

HAALBAARHEIDSSSTUDIE ADOX EEN NEXT GENERATION ADSORPTIE – OXIDATIEPROCES VOOR DE VERWIJDERING VAN ORGANISCHE MICROVERONTREINIGINGEN UIT STEDELIJK AFVALWATER



RAPPORT

2022

10

HAALBAARHEIDSTUDIE ADOX

EEN NEXT GENERATION ADSORPTIE – OXIDATIEPROCES VOOR DE
VERWIJDERING VAN ORGANISCHE MICROVERONTREINIGINGEN
UIT STEDELIJK AFVALWATER

RAPPORT

2022

10

ISBN 978.90.5773.978.1



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 L.C. Rietveld – TU Delft
J.P. van der Hoek – TU Delft, Waternet
S.G.J. Heijman – TU Delft
N. Fausta – TU Delft
M. Fu – TU Delft
N. Jiang – TU Delft
Y. Doekhi-Bennani – Nijhuis Saur Industries
N. Stokhof – TU Delft

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

M. Mulder – Mirabella Mulder Wastewater Management
C.A. Uijterlinde – STOWA
G.B.J. Rijs – Rijkswaterstaat
R. Schemen – Waterschap de Dommel
A. van Nieuwenhuijzen – Witteveen + Bos
P.T. Li – Witteveen + Bos
M. Bechger – Waternet
J. van den Bulk – TAUW
M. Verhoeven – Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden
A. Kramer – Waterschap Rijn en IJssel
P. Clevering-Loeffen – Sweco
R. Hofman-Caris – KWR Water Research
M. Vanson – Arcadis

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau bv
STOWA STOWA 2022-10
ISBN 978.90.5773.978.1

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

ADOX TECHNOLOGIE, INTERESSANTE TECHNOLOGIE VOOR DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN UIT GEZUIVERD AFVALWATER

AdOx is een geïntegreerd adsorptie-oxidatieproces voor de verwijdering van organische microverontreinigingen uit afvalwater, waarbij gebruik wordt gemaakt van een innovatief adsorptiemiddel, synthetische zeolietkorrels met een hoog silicagehalte, die steeds in-situ worden geregenereerd met ozongas.

De aanwezigheid van organische microverontreinigingen in afvalwater, zoals medicijnresten, pesticiden, personal care products en industriële verontreinigingen vereist een nabehandeling in afvalwaterzuivering. In de afgelopen vier jaar is de proof-of-principle van AdOx op laboratoriumschaal aangetoond. Zeolietkorrels met een hoog silicagehalte kunnen de organische microverontreinigingen selectief adsorberen in een gepakt filterbed en de regeneratie gebeurt door middel van oxidatie met ozongas, waardoor een efficiënte technologie met een lage milieu-impact wordt verkregen.

Deze haalbaarheidsstudie is uitgevoerd in het kader van het innovatieprogramma voor de verwijdering van microverontreinigingen uit het effluent van de afvalwaterzuiveringsinstallatie (IPMV) van STOWA en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. In dit rapport is AdOx vergeleken met de door STOWA voorgestelde referentietechnieken: poedervormige actieve kool in een biologisch actief slib systeem (PACAS), nabehandeling met granulaire actieve koolfiltratie (GAK) en combinatie van ozonisatie met snelle zandfiltratie (Ozon+ZF).

Met een gemiddeld verwijderingsrendement van 80 - 85% bij een contacttijd van 5 minuten is AdOx concurrerend met de referentietechnieken. AdOx heeft een voor de helft lagere CO₂-voetafdruk dan de referentietechnieken, heeft een verwachte reductie van ecotoxiciteit van >50% en heeft kosten in de orde van grootte van € 0,13 - 0,17 per m³ behandeld water.

