



stowa

HAALBAARHEID VAN DE ARVIA NYEX™ TECHNOLOGIE

EEN ZUIVERINGSTECHNIEK VOOR DE VERWIJDERING VAN
MICROVERONTREINIGINGEN OP RIOOLWATERZUIVERINGEN



RAPPORT

2020
17

HAALBAARHEID VAN DE ARVIA NYEX™ TECHNOLOGIE
EEN ZUIVERINGSTECHNIEK VOOR DE VERWIJDERING VAN
MICROVERONTREINIGINGEN OP RIOOLWATERZUIVERINGEN

RAPPORT

2020

17

ISBN 978.90.5773.877.7



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

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

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS P. Wessels, Isle Utilities
T. Krahnstöver, Isle Utilities

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

M. Mulder – Mirabella Mulder Wastewater Management
C.A. Uijterlinde – STOWA
G.B.J. Rijs – Rijkswaterstaat
A. Deeke – Waterschap de Dommel
J.F. Kramer – Witteveen + Bos
C. de Jong – Witteveen + Bos
D. de Vogel - WLN
J. Foekema – CABOT
M. Bechger – Waternet
J. van den Bulk – Tauw

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA STOWA 2020-17
ISBN 978.90.5773.877.7

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

De Arvia Nyex™ technologie biedt nu nog onvoldoende perspectief om een vervolg te krijgen in het Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit Afvalwater (IPMV).

Het ministerie van IenW en de STOWA hebben samen het IPMV-programma opgezet met als doel het versnellen van de ontwikkeling van veelbelovende verwijderingstechnieken voor microverontreinigingen uit afvalwater. Het innovatieprogramma is onderverdeeld in vijf verschillende thema's, waaronder de themabegeleidingscommissie 'granulair kool' waar het voorliggende onderzoek onder valt.

In het kader van het IMPV werd de haalbaarheid van Arvia Nyex™ technologie beoordeeld op basis van de te verwachten verwijderingsrendementen, geschatte kosten en geschatte CO₂ footprint ten opzichte van drie referentie technieken (poederkool, granulair kool of ozon-dosering).

Tijdens het onderzoek bleek dat de technologie nog volop in ontwikkeling is en de begeleidingscommissie ziet weldegelijk de potentie van deze techniek. Desalniettemin, kan op basis van de huidige informatie niet geconcludeerd worden dat de techniek beter presteert dan de genoemde referentietechnieken. Daarom krijgt deze haalbaarheidsstudie geen vervolg. Bij aantoonbare toekomstige verbeteringen wordt echter niet uitgesloten dat deze beslissing kan worden heroverwogen.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

Om de haalbaarheid van de verwijdering van antropogene microverontreinigingen uit effluënten van Nederlandse rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) te beoordelen, heeft Isle Utilities het Nyex™-proces van het Britse bedrijf Arvia Technology Ltd. (verder Arvia) bestudeerd en geëvalueerd.

Het systeem van Arvia bestaat uit een filterbed met een eigen adsorptiemedium (Nyex™) dat organische microverontreinigingen op het oppervlak adsorbeert. Door het onder elektrische stroom zetten van het filtermedium, worden de geadsorbeerde verbindingen geoxideerd, wat een continue regeneratie van het medium en dus een continue procesvoering mogelijk maakt. OH radicalen vormen en reageren direct op het adsorberende oppervlak, in theorie leidend tot een hoge procesefficiëntie en volledige afbraak van de organische verontreinigingen.

Het Nyex™ behandelingssysteem kan worden ingezet als een modulaair systeem of als een retrofitsysteem voor bestaande faciliteiten door de inzet in bestaande betonnen tanks. Omdat het gaat om een nageschakelde techniek zal het systeem geen nadelige effecten hebben op de dagelijkse bedrijfsvoering van de RWZI. Een high-level analyse met betrekking tot de toepasbaarheid op Nederlandse RWZI's heeft de volgende conclusies opgeleverd:

- Bij RWZI's met een nageschakelde filtratiestap, bijvoorbeeld zand of mechanische filters of een MBR, kan de Arvia technologie worden geïnstalleerd zonder extra voorbehandelingsmaatregelen;
- Is deze filtratiestap niet aanwezig, dan zal analyse van historische gegevens nodig zijn om te bepalen of extra voorbehandeling nodig is, voornamelijk om zwevende stoffen te verwijderen.

De twee belangrijkste dimensioneringsgrondslagen zijn de verblijftijd (empty bed contact time) en het toegepaste elektrisch vermogen; de verblijftijd bepaalt het adsorptieniveau op het Nyex™-bed en het vermogen bepaalt hoeveel oxidatie optreedt in het medium.

In het algemeen kan voor afvalwatertoepassingen een typisch vermogen tussen 0,8 - 1,2 kWh/m³ en een retentietijd van 30-45 minuten worden verwacht, hoewel dit sterk afhankelijk is van samenstelling van het afvalwater. De meest recente testresultaten van Arvia tonen aan dat door het pulseren van stroom, het energieverbruik (logischerwijs) afneemt terwijl er bij 50% pulseren vrijwel geen vermindering in verwijderingsrendement wordt gevonden. Er worden meer experimenten uitgevoerd om het energieverbruik verder terug te dringen, door verdere vermindering van de puls frequentie. Er is echter onvoldoende bewijs geleverd om aan te tonen dat dit geen negatief effect zal hebben op het verwijderingsrendement.

Arvia heeft verschillende laboratorium- en pilotstudies uitgevoerd voor de behandeling van drinkwater, industrieel en stedelijk afvalwater. Op basis van de resultaten van eerdere studies op stedelijk afvalwater is aangetoond dat de technologie 9 van de 11 STOWA-verbindingen met een verwijderingspercentage tussen 71-99% effectief verwijderd worden.

Isle verwacht dat een verblijftijd van 30-45 minuten en een toegepast vermogen van 0,8 - 1,2 kWh/m³ bij een 50% gepulseerde werking, oftewel een energieverbruik van 0,4 - 0,6 kWh/m³, voldoende zal zijn voor de verwijdering met 80-85% van minstens 7 van de 11 gidsstoffen. Op

basis van deze verwachting werden de CO₂ footprint en kosten van de behandeling geschat. De resultaten zijn in tabel 1 weergegeven.

Net als elk ander oxidatieproces brengt het Nyex™ proces in principe een risico van de vorming van toxische afbraakproducten met zich mee. Theoretisch zou echter door de heradsorptie en verdere oxidatie van eventuele afbraakproducten een volledige mineralisatie van organisch materiaal optreden. Daarmee zou het risico op toxische afbraakproducten lager zijn dan bij andere oxidatieve technieken. Ook werd er eerder experimenteel aangetoond dat de omzetting van bromide in bromaat een stuk lager is dan bij toepassing van ozon en dat er een zekere vermindering van de ecotoxiciteit is na de behandeling.

Op basis van deze waarnemingen en argumenten is het aannemelijk dat het proces een positief effect op de ecotoxiciteit van het water zal hebben. Of dit meer dan 50% bedraagt, moet in een pilot worden aangetoond. Ook wordt aangeraden een gedetailleerde analytische screening op afbraakproducten uit te voeren.

TABEL 1

SAMENVATTING VAN DE RESULTATEN UIT DE HAALBAARHEIDSTUDIE

	PACAS	O ₃ + zandfiltratie	GAK	Arvia Nyex™
CO ₂ footprint [g CO ₂ /m ³]	122	128	325	245 - 350
Kosten [€/m ³]	0,05	0,17	0,26	0,21 - 0,23
Verwijderingsrendement [%]	70 - 75	80 - 85	80 - 85	80 - 85

Concluderend is de haalbaarheid van de Arvia technologie beoordeeld op basis van CO₂ footprint, kosten en verwijderingsrendement. Hoewel aannemelijk is dat de technologie dezelfde hoge verwijderingspercentages kan bereiken als conventionele technologieën en waarschijnlijk een positief effect zal hebben op de ecotoxiciteit van het behandelde water, levert het in vergelijking met de combinatie ozon en zandfiltratie geen verbetering op in de kosten of de CO₂ footprint. Vooral de laatste is aanzienlijk hoger. Daarom concludeert Isle dat de Nyex™ technologie op dit moment geen geschikt alternatief vormt voor conventionele methoden. Er wordt echter niet uitgesloten dat dit met een aantal toekomstige verbeteringen wel het geval zal zijn.

Arvia is ervan overtuigd dat het in staat zal zijn om het energieverbruik te verminderen, het ontwerp te verbeteren en de verblijftijd te verkorten waardoor zowel de CO₂ footprint als de kosten worden gereduceerd terwijl een hoog verwijderingsrendement wordt bereikt. Isle en de begeleidingscommissie blijven de technologie interessant vinden en moedigen het bedrijf aan haar inspanningen voort te zetten en eventuele verbeteringen met feiten te onderbouwen. Bij aantoonbare verbeteringen die leiden tot reductie in kosten en CO₂ footprint is de commissie bereid de uitkomst van deze studie te heroverwegen.

