie aan) specifieke microverontreinigingen?
 - Wat is de verwijderingsprestatie van GAC?
 - Wat is de bijdrage van ozon?
 - Wat is de totale gecombineerde verwijderingsprestatie?
2. Wat zijn de verwijderingsprestaties voor een cocktail van (een selectie aan) microverontreinigingen?
 - Wat is de verwijderingsprestatie van GAC?
 - Wat is de bijdrage van ozon?
 - Wat is de totale gecombineerde verwijderingsprestatie?
3. Heeft ozon en positieve invloed op de standtijd van het GAC?
 - Wat is de (range van) ozondosering die tot verbetering van de standtijd van het GAC leidt?
 - Wat is de te verwachten standtijd van het GAC?
4. Wat is de invloed van de ozondosering op de nutriëntenverwijdering, te weten...
 - de biologische stikstofverwijdering?
 - de chemische fosfaatverwijdering?
5. Wat zijn de langdurige prestaties van het GAC?
 - Wat is de resterende beladingscapaciteit van het GAC na verloop van een bepaalde standtijd?
 - Wat is de (thermische) regeneratiemogelijkheid van het GAC na verloop van een bepaalde standtijd?
 - Wat is de resterende adsorptiecapaciteit van het (thermisch) gereactiveerde GAC?

De onderzoeksvragen zijn onder te verdelen in twee groepen. De eerste groep (onderzoeksvraag 1 tot en met 3) richten zich op de veronderstelling dat combineren van GAC-filtratie met voorgeschakelde ozonoxidatie leidt tot een verwijdering van een breder spectrum van microverontreinigingen én een verlenging van de standtijd van het actiefkoolbed. Deze veronderstelling is de basis van het O3-STEP® filter concept. Deze vragen zijn op laboratoriumschaal nader beschouwd in hoofdstuk 7: proof of principle.

De tweede groep, onderzoeksvragen 4 en 5 richten zich op de gecombineerde verwijdering van microverontreinigingen én nutriënten als ook op de (operationele) aspecten van actiefkool. Als de proof-of-principle geslaagd is dient deze verdere integratie met het 1-STEP® filter plaats te vinden. Deze vragen vereisen echter uitvoerige, langdurige testen met een filter in continue bedrijf en zijn daarmee beter te testen in demonstratie-opstelling dan in een laboratorium-omgeving.

7

PROOF-OF-PRINCIPLE

Het proof-of-principle onderzoek gaat (zoals genoemd in hoofdstuk 6.2) in op de veronderstelling dat combineren van GAC-filtratie met voorgeschakelde ozonoxidatie leidt tot een verwijdering van een breder spectrum van microverontreinigingen én een verlenging van de standtijd van het actiefkoolbed. Deze veronderstelling vormt de basis van het O3-STEP® filter concept. Dit hoofdstuk beschrijft achtereenvolgend de onderzoeksopzet, randvoorwaarden, resultaten van het proof-of-principle onderzoek op laboratoriumschaal en tenslotte de implicaties op de in hoofdstuk 3 tot en met 5 gehanteerde uitgangspunten voor Concept 1. De (Engelstalige) scriptie “Organic Micropollutant Treatment by Pre-Ozonation and Activated Carbon”, die gedurende het proof-of-principle onderzoek bij de TU Delft is geschreven, is beschikbaar via www.hydrotheek.nl [25].

TOELICHTING

Gedurende dit proof-of-principle onderzoek is gefocust op één specifieke groep binnen de microverontreinigingen: geneesmiddelen. In vervolgonderzoek dient gekeken te worden naar de bredere groep microverontreinigingen, zoals genoemd in het hoofddoel van dit onderzoeksproject (zie hoofdstuk 1). In vervolgonderzoek dient gebruik gemaakt te worden van effectmetingen om de effecten van niet-analyseerbare metabolieten en microverontreinigingen mee te kunnen nemen.

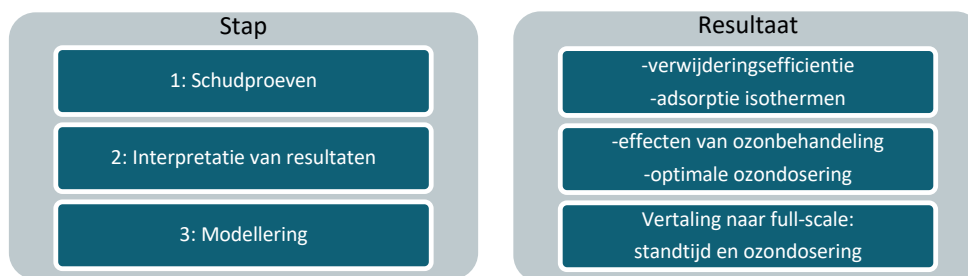
7.1 ONDERZOEKSVRAGEN EN -OPZET

De centrale onderzoeksvragen van de proof-of-principle, op basis van de vragen zoals gedefinieerd in hoofdstuk 6.2, zijn:

1. Wat zijn de verwijderingsprestaties voor (een selectie aan) specifieke geneesmiddelen?
2. Wat zijn de verwijderingsprestaties voor een cocktail van (een selectie aan) geneesmiddelen?
3. Heeft ozon en positieve invloed op de standtijd van het GAC?
 - Wat is de (range van) ozondosering die tot verbetering van de standtijd van het GAC leidt?
 - Wat is de te verwachten standtijd van het GAC?

Om deze vragen goed te kunnen beantwoorden is het onderzoek opgesplitst in 3 stappen, deze zijn schematisch weergegeven in afbeelding 7.1: schudproeven (stap 1), interpretatie van resultaten (stap 2) en modellering (stap 3). De schudproeven zijn een snelle en efficiënte methode om een indicatie van verwijderingsprestaties te krijgen, dit draagt bij aan de beantwoording onderzoeksvragen 1 en 2. Daarnaast worden uit de schudproeven adsorptie-isothermen bij verschillende ozondoseringen bepaald. Deze isothermen vormen de input voor een simulatiemodel, waarmee de doorbraakcurves en standtijden van een continu doorstroomd filter ingeschat kunnen worden. Daarmee dragen stappen 1, 2 en 3 bij aan het beantwoorden van onderzoeksvraag 3.

AFBEELDING 7.1 ONDERZOEKSOPZET LABORATORIUMTESTEN, OP BASIS VAN [25], HOOFDSTUK 3

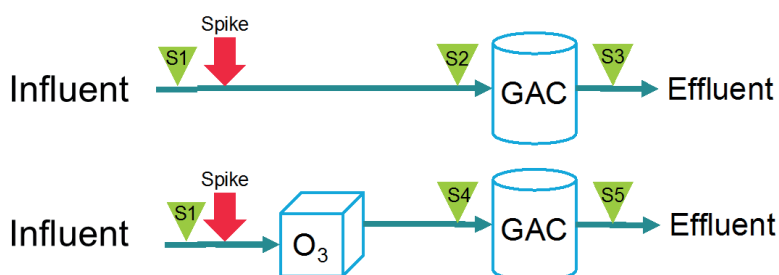


7.2 METHODE

ONDERZOEKSOPZET

Er is in dit onderzoek gebruik gemaakt van water uit de afloop van de nabezinktanks van rwzi Horstermeer. Het water is, conform afbeelding 7.2, op twee manieren behandeld: één deel is na spiken met de cocktail van doelstoffen direct behandeld met actiefkool in schudproeven. Bij het spiken wordt een vooraf bepaalde hoeveelheid extra doelstoffen toegediend aan het te behandelen water, zie verderop in deze paragraaf. Een ander deel is na spiken eerst met ozon in contact gebracht en daarna in schudproeven met actiefkool behandeld. In afbeelding 7.2 zijn de monsternamenpunten aangegeven met de groene driehoeken S1 tot S5.

AFBEELDING 7.2 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN SCHUDPROEVEN



DOELSTOFFEN

De geneesmiddelen waar gedurende dit onderzoek naar gekeken is zijn weergegeven in tabel 7.1. De lijst is samengesteld op basis van al lopende onderzoekslijnen in Nederland (PACAS en de Zoetwaterfabriek) en de beschikbaarheid van de gewenste stoffen in pakketten van analytische laboratoria. Benzotriazol is een uitzondering in deze lijst: het is geen geneesmiddel, maar een corrosieremmer. Deze stof komt voor in de lopende Nederlandse onderzoeken en was te analyseren door de laboratoria. De totstandkoming van de lijst is in meer detail terug te vinden in hoofdstuk 3.1 van referentie [25].

TABEL 7.1 DOELSTOFFEN VAN HET PROOF-OF-PRINCIPLE ONDERZOEK

Atorvastatine ⁸	Benzotriazol	Bisoprolol ⁹
Carbamazepine	Clarithromycine	Diclofenac
Ibuprofen	Metformine	Metoprolol
Sotalol	Sulfamethoxazole	Trimethoprim

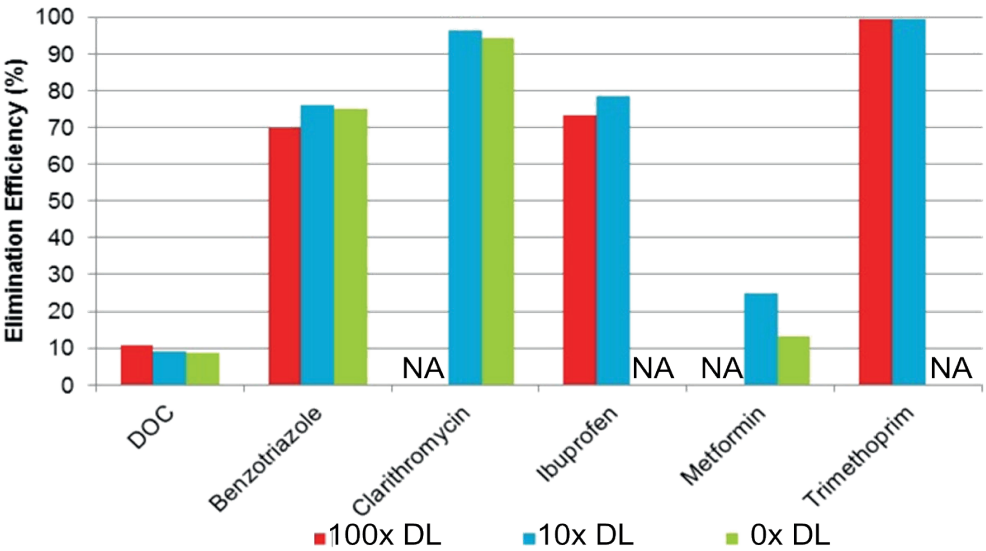
8 Atorvastatine staat wel op de doelstoffenlijst maar is door technische moeilijkheden in het analytisch laboratorium niet geanalyseerd;

9 Bisoprolol staat wel op de doelstoffenlijst maar is door technische moeilijkheden in het analytisch laboratorium niet geanalyseerd

SPIKEN VAN GENEESMIDDELEN

Om de verwijderingsprestatie van microverontreinigingen goed te kunnen bepalen is de cocktail van geneesmiddelen in bekende hoeveelheid toegevoegd aan het water (spiking, zie referentie [25], hoofdstuk 3.1 en 3.4 voor meer detail). Er is gespiked met 100x de laagst meetbare geneesmiddelenconcentratie (100x detectielimiet, afgekort tot DL). Omdat spiken effect heeft op de totale concentraties van geneesmiddelen in het water en omdat verwijdering van stoffen deels concentratieafhankelijk is, zijn schudproeven uitgevoerd met 10x detectielimiet en zonder spiken om de effecten hiervan te kunnen bepalen. Er is aangetoond dat spiken weinig tot geen aantoonbaar effect heeft op de gemeten verwijderingsprestatie, zoals te zien is in afbeelding 7.3.

AFBEELDING 7.3 EFFECT VAN SPIKEN VAN MICROVERONTREINIGINGEN OP DE VERWIJDERINGSPRESTATIE BIJ EEN OZONDOSERING VAN 0,8 G O₃/G DOC. “NA” GEEFT AAN DAT DE DATA NIET GEACCEPTEERD IS TIJDENS DE DATAVALIDATIE (ZIE VERDEROP IN DEZE PARAGRAAF), DL STAAT VOOR “DETECTIELIMIET”;



ACTIEFKOOLDOSERING

Er is gedurende dit proof-of-principle gebruik gemaakt van hetzelfde type GAC als in het 1-STEP® filter gebruikt wordt (GAC 612 WB, leverancier: CABOT). Het kool is vermalen om de testen te versnellen. De gebruikte doseringen van het kool zijn in tabel 7.2 beschreven. Er is gekozen voor een brede doseerrange om voldoende kwaliteit adsorptie-isothermen te verkrijgen om de standtijden van het full-scale filter te kunnen modelleren.

TABEL 7.2 KOOLDOSERING GEBRUIKT IN DE SCHUDPROEVEN

Kooldosering (mg AC/L water)	0,5	2	5	10	30	50
------------------------------	-----	---	---	----	----	----

OZONDOSERING

Tabel 7.3 geeft de gebruikte ozondoseringen aan. De bovengrens van 1,4 g O₃/g DOC is gekozen om bromaatvorming te voorkomen [53]. 0,8 g O₃/g DOC is een gangbare doseerrange voor ozonbehandeling [12, 53]. 0,2 en 0,4 g O₃/g DOC zijn gekozen op basis van literatuuronderzoek (zie referentie [25], paragraaf 3.5.2). Met beide doseringen worden hoge verwijderingsprestaties gerapporteerd. Ze worden hier gebruikt als lage doseringen om te bepalen hoe laag gedoseerd kan worden om nog positieve effecten te hebben op verwijderingsprestatie en standtijd.

TABEL 7.3

OZONDOSERING GEBRUIKT IN DE SCHUDPROEVEN

Ozondosering (g O ₃ /g DOC)	0	0,2	0,4	0,8	1,4
--	---	-----	-----	-----	-----

KWALITEITSTOETSING EN DATAVALIDATIE

De data van de schudproeven zijn eerst gevalideerd alvorens ze te gebruiken in de modellering die in het afstudeerproject nader zijn uitgewerkt [25]. Een aantal stoffen lieten grote verschillen tussen de verschillende (blanco)metingen zien. Hiervoor is geen eenduidige oorzaak te vinden, behalve de nauwkeurigheid van de specifieke analysemethoden van het laboratorium. Om negatieve invloeden hiervan te voorkomen op de rest van het onderzoek is een datavalidatiestap toegepast, zoals beschreven in referentie [25], hoofdstuk 4.1. Op basis van deze validatie zijn de data voor bisoprolol compleet verworpen. Atorvastatine was, zoals eerder deze paragraaf gemeld, door technische moeilijkheden niet analyseerbaar in het laboratorium. Zodoende zijn in totaal 10 van de 12 gewenste doelstoffen verder verwerkt. Bij de grafieken die verder in dit hoofdstuk gepresenteerd zijn, is aangegeven welke data gevalideerd is en meegenomen in de analyse. Als over “de gehele cocktail” wordt gesproken in dit rapport, dan worden de 10 gemeten en gevalideerde doelstoffen bedoeld. Voor nadere details over de modellering wordt verwezen naar referentie [25].

7.3 UITGANGSPUNTEN EN RANDVOORWAARDEN VAN HET ONDERZOEK

Het laboratoriumonderzoek kent een aantal uitgangspunten en randvoorwaarden die belangrijk zijn voor de interpretatie van de onderzoeksresultaten. Deze uitgangspunten zijn in meer detail weergegeven in referentie [25], paragraaf 4.9.4. Deze paragraaf beargumenteert en onderbouwt de belangrijkste uitgangspunten:

1. Verwijderingsrendement en standtijd worden gemodelleerd in plaats van gemeten in continue kolomtesten. Het model is gebaseerd op adsorptie-isothermen die bepaald zijn met batchgewijze schudproeven
2. De testen zijn uitgevoerd als schudtesten met vormalen GAC in plaats van GAC-kolomtesten;
3. Tijdens het proof-of-principleonderzoek is de invloed van de aanwezigheid van biologie niet getest;

MODELVOORSPELLING VERSUS KOLOMTEST

Kolomtesten geven het beste beeld van de prestaties van actiefkool gedurende een bepaalde standtijd. Dit zijn echter langdurige continue testen, waarbij gebruikt wordt gemaakt van een (kleinschalig) actiefkool filter. Voor dit proof-of-principle onderzoek is gekozen voor de korter durende schudtesten met vormalen GAC om de experimenten te versnellen. Hierdoor wordt de adsorptiekinetiek overschat omdat de te overbruggen afstand van het water naar het kooloppervlak korter is. Het is bekend dat er nog een onvolkomenheid in het model zit. De modellering geeft dan ook geen 100% realistisch beeld van de echte standtijd van het filter, maar de

relatieve toe- of afnames door voorbehandeling met ozon geven wel een sterke indicatie van wat er in een full-scale filter te verwachten is.

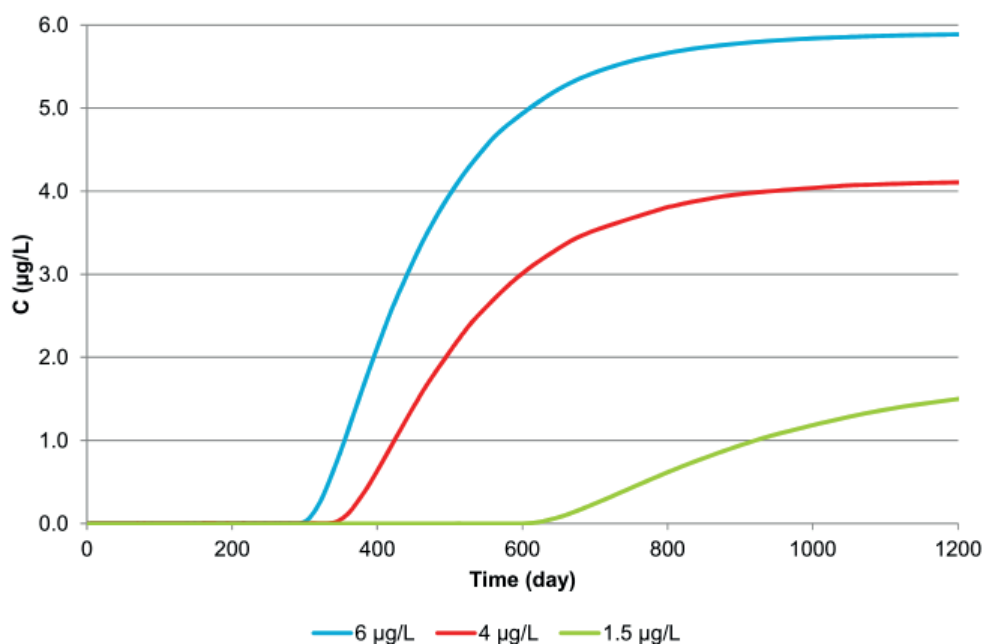
MODELLEREN VERSUS CONTINU TESTEN

Vergelijkbaar met de bovenstaande redenering is voor modelleren op basis van laboratoriumtesten gekozen omdat dit de mogelijkheid geeft om in korte tijd veel procescondities te simuleren. Hieronder zijn twee voorbeelden van gevoeligheden gegeven die dit illustreren. Allereerst is de wisseling in concentratie in het aangevoerde water besproken en daarna het effect van gebruikte bedhoogte van het actiefkool.

De afvalwatersamenstelling is een belangrijke factor voor de standtijd van het actiefkool. In dit onderzoek is op één moment een monster genomen, dus de fluctuaties in belading die in de realiteit optreden zijn niet meegenomen. Afbeelding 7.4 is afkomstig uit de gevoeligheidsanalyse van de modellering van het laboratoriumonderzoek en illustreert het effect van de startconcentratie in het water op de standtijd van het kool goed: De lijnen geven verschillende gemodelleerde benzotriazolconcentraties aan die het filter ingaan. Het filter heeft maar een gelimiteerde adsorptiecapaciteit. Bij een hogere ingaande concentratie is het actiefkool sneller verzadigd. Hoe meer het filter verzadigd raakt, hoe meer benzotriazol in het effluent aangetroffen wordt. Een hoge belasting leidt tot een snelle verzadiging van het filter en een vroege doorbraak. Een lagere belasting (lagere concentratie bij hetzelfde debiet) vertraagt het moment van doorbraak juist [25]. Het moment van doorbraak wordt uitgedrukt in dagen standtijd van het filter.

AFBEELDING 7.4

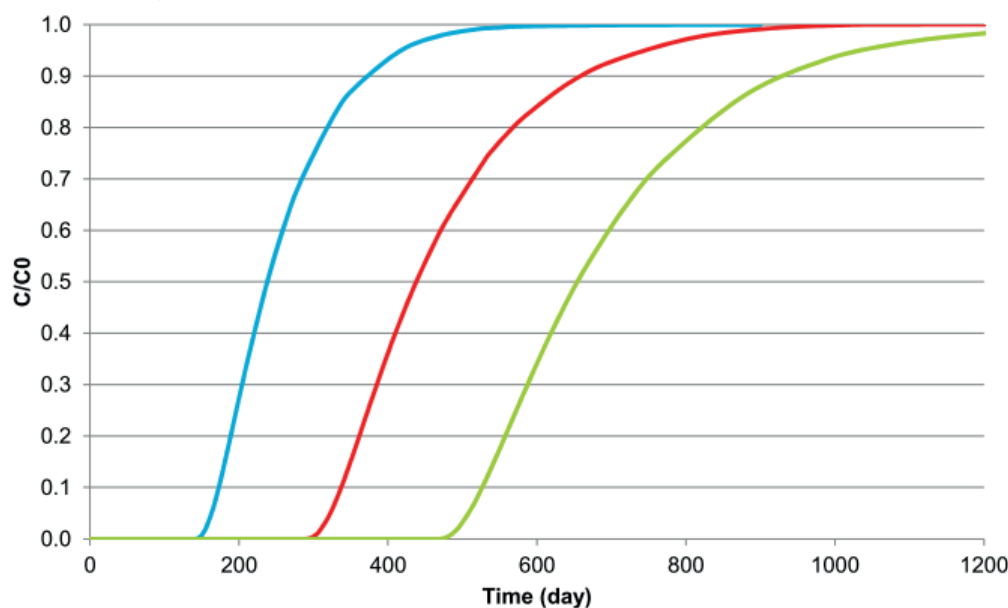
EFFECT VAN DE STARTCONCENTRATIE EN BELADING OP DE GEMODELLEERDE STANDTIJD, HIER IS DE CONCENTRATIE VAN BENZOTRIAZOL WEERGEGEVEN (BLAUWE LIJN: 6 µg/L, RODE LIJN: 4,7 µg/L, GROENE LIJN: 1,8 µg/L)



Daarnaast heeft de filterbedhoogte een groot effect op de gemodelleerde standtijd. Het filter is nu gemodelleerd op 1,5 m, op basis van het 1-STEP® filter uit STOWA 2013-35, terwijl in hoofdstuk 3-5 van rapport wordt uitgegaan van een filterbedhoogte van 2,5 m. Door een bedhoogte van 1,5 m te modelleren kunnen de resultaten van de modellering beter worden vergeleken met de praktijkresultaten van het 1-STEP® filter [52]. Afbeelding 7.5 is afkomstig uit de gevoeligheidsanalyse van Liu [25] en geeft dit effect goed weer. Het verhogen van het

filterbed heeft twee effecten: aan de ene kant wordt de EBCT verlengd, waardoor microverontreinigingen langer de tijd krijgen om te absorberen waardoor meer adsorptie plaatsvindt. Aan de andere kant is er, bij gelijkblijvende afvalwatersamenstelling en -debiet, meer kool- en dus absorptiecapaciteit beschikbaar, waardoor de standtijd significant toeneemt. Deze manier van standtijdverlenging betekent echter alleen dat er minder vaak kool gewisseld hoeft te worden: als met tweemaal zoveel kool een dubbele standtijd wordt gerealiseerd, dan wordt alleen op operationele (handelings)kosten bespaard en niet op koolverbruik.

AFBEELDING 7.5 GEMODELLEERD EFFECT VAN ACTIEFKOOLBEDHOOGTE OP DE DOORBRAAKCURVES (C/C_0 GEEFT DE GEMODELLEERDE CONCENTRATIE VAN BENZOTRIAZOL TEN OPZICHTE VAN DE STARTCONCENTRATIE AAN. BIJ $C/C_0=0$ VIND VOLLEDIGE ABSORPTIE PLAATS, BIJ $C/C_0=1$ IS HET BED VOLLEDIG VERZADIGD)



AFWEZIGHEID VAN BIOMASSA

Tenslotte zijn de effecten van ozon op de verwijderingsprestaties van het O3-STEP® filter niet mét biomassa getest in het proof-of-principle onderzoek. Er is gedurende deze fase alleen zonder biomassa getest. Literatuur schrijft echter een verlengde standtijd deels toe aan de biomassa [10, 20, 40]. De biomassa zou enerzijds beter ontwikkelen doordat ozoneren leidt tot beter biologisch afbreekbaar materiaal. Hierdoor kan meer biomassa in het filter groeien dat vervolgens weer meer organisch materiaal kan afbreken, waardoor er meer adsorptieplaatsen beschikbaar blijven voor microverontreinigingen.

Anderzijds kan de biomassa microverontreinigingen opnemen en afbreken. De biomassa kan ook geabsorbeerde microverontreinigingen van het kool “grazen” en daarmee het kool deels regenereren. Daarmee wordt de adsorptiecapaciteit nog langer in stand gehouden.

Een van de belangrijke vragen blijft hoe de denitrificatie reageert op de ozondosering: een restproduct van ozon is zuurstof en een verhoogde concentratie opgelost zuurstof in het water kan negatieve effecten hebben op de biologische stikstofverwijdering.

7.4 RESULTATEN LABORATORIUMONDERZOEK

In deze paragraaf is in alle grafieken de grens van 80% verwijderingsprestatie weergegeven. Het verwijderingsrendement in dit rapport is gebaseerd op de reductie ten opzichte van het

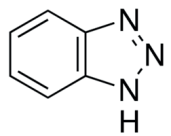
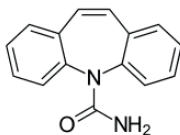
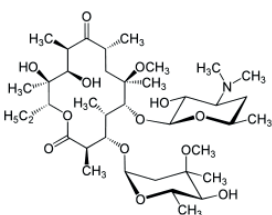
onbehandelde rwzi effluent. 80% verwijdering (vergeleken met het influent concentratie) is een waarde die in Duitsland en Zwitserland gehanteerd wordt als goede verwijdering, daarom wordt het hier als referentie aangehouden [29]. De verschillende (actiefkool)doseringen zijn gebruikt om adsorptie-isothermen te bepalen die de basis vormen voor de standtijdmodellerings (paragraaf 7.5). Adsorptie-isothermen zijn grafieken die de mate van adsorptie aan het actiefkool aangeven. Ze geven de hoeveelheid van de doelstof aan die aan het actiefkool geadsorbeerd is als functie van de concentratie van de doelstof bij constante temperatuur, voor meer detail zie referentie [25], hoofdstuk 3.6.2 en 4.7.

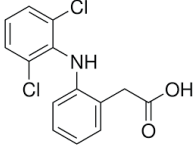
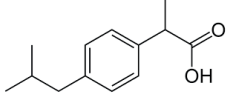
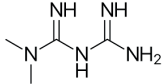
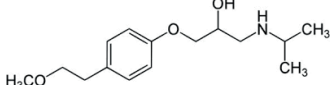
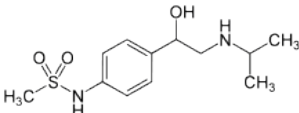
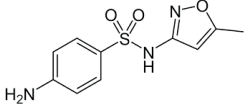
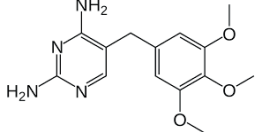
In de praktijk zeggen de verschillende actiefkooldoseringen weinig tot niets over de verwijderingsrendementen in het full-scale filter. De in deze paragraaf weergegeven verwijderingsprestaties geven daarom slechts een indicatie van mogelijke verwijderingsprestaties en geven vooral de verschillen aan tussen losstaande ozon- en actiefkoolbehandeling en de effecten van combinatie van technieken. De echte verwijderingsprestaties in het actiefkoolbed dienen in het vervolgetraject gedurende een langere periode bekeken te worden.

7.4.1 OZON

Ozon breekt via twee routes stoffen af, zoals in bijlage I is uitgelegd: directe reactie van ozon-moleculen met organisch materiaal en indirecte reactie, waarbij de reactie via radicalen loopt. Via de directe route worden met name stoffen met dubbele bindingen, stoffen met aminegroepen, benzeenringen met daaraan amine- of hydroxylgroepen of benzeenringen met etherverbindingen eraan afgebroken [23, 63]. De indirecte route is een meer specifieke route, waar meer verschillende stofgroepen worden afgebroken. Beide type reacties kunnen voorkomen in de watermatrix. Tabel 7.4 presenteert de molecuulstructuur van de verschillende doelstoffen met de daaruit volgende relevante eigenschappen voor de directe route van ozonoxidatie. De directe route is weergegeven omdat hier stof specifieke eigenschappen van belang zijn, terwijl die bij de indirecte route minder dominant zijn. In deze tabel zijn de verwijderingsprestaties weergegeven bij 0,8 g O₃/g DOC. Deze dosering is, op basis van hoofdstukken 3-5 een realistische optie om in een full-scale opstelling te gebruiken.