Als follow-up wordt een onderzoek uitgevoerd op pilotschaal, waarbij de nadruk ligt op de volledige integratie tussen adsorptie- en regeneratieprocessen in een continue bedrijfsvoering én op de lange termijn mogelijkheden voor grootschalige toepassing.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

AdOx, een geïntegreerd adsorptie – oxidatie proces voor verwijdering van organische microverontreinigingen uit stedelijk afvalwater, is geëvalueerd om naar het volgende niveau van technologieontwikkeling te gaan, na drie jaar van experimenten op laboratoriumschaal. Deze evaluatie werd uitgevoerd om de haalbaarheid van AdOx vast te stellen voor de groot-schalige toepassing op rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) in Nederland.

AdOx maakt gebruik van (synthetische) zeolietkorrels met een hoog silica-gehalte als adsorptiemiddel voor de micro's. Deze korrels worden in een filter met een gepakt bed geplaatst met regelmatig geplande in-situ regeneratie, door ozongas in de kolom te injecteren om de geadsorbeerde micro's te oxideren. Dit proces maakt een langdurig gebruik van het adsorbens mogelijk en is daardoor duurzaam. De regeneratie wordt uitgevoerd zonder de aanwezigheid van afvalwater in de kolom, zodat er geen bromaatvorming optreedt in het AdOx-effluent n geen bromaat op het ontvangende oppervlaktewater wordt geloosd.

De laboratoriumexperimenten lieten veelbelovende resultaten zien met een verwijderingsefficiëntie tussen 85% en 99% voor 8 van de 11 gidsstoffen (volgens de evaluatie op 3 april 2020 door STOWA en Ministerie I&W). De experimenten werden uitgevoerd met demiwater en met effluent van RWZI Horstermeer. De techniek vereist een by-pass onder regenafvoer condities, waardoor de verwachting is dat de gemiddelde totale verwijdering van micro's uit stedelijk afvalwater 80 - 85% zal bedragen. Omdat ozonisatie niet direct plaats vindt op het afvalwater wordt verwacht dat deze technologie de ecotoxiciteit met tenminste 50% zal verminderen.

De uitgangspunten voor het dimensioneren van de AdOx-technologie zijn gebaseerd op de huidige laboratoriumexperimenten en literatuurstudie. Er wordt gestreefd naar een contact-tijd (EBCT) tussen 5 en 10 minuten, een debiet tussen 6 en 12 BV/u en een bedrijfstijd tussen 5 en 7 dagen voordat het regeneratieproces begint. Het ozongas voor de regeneratie wordt toegediend in een concentratie van 90 mg/L en de regeneratie duurt ongeveer 3 uur. Daaraan voorafgaand worden de zeolietkorrels in het filter gedroogd door verwarmde lucht van 60°C door het filter te blazen.

De CO₂-voetafdruk van AdOx is geschat op basis van het STOWA IPMV CO₂-model voor 100.000 i.e., waarbij AdOx een emissie van 65 g CO₂/m³ heeft bij een EBCT van 5 minuten en 123 g CO₂/m³ bij een EBCT van 10 minuten. Op basis van de laboratoriumresultaten is een EBCT van 5 minuten (of bijna 5 minuten) het meest aannemelijk, ook op praktijkschaal. Zonder lozing van bijproducten in het ontvangende oppervlaktewater kan de ecotoxiciteit met meer dan 50% worden verminderd. De kostenraming varieert op basis van de gekozen EBCT en de voor-spelde bulkprijs van de zeolietkorrels/pellets. Er zijn vier kostenscenario's doorgerekend. Voor de EBCT van 5 minuten variëren de kosten van € 0,10 - 0,14/m³ voor CAPEX en € 0,03/m³ voor OPEX. Voor de EBCT van 10 minuten variëren de kosten van € 0,11 - 0,19/m³ voor CAPEX en € 0,04 - 0,05/m³ voor OPEX. Deze waarden geven een totale kostenmarge van € 0,13 - 0,24/m³.

Vergeleken met andere bestaande technologieën, zoals de referentietechnieken Poedervormige Actieve Kool in een biologisch Actief Slib systeem (PACAS), nabehandeling met Granulaire Actieve Koolfiltratie (GAK) en combinatie van Ozonisatie met snelle Zandfiltratie (Ozon+ZF), heeft AdOx de potentie de "next generation" technologie te worden voor de verwijdering van organische microverontreinigingen uit stedelijk afvalwater.