DE STOWA IN HET KORT

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

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

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

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

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

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

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

HAALBAARHEID VAN DE ARVIA NYEX™ TECHNOLOGIE EEN ZUIVERINGSTECHNIEK VOOR DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN OP RIOOLWATERZUIVERINGEN

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	PROJECTCONTEXT EN DOEL	1
2	ALGEMENE BESCHRIJVING VAN DE ARVIA NYEX™ TECHNOLOGIE	2
	2.1 Werkingsprincipe	2
	2.2 Technische implementatie en dimensioneringsgrondslagen	3
	2.3 Inpassing in de Nederlandse zuiveringspraktijk	4
	2.4 Technology Readiness Level (TRL)	5
3	VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN	6
	3.1 Eerder uitgevoerde studies met betrekking tot microverontreinigingen	6
	3.2 Verwijdering 11 gidsstoffen	7
	3.3 Conclusies en vertaling naar dimensioneringscriteria voor de casestudy	8
4	EFFECT OP ECOTOXICOLOGIE	9
	4.1 Vorming van restproducten	9
	4.2 Bromaatvorming	9
	4.3 Gemeten ecotoxicologische effecten	10
	4.4 Conclusies met betrekking tot ecotoxicologische effecten	11

5	CASE STUDY – ONTWERP 100 000 I.E. RWZI	12
5.1	Dimensioneringsgrondslagen & procesontwerp	12
5.2	Operationele omschrijving	13
5.3	Kostenanalyse	14
5.3.1	Investeringskosten	14
5.3.2	Operationele kosten	14
5.3.3	Kosten per m ³ gezuiverd water	15
5.3.4	CO ₂ footprint	16
6	CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN	17
7	BRONVERMELDINGEN	19
BIJLAGE A	ANALYSERESULTATEN EERDERE STUDIES	21
BIJLAGE B	KOSTENCALCULATIES	24
BIJLAGE C	BEREKENING CO ₂ FOOTPRINT	27

1

PROJECTCONTEXT EN DOEL

Er worden steeds meer chemische stoffen geproduceerd, verwerkt en gebruikt in huishoudens, industrieën, ziekenhuizen en de landbouw. Deze stoffen komen via verschillende routes uiteindelijk ook in het milieu terecht waardoor, onder andere, een toenemend aantal persistente stoffen wordt gemeten in oppervlaktewater. Dit brengt mogelijk schadelijke effecten op aquatische leven en potentieel voor de mens met zich mee. Riolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) zijn een belangrijke schakel in de verspreiding van microverontreinigingen in het aquatisch milieu. Dit omdat het afvalwater van huishoudens, en soms industrieën, met de slecht afbreekbare microverontreinigingen hier bij elkaar komt en conventionele afvalwaterzuiveringsprocessen niet ontworpen zijn om deze voldoende te verwijderen. Daarom wordt het noodzakelijk geacht om de RWZI te verbeteren door implementatie zuiveringsmethoden die gericht zijn op het verwijderen van deze stoffen.

In Nederland zijn de meest overwogen technologieën voor de verwijdering van microverontreinigingen: 1) dosering van actief kool in poedervorm in het actiefslibstelsysteem (PACAS) 2) dosering van ozon gevolgd door zandfiltratie en 3) het gebruik van granulair actief kool.

STOWA verkent en test alternatieve technologieën voor de efficiënte verwijdering van microverontreinigingen uit stedelijk afvalwater. Aangezien er meerdere (combinaties van) technologieën zijn die mogelijk uitkomst bieden, worden deze in een eerste projectfase beoordeeld en wordt de algemene haalbaarheid ervan beoordeeld aan de hand van de volgende criteria:

- Effectieve verwijdering van minimaal 7 van de 11 door het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat aangewezen gidsstoffen
- Investerings- en operationele kosten
- CO₂ footprint
- Ecotoxicologische effecten

De technologieën die aantoonbare verbeteringen opleveren ten opzichte van de eerdergenoemde referentieprocessen, worden ondersteund bij het uitvoeren van pilot onderzoek op een Nederlandse RWZI om verdere operationele ervaring op te doen.

Om de STOWA-begeleidingscommissie (BC) Adsorptie aan granulaire kool te ondersteunen in het beoordelen van de technische haalbaarheid, heeft Isle Utilities het Nyex™-proces van het Britse bedrijf Arvia Technology Ltd. (verder Arvia) bestudeerd en geëvalueerd. Het doel van deze haalbaarheidsstudie is om de Nederlandse waterschappen, STOWA en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat te voorzien van gedetailleerde, objectieve informatie over de werkingsprincipes van de technologie, de technische implementatie en eerdere operationele ervaring.

2

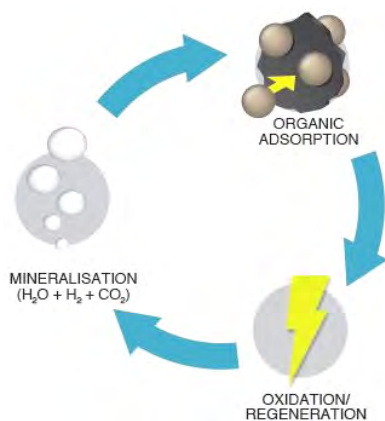
ALGEMENE BESCHRIJVING VAN DE ARVIA NYEX™ TECHNOLOGIE

2.1 WERKINGSPRINCIPE

Arvia's Nyex™ technologie werkt door een effectieve combinatie van adsorptie en elektrochemische oxidatie in één in-situ proces (figuur 1). Eerst worden organische verontreinigingen geadsorbeerd op het gepatenteerde adsorptiemedium op basis van koolstof, waardoor ze uit de waterfase worden gehaald en aan het oppervlak van het adsorptiemiddel worden gehouden. Vervolgens wordt het geleidende adsorptiebed, dat fungeert als een 3D-elektrode, onder stroom gezet. Hierdoor worden aan het oppervlak van het medium OH-radicalen geproduceerd, die de geadsorbeerde verontreinigingen oxideren en mineraliseren tot H_2O , H_2 en CO_2 .

Dankzij de oxidatie van geadsorbeerde verbindingen wordt de Nyex™ media continu geregeneerd, waardoor de adsorptiecapaciteit altijd op een hoog niveau wordt gehouden. Continue proceswerking wordt hiermee bereikt zonder regelmatige regeneratie, vervanging of systeemredundantie, in tegenstelling tot granulair actief kool.

FIGUUR 1 WERKINGSPRINCIPE VAN DE ARVIA NYEX™ TECHNOLOGIE



Het is belangrijk op te merken dat er voornamelijk oppervlakte-adsorptie optreedt, in tegenstelling tot interne adsorptie zoals bij actief kool. De korrelporositeit is beperkt, omdat de hoge elektrische stroom die nodig is om intern geadsorbeerde organische stoffen te vernietigen de korrelstructuur zou beschadigen. Arvia meldt dat met de technologie tot op heden jaarlijks slechts 2% van het adsorptiemiddel verloren gaat en moet worden bijgevuld. Voor toepassing als nageschakelde microverontreinigingsstap heeft de technologie geen chemicaliën nodig.

Stoffen die hydrofoob van aard zijn, zullen waarschijnlijk adsorberen op het filtermedium, waardoor het potentieel voor oxidatie mogelijk wordt. Zeer hydrofiële verbindingen met een

sterke voorkeur voor de waterfase zijn moeilijker te adsorberen, zodat de kans op verwijdering afneemt. In vergelijking met adsorptie (bv. actieve kool) of oxidatieprocessen (bv. ozon) moeten verbindingen zowel een voldoende hoge adsorptie- als oxidatie-eigenschap hebben om te kunnen worden verwijderd (tabel 2). In de literatuur wordt tevens gemeld dat oxidatieprocessen op basis van OH-radicalen over het algemeen minder stabiel zijn dan die op basis van bijvoorbeeld ozonreactie (Wert, Gonzales, Dong, & Rosario-Ortiz, 2011). Dit is te wijten aan het feit dat de OH-vorming sterk beïnvloed wordt door de watermatrix.

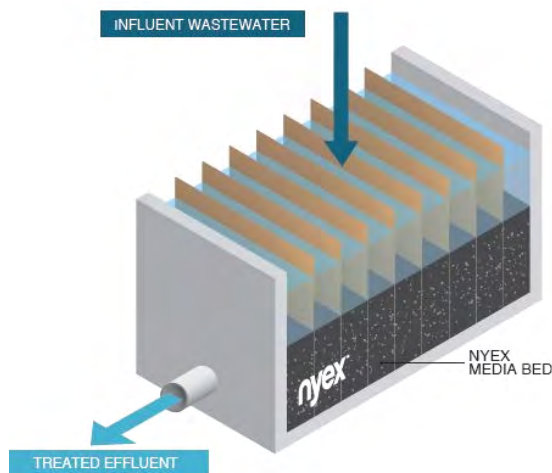
TABEL 2 VERGELIJKING NYEX™ MET CONVENTIONELE VERWIJDERINGSMETHODEN

	PACAS	O ₃ + zandfiltratie	GAC	Nyex™ proces
Verwijderingsmechanisme(n)	Adsorptie	Oxidatie	Adsorptie	Adsorptie & oxidatie
Typische verblijftijd	= slib leeftijd	10 - 30 min	5 - 30 min	30 - 45 min
Hulpmiddelen	PAK, flocculant, elektriciteit	Zuurstof, elektriciteit	GAK, elektriciteit	Nyex™ media elektriciteit
Operationele risico's	Toename slibomvang, verlies PAK	Veiligheid (O ₃), vorming afbraakproducten	Doorbraak	Veiligheid (H ₂), mogelijke vorming afbraakproducten

2.2 TECHNISCHE IMPLEMENTATIE EN DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN

Het Nyex™ filtermedium wordt toegepast in een vast bed dat zowel van boven naar beneden als van beneden naar boven kan worden doorstroomd. Het systeem bestaat in een eencellige (lab-experimenten) en meercellige (tot 21 cellen per unit) modulaire vorm. De technische componenten bestaan uit elektroden, adsorptiemiddel en celscheider. Figuur 2 illustreert deze hoofdcomponenten.

FIGUUR 2 HOOFDCOMPONENTEN VAN DE ARVIA MODULE BIJ TOP-DOWN TOEPASSINGEN



In een top-down systeem wordt meestal een terugspoelmechanisme geïnstalleerd om bedverdichting tegen te gaan. Er wordt dan tijdens het uitvoeren van regulier onderhoud een spoeling van het filtermedium geïnitieerd.

Het bottom-up systeem is zo ontworpen dat zwevende vaste stoffen in het voedingswater zullen bezinken en worden getourneerd voordat ze in contact komen met het filterbed. Daartoe wordt 5-10% van het voedingswater als spoelbypass gebruikt en gerecirculeerd naar de conventionele zuiveringsinstallatie.