TABEL 7.4 MOLECUULSTRUCTUUR EN TYPE OZON-RELEVANTE EIGENSCHAPPEN VAN DE DOELSTOFFEN [21, 23, 63], EN DE VERWIJDERINGSPRESTATIES IN DE SCHUDPROEVEN BIJ 0,8 g O₃/g DOC;

Doelstof	Molecuulstructuur	Ozon-relevante eigenschappen	% verwijderd bij 0,8 g O ₃ /g DOC
Benzotriazol		geen geactiveerde benzeenring, wel op aminegroepen lijkende verbindingen.	>70
Carbamazepine		Aminegroep tussen twee benzeenringen	>95
Clarithromycine		Verskillende hydroxyl- en aminegroepen als ook etherverbindingen	>95

Doelstof	Molecuulstructuur	Ozon-relevante eigenschappen	% verwijderd bij 0,8 g O ₃ /g DOC
Diclofenac		Aminegroep tussen twee benzeenringen De chlorideverbindingen kunnen de ozonoxidatie (licht) hinderen.	>95 ¹
Ibuprofen		niet geactiveerde benzeenring;	>70
Metformine		geen geactiveerde benzeenringen, wel dubbele N-bindingen en aminegroepen	~20
Metoprolol		benzeenring met een etherverbinding, hydroxyl- en aminegroep.	>80
Sotalol		benzeenring met zowel hydroxyde- als aminegroepen;	>95
Sulfamethoxazole		benzeenring met aminegroepen;	>95 ¹
Trimethoprim		Benzeenring met meerdere ethergroepen, tevens zijn meerdere aminegroepen aanwezig	>95

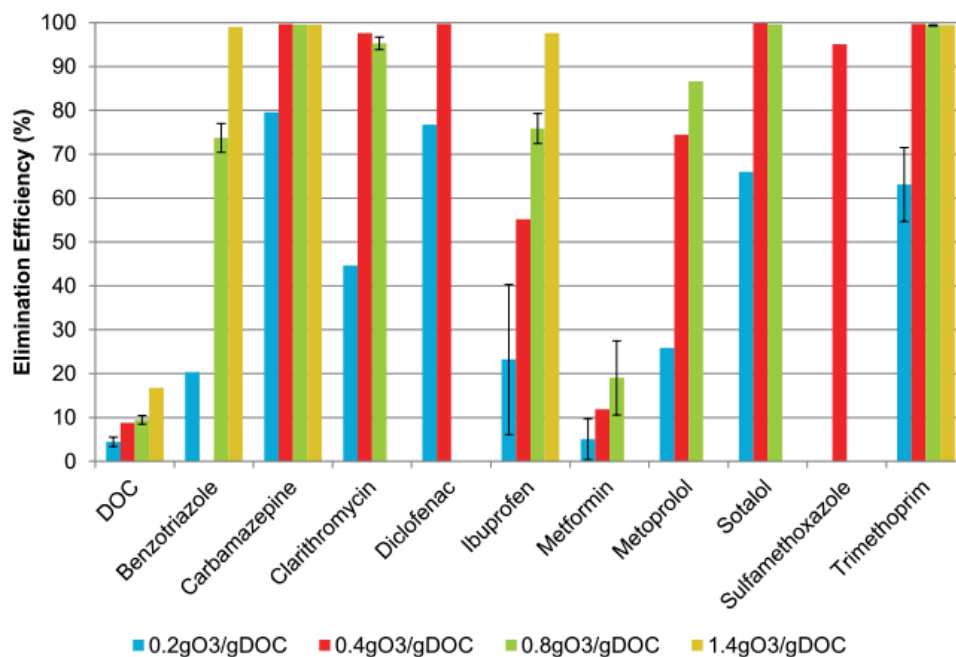
¹⁾ De data uit de meting van 0,8 g O₃/g DOC is verworpen in de datavalidatie. Bij 0,4 g O₃/g DOC wordt al >95% verwijdering waargenomen, dus het is aannemelijk dat dit ook bij 0,8 g O₃/g DOC het geval is.

De grafiek in Afbeelding 7.6 laat de verwijderingsprestaties van de doelstoffen zien bij de verschillende ozondoseringen. Sommige stoffen zoals carbamazepine, claritromycine, diclofenac, sotalol, sulfamethoxazol en trimethoprim worden relatief goed verwijderd: bij lage doseringen worden deze stoffen al grotendeels verwijderd (0,4 g O₃/g DOC verwijdert >95% van deze stoffen).

Benzotriazol, ibuprofen en metoprolol worden minder goed verwijderd. Voor deze stoffen is een minimale ozondosering van 0,8 g O₃/g DOC nodig om tot circa 80% verwijdering te komen. Metformine is moeilijk te verwijderen. Bij een ozondosering van 0,8 g O₃/g DOC wordt circa 20% verwijdering gerealiseerd.

AFBEELDING 7.6

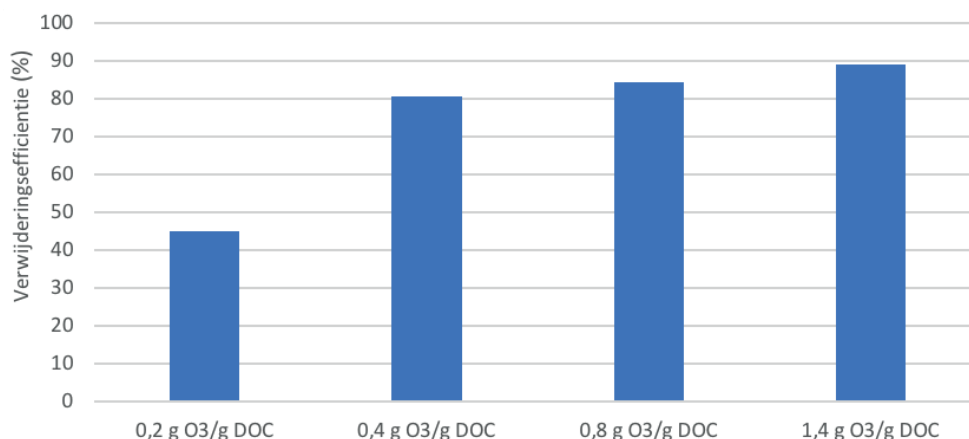
VERWIJDERINGSPRESTATIES BIJ VERSCHILLENDE OZONDOSERINGEN. WAAR "0" STAAT AANGEGEVEN IS DAADWERKELIJK 0 GEMETEN. WAAR GEEN DATA STAAT WEERGEGEVEN EN DUS DE STAVEN GEHEEL ONTBREKEN, IS DE DATA GEDURENDE DE DATAVALIDATIE VERWORPEN. DE HORIZONTALE BLAUWE LIJN GEEFT 80% VERWIJDERINGSPRESTATIE AAN. DE FOUTBALKEN GEVEN, WAAR BESCHIKBAAR, DE FOUTMARGE AAN TUSSEN DE VERSCHILLENDE ANALYSERESULTATEN



Deze observaties komen grotendeels overeen met de verwachtingen op basis van literatuur [12] en moleculaire structuur. Carbamazepine, claritromycine, diclofenac, sotalol, sulfamethoxazol en trimethoprim bevatten allen meerdere met ozon reagerende groepen. Dit is terug te zien in de vergaande oxidatie. Metoprolol bevat ook enkele van deze groepen, maar wordt iets minder goed verwijderd. Benzotriazol en ibuprofen hebben geen geactiveerde benzeenring of dubbele binding en zijn daardoor lastiger om te zetten. Metformine heeft weliswaar een aantal amine-achtige verbindingen maar blijkt in praktijk zeer lastig om te zetten.

Als wordt gekeken naar de gemiddelde verwijdering van de cocktail van de doelstoffen, is te zien dat bij toenemende ozondoseringen de verwijderingsprestatie toeneemt. De grafiek in Afbeelding 7.7 geeft de gemiddelde verwijderingsprestaties over de gehele cocktail. Metformine wordt, zoals eerder besproken, slecht verwijderd over de gehele doseerrange en heeft daarbij een groot effect op de gemiddelde waarden.

AFBEELDING 7.7

GEMIDDELTE VERWIJDERINGSPRESTATIES VAN DE GEHELE COCKTAIL VAN DOELSTOFFEN¹⁰. DE HORIZONTALE BLAUWE LIJN GEEFT 80%

Bij een ozondosering van 0,4 g O₃/g DOC kan al circa 80% van de gehele cocktail verwijderd worden. Als metformine buiten beschouwing gelaten wordt komt dit op 90%. Verhogen van de dosering naar 0,8 g O₃/g DOC verhoogt de verwijderingsprestaties nog iets verder (tot circa 85% op de gehele cocktail). Bij 1,4 g O₃/g DOC wordt circa 90% van de gehele cocktail verwijderd.

SAMENVATTING OZONOXIDATIE

In deze paragraaf zijn de verwijderingsprestaties met alleen ozonoxidatie besproken. Met ozon zijn goede verwijderingsprestaties te behalen, afhankelijk van de dosering. Met ozondoseringen hoger dan 0,4 g O₃/g DOC wordt >80% verwijdering van de gehele cocktail gerealiseerd.

Binnen de cocktail zijn op stofniveau grote verschillen te zien: benzotriazol en ibuprofen worden bij lagere doseringen nauwelijks verwijderd. Pas bij hogere doseringen worden deze stoffen wel verwijderd. Metformine wordt ook bij hogere doseringen slecht verwijderd.

7.4.2 GAC

De adsorptie van stoffen aan onder andere actiefkool wordt grotendeels bepaald door mate waarin de stof hydrofoob, ofwel water-vrezend, is: de stof hecht dan “liever” aan kool dan dat het in water opgelost blijft [15, 54]. De octanol-water-partitiecoëfficiënt (afgekort $\log(P_{ow})$), ook voorkomend als $\log(K_{ow})$ is een maat hiervoor. Het geeft aan hoe de stof zich verdeelt tussen twee oplosmiddelen, octanol en water. Octanol gedraagt zich hierbij als oplosmiddel voor hydrofobe stoffen. De berekening van de $\log P_{ow}$ wordt als volgt weergegeven:

$$\log P_{ow} = \log \left(\frac{[C]_{octanol}}{[C]_{water}} \right)$$

Hierin geeft [C] de concentratie van de desbetreffende stof aan in een van beide oplosmiddelen. Hoe hoger de waarde van $\log P_{ow}$, hoe sterker hydrofoob de stof dus is.

Negatieve waarden geven een hydrofiel, water-minnend, karakter aan. Hoe negatiever de $\log P_{ow}$, hoe sterker hydrofiel de stof is, hoe minder de stof geneigd zal zijn zich aan actiefkool te hechten. De $\log P_{ow}$ waarden en de behaalde verwijderingsprestatie bij een dosering van 10 mg AC/L van de doelstoffen zijn in Tabel 7.5 weergegeven. 10 mg/L is hier weergegeven als

10 Een aantal metingen bij hogere ozondoseringen zijn verworpen. Om een realistisch beeld te krijgen van de verwijderingsprestaties op de gehele cocktail is in deze grafiek ervan uitgegaan dat als een verwijderingspercentage gehaald is bij een lagere ozondosis dat een hogere ozondosis minimaal dezelfde prestaties levert: voor diclofenac is de data voor 0,8 en 1,4 g O₃/g DOC verworpen. Bij 0,4 g O₃/g DOC wordt 99,7% verwijderd. Deze verwijdering is ook voor de hogere doseringen aangenomen.

een gemiddelde dosering die redelijke verwijderingsprestaties laat zien. Metformine is de enige hydrofiële stof en laat de laagste verwijderingsprestaties zien.

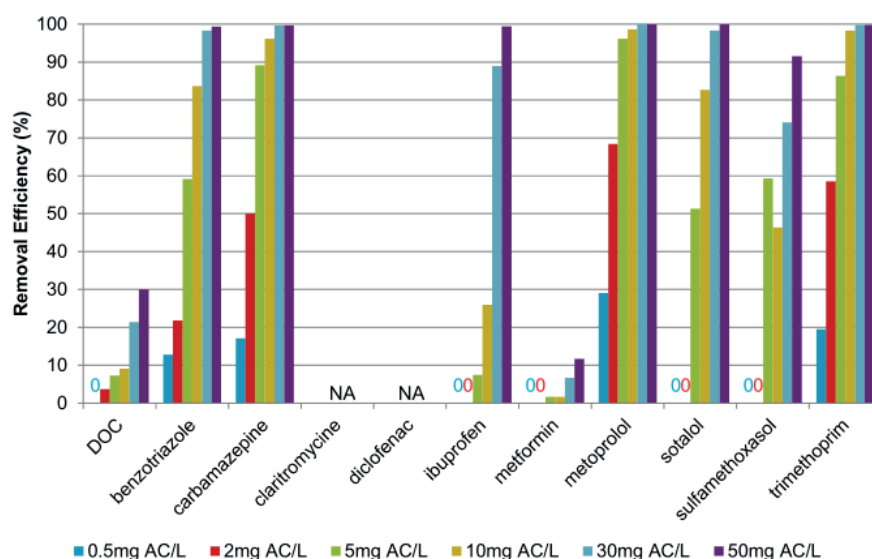
TABEL 7.5 HYDROFOOB/HYDROFIEL KARAKTER EN $\log P_{ow}$ WAARDEN VAN DE DOELSTOFFEN, OP BASIS VAN [31], EN DE VERWIJDERINGSPRESTATIES IN DE SCHUDPROEVEN. "NA" STAAT VOOR "NOT ACCEPTED DURING VALIDATION"

Doelstof	$\log(P_{ow})$	Hydrofoob/hydrofiel	% verwijderd bij 10 mg AC/L
Benzotriazol	1,44	Hydrofoob	>80
Carbamazepine	2,77	Hydrofoob	>95
Clarithromycine	3,16	Hydrofoob	NA
Diclofenac	4,51	Hydrofoob	NA
Ibuprofen	3,84	Hydrofoob	~25
Metformine	-0,50	Hydrofiel	~5
Metoprolol	1,76	hydrofoob	>95
Sotalol	0,24	Hydrofoob	>80
Sulfamethoxazole	0,79	Hydrofoob	~45
Trimethoprim	0,89	Hydrofoob	>95

De grafiek in Afbeelding 7.8 laat de verwijderingsprestaties van de doelstoffen zien bij de verschillende actiefkooldoseringen. Sommige stoffen zoals benzotriazol, carbamazepine, metoprolol en trimethoprim worden relatief goed verwijderd: bij lage doseringen worden deze stoffen al deels verwijderd (2 mg AC/L verwijdert benzotriazol tot circa 20%, de overige drie stoffen tot >50%). Bij hogere doseringen (>10 mg AC/L) worden deze stoffen tot >80% verwijderd.

Ibuprofen, metformine, sotalol en sulfamethoxazol worden helemaal niet verwijderd bij lage doseringen tot 2 mg AC/L. Bij hogere doseringen nemen de verwijderingsprestaties wel toe: ibuprofen is pas met 30 mg AC/L tot >80% te verwijderen, metformine kan met 50 mg AC/L maar tot vlak boven 10% verwijdering komen. Voor sotalol is met 10 mg AC/L >80% verwijdering te realiseren. Sulfamethoxazole wordt met 30 mg AC/L tot vlak boven de 70% verwijderd, dus om >80% verwijdering te realiseren zou een hogere dosering nodig zijn.

AFBEELDING 7.8 VERWIJDERINGSPRESTATIES BIJ VERSCHILLENDE ACTIEFKOOLDOSERINGEN. WAAR "0" STAAT AANGEGEVEN IS 0 GEMETEN¹¹. "NA" STAAT VOOR "NOT ACCEPTED DURING VALIDATION". DE HORIZONTALE BLAUWE LIJN GEEFT 80% VERWIJDERINGSPRESTATIE AAN



¹¹ 0 of onder de detectielimiet;

Deze observaties komen grotendeels overeen met de verwachtingen op basis van literatuur en P_{ow} waarden.

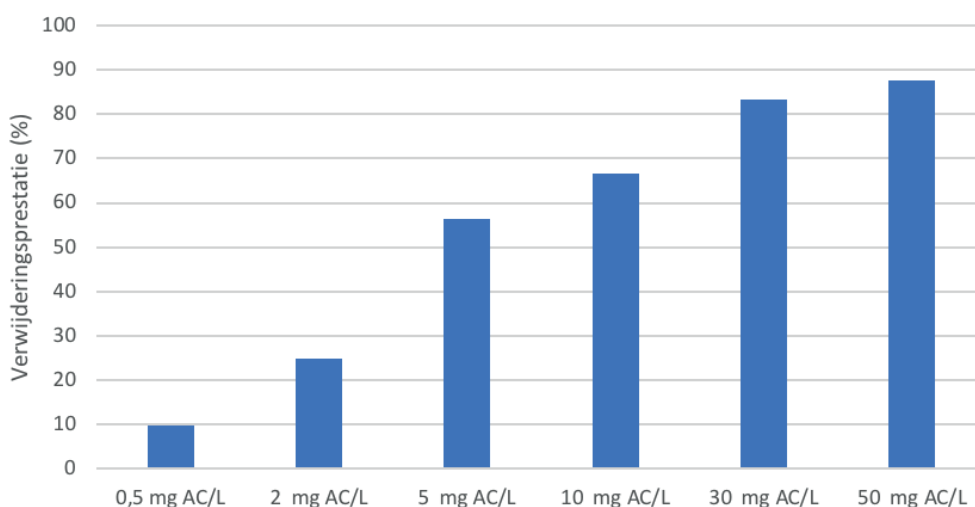
Zowel carbamazepine als metoprolol hebben relatief hoge $\log P_{ow}$ waarden en worden ook goed verwijderd in de schudproeven. Trimethoprim wordt beter verwijderd dan op basis van de $\log P_{ow}$ te verwachten, zeker als dit wordt vergeleken met de verwijderingsprestaties en $\log P_{ow}$ van sulfamethoxazol en benzotriazol.

Metformine staat erom bekend lastig te verwijderen te zijn, mede door het hydrofiele karakter, dit is ook te zien in de schudproeven. Sotalol en sulfamethoxazol zijn beiden weliswaar hydrofoob, maar niet heel sterk, dit verklaart de lagere affiniteit voor actiefkool. De observatie voor sulfamethoxazol komt overeen met andere onderzoeken [12], voor sotalol zijn geen literatuurreferenties gevonden.

Ibuprofen wijkt af: de verwachting is dat ibuprofen normaliter relatief goed te verwijderen is (>80% wordt gerapporteerd in meerdere studies, samengevat in [12]). Waardoor deze afwijking is veroorzaakt is niet bekend.

Als wordt gekeken naar de gemiddelde verwijdering van de cocktail van de doelstoffen, is te zien dat bij toenemende actiefkool doseringen de verwijderingsprestatie toeneemt. De grafiek in Afbeelding 7.9 geeft de gemiddelde verwijderingsprestaties over de gehele cocktail. Metformine wordt, zoals eerder besproken, zeer slecht verwijderd over de gehele doseerrange en heeft daardoor een groot effect op de gemiddelde verwijderingsprestatie.

AFBEELDING 7.9 GEMIDDELTE VERWIJDERINGSPRESTATIES VAN DE GEHELE COCKTAIL VAN DOELSTOFFEN¹² BIJ VERSCHILLENDE CONCENTRATIES ACTIEFKOOL. DE HORIZONTALE BLAUWE LIJN GEEFT 80% VERWIJDERINGSPRESTATIE AAN



Bij een actiefkooldosering van 10 mg AC/L wordt de totale cocktail circa 65% verwijderd (75% zonder metformine). Bij 30 mg AC/L wordt >80% verwijdering voor de gehele cocktail gerealiseerd. Als metformine hier buiten beschouwing wordt gelaten verwijderd 30 mg AC/L circa 95%. Deze verwijderingsprestaties dienen als referentiekader voor de toegevoegde waarde van ozon, verderop in deze paragraaf.

¹² De metingen voor claritromycine en diclofenac zijn vanwege onbetrouwbaarheid in de metingen verworpen en daarom niet meegenomen in deze grafiek.

SAMENVATTING ACTIEFKOOLFILTRATIE

In deze paragraaf zijn de verwijderingsprestaties met losstaande actiefkoolfiltratie besproken. Met actiefkool zijn redelijke verwijderingsprestaties te behalen, afhankelijk van de dosering. Op basis van de schudproeven is met 10 mg AC/L 65% van de gehele cocktail aan microverontreinigingen te verwijderen. De cocktail wordt berekend op basis van de gemiddelde verwijdering efficiëntie van de geanalyseerde stoffen. Als 80% verwijdering van de gehele cocktail van doelstoffen gewenst is, is een kooldosering van >30 mg AC/L nodig. Zoals al aangegeven zijn deze doseringen niet een-op-een te vertalen naar standtijden of EBCTs van het actiefkoolfilter.

Wat goed zichtbaar is: binnen de cocktail op stofniveau zijn grote verschillen zichtbaar: ibuprofen, sotalol en sulfamethoxazol worden bij lagere doseringen nauwelijks verwijderd. Pas bij hogere doseringen worden deze stoffen verwijderd. Metformine wordt ook bij hogere doseringen nauwelijks verwijderd. Dit betekent dat deze stoffen relatief snel door zullen breken.

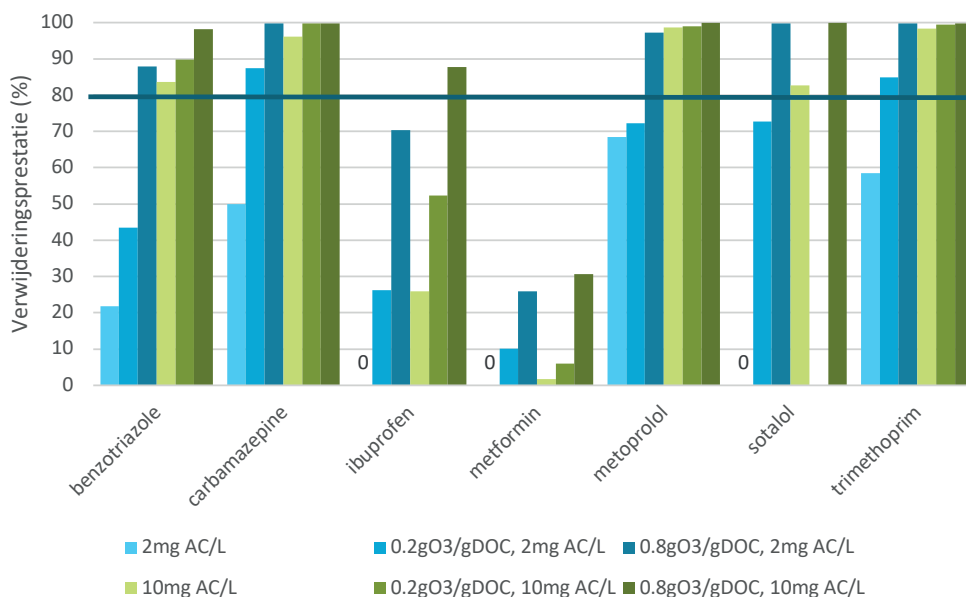
7.4.3 OZON + GAC

De verwijderingsprestaties van losstaande actiefkool en ozonbehandeling zijn in de paragrafen hiervoor besproken. Deze sub-paragraaf gaat in op de verwijderingsprestaties als beide technieken gecombineerd worden. In de grafiek in afbeelding 7.10 is dit samengevat. Deze grafiek laat het gecombineerde effect zien van een zekere actiefkool- en ozondosering zien op de doelstoffen. In blauw zijn de resultaten met 2 mg AC/L weergegeven, in groen met 10 mg AC/L. De dosering van 2 mg AC/L is gekozen omdat deze lage dosering goed de toegevoegde waarde van ozon in beeld brengt. 10 mg AC/L is gekozen omdat bij deze dosering net geen 80% verwijdering over de gehele cocktail gerealiseerd wordt met alleen actiefkool. Hierdoor wordt het inzichtelijk hoeveel ozon toegevoegd moet worden om wel >80% te komen. Aangezien dit onderzoek focust op de bijdrage van ozon aan actiefkoolfiltratie is de verwijdering met alleen ozon niet getoond in de grafiek.

Binnen de twee kleuren is de oplopende ozondosering aangegeven door het donkerder worden van de kleur: geen ozondosering, 0,2 g O₃ / g DOC en 0,8 g O₃/g DOC. 0,2 g O₃/g DOC is gekozen om het effect van een lage ozondosering inzichtelijk te maken. In praktijk zal deze dosering niet voorkomen. 0,8 g O₃/g DOC is gekozen omdat het een realistische doseerverhouding voor full-scale toepassing is.

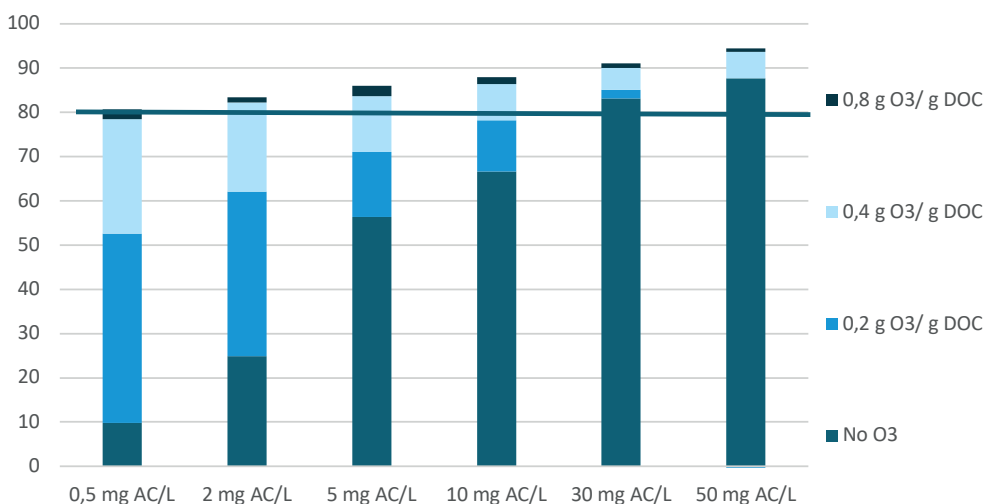
In alle gevallen leidt het combineren van actiefkool met ozon tot een verhoogde verwijderingsprestatie ten opzichte van alleen actiefkool. Dit effect is het duidelijkste zichtbaar bij een lage actiefkooldosering. Als gekeken wordt naar specifieke stoffen, dan blijkt dat de combinatie, zoals verwacht, een breder spectrum kan verwijderen dan de enkele technieken: ibuprofen en metformine worden beiden niet of nauwelijks afgevangen door het actiefkool, het toevoegen van een ozondosering verhoogt de verwijderingsprestatie significant, voor ibuprofen zelfs tot boven 80% verwijdering.

AFBEELDING 7.10 VERWIJDERINGSPRESTATIE VAN DE VERSCHILLENDE ONDERZOCHE STEFFEN BIJ ACTIEFKOOLDOSERINGEN VAN 2 MG/L (BLAUW) EN 10 MG/L (GROEN). VAN LINKS NAAR RECHTS IS PER STOF DE SERIE EEN OPLOPENDE OZONDOSERING WEERGEGEVEN: GEEN OZON, 0,2 G O₃/G DOC OF 0,8 G O₃/G DOC. WAAR EEN "0" STAAT WEERGEGEVEN IS ER 0% VERWIJDERING GEMETEN. WAAR GEEN WAARDE STAAT WEERGEGEVEN ZIJN DE DATA VERWORPEN¹³ [25]. DE HORIZONTALE BLAUWE LIJN GEEFT 80% VERWIJDERINGSPRESTATIE AAN



Voor de verwijdering van de cocktail aan stoffen heeft ozon een duidelijke toegevoegde waarde. Dit is weergegeven in afbeelding 7.11. Verschillende combinaties zijn in staat om >80% verwijdering van de gehele cocktail te realiseren. Een relatief lage kooldosering met een gemiddelde ozondosering (0,5 mg AC/L en 0,8 g O₃/g DOC) haalt >80%. Een iets hogere kooldosering met een lagere ozondosering levert ook >80% verwijdering op: 0,4 g O₃/g DOC is voldoende om zowel met 2, 5 als 10 mg AC/L tot 80% te komen.

AFBEELDING 7.11 VERWIJDERINGSPRESTATIES VAN DE COCKTAIL VAN DOELSTOFFEN MET ACTIEFKOOL GECOMBINEERD MET VERSCHILLENDE OZONDOSERINGEN¹⁴. DE HORIZONTALE BLAUWE LIJN GEEFT 80% VERWIJDERINGSPRESTATIE AAN



¹³ Claritromycine, diclofenac en sulfamethoxazol zijn in deze grafiek niet weergegeven omdat de data hier grotendeels voor verworpen is. Om de grafiek duidelijker te maken zijn deze geheel weggelaten.

¹⁴ Een aantal metingen bij hogere ozondoseringen zijn verworpen. Om een realistisch beeld te krijgen van de verwijderingsprestaties op de gehele cocktail is in deze grafiek ervan uitgegaan dat als een verwijderingspercentage gehaald is bij een lagere ozondosis dat een hogere ozondosis minimaal dezelfde prestaties levert: bijvoorbeeld voor diclofenac is de data voor 0,8 g O₃/g DOC verworpen. Bij 0,4 g O₃/g DOC wordt 99,7% verwijderd. Deze verwijdering is ook voor de hogere doseringen aangenomen. De gegevens van 1,4 g O₃/g DOC zijn niet weergegeven in deze grafiek omdat teveel data verworpen was om een representatief gemiddelde weer te geven.

SAMENVATTING COMBINATIE ACTIEFKOOL EN OZON

In deze paragraaf zijn de verwijderingsprestaties met gecombineerde actiefkoolfiltratie en ozonoxidatie besproken. De combinatie van beide technieken leidt zowel tot een verdere verwijdering als tot een bredere verwijderingsrange van de doelstoffen dan beide technieken afzonderlijk zouden kunnen bereiken. Tevens maakt ozon het mogelijk om met minder kool eenzelfde verwijderingsprestatie te leveren. Ozon oxideert hierbij een deel van de microverontreinigingen, kool dient als barrière voor afbraakproducten en microverontreinigingen die slecht oxideerbaar zijn.

SAMENVATTING

In de voorgaande paragrafen zijn de resultaten van de schudproeven besproken. Zowel losstaand actiefkool, als losstaande ozonoxidatie, als de combinatie van beide technieken is in staat om tot goede verwijderingsprestaties (>80% over de gehele cocktail) te komen.

Op basis van de schudproeven verwijdert 10 mg AC/L circa 65% van de gehele cocktail aan microverontreinigingen. Als 80% verwijdering van de gehele cocktail van doelstoffen gewenst is met alleen actiefkool is een dosering van minimaal 30 mg AC/L nodig. Met een ozondosering van 0,4 g O₃/g DOC is in het proof-of-principle onderzoek >80% verwijdering van de gehele cocktail behaald. Deze doseringen zeggen, zoals eerder gemeld, niet 1-op-1 iets over het full-scale filter, maar geven een basis om de combinatie van ozon met actiefkool op waarde te schatten.

Als op individueel stofniveau wordt gekeken dan worden verschillen zichtbaar: met alleen actiefkool worden ibuprofen, sotalol en sulfamethoxazol bij lagere doseringen beperkt verwijderd. Metformine wordt nauwelijks verwijderd. Bij losstaande ozondosering worden benzotriazol en ibuprofen relatief moeilijk verwijderd. Metformine wordt, ook bij hogere doseringen, slecht verwijderd, alhoewel met ozon een verdergaande verwijdering mogelijk is dan met actiefkool.

De combinatie van beide technieken leidt tot een bredere verwijderingsrange van de doelstoffen dan beide technieken afzonderlijk zouden kunnen bereiken: ozon verwijdert sotalol en sulfamethoxazol ook al bij lage doseringen verder dan actiefkool. Tevens verhoogt de combinatie van technieken de verwijdering van metformine significant.