SUMMARY

AdOx, an integrated adsorption-oxidation process for the removal of organic micropollutants (OMPs) from municipal wastewater, has been assessed to move to the next level of technology development after three years of lab-scale experiments. This assessment was performed in order to identify its feasibility for full-scale application of AdOx at wastewater treatment plants (WWTPs) in the Netherlands.

AdOx uses (synthetic) high-silica zeolite granules as the adsorbent for the OMPs. These granules are filled in a packed-bed filtration column with a frequently-scheduled *in-situ* regeneration by injecting ozone gas into the column to oxidize the adsorbed OMPs. This process enables long term utilization of the adsorbent and therefore is a sustainable process. The regeneration is conducted without the presence of wastewater in the column, ensuring no presence of bromate formation in AdOx-effluent and no discharge of bromate into the receiving water body.

The lab experiments gave promising results with a removal efficiency between 85% and 99% for 8 out of 11 indicator substances (as per the evaluation on 3 April 2020 by STOWA and Ministerie I&W). The experiments were performed in demi water and in effluent from WWTP Horstermeer. This filtration method requires by-passing during rain weather condition, giving the expectation of the average total removal of OMPs to be 80 – 85%. This technology is expected to reduce the ecotoxicity risk for at least 50%.

Dimensioning principles for AdOx technology is based on the current lab experiments and literature study. It aims for an empty bed contact time (EBCT) between 5 and 10 minutes, a flow rate between 6 – 12 BV/h and a running time between 5 and 7 days before the regeneration process starts. The ozone gas for regeneration is given in a concentration of 90 mg/L and the regeneration takes about 3 hours. Prior to that, the granules are dried up inside the column by blowing heated air of 60°C through the column.

AdOx's CO₂ footprint was estimated from STOWA IPMV CO₂-model for 100,000 i.e, where AdOx obtains 65 g CO₂/m³ for EBCT of 5 minutes and 123 g CO₂/m³ for EBCT of 10 minutes. Based on laboratory results an EBCT of 5 min (or close to it), is most likely, also in full-scale. With no discharge of by-products to the receiving surface water, it can reduce the risk of ecotoxicology for at least with 50%. The cost estimation varies based on the chosen EBCT and the predicted bulk price of the zeolite granules. Four cost scenarios are presented. For the EBCT of 5 min the costst range from € 0.10 – 0.14/m³ for CAPEX and € 0.03/m³ for OPEX. For the EBCT of 10 min the costs range from € 0.11 – 0.19/m³ for CAPEX and € 0.04 – 0.05/m³ for OPEX. These values give a total cost range of € 0.13 – 0.24/m³.

Compared to other existing technologies, such as the reference technologies Powdered Activated Carbon in Biologically Active Sludge (PACAS), combined ozone - rapid sand filtration and Granular Activated Carbon filtration (GAC), AdOx can become the next generation technology for the removal of organic micropollutants from municipal wastewater.

DE STOWA IN HET KORT

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

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

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

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

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

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

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

HAALBAARHEIDSTUDIE ADOX EEN NEXT GENERATION ADSORPTIE – OXIDATIEPROCES VOOR DE VERWIJDERING VAN ORGANISCHE MICROVERONTREINIGINGEN UIT STEDELIJK AFVALWATER

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	SUMMARY	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
2	BESCHRIJVING DE TECHNOLOGIE	2
	2.1 Achtergrond	2
	2.2 Technische onderdelen en processtappen	3
	2.3 Onderscheidend vermogen van AdOx	4
	2.4 Fase van ontwikkeling van AdOx	5
3	LITERATUURSTUDIE TECHNOLOGIE	7
	3.1 Literatuurstudie: zeoliet als adsorbens	7
	3.2 Literatuurstudie: in-situ regeneratie met ozongas	7
4	LABORATORIUMONDERZOEK	9
	4.1 Al eerder uitgevoerd onderzoek naar AdOx	9
	4.2 Biologische effectmetingen	12
	4.3 Type gebruikt afvalwater	12
5	DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN	13