De elektroden bestaan uit grafiet en fungeren als stroomverdelers naar het adsorptiebed, dat in contact staat met de elektroden en functioneert als een 3D-uitbreiding van de elektroden. De celafscheider wordt ingeklemd tussen twee adsorptiebedden, die tussen de twee grafiet-elektroden wordt ingeklemd. De positief geladen anode wordt verbonden met één van de elektroden en de negatief geladen kathode wordt verbonden met de andere. De celafscheider scheidt deze gepolariseerde adsorptiebedden van elkaar, waardoor het systeem als een elektrochemische cel kan werken (figuur 2). Overige componenten, zoals afdichtingsmiddelen, leidingwerk en behuizingsmaterialen, zijn op maat gemaakt voor de toepassing.

De modules worden gevoed met een gelijkstroom. Door middel van het tijdelijk veranderen van de stroomrichting, kunnen metalen en andere niet-oxiderende achtergrondverbindingen die adsorberen op het filtermedium verwijderd worden.

De eencellige technologie kan worden opgeschaald tot modulaire banken van elektrochemische cellen. Schaalvergroting wordt bereikt door middel van het uitbreiden van het actieve gebied van de elektrode. Eenmaal geïntegreerd en in een container geplaatst, kan het systeem worden ingezet als een 'plug&play' systeem met een minimale operationele complexiteit. Dit maakt het mogelijk om eenvoudig een pilot- of grootschalige installatie in te bouwen in bestaande zuiveringssystemen.

Arvia ontwikkelt momenteel een behandelingssysteem voor grote schaal toepassingen dat het mogelijk maakt om elektrochemische cellen onder te dompelen in grote watertanks of andere bestaande tanks, zodat de bestaande infrastructuur van een zuiveringsinstallatie kan worden hergebruikt, bijvoorbeeld betonnen bekkens die oorspronkelijk werden gebruikt voor sedimentatie- of filtratiedoeleinden. Dit systeem zal een gravitatie-systeem zijn dat werkt in bottom-up modus.

Verwacht wordt dat de in het voedingswater achtergebleven vaste stoffen in de tank zullen bezinken alvorens het vaste bed te bereiken, zodat verstopping kan worden vermeden. Bezonken deeltjes worden via een 5-10% recirculatiestroom uit de tank verwijderd en gefilterd alvorens het water terug te sturen naar het beginpunt van de installatie.

2.3 INPASSING IN DE NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK

Het Arvia Nyex™ systeem is relatief eenvoudig te integreren in bestaande behandelingsreinen, mits er voldoende fysieke ruimte beschikbaar is. Het systeem is modulair van aard en kan daarom worden aangepast aan de eisen van de locatie. De modules kunnen eventueel in bestaande tanks van een zuiveringsinstallatie worden ingebouwd, waardoor een efficiënt gebruik van de middelen mogelijk is. Omdat het gaat om een nageschakelde techniek zonder enige interactie met voorgaande zuiveringstappen, zal het systeem geen nadelige effecten hebben op de dagelijkse bedrijfsvoering van de RWZI.

Om het systeem optimaal te laten functioneren, moet aan een aantal eisen worden voldaan met betrekking tot de kwaliteit van het te behandelen afvalwater:

- Zware metalen < 5 mg/l
- TSS <10 mg/l
- Hardheid: < 500 mg/l
- Temperatuur < 55 °C
- pH: 7 - 8

De enige factor in de algemene Nederlandse RWZI-praktijk die in potentie afwijkt van deze eisen is het TSS-gehalte (TSS: Total Suspended Solids = Totaal Zwevende Deeltjes/Stof). Alle Nederlandse RWZI's zijn verplicht om een TSS-gehalte van <30 mg/l te halen. In de praktijk zullen de meeste RWZI's echter een veel lager TSS-gehalte hebben dan de norm voorschrijft. De concentratie is afhankelijk van de werking, de leeftijd, de hydraulische belasting en de capaciteit van de installatie.

Op basis van het voorgaande, worden de volgende conclusies getrokken:

- Als een AWZI een extra filtratiestap heeft, bijvoorbeeld zand of mechanische filters of een MBR, dan kan de Arvia technologie worden geïnstalleerd zonder extra voorbehandeling.
- Is deze filtratiestap niet aanwezig, dan zal een analyse van historische gegevens nodig zijn om te bepalen of een bijkomende voorbehandeling nodig is.

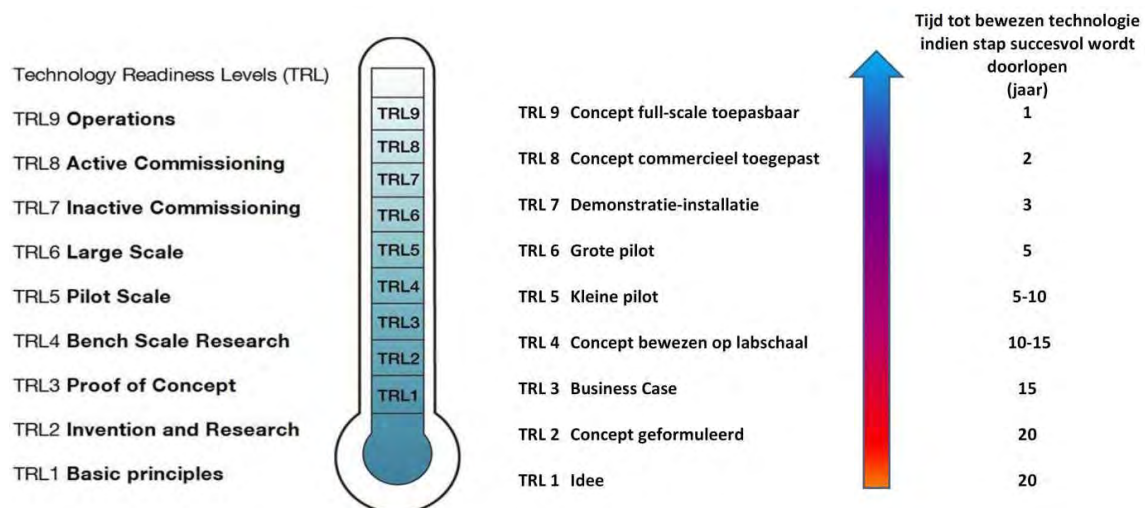
Aangezien dit tweede punt afhankelijk is van verschillende factoren, zal het van geval tot geval bepaald moeten worden. In de hiernavolgende casestudy (hoofdstuk 5) is er voorlopig van uitgegaan dat er geen extra voorbehandeling nodig is.

2.4 TECHNOLOGY READINESS LEVEL (TRL)

Arvia bedrijft nu en in het verleden meerdere pilots met als doel het verwijderen van specifieke moeilijk te verwijderen stoffen, zowel op drink- als afvalwaterzuiveringen. Daarmee hebben ze inmiddels veel ervaring opgedaan met de technologie en kunnen zij operationele aspecten continu blijven verbeteren.

Tegelijkertijd is tot op heden alleen ervaring opgedaan op relatief kleine schaal en moet er nog nagedacht worden over een goed opschaalmodel dat zowel technisch als financieel haalbaar is. Op dit vlak moet nog veel gebeuren. Op basis van deze overwegingen wordt de TRL momenteel geschat op 6.

FIGUUR 3 STOWA DEFINITIE TECHNOLOGY READINESS LEVEL (TRL)



3

VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN

3.1 EERDER UITGEVOERDE STUDIES MET BETREKKING TOT MICROVERONTREINIGINGEN

Arvia heeft tot op heden enkele pilotstudies en laboratoriumschaal behandelingsproeven uitgevoerd met afvalwatermonsters van verschillende installaties. De resultaten en testcondities waaronder dit gebeurde, worden in tabel 3 weergegeven. Afhankelijk van de specifieke installatie- en waterkarakteristieken bedroeg de empty bed contact time (EBCT) in het systeem 30-45 minuten en varieerde het energieverbruik tussen 0,2 en 5,3 kWh/m³.

TABEL 3 TESTCONDITIES & RESULTATEN M.B.T. GIDSSTOFFEN UIT EERDERE STUDIES OP AFVALWATER

Test gedaan voor	Capaciteit (m ³ /d)	Duur	EBCT (Min.)	Energie-input (kWh/m ³)	Influent DOC (mg/l)	Verwijdering (%)	Monstername
PWNT (2018)	Lab	2 weken	45	0,2-0,4	5	< LOD	4 st.
Bülach (2018)	Lab	4 weken	38	2,5	1,8	94-99	5 st.
Nersingen (2017)	Lab	2 weken	30	2,5-5,3	4,1	89-98	3 st.
Anglian Water (2016)	3.6 (pilot)	1 jaar	45	0,8-1,2	10	71-92	10 x per maand

Alle analyses werden uitgevoerd en gevalideerd in geaccrediteerde laboratoria. De resultaten zijn afkomstige uit eerdere studies en komen gedeeltelijk overeen met de lijst van 11 gidsstoffen van het ministerie van I&W. In dit rapport worden alleen de resultaten die betrekking hebben op de gidsstoffen getoond, overige analyseresultaten worden in bijlage A gepresenteerd.

Bij de meeste proeven lagen de concentraties van de gemeten gidsstoffen in het bereik van 0,1-10 µg/L, met uitzondering van de proef bij PWNT waar de concentraties een factor 1000 lager waren en na verwijdering veelal niet meer gedetecteerd werden.

Een belangrijke factor voor het verwijderingsrendement is het DOC-gehalte (Dissolved Organic Compounds) van het voedingswater. Het DOC-gehalte is een indicator voor organisch achtergrondmateriaal dat concurreert met microverontreinigingen voor adsorptiesites en OH-radicalen. Arvia meldt dat de verwijdering van DOC soms lager was dan de verwijdering van microverontreinigingen wat wijst op een geringe concurrentie en een hoge selectiviteit van het proces.

Desalniettemin, wordt voor verdere metingen aanbevolen om bij het vergelijken van de procesefficiëntie tussen verschillende installaties rekening te houden met het DOC-gehalte in het voedingswater. Daarmee concludeert Isle dat de resultaten van de pilot bij Anglian Water het meeste representatief zijn voor de casestudy die in hoofdstuk 5 verder wordt uitgewerkt. In de casestudy wordt namelijk uitgegaan van de DOC-gehalte van 11 mg/L.