DEELCONCLUSIE

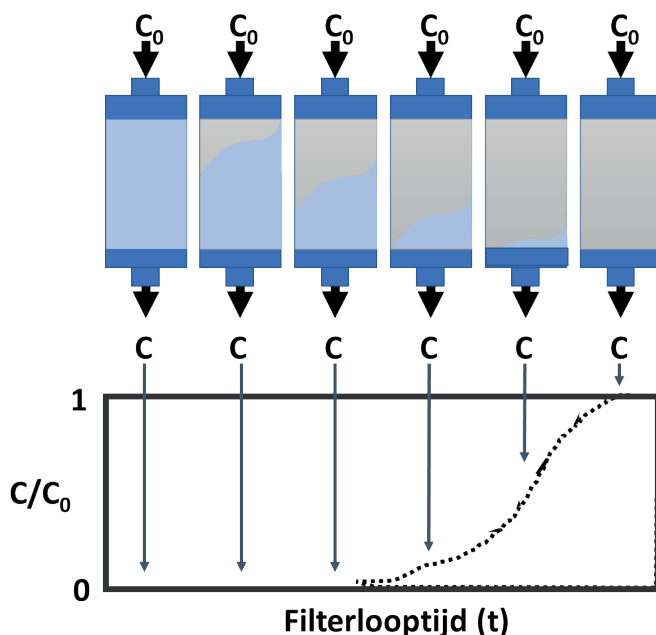
De actiefkooldoseringen geven een goed beeld van wat er qua verwijderingsprestatie mogelijk is. Bij een dosering van 10 mg AC/L wordt circa 65% van de cocktail verwijderd. Met een voorgeschakelde ozondosering van 0,4 g O₃/g DOC wordt dit naar >80% verwijdering verhoogd. Op basis van de resultaten uit deze schudproeven kan worden geconcludeerd dat een combinatie van actiefkoolfiltratie en ozonoxidatie leidt tot een verhoogde verwijderingsprestatie en een verbreding van de stofgroepen die verwijderd kunnen worden.

In praktijk wordt er in het O3-STEP® filter geen gebruik gemaakt van een actiefkooldosering maar van een actiefkoolbed. De resultaten die hierboven besproken zijn voor de schudproeven zijn gebruikt om via modellering de vertaalslag naar een full-scale filter te maken om een beeld te krijgen van de standtijden met voldoende verwijdering. Dit wordt in de volgende paragraaf besproken.

7.5 RESULTATEN MODELLERING

Op basis van de resultaten uit de schudproeven is een full-scale filter gemodelleerd om inzicht te krijgen in de effecten van ozondosering op de standtijd van het filter. De modelleringsmethode is in meer detail beschreven in referentie [25], paragraaf 4.7. De afbeelding hieronder geeft mooi weer wat de doorbraakcurves betekenen: bij een nieuw, schoon filterbed (uiterst links) is nog niets geadsorbeerd aan het kool en worden alle stoffen tegengehouden door het filter. De uitgaande concentratie (weergegeven als C/C_0) is dan 0. Na verloop van tijd raakt het koolbed verzadigd, dit wordt in de afbeelding verbeeld door het grijze verzadigingsfront dat zich naar beneden beweegt. Zodra dit front de uitgang van het filter bereikt heeft, begint doorbraak op te treden, C/C_0 is daarmee groter dan 0. Als het filter eenmaal volledig verzadigd is (uiterst rechts), dan vindt geen adsorptie meer plaats en is de ratio C/C_0 gelijk aan 1.

AFBEELDING 7.12 VISUELE WEERGAVE VAN DE TOTSTANDKOMING VAN DE DOORBRAAKCURVES, OP BASIS VAN [17]



7.5.1 DOORBRAAKCURVEN

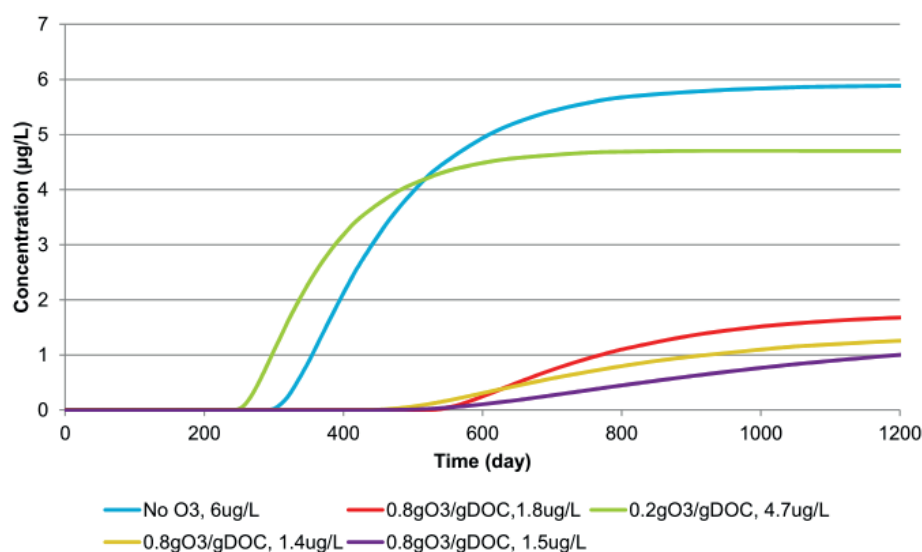
Bovenstaande grafiek ging uit van alleenstaande actiefkoolfiltratie. Deze paragraaf gaat verder in op de effecten van ozondosering op de standtijd van een gemodelleerd full-scale filter. Deze paragraaf beschrijft allereerst de modelleringen van drie verschillende stoffen: benzotriazol, metoprolol en sotalol. Voor trimethoprim is alleen 0,2 g O_3 /g DOC gemodelleerd, deze is daarom niet besproken in dit rapport. De grafiek hiervan is terug te vinden in referentie [25], paragraaf 4.9.3.

BENZOTRIAZOL

Onderstaande grafiek (7.13) geeft de effecten van 2 ozondoseringen weer op de doorbraakcurves van benzotriazol. Benzotriazol is redelijk goed te adsorberen en matig te oxideren, zoals in de vorige paragraaf besproken. Als er geen ozon gedoseerd wordt, is de concentratie benzotriazol dat het actiefkoolfilter ingaat 6 $\mu\text{g/L}$. Benzotriazol begint dan door te breken bij circa 300 dagen standtijd (circa 40.000 bedvolumes) en bij standtijden langer dan 375 dagen wordt 80% verwijdering niet meer gerealiseerd. Door ozon voorbehandeling wordt een deel van de benzotriazol al afgebroken: bij 0,2 g O_3 /g DOC betekent dit dat er nog maar 4,7 μg benzotriazol/L het filter ingaat. Bij 0,8 g O_3 /g DOC ligt dit nog lager op circa 1,5 $\mu\text{g/L}$.

De verwachting is dat een lagere belading van het filter betekent dat de standtijd verlengd wordt. Dit is echter niet eenduidig aangetoond, zoals te zien in afbeelding 7.13. Deze grafiek laat zien dat de adsorptiecapaciteit van het actiefkool afneemt bij een ozondosis van 0,2 g O₃/g DOC, terwijl bij een hogere ozondosis (0,8 g O₃/g DOC) een duidelijke verbetering zichtbaar is ten opzichte van actiefkool zonder ozonvoorbehandeling. Als 0,8 g O₃/g DOC wordt gedoseerd, wordt binnen de gemodelleerde termijn van 1.200 dagen consistent meer dan 80% benzotriazol verwijderd.

AFBEELDING 7.13 GEMODELLEERDE DOORBRAAK VAN BENZOTRIAZOL IN HET ACTIEFKOOLBED BIJ VOORBEHANDELING MET VERSCHILLENDE OZONDOSERINGEN. DE IN DE LEGENDA GENOEMDE CONCENTRATIES GEVEN DE CONCENTRATIE VAN BENZOTRIAZOL WEER ZOALS DEZE HET ACTIEFKOOLFILTER INGAAN NA BEHANDELING MET OZON. VOOR 0,8 G O₃/G DOC WAREN 3 SETS RESULTATEN VAN VOLDOENDE KWALITEIT OM GEMODELLEERD TE WORDEN, DEZE ZIJN ALLE DRIE ZICHTBAAR IN DE GRAFIEK. DE HORIZONTALE BLAUWE LIJN GEEFT 80% VERWIJDERINGSPRESTATIE TEN OPZICHTE VAN DE AFLOOP NABEZINKTANK AAN

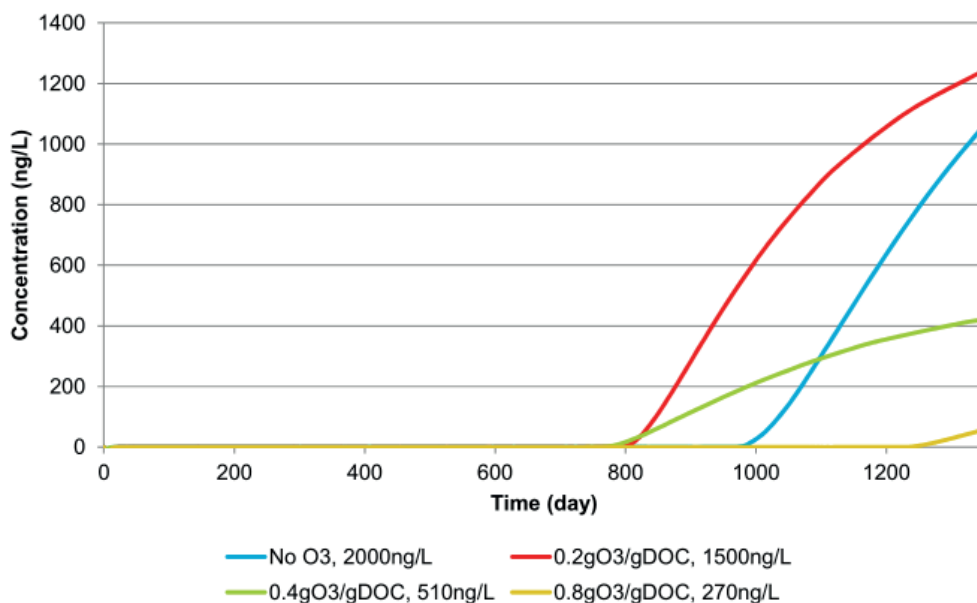


METOPROLOL

Onderstaande grafiek (7.14) geeft de effecten van 3 ozondoseringen weer op de doorbraakcurves van metoprolol. Metoprolol is goed adsorbeerbaar en matig oxideerbaar. Als er geen ozon gedoseerd wordt, is de concentratie metoprolol dat het actiefkoolfilter ingaat 2000 ng/L (2 µg/L, hier in nanogram weergegeven vanwege de lage eindconcentraties). Metoprolol begint door te breken bij circa 1.000 dagen standtijd (circa 125.000 bedvolumes), vanaf ongeveer 1.100 dagen wordt 80% verwijdering niet meer gerealiseerd. Door ozonvoorbehandeling wordt een deel van de metoprolol al afgebroken: bij 0,2 g O₃/g DOC betekent dit dat er nog maar 1.500 ng metoprolol/L het filter ingaat. Bij 0,8 g O₃/g DOC ligt dit nog lager op circa 270 ng/L.

Zoals bij benzotriazol al gemeld, zou een lagere belading van het filter betekenen dat de standtijd verlengd wordt. Dit is echter niet eenduidig aangetoond, zoals te zien in afbeelding 7.14. Deze grafiek laat zien dat de standtijd van het actiefkool afneemt bij ozondoseringen van 0,2 en 0,4 g O₃/g DOC, terwijl bij een hogere ozondosering (0,8 g O₃/g DOC) een duidelijke verbetering zichtbaar is ten opzichte van actiefkool zonder ozonvoorbehandeling. Als 0,8 g O₃/g DOC wordt gedoseerd wordt na ozon al meer dan 80% metoprolol verwijderd.

AFBEELDING 7.14 GEMODELLEERDE DOORBRAAK VAN METOPROLOL IN HET ACTIEFKOOLBED BIJ OZONVOORBEHANDELING MET VERSCHILLENDE OZONDOSERINGEN. DE IN DE LEGENDA GENOEMDE CONCENTRATIES GEVEN DE CONCENTRATIE VAN METOPROLOL WEER ZOALS DEZE HET ACTIEFKOOLFILTER INGAAT NA BEHANDELING MET OZON. DE HORIZONTALE BLAUWE LIJN GEEFT 80% VERWIJDERINGSPRESTATIE TEN OPZICHTE VAN DE AFLOOP NABEZINKTANK AAN



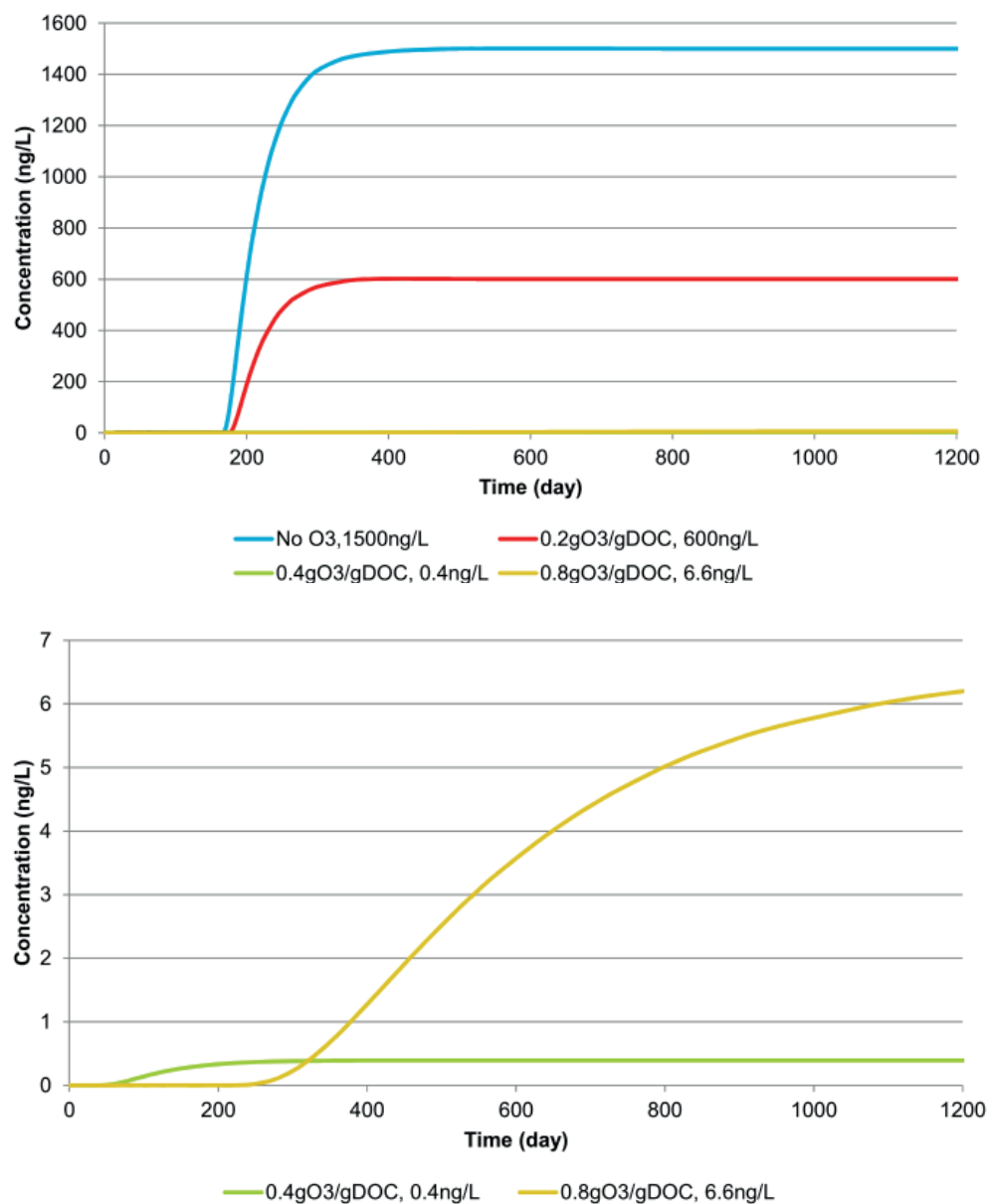
SOTALOL

Onderstaande grafiek (7.15) geeft de effecten van 3 ozondoseringen weer op de doorbraakcurves van sotalol. Sotalol is goed adsorbeerbaar en matig oxideerbaar. Als er geen ozon gedoseerd wordt, is de concentratie sotalol die het actiefkoolfilter ingaat 1.500 ng/L. Sotalol begint door te breken bij circa 200 dagen standtijd (circa 20.000 bedvolumes) en vlak daarna wordt 80% verwijdering niet langer gerealiseerd. Door ozonvoorbehandeling wordt een deel van de sotalol al afgebroken: bij 0,2 g O₃/g DOC betekent dit dat er nog maar 600 ng sotalol/L het filter ingaat, bij 0,4 g O₃/g DOC is dit 0,4 ng/L. Bij 0,8 g O₃/g DOC ligt dit iets hoger op circa 6,6 ng/L. Zowel 0,4 g O₃/g als 0,8 g O₃/g DOC bereikt >99% verwijdering.

Deze lagere belading van het filter betekent in dit geval dat de standtijd wel verlengd wordt. 0,2 g O₃/g DOC verlengt de standtijd nauwelijks, maar als >0,4 g O₃/g DOC wordt gedoseerd wordt na ozon al meer dan 80% sotalol verwijderd.”

AFBEELDING 7.15

GEMODELLEERDE DOORBRAAK VAN SOTALOL IN HET ACTIEFKOOLBED BIJ OZONVOORBEHANDELING MET VERSCHILLENDE OZONDOSERINGEN. DE IN DE LEGENDA GENOEMDE CONCENTRATIES GEVEN DE CONCENTRATIE VAN SOTALOL WEER ZOALS DEZE HET ACTIEFKOOLFILTER INGAAT NA BEHANDELING MET OZON. DE GRAFIEK IS IN 2 DELEN OPGESPLITST: DE BOVENSTE GRAFIEK MET ALLE GEMODELLEERDE OZONDOSERINGEN EN DE DOORBRAAKCURVES VAN 0,4 EN 0,8 G O₃/G DOC IN MEER DETAIL IN DE ONDERSTE DIAGRAM. DE HORIZONTALE BLAUWE LIJN GEEFT 80% VERWIJDERINGSPRESTATIE TEN OPZICHTE VAN DE AFLOOP NABEZINKTANK AAN



VERKLARING VAN AFWIJKENDE RESULTATEN

De bovenstaande resultaten zijn volgens Liu [25] niet volledig in overeenstemming met eerder onderzoek en de ervaringen met vergelijkbare toepassing in de drinkwaterbereiding uit oppervlaktewater: bij toenemende ozondoseringen wordt een verlenging van de standtijd verwacht doordat stoffen verder worden afgebroken. In dit onderzoek wordt geen eenduidige verbetering gezien. Er zijn een aantal mogelijke verklaringen hiervoor te geven die elkaar deels tegen spreken. In vervolgonderzoek worden deze verschillende verklaringen nader onderzocht.

Een mogelijke verklaring die wordt gegeven is dat afvalwater meer DOC bevat dan oppervlaktewater, waardoor een sterkere competitie voor adsorptiezones van het actiefkool optreedt [25]: DOC adsorbeert aan het actiefkool en op plekken waar DOC al is geadsorbeerd kunnen geen microverontreinigingen meer hechten.

Door ozon te doseren worden de grote DOC moleculen opgebroken in kleinere moleculen die vaak ook meer polair worden waardoor ze niet meer aan het actiefkool adsorberen. Door deze polariteit hecht er minder DOC aan het actiefkool en blijven meer adsorptieplaatsen beschikbaar voor microverontreinigingen. Hierdoor kunnen meer microverontreinigingen verwijderd worden voordat doorbraak plaatsvindt en het kool vervangen moet worden.

Het onderzoek geeft de hypothese dat door lage ozondoseringen wel de kleine moleculen worden gevormd die voor meer competitie zorgen, maar dat er onvoldoende polarisatie optreedt. Doordat er meer kleine moleculen ontstaan, nemen deze adsorptieplaatsen in beslag die anders beschikbaar waren voor microverontreinigingen. Daardoor neemt de adsorptiecapaciteit af en wordt ook een kortere standtijd gerealiseerd omdat het kool eerder verzadigd raakt.

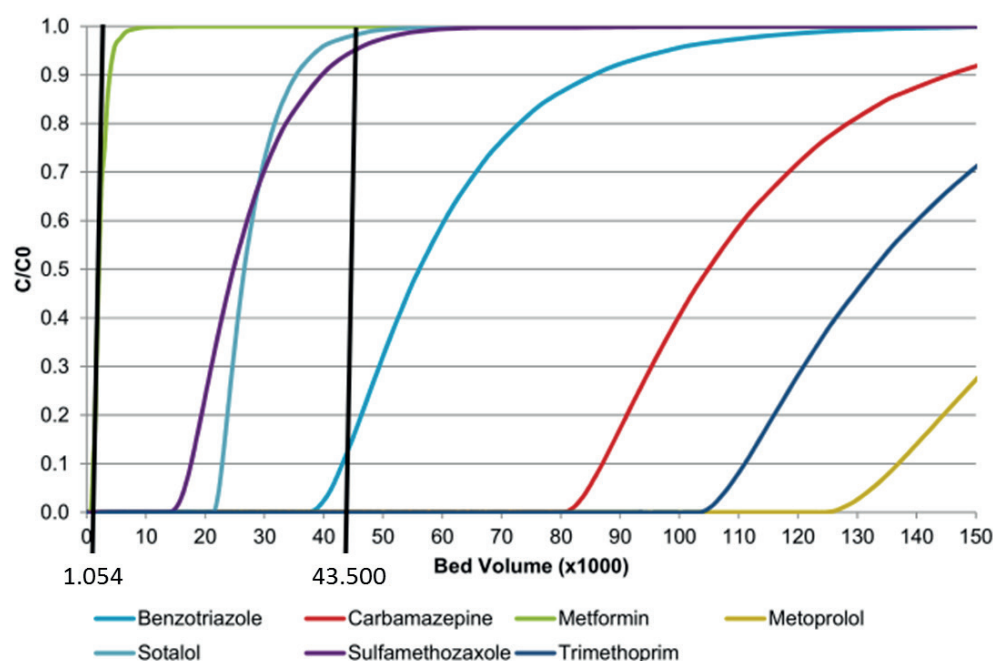
Hogere ozondoseringen leiden volgens dit onderzoek tot verdergaande afbraak én polarisatie van DOC waardoor minder adsorbeert aan het actiefkool. Zoals eerder beschreven is hierdoor meer ruimte voor microverontreinigingen en neemt de standtijd weer toe ten opzichte van geen ozon doseren. De hierboven genoemde hypothesen zijn niet getest in het huidige onderzoek, maar zijn wel interessant om mee te nemen voor vervolgonderzoek.

7.5.2 MODEL VS. PRAKTIJK RWZI

De gemodelleerde doorbraakcurves van het actiefkoolfilter zijn grafisch weergegeven in Afbeelding 7.16. Deze grafiek geeft het doorbraakgedrag van een aantal doelstoffen weer op basis van alleen actiefkoolfiltratie (zonder ozondosering) en concentraties zoals deze aangetroffen zijn in de afloop van de nabezinktank van de rwzi Horstermeer.

Om een beeld te krijgen van hoe realistisch het model is in het bepalen van de doorbraakcurves is een vergelijking gemaakt tussen de gemodelleerde curves en de werkelijk gemeten verwijderingsprestaties van het 1-STEP® filter op rwzi Horstermeer. Gedurende het 1-STEP® filter monitoringsonderzoek is dit gemeten bij 1.054 en 43.500 bedvolumes [6]. De verticale zwarte lijnen geven deze momenten weer. In Afbeelding 7.16 zijn de verwijderingsprestaties van het 1-STEP® filter weergegeven bij deze standtijden.

AFBEELDING 7.16 GEMODELLEERDE DOORBRAAKCURVES VAN VERSCHILLENDE DOELSTOFFEN. DEZE GRAFIEK GEEFT DE DOORBRAAKCURVES WEER. DE TOENAME VAN CONCENTRATIE VAN EEN DOELSTOF IN HET FILTRAAT (C/C_0) IS WEERGEGEVEN ALS FUNCTIE VAN DE STANDTIJD VAN HET FILTER. DE HORIZONTALE BLAUWE LIJN GEEFT 80% VERWIJDERINGSPRESTATIE AAN



TABEL 7.6

GEMETEN VERWIJDERINGSPRESTATIES VAN HET 1-STEP® FILTER BIJ EEN STANDTIJD VAN 1.054 EN 43.500 BEDVOLUMES [6]

Doelstof	verwijderingsprestatie bij 1.054 bed volumes [%]	verwijderingsprestatie bij 43.500 bed volumes [%]
carbamazepine	65	12
metoprolol	80	18
sotalol	75	28
sulfamethoxazol	18	10
trimethoprim	84	34

In de grafiek is te zien dat metformine, zoals in paragraaf 7.4.1 al is aangegeven, zeer snel doorbreekt. Op basis van de schudproeven was al een lage verwijderingsprestatie te zien, dit resulteert in een zeer snelle doorbraakcurve van het koolfilter. De tabel laat zien dat op het moment dat in de modellering alleen metformine doorbreekt (circa 1.054 bedvolumes in de praktijk) al meer stoffen aan het doorbreken zijn: sulfamethoxazol wordt nog maar 18% verwijderd, ook sotalol en carbamazepine hebben hier al een duidelijke doorbraak. Er is echter geen meting beschikbaar direct na de opstart (e.g. 1 bedvolume standtijd), dus het is niet bekend of deze stoffen überhaupt werden geadsorbeerd.

Volgens de modellering zouden carbamazepine, trimethoprim en metoprolol pas bij >80.000 bedvolumes moeten doorbreken. In praktijk blijkt dat deze stoffen al bij circa 45.000 bedvolumes ver onder de 50% verwijderingsprestatie zitten. De modellering komt dus, zoals al aangegeven in paragraaf 7.3, gunstiger uit dan de realiteit. Dit is belangrijk om in gedachten te houden bij de rest van deze paragraaf: de gemodelleerde standtijden zijn niet een-op-een te vertalen naar een echte situatie, maar geven wel duidelijk trends weer die ook in de praktijk te verwachten zijn. De verbeteringen of verslechtingen van standtijden door de verschillende ozondoseringen zullen ook in een echt filter optreden, maar de exacte doorbraakcurves en standtijden blijven sterk afhankelijk van de specifieke situatie op de rwzi en zullen dus altijd in praktijk getest moeten worden.

7.5.3 SAMENVATTING EN TERUGBLIK

Op basis van de beschikbare modelleringen van benzotriazol, metoprolol, sotalol en trimethoprim is een gemiddelde standtijdverlenging bepaald om een inschatting te krijgen in de gemiddelde verandering van de standtijd van het filter in relatie tot de ozondosering. Voor trimethoprim is alleen de modellering van 0,2 g O₃/g DOC voldoende gevalideerd.

De verandering van doorbraakmoment in relatie tot de verschillende ozondoseringen is weergegeven in tabel 7.7. Hier is te zien dat benzotriazol zonder ozonvoorbehandeling bij 364 dagen de 80% verwijderingsgrens doorbreekt. 0,2 g O₃/g DOC zorgt voor een snellere doorbraakcurve, zoals besproken. De doorbraak van benzotriazol vindt zo 16% eerder plaats dan zonder ozonvoorbehandeling. Bij 0,8 g O₃/g DOC wordt dit doorbraakmoment juist een factor 3 later gemodelleerd, na ruim 1.100 da00gen.

TABEL 7.7

VERANDERING IN MOMENT DAT 80% VERWIJDERING NIET MEER GEREALISEERD WORDT ALS GEVOLG VAN OZONDOSERING (GEBASEERD OP TABEL 4-8 EN FIGUUR 4-16 IN REFERENTIE [25]). NA: DATA GEDURENDE DATAVALIDATIESTAP VERWORPEN EN ZODOENDE NIET GEMODELLEERD, ∞:

Doelstof	Geen ozon voorbehandeling	0,2 g O ₃ / g DOC		0,4 g O ₃ / g DOC		0,8 g O ₃ / g DOC	
	dag	dag	% t.o.v. geen ozon	dag	% t.o.v. geen ozon	dag	% t.o.v. geen ozon
Benzotriazol	364	306	-16	NA	-	1120	+308
Metoprolol	1128	932	-17	1284	+14	>>1300	>>+115
Sotalol	186	215	+15	>>1200	>>650	>>1200	>>+650

Om een beeld te krijgen van het cocktail-effect kan een gemiddelde verandering worden bepaald. Bij een ozondosis van 0,2 g O₃/g DOC wordt gemiddeld een 6% snellere doorbraak van het GAC gemodelleerd ten opzichte van het niet doseren van ozon. 0,4 g O₃/g DOC leidt tot ruim meer dan 15% tragere doorbraak. Alleen bij 0,8 g O₃/g DOC wordt juist een verlenging van ruim meer dan 100% bewerkstelligd.

Op basis van deze doorbraakcurves zou 0,4 g O₃/g DOC al aan te raden zijn. Echter, aangezien de gemiddelde doorbraaktijd van de 0,4 g O₃/g DOC slechts gebaseerd is op modellering van 2 doelstoffen verdient het de aanbeveling om in verder onderzoek deze optie verder uit te diepen. 0,8 g O₃/g DOC leidt aantoonbaar tot een verlenging van de standtijd én voldoende verwijderingsrendement. Het is dan ook aan te raden om deze optie in ieder geval verder te testen in vervolgonderzoek. De dosering van 0,8 g O₃/g DOC komt ook goed overeen met wat er in de uitgangspunten van hoofdstuk 3-5 is gehanteerd (0,7 g O₃/g DOC). De ontwerpgrondslagen worden hiermee onderschreven. Wel is er een optimalisatie mogelijk door bij lagere ozondoseringen de standtijden te bepalen: de doseerrange tussen 0,4 g O₃/g DOC en 0,8 g O₃/g DOC levert veelbelovende verwijderingsprestaties. De negatieve effecten op de standtijd van ozondoseringen <0,8 g O₃/g DOC zijn onvoldoende onderbouwd om deze doseerrange uit te sluiten.

7.5.4 BROMAATVORMING

Een van de aandachtspunten als met ozonoxidatie wordt gewerkt is bromaatvorming, zie hoofdstuk 2.1.4 voor meer details. Tijdens de proof-of-principle is de bromaatconcentratie gemeten. Bij alle gebruikte ozondoseringen bleef de concentratie onder de detectielimiet. Een factor in bromaatvorming is de bromideconcentratie. Deze is niet expliciet gemeten gedurende dit onderzoek. Voor vervolgonderzoek dient ook de bromideconcentratie meegenomen te worden.

7.6 IMPLICATIES VOOR UITGANGSPUNTEN

Deze paragraaf beschouwt de effecten van het proof-of-principle onderzoek op de belangrijkste uitgangspunten uit hoofdstuk 3-5 en de tussenconclusies zoals beschreven in hoofdstuk 6. Hieronder wordt de gehanteerde ozondosering, -contacttijd, actiefkool bedhoogte en standtijd behandeld. Op hoofdlijnen bevestigen de resultaten uit het proof-of-principle onderzoek de in de hoofdstuk 3-5 gehanteerde uitgangspunten en ontwerpspecificaties die in de conceptontwikkeling zijn gebruikt, maar er is wel ruimte voor optimalisatie.