6	ONDERBOUWING VAN ONTWERPCRITERIA	14
6.1	CO₂-voetafdruk	14
6.1.1	AdOx-influent opvoerhoogte	14
6.1.2	Warmte voor drogen	15
6.1.3	Ozonproductie en -verbruik	15
6.1.4	Terugspoelen	16
6.1.5	Energiegebruik voor zeolietmateriaal	16
6.2	Totaal energiegebruik	16
6.3	Verwijdering van microverontreinigingen	20
6.4	Vermindering ecotoxiciteit effluent	22
6.5	Kosten	22
7	MOGELIJKE TOEPASSINGEN IN NEDERLAND	23
7.1	Voorzieningen, installaties, kosten en ruimtebeslag	23
7.2	Andere doelen	24
7.3	Toepasbaarheid op RWZI's in Nederland	24
8	JAARLIJKSE KOSTEN	25
8.1	Investerings of Capital Expenditure (CAPEX)	25
8.1.1	CAPEX voor AdOx (EBCT 5 minuten)	26
8.1.2	CAPEX voor AdOx (EBCT 10 minuten)	27
8.2	Variabele kosten of Operational Expenditure (OPEX)	28
8.2.1	OPEX voor AdOx (EBCT 5 min.)	29
8.2.2	OPEX voor AdOx (EBCT 10 min.)	30
8.3	Totale jaarlijkse kosten	31
9	KENNIS/ONDERZOEKSVRAGEN	32
9.1	Adsorptie van organische microverontreinigingen met zeolieten	32
9.2	Regeneratie van zeolieten met ozon	32
9.3	Beoordeling van de gehele technologie (adsorptie en regeneratie)	32
10	CONCLUSIES	33
	REFERENTIES	34
	BIJLAGEN	37

1

INLEIDING

Verwijdering van organische microverontreinigingen (micro's) uit afvalwater staat sterk in de belangstelling de laatste jaren. Verschillende technieken worden onderzocht in Nederland, zowel adsorptieve technieken, oxidatieve technieken, biologische technieken als membraan-technieken. Ook combinaties van technieken worden onderzocht, bijvoorbeeld de combinatie van ozon en actieve kool als gecombineerd adsorptie-oxidatie proces.

In deze haalbaarheidsstudie staat de techniek AdOx centraal, een combinatie van een adsorptief proces met een oxidatief proces. In de adsorptiefase worden organische microverontreinigingen uit het afvalwater verwijderd door adsorptie aan synthetische zeolieten door filtratie van tertiair afvalwater door een filter gevuld met zeolietkorrels. Nadat het adsorbens is verzadigd wordt het zeolietfilter geregenereerd met ozon: ozongas wordt door het zeolietfilter geleid en oxideert de aan de zeolietkorrels geadsorbeerde organische microverontreinigingen.

Dit rapport beschrijft de technologie, de huidige stand van de ontwikkeling van de techniek gebaseerd op laboratoriumonderzoek en literatuurstudie, en beoordeelt de haalbaarheid van AdOx op de volgende aspecten:

- CO₂-voetafdruk
- operationele en investeringskosten per m³ behandeld afvalwater
- verwijderingsrendement van microverontreinigingen
- ecotoxicologische aspecten
- onderzoeksvragen die beantwoord moeten worden om TRL-7 te bereiken
- de inpasbaarheid in de Nederlandse zuiveringspraktijk

Tenslotte worden de kennis- en onderzoeksvragen beschreven voor een vervolg pilot-plant onderzoek.

2

BESCHRIJVING DE TECHNOLOGIE

Dit hoofdstuk geeft de beschrijving van AdOx-technologie, inclusief de achtergronden van de techniek, technische onderdelen en processtappen, onderscheidend vermogen en fase van ontwikkeling.