3.2 VERWIJDERING 11 GIDSSTOFFEN

In alle voorgaande proeven op afvalwater, was het verwijderingsrendement op de gidsstoffen hoog (tabel 4). De meest complete dataset voor de verwijdering van stoffen uit stedelijk afvalwater is die van de Anglian Water studie. Zoals in de vorige paragraaf beschreven, komen de condities ook het meest overeen met de condities zoals voorgeschreven in de casestudy. In dit geval werd een gemiddelde verwijdering van 84% bereikt voor de gemeten gidsstoffen met een variatie tussen de 70 en 92%. De experimenten werden echter enkele jaren geleden uitgevoerd en sindsdien zijn er procesverbeteringen en optimalisaties doorgevoerd, vooral met betrekking tot het energieverbruik.

TABEL 4 VERWIJDERING VAN GIDSSTOFFEN IN EERDERE PROEVEN

Gidsstof	Anglian Water	Nersingen	PWNT	Bülach	Range
Benzotriazool		89		96	89 – 96
Clarithromycin	82,5			96,3	82,5 – 96,3
Carbamazepine	70,6			98,6	70,6 – 98,6
Diclofenac	91,1	97		98,7	91,1 – 98,7
Metoprolol		98	Below LOQ	94,3	94,3 – 98
Hydrochlorothiazide		96		95,7	95,7 – 96
Mix van 4- en 5-methylbenzotriazole	84,1	95		96	84,1 – 96
Propranolol	92,1		Below LOQ		92,1
Sotalol			Below LOQ		n.d.
Sulfamethoxazole		95	89	99	89 – 99
Trimethoprim			Below LOQ		n.d.

De proeven in Nersingen en Bülach werden ook uitgevoerd op afvalwatermonsters, maar dit waren slechts laboratoriumproeven en beide watertypes bevatten aanzienlijk minder DOC dan de Anglian Water monsters. Dit, in combinatie met het hoge stroomverbruik (2,5-5,3 kWh/m³), kan de extreem hoge gemiddelde verwijderingspercentages van respectievelijk 95% en 97% met min of meer gelijke retentietijden verklaren. Dergelijke hoge stroomverbruiken zijn echter niet realistisch in een grootschalige toepassingen gezien de onevenredig hoge kosten en CO₂ die daarmee gepaard zou gaan. De resultaten van deze proeven worden daarom alleen getoond om aan te tonen dat een aantal gidsstoffen, die niet werden gemeten bij de Anglian Water pilot, wel verwijderd kan worden.

Hoewel de proeven voor PWNT gedaan werden op afvalwater met zeer lage concentraties microverontreinigingen, waardoor verwijderingsrendementen ietwat vertekend zijn, heeft het experiment wel aangetoond dat er qua verwijdering weinig verschil te zien is wanneer het filterbed slechts 50% van de tijd onder stroom gezet wordt in plaats van continu. Hiermee wordt het energieverbruik gehalveerd (zie resultaten bijlage A).

3.3 CONCLUSIES EN VERTALING NAAR DIMENSIONERINGSKRITERIA VOOR DE CASESTUDY

In het algemeen is het Nyex™-proces in staat om een breed scala aan microverontreinigingen effectief te verwijderen, waaronder farmaceutische producten, steroïden, hormonen en hormoonontregelaars. In eerdere studies varieerde het verwijderingspercentage tussen de 70 en 99%, afhankelijk van de specifieke stof, werkingsomstandigheden en afvalwaterkenmerken.

Zoals bij elk ander verwijderingsproces wordt de verwijderbaarheid van een stof beïnvloed door zijn chemische eigenschappen. Zeer goede verwijderingspercentages werden bereikt voor metoprolol en hydrochloorthiazide, die ook in andere studies (Margot, et al., 2013) gemakkelijk adsorbeerbare en oxideerbare stoffen bleken te zijn. Voor Diclofenac, Sulfamethoxazool en Candesartan is met het Nyex™-proces een zeer goede verwijdering aangetoond, hoewel ze hydrofiel zijn en dus naar verwachting minder adsorbeerbaar (Margot, et al., 2013).

Het proces is zeer flexibel, zodat hogere verwijderingspercentages kunnen worden bereikt, indien nodig, door de energie-input in het systeem te verhogen of door de verblijftijd te wijzigen. Op basis van de resultaten van de Anglian Water pilot en de PWNT proeven, waarin werd aangetoond dat bij een pulserende stroomtoepassing van 50% geen significant daling in verwijdering kan worden gezien, concludeert Isle dat een verwijdering van minimaal 7 van de 11 gidsstoffen met ongeveer 80% - 85% kan worden bereikt op een typische gemeentelijke afvalwaterzuiveringsinstallatie onder de volgende omstandigheden:

- EBCT: 30 - 45 minuten
- Energie input: 0,8 – 1,2 bij 50% pulsmodus, energieverbruik is 0,4 – 0,6 kWh/m³

De energiebehoefte is gebaseerd op het voorgeschreven DOC-gehalte van 11 mg/L met als uitgangspunt dat er 50% van de tijd gepulseerd stroom wordt toegepast. Er wordt voor gekozen om een EBCT van 45 min toe te passen bij droog wateraanvoer (DWA). Bij de hydraulische piek capaciteit, die overeenkomstig met de ontwerp DWA-piek 1,7 x hoger ligt is de verblijftijd van 27 min. Daarmee valt de gehele capaciteit ongeveer binnen de eerdergenoemde range en wordt gezorgd voor een continu hoog verwijderingsrendement.

Tot slot wordt opgemerkt dat Arvia weinig onderzoek lijkt te doen naar de optimalisatie van de EBCT. De meeste testen en pilot onderzoeken worden uitgevoerd met zeer hoge (30-45 minuten) verblijftijden. Een reductie in verblijftijd kan een significante reductie in investeringskosten opleveren en de techniek daarmee aantrekkelijker maken. Omdat geen duidelijk bewijs is geleverd van hoge verwijderingsrendementen bij een mogelijk lagere verblijftijd kan voor dit onderzoek niet worden gerekend met een lager getal.

Ook zouden eventuele verdere reducties in energieverbruik door korter pulsen in de toekomst een aantrekkelijker zuiveringssysteem opleveren. Meer onderzoek is nodig om aan te tonen dat deze reducties haalbaar zijn bij een blijvend hoog verwijderingsrendement.

4

EFFECT OP ECOTOXICOLOGIE

4.1 VORMING VAN RESTPRODUCTEN

Het Nyex™-systeem werkt deels door middel van elektrochemische oxidatie door de vorming van OH-radicalen. OH-radicalen worden beschouwd als de sterkste oxidanten die in de waterzuivering kunnen worden gebruikt en die oxideren zonder onderscheid te maken tussen organische stoffen. Vaak worden er bij oxidatie echter ook schadelijke afbraakproducten gevormd.

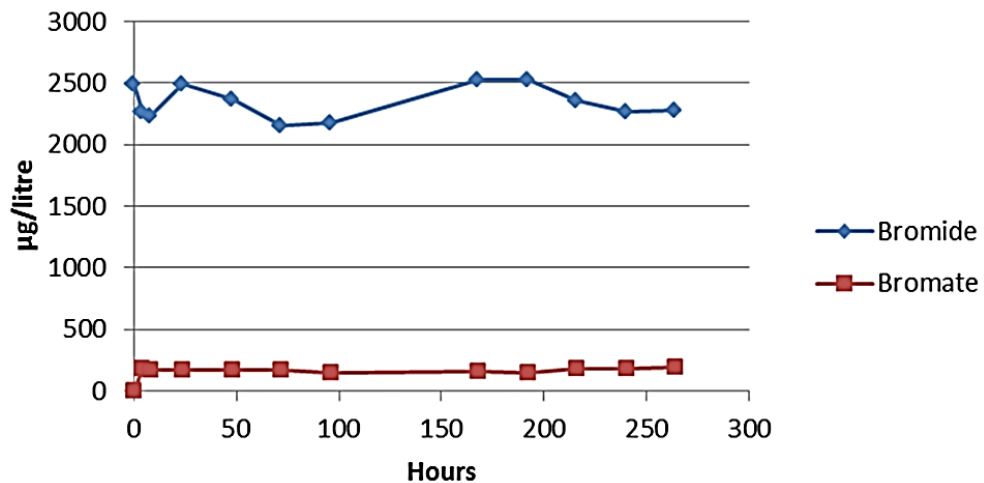
Het voordeel van het Nyex™ systeem ten opzichte van andere oxidatieve processen is dat eventuele afbraakproducten wederom verwijderd zullen worden door adsorptie en daaropvolgende elektrochemische oxidatie. Het huidige inzicht is daarom dat organische verbindingen in theorie volledig gemineraliseerd zullen worden en dat er nauwelijks bijproducten gevormd zullen worden.

In de praktijk zijn er echter nog geen gedetailleerde chemische analyses uitgevoerd met betrekking tot de vorming van afbraakproducten. Dit moet deel uitmaken van toekomstige projecten die momenteel in voorbereiding zijn.

4.2 BROMAATVORMING

Het effect van het Nyex™-proces op de vorming van bromaat is onderzocht, als onderdeel van een eerdere studie. Alle resultaten zijn geanalyseerd door een extern geaccrediteerd laboratorium. De resultaten (zie figuur 4) van dit onderzoek toonden een nominale omzetting van bromaat van 0,3 - 4,9 mol % omzetting aan voor een verblijftijd van 3 - 30 minuten en een energie-input van 0,3 - 1 kWh/m³.

Dit is lager dan het verwachte omzettingsbereik van ozon, dat ca. 5 - 25 mol% bedraagt, afhankelijk van de toepassing en dosering (Ratpukdi, Casey, DeSutter, & en Eakalak Khan, 2011) en komt overeen met eerdere onderzoeksbevindingen dat bromaat voornamelijk gevormd wordt door ozon in plaats van OH-radicalen (Kishimoto & Nakamura, 2012). Andere studies naar bromaatvorming uit bromide toonden echter aan dat dit ook kon plaatsvinden door elektrochemische oxidatie (Jarvis, Smith & Parsons, 2007; von Gunten & Oliveras, 1998) (Jarvis 2007, von Gunten 1998).