7.6.1 OZONDOSERING

De laboratoriumresultaten onderbouwen de gebruikte ozondosering uit hoofdstuk 3.1.5. Hier is een ozondosering van 0,7 g O₃/g DOC aangenomen, in het laboratoriumonderzoek worden goede resultaten behaald met 0,8 g O₃/g DOC. Deze waarden komen overeen met veelgebruikte ozondoseringen in recente onderzoeken in Duitsland en Zwitserland [1, 13, 22, 41, 69]. De ozondoseringsrange van 0,8 g O₃/g DOC uit de conceptontwikkeling is een legitieme ontwerpkeuze die ook in het vervolgtraject kan worden gehanteerd. Het verdient echter de aandacht om ook de range tussen 0,4 en 0,8 g O₃/g DOC nader te onderzoeken. Met 0,4 g O₃/g DOC is >80% verwijdering over de gehele cocktail haalbaar, vergelijkbaar met 0,8 g O₃/g DOC. Op basis van de modellering resulteert deze dosering in een kortere standtijd, maar de onderbouwing hiervoor laat te wensen over. Dit dient dus getest te worden in praktijkonderzoek.

7.6.2 VERBLIJFTIJD OZONREACTOR

De verblijftijd in de ozonreactor bepaalt het volume van de ozoncontactor en daarmee de investeringskosten hiervoor. In hoofdstuk 3-5 is uitgegaan van een nominale contacttijd van 25 minuten. Gedurende dit proof-of-principle is niet expliciet gekeken naar de contacttijd in de ozonreactor.

Tijdens pilottesten met ozonoxidatie op zowel de awzi Leiden Zuid-West als op de rwzi Aachen-Soers bleek dat de invloed van de contacttijd op de ozonoxidatie gering. De invloed van de contacttijd op de eliminatie van microverontreinigingen lijkt op basis van deze onderzoeken verwaarloosbaar [42, 49]. Op basis hiervan wordt aangeraden voor de zekerheid de nominale ontwerp contacttijd van 25 minuten aan te houden, maar om gedurende vervolgonderzoek nadrukkelijk te kijken naar mogelijke verkorting hiervan.

7.6.3 BEDHOOGTE ACTIEFKOOLFILTER

In hoofdstuk 3-5 is uitgegaan van een bedhoogte van 2,5 meter (zie tabel 3.3) om bij een oppervlaktebelasting van $10 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ een EBCT van 15 minuten te realiseren. Uitgangspunt is dat deze EBCT minimaal nodig is voor vergaande verwijdering van microverontreinigingen. De minimale vereiste EBCT met het koolbed in combinatie met ozonoxidatie is gedurende het proof-of-principle niet expliciet getest.

Gedurende de proof-of-principle is aangetoond dat bij ozondoseringen hoger dan $0,4 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$ al $\sim 80\%$ verwijdering te realiseren is op de cocktail van doelstoffen. Het actiefkoolfilter dient op deze manier als robuuste barrière voor metabolieten en moeilijk te oxideren microverontreinigingen. Omdat de ozonoxidatie al een (groot) deel van de doelstoffen afvangt is de verwachting dat een minder lange EBCT nodig is. Bij alleen actiefkool filtratie zou een lange EBCT gebruikt worden om voldoende adsorptietijd en daarmee verwijdering te creëren. Aangezien actiefkool een grote factor is in zowel kosten als duurzaamheid zou een minder hoog koolbed wenselijk zijn. In het 1-STEP® filter op rwzi Horstermeer is een bedhoogte van circa 1,5 m gebruikt. Dit levert voldoende EBCT op voor nutriëntenverwijdering. Op basis van de verwijderingsprestaties van ozon zou het mogelijk kunnen zijn om met een kortere EBCT acceptabele verwijdering over het gehele systeem te behalen. Voor vervolgonderzoek wordt aangeraden om in het ontwerp de mogelijkheid in te bouwen om met een bedhoogte van 2,5 m te werken, maar om ook zeker met een kortere EBCT te testen.

7.6.4 STANDTIJD ACTIEFKOOLFILTER

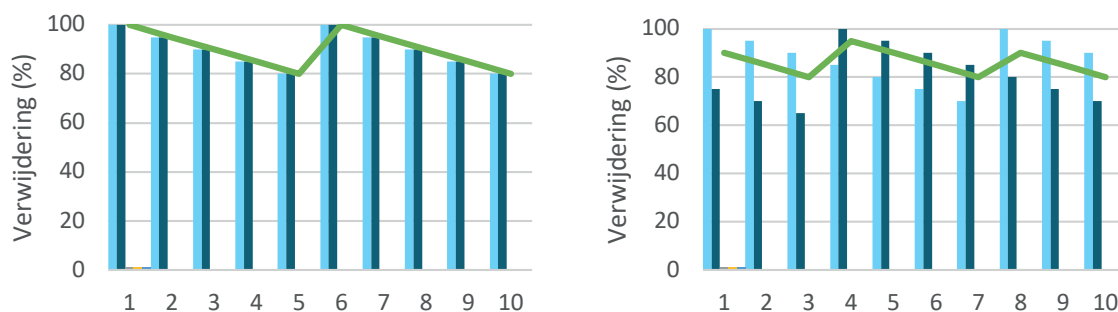
In paragraaf 3.1.8 is ervan uitgegaan dat een standtijd van 35.000 bedvolumes haalbaar is als ozonbehandeling wordt voorgeschakeld voor het 1-STEP® filter. Zonder ozondosering is een standtijd van 15.000-20.000 bedvolumes haalbaar waarbij nog aantoonbaar verwijdering van microverontreinigingen optreedt [6]. Op basis van de proof-of-principletesten is het aannemelijk dat door voorbehandeling met voldoende ozon de standtijd te verlengen is met zeker een factor 2 (100% verbetering) [25]. Daardoor komt de standtijd van een actiefkoolbed met een filterbeddiepte van 1,5 m op 30.000-40.000 bedvolumes. Hierbij is nog geen rekening gehouden met een verwachte verdere standtijdverlenging door de biologie.

Wat nog niet is meegenomen in deze redeneerlijn is het in parallel schakelen van meerdere filters: De verschillende filters zijn parallel geschakeld maar worden wel sequentieel in de tijd gebruikt (de ene filter na de andere). De standtijdverlenging is het gevolg van het vertraagd bereiken van bepaalde beladingen en kwaliteiten van het filterbed [11]. Hierdoor kan het ene “verse” filter dat een betere filtraatkwaliteit produceert een filter dat door een langere stand-

tijd al een slechtere filtraatkwaliteit produceert compenseren. Dit is grafisch weergegeven in Afbeelding 7.17, hieronder met 2 filterbakken. Beide voorbeelden geven twee filterbakken weer die per tijdseenheid (1 tot en met 10) 5% van hun verwijderingsprestaties verliezen. Als de gemiddelde verwijdering lager wordt dan 80% wordt het kool vervangen. Bij gelijktijdig starten moet het kool van beide filters na 5 tijdseenheden standtijd gewisseld worden, een vers filter heeft in deze configuratie een standtijd van 5 tijdseenheden.

Bij het sequentieel bedreven filter wordt de verse filterbak pas na 8 tijdseenheden vervangen, terwijl de gecombineerde effluentkwaliteit altijd boven de 80% blijft. Het 1-STEP® filter Horstermeer is op deze manier opgebouwd: de 5 filterbakken samen leveren een (uiteinde-lijke) filtraatkwaliteit, terwijl individuele filters op een verschillende fase van hun standtijd zitten. Voor vervolgonderzoek dient deze overweging meegenomen te worden.

AFBEELDING 7.17 GRAFISCHE ILLUSTRATIE VAN HET EFFECT VAN GELIJKTIJDIG (LINKS) IN GEBRUIK NEMEN VAN ACTIEFKOOLBEDDEN EN PARALLEL SCHAKELEN, SEQUENTIEEL IN DE TIJD (RECHTS). HET VOORBEELD GAAT UIT VAN 2 FILTERBEDDEN (STAAFDIAGRAMMEN) DIE SAMEN EEN GEMIDDELTE EFFLUENTKwaliteit PRODUCEREN (GROENE LIJN)



8

CONCLUSIE EN AANBEVELING

8.1 ALGEMEEN

De aanwezigheid van microverontreinigingen in oppervlaktewater, grondwater en drinkwater en het verminderen hiervan krijgt steeds meer bestuurlijke aandacht. Naast opkomende emissie-eisen voor microverontreinigingen worden door de vertaling van de Europese kaderrichtlijn water (KRW) van oppervlaktewater naar rwzi-emissies de lozingeisen voor nutriënten nog steeds strikter. Vanuit de actuele beleidskaders worden (end-of-pipe) oplossingen op rwzi-niveau als pragmatische oplossingen beschouwd die snel zijn te realiseren en effectief zijn.

Het belang van een integrale aanpak voor verwijdering van microverontreinigingen en nutriënten in de waterketen is urgent om de chemische en ecologische kwaliteit van het watersysteem en de drinkwaterbronnen te kunnen blijven garanderen. Omdat vanuit de KRW voor nutriënten en in de toekomst mogelijk ook voor microverontreinigingen als aanpassingen op de rwzi vereist zijn, kan dit vanuit kostenoptimalisatie en doelmatigheid gecombineerd worden. Om de ontwikkeling van een (kosten)effectief zuiveringsconcept voor de verwijdering van microverontreinigingen en nutriënten uit secundair effluent mogelijk te maken, zijn binnen het STOWA-project 'Verwijdering van microverontreinigingen uit secundair effluent door ozondosering en GAC-filtratie' vier verschillende zuiveringsconcepten ontwikkeld op basis van ozondosering en GAC-filtratie gecombineerd met chemische fosfaatverwijdering en biologische stikstofverwijdering. De concepten verschillen onderling door het type voorbehandeling en de regeneratiemethoden van het GAC.

Als innovatieve uitvoeringsvorm van GAC-filtratie is het principe van organics destruction cell (ODC) geïntroduceerd en nader beschouwd. Op basis van het conceptontwerp en de analyse op de vooraf opgestelde uitgangspunten, criteria en de toetsing van de stand der techniek valt het concept met enkel chemicaliëndosering in combinatie met de nieuwe ODC-techniek in de huidige situatie af voor toepassing op secundair effluent. Het concept met GAC-filtratie met chemicaliën dosering in combinatie met de ODC techniek is technisch wel haalbaar, maar te duur. Om deze reden is dit concept bij de verdere detaillering in dit rapport verder buiten beschouwing gelaten.

In het onderzoek zijn vier zuiveringsconcepten ontwikkeld, die gebruik maken van ozondosering en GAC-filtratie, gecombineerd met chemische fosfaatverwijdering en biologische stikstofverwijdering. De volgende concepten zijn beschouwd:

1. O3-STEP® filter met externe (= buiten de rwzi-locatie) thermische regeneratie van de kool;
2. O3-STEP® filter met externe thermische regeneratie, met voorgeschakeld zandfilter;
3. O3-STEP® filter met on-site regeneratie met O_3 (= buiten de GAC-filters, op de rwzi-locatie);
4. O3-STEP® filter met in-situ (= in de GAC-filters) regeneratie met O_3 .

De O3-STEP® filter concepten blijken alle technologisch en technisch haalbaar en zijn op financiële aspecten vergelijkbaar met alternatieve end-of-pipe maatregelen op rwzi's. De concepten verwijderen een breder spectrum aan microverontreinigingen dan alternatieve nabehandelingsconcepten. Bovendien verwijderen de O3-STEP® filter concepten nutriënten vergaand. Deze concepten zijn op basis van referenties en literatuurgegevens opgesteld en nog niet in de praktijk uitvoerig bewezen. De resultaten van het laboratoriumonderzoek onderbouwen de conclusies en aanbevelingen die uit de conceptontwikkeling komen. Daarmee is dit rapport een opmaat voor vervolgonderzoek.

8.2 CONCLUSIES OVER HET O3-STEP® FILTER CONCEPT

8.2.1 TECHNISCH EN TECHNOLOGISCH HAALBAAR

De vier zuiveringsconcepten zijn in detail uitgewerkt voor vergaande verwijdering van microverontreinigingen en nutriënten uit secundair effluent door middel van ozondosering en GAC-filtratie (met biologische nitraatverwijdering en chemische fosfaatverwijdering). Hierbij wordt een breder spectrum aan microverontreinigingen en nutriënten verwijderd dan in beide losstaande concepten doordat gebruik gemaakt wordt van zowel oxidatie, adsorptie én biologische omzetting van microverontreinigingen en afbraakproducten, chemische precipitatie van fosfaat en denitrificatie van nitraat. De uitgewerkte O3-STEP® filter concepten zijn technologisch en technisch haalbaar en leveren een onderling vergelijkbare effluentkwaliteit maar onderscheiden zich door de zuiveringsconfiguraties en de regeneratiemethoden. Op laboratoriumschaal is aangetoond dat bij een ozondosering van 0,8 gO₃/g DOC de combinatie van ozon en actiefkool leidt tot een hogere verwijderingsprestatie, verwijdering van een breder spectrum van microverontreinigingen en tot verlenging van de standtijd van het actiefkool, waarmee een standtijd van 25.000 bedvolumes realistisch wordt. Mogelijk is wordt de standtijd zelfs nog langer door de verwachte positieve effecten van biologie, die bij de laboratoriumexperimenten niet is meegenomen. De 35.000 bedvolumes zoals aangenomen in paragraaf 3.1 komt dan ook in beeld.

Als de gecombineerde techniek beschouwd wordt dan blijkt het actiefkoolverbruik een grotere bijdrage te leveren aan de totale kosten en duurzaamheidsimpact dan ozon [12]. Daarom is het gunstig om ozon voor te schakelen, omdat op deze manier meer microverontreinigingen al worden afgebroken door ozon die vervolgens niet meer door het kool afgevangte hoeven te worden. Om dezelfde verwijderingsprestaties te halen is dus minder actiefkooladsorptie noodzakelijk. Het effect hiervan op de standtijd wordt in de volgende paragraaf behandeld. Wat hier nog niet in is meegenomen is de vorming van metabolieten door ozonoxidatie. Het actiefkoolfilter dient als barrière zodat deze stoffen niet in het filtraat komen. In het proof-of-principle onderzoek is hier nog niet expliciet naar gekeken. In vervolgonderzoek wordt hier nadrukkelijk wel aandacht aan besteed.

8.2.2 FINANCIËEL CONCURREREND

De kosten voor de vier uitgewerkte nabehandelingsconcepten liggen voor installaties van 300.000 i.e. tussen de 0,21 - 0,25 EUR per m³ behandeld secundair effluent, respectievelijk 11,0 tot 13,2 EUR/i.e./jaar. Voor een schaalgrootte van 100.000 i.e. liggen de kosten op circa 0,25 tot 0,32 EUR/m³; respectievelijk 13,0 - 16,6 EUR/i.e./jaar. Concept 1 is daarbij de gunstigste uitvoering van het O3-STEP® filter concept. Concept 3 wordt vergelijkbaar met concept 1 op grote schaal (> 300.000 i.e.) wanneer de realisatiekosten verdisconteerd worden met de extra voorzieningen voor ozonbestendigheid in verband met de verhoogde optredende corrosie.

De concepten 2 en 4 zijn relatief duurder doordat extra filterunits nodig zijn en ingeval van concept 4 de GAC-filters ozonbestendig gemaakt moeten worden.

De kostenanalyse toont dat de jaarlasten voor het grootste gedeelte bestaan uit CAPEX. Relatief hoge investeringskosten zorgen tevens voor aanzienlijke onderhoudskosten die ook op de OPEX invloed hebben. In de onderlinge vergelijking van de OPEX-posten zijn de regeneratiekosten van GAC aanzienlijk. Efficiënte uitvoeringsmethoden en alternatieven voor thermische regeneratie kunnen leiden tot potentiële kostenbesparingen, zeker bij een schaalgrootte van meer dan 300.000 i.e..

Bij een schaalgrootte van 20.000 i.e. is concept 1 duidelijk voordeliger dan de overige concepten. Voor zuiveringen met een dergelijk kleine schaal zal anders moeten worden ontworpen dan bij de grotere schaalgroottes en dient een conventionele regeneratietechniek toegepast te worden. Hierbij moet gedacht worden aan werken met metaal i.p.v. beton en op basis van (industriële) modulaire bouwmethoden. Dit zal de kosten voor realisatie op kleinere schaal naar beneden brengen.

Op basis van de analyse van concept 2 blijkt het plaatsen van een (chemisch ondersteund en biologisch actief) zandfilter voorafgaande aan de ozondosering en de GAC-filtratie niet kosten-effectief te zijn. De besparing door de extra DOC-verwijdering op ozonisatie en GAC-filtratie wordt teniet gedaan door de extra investerings- en onderhoudskosten waardoor de zandfilters het concept 2 structureel duurder maken dan concept 1 en bij een schaalgrootte van 300.000 i.e. concept 2 ook duurder uitvalt dan concept 3.

De concepten zijn bij een schaalgrootte vanaf 100.000 i.e. goedkoper dan alleen GAC-filtratie omdat door de ozonisatie de standtijd van het GAC vergroot kan worden. Daarnaast zorgt regeneratie van GAC voor een behoorlijke besparing in de kosten ten opzichte van de aanschaf van nieuw GAC. De concepten met ozonisatie en biologische GAC-filtratie zijn iets duurder dan ozonisatie + zandfiltratie en PAC+ zandfiltratie, een verschil dat teniet gedaan wordt wanneer de vergaande nutriëntenverwijdering van de concepten niet meegenomen wordt. De kosten van concept 1 worden dan 0,18-0,19 EUR per m³ secundair effluent.

Voor de andere O3-STEP® filter concepten liggen de kosten voor de verwijdering van alleen microverontreinigingen hoger. Ten opzichte van het PACAS-concept liggen de prijzen wel hoger, maar de verwijderingspotentie en brede verwijderingsrange van de combinatie van het O3-STEP® filter zorgt voor een stabiele, verder gezuiverde effluentkwaliteit.

8.2.3 VERWIJDERINGSPRESTATIES EN HOOGWAARDIGE WATERKWALITEIT

Door de combinatie van microverontreinigingen- en nutriëntenverwijdering in het O3-STEP® filter concept is de waterkwaliteit van het effluent hoogwaardig. Dit komt niet alleen omdat nutriënten verwijderd kunnen worden tot aan streefwaarden voor oppervlaktewater maar ook omdat door de combinatie van ozonisatie met biologische GAC-filtratie oxidatie van microverontreinigingen gecombineerd wordt met biologische omzetting en adsorptie van microverontreinigingen, afbraakproducten én restproducten. Hierdoor wordt een breder spectrum aan microverontreinigingen verwijderd dan wanneer alleen adsorptie of alleen oxidatie wordt gebruikt zoals bij enkel GAC-filtratie of poederkooldosering. De literatuurverkenning, de deskstudie en de proof-of-principle laboratoriumtesten bevestigen in grote lijnen deze uitstekende effluentkwaliteit van het concept O3-STEP® filter. Tevens is bij de gehanteerde ozondoseringen en testcondities geen bromaat aangetoond in het filtraat. Dat impliceert overigens niet dat bromaat- en metaboliëtvorming uitgesloten kunnen worden bij toepassing van geavanceerde

oxidatietechnieken. De combinatie met een adsorptief actiefkoolbed vermindert echter de kans op lozing van metabolieten aanzienlijk. Dit dient in demonstratieonderzoek bevestigd te worden met chemische analyses en ecotox-metingen.

8.2.4 ALTERNATIEVEN VOOR THERMISCHE REGENERATIE ZIJN WENSELIJK

Het verschil in de jaarlasten tussen het concept met thermische regeneratie van het GAC (concept 1) en het concept met regeneratie van GAC door middel van ozondosering in een regeneratietank (concept 3) is dermate klein op grotere schaal (>300.000 i.e.) dat dit valt binnen de bandbreedte van de onzekerheidsmarge voor de kostenspecificaties voor het ozonbestendig maken van de in-situ/on-situ-installaties en de overige onzekerheden. In de onderlinge vergelijking van concept 3 en 4, blijkt concept 3 in alle berekende situaties gunstiger dan concept 4. Echter, de in-situ regeneratiemethoden van concept 3 en 4 resulteren niet in structureel lagere kosten dan concept 1 met thermische regeneratie. Regeneratie van het GAC door middel van ozondosering zorgt echter wel voor een verlaging van de totale verbruikskosten voor de nabehandeling van secundair effluent ten opzichte van thermische regeneratie. Dit houdt in dat indien de investeringskosten van de GAC-regeneratie met ozon beperkt kan worden, concept 3 een interessant alternatief is. Daarvoor is verder onderzoek naar alternatieve regeneratiemethoden van GAC nodig. Tevens dient rekening gehouden te worden met duurzaamheidsaspecten van het regeneratieproces waarin alternatieve methoden potentieel minder energie- en hulpstoffen vragen, geen transportbewegingen vereisen, lagere emissie naar de omgeving kennen en een lagere reststoffenproductie zouden kunnen hebben. Nader onderzoek is hiervoor nodig.

8.3 ONDERZOEKSVRAGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK

Vanuit dit STOWA-onderzoek zijn een aantal essentiële onderzoeksvragen relevant die beantwoording vereisen voor succesvolle praktijktoepassing van het O3-STEP® filter concept. Deze vragen zijn al deels in hoofdstuk 7 beantwoord, maar verdienen ook in het vervolgonderzoek de aandacht:

1. Wat zijn de verwijderingsprestaties voor (een selectie aan) specifieke microverontreinigingen?
 - Wat is de verwijderingsprestatie van GAC?
 - Wat is de bijdrage van ozon?
 - Wat is de totale gecombineerde verwijderingsprestatie?
2. Wat zijn de verwijderingsprestaties voor een cocktail van (een selectie aan) microverontreinigingen?
 - Wat is de verwijderingsprestatie van GAC?
 - Wat is de bijdrage van ozon?
 - Wat is de totale gecombineerde verwijderingsprestatie?
3. Heeft ozon en positieve invloed op de standtijd van het GAC?
 - Wat is de (range van) ozondosering die tot verbetering van de standtijd van het GAC leidt?
 - Wat is de te verwachten standtijd van het GAC?
4. Wat is de invloed van de ozondosering op de nutriëntenverwijdering, te weten...
 - de biologische stikstofverwijdering?
 - de chemische fosfaatverwijdering?
5. Wat zijn de langdurige prestaties van het GAC?
 - Wat is de resterende beladingscapaciteit van het GAC na verloop van een bepaalde standtijd?
 - Wat is de (thermische) regeneratiemogelijkheid van het GAC na verloop van een bepaalde standtijd?
 - Wat is de resterende adsorptiecapaciteit van het (thermisch) gereactiveerde GAC?

Vragen 1 tot en met 3 zijn gedurende de proof-of-principle al deels beantwoord. Ter bevestiging van de bevindingen in de proof-of-principle dienen de vragen ook in het vervolgonderzoek meegenomen te worden. Gedurende de proof-of-principle is alleen gekeken naar geneesmiddelen. In vervolgonderzoek dient een bredere groep microverontreinigingen meegenomen te worden in de analyses. Tevens is het aan te raden om met effectmetingen te werken om ook effecten van metabolieten goed mee te kunnen nemen. Daarnaast is vooral de vraag hoe de nutriëntenverwijdering werkt met de voorgeschakelde ozondosering.

8.4 AANBEVELINGEN

8.4.1 INTEGRALE EN LOCATIESPECIFIEKE AANPAK MICROVERONTREINIGINGEN

Aanbevolen wordt om binnen het STOWA programma over microverontreinigingen het O3-STEP® filter concept voor de verwijdering van microverontreinigingen én nutriënten uit secundair effluent als toepasbaar alternatief verder door te ontwikkelen. Het O3-STEP® filter is bij uitstek geschikt om relatief grote zuiveringen aan te pakken waar de ambitie is om microverontreinigingen te verwijderen (bijvoorbeeld hotspot-zuiveringen) én waar nutriëntenverwijdering gewenst is.

Deze doorontwikkeling wordt bij voorkeur gedaan in een integrale aanpak waarin meerdere alternatieven parallel aan elkaar uitgewerkt worden. Een aantal vergelijkbare lopen al (Gozond Water) of zijn recentelijk afgerond (PACAS, De Zoetwaterfabriek de Groote Lucht), terwijl een aantal binnenkort gaan lopen (onder andere de pilots met ozon en UV/H₂O₂ op de rwzi Aarle-Rixtel). Zo wordt voor alle waterschappen de juiste lokale oplossing voor het microverontreinigingenvraagstuk aangeboden. Op basis van de uitgevoerde haalbaarheidsstudie worden enkele essentiële aanbevelingen gedaan om de ontwikkeling van een (kosten) effectief zuiveringsconcept voor de verwijdering van microverontreinigingen en nutriënten uit secundair effluent op korte termijn mogelijk te maken.

8.4.2 DEMONSTRATIEONDERZOEK

Om de ontwerpuitgangspunten, aannames en de op literatuurgegevens vastgestelde prestaties van het zuiveringsconcept O3-STEP® filter te valideren en definitief vast te stellen is nader onderzoek nodig. Het zuiveringsprincipe van concept 1 is als basis genomen voor laboratoriumonderzoek, dit heeft een deel van de ontwerpuitgangspunten bevestigd. Vervolgonderzoek op demonstratie-schaal dat vervolgens vertaald kan worden naar een full-scale-installatie is de gewenste volgende stap.

8.4.3 VERKENNING EN ONTWIKKELING VAN ALTERNATIEVE REGENERATIEMETHODEN

Vanuit concept 1 dient de haalbaarheid en efficiënte toepasbaarheid van de alternatieven en optimalisaties van regeneratiemethoden aangetoond te worden. Voordat de concepten (3 en 4) met on-site ozonregeneratie op demonstratieschaal uitgevoerd kunnen worden, dient eerst kleinschalig laboratoriumonderzoek te worden uitgevoerd naar de uitvoering en efficiëntie van ozon op GAC-regeneratie. Vanuit laboratoriumcondities kan uiteindelijk opschaling naar semi-praktijkschaal plaatsvinden, op basis waarvan ook concept 3 beproefd kan worden. De ODC-techniek zou hier, op termijn, een interessant concept kunnen zijn die voor in-situ regeneratie kan zorgen. Daarom is het aan te raden om deze techniek te blijven volgen.

Aangezien de optimalisatie van regeneratie van actiefkool essentieel is voor de haalbaarheid van de concepten dienen alternatieve regeneratietechnieken, zoals biologische GAC-rege-

neratie, nader onderzocht te worden. De verschillende regeneratietechnieken kunnen eerst op kleinere schaal getest worden met actiefkool uit bestaande installaties. Bij het testen van de regeneratie van actiefkool moet rekening gehouden worden met de standtijd van het GAC. Indien deze te lang is zal het GAC minder goed geregenereerd kunnen worden en kan dit wellicht tot verkeerde conclusies leiden bij het vergelijken van de werking van de verschillende regeneratietechnieken.

8.4.4 INSPELEN OP RECENTE ONTWIKKELINGEN

De huidige focus ligt op het verwijderen van medicijnresten en andere microverontreinigingen. Recentelijk worden twee andere aspecten als belangrijk ervaren: microplastics en antibiotica resistentie. Het is dan ook ten zeerste aan te bevelen om in vervolgonderzoek aandacht te besteden aan deze en andere nieuwe ontwikkelingen.

9

REFERENTIES

- [1] Abegglen, C. 2009. *Ozonung von gereinigtem Abwasser*. EAWAG.
- [2] Activated carbon schematic: 2015. <https://joejaworski.files.wordpress.com/2008/05/activatedcarbon1.jpg>. Accessed: 2015-08-15.
- [3] Álvarez, P.M., Beltrán, F.J., Gómez-Serrano, V., Jaramillo, J. and Rodríguez, E.M. 2004. Comparison between thermal and ozone regenerations of spent activated carbon exhausted with phenol. 38, 8 (2004), 2155–65.
- [4] Álvarez, P.M., Beltrán, F.J., Masa, F.J. and Pocostales, J.P. 2009. A comparison between catalytic ozonation and activated carbon adsorption/ozone-regeneration processes for wastewater treatment. 92, 3–4 (2009), 393–400.
- [5] Ariva Productspecificatie ODC: 2015. <http://www.arviatechnology.com/our-solution/>. Accessed: 2015-09-09.
- [6] Arjan Dekker and W. Zijlstra 2013. STOWA 2013 35 Monitoring 1-STEP filter Horstermeer. STOWA.
- [7] Arvia Organics Destruction Cell: 2015. <http://www.arviatechnology.com/product/>. Accessed: 2015-09-09.
- [8] Bao, M.L., Griffini, O., Santianni, D., Barbieri, K., Burrini, D. and Pantani, F. 1999. Removal of bromate ion from water using granular activated carbon. *Water Research*. 33, 13 (1999), 2959–2970.
- [9] Benjamin, M.M. and Lawler, D.F. 2013. *Water quality engineering: Physical/chemical treatment processes*. John Wiley & Sons.
- [10] Böhler, M. 2012. *Ergänzende Untersuchungen zur Elimination von Mikroverunreinigungen auf der ARA Neugut*. Technical Report #08.0020.PJ / K402-0205. EAWAG.
- [11] Bornemann, et al. 2015. *FilterAK+ Technische Erprobung des Aktivkohleeinsatzes zur Elimination von Spurenstoffen in Verbindung mit vorhandenen Filteranlagen*. Wupperverband.
- [12] Bram Bloks, Coen de Jong, Aisa Essed and Arjen van Nieuwenhuijzen 2017. Verkenning alternatieve technologische mogelijkheden verwijdering van geneesmiddelen uit afvalwater [nog niet gepubliceerd]. STOWA.
- [13] C. Abegglen and Siegrist, H. 2012. *Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser- Verfahren zur weitergehende Elimination auf Kläranlagen*. BAFU.
- [14] Çeçen, F., Akta, Ö. and editors 2012. *Activated carbon for water and wastewater treatment: integration of adsorption and biological treatment*. Wiley-VCH.
- [15] D. de Ridder` 2012. *Adsorption of organic micropollutants onto activated carbon and zeolites*. TU Delft.