2.1 ACHTERGROND

AdOx is een techniek waarbij zeolieten worden gebruikt voor het adsorberen van microverontreinigingen (micro's), waarna de zeolieten effectief geregenereerd worden met ozon. Synthetische zeolieten hebben zich bewezen als adsorbens voor de selectieve verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater (Jiang et al., 2018). Zeolieten kunnen als slijtvaste korrels worden toegepast (Elshof, 2019), waardoor het adsorptieproces uitgevoerd kan worden als continu proces in een nageschakelde vastbed reactor waarmee RWZI-effluent kan worden behandeld.

Na verloop van tijd zijn de zeolietkorrels verzadigd en moeten zij geregenereerd worden. Zeoliet korrels kunnen met chemische oxidatie geregenereerd worden zonder verlies van adsorptiecapaciteit, waarbij AdOx gebruikt maakt van ozonisatie. Zowel granulaire actieve kool (GAK) als zeoliet korrels kunnen gebruikt worden voor het verwijderen van microverontreinigingen uit afvalwater. Er is een vergelijking gemaakt tussen beide technieken waaruit blijkt dat de combinatie actieve kool met ozon voor regeneratie van verzadigde kool leidt tot wijziging van de chemische eigenschappen van het koolstofoppervlak en de adsorptieve- en textuurkenmerken (Valdés et al., 2002). Dit resulteert in vermindering van het adsorptievermogen van de actieve kool. Zeolieten kunnen zowel thermisch geregenereerd worden (Wang et al., 2006) als ook met chemische oxidatie zonder verlies van adsorptiecapaciteit. Chemische oxidatie kan door middel van ozonisatie, Fenton-katalyse, of foto-katalyse (Braschi et al., 2016). Het ozonverbruik bij regeneratie van zeolieten beladen met 2,4,6-trichlorophenol (TCP) was ongeveer 10 keer lager ten opzichte van directe ozonisatie van dezelfde hoeveelheid TCP in water (Zhang et al., 2014). Vrijwel al het regeneratie onderzoek, zoals gerapporteerd in de literatuur, is uitgevoerd met zeolietpoeders.

In AdOx worden zeolietkorrels, nadat ze beladen zijn, geregenereerd met ozongas. Dit is een nieuwe ontwikkeling. Pilotonderzoek (adsorptie/regeneratie) met zeolietkorrel en regeneratie van zeolietkorrels met ozon is ook nieuw, waarbij de *proof-of-principle* al wel is bewezen op laboratoriumschaal.

De verwachting is dat de combinatie van adsorptie met zeolieten en on-site regeneratie met ozon voordelen biedt voor de verwijdering van microverontreinigingen in vergelijking met adsorptie met actieve kool en directe ozonisatie:

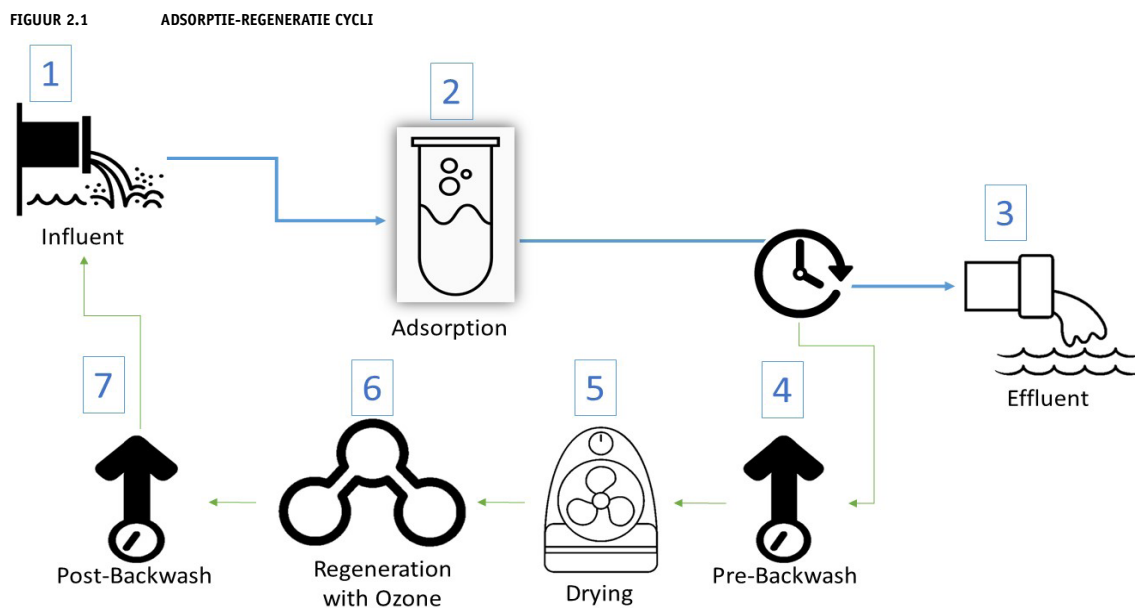
- kleine installatie door kortere contacttijd (EBCT)
- frequente on-site regeneratie met ozongas, wat leidt tot lage transportkosten