Arvia's studie werd uitgevoerd onder gecontroleerde omstandigheden zonder significante hoeveelheden andere organische stoffen, terwijl in de meeste praktische toepassingen OH-radicalen ook zullen reageren met andere organische stoffen, wat naar verwachting zal leiden tot een nog lagere bromaatvorming. Het effect van retentietijd en energie-input zal in de toekomst in meer detail bestudeerd moeten worden.

4.3 GEMETEN ECOTOXICOLOGISCHE EFFECTEN

In een eerdere afvalwaterstudie, waarbij de Nyex™-behandeling werd toegepast als nageschakelde zuiveringsstap, werden ecotoxicologische metingen uitgevoerd op monsters van influent en effluent. De uitgevoerde metingen werden uitgevoerd door een extern laboratorium volgens vijf ISO-methoden die in verschillende EG-BREF-BAT documenten worden aanbevolen (tabel 5).

TABEL 5 UITGEVOERD TOXICITEITSTESTEN

Test	Test details
MicroTox	Acute toxiciteit op bacteriën
Daphnia	Acute toxiciteit op Daphnia
Algen	Groeisnelheid van algen
Lemna minor	Groeisnelheid van kroos
Vis embryo	Mortaliteit van het embryo

De MicroTox-, Daphnia- en Vis Embryo-tests waren allemaal negatief voor en na de Nyex™-behandeling. De Algen- en Lemna minor tests wezen op een toxiciteit van het secundaire gezuiverde afvalwater, dat door de Nyex™-behandeling werd verwijderd, oftewel een afname van de toxiciteit.

Geen van de tests toonden een toename van de toxiciteit aan als gevolg van de mogelijke vorming van bijproducten.

4.4 CONCLUSIES MET BETREKKING TOT ECOTOXICOLOGISCHE EFFECTEN

Net als elk ander oxidatieproces brengt het Nyex™ proces in principe een risico van de vorming van toxische bijproducten met zich mee. De theoretische kennis is echter dat door de her-adsorptie en verdere oxidatie van eventuele afbraakproducten, een volledige mineralisatie van organisch materiaal optreedt en het risico daarmee lager is dan bij andere technieken. Er werd inderdaad experimenteel aangetoond dat de omzetting van bromide in bromaat een stuk lager is ten opzichte van ozon en dat er een zekere vermindering van de ecotoxiciteit na de behandeling is.

Op basis van deze waarnemingen en argumenten is het waarschijnlijk dat de ecotoxiciteit van het water aanzienlijk zal afnemen. Of dit meer dan 50% bedraagt, moet in een pilot-screening worden beoordeeld. Een gedetailleerde analytische screening op de vorming van afbraakproducten is tot op heden nog niet uitgevoerd.

5

CASE STUDY – ONTWERP 100 000 I.E. RWZI

5.1 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN & PROCESONTWERP

Ter beoordeling van de kosten en de CO₂ footprint van de Arvia technologie wordt in dit hoofdstuk een casestudy uitgewerkt voor de toepassing op een Nederlandse RWZI met een capaciteit van 100 000 inwonerequivalent (i.e.) die 7 665 000 m³/jaar (21 000 m³/dag x 365 dagen) behandelt.

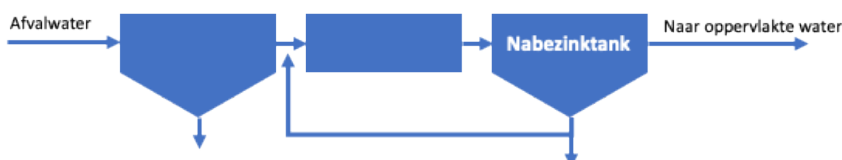
Het systeem wordt als nageschakelde zuiveringsstap geïnstalleerd. Minimaal 70% van het jaarlijkse volume wordt behandeld voor microverontreinigingen, wat overeenkomt met de volgende ontwerpspecificaties:

- Gemiddelde dagelijks afvalwatervolume: 21 000 m³/d
- Jaarlijks behandeld volume (70 % van het jaarvolume): 5 365 500 m³/jaar
- DWA: 612,5 m³/h
- Ontwerp piek DWA & min. hydraulisch vermogen: 1040 m³/h

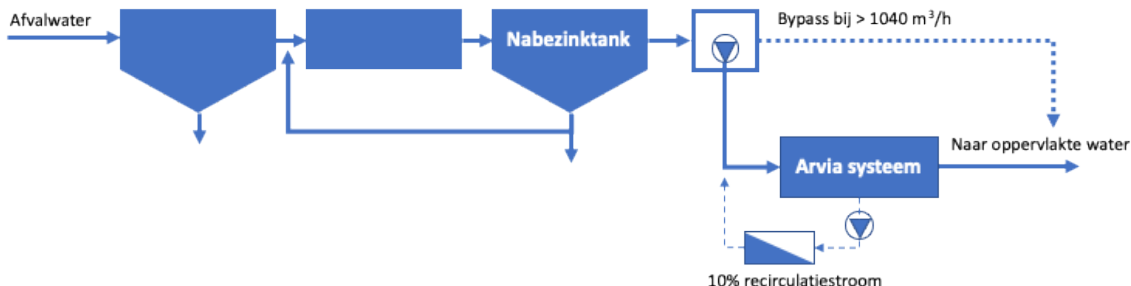
Figuur 5 laat zien hoe het systeem past in het zuiveringsschema van de waterzuiveringsinstallatie.

FIGUUR 5 INPASSING NYEX(TM) IN RWZI

Situatie zonder nageschakelde techniek



Situatie met nageschakelde techniek



Onder normale omstandigheden wordt al het afvalwater naar het Arvia systeem geleid, dat stromen tot 1040 m³/h kan verwerken. Een bypass wordt geïnstalleerd om extra water direct naar het lozingspunt te leiden bij grotere buien. Met een capaciteit van 1040 m³/h wordt 70% van het totale afvalwaterdebiet gezuiverd op microverontreinigingen. Omdat het systeem geheel los van de RWZI functioneert, heeft het geen effect op de werking van de zuivering.

Er wordt een toevoergemaal geïnstalleerd om het Nyex™-proces te voeden. Zoals eerder benoemd, wordt een verblijftijd van 45 minuten aangehouden om een gemiddelde OMP-verwijdering van 80 - 85% te bereiken. Dit zal worden gerealiseerd door het installeren van vijf gelijk gedimensioneerde betonnen tanks, elk met 46 elektrochemische modules die parallel worden gebruikt. Elke betonnen tank is 34,6 m lang, 3,2 m breed en 2,5 m diep. Elke module bevat 1,2 ton Nyex™ media, wat een totale massa van 276 ton filtermateriaal oplevert.

FIGUUR 6

LAYOUT & HOOFDCOMPONENTEN ARVIA NYEX™ SYSTEEM



Het systeem wordt van onder gevoed en het behandelde effluent wordt opgevangen in een gemeenschappelijke lijn tussen de modules. Zwevende stoffen in het voedingswater die neerslaan op de bodem van de tanks, worden uit het systeem geleid met een bypasswaterstroom (10% van het voedingswater). Dit water wordt mechanisch gefilterd om vaste stoffen te verwijderen en opnieuw gecirculeerd naar de nageschakelde zuiveringsstap.

5.2 OPERATIONELE OMSCHRIJVING

Het systeem werkt continu met een gecontroleerde maximale waterstroom van 1040 m³/h. Het filtermateriaal wordt met pulsen 50% van de tijd onder stroom gezet, waarbij een stroomverbruik van 0,4 - 0,6 kWh/m³ voldoende zou moeten zijn voor een beoogde 80 - 85% verwijdering van microverontreinigingen.

De bedrijfsomstandigheden en afvalwaterparameters worden bewaakt met online sensoren en kunnen automatisch worden bijgestuurd. Naar schatting verliest de opstelling jaarlijks 2% van het Nyex™-filtermedium door slijtage en wordt eens per jaar aangevuld. Dat komt overeen met een jaarlijkse massa van ongeveer 5,5 ton te vervangen Nyex™ media.

De elektroden hebben een verwachte levensduur van ca. 7 jaar totdat ze moeten worden vervangen. Dit zijn conservatieve schattingen, omdat er nog geen lange termijn operationele ervaring is opgedaan.

5.3 KOSTENANALYSE

5.3.1 INVESTERINGSKOSTEN

De geraamde kapitaalkosten omvatten de vijf betonnen tanks, 230 Nyex-modules met media, elektrische componenten en behuizingsinfrastructuur (leidingen en pompen), alsmede automatiseringsapparatuur. De geschatte kosten voor het Nyex™ systeem hebben een zekere mate van onzekerheid, omdat er geen ervaring is met de toepassing ervan op deze schaal. Verwacht wordt dat de werkelijke kosten in de toekomst lager zullen zijn, dankzij de toenemende systeemoptimalisatie en ontwerpervaring.

Bovenop de kostenraming vraagt STOWA om opslag van de volgende factoren¹:

- Onvolledigheidsfactor van 25%
- Aannemerskosten van 25% bestaande uit kosten aannemer om het werk uit te voeren, o.a. algemene bouwplaatskosten, uitvoeringskosten, algemene kosten, winst en risico
- Bouw- en Stichtingskosten van 80% bestaande uit BTW, onvoorzien, engineering, projectmanagement, directievoering, verzekeringen, tijdelijke voorzieningen tijdens ombouw en opstart, opleiding en communicatie.

De afschrijvingen op kapitaal werd berekend met een rentevoet van 4% en afschrijvingstermijnen zoals aangegeven in tabel 6.