- [16] Drinking Water Treatability Database: Granular Activated Carbon: 2015. <http://iaspub.epa.gov/tdb/pages/treatment/treatmentOverview.do?processId=2074826383>. Accessed: 2015-08-28.
- [17] EAWAG 2017. *Schlussbericht Biologische Nachbehandlung von kommunalem Abwasser nach Ozonung - ReTREAT*. Technical Report #5221.00789.001. EAWAG.
- [18] Heringa, M.B., Harmsen, D.J.H., Beerendonk, E.F., Reus, A.A., Krul, C.A.M. and Metz, D.H. 2011. Formation and removal of genotoxic activity during UV/H₂O₂-GAC treatment of drinking water. 45, 1 (2011), 366–74.
- [19] Hofman-Caris, R.C.H.M., Harmsen, D.J.H., Puijker, L., Baken, K.A., Wols, B.A. and Beerendonk, E.F. 2015. Influence of process conditions and water quality on the formation of mutagenic byproducts in UV/H₂O₂ processes. 74, (2015), 191–202.
- [20] Hydro-Ingenieure, Hochschule Ostwestfalen-Lippe and IWW- Rheinische-Westfälisches Institut für Wasser 2017. *Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Detmold mittels der Kombination von Ozon mit nachgeschalteter Aktivkohlefiltration*.
- [21] Ian Hunt 2017. Chapter 12 : Reactions of Arenes. Electrophilic Aromatic Substitution.
- [22] Klaer, K. 2017. Pilotversuche Ozonung: Spurenstoffelimination und Desinfektion.
- [23] Lenntech 2017. Ozone reaction mechanisms.
- [24] Lin, S. 2002. Kinetic characteristics of textile wastewater ozonation in fluidized and fixed activated carbon beds. 34, 3 (2002), 763–72.
- [25] Liu, T.K. 2017. *Organic Micropollutant Treatment by Pre-Ozonation and Activated Carbon*. University of Technology.
- [26] Mansveld, W.J. 2013. Brief van Mansveld van juni 2013 betreffende Geneesmiddelen in drink-water en milieu.
- [27] Martijn, A.J. 2015. *Impact of the water matrix on the effect and the side effect of MP UV/H₂O₂ treatment for the removal of organic micropollutants in drinking water production*. Wageningen University.
- [28] Mehta, M.P. and Flora, J.R.V. 1997. Effects of electrochemical treatment of granular activated carbon on surface acid groups and the adsorptive capacity for phenol. 46, 15 (1997), 2171–6.
- [29] Mirabella Mulder, Demet Antakyali and Sandra Ante 2015. 2015-27 Verwijdering van microverontreinigingen uit effluënten van rwzi's een vertaling van kennis en ervaring uit Duitsland en Zwitserland, STOWA. STOWA.
- [30] Narbaitz, R.M. and McEwen, J. 2012. Electrochemical regeneration of field spent GAC from two water treatment plants. 46, 15 (2012), 4852–60.
- [31] National Center for Biotechnology Information and U.S. National Library of Medicine Pubchem database.
- [32] Opening proefinstallatie ozon-deelstroomdosering Waternet: 2015. <http://www.innovatie.waternet.nl/projecten/ozondosering-met-venturi-in-deelstroom/>. Accessed: 2015-08-30.
- [33] Oxidative Processes- Pollutant control and reaction kinetics: 2015. https://www.uni-due.de/water-science/oxpro_15.php. Accessed: 2015-08-28.
- [34] OZAT CFV leaflet: 2011. <http://www.ozonia.com/ozone.php>. Accessed: 2015-08-28.
- [35] Ozon + waterstofperoxide = Perozox®: 2014. <http://www.verhoevemw.com/ozon-waterstofperoxide-perozox/>. Accessed: 2015-09-15.

- [36] Ozongeneratie: 2015. <http://www.lenntech.nl/bibliotheek/ozon/generatie/ozon-generatie.htm>. Accessed: 2015-09-14.
- [37] Peter de Jong, Freek Kramer, W.F. Slotema and K.A. Thirid 2005. Verkenningen zuiveringstechnieken en KRW, STOWA 2005-28. STOWA.
- [38] Primozone Ozone generator leaflet: 2011. <http://www.primozone.se>. Accessed: 2015-08-28.
- [39] Public Water Disinfection using ozone: 1999. http://www.online-pdh.com/engcourses/file.php/162/OZN_SG.pdf. Accessed: 2015-08-28.
- [40] Reungoat, J., Escher, B.I., Macova, M. and Argand, F.X. 2012. Ozonation and biological activated carbon filtration of wastewater treatment plant effluents. *Water Research*.
- [41] Rolfs, T. 2017. Konzeption, Planung und Bau einer Ozonungsanlage zur Vollstrombehandlung auf der Kläranlage Aachen-Soers.
- [42] Rolfs, T. 2017. Konzeption, Planung und Bau einer Ozonungsanlage zur Vollstrombehandlung auf der Kläranlage Aachen-Soers.
- [43] Salvador, F., Martin-Sanchez, N., Sanchez-Hernandez, R., Sanchez-Montero, M. and Izquierdo, C. 2015. Regeneration of carbonaceous absorbents. Part II: Chemical, Microbiological and Vacuum Regeneration. 202, (2015), 277–96.
- [44] Sharon Dijksma 2017. Update ketenaanpak medicijnresten uit water. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- [45] Siddiqui, M.S., Zhai, W., Amy, G.. and Mysore, C. 1996. Bromate ion removal by activated carbon. *Water Research*. 30, 7 (1996), 1651–60.
- [46] Sodha, K., Panchani, S.C. and Nath, K. 2013. Feasibility study microbial regeneration of spent activated carbon sorped with phenol using mixed bacterial culture. 20, (2013), 33–9.
- [47] STOWA 2006-21 2006. *Filtratietechnieken RWZI's: stand van zaken en ervaringen met zandfiltratie*. Technical Report #21. STOWA.
- [48] STOWA 2007-24 2007. *Het actiefslibproces: de mogelijkheden en grenzen*. Technical Report #24. STOWA.
- [49] STOWA 2009-33 2009. *Nageschakelde zuiveringstechnieken op de AWZI Leiden-Zuid-West- verkenning actiefkooladsorptie en geavanceerde oxidatietechnieken*. Technical Report #33. STOWA.
- [50] STOWA 2009-34 2009. *Pilotonderzoek RWZI Horstermeer 1-STEP® filter als effluentpolishingtechniek*. Technical Report #34. STOWA.
- [51] STOWA 2010-27 2010. *Actievekoolfiltratie op afloop nabezinktank: demonstratieonderzoek op vier rwzi's*. Technical Report #27. STOWA.
- [52] STOWA 2013-35 2013. *Monitoring 1-STEP® filter Horstermeer*. Technical Report #35. STOWA.
- [53] STOWA 2015-27 2015. *Verwijdering van Microverontreinigingen uit effluenten van RWZI's - vertaling van kennis en ervaring uit duitsland en zwisterland*. Technical Report #27. STOWA.
- [54] Tadkaew 2011. Removal of trace organics by MBR treatment The role of molecular properties. IWA Water research.
- [55] Technology Fact Sheet, GAC: 2000. https://owpubauthor.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2003_05_15_mtb_carbon_absorption.pdf. Accessed: 2015-08-28.

- [56] Technology Fact Sheet, ozon disinfection: 1999. http://owpubweb.epa.gov.scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_ozon.pdf. Accessed: 2015-08-28.
- [57] Valdés, H., Sánchez-Polo, M., Rivera-Utrilla, J. and Zaror, C.A. 2002. Effect of Ozone Treatment on Surface Properties of Activated Carbon. 18, 6 (2002), 2111–6.
- [58] Van der Hoek, J.P., Hofman, J. and Graveland, A. 2000. Benefits of ozone-activated carbon filtration in integrated treatment processes, including membrane systems. 49, 6 (2000), 341–57.
- [59] Van Leenen, M. 2015. *Invloed van verwijdering van organische stof op ozonisatie*. Delft University of Technology.
- [60] Vermuë, A.J. and Bergkamp, R.M. 2014. Brief Vewin en UvW aan Staatssecretaris IenM over Plan van aanpak geneesmiddelen in de waterketen.
- [61] Von Gunten, U. 2003. Ozonation of drinking water: Part 1. Oxidation kinetics and product formation. 37, 7 (2003), 1443–67.
- [62] Von Sonntag, C. and Von Gunten, U. 2012. *Chemistry of ozone in water and wastewater treatment: from basic principles to applications*. IWA Publ.
- [63] Wikimedia Commons Electrophilic aromatic directing groups.
- [64] Wittmer, A. 2015. Poster Ozonation Reactor and Measurements.
- [65] Wittmer, A. 2013. *UV-Messung zur Regelung der Ozondosis und Überwachung der Reinigungsleistung-Labor und halbtechnische Pilotversuche*. EAWAG.
- [66] WWTP Neugut 2015. Switzerland's first facility for the removal of micropollutants. ARA Neugut.
- [67] Zhu, I.X., Wang, J. and Wieland, A. 2015. Ozone-Enhanced Biologically Active Filtration for Wastewater Reuse. *Journal- American Water Work Association*. 107, 12 (2015), E685–E692.
- [68] Zuivering van stedelijk afvalwater: per provincie en stroomgebieddistrict: 2015. <http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?DM=SLNL&PA=7477&D1=0,12,43,55&D2=0&D3=1&HDR=G1,T&STB=G2&VW=T>. Accessed: 2015-09-09.
- [69] 2015. *Ozonung ARA Neugut, Dübendorf - Grosstechnische Optimierung der Ozondosierung*. EAWAG.

BIJLAGE 1

OZONE CHEMISTRY

Ozone chemistry is highly complex because of the high reactivity of the ozone molecule. It reacts over direct and indirect reactions with a lot of species in the water. In table I.1 the most important species are listed that react with ozone and are formed during the ozonation process.

TABEL I.1 INTRODUCTION OF RELEVANT SPECIES IN OZONE CHEMISTRY

Chemical Species	Name
DOC	Natural Organic Matter
DOC _{ox}	oxidized DOC molecule
DOC ⁺ ·	positive charged DOC radical
O ₃	ozone molecule
O ₃ ^{-·}	ozonide anion radical
O ₂	oxygen molecule
O ₂ ^{-·}	superoxide radical
·OH	hydroxyl radical
OH ⁻	hydroxyl ion
H ⁺	hydrogen ion
HCO ₃ ⁻	bicarbonate
CO ₃ ²⁻	carbonate
CO ₃ ^{-·}	carbonate radical
H ₂ O	water molecule
HO ₂ ·	hydroperoxyl radicals
HO ₃ ·	
HO ₄ ·	

REACTION OF OZONE WITH DOC

In drinking water treatment and in wastewater treatment ozone is added well-controlled to the water. Ozone can either react directly or indirectly with the water compounds. The direct pathway is the reaction with Dissolved Organic Matter (DOC) described by reaction [1] and [2] [61]:



These reactions are general expressions because DOC is a surrogate parameter. A lot of reactions have been understood and modelled but nevertheless ozone chemistry remains for a large part unknown when dealing with natural waters.

The formation of the ozonide anion radical in turn initiates the formation of high reactive OH-radicals:



The indirect reaction of ozone with DOC is the reaction over OH-radicals. OH-radicals can react really fast with DOC and form carbon centred radicals which lead to the formation of the superoxide radical:



The superoxide radical leads to a chain reaction in which new OH-radicals are generated over reactions [7], [3] and [4].



REACTION OF OZONE WITH HYDROXYL RADICALS (SELF-DECOMPOSITION OF OZONE)

The OH-radicals from reaction [4] react really fast with micro pollutants and have a large share on the degradation of micro pollutants but they also react with ozone molecules ([8], [9], [10]) and increase the depletion rate of ozone. Thereby new superoxide radicals are formed which lead to the regeneration of the hydroxyl radicals ([7], [3], [4]):



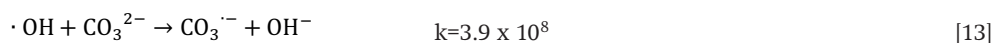
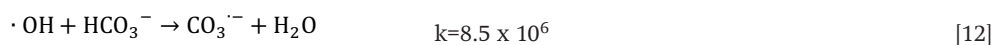
REACTION OF OZONE WITH HYDROXYL IONS

Hydroxyl ions can also initiate the decomposition of ozone. The advantage of this reaction mechanism is that it leads to the formation of the superoxide radicals which can in turn initiate the hydroxyl radical formation over the chain reactions [10], [7], [3] and [4]:



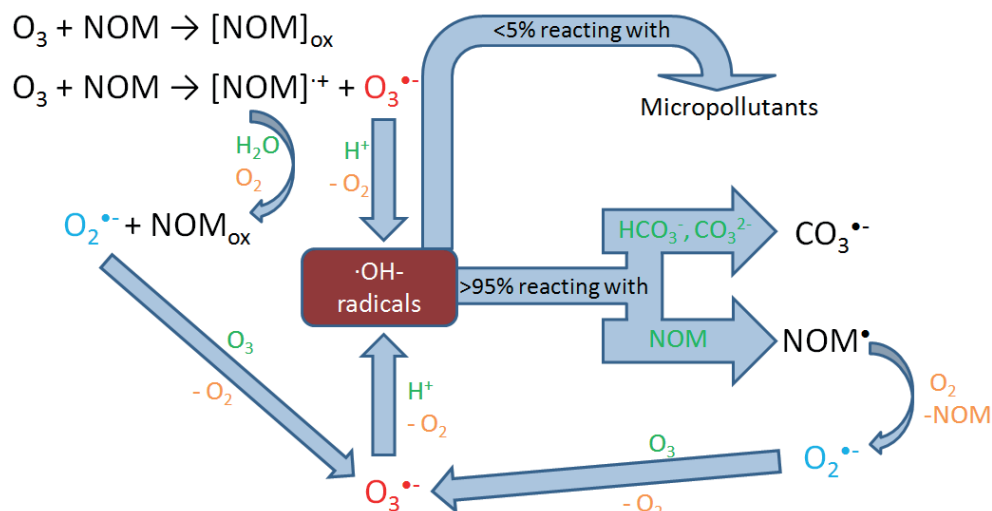
REACTION OF HYDROXYL RADICALS WITH INORGANIC CARBON

The reaction of hydroxyl with carbonate species has been investigated in a lot of studies. Carbonate species act as inhibitors and slow down the decomposition of ozone. This is because they react with hydroxyl radicals and avoid the depletion of ozone induced by hydroxyl-radicals. The presence of carbonate and bicarbonate on the one hand has an adverse effect on micro pollutant removal by hydroxyl radicals. But on the other hand the micro pollutant removal and the disinfection by ozone are improved due to the decreased depletion of ozone by hydroxyl radicals (reaction [8]). So more ozone becomes available for the reaction with micro pollutants.



Below in Figure I.1 the hydroxyl radical formation and some important reactions with target compounds from reactions [1] to [13] are summarized in a scheme.

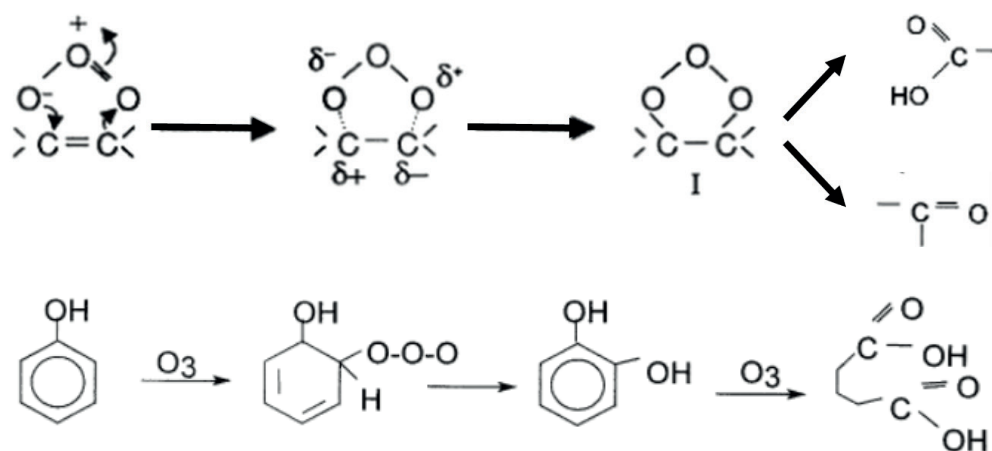
AFBEELDING I.9.1 SCHEMATIC OVERVIEW OF HYDROXYL RADICAL FORMATION AND REACTIONS (MODIFIED [33])



REACTION OF OZONE WITH SPECIFIC MICROPOLLUTANTS

As described, ozon oxidation has two main pathways: direct and indirect (via various radicals). The direct route tackles a few different types of organic matter. Three most notable groups are double bonds, activated aromatic groups and amines. Activated aromatic groups are groups that promote electrophilic aromatic substitution, for more detail see [21, 63]. The indirect route via radicals is much more a-specific and tackles a broader range of compounds.

AFBEELDING 9.2 TWO PATHWAYS OF OZONE BREAKDOWN. TOP: OZON REACTING WITH A SATURATED HYDROCARBON (DOUBLE BOND) TO FORM METABOLITES; BOTTOM: OZON REACTING WITH AN ACTIVATED AROMATIC MOLECULE



REFERENCES

- von Gunten, U. 'Ozonation of drinking water: Part I: Oxidation kinetics and product formation.' *Water Research*, 2003a: 1443-1467.
- Lutze, H. Oxidative Processes - Pollutant control and reaction kinetics [Internet]. 2015. Available from: https://www.uni-due.de/water-science/oxpro_15.php.

BIJLAGE 2

INVLOED VAN MENGING OP OXIDATIE & DESINFECTIE

Het belang van een goede menging van ozon door het te behandelen afvalwater komt vooral voort uit de log schaal waarmee desinfectie wordt aangegeven. Het onderstaande voorbeeld illustreert dit:

In een beluchtingsbak wordt de helft van het water (A) goed voorzien van ozon en de helft niet (B), zie tabel II.1.

TABEL II.1

AFDODING BIJ GOEDE EN SLECHTE MENGING VAN OZON

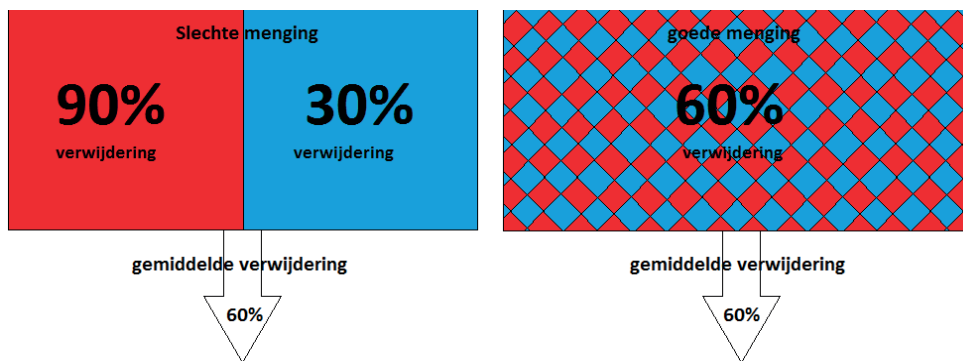
Deel	Log reductie	% afdoding	Overlevende microben
A	5	99,999%	1 op 100.000
B	1	90,000%	10.000 op 100.000

Zodra de twee delen water bij elkaar komen is het aantal overlevende microben 10.001 op 200.000 wat bijna gelijk staat aan een log reductie van 1, zonder goede menging is het niet mogelijk een goede desinfectie te bewerkstelligen.

Voor oxidatie is de menging minder relevant. onderstaande afbeelding illustreert dit.

AFBEELDING II.2

VERWIJDERINGSPRESTATIES MET SLECHTE EN GOEDE MENGING



Bij slechte en goede menging zal het gemiddelde uiteindelijk (bijna) hetzelfde zijn. Pas bij hoge doseringen in combinaties met zeer slechte menging zal er een significante afname in effectiviteit plaatsvinden voor oxidatie

BIJLAGE 3

BEREKENING ENERGIEVERBRUIK

TABEL III.1 ENERGIEVERBRUIK REGENERATIE ACTIEFKOOL (5)

Criteria	Eenheid	Waarde
totale kosten voor regeneratie	EUR/m ³	500,--
transport	EUR/m ³	200,--
energiekosten regeneratie actiefkool	EUR/m ³	300,--
energieprijs	EUR/kWh	0,13
energieverbruik regeneratie	kWh/m ³ actiefkool	2.308
standtijd actiefkool	jaar	1
behandelde hoeveelheid bedvolumes per standtijd	-	30.000
behandeld water per m ³ actiefkool	m ³	30.000
energie-inzet voor regeneratie	kWh/m ³	0,077

BIJLAGE 4

MINUTES OF WORKSHOP

Witteveen+Bos
 Van Twickelostraat 2
 P.O. Box 233
 7400 AE Deventer
 The Netherlands
 +31 570 69 79 11
www.witteveenbos.com

subject Minutes of workshop
project Post-treatment with ozonation and GAC-filtration
minutes no. 15/02
date 30 October 2015
time 12:00 - 16:00
location Waternet, Amsterdam
project code STO196-1
reference STO196-1/15-019.902
prepared by Marina Sanders
date of preparation 30 November 2015
appendices -

present	Pharmafilter HH Delfland HH de Stichtse Rijnlanden WS de Dommel WS Vallei en Veluwe STOWA ISA RWTH Aachen Cabot TU Delft Waternet Witteveen+Bos	Nico Wortel Oscar Helsen Marlies Verhoeven Jarno de Jonge Frans Visser Mirabella Mulder Frank Benstöm Jan van de Dikkenberg Luuk Rietveld Manon Bechger, René van de Aa Arjan Dekker, Marina Sanders, Jeroen Mulder
absent	-	
copy	EAWAG	Marc Böhler, Christa McArdell

These minutes provide a summary of the outcomes of the expert workshop to post-treatment with Ozonation and GAC-filtration. The workshop and thus the minutes consist of three sections: research questions and answers, concept development and a wrap-up.

1. ANSWERS TO RESEARCH QUESTIONS

1.1. Process configuration

Process configuration was addressed during concept brainstorm. Considerations are:

- If only 80 % removal of micro pollutants is required only ozone or GAC is sufficient, potential benefits of combining ozone and GAC are:
 - Increase longevity of GAC
 - Broadband removal
 - Combining with nutrient removal
- Current common practice in Germany is that biological filters after ozonation are required to remove degradation products

- Coagulation/flocculation (iron) removes mostly DOC that is part of biopolymers, generally, iron dosing for DOC-removal doesn't improve absorption by GAC-filtration or GAC longevity
- There are some indications that ozonation will degrade dissolved organic N and P which currently cannot be removed by post-treatment technologies into components that can be removed
- Super saturation of water after ozonation, the net effect on methanol consumption for denitrification may be neutral because of increased AOC after ozonation, degassing equipment can be applied to decrease oxygen super saturation
- Potentially ozonation of WWTP effluent results in ammonia oxidation, because NO_x are removed in a biological denitrifying filter, the total N removal efficiency can increase

1.2. Ozonation

1.2.1. Ozone dosing

Considerations:

- Potential reuse of (parts of) the existing system determines what the most cost effective component for ozone dosing is: bubble contactor or side stream venturi injection, this has only influence on ozone dosing efficiency, not on the MP removal efficiency, don't decide up front to reject one dosing method over the other, the local situation should fit with the selected method
- High dosage in combination with side stream will create difficulties because of maximum solubility of ozone in water and bromate formation, if the percentage which is taken from the main stream for the side stream venturi injection becomes too large, the energy loss may become problematic
- Amount of ozone to be added (mg/mg order of magnitude):
 - Ozone/COD = 1 in wastewater (Nico Wortel)
 - Ozone/DOC = 0,5-1,0 (Frank Benstöm)
- In a plug flow reactor ozonation and coagulation can be combined (dimensioning tube reactor: IWA BRATBY, G[1/s]):
 - 2 minutes are needed to let ozone react, then coagulant can be added for PO₄ removal; the remaining time in the plug flow reactor can then also be used for the coagulation of PO₄.

What parameters influence the ozonation process?

- Ozone dose
- DOC/COD
- Temperature
- pH
- Turbidity (no knowledge)
- Nitrite, nitrate
- H₂CO₃ and CO₃²⁻ (scavengers; need to measure)
- bromide

On which parameters is the dimensioning based?

The required dosage of ozone is based predominantly on the amount of COD or DOC.

1.2.2. Degradation products and side-effects

- Ozone dosing only is up to now not acceptable, a consecutive filter step is necessary because the toxicity of water increases after ozonation

- Experience with pharmafilter is different (no by products or higher toxicity measured), the ozone dosage applied in the pharmafilter is significantly higher than applied for WWTP post-treatment in Germany

Nitrite, nitrate

- Formation of nitric acid shouldn't cause problems, pH won't be influenced by nitric acid formation in water treatment, nitric acid formation by nitrous oxide oxidation in the air may cause corrosion issues in for example degassing equipment or ozone destruction equipment

Bromate formation

- In the pharmafilter problems with bromate formation are not experienced although the ozone dosage applied is high, the cause cannot (yet) be disclosed
- In the design process for effluent polishing in Germany, measurements of bromate levels are decisive for the consideration to use GAC or ozone
- Less than 10 % of the formed bromate is removed / reduced in a filter
- Bromate is reduced to bromide under anaerobic conditions

DOC removal

Depends on dosage. With low dosages such as used in WWTP in Germany, DOC will be broken down to smaller molecules but this doesn't remove the DOC (yet) the smaller DOC molecules are removed better in the GAC-filter.

Biomass

Combining denitrifying biomass and ozone in the same environment is not possible because of the contradicting process conditions.

1.2.3. Influence on GAC

This is a part which we can consider as knowledge gap. GAC works as a catalyst for OH-radical formation and some lab test are known where the possibilities for ozone in combination with GAC were investigated. If more information is needed about this combination, research is needed.

1.3. GAC-filtration

- Smaller molecules in DOC compete with MP, larger molecules such as biopolymers, don't, therefore micro pollutants can still be removed after breakthrough of COD/TOC
- GAC removes substances that are hydrophobic, hydrophilic components are removed less
- DOC-fractionation over components is very similar for different samples of domestic wastewater, the pore blocking fractions are known
- Larger molecules are not well absorbed but do cause pore blocking / carbon fouling
- Smaller molecules are absorbed well by GAC
- GAC-grain size is determined by the function of the filter, if coagulation and TSS removal is required, larger grains are needed to prevent clogging

1.3.1. Reactivation methods

- Thermal reactivation:
 - Only proven technology
 - Good reactivation quality, but 15 % loss
 - High energy consumption

- External, transport needed:
- Timely execution of reactivation important to maintain quality
- In Germany poor results has been achieved, possibly because the carbon should have been regenerated earlier
- Supercritical water:
 - When oil/energy prices go up this technology will be more financially viable because of high investment cost en lower energy consumption
 - gas water stream
- Electrochemical:
 - Only one known full scale plant (Arvia)
 - By-products are a concern
 - Many unknowns, what is in the liquid? what will it produce?
- Ozone:
 - High ozone dosage potentially oxidizes the GAC
 - How to distribute the ozone evenly through the GAC, fluidized bed seems needed
 - Only tried at lab-scale, difficult to predict results on full-scale
 - Necessary reactivation time unknown
 - How many bed volumes can be treated before reactivation is required
- Microwave:
 - Labscale, but technology is already 15 yr old
 - Very energy intensive, not economical feasible yet

2. CONCEPT DEVELOPMENT

GAC combined with N and P removal is summarized as '1-step' in the following concepts.

2.1.1. Sand → ozone → 1-step

A sand filter followed by ozonation and 1-step filter. The sand filter removes TSS and COD related to the TSS. Thus lowering the amount of ozone required for ozonation and possibly improving the efficiency of micro pollutant removal by ozonation. Drawback is the cost of the extra filter step.

2.1.2. 1-step → ozone → GAC/Sand-filter

Two carbon filters with ozone in between, one pre-treatment filter for suspended solids and nutrient removal and one post treatment biological filter for polishing and degradation product removal. GAC-reactivation if required is to be achieved externally. Improved ozonation efficiency and GAC-lifetime of the second GAC-filter would be the main drivers for this concept. Drawback is the high cost of the double filter step. In Germany direct effluent ozonation followed by filtration is applied.

2.1.3. 1-step → ozone → wetland/soil filter

The 1-step filter followed by ozone and a wetland is similar to the previous option, except in this case the second filter is replaced by a wetland or soil filter. Benefit of the concept is that the second step is a low tech solution with a negligible energy use. Drawback however is the required scale of such this type of post treatment and the absence of process control opportunities.

2.1.4. Alternating combined GAC/ozone and 1-STEP in series

In this concept the effluent passes through a GAC/ozone filter and a 1-STEP filter consecutively. If the second filter needs reactivation the sequence changes. The GAC/ozone combination works as a catalyst producing OH-radicals and a separate ozone contactor would not be required; also GAC-replacement is potentially eliminated. A drawback is the cost of double filters of the system and that the complete system should be ozone resistant. Also, the concept must be considered experimental because factors as biomass regrowth, reactivation rate, relate alternation frequency and the effect of ozone on GAC is not known. Possibly ozone can change the surface of GAC, making it hydrophilic and reducing the absorption to the GAC.

2.1.5. Ozone → 1-STEP and on-site reactivation / in-situ reactivation

This concept is the most basic configuration of ozone followed by 1-STEP. Furthermore the concept is focussing on new concepts for reactivation. Both concepts will be based on reactivation with ozone, which implies the possibilities of this concept should be researched. External on-site reactivation would use one separate reactivation tank where the GAC of different filters would be regenerated. In-situ reactivation would need redundant ozone proof filters which can be reactivated consecutively by purging ozone through the filter bed. Drawback of this concept is the potentially higher ozone consumption because the water is not pre-treated.

2.1.6. 1-STEP → electrochemical oxidation / reactivation

- this concept was not discussed during the workshop - electrochemical oxidation / reactivation of GAC is commercialized by 'Arvia'. By forcing an electrical current through GAC, micro pollutants are claimed to be catalytically oxidized to CO₂ from the GAC, an in depth technical review of this technology cannot yet be obtained and estimated energy consumption is high. It is unlikely that combining 'Arvia' with biological denitrification is a technically feasible alternative, although this combination would mean the 'ultimate' 1-step treatment.

3. WRAP UP

During the workshop many concepts were identified which are grouped in the 6 concepts that are described in the previous chapter. Some concepts can be considered highly experimental or economically unviable up front and a reasonable high level selection must be made for the next stage of this feasibility study. Because practical experience in Germany demonstrates that direct ozonation of WWTP effluent is effective and feasible and concepts with double effluent filtration steps are economically less viable, the concepts with double effluent filtration steps will be grouped to only 1 concept as a cost-reference. Also the 'ultimate' combination of 'Arvia' combined with 1-step is further developed as a cost reference. All concepts for the next phase are:

- Ozone → 1-step (with off site thermal reactivation of GAC)
- Sand filter → Ozone → 1-STEP (with off site thermal reactivation of GAC)
- Ozone → 1-step (with on site ozone reactivation of GAC)
- Ozone → 1-step (with in situ ozone reactivation of GAC)
- 1-step + 'Arvia' combined

The technical and economical feasibility of GAC reactivation by ozone is a major unknown in these concepts. In general there major research questions were identified:

- **GAC reactivation by ozone**
 - Limited information available in literature, lab tests are required to fill knowledge gaps
- **Effects of ozone on GAC lifetime**
 - GAC lifetime is the most important TCO aspect
- **Effect of ozone on nutrient removal**
 - Positive effects of ozone on availability of nutrients for removal in 1-step?