- minder concurrentie met Natuurlijk Organisch Materiaal (NOM) wat zorgt voor een effectief adsorptieproces
- geen continue ozondosering nodig aan het gehele AdOx-influent
- geen directe ozonisatie in de hoofdstroom waardoor geen bijproducten, zoals bromaat, ontstaan die met het gezuiverde afvalwater in het oppervlakteater terecht komen

2.2 TECHNISCHE ONDERDELEN EN PROCESSTAPPEN

Het processchema van de AdOx pilot-plant bestaat uit zeven stappen:

1. Het afvalwater-effluent wordt als AdOx-influent door een pomp naar een kolom gebracht, het zeolietfilter
 2. In de adsorptiefase wordt het zeolietfilter neerwaarts bedreven
 3. Het effluent van het zeolietfilter wordt geloosd op het ontvangende oppervlaktewater
 4. Nadat het filter is verzadigd wordt het eerst teruggespoeld
 5. Na terugspoelen wordt het filter gedraineerd (tot vochtgehalte 40% (w/w)) en met warme lucht gedroogd (tot vochtgehalte 20%)
 6. Vervolgens wordt ozongas door het filter geleid waardoor geadsorbeerde microverontreinigingen worden geoxideerd
 7. Na ozonisatie wordt het filter nog een keer teruggespoeld
- Het schema van de technologie is weergegeven in Figuur 2.1.



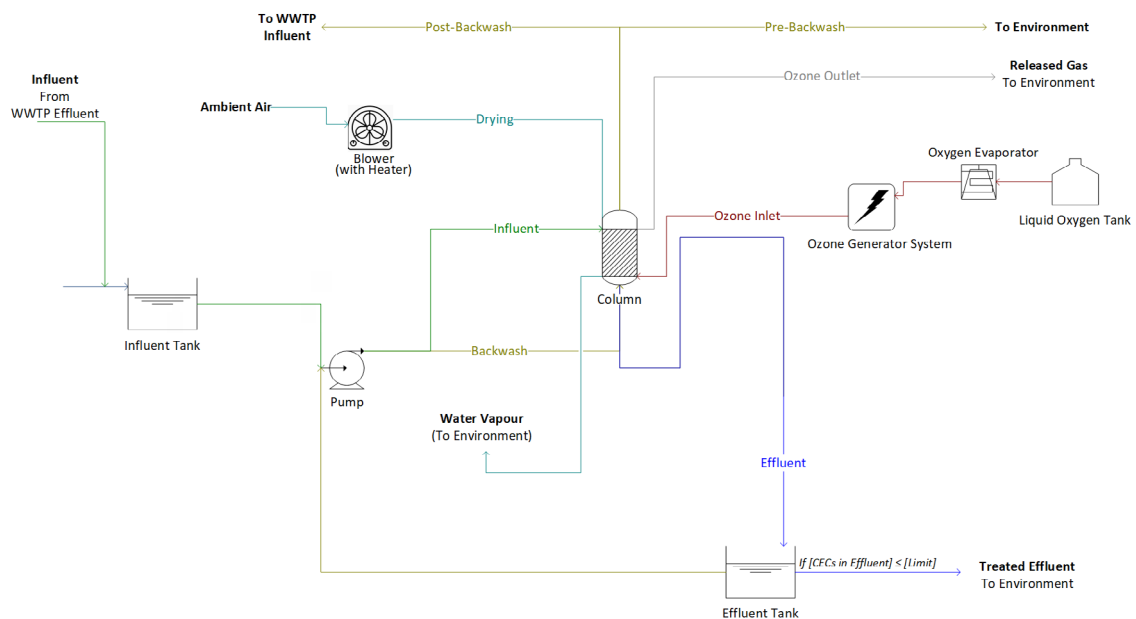
Nut en noodzaak, en de uitvoering van de processtappen is als volgt: in de adsorptiefase wordt het zeolietfilter *downflow* bedreven. Nadat het filter is verzadigd wordt het eerst voorgespoeld (*pre-backwash*), hiervoor wordt effluent van het zeolietfilter gebruikt. Na spoelen wordt het filter gedraineerd (tot vochtgehalte 40% (w/w)) en met warme lucht gedroogd (tot vochtgehalte 20%). Vervolgens wordt ozongas door het filter geleid waardoor geadsorbeerde microverontreinigingen worden geoxideerd. Uit het laboratoriumonderzoek is gebleken dat regeneratie direct met ozongas tot veel betere resultaten leidt dan regeneratie met ozon opgelost in water.