TABEL 6 UITSPLOITING KOSTENRAMING IN VERSCHILLENDE DISCIPLINES EN JAARLIJKSE AFSCHRIJVINGEN OP KAPITAALLASTEN

Discipline	Civiel	WTB & E	P.A.	Totaal
Geschatte Kosten (€)	€ 744 320	€ 2 386 198	€ 150 000	€ 3 280 518
Kosten incl. STOWA factoren (€)	€ 1 711 936	€ 5 488 255	€ 345 000	€ 7 545 191
Afschrijvingstermijn (jaar)	30 jaar	15 jaar	5 jaar	-
Jaarlijkse Afschrijving (/jaar)	€ 100 000	€ 494 000	€ 78 000	€ 672 000

5.3.2 OPERATIONELE KOSTEN

ENERGIEKOSTEN

Op basis van de huidige beschikbare bedrijfsgegevens wordt ervan uitgegaan dat de Nyex™ zuivering gemiddeld 0,4 - 0,6 kWh/m³ verbruikt voor de oxidatie van microverontreinigingen bij gebruik in een 50% pulserende modus, waardoor het verreweg de hoogste operationele kostenpost is (tabel 6).

Verdere optimalisatie van de elektrische puls-modus kan naar verwachting het energieverbruik in de toekomst verder verminderen. Er is echter geen bewijs om deze veronderstelling op dit moment te onderbouwen.

Bovenop energie voor de oxidatie van microverontreinigingen is er energie nodig om water door de nageschakelde zuiveringsstap te pompen. Er wordt uitgegaan van een pomphoogte van 8 m, zoals standaard voorgeschreven door STOWA voor alle nageschakelde technieken. Dit betekent een additioneel energieverbruik van 0,035 kWh/m³, wat het totale energieverbruik op 0,435 – 0,635 kWh/m³ brengt.

¹ Arvia is ervan overtuigd dat de opslagfactoren zoals die door STOWA worden berekend overdreven zijn omdat het systeem modulair is en dus geen dergelijk grote overheadkosten benodigd.

Met een voorgeschreven energieprijis van 0,1 €/kWh zijn de totale energiekosten 257 000 – 375 000 €/jaar.

BEHANDELING VAN SPOELWATER

Een verondersteld volume van 10% wordt gerecirculeerd vanaf de bodem van de betonnen tanks die de Arvia modules bevatten. Dit water bevat zwevende stoffen die door middel van mechanische filtratie worden verwijderd. Vervolgens wordt het water teruggevoerd naar het toevoergemaal.

Voor de berekening van de totale kosten van 5 000 €/m³ is uitgegaan van de voorgeschreven kosten van 0,01 €/m³ per jaar.

ONDERHOUD

Bij het berekenen van onderhoudskosten wordt minimaal afgeweken van de voorgeschreven berekening. Er wordt namelijk geen 3% van de bouwsom voor elektrische componenten meegenomen in de berekening omdat Arvia een losse kostenpost opneemt voor het aanvullen van filtermateriaal en het eens per 7 jaar vervangen van de elektroden. Hiervoor raamt het bedrijf in totaal € 96 000,-.

Bovenop dit onderhoud worden overige onderhoudsposten, 3% van de bouwsom op alle mechanische en procesautomatiseringsapparatuur en 0,5% op civiele onderdelen gewoon meegenomen. In totaal komt dit neer op 146 000 €/jaar.

PERSENEEL

Het systeem van Arvia is geautomatiseerd en vereist een minimale tussenkomst van de operator. Er moeten echter regelmatig controles en analyses worden uitgevoerd. Er wordt daarom gerekend op een toegenomen werkdruk van ca. 0,4 FTE. Tegen een vergoeding van 50 000 €/fte zal de extra personeelsbezetting ongeveer 20 000 €/jaar kosten.

TABEL 7

GERAAMDE OPERATIONELE KOSTEN VAN DE ARVIA NYEX™ TECHNOLOGIE

Post	Jaarlijkse Kosten
Energieverbruik	€ 257 000 – 375 000
Behandeling spoelwater	€ 5 000
Onderhoud	€ 146 000
Personeel	€ 20 000
Totaal operationele kosten / jaar	€ 428 000 – 546 000

5.3.3 KOSTEN PER M³ GEZUIVERD WATER

In deze casestudy is geen rekening gehouden met eventuele additionele voorzuiveringsstappen. Er wordt aangenomen dat het Nyex™ systeem direct toepasbaar is op het effluent van de zuivering. Het systeem heeft een hydraulische capaciteit van 1040 m³/h en zuivert daarmee 70% van het jaarvolume, overeenkomstig met 5 365 500 m³/jaar.

TABEL 8

OVERZICHT VAN DE KOSTEN VOOR HET VERWIJDEREN VAN MICROVERONTREINIGINGEN

Post	Hoeveelheid
Afschrijving kapitaallasten (/jaar)	€ 672 000
Operationele kosten (/jaar)	€ 428 000 – 546 000
Behandelde jaarmvolume (70% jaarmvolume)	5 365 500 m ³ /jaar
Kosten zuiveren water:	0,21-0,23 € / m³

5.3.4 CO₂ FOOTPRINT

De berekening van de CO₂ footprint is opgesplitst in twee delen, omdat het STOWA-model geen rekening houdt met de invoer van afwijkende filtermaterialen en andere verbruiksmaterialen. Daarom is besloten om alle standaardaspecten in het model te berekenen en vervolgens de footprint van het filtermateriaal los daarbij op te tellen. De berekening wordt getoond in bijlage C.

- Het eerste deel van de berekening is gedaan op basis van het model van STOWA. De gemaakte aannames en input voor het model zijn weergegeven in de bijlage. De totale CO₂ footprint zoals berekend in het STOWA-model is 240 – 345 g CO₂/m³ voor een energieverbruik van 0,4 en 0,6 kWh/m³ respectievelijk.

- Het tweede deel van de berekening is apart gedaan. In dit deel is gekeken naar de CO₂ footprint van het filtermedium. De CO₂ footprint van het medium is vastgesteld op ongeveer 4,4 kg CO₂/kg Nyex™, gebaseerd op literatuurwaarden voor synthetische grafiet (Romare & Dahllöf, 2017). Met een aanvulling van slechts 2% per jaar is de additionele CO₂ footprint slechts 5 g CO₂/m³. Gezien de geringe bijdrage van dit tweede onderdeel is geen verdere gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met betrekking tot een eventueel afwijkend (hoger of lager) percentage materiaalverlies of een hogere footprint van het filtermateriaal.

Als beide onderdelen worden opgeteld, is de totale CO₂ footprint van de Arvia technologie 245 - 350 g CO₂/m³. Het grootste deel (ongeveer 200 g CO₂/m³) komt van de energie die nodig is om het Nyex™ filtermedium te regenereren. Toekomstige optimalisaties die het energieverbruik verder verminderen, zoals door Arvia nagestreefd, kunnen daarom de footprint aanzienlijk verminderen, waardoor het mogelijk concurrerender wordt met ozon. Hiervoor zou het energieverbruik teruggebracht moeten worden tot ca. 0,1 kWh/m³.

6

CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

Isle Utilities heeft het Nyex™-proces van het Britse bedrijf Arvia Technology Ltd. grondig bestudeerd en geëvalueerd op basis van de werkings- en dimensioneringsprincipes, de mogelijkheden tot inpassing in de Nederlandse zuiveringspraktijk, het verwijderingsrendement op 11 door het ministerie van I&W aangewezen gidsstoffen, mogelijke ecotoxicologische effecten, kosten en de CO₂ footprint.

Kort samengevat concludeert Isle het volgende:

1. Het Nyex™ behandelingssysteem kan worden ingezet als een modulair systeem of als een retrofitsysteem voor bestaande faciliteiten door de inzet in bestaande betonnen tanks. Omdat het gaat om een nageschakelde techniek zal het systeem geen nadelige effecten hebben op de dagelijkse bedrijfsvoering van de RWZI. Een high-level analyse met betrekking tot de toepasbaarheid op Nederlandse RWZI's heeft de volgende conclusies opgeleverd:
 - a. Bij RWZI's met een filtratiestap, bijvoorbeeld zand- of mechanische filters of een MBR, kan de Arvia technologie worden geïnstalleerd zonder extra voorbehandelingsmaatregelen.
 - b. Zonder een aanwezige filtratiestap zal analyse van historische gegevens nodig zijn om te bepalen of extra voorbehandeling nodig is, voornamelijk om zwevende stoffen te verwijderen.
2. De twee belangrijkste dimensioneringsgrondslagen zijn de verblijftijd (empty bed contact time) en het toegepaste elektrische vermogen; de verblijftijd bepaalt het adsorptieniveau op het Nyex™-bed en het vermogen bepaalt het oxidatieniveau in het bed.
3. Om een verwijderingsrendement van 80-85% te halen voor minimaal 7 van 11 gidsstoffen worden de volgende ontwerpcriteria vastgelegd:
 - a. Verblijftijd (EBCT): 45 minuten bij DWA. Daarmee is de verblijftijd bij ontwerp DWA-piek ca. 27 min. Mogelijk kunnen lagere retentietijden haalbaar zijn. Echter is de data om dit te ondersteunen niet aanwezig. Isle raadt Arvia aan in het vervolg meer nadruk te leggen op de impact van retentietijd en ook in pilots te testen met lagere verblijftijden.
 - b. Elektrisch vermogen: 0,8 - 1,2 kWh/m³ toegepast in een 50% van de tijd pulserende modus waardoor het energieverbruik uitkomt op 0,4 - 0,6 kWh/m³. Verdere reducties in energieverbruik zouden een significante impact hebben op de kosten en de CO₂ footprint. Arvia wordt aangespoord de puls-modus verder door te ontwikkelen, te optimaliseren en aan te tonen dat dit geen negatieve gevolgen op de verwijdering zal hebben.
4. Op basis van de werking van de technologie moeten organische stoffen theoretisch volledig gemineraliseerd worden. Ook is experimenteel aangetoond dat de omzetting van bromide naar bromaat lager is dan bij toepassing van ozon. Tot slot werd aan de hand van een aantal ecotoxicologische indicatoren aangetoond dat er een vermindering in toxiciteit plaatsvindt. Uit bovenstaande wordt het aannemelijk geacht dat de Nyex™ technologie een positief effect op de ecotoxicologie van het gezuiverde water zal hebben. Verder onderzoek moeten dit effect verder helpen kwantificeren.
5. De kosten en de CO₂ footprint van de technologie vallen hoger uit dan een combinatie van ozon en zandfiltratie waarmee deze techniek vergeleken dient te worden:

- a. De kosten worden zwaar beïnvloed door zowel de verblijftijd als de energiebehoefte van de technologie en komen daarmee iets (€ 0,04 – 0,06 /m³) hoger uit dan ozon.
 - b. De CO₂ footprint komt uit op 245 - 350 g CO₂/m³ afhankelijk van de verbruikte hoeveelheid energie. Dat is minimaal 2 x de CO₂ footprint van ozon en zandfiltratie en is daarmee zeer negatief. Ca. 200 g CO₂/m³ (bij totale footprint van 245) is hierbij afkomstig van het energieverbruik door oxidatie.
 - c. Bij een reductie van het de verblijftijd naar met ongeveer 33% komen de kosten ongeveer overeen met ozon. Zonder een verdere reductie in energieverbruik zou echter de CO₂ footprint nog steeds te zwaar wegen om dit een haalbare optie te laten zijn.
 - d. Bij een reductie van het energieverbruik naar ca. 0,15 kWh/m³ (ten opzichte van ca. 0,1 kWh/m³ voor ozon), komen de zuiveringskosten en de CO₂ footprint lager uit dan die van ozon.
6. Isle spoort Arvia aan verder onderzoek te blijven doen naar de mogelijkheden tot reductie in energieverbruik en verblijftijd bij gelijkblijvende hoge verwijderingsrendementen. Ook wordt aangeraden de beide parameters los van elkaar te variëren en de resultaten die daaruit voortkomen duidelijk en transparant op te stellen en te communiceren.

TABEL 9

SAMENVATTING VAN DE RESULTATEN UIT DE HAALBAARHEIDSTUDIE

	PACAS	O ₃ + zandfiltratie	GAK	Arvia Nyex™
CO ₂ footprint [g CO ₂ /m ³]	122	128	325	245 - 350
Kosten [€/m ³]	0,05	0,17	0,26	0,21 - 0,23
Verwijderingsrendement [%]	70 - 75	80 - 85	80 - 85	80 - 85

Concluderend is de haalbaarheid van de Arvia technologie beoordeeld op basis van CO₂ footprint, kosten en verwijderingsrendement. Hoewel de technologie dezelfde hoge verwijderingspercentages kan bereiken als conventionele technologieën en waarschijnlijk een positief effect zal hebben op de ecotoxiciteit van het behandelde water, levert het in vergelijking met de combinatie ozon en zandfiltratie geen verbetering op in de kosten of de CO₂ footprint. Vooral de laatste is aanzienlijk hoger. Daarom concludeert Isle dat de Nyex™ technologie op dit moment geen geschikt alternatief vormt voor conventionele methoden. Er wordt echter niet uitgesloten dat dit met een aantal toekomstige verbeteringen wel het geval zal zijn.

Arvia is ervan overtuigd dat het in staat zal zijn om het energieverbruik te verminderen, het ontwerp te verbeteren en de verblijftijd te verkorten waardoor zowel de CO₂ footprint als de kosten worden gereduceerd terwijl een hoog verwijderingsrendement wordt bereikt. Isle en de begeleidingscommissie blijven de technologie interessant vinden en moedigen het bedrijf aan haar inspanningen voort te zetten en eventuele verbeteringen met feiten te onderbouwen. Bij aantoonbare verbeteringen die leiden tot reductie in kosten en CO₂ is de commissie bereid de uitkomst van deze studie te heroverwegen.

7

BRONVERMELDINGEN

Bolong, N., Ismail, A., Salim, M., & Matsuura, T. (2009). A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. *Desalination*(239), pp. 229-246.

Jarvis, P., Smith, R., & Parsons, S. (2007). Modelling bromate formation during ozonation. *Ozone: Science & Engineering*(29 (6)), 429-442.

Kishimoto, N., & Nakamura, E. (2012). Bromate formation characteristics of UV irradiation, hydrogen peroxide addition, ozonation, and their combination processes. *International Journal of Photoenergy*.

Loos, R., Carvalho, R., António, D., Comero, S., Loccoro, G., Tavazzi, S., . . . Gawlik, B. (2013). EU-wide monitoring survey on emerging polar organic contaminants in wastewater treatment plant effluents. *Water Research*(47), pp. 6475-6487.

Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L. D., Hai, F. I., Zhang, J., . . . Wang, C. X. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, pp. 619-642.

Margot, J., Kienle, C., Magnet, A., Weil, M., Rossi, L., de Alencastro, L. F., . . . Barry, D. (2013). Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon? *Science of the Total Environment*(461-462), 480-498.

Nam, S.-W., Jo, B.-I., Yoon, Y., & Zoh, K.-D. (2014). Occurrence and removal of selected micropollutants in a water treatment plant. *Chemosphere*, pp. 156-165.

Nkrumah-Amoako, K., Khan, M., Parocki, D., & Nabeerasool, A. (2017). Technical and commercial considerations in the removal of priority substances as specified within the EU Water Framework Directive from treated domestic sewage. *11th European Waste Water Management Conference*. Leeds.

Rakic, V., Rac, V., Krmar, M., Otman, O., & Auroux, A. (2015). The adsorption of pharmaceutically active compounds from aqueous solutions onto activated carbons. *Journal of Hazardous Materials*(282), pp. 141-149.

Ratpukdi, T., Casey, F., DeSutter, T., & and Eakalak Khan, M. (2011). Bromate Formation by Ozone-VUV in Comparison with Ozone and Ozone-UV: Effects of pH, Ozone Dose, and VUV Power. *Journal of Environmental Engineering* .

Romare, M., & Dahllöf, L. (2017). The life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions from Lithium-Ion batteries. Swedish Environmental Research Institute.

Scheurer, M., Storck, F., Brauch, H.-J., & Lange, F. (2010). Performance of conventional multi-barrier drinking water treatment plants for the removal of four artificial sweeteners. *Water Research*(44 (12)), 3573-3584.

Sethi, V., & Clark, R. (1998, August). Cost estimation models for drinking water treatment unit processes. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*(5), pp. 223-235.

von Gunten, U., & Oliveras, Y. (1998). Advanced oxidation of bromide-containing water: Bromate formation mechanisms. *Environmental Science & Technology*(32), 63-70.

Wert, E., Gonzales, S., Dong, M., & Rosario-Ortiz, F. (2011). Evaluation of enhanced coagulation pretreatment to improve ozone oxidation efficiency in wastewater. *Water Research*(45 (16)), 5191-5199.

BIJLAGE A

ANALYSERESULTATEN EERDERE STUDIES

Compound	Inlet (µg/L)	Outlet (µg/L)	Removal (%)
Anglian Water			
10,11- epoxy-carbamazepine	0.07	0.04	43.4
atenolol	0.44	0.16	64
atorvastatin	0.21	0.02	89
azithromycin	0.19	0.03	83
benzo(a)pyrene	0.001	0.0001	83
carbamazepine	0.68	0.2	71
ciprofloxacin	0.31	0.03	90
clarithromycin	0.51	0.09	83
cypermethrin	0.00009	LOD	71
diclofenac	0.39	0.03	91
Diethylhexyl-phthalate	0.45	0.11	76
E1	0.00099	0.00008	92
E2	0.000146	0.000042	71
EE2	0.00019	0.00003	84
erythromycin	0.47	0.09	82
fluoranthene	0.0032	0.0004	87
fluoxetine	0.06	0.0046	92
hexabromocyclododecane	0.01	0.001	87
ibuprofen	0.35	0.13	64
metformin	4.34	2.36	46
Nonylphenol diethoxylate	0.07	0.02	76
Nonylphenol monoethoxylate	0.05	0.01	76
norsertaline	0.03	0.0042	85
ortho-hydroxy-atorvastatin	0.19	0.01	93
para-hydroxy-atorvastatin	0.27	0.03	89
propranolol	0.26	0.02	92
ranitidine	1.12	0.07	94
sertaline	0.05	0.004	91
triclosan	0.08	0.01	84
Jersey			
2,4-Dichlorophenoxyacetic acid	0.015	0.00705	53
atrazine desethyl	0.003	<0.003	LOD
atrazine desisopropyl	0.01	0.001	>90
boscalid	0.009	0.00504	44
carbendazim	0.004	<0.003	>25 (LOD)
clomazone	0.003	<0.003	LOD
clopyralid	0.008	0.005	37.5
diuron	0.01	<0.003	>70
ethoprophos	0.003	<0.003	LOD
fluaazifop-butyl	0.001	<0.001	LOD
gamma HCH/ lindane	0.009	0.00099	89

Compound	Inlet (µg/L)	Outlet (µg/L)	Removal (%)
mecoprop	0.005	<0.005	LOD
metalaxyl	0.002	<0.002	LOD
metazachlor	0.021	0.001995	90.5
oxadixyl	0.123	<0.005	>95.9
pirimiphos-ethyl	0.001	<0.001	LOD
terbutryn	0.001	<0.001	LOD
Bülach			
acesulfame K	0.31	0.07	77
amisulpride	0.29	0.01	97
benzotriazole	5.92	0.25	96
candesartan	1.17	0.01	99
carbamazepine	0.69	0.01	99
citalopram	0.28	0.01	96
clarithromycin	0.27	0.01	96
diclofenac	1.57	0.02	99
hydrochlorothiazide	0.46	0.02	96
irbesartan	0.17	0.01	94
mecoprop	0.07	<0.02	>71
metoprolol	0.35	0.02	94
sulfamethoxazole	1	0.01	99
venlafaxine	0.55	0.01	98
Nersingen			
1H-benzotriazole	6.8	0.75	89
4 & 5-methylbenzotriazole	0.88	0.04	95
candesartan	1.3	0.03	98
carbamazepine	0.51	0.02	96
diclofenac	1.2	0.04	97
hydrochlorothiazide	0.67	0.03	96
iomeprol	0.21	0.05	76
irbesartan	0.2	0.02	90
metoprolol	0.86	0.02	98
sulfamethoxazole	0.4	0.02	95