BIJLAGE 5

ONTWERP EN KOSTENBEREKENING CONCEPTEN

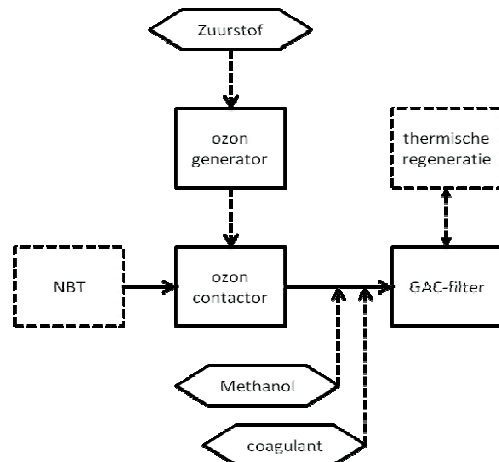
Concept 1: O3GAC (extern thermische regeneratiethermische reactivatie)

Project:	Nabehandeling met ozondosering en GAC-filtratie
onderwerp	Concept 1: Ozon + GAC - extern thermische regeneratie
opdrachtgever	STOWA
Project code:	STO196-1
Project manager	Arjan Dekker
Document revisie:	IDC04
ontworpen door:	Marina Sanders
goedgekeurd door:	Arjen van Nieuwenhuijzen
verbeterd en aangepast	Marina Sanders
	Date
	Date
	Date
	18-apr
	07-apr

Projectspecifieke waarden

Natuurkundige waarden

Berekende waarden



<u>Parameter</u>	<u>Eenheid</u>	<u>waarde</u>			<u>opmerking</u>
<u>Uitgangspunten</u>					
<u>Technisch</u>	i.e.	20.000	100.000	300.000	
<u>rekenwaarde RWZI effluent</u>					
representatief volume water	m³/u	180	900	2.700	STOWA 2015-27
spoelwaterverbruik	%	10%	10%	10%	STOWA 2015-27
volume water inclusief spoelwater	m³/u	198	990	2.970	
gemiddelde aanvoertijd per dag	uur/dag	16	16	16	
gemiddelde dagdebiet	m³/dag	3.168	15.840	47.520	
gemiddeld Chemisch Zuurstof Verbruik	g CZV/m³	36,5	36,5	36,5	CBS statline 2013
Stikstofverbindingen als NOX-N	g N/m³	5,3	5,3	5,3	STOWA 2013-35
Fosforverbindingen als PO4-P	g P/m³	0,3	0,3	0,3	STOWA 2013-35
zuurstofgehalte in aanvoer GAC-filter	g O₂/m³	1,5	1,5	1,5	STOWA 2009-32
DOC concentratie in RWZI effluent	g DOC/m³	11,0	11,0	11,0	STOWA 2015-27
<u>ozonproductie</u>					
Verhouding zuurstof gas/vloeibaar	Nm³/l	1,0	1,0	1,0	opgave budget prijzen lin
opslag bij nominaal gebruik	dagen	30	30	30	STOWA 2015-27
zuurstofverbruik	Nm³/ kg ozon	7,0	7,0	7,0	opgave budget prijzen lin
rendement omzetting		90%	90%	90%	
verlies afgas		90%	90%	90%	
energieverbruik	kWh/ kg ozon	10	10	10	STOWA 2015-27
energieverbruik koeling	kWh/ kg ozon	2	2	2	Opgave leveranciers
dichtheid zuurstof	kg/Nm³	1,43	1,43	1,43	http://www.uigi.com/o2_c
<u>ozondosering</u>					
doseersysteem		beluchtingsbak		zowel deelstroom als bel	
contacttijd (nominaal)	minuten	25	25	25	STOWA 2015-27
ozondosering (nominaal)	g O₃/g DOC	0,7	0,7	0,7	STOWA 2015-27
<u>GAC-filtratie (1-STEP)</u>					
hydraulische belasting	m³/m².u	10	10	10	STOWA 2013-35
filterbedhoogte	m	2,5	2,5	2,5	STOWA 2015-27; Zhu et
EBCT (leegbed contacttijd)	minuten	15	15	15	Zhu et al 2015; STOWA
bovenwaterstand	m	1,5	1,5	1,5	
standtijd	maanden	12	12	12	STOWA 2015-27; WWTI
<u>C-bron dosering</u>					
CZV methanol	g CZV/g methanol	1,5	1,5	1,5	productspecificatie metha
dichtheid methanol	kg/m³	800	800	800	productspecificatie metha
methanoldosering ratio stikstof	g CZV/g NOx-N	4,2	4,2	4,2	STOWA 2013-35
methanoldosering ratio stikstof	g methanol/g NOx-N	2,8	2,8	2,8	
methanoldosering ratio zuurstof	g CZV/g O₂	0,8	0,8	0,8	STOWA 2013-35
methanoldosering ratio zuurstof	g methanol/g O₂	0,5	0,5	0,5	
opslag bij nominaal gebruik	dagen	30	30	30	Conform ontwerp 1-STEI

Concept 1: O3GAC (extern thermische regeneratiethermische reactivatie)

coagulant dosering

aluminium concentratie PAX-214	mol Al/l	3,5	3,5	3,5	SCADA Data monitoring
dichtheid PAX-214	kg / m ³	1.300	1.300	1.300	productspecificatie PAX-;
molaire massa P	g/mol	31	31	31	
PAX-214 dosering ratio	mol Al/mol PO ₄ -P	3,1	3,1	3,1	STOWA 2013-35
opslag bij nominaal gebruik	dagen	30	30	30	Conform ontwerp 1-STEF

pompen

debiet per pomp	m ³ /u	150	400	400	Conform ontwerp 1-STEF
aantal	#	2,0	3,0	8,0	STOWA 2015-27
opvoerhoogte	m	6,0	6,0	6,0	STOWA 2015-27
aantal keer opvoeren	#	1,0	1,0	1,0	STOWA 2015-27
rendement	%	70%	70%	70%	ontwerpuitsgangspunt o.b

Ontwerp

	Eenheid	waarde	waarde	waarde	opmerking
<u>ozondosering</u>					
nominale ozondosering	g/m ³	7,7	7,7	7,7	
capaciteit ozongenerator	kg/u	1,4	6,9	20,8	berekend op basis van ui
gekozen generator	kg/u	1,8	7,0	23,2	gemiddelde van budgetpi
benodigt aantal generatoren	#	1,0	1,0	1,0	
volume ozoncontactor	m ³	83	413	1.238	berekend op basis van ui
benodigd liquid oxygen	m ³ /d	0,2	1,0	2,9	
zuurstofopslag berekend	m ³	5,7	28,7	86,2	
tankvolume gekozen	m ³	11	30	49	opgave budget prijzen lin
aantal tanks gekozen	aantal	1,0	1,0	1,0	opgave budget prijzen lin
aantal dagen opslag berekend	dagen	57	31	17	
gebouw	m ²	30	50	100	Schatting op basis van di

chemicaliën dosering

stikstofvracht	kg NO _x -N/u	1,0	4,8	14,3	berekend op basis van ui
te verwijderen zuurstof	kg O ₂ /u	0,3	1,5	4,5	ozondosering verhoogd t
benodigd methanol	kg/u	2,8	14,1	42,4	
benodigd methanol	kg/d	45	226	679	
benodigd methanol	m ³ /d	0,06	0,28	0,85	
methanol opslag berekend	m ³	2	8	25	
tankvolume gekozen	m ³	5	10	30	systeemkeuze op basis v
aantal tanks gekozen	aantal	1	1	1	systeemkeuze op basis v
aantal dagen opslag berekend	dagen	88	35	35	
fosfaatvracht	kg PO ₄ -P/u	0,05	0,27	0,81	
benodigd coagulant	m ³ /d	0,02	0,12	0,37	
coagulant opslag berekend	m ³	1	4	11	
tankvolume gekozen	m ³	1	10	10	systeemkeuze op basis v
aantal tanks gekozen	aantal	-	1	1	Het 20.000 i.e. scenario t
aantal dagen opslag berekend	dagen	-	81	27	

GAC-filter

totaal filteroppervlak	m ²	20	100	300	bij schaalgrootte 20.000 i
aantal filters	#	1,0	4,0	10,0	systeemkeuze op basis v
oppervlak per filter	m ²	20	25	30	
filterbedvolume per filter	m ³	50	63	75	
totaal filterbedvolume	m ³	50	250	750	
totaalvolume per filter	m ³	80	100	120	
totaalvolume	m ³	80	400	1.200	

energieverbruik

pompen	kWh/d	74	370	1.110	
ozongenerator	kWh/d	222	1.109	3.326	
extra koeling ozongenerator	kWh/d	44	222	665	
overig GAC	kWh/d	127	634	1.901	40

Kostenraming

		0,03	0,03	0,03	
		0,08	0,08	0,08	
<u>technische levensduur:</u>					
civil	jaar	30			STOWA 2015-27
mechanisch/elektrisch	jaar	15			STOWA 2015-27
procesautomatisch	jaar	5			STOWA 2015-27
onvoorzien	jaar	15			STOWA 2015-27
rente	%	4%			STOWA 2015-27
afschrijving		annuïtair			STOWA 2015-27
onvolledigheid	%	30%			5% lager dan in referentie
<u>opslagfactor voor realisatie en projectkosten</u>					
advies en ontwerp	%	65%			STOWA 2015-27
verzekeringen, vergunningen, bouwrentes	%	12%			STOWA 2015-27
		15%			STOWA 2015-27

Concept 1: O3GAC (extern thermische regeneratiethermische reactivatie)

projectmanagement, directievoering en toezicht	%	8%				STOWA 2015-27		
tijdelijke installatie tijdens de bouw en opstart	%	5%				STOWA 2015-27		
opleiding personeel	%	2%				STOWA 2015-27		
communicatie	%	2%				STOWA 2015-27		
BTW	%	21%				STOWA 2015-27		
<u>onderhoud</u>								
civil	%	0,5%				STOWA 2015-27		
mechanisch, elektrisch en PA	%	3,0%				STOWA 2015-27		
<u>personeelskosten</u>								
20.000 i.e.	EUR	€	25.000			aanname overgenomen t		
100.000 i.e.	EUR	€	50.000			aanname overgenomen t		
300.000 i.e.	EUR	€	50.000			BC-overleg 12-1-2016; a		
<u>operationele kosten, inclusief 21% BTW</u>								
nieuw GAC	EUR/m³	€	1.200			STOWA 2015-27		
elektriciteit	EUR/kWh	€	0,10			STOWA 2015-27		
pure zuurstof (vloeibaar)	EUR/ton	€	200,00	€	200,00	STOWA 2015-27 NB: Lir		
coagulant (PAX 214)	EUR/ton	€	510,00	€	258,94	Het 20.000 i.e. scenario t		
polymeer (40% actief)	EUR/l	€	3,00			STOWA 2015-27		
methanol (100%)	EUR/ton	€	356,95			STOWA 2009-34		
thermische regeneratie kool inclusief transport	EUR/m³	€	500,00			STOWA 2015-27		
huurkosten zuurstofopslag	EUR/jaar	€	544,50	€	847,00	opgave budget prijzen lin		
<u>bouwkosten</u>								
Capaciteit ozongenerator	kgO₃/h		1,8	7,0	23,2			
ozongenerator	EUR/stuk	€	102.000	€	350.000	gemiddelde van budgetpi		
	wtb EUR/stuk	€	71.400	€	245.000	70%		
	et EUR/stuk	€	10.200	€	35.000	10%		
	pa EUR/stuk	€	20.400	€	70.000	20%		
ozoncontactor	EUR/m³	€	625	€	563	inc. Schotten, en ozonbe		
	civil EUR/m³	€	375	€	338	60%		
	wtb EUR/m³	€	156	€	141	25%		
	et EUR/m³	€	63	€	56	10%		
	pa EUR/m³	€	31	€	28	5%		
gebouw								
	civil EUR/m²	€	590	€	590	DACE-Prijzenboekje Edit		
filterinstallatie GAC	EUR/m²	€	23.000	€	16.000			
	civil EUR/m²	€	16.100	€	11.200	70%		
	wtb EUR/m²	€	4.600	€	3.200	20%		
	et EUR/m²	€	2.300	€	1.600	10%		
methanol opslag en dosering		€	120.500	€	121.500			
	civil 30 m3	-	-	€	45.200			
	wtb 30 m3	-	-	€	122.888			
	et 30 m3	-	-		61.444	50% van wtb=et		
	civil 5/10 m3	€	20.700	€	22.400	halve volume is /1,8		
	wtb 5/10 m3	€	71.600	€	68.600	halve volume is /1,6		
	et 5/10 m3	€	28.200	€	30.500	50% van wtb=et		
coagulant opslag en dosering		-	€	42.600	€	42.600		
	civil 10 m3	-	€	8.900	€	8.900	halve volume is /1,8	
	wtb 10 m3	-	€	23.300	€	23.300	halve volume is /1,6	
	et 10 m3	-	€	10.400	€	10.400	50% van wtb=et	
zuurstof opslag en dosering								
	civil	€	5.000	€	10.000	kosten voor een funderin		
	wtb EUR	€	4.840	€	7.260	plaatsingskosten, gereke		
BOUW- EN INVESTERINGSKOSTEN								
<u>civil</u>								
leidingwerk		€	71.190	€	142.380	op basis van 1-step horsl		
GAC-filter		€	322.000	€	1.120.000	€	3.360.000	
gemaal gebouw		€	51.500	€	77.200	€	205.800	op basis van 1-step horsl
ozoncontactor		€	30.900	€	139.200	€	371.300	
gebouw ozongenerator		€	17.700	€	29.500	€	59.000	
zuurstofopslag		€	5.000	€	10.000	€	15.000	
methanol opslag		€	20.700	€	22.400	€	45.200	
coagulant opslag		-	€	8.900	€	8.900		
subtotaal bouwkosten		€	519.000	€	1.549.600	€	4.278.800	
subtotaal stichtingskosten		€	856.000	€	2.557.000	€	7.060.000	
<u>werktuigbouwkundig</u>								
GAC-filter		€	92.000	€	320.000	€	960.000	
gemaal pompen		€	103.960	€	155.940	€	415.840	op basis van 1-step horsl

Concept 1: O3GAC (extern thermische regeneratiethermische reactivatie)

ozongenerator	€	71.400	€	245.000	€	686.000	
ozoncontactor	€	12.891	€	58.008	€	154.688	
zuurstof opslag en dosering	€	4.840	€	7.260	€	10.890	
methanol opslag en dosering	€	71.600	€	68.600	€	122.888	
coagulant opslag en dosering	-		€	10.400	€	10.400	
subtotaal bouwkosten	€	356.700	€	865.200	€	2.360.700	
subtotaal stichtingskosten	€	589.000	€	1.428.000	€	3.895.000	
<u>electrotechnisch</u>							
GAC-filter	€	46.000	€	160.000	€	480.000	
ozongenerator	€	10.200	€	35.000	€	98.000	
ozoncontactor	€	5.156	€	23.203	€	61.875	
methanol opslag en dosering	€	28.200	€	30.500	€	61.444	
coagulant opslag en dosering	-		€	10.400	€	10.400	
aardings-, potentiaal vereffenings-, bliksemafleider- en overspanningsbeveiliging	€	19.775	€	39.550	€	59.325	prijs geschaald aan 1-ste
energievoorziening LS	€	2.825	€	5.650	€	8.475	prijs geschaald aan 1-ste
schakel en verdeelinrichtingen	€	70.625	€	141.250	€	211.875	prijs geschaald aan 1-ste
kabeldraagsysteem en graafwerk	€	8.475	€	16.950	€	25.425	prijs geschaald aan 1-ste
verlichting en overige installaties	€	19.775	€	39.550	€	59.325	prijs geschaald aan 1-ste
subtotaal bouwkosten	€	211.000	€	502.100	€	1.076.100	
subtotaal stichtingskosten	€	348.000	€	828.000	€	1.776.000	
<u>procesautomatisering</u>							
ozongenerator	€	20.400	€	70.000	€	196.000	
ozoncontactor	€	-	€	11.602	€	30.938	
processinstallatie "verbruikers"	€	50.850	€	101.700	€	152.550	prijs geschaald aan 1-ste
processinstallatie "metingen"	€	81.925	€	163.850	€	245.775	prijs geschaald aan 1-ste
automatiseringsinstallatie	€	73.450	€	146.900	€	220.350	prijs geschaald aan 1-ste
subtotaal bouwkosten	€	226.600	€	494.100	€	845.600	
subtotaal stichtingskosten	€	374.000	€	815.000	€	1.395.000	
<u>onvolledigheid</u>							
civil	€	155.700	€	464.900	€	1.283.700	
werktuigbouwkundig	€	107.000	€	259.600	€	708.200	
ET	€	63.300	€	150.600	€	322.800	
PA	€	68.000	€	148.200	€	253.700	
subtotaal bouwkosten	€	394.000	€	1.023.300	€	2.568.400	
civil	€	256.800	€	766.900	€	2.118.100	
werktuigbouwkundig	€	176.700	€	428.300	€	1.168.600	
ET	€	104.400	€	248.300	€	532.800	
PA	€	112.200	€	244.400	€	418.500	
subtotaal stichtingskosten	€	650.000	€	1.688.000	€	4.238.000	
totaal bouwkosten	€	1.707.000	€	4.434.000	€	11.130.000	
totaal stichtingskosten	€	2.817.000	€	7.316.000	€	18.364.000	
CAPEX							
Jaarlasten civil	EUR/jaar	€	49.500	€	147.900	€	408.300
Jaarlasten werktuigbouwkundig	EUR/jaar	€	53.000	€	128.400	€	350.300
Jaarlasten ET	EUR/jaar	€	31.300	€	74.500	€	159.700
Jaarlasten PA	EUR/jaar	€	84.000	€	183.100	€	313.400
Jaarlasten onvolledigheid	EUR/jaar	€	58.500	€	151.800	€	381.200
<u>CAPEX inclusief onvolledigheid</u>							
Jaarlasten civil	EUR/jaar	€	62.800	€	190.000	€	534.700
Jaarlasten werktuigbouwkundig	EUR/jaar	€	67.200	€	164.900	€	458.700
Jaarlasten ET	EUR/jaar	€	39.700	€	95.700	€	209.100
Jaarlasten PA	EUR/jaar	€	106.600	€	235.200	€	410.400
totaal CAPEX	EUR/jaar		276.300		685.700		1.612.900
OPEX							
<u>onderhoudskosten (als percentage van totale bouwkosten)</u>							
civil	EUR/jaar	€	8.500	€	22.200	€	55.700
werktuigbouwkundig, electrotechniek en procesaut	EUR/jaar	€	51.200	€	133.000	€	333.900
energie	EUR/jaar	€	17.000	€	85.200	€	255.600
methanol	EUR/jaar	€	5.900	€	29.500	€	88.500
PAX-214	EUR/jaar	€	6.000	€	15.200	€	45.500
vloeibare zuurstof	EUR/jaar	€	20.000	€	100.000	€	300.100
huurkosten zuurstofopslag	EUR/jaar	€	6.500	€	10.200	€	27.600
vers GAC	EUR/jaar	€	11.000	€	55.000	€	165.000
geregeneerd GAC	EUR/jaar	€	25.000	€	125.000	€	375.000
							eenmalig vers GAC bij in inclusief kosten transport
personeel	EUR/jaar	€	25.000	€	50.000	€	50.000
totaal OPEX	EUR/jaar	€	176.100	€	625.300	€	1.696.900

Concept 1: O3GAC (extern thermische regeneratiethermische reactivatie)

totaal jaarlasten (CAPEX+OPEX)	EUR/jaar	€	452.400	€	1.311.000	€	3.309.800
kosten per m³	EUR/m³	€	0,43	€	0,25	€	0,21
kosten per i.e.	EUR/i.e.	€	22,6	€	13,1	€	11,0

omrekenfactoren

1 uur	minuten	60	60	60
1 uur	seconden	3.600	3.600	3.600
zwaartekrachtversnelling	m/s ²	9,81	9,81	9,81
1 kWh	joule	3600000	3600000	3600000 sec/h

Concept 2: Zandfilter + O3GAC (extern thermische reactivatie)

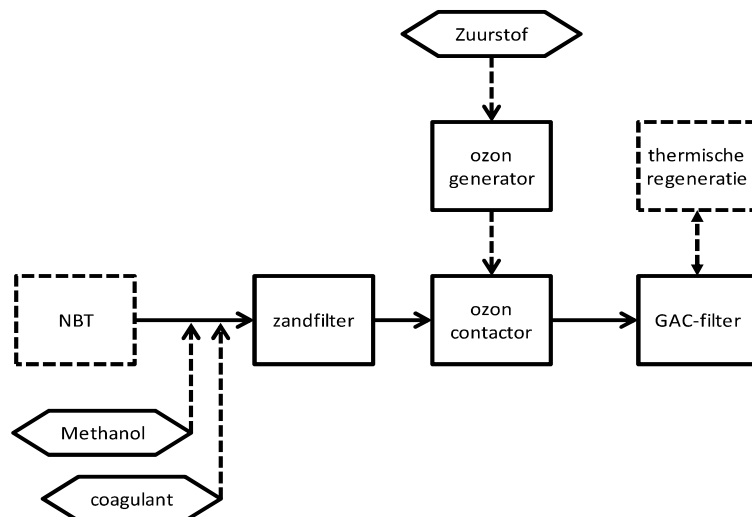
Project:	Nabehandeling met ozondosering en GAC-filtratie	
onderwerp	Concept 2: Ozon + zandfilter + GAC - extern thermische reactivatie	
opdrachtgever	STOWA	
Project code:	STO196-1	
Project manager	Arjan Dekker	
Document revisie:	IDC05	
ontworpen door:	Jeroen Mulder	Date
goedgekeurd door:	Arjen van Nieuwenhuijze	Date
verbeterd en aangepast	Marina Sanders	Date

Projectspecifieke waarden

Natuurkundige waarden

Berekende waarden

07-apr



Parameter

Eenheid

waarde

opmerking

Uitgangspunten

<u>Technisch</u>	<u>i.e.</u>	<u>20.000</u>	<u>100.000</u>	<u>300.000</u>	
<u>rekenwaarde RWZI effluent</u>					
representatief volume water	m ³ /u	180	900	2700	STOWA 2015-27
spoelwaterverbruik	%	15%	15%	15%	STOWA 2015-27
volume water inclusief spoelwater	m ³ /u	207	1.035	3.105	
gemiddelde aanvoertijd per dag	uur/dag	16	16	16	voor omrekening naar d
gemiddelde dagdebiet	m ³ /dag	3.312	16.560	49.680	
gemiddeld Chemisch Zuurstof Verbruik	g CZV/m ³	36,5	36,5	36,5	CBS statline 2013
Stikstofverbindingen als NOX-N	g N/m ³	5,3	5,3	5,3	STOWA 2013-35
Fosforverbindingen als PO4-P	g P/m ³	0,3	0,3	0,3	STOWA 2013-35
zuurstofgehalte in aanvoer GAC-filter	g O ₂ /m ³	1,5	1,5	1,5	STOWA 2009-32
DOC concentratie in RWZI effluent	g DOC/m ³	11,0	11,0	11,0	STOWA 2015-27
<u>ozonproductie</u>					
Verhouding zuurstof gas/vloeibaar	Nm ³ /l	1	1	1	opgave budget prijzen lir
opslag bij nominaal gebruik	dagen	30	30	30	
zuurstofverbruik	N m ³ / kg ozon	7,0	7,0	7,0	opgave budget prijzen lir
rendement omzetting		90%	90%	90%	
verlies afgas		90%	90%	90%	
energieverbruik	kWh/ kg ozon	10	10	10	STOWA 2015-27
energieverbruik koeling	kWh/ kg ozon	2	2	2	
dichtheid zuurstof	kg/m ³	1,43	1,43	1,43	http://www.uiqi.com/o2
<u>ozondosering</u>					
doseersysteem		beluchtingsbak			zowel deelstroom als be
contacttijd (nominaal)	minuten	25	25	25	STOWA 2015-27
ozondosering (nominaal)	g O ₃ /g DOC	0,7	0,7	0,7	STOWA 2015-27

zand-filter

Concept 2: Zandfilter + O3GAC (extern thermische reactivatie)

hydraulische belasting	m/u	10	10	10 ontwerpgegevens zandfi
filterbedhoogte	m	1,5	1,5	1,5
EBCT (leegbed contacttijd)	minuten	9	9	9
bovenwaterstand	m	1,5	1,5	1,5 STOWA 2013-35
verwijderingspercentage DOC	%	50%	50%	50% Deel wordt verwijderd als
verwijderingspercentage PO4-P	%	0%	0%	0% Het vermoeden bestaat

GAC-filtratie (1-STEP)

hydraulische belasting	m/u	10	10	10 STOWA 2013-35
filterbedhoogte	m	2,5	2,5	2,5 STOWA 2015-27; Zhu e
EBCT (leegbed contacttijd)	minuten	15	15	15 Zhu et al 2015; STOWA
bovenwaterstand	m	1,5	1,5	1,5
standtijd	maanden	24	24	24 STOWA 2015-27; WWT

C-bron dosering

CZV methanol	g CZV/g methanol	1,5	1,5	1,5 productspecificatie meth
dichtheid methanol	kg/m ³	800	800	800 productspecificatie meth
methanoldosering ratio stikstof	g CZV/g NO _x -N	4,2	4,2	4,2 STOWA 2013-35
methanoldosering ratio stikstof	g methanol/g NO _x -N	2,8	2,8	2,8
methanoldosering ratio zuurstof	g CZV/g O ₂	0,8	0,8	0,8 STOWA 2013-35
methanoldosering ratio zuurstof	g methanol/g O ₂	0,5	0,5	0,5
opslag bij nominaal gebruik	dagen	30	30	30 Conform ontwerp 1-STE

coagulant dosering

aluminium concentratie PAX-214	mol Al/l	3,5	3,5	3,5 SCADA Data monitoring
dichtheid PAX-214	kg / m ³	1.300	1.300	1.300 productspecificatie PAX-
molaire massa P	g/mol	31	31	31
PAX-214 dosering ratio	mol Al/mol PO4-P	3,1	3,1	3,1 STOWA 2013-35
opslag bij nominaal gebruik	dagen	30	30	30 Conform ontwerp 1-STE

pompen

debiet per pomp	m ³ /u	150	400	400 ref. HRM23-1 Effluent na
aantal	#	2	3	8 STOWA 2015-27
opvoerhoogte	m	9	9	9 STOWA 2015-27 + 3m v
aantal keer opvoeren	#	1	1	1
rendement	%	70%	70%	70% aannname o.b.v. praktijk

Ontwerp

Eenheid	waarde	opmerking
---------	--------	-----------

zand-filter

totaal filteroppervlak	m ²	20	100	310 bij schaalgrootte 20.000
aantal filters	#	1,0	4,0	10,0 systeemkeuze o.b.v. pra
oppervlak per filter	m ²	20	25	31
filterbedvolume per filter	m ³	30	40	50
totaal filterbedvolume	m ³	30	160	500
totaalvolume per filter	m ³	60	80	90
totaalvolume	m ³	60	320	900

ozondosering

nominale ozondosering	g/m ³	3,9	3,9	3,9
capaciteit ozongenerator	kg/u	0,7	3,5	10,4
gekozen generator	kg/u	1,8	3,5	11,6 gemiddelde van budgetp
benodigt aantal generatoren	#	1,0	1,0	1,0
volume ozoncontactor	m ³	86	431	1.294
benodigd liquid oxygen	m ³ /d	0,1	0,5	1,4
zuurstofopslag berekend	m ³	2,9	14,4	43,1
tankvolume gekozen	m ³	11	11	30 opgave budget prijzen lir
aantal tanks gekozen	aantal	1	1	1 opgave budget prijzen lir
aantal dagen opslag berekend	dagen	115	23	21
gebouw	m ²	30	40	50 schatting o.b.v. praktijk

chemicaliën dosering

Concept 2: Zandfilter + O3GAC (extern thermische reactivatie)

stikstofvracht	kg NO _x -N/u	1,0	4,8	14,3	
te verwijderen zuurstof	kg O ₂ /u	0,3	1,6	4,7	ozondosering verhoogt t
benodigd methanol	kg/u	2,8	14,2	42,6	
benodigd methanol	kg/d	45	227	681	
benodigd methanol	m ³ /d	0,06	0,28	0,85	
methanol opslag berekend	m ³	2	9	26	
tankvolume gekozen	m ³	5	10	30	systeemkeuze o.b.v. pra
aantal tanks gekozen	aantal	1	1	1	systeemkeuze o.b.v. pra
aantal dagen opslag berekend	dagen	88	35	35	
fosfaatvracht	kg PO ₄ -P/u	0,05	0,27	0,81	
benodigd coagulant	m ³ /d	0,02	0,12	0,37	
coagulant opslag berekend	m ³	1	4	11	
tankvolume gekozen	m ³	1	10	10	systeemkeuze o.b.v. pra
aantal tanks gekozen	aantal	-	1	1	20.000 i.e. scenario bev
aantal dagen opslag berekend	dagen	-	81	27	
<u>GAC-filter</u>					
totaal filteroppervlak	m ²	20	100	310	bij schaalgrootte 20.000
aantal filters	#	1,0	4,0	10,0	systeemkeuze o.b.v. pra
oppervlak per filter	m ²	20	25	31	
filterbedvolume per filter	m ³	50	63	78	
totaal filterbedvolume	m ³	50	250	775	
totaalvolume per filter	m ³	80	100	124	
totaalvolume	m ³	80	400	1,240	
<u>energieverbruik</u>					
pompen	kWh/d	116	580	1.741	
ozongenerator	kWh/d	111	554	1.663	
extra koeling ozongenerator	kWh/d	22	111	333	
overig GAC	kWh/d	132	662	1.987	40
<u>Kostenraming</u>					
<u>technische levensduur:</u>					
civil	jaar	30			STOWA 2015-27
mechanisch/elektrisch	jaar	15			STOWA 2015-27
procesautomatisch	jaar	5			STOWA 2015-27
onvoorzien	jaar	15			STOWA 2015-27
rente	%	4%			STOWA 2015-27
afschrijving		annuïtair			STOWA 2015-27
onvolledigheid	%	30%			5% lager dan in referent
<u>opslagfactor voor realisatie en projectkosten</u>					
advies en ontwerp	%	65%			STOWA 2015-27
verzekeringen, vergunningen, bouwrentes	%	12%			STOWA 2015-27
projectmanagement, directievoering en toezicht	%	15%			STOWA 2015-27
tijdelijke installatie tijdens de bouw en opstart	%	8%			STOWA 2015-27
opleiding personeel	%	5%			STOWA 2015-27
communicatie	%	2%			STOWA 2015-27
BTW	%	2%			STOWA 2015-27
<u>onderhoud</u>					
civil	%	0,5%			berekend over bouwkost
mechanisch, elektrisch en PA	%	3%			berekend over bouwkost
<u>personeelskosten</u>					
20.000 i.e.	EUR	€	25.000		aanname overgenomen
100.000 i.e.	EUR	€	50.000		aanname overgenomen
300.000 i.e.	EUR	€	50.000		BC-overleg 12-1-2016; i