Drogen is essentieel om de regeneratie met ozon effectief te laten verlopen. Door regeneratie met ozongas en drogen van het filter is diffusie van ozon in de waterfase geen limiterende stap. Na beëindiging van de regeneratie met ozon wordt het filter teruggespoeld met effluent van het zeolietfilter (*post-backwash*), en daarna weer in bedrijf genomen voor verwijdering van

microverontreinigingen. Het voorspoelwater en drainagewater van vóór de regeneratie (*pre-backwash* water) is vrij van organische microverontreinigingen doordat er teruggespoeld wordt met effluent van het zeolietfilter. Dit *pre-backwash* water bevat slechts in het filter geaccumuleerde deeltjes en kan aan het AdOx-effluent worden toegevoegd. Het terugspoelwater van na de regeneratie (*post-backwash* water) kan mogelijk resten van oxidatie bijproducten bevatten (met een minder complexe structuur dan de oorspronkelijke microverontreinigingen door de ozonisatie) en afbraakproducten van natuurlijk organisch materiaal. Het volume van deze stroom is kleiner dan 1% van de totale afvalwaterstroom. Door de hoge *Biodegradable Organic Matter* (BDOC) kan dit naar het influent van de RWZI worden geleid en biologisch afgebroken worden in de RWZI. Het processtroomdiagram tijdens adsorptie en regeneratie is weergegeven in Figuur 2.2.