Compound	Units	Influent	0.4 kWh/m ³		0.2 kWh/m ³	
		Conc.	Conc.	%removed	Conc.	%removed
10,11-trans diolcarbamazepine	ng/l	17.3	6.4	63.01%	6.9	60.12%
acetylsulfamethoxazole	ng/l	1.144	0	100.00%	0	100.00%
atenolol	ng/l	1.1	0	100.00%	0	100.00%
bisoprolol	ng/l	0.6	0	100.00%	0	100.00%
carbamazepine	ng/l	13.5	0.3	97.78%	0.4	97.04%
coffeïne	ng/l	85.7	84.8	1.05%	55.2	35.59%
fenazon	ng/l	3.365	0.619	81.60%	0.381	88.68%
ifosfamide	ng/l	0.1	0.1	0.00%	0.1	0.00%
iopromide	ng/l	24.7	0	100.00%	13.1	46.96%
lidocaïne	ng/l	3.6	0	100.00%	0	100.00%
lincomycine	ng/l	0.6	0	100.00%	0	100.00%
losartan	ng/l	4.085	0	100.00%	0	100.00%
metformin	ng/l	126.3	29.8	76.41%	53.2	57.88%
metoprolol	ng/l	6	0	100.00%	0	100.00%
oxazepam	ng/l	2.3	0	100.00%	0	100.00%
primidon	ng/l	2	1.6	20.00%	1.7	15.00%
propranolol	ng/l	0.4	0	100.00%	0	100.00%
sotalol	ng/l	1.7	0	100.00%	0	100.00%
sulfamethoxazol	ng/l	5.757	0.661	88.52%	0.808	85.96%
temazepam	ng/l	2.1	0.5	76.19%	1.3	38.10%
theophylline	ng/l	7.078	0	100.00%	0	100.00%
trimethoprim	ng/l	1.2	0	100.00%	0	100.00%
acesulfaam	µg/l	0.389	0.304	21.85%	0.309	20.57%
cyclamaat	µg/l	0.064	0.052	18.75%	0.055	14.06%
saccharine	µg/l	0.064	0.048	25.00%	0.045	29.69%
sucralose	µg/l	0.954	0.773	18.97%	1.448	-51.78%

Acknowledgements

This work has been carried out within the Interreg 2 Seas project DOC2C's.

The DOC2C's project is a joint European collaboration with project partners from the water industry and universities in the 2 Seas Area to research and to exchange the results on Dissolved Organic Carbon (DOC) removal.

The DOC2C's consortium consists of **PWN Technologies R&D (NL)**, **South West Water (UK)**, **De Watergroep (BE)**, **Lille University (FR)** and **Delft University of Technology (NL)**.

BIJLAGE B

KOSTENCALCULATIES

NYEX CASE STUDY CALCULATION

SYSTEM DESIGN

Water fluxes

Annual wastewater volume	7665000	m ³ /yr
Average wastewater flow	875	m ³ /h
Annual treated wastewater (70% of incoming)	5365500	m³/yr
Treatment capacity (70% of incoming)	612,5	m ³ /h
Peak flow capacity	1040	m ³ /h
Bypass water	10	%

Dimensioning

Targeted average retention time	0,75	h
Number of tanks	5	
Filter media volume	459	m ³
Dimensions of one single module	1m x 1m x 2m	
Total number of modules	230	
Total filter surface area	230	m ²
Filter loading rate	2,7	m/h
Single tank volume	452	m ³

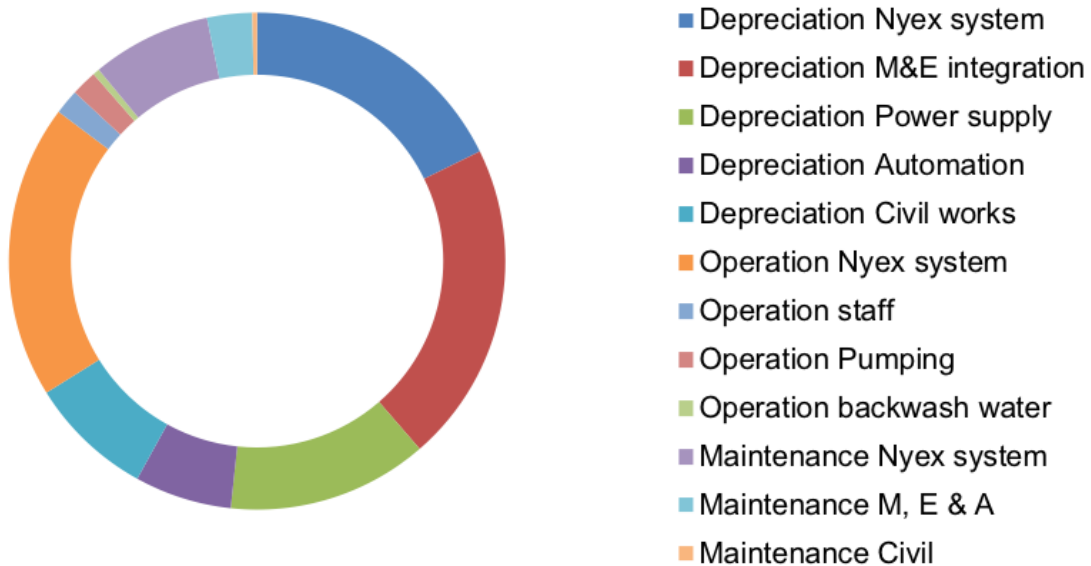
Nyex media

Nyex mass per module	1,2	t
Total Nyex mass	275,6	t
Yearly top-up (2% of mass)	5,5	t

CAPEX					
Mechanical and electrical cost details			STOWA Factors		
Nyex system	€ 1 056 170	Incompleteness factor	25%		
Power supply	€ 778 385	Contractor fee	25%		
Electrical and mechanical integration	€ 551 643	Construction and institutional	80%		
Subtotal M&E	€ 2 386 198				
Total costs and depreciation					
	Civil works	M&E	Automation	TOTAL	Unit
Subtotals	€ 744.320,00	€ 2.386.198	€ 150.000,00	€ 3.280.517	
Subtotal incl. Factors	€ 1.711.936,00	€ 5.488.255	€ 345.000,00	€ 7.545.191	
Depreciation term	30	15	5	-	year
Interest rate	4%	4%	4%	-	
Annual depreciation	€ 100.000,00	€ 494.000,00	€ 78.000,00	€ 672.000,00	/year
OPEX					
Energy consumption					
Energy for Nyex treatment			0,4 - 0,6	kWh/m ³	
Pumping energy			0,035	kWh/m ³	
Total energy consumption			0,435 - 0,635	kWh/m ³	
Total yearly energy consumption			2 567 392 - 3 747 802	kWh	
Energy price			0,1	€/kWh	
Total yearly energy costs			256 800 - 375 000	€/year	
Backwash water					
Annual backwash volume			536550	m ³	
Treatment costs			0,01	€/m ³	
Total yearly treatment costs			5000	€/year	
Maintenance					
Nyex component replacement			96000	€/year	
Maintenance civil			5000	€/year	
Maintenance M & A			45000	€/year	
Total yearly meintenance costs			146000	€/year	
Staff					
Staff			0,4	fte	
Staff price			50000	€/fte/year	
Yearly staff costs			20000	€/year	
Total OPEX			428 000 - 546 000	€/year	

TOTAL TREATMENT COSTS

Yearly OPEX	428 000 – 546 000	€/year
Yearly CAPEX depreciation	672 000	€/year
Yearly costs	1 100 000 – 1 218 000	€/year
Specific costs	0,21 – 0,23	€/m ³



BIJLAGE C

BEREKENING CO₂ FOOTPRINT**CO₂ footprint Arvia Nyex™****CO₂ footprint uit model (alle aspecten excl. footprint filtermateriaal)**

Invoerparameters model:

Naam	Hoeveelheid	Eenheid	Uitleg
Behandeld jaarvolume nabehandeling	5365500	m ³ /jaar	Volgens eis STOWA, min. 70% jaarvolume behandelen
Slib	6100	ton/jaar	Ongewijzigd
Drogestofgehalte	21,10%		Ongewijzigd
Energieverbruik Arvia	0,4 - 0,6	kWh/m ³	Verbruik regeneratie filtermedium + overige (instrumentatie)
Energie (elektrisch excl. Opvoeren water)	2146200 - 3219300	kWh/jaar	Energieverbruik o.b.v vorige regel
Opvoerhoogte nageschakelde techniek	8	m	Standaard STOWA model aangehouden
Percentage Spoelwater	10%		Standaard STOWA model aangehouden
IjzerChloride	260000	kg/jaar	Standaard STOWA model aangehouden
Polymeer	23168	kg/jaar	Standaard STOWA model aangehouden
Gewapend Beton	4030	m ³	Onbekend, geschat +/- gelijk aan GAK en O ₃ +ZF
CO₂ Footprintuit STOWA model:	240-345g	CO₂/m³	CO ₂ footprint Excl. Filtermateriaal
CO₂ footprint filtermateriaal			
Naam	Hoeveelheid	Eenheid	Uitleg
Filtermateriaal (100 000 i.e.)	275600	kg	Zie ontwerp
% filtermateriaal vervangen per jaar	2%		Tot heden werden verliezen van ca. 2-4% gemeten
Totaal filtermateriaal per jaar	5512	kg/jaar	
CO ₂ footprint Nyex	4,4	kg CO ₂ /kg	CO ₂ footprint is ongeveer gelijk aan dat van synthetisch grafiet. Waarde uit literatuur.
	24252,8	kg CO ₂ /jaar	CO ₂ footprint Basismateriaal excl. Enzymen
CO₂ footprint filtermateriaal:	4,5	gCO₂/m³	
TOTAAL	245 - 350	g CO₂/m³	