Concept 2: Zandfilter + O3GAC (extern thermische reactivatie)

operationele kosten, inclusief 21% BTW

nieuw GAC	EUR/m3	€	1.200				STOWA 2015-27
elektriciteit	EUR/kWh	€	0,1				STOWA 2015-27
pure zuurstof (vloeibaar)	EUR/ton	€	200	€	200	€	200 STOWA 2015-27
coagulant (PAX 214)	EUR/ton	€	510	€	259	€	259 STOWA 2015-27
polymeer (40% actief)	EUR/l	€	3,0				STOWA 2015-27
methanol (100%)	EUR/ton	€	357				STOWA 2009-34
thermische regeneratie kool inclusief transport	EUR/m3	€	500				STOWA 2015-27
huurkosten zuurstofopslag	EUR/jaar	€	545	€	847	€	2.299 opgave budget prijzen lir

bouwkosten

capaciteit generator	kgO ₃ /h		1,8		3,5		11,6	
ozongenerator	EUR/stuk	€	102.000	€	165.000	€	410.000	gemiddelde van budgetp
	wtb EUR/stuk	€	71.400	€	115.500	€	287.000	70%
	et EUR/stuk	€	10.200	€	16.500	€	41.000	10%
	pa EUR/stuk	€	20.400	€	33.000	€	82.000	20%
ozoncontactor	EUR/m ³	€	625	€	563	€	500	inc. Schotten, en ozonbe
	civiel EUR/m ³	€	375	€	338	€	300	60%
	wtb EUR/m ³	€	156	€	141	€	125	25%
	et EUR/m ³	€	63	€	56	€	50	10%
	pa EUR/m ³	€	31	€	28	€	25	5%
gebouw								
	civiel EUR/m ²	€	590	€	590	€	590	DACE-Prijzenboekje Edi
filterinstallatie GAC	EUR/m ²	€	23.000	€	16.000	€	16.000	
	civiel EUR/m ²	€	16.100	€	11.200	€	11.200	70%
	wtb EUR/m ²	€	4.600	€	3.200	€	3.200	20%
	et EUR/m ²	€	2.300	€	1.600	€	1.600	10%
filterinstallatie zand	EUR/m ²	€	20.000	€	13.000	€	13.000	
	civiel EUR/m ²	€	14.000	€	9.100	€	9.100	70%
	wtb EUR/m ²	€	4.000	€	2.600	€	2.600	20%
	et EUR/m ²	€	2.000	€	1.300	€	1.300	10%
methanol opslag en dosering		€	112.400	€	121.500	€	229.531	
	civiel 30 m ³	-	-	-	€	45.200		
	wtb 30 m ³	-	-	-	€	122.888		
	et 30 m ³	-	-	-	€	61.444	50% van wtb=et	
	civiel 5/10 m ³	€	20.700	€	22.400	-		halve volume is /1,8
	wtb 5/10 m ³	€	63.500	€	68.600	-		halve volume is /1,6
	et 5/10 m ³	€	28.200	€	30.500	-		50% van wtb=et
coagulant opslag en dosering		-	-	€	42.600	€	42.600	
	civiel 10 m ³	-	-	€	8.900	€	8.900	halve volume is /1,8
	wtb 10 m ³	-	-	€	23.300	€	23.300	halve volume is /1,6
	et 10 m ³	-	-	€	10.400	€	10.400	50% van wtb=et
zuurstof opslag en dosering								
	civiel	€	5.000	€	5.000	€	10.000	grove kostenschatting fu
	wtb EUR	€	4.840	€	4.840	€	7.260	opgave budget prijzen lir

BOUW- EN INVESTERINGSKOSTEN

<u>civiel</u>							
leidingwerk	€	71.190	€	142.380	€	213.570	op basis van 1-step hors
GAC-filter	€	322.000	€	1.120.000	€	3.472.000	
zand-filter	€	280.000	€	910.000	€	2.821.000	
gemaal gebouw	€	51.458	€	77.188	€	205.834	op basis van 1-step hors
ozoncontactor	€	32.344	€	145.547	€	388.125	
gebouw ozongenerator	€	17.700	€	23.600	€	29.500	
zuurstofopslag	€	5.000	€	5.000	€	10.000	
methanol opslag	€	20.700	€	22.400	€	45.200	

Concept 2: Zandfilter + O3GAC (extern thermische reactivatie)

coagulant opslag	-	€	8.900	€	8.900	
subtotaal bouwkosten	€	800.400	€	2.455.000	€	7.194.100
subtotaal stichtingskosten	€	1.321.000	€	4.051.000	€	11.870.000

werktuigbouwkundig

GAC-filter	€	92.000	€	320.000	€	992.000	
zand-filter	€	80.000	€	260.000	€	806.000	
gemaal pompen	€	103.960	€	155.940	€	415.840	op basis van 1-step hors
ozongenerator	€	71.400	€	115.500	€	287.000	
ozoncontactor	€	13.477	€	60.645	€	161.719	
zuurstof opslag en dosering	€	4.840	€	4.840	€	7.260	
methanol opslag en dosering	€	63.500	€	68.600	€	122.888	
coagulant opslag en dosering	-		€	10.400	€	10.400	
subtotaal bouwkosten	€	429.200	€	995.900	€	2.803.100	
subtotaal stichtingskosten	€	708.000	€	1.643.000	€	4.625.000	

electrotechnisch

GAC-filter	€	46.000	€	160.000	€	496.000	
zand-filter	€	40.000	€	130.000	€	403.000	
ozongenerator	€	10.200	€	16.500	€	41.000	
ozoncontactor	€	5.391	€	24.258	€	64.688	
methanol opslag en dosering	€	28.200	€	30.500	€	61.444	
coagulant opslag en dosering	-		€	10.400	€	10.400	
aardings-, potentiaal vereffening-, bliksemafleider- en overspanningsbeveil	€	19.775	€	39.550	€	59.325	prijs geschaald aan 1-st
energievoorziening LS	€	2.825	€	5.650	€	8.475	prijs geschaald aan 1-st
schakel en verdeelinrichtingen	€	70.625	€	141.250	€	211.875	prijs geschaald aan 1-st
kabeldraagsysteem en graafwerk	€	8.475	€	16.950	€	25.425	prijs geschaald aan 1-st
verlichting en overige installaties	€	19.775	€	39.550	€	59.325	prijs geschaald aan 1-st
subtotaal bouwkosten	€	251.300	€	614.600	€	1.441.000	
subtotaal stichtingskosten	€	415.000	€	1.014.000	€	2.378.000	

procesautomatisering

ozongenerator	€	20.400	€	33.000	€	82.000	
ozoncontactor	€	2.695	€	12.129	€	32.344	
processinstallatie "verbruikers"	€	50.850	€	101.700	€	152.550	prijs geschaald aan 1-st
processinstallatie "metingen"	€	81.925	€	163.850	€	245.775	prijs geschaald aan 1-st
automatiseringsinstallatie	€	73.450	€	146.900	€	220.350	prijs geschaald aan 1-st
subtotaal bouwkosten	€	229.300	€	457.600	€	733.000	
subtotaal stichtingskosten	€	378.000	€	755.000	€	1.209.000	

onvolledigheid

civiel	€	240.100	€	736.500	€	2.158.300	
werktuigbouwkunde	€	128.800	€	298.800	€	840.900	
ET	€	75.400	€	184.400	€	432.300	
PA	€	68.800	€	137.300	€	219.900	
subtotaal bouwkosten	€	513.100	€	1.356.900	€	3.651.400	
civiel	€	396.500	€	1.215.400	€	3.561.200	
werktuigbouwkunde	€	212.500	€	492.900	€	1.387.600	
ET	€	124.600	€	304.200	€	713.400	
PA	€	113.500	€	226.500	€	362.700	
subtotaal stichtingskosten	€	847.000	€	2.239.000	€	6.025.000	

totaal bouwkosten	€	2.223.300	€	5.880.000	€	15.822.600
totaal stichtingskosten	€	3.669.000	€	9.702.000	€	26.107.000

CAPEX

Jaarlasten civiel	EUR/jaar	€	76.400	€	234.300	€	686.400
Jaarlasten werktuigbouwkundig	EUR/jaar	€	63.700	€	147.800	€	416.000
Jaarlasten ET	EUR/jaar	€	37.300	€	91.200	€	213.900
Jaarlasten PA	EUR/jaar	€	84.900	€	169.600	€	271.600
Jaarlasten onvolledigheid	EUR/jaar	€	76.200	€	201.400	€	541.900

Concept 2: Zandfilter + O3GAC (extern thermische reactivatie)

CAPEX inclusief onvolledigheid

Jaarlasten civiel	EUR/jaar	€	98.600	€	307.700	€	920.600
Jaarlasten werktuigbouwkundig	EUR/jaar	€	82.200	€	194.100	€	558.000
Jaarlasten ET	EUR/jaar	€	48.100	€	119.800	€	286.900
Jaarlasten PA	EUR/jaar	€	109.600	€	222.700	€	364.300

totaal CAPE	EUR/jaar	€	338.500	€	844.300	€	2.129.800
--------------------	-----------------	----------	----------------	----------	----------------	----------	------------------

OPEX

onderhoudskosten

civil	EUR/jaar	€	11.100	€	29.400	€	79.100	in referentie staat niet a
werktuigbouwkundig, electrotechniek en procesaut	EUR/jaar	€	66.700	€	176.400	€	474.700	in referentie staat niet a

energie	EUR/jaar	€	13.900	€	69.600	€	208.900	
methanol	EUR/jaar	€	5.900	€	29.600	€	88.700	
PAX-214	EUR/jaar	€	6.000	€	15.200	€	45.500	
vloeibare zuurstof	EUR/jaar	€	10.000	€	50.000	€	150.000	
huurkosten zuurstofopslag	EUR/jaar	€	6.500	€	10.200	€	27.600	opgave budget prijzen lir
vers GAC	EUR/jaar	€	11.000	€	55.000	€	170.500	eenmalig vers GAC bij ir
geregeneerd GAC	EUR/jaar	€	12.500	€	62.500	€	193.800	inclusief kosten transpor

personeel	EUR/jaar	€	25.000	€	50.000	€	50.000
-----------	----------	---	--------	---	--------	---	--------

totaal OPEX	EUR/jaar	€	168.600	€	547.900	€	1.488.800
--------------------	-----------------	----------	----------------	----------	----------------	----------	------------------

totaal jaarlasten (CAPEX+OPEX)	EUR/jaar	€	507.100	€	1.392.200	€	3.618.600
---------------------------------------	-----------------	----------	----------------	----------	------------------	----------	------------------

kosten per m³	EUR/m³	€	0,48	€	0,26	€	0,23
kosten per i.e.	EUR/i.e.	€	25,4	€	13,9	€	12,1

omrekenfactoren

1 uur	minuten	60	60	60
1 uur	seconden	3.600	3.600	3.600
zwaartekrachtversnelling	m/s ²	9,81	9,81	9,81
1 kWh	joule	3600000	3600000	3600000 sec/h

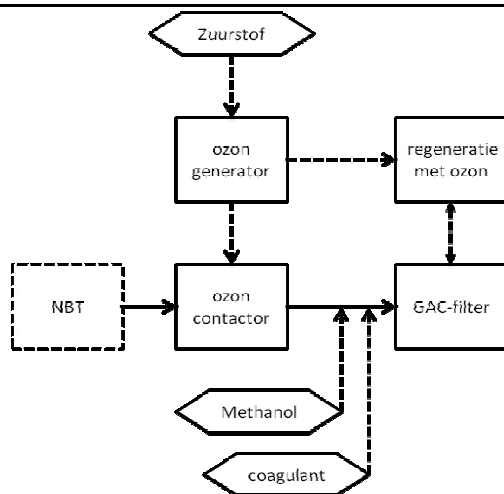
Concept 3: O3GAC (on-site GAC-regeneratie met ozon)

Project:	Nabehandeling met ozondosering en GAC-filtratie	
onderwerp	Concept 3: Ozon + GAC - on-site regeneratie met ozon	
opdrachtgever	STOWA	
Project code:	STO196-1	
Project manager	Arjan Dekker	
Document revisie:	IDC03	
ontworpen door:	Arjen van Nieuwenhuijze	Date
goedgekeurd door:	Marina Sanders	Date
		07-apr

Projectspecifieke waarden

Natuurkundige waarden

Berekende waarden



Parameter

Eenheid

waarde

opmerking

Uitgangspunten

<u>Technisch</u>	i.e.	20.000	100.000	300.000	
<u>rekenwaarde RWZI effluent</u>					
representatief volume water	m ³ /u	180	900	2700	STOWA 2015-27
spoelwaterverbruik	%	10%	10%	10%	STOWA 2015-27
volume water inclusief spoelwater	m ³ /u	198	990	2.970	
aanvoertijd	uur	16	16	16	
gemiddeld Chemisch Zuurstof Verbruik	g CZV/m ³	36,5	36,5	36,5	CBS statline 2013
Stikstofverbindingen als NOX-N	g N/m ³	5,3	5,3	5,3	STOWA 2013-35
Fosforverbindingen als PO4-P	g P/m ³	0,3	0,3	0,3	STOWA 2013-35
zuurstof in aanvoerwater	g O ₂ /m ³	1,5	1,5	1,5	STOWA 2009-32
DOC concentratie in RWZI effluent	g DOC/m ³	11,0	11,0	11,0	STOWA 2015-27
<u>ozonproductie</u>					
Verhouding zuurstof gas/vloeibaar	Nm ³ /l	1	1	1	
opslag bij nominaal gebruik	dagen	30	30	30	
zuurstofverbruik	Nm ³ / kg ozon	7,0	7,0	7,0	productspecificatie ozong
rendement omzetting		0,9	0,9	0,9	
verlies afgas		0,9	0,9	0,9	
energieverbruik	kWh/ kg ozon	10	10	10	STOWA 2015-27
extra energieverbruik koeling	kWh/ kg ozon	2	2	2	
dichtheid zuurstof	kg/m ³	1,43	1,43	1,43	http://www.uigi.com/o2_c
<u>ozondosering</u>					
doseersysteem		beluchttingsbak		zowel deelstroom als bel	
contacttijd (nominaal)	minuten	25	25	25	STOWA 2015-27
ozondosering (nominaal)	g O ₃ /g DOC	0,7	0,7	0,7	STOWA 2015-27
ozondosering regeneratie ratio (nominaal)	kgO ₃ /kg GAC/h	0,35	0,35	0,35	P.M. Álvarez, comparisor
<u>GAC-filtratie (1-STEP)</u>					
dichtheid GAC	kg/m ³	500	500	500	
hydraulische belasting	m/u	10	10	10	STOWA 2013-35
filterbedhoogte	m	2,5	2,5	2,5	STOWA 2015-27; Zhu et
EBCT (leegbed contacttijd)	minuten	15	15	15	Zhu et al 2015; STOWA :

Concept 3: O3GAC (on-site GAC-regeneratie met ozon)

bovenwaterstand	m	1,5	1,5	1,5
standtijd	maanden	12	12	12
toetsing standtijd op basis van isotherm op bulk DOC				STOWA 2015-27; WWTF

C-bron dosering

CZV methanol	g CZV/g methanol	1,5	1,5	1,5
dichtheid methanol	kg/m ³	800	800	800
methanoldosering ratio stikstof	g CZV/g NO _x -N	4,2	4,2	4,2
methanoldosering ratio stikstof	g methanol/g NO _x -N	2,8	2,8	2,8
methanoldosering ratio zuurstof	g CZV/g O ₂	0,8	0,8	0,8
methanoldosering ratio zuurstof	g methanol/g O ₂	0,5	0,5	0,5
opslag bij nominaal gebruik	dagen	30	30	30
				Ontwerp 1-STEP filter

coagulant dosering

aluminium concentratie PAX-214	mol Al/l	3,5	3,5	3,5
dichtheid PAX-214	kg / m ³	1.300	1.300	1.300
molaire massa P	g/mol	31	31	31
PAX-214 dosering ratio	mol Al/mol PO ₄ -P	3,1	3,1	3,1
opslag bij nominaal gebruik	dagen	30	30	30
				Ontwerp 1-STEP filter

pompen

debiet per pomp	m ³ /u	150	400	400
aantal	#	2	3	8
opvoerhoogte	m	6	6	6
aantal keer opvoeren	#	1	1	1
rendement	%	70%	70%	70%
				ref. HRM23-1 Effluent na STOWA 2015-27 STOWA 2015-27 STOWA 2015-27 aanname o.b.v. praktijk

Ontwerp

	Eenheid	waarde	opmerking
<u>ozondosering</u>			
nominale ozondosering	g/m ³	7,7	7,7
ozonvraag Oxidatie	kgO ₃ /uur	1,4	6,9
ozonverbruik Regeneratie	kgO ₃ /filter/regeneratie	8.750	10.938
acceptabele regeneratietijd per filter	dagen per filter	364	91
nodige regeneratiefrequentie	keer filter per jaar	1	4
toepasbare regeneratietijd per filter	uur	8.736	2.184
ozonvraag Regeneratie	kg O ₃ /uur	1,0	5,0
capaciteit ozongenerator	kg/u	2,4	11,9
gekozen generator	kg/u	3,5	13,4
benodigd aantal generatoren	#	1,0	1,0
volume ozoncontactor	m ³	83	413
benodigd liquid oxygen	m ³ /d	0,3	1,7
zuurstofopslag berekend	m ³	10	50
zuurstofopslag gekozen	m ³	11	30
aantal tanks (a 30 m ³)	aantal	1	1
aantal dagen opslag berekend	dagen	33	18
gebouw	m ²	40	80
			130 Schatting op basis van di

chemicaliën dosering

stikstofvracht	kg NO _x -N/u	1,0	4,8	14,3
te verwijderen zuurstof	kg O ₂ /u	0,3	1,5	4,5
benodigd methanol	kg/u	2,8	14,1	42,4
benodigd methanol	kg/d	45	226	679
benodigd methanol	m ³ /d	0,06	0,28	0,85
methanol opslag berekend	m ³	2	8	25
methanol opslag gekozen	m ³	5	10	30
aantal tanks	aantal	1	1	1
aantal dagen opslag berekend	dagen	88	35	35
fosfaatvracht	kg PO ₄ -P/u	0,05	0,27	0,81
benodigd coagulant	m ³ /d	0,02	0,12	0,37
coagulant opslag berekend	m ³	1	4	11
coagulant opslag gekozen	m ³	1	10	10
aantal tanks	aantal	1	1	1
				Het 20.000 i.e. scenario t

Concept 3: O3GAC (on-site GAC-regeneratie met ozon)

aantal dagen opslag berekend	dagen	41	81	27	
<u>GAC-filter</u>					
totaal filteroppervlak	m ²	20	100	300	bij schaalgrootte 20.000 i
aantal filters	#	1,0	4,0	10,0	systeemkeuze op basis v
oppervlak per filter	m ²	20	25	30	
filterbedvolume per filter	m ³	50	63	75	
totaal filterbedvolume	m ³	50	250	750	
totaalvolume per filter	m ³	80	100	120	
totaalvolume	m ³	80	400	1.200	
totaal volume benodigd GAC	m ³	100	313	825	totaal filterbedvolume + 1
<u>regeneratietank</u>					
regeneratiefrequentie	regeneraties per maand	0,1	0,3	0,8	
regeneratiefrequentie	regeneraties per jaar	1,0	4,0	10,0	
inhoud regeneratie tank	m ³	60	75	90	inhoud van GAC-filer +
bedhoogte regeneratiebed	m	1,75	1,75	1,75	hoe lager hoe beter in ve
oppervlakte regeneratietank	m ²	34	43	51	
Opslagtank geregereert kool	m ³	60	75	90	gelijke grootte als regene
	m	1,8	1,8	1,8	
	m ²	34	43	51	
gekozen volume opslagtank	m ³	40	50	55	
<u>energieverbruik</u>					
pompen	kWh/d	74	370	1.110	
ozongenerator	kWh/d	382	1.910	5.730	
extra koeling ozongenerator	kWh/d	76	382	1.146	
overig GAC	kWh/d	127	634	1.901	40
<u>Kostenraming</u>					
<u>technische levensduur:</u>					
civil	jaar	30			STOWA 2015-27
mechanisch/elektrisch	jaar	15			STOWA 2015-27
procesautomatisch	jaar	5			STOWA 2015-27
onvoorzien	jaar	15			STOWA 2015-27
rente	%	4%			STOWA 2015-27
afschrijving		annuïtair			STOWA 2015-27
onvolledigheid	%	30%			5% lager dan in referent
<u>opslagfactor voor realisatie en projectkosten</u>					
advies en ontwerp	%	65%			STOWA 2015-27
verzekeringen, vergunningen, bouwrentes	%	12%			STOWA 2015-27
projectmanagement, directievoering en toezicht	%	15%			STOWA 2015-27
tijdelijke installatie tijdens de bouw en opstart	%	8%			STOWA 2015-27
opleiding personeel	%	5%			STOWA 2015-27
communicatie	%	2%			STOWA 2015-27
BTW	%	2%			STOWA 2015-27
<u>onderhoud</u>					
civil	%	0,5%			berekend over totale bou
mechanisch, elektrisch en PA	%	3%			berekend over totale bou
<u>personeelskosten</u>					
			GAC regeneratie		
20.000 i.e.	EUR	€	25.000	€	25.000
100.000 i.e.	EUR	€	50.000	€	25.000
300.000 i.e.	EUR	€	50.000	€	25.000
<u>operationele kosten, inclusief 21% BTW</u>					
nieuw GAC	EUR/m3	€	1.200		STOWA 2015-27
elektriciteit	EUR/kWh	€	0,10		STOWA 2015-27
pure zuurstof (vloeibaar)	EUR/ton	€	200	€	200
coagulant (PAX 214)	EUR/ton	€	510	€	259
polymeer (40% actief)	EUR/l	€	3,0		STOWA 2015-27

Concept 3: O3GAC (on-site GAC-regeneratie met ozon)

methanol (100%)	EUR/ton	€	357				STOWA 2009-34
thermische regeneratie kool inclusief transport	EUR/m3	€	500				STOWA 2015-27
huurkosten zuurstofopslag	EUR/jaar	€	545	€	847	€	2.299 opgave budget prijzen lin

bouwkosten

Capaciteit ozongenerator	kgO ₃ /h		3,5		13,4		36,6	
ozongenerator	EUR/stuk	€	165.000	€	512.000	€	1.082.000	gemiddelde van budgetp
wtb	EUR/stuk	€	115.500	€	358.400	€	757.400	70%
et	EUR/stuk	€	16.500	€	51.200	€	108.200	10%
pa	EUR/stuk	€	33.000	€	102.400	€	216.400	20%
ozoncontactor	EUR/m ³	€	625	€	563	€	500	inc. Schotten, en ozonbe
civiel	EUR/m ³	€	375	€	338	€	300	60%
wtb	EUR/m ³	€	156	€	141	€	125	25%
et	EUR/m ³	€	63	€	56	€	50	10%
pa	EUR/m ³	€	31	€	28	€	25	5%
gebouw								
civiel	EUR/m ²	€	590	€	590	€	590	DACE-Prijzenboekje Edit
filterinstallatie GAC								
	EUR/m ²	€	23.000	€	16.000	€	16.000	
civiel	EUR/m ²	€	16.100	€	11.200	€	11.200	70%
wtb	EUR/m ²	€	4.600	€	3.200	€	3.200	20%
et	EUR/m ²	€	2.300	€	1.600	€	1.600	10%
regeneratie tank								
	EUR/m ²	€	23.000	€	23.000	€	23.000	
civiel	EUR/m ²	€	16.100	€	16.100	€	16.100	70%
wtb	EUR/m ²	€	4.600	€	4.600	€	4.600	20%
et	EUR/m ²	€	2.300	€	2.300	€	2.300	10%
methanol opslag en dosering								
		€	112.400	€	121.500	€	229.531	
civiel	30 m ³	-	-	-	€	45.200		
wtb	30 m ³	-	-	-	€	122.888		
et	30 m ³	-	-	-	€	61.444		50% van wtb=et
civiel	5/10 m ³	€	20.700	€	22.400	-		halve volume is /1,8
wtb	5/10 m ⁴	€	63.500	€	68.600	-		halve volume is /1,6
et	5/10 m ⁵	€	28.200	€	30.500	-		50% van wtb=et
coagulant opslag en dosering		-	€	42.600	€	42.600		
civiel	10 m ³	-	€	8.900	€	8.900		halve volume is /1,8
wtb	10 m ³	-	€	23.300	€	23.300		halve volume is /1,6
et	10 m ³	-	€	10.400	€	10.400		50% van wtb=et
zuurstof opslag en dosering								
civiel		€	5.000	€	10.000	€	15.000	kosten voor een funderin
wtb	EUR	€	4.840	€	7.260	€	10.890	plaatsingskosten, gereke
Opslagtank geregenereerd actief kool								
civiel	EUR/m ²	€	41.300	€	55.460	€	55.460	DACE-Prijzenboekje Edit
vers GAC								
civiel	EUR/m3	€	1.011	€	1.011	€	1.011	STOWA2009-34

BOUW- EN INVESTERINGSKOSTEN

<u>civiel</u>								
leidingwerk		€	71.190	€	142.380	€	213.570	op basis van 1-step horst
GAC-filter		€	322.000	€	1.120.000	€	3.360.000	
gemaal gebouw		€	51.458	€	77.188	€	205.834	op basis van 1-step horst
regeneratietank		€	552.000	€	690.000	€	828.000	
ozoncontactor		€	30.938	€	139.219	€	371.250	
gebouw ozongenerator		€	23.600	€	47.200	€	76.700	
zuurstofopslag		€	5.000	€	10.000	€	15.000	
methanol opslag		€	20.700	€	22.400	€	45.200	
coagulant opslag		-	€	8.900	€	8.900		
geregenereerd actief kool opslag		€	41.300	€	55.460	€	55.460	

Concept 3: O3GAC (on-site GAC-regeneratie met ozon)

vers GAC	€	101.135	€	316.047	€	834.364
subtotaal bouwkosten	€	1.219.300	€	2.628.800	€	6.014.300
subtotaal stichtingskosten	€	2.012.000	€	4.338.000	€	9.924.000

werktuigbouwkundig

GAC-filter	€	92.000	€	320.000	€	960.000	
gemaal pompen	€	103.960	€	155.940	€	415.840	op basis van 1-step horsi
regeneratietank	€	157.714	€	197.143	€	236.571	
ozongenerator	€	115.500	€	358.400	€	757.400	
ozoncontactor	€	12.891	€	58.008	€	154.688	
zuurstof opslag en dosering	€	4.840	€	7.260	€	10.890	
methanol opslag en dosering	€	63.500	€	68.600	€	122.888	
coagulant opslag en dosering	-		€	10.400	€	10.400	
subtotaal bouwkosten	€	550.400	€	1.175.800	€	2.668.700	
subtotaal stichtingskosten	€	908.000	€	1.940.000	€	4.403.000	

electrotechnisch

GAC-filter	€	46.000	€	160.000	€	480.000	
regeneratietank	€	78.857	€	98.571	€	118.286	
ozongenerator	€	16.500	€	51.200	€	108.200	
ozoncontactor	€	5.156	€	23.203	€	61.875	
methanol opslag en dosering	€	28.200	€	30.500	€	61.444	
coagulant opslag en dosering	-		€	10.400	€	10.400	
aardings-, potentiaal vereffenings-, bliksemafleider- en overspanningsbeveiligingsin	€	19.775	€	39.550	€	59.325	prijs geschaald aan 1-ste
energievoorziening LS	€	2.825	€	5.650	€	8.475	prijs geschaald aan 1-ste
schakel en verdeelinrichtingen	€	70.625	€	141.250	€	211.875	prijs geschaald aan 1-ste
kabeldraagsysteem en graafwerk	€	8.475	€	16.950	€	25.425	prijs geschaald aan 1-ste
verlichting en overige installaties	€	19.775	€	39.550	€	59.325	prijs geschaald aan 1-ste
subtotaal bouwkosten	€	296.200	€	616.800	€	1.204.600	
subtotaal stichtingskosten	€	489.000	€	1.018.000	€	1.988.000	

procesautomatisch

ozongenerator	€	33.000	€	102.400	€	216.400	
ozoncontactor	€	2.578	€	11.602	€	30.938	
processinstallatie "verbruikers"	€	50.850	€	101.700	€	152.550	prijs geschaald aan 1-ste
processinstallatie "metingen"	€	81.925	€	163.850	€	245.775	prijs geschaald aan 1-ste
automatiseringsinstallatie	€	73.450	€	146.900	€	220.350	prijs geschaald aan 1-ste
subtotaal bouwkosten	€	241.800	€	526.500	€	866.000	
subtotaal stichtingskosten	€	399.000	€	869.000	€	1.429.000	

onvolledigheid

civiel	€	365.800	€	788.700	€	1.804.300	
werktuigbouwkundig	€	165.100	€	352.700	€	800.600	
ET	€	88.900	€	185.000	€	361.400	
PA	€	72.500	€	158.000	€	259.800	
subtotaal bouwkosten	€	692.300	€	1.484.400	€	3.226.100	
civiel	€	603.400	€	1.301.100	€	2.977.100	
werktuigbouwkundig	€	272.300	€	581.900	€	1.320.900	
ET	€	146.600	€	305.300	€	596.400	
PA	€	119.700	€	260.600	€	428.700	
subtotaal stichtingskosten	€	1.142.000	€	2.449.000	€	5.323.000	

totaal bouwkosten	€	3.000.000	€	6.432.000	€	13.980.000
totaal stichtingskosten	€	4.950.000	€	10.614.000	€	23.067.000

CAPEX

Jaarlasten civiel	EUR/jaar	€	116.400	€	250.900	€	573.900
Jaarlasten werktuigbouwkundig	EUR/jaar	€	81.700	€	174.500	€	396.000
Jaarlasten ET	EUR/jaar	€	44.000	€	91.600	€	178.800
Jaarlasten PA	EUR/jaar	€	89.600	€	195.200	€	321.000
Jaarlasten onvolledigheid	EUR/jaar	€	102.700	€	220.300	€	478.800

CAPEX inclusief onvolledigheid

Jaarlasten civiel	EUR/jaar	€	152.400	€	328.500	€	760.900
Jaarlasten werktuigbouwkundig	EUR/jaar	€	107.000	€	228.500	€	525.000

Concept 3: O3GAC (on-site GAC-regeneratie met ozon)

Jaarlasten ET	EUR/jaar	€	57.600	€	119.900	€	237.000
Jaarlasten PA	EUR/jaar	€	117.300	€	255.600	€	425.600

totaal CAPEX	EUR/jaar	€	434.400	€	932.500	€	1.948.500
---------------------	-----------------	----------	----------------	----------	----------------	----------	------------------

OPEX

onderhoudskosten

civil	EUR/jaar	€	15.000	€	32.200	€	69.900	STOWA 2015-27
werktuigbouwkundig, electrotechniek en procesautomatise	EUR/jaar	€	90.000	€	193.000	€	419.400	STOWA 2015-27
energie	EUR/jaar	€	24.100	€	120.300	€	360.900	
methanol	EUR/jaar	€	5.900	€	29.500	€	88.500	
PAX-214	EUR/jaar	€	6.000	€	29.900	€	89.600	
vloeibare zuurstof	EUR/jaar	€	34.500	€	172.300	€	516.900	
huurkosten zuurstofopslag	EUR/jaar	€	6.500	€	10.200	€	27.600	opgave budget prijzen lin

personeel	EUR/jaar	€	50.000	€	75.000	€	75.000
-----------	----------	---	--------	---	--------	---	--------

totaal OPEX	EUR/jaar	€	232.000	€	662.400	€	1.647.800
--------------------	-----------------	----------	----------------	----------	----------------	----------	------------------

totaal jaarlasten capex+opex	EUR/jaar	€	666.400	€	1.594.900	€	3.596.300
-------------------------------------	-----------------	----------	----------------	----------	------------------	----------	------------------

kosten per m³	EUR/m³	€	0,63	€	0,30	€	0,23
kosten per i.e.	EUR/i.e.	€	33,3	€	15,9	€	12,0

omrekenfactoren

1 uur	minuten	60	60	60
1 uur	seconden	3.600	3.600	3.600
zwaartekrachtversnelling	m/s ²	9,81	9,81	9,81
1 kWh	joule	3600000	3600000	3600000 sec/h
1 dag	uren	24	24	24

Concept 4: O3GAC (in-situ GAC-regeneratie met ozon)

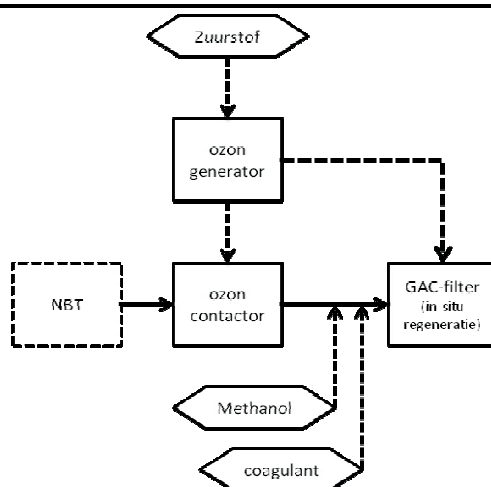
Project:	Nabehandeling met ozondosering en GAC-filtratie
onderwerp	Concept 4: Ozon + GAC - in-situ regeneratie met ozon
opdrachtgever	STOWA
Project code:	STO196-1
Project manager	Arjan Dekker
Document revisie:	IDC03
ontworpen door:	Arjen van Nieuwenhuijze
goedgekeurd door:	Marina Sanders
	Date
	Date

Projectspecifieke waarden

Natuurkundige waarden

Berekende waarden

07-apr



Parameter

Eenheid

waarde

opmerking

Uitgangspunten

Technisch	i.e.	20.000	100.000	300.000	
<u>rekenwaarde RWZI effluent</u>					
representatief volume water	m ³ /u	180	900	2700	STOWA2015-27
spoelwaterverbruik	%	10%	10%	10%	STOWA2015-27
volume water inclusief spoelwater	m ³ /u	198	990	2.970	
aanvoertijd	uur	16	16	16	
gemiddeld Chemisch Zuurstof Verbruik	g CZV/m ³	36,5	36,5	36,5	CBS statline 2013
Stikstofverbindingen als NOX-N	g N/m ³	5,3	5,3	5,3	STOWA 2013-35
Fosforverbindingen als PO4-P	g P/m ³	0,3	0,3	0,3	STOWA 2013-35
zuurstof in aanvoerwater	g O ₂ /m ³	1,5	1,5	1,5	STOWA 2009-32
DOC concentratie in RWZI effluent	g DOC/m ³	11,0	11,0	11,0	STOWA2015-27
<u>ozonproductie</u>					
Verhouding zuurstof gas/vloeibaar	Nm ³ /l	1	1	1	opgave budget prijzen lindegas 27
opslag bij nominaal gebruik	dagen	30	30	30	
zuurstofverbruik	Nm ³ /kg ozon	7,0	7,0	7,0	productspecificatie ozongenerator
rendement omzetting		90%	90%	90%	
verlies afgas		90%	90%	90%	
energieverbruik generator	kWh/kg ozon	10	10	10	STOWA2015-27
energieverbruik koeling	kWh/kg ozon	2	2	2	
dichtheid zuurstof	kg/m ³	1,43	1,43	1,43	http://www.uigi.com/o2_conv.html
<u>ozondosering</u>					
doseersysteem			beluchttingsbak		zowel deelstroom als beluchttingsb
contacttijd (nominaal)	minuten	25	25	25	STOWA2015-27
ozondosering (nominaal)	g O ₃ /g DOC	0,7	0,7	0,7	STOWA2015-27
ozondosering regeneratie ratio (nominaal)	kgO ₃ /kg GAC/h	0,35	0,35	0,35	P.M. Álvarez, comparison between
<u>GAC-filtratie (1-STEP)</u>					
dichtheid GAC	kg/m ³	500	500	500	
hydraulische belasting	m/u	10	10	10	STOWA 2013-35
filterbedhoogte	m	2,5	2,5	2,5	STOWA 2015-27; Zhu et al 2014
EBCT (leegbed contacttijd)	minuten	15	15	15	Zhu et al 2015; STOWA 2013-35;
bovenwaterstand	m	1,5	1,5	1,5	
standtijd	maanden	12	12	12	STOWA 2015-27; WWTP Swindo

Concept 4: O3GAC (in-situ GAC-regeneratie met ozon)

C-bron dosering

CZV methanol	g CZV/g methanol	1,5	1,5	1,5
dichtheid methanol	kg/m ³	800	800	800
methanoldosering ratio stikstof	g CZV/g NO _x -N	4,2	4,2	4,2 STOWA 2013-35
methanoldosering ratio stikstof	g methanol/g NO _x -N	2,8	2,8	2,8
methanoldosering ratio zuurstof	g CZV/g O ₂	0,8	0,8	0,8 STOWA 2013-35
methanoldosering ratio zuurstof	g methanol/g O ₂	0,5	0,5	0,5
opslag bij nominaal gebruik	dagen	30	30	30 Ontwerp 1-STEP filter

coagulant dosering

aluminium concentratie PAX-214	mol Al/l	3,5	3,5	3,5 SCADA Data monitoring 1-step
dichtheid PAX-214	kg / m ³	1.300	1.300	1.300 productspecificatie PAX-214
molaire massa P	g/mol	31	31	31
PAX-214 dosering ratio	mol Al/mol PO ₄ -P	3,1	3,1	3,1 STOWA 2013-35
opslag bij nominaal gebruik	dagen	30	30	30 Ontwerp 1-STEP filter

pompen

debiet per pomp	m ³ /u	150	400	400 ref. HRM23-1 Effluent nabehandeling
aantal	#	2	3	8 STOWA2015-27
opvoerhoogte	m	6	6	6 STOWA2015-27
aantal keer opvoeren	#	1	1	1 STOWA2015-28
rendement	%	70%	70%	70% aanname o.b.v. praktijkervaring

Ontwerp

Ontwerp	Eenheid	waarde		opmerking
<u>ozondosering</u>				
nominale ozondosering	g/m ³	7,7	7,7	7,7
ozonvraag Oxidatie	kg/u	1,4	6,9	20,8
ozonverbruik Regeneratie	kgO ₃ /filter/regeneratie	8.750,0	10.937,5	13.125,0
acceptabele regeneratietijd per filter	dagen per filter	364	91	36
nodige regeneratiefrequentie	aantal filters/jaar	1	4	10
toepasbare regeneratietijd per filter	uur	8.736	2.184	874
ozonvraag Regeneratie	kg O ₃ /uur	1,0	5,0	15,0
capaciteit ozongenerator	kg/u	2,4	11,9	35,8
gekozen ozongenerator	kg/u	3,5	13,5	36,6
benodigd aantal generatoren	#	1,0	1,0	1,0
volume ozoncontactor	m ³	83	413	1.238
benodigd liquid oxygen	m ³ /d	0,3	1,7	5,0
zuurstofopslag berekend	m ³	10	50	149
zuurstofopslag gekozen	m ³	11	30	49
aantal tanks	aantal	1	1	2
aantal dagen opslag berekend	dagen	33	18	20
gebouw	m ²	40	80	130 Schatting op basis van de footprint

chemicaliën dosering

stikstofvracht	kg NO _x -N/u	1,0	4,8	14,3
te verwijderen zuurstof	kg O ₂ /u	0,3	1,5	4,5 ozondosering verhoogt het zuurstof
benodigd methanol	kg/u	2,8	14,1	42,4
benodigd methanol	kg/d	45	226	679
benodigd methanol	m ³ /d	0,06	0,28	0,85
methanol opslag berekend	m ³	2	8	25
methanol opslag gekozen	m ³	5	10	30
aantal tanks	aantal	1	1	1
aantal dagen opslag berekend	dagen	88	35	35
fosfaatvracht	kg PO ₄ -P/u	0,05	0,27	0,81
benodigd coagulant	m ³ /d	0,02	0,12	0,37
coagulant opslag berekend	m ³	1	4	11
coagulant opslag gekozen	m ³	1	10	10
aantal tanks	aantal	1	1	1 Het 20.000 i.e. scenario bevat een
aantal dagen opslag berekend	dagen	41	81	27

GAC-filter

totaal filteroppervlak	m ²	20	100	300 bij schaalgrootte 20.000 i.e. ligt ee
------------------------	----------------	----	-----	---

Concept 4: O3GAC (in-situ GAC-regeneratie met ozon)

aantal filters in gebruik	#	1,0	4,0	10,0	systeemkeuze op basis van praktijk
oppervlak per filter	m ²	20	25	30	
filterbedvolume per filter	m ³	50	63	75	
totaal filterbedvolume	m ³	50	250	750	
totaalvolume per filter	m ³	80	100	120	
totaalvolume in gebruik	m ³	80	400	1.200	
totaal aantal te plaatsen filters	#	2	5	11	1 filter per keer wordt geregenereerd
totaal te plaatsen filteroppervlak	m ²	40	125	330	
totaal volume benodigd GAC	m ³	100	313	825	

energieverbruik

pompen	kWh/d	74	370	1.110	
ozongenerator	kWh/d	382	1.910	5.730	
extra koeling ozongenerator	kWh/d	76	382	1.146	
overig GAC	kWh/d	127	634	1.901	40

Kostenraming

technische levensduur:

civil	jaar	30		STOWA2015-27
mechanisch/elektrisch	jaar	15		STOWA2015-27
procesautomatisch	jaar	5		STOWA2015-27
onvoorzien	jaar	15		STOWA2015-27
rente	%	4%		STOWA2015-27
afschrijving		annuïtair		STOWA2015-27
onvolledigheid	%	30%		5% lager dan in referentie wegens

opslagfactor voor realisatie en projectkosten

advies en ontwerp	%	65%		STOWA2015-27
verzekeringen, vergunningen, bouwrentes	%	12%		STOWA2015-27
projectmanagement, directievoering en toezicht	%	15%		STOWA2015-27
tijdelijke installatie tijdens de bouw en opstart	%	8%		STOWA2015-27
opleiding personeel	%	5%		STOWA2015-27
communicatie	%	2%		STOWA2015-27
BTW	%	2%		STOWA2015-27
	%	21%		STOWA2015-27

onderhoud

civil	%	0,5%		berekend over totale bouwkosten
mechanisch, elektrisch en PA	%	3%		berekend over totale bouwkosten

personeelskosten

			GAC regeneratie		
20.000 i.e.	EUR	€	25.000	€	15.000
100.000 i.e.	EUR	€	50.000	€	15.000
300.000 i.e.	EUR	€	50.000	€	15.000

aanname overgenomen uit STOW

aanname overgenomen uit STOW

aanname overgenomen uit STOW

operationele kosten, inclusief 21% BTW

nieuw GAC	EUR/m ³	€	1.200		STOWA2015-27
elektriciteit	EUR/kWh	€	0,1		STOWA2015-27
pure zuurstof (vloeibaar)	EUR/ton	€	200	€	200
coagulant (PAX 214)	EUR/ton	€	510	€	259
polymeer (40% actief)	EUR/l	€	3,0		STOWA2015-27
methanol (100%)	EUR/ton	€	357		STOWA 2009-34
thermische regeneratie kool inclusief transport	EUR/m ³	€	500		STOWA2015-27
huurkosten zuurstofopslag	EUR/jaar	€	545	€	847
				€	2.299

opgave budget prijzen lindegas 27

bouwkosten

Capaciteit ozongenerator	kgO ₃ /h		3,5	13,5	36,6	
ozongenerator	EUR/stuk	€	165.000	€	512.000	€
	wtb EUR/stuk	€	115.500	€	358.400	€
	et EUR/stuk	€	16.500	€	51.200	€
	pa EUR/stuk	€	33.000	€	102.400	€
					216.400	
ozoncontactor	EUR/m ³	€	625	€	563	€
	civil EUR/m ³	€	375	€	338	€
	wtb EUR/m ³	€	156	€	141	€
	et EUR/m ³	€	63	€	56	€

gemiddelde van budgetprijzen ozo

70%

10%

20%

inc. Schotten, en ozonbesteldig

60%

25%

10%

Concept 4: O3GAC (in-situ GAC-regeneratie met ozon)

	pa EUR/m ³	€	31 €	28 €	25	5%
gebouw						
	civiel EUR/m ²	€	590 €	590 €	590	DACE-Prijzenboekje Editie 25, 20
filterinstallatie GAC (ozonbestendig)	EUR/m ²	€	34.500 €	24.000 €	24.000	
	civiel EUR/m ²	€	24.150 €	16.800 €	16.800	70%
	wtb EUR/m ²	€	6.900 €	4.800 €	4.800	20%
	et EUR/m ²	€	3.450 €	2.400 €	2.400	10%
vers GAC						
	civiel EUR/m ³	€	1.011 €	1.011 €	1.011	STOWA2009-34
methanol opslag en dosering		€	112.400 €	121.500 €	229.531	
	civiel 30 m ³	-	-	€	45.200	
	wtb 30 m ³	-	-	€	122.888	
	et 30 m ³	-	-	€	61.444	50% van wtb=et
	civiel 5/10 m ³	€	20.700 €	22.400 -		halve volume is /1,8
	wtb 5/10 m ³	€	63.500 €	68.600 -		halve volume is /1,6
	et 5/10 m ³	€	28.200 €	30.500 -		50% van wtb=et
coagulant opslag en dosering		-	€	42.600 €	42.600	
	civiel 10 m ³	-	€	8.900 €	8.900	halve volume is /1,8
	wtb 10 m ³	-	€	23.300 €	23.300	halve volume is /1,6
	et 10 m ³	-	€	10.400 €	10.400	50% van wtb=et
zuurstof opslag en dosering						
	civiel	€	5.000 €	10.000 €	15.000	kosten voor een funderingsplaat, s
	wtb EUR	€	4.840 €	7.260 €	10.890	plaatsingskosten, gerekend tot wtb

BOUW- EN INVESTERINGSKOSTEN

civiel

leidingwerk	€	71.190 €	142.380 €	213.570	op basis van 1-step horstermeer:
GAC-filter	€	966.000 €	2.100.000 €	5.544.000	
vers GAC	€	101.135 €	316.047 €	834.364	
gemaal gebouw	€	51.458 €	77.188 €	205.834	op basis van 1-step horstermeer:
ozoncontactor	€	30.938 €	139.219 €	371.250	
gebouw ozongenerator	€	23.600 €	47.200 €	76.700	
zuurstofopslag	€	5.000 €	10.000 €	15.000	
methanol opslag	€	20.700 €	22.400 €	45.200	
coagulant opslag	-	€	8.900 €	8.900	
subtotaal bouwkosten	€	1.270.000 €	2.863.300 €	7.314.800	
subtotaal stichtingskosten	€	2.096.000 €	4.724.000 €	12.069.000	

werktuigbouwkundig

GAC-filter	€	276.000 €	600.000 €	1.584.000	
gemaal pompen	€	103.960 €	155.940 €	415.840	op basis van 1-step horstermeer:
ozongenerator	€	115.500 €	358.400 €	757.400	
ozoncontactor	€	12.891 €	58.008 €	154.688	
zuurstof opslag en dosering	€	4.840 €	7.260 €	10.890	
methanol opslag en dosering	€	63.500 €	68.600 €	122.888	
coagulant opslag en dosering	-	€	10.400 €	10.400	
subtotaal bouwkosten	€	576.700 €	1.258.600 €	3.056.100	
subtotaal stichtingskosten	€	952.000 €	2.077.000 €	5.043.000	

electrotechnisch

GAC-filter	€	138.000 €	300.000 €	792.000	
ozongenerator	€	16.500 €	51.200 €	108.200	
ozoncontactor	€	5.156 €	23.203 €	61.875	
methanol opslag en dosering	€	28.200 €	30.500 €	61.444	
coagulant opslag en dosering	-	€	10.400 €	10.400	
aardings-, potentiaal vereffenings-, bliksemafleider- en overspanningsbeveil	€	19.775 €	39.550 €	59.325	prijs geschaald aan 1-step (1500 r
energievoorziening LS	€	2.825 €	5.650 €	8.475	prijs geschaald aan 1-step (1500 r
schakel en verdeelinrichtingen	€	70.625 €	141.250 €	211.875	prijs geschaald aan 1-step (1500 r
kabeldraagsysteem en graafwerk	€	8.475 €	16.950 €	25.425	prijs geschaald aan 1-step (1500 r
verlichting en overige installaties	€	19.775 €	39.550 €	59.325	prijs geschaald aan 1-step (1500 r
subtotaal bouwkosten	€	309.300 €	658.300 €	1.398.300	
subtotaal stichtingskosten	€	510.000 €	1.086.000 €	2.307.000	

Concept 4: O3GAC (in-situ GAC-regeneratie met ozon)

<u>procesautomatisch</u>					
ozongenerator	€	33.000	€	102.400	€ 216.400
ozoncontactor	€	2.578	€	11.602	€ 30.938
processinstallatie "verbruikers"	€	50.850	€	101.700	€ 152.550 prijs geschaald aan 1-step (1500 r
processinstallatie "metingen"	€	81.925	€	163.850	€ 245.775 prijs geschaald aan 1-step (1500 r
automatiseringsinstallatie	€	73.450	€	146.900	€ 220.350 prijs geschaald aan 1-step (1500 r
subtotaal bouwkosten	€	241.800	€	526.500	€ 866.000
subtotaal stichtingskosten	€	399.000	€	869.000	€ 1.429.000

<u>onvolledigheid</u>					
civil	€	381.000	€	859.000	€ 2.194.500
werktuigbouwkundig	€	173.000	€	377.600	€ 916.800
ET	€	92.800	€	197.500	€ 419.500
PA	€	72.500	€	157.900	€ 259.800
subtotaal bouwkosten	€	719.300	€	1.592.000	€ 3.790.600
civil	€	628.700	€	1.417.300	€ 3.620.500
werktuigbouwkundig	€	285.600	€	623.100	€ 1.512.800
ET	€	153.000	€	325.800	€ 692.100
PA	€	119.700	€	260.700	€ 428.700
subtotaal stichtingskosten	€	1.187.000	€	2.627.000	€ 6.254.000

totaal bouwkosten	€	3.117.000	€	6.899.000	€ 16.426.000
totaal stichtingskosten	€	5.144.000	€	11.383.000	€ 27.102.000

CAPEX

Jaarlasten civil	EUR/jaar	€	121.200	€	273.200	€	698.000
Jaarlasten werktuigbouwkundig	EUR/jaar	€	85.600	€	186.800	€	453.600
Jaarlasten ET	EUR/jaar	€	45.900	€	97.700	€	207.500
Jaarlasten PA	EUR/jaar	€	89.600	€	195.200	€	321.000
Jaarlasten onvolledigheid	EUR/jaar	€	106.800	€	236.300	€	562.500

<i>CAPEX inclusief onvolledigheid</i>							
Jaarlasten civil	EUR/jaar	€	159.000	€	358.900	€	931.700
Jaarlasten werktuigbouwkundig	EUR/jaar	€	112.300	€	245.400	€	605.500
Jaarlasten ET	EUR/jaar	€	60.200	€	128.400	€	277.000
Jaarlasten PA	EUR/jaar	€	117.600	€	256.500	€	428.500

totaal CAPEX	EUR/jaar	€	449.100	€	989.200	€	2.242.600
---------------------	-----------------	---	----------------	---	----------------	---	------------------

OPEX

<u>onderhoudskosten</u>							
civil	EUR/jaar	€	15.585	€	34.495	€	82.130 STOWA2015-27
werktuigbouwkundig, electrotechniek en procesaut	EUR/jaar	€	93.510	€	206.970	€	492.780 STOWA2015-27
energie	EUR/jaar	€	24.100	€	120.300	€	360.900
methanol	EUR/jaar	€	5.900	€	29.500	€	88.500
PAX-214	EUR/jaar	€	6.000	€	29.900	€	89.600
vloeibare zuurstof	EUR/jaar	€	34.500	€	172.300	€	516.900
huurkosten zuurstofopslag	EUR/jaar	€	6.500	€	10.200	€	27.600 opgave budget prijzen lindegas 27
personeel	EUR/jaar	€	40.000	€	65.000	€	65.000
totaal OPEX	EUR/jaar	€	226.100	€	668.700	€	1.723.400

totaal jaarlasten (CAPEX+OPEX)	EUR/jaar	€	675.200	€	1.657.900	€	3.966.000
---------------------------------------	-----------------	---	----------------	---	------------------	---	------------------

kosten per m³	EUR/m³	€	0,64	€	0,32	€	0,25
kosten per i.e.	EUR/i.e.	€	33,8	€	16,6	€	13,2

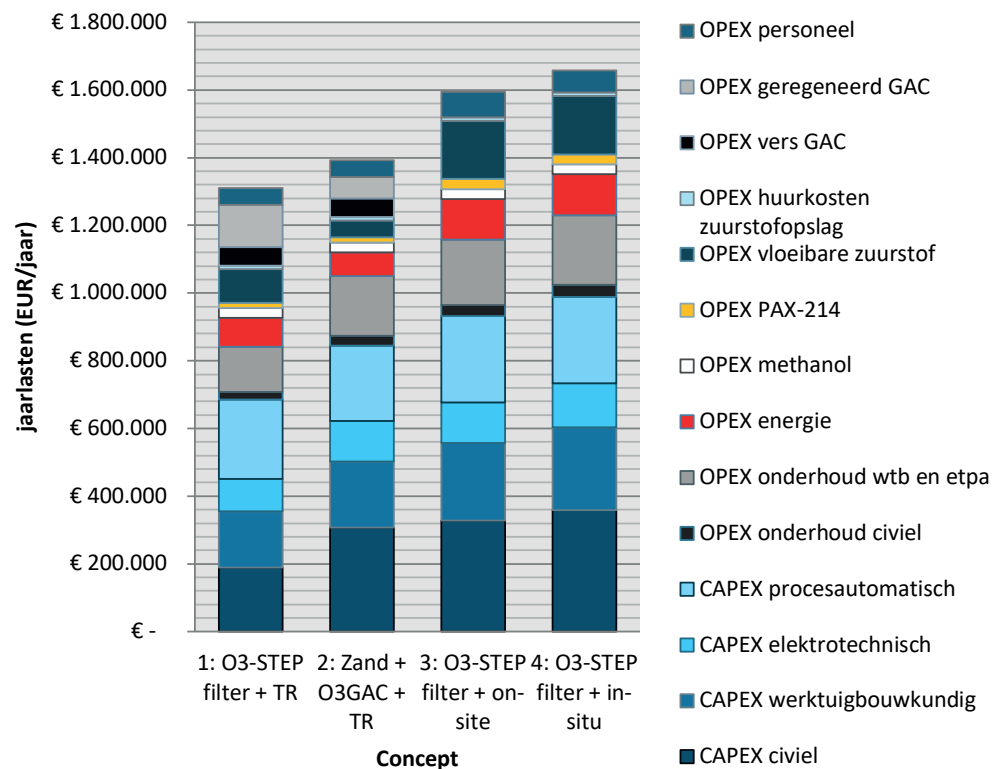
omrekenfactoren

1 uur	minuten	60	60	60
1 uur	seconden	3.600	3.600	3.600
zwaartekrachtversnelling	m/s ²	9,81	9,81	9,81
1 kWh	joule	3600000	3600000	3600000 sec/h
1 dag	uren	24	24	24

BIJLAGE 6

OVERZICHT VAN DE JAARLASTEN PER CONCEPT BIJ EEN GROOTTE VAN 100.000 I.E.

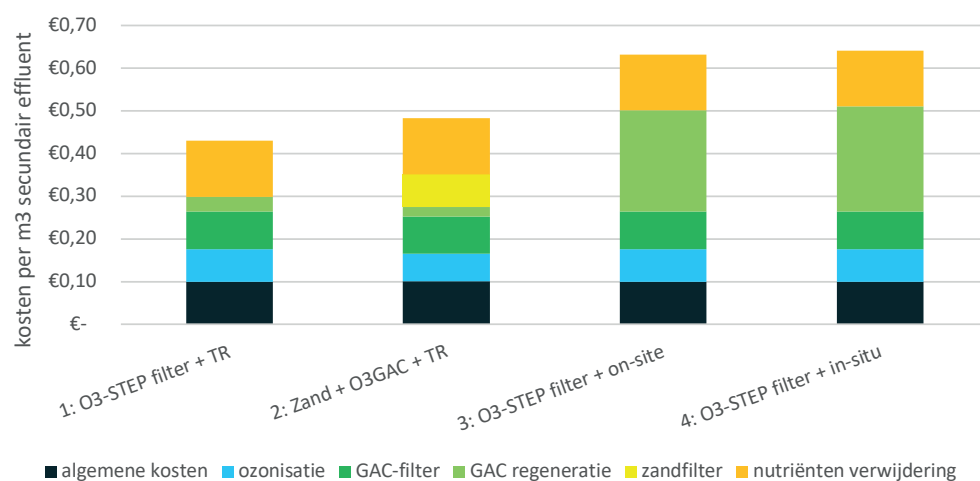
OVERZICHT VAN DE KOSTEN PER CONCEPT BIJ EEN SCHAALGROOTTE VAN 100.000 I.E.; HIERBIJ ZIJN CONCEPT 1 EN 2 MET THERMISCHE REGENERATIE EN CONCEPT 3 EN 4 MET OZONREGENERATIE



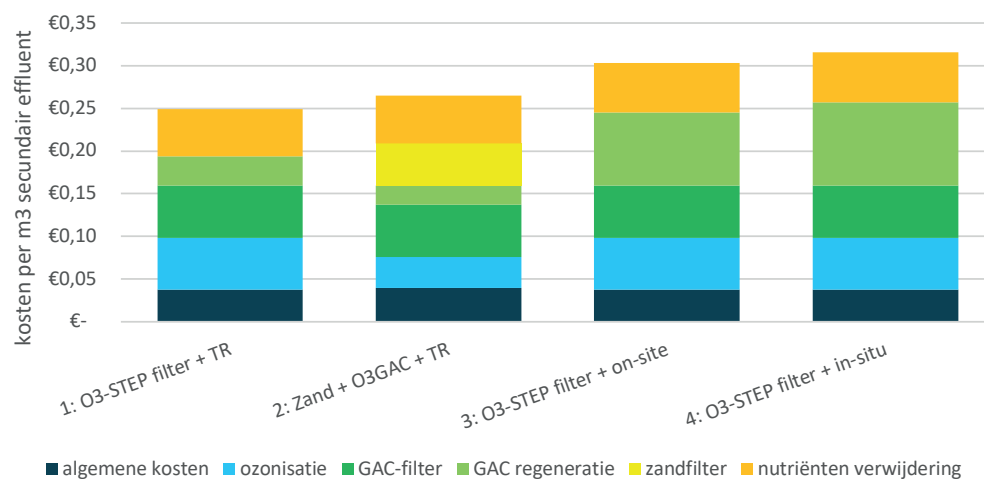
BIJLAGE 7

OVERZICHT VAN DE KOSTEN PER M³ SECUNDAIR EFFLUENT

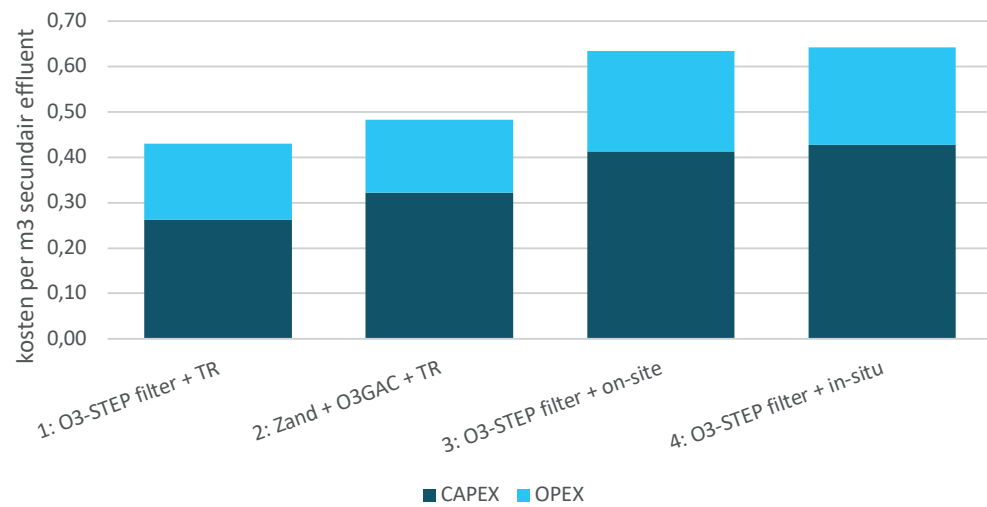
OVERZICHT KOSTENVERDELING PER M³ NBT-EFFLUENT PER CONCEPT BIJ EEN SCHAAFGROOTTE VAN 20.000 I.E.; HIERBIJ ZIJN CONCEPT 1 EN 2 MET THERMISCHE REGENERATIE EN CONCEPT 3 EN 4 MET OZONREGENERATIE



OVERZICHT KOSTENVERDELING PER M³ NBT-EFFLUENT PER CONCEPT BIJ EEN SCHAAFGROOTTE VAN 100.000 I.E.; HIERBIJ ZIJN CONCEPT 1 EN 2 MET THERMISCHE REGENERATIE EN CONCEPT 3 EN 4 MET OZONREGENERATIE



KOSTEN VERDELING IN CAPEX EN OPEX PER CONCEPT BIJ EEN SCHAALGROOTTE VAN 20.000 I.E.; HIERBIJ ZIJN CONCEPT 1 EN 2 MET THERMISCHE REGENERATIE EN CONCEPT 3 EN 4 MET OZONREGENERATIE



KOSTEN VERDELING IN CAPEX EN OPEX PER CONCEPT BIJ EEN SCHAALGROOTTE VAN 100.000 I.E.; HIERBIJ ZIJN CONCEPT 1 EN 2 MET THERMISCHE REGENERATIE EN CONCEPT 3 EN 4 MET OZONREGENERATIE