FIGUUR 2.2

PROCESSTROMEN TIJDENS ADSORPTIE EN REGENERATIE

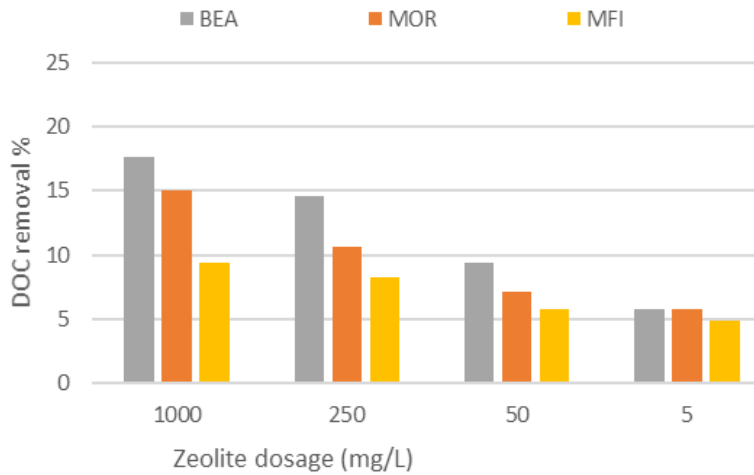


2.3 ONDSCHIEDEND VERMOGEN VAN ADOX

De inzet van ozonisatie voor regeneratie van zeolieten onderscheidt zich zowel van directe ozonisatie van RWZI-effluent als van inzet van granulaire actief kool in combinatie met ozon. Dit zijn beide processen die al uitgebreid zijn onderzocht en thans full-scale worden toegepast. In AdOx wordt ozon toegepast in een zijstroom voor de oxidatie van microverontreinigingen, in tegenstelling tot de hiervoor genoemde technologieën waar ozon in de hoofdstroom wordt ingebracht. Voordeel hiervan is tweeledig. Ten eerste is er geen risico van bromaatvorming en vorming van transformatieproducten/oxidatie bijproducten in het behandelde afvalwater. Ten tweede, doordat zeolieten selectief zijn voor de adsorptie van organische microverontreinigingen en slechts zeer beperkt Natuurlijk Organisch Materiaal (NOM) adsorberen (de Ridder et al., 2012), is het ozonverbruik aanmerkelijk lager. Immers, de beladen zeolieten bevatten hoofdzakelijk organische microverontreinigingen en geen NOM. Uit Figuur 2.3 blijkt dat de zeolieten selectief kleinere organische moleculen adsorberen. De grotere organische moleculen passen niet in de zeolietporiën. Er wordt maximaal 18% van de DOC geadsorbeerd. Bij actieve kool is dat meer dan 90%. Een ander voordeel is dat regeneratie van zeolieten met ozon on-site kan plaatsvinden, in tegenstelling tot (thermische) reactivatie van actieve kool. Dit voorkomt transportkosten en redu-

ceert de CO₂-uitstoot, en biedt flexibiliteit ten aanzien van de standtijd van het zeolietfilter: lange looptijden zijn minder belangrijk om de regeneratiekosten en milieu-effecten laag te houden.

FIGUUR 2.3 DOC-VERWIJDERING MET DRIE VERSCHILLENDE ZEOLIETEN: BEA, MOR EN MFI. DE VERWIJDERING IS GROTER ALS DE PORIËN IN HET ZEOLIET GROTER ZIJN. PORIEGROOTTE NEEMT AF IN DE VOLGORDE BEA-MOR-MFI



Met betrekking tot het adsorptiedeel zijn de investeringskosten van een zeolietfilter en een korrelkoolfilter vergelijkbaar door een vergelijkbare hydraulische belasting. De eenmalige aanschafkosten van zeolieten zijn hoger dan van actieve korrelkool, maar in tegenstelling tot kool hoeft zeoliet niet periodiek worden aangevuld. Deze aanvulling is bij GAK vereist als gevolg van het verlies aan kool van tenminste 10% dat optreedt bij iedere reactivatie van de kool, wat halfjaarlijks plaatsvindt uitgaande van een looptijd van 10.000 bed volumina (BV) (STOWA, 2017). De pompkosten voor beide technologieën zijn voor wat betreft de adsorptiefase gelijk. De CO₂-voetafdruk door energieverbruik is daardoor ook vergelijkbaar. Een verschil kan optreden in de CO₂-voetafdruk van het adsorbens zelf, maar dit is afhankelijk van type zeoliet en type kool, en ook hier geldt dat er geen verlies van zeoliet optreedt door ozonregeneratie en een verlies van tenminste 10% aan actieve kool door reactivatie.

De grote verschillen treden op tussen de regeneratie van het zeolietfilter en de reactivatie van de actieve kool. Bekend is dat reactivatie van actieve kool een zeer grote milieuvoetafdruk en CO₂-voetafdruk heeft ten opzichte van ozonisatie, tot wel een factor 5 toe (Mohapatra et al., 2002). Ozonregeneratie van zeolieten is daarmee veel milieuvriendelijker dan thermische reactivatie van actieve kool. Uit een analyse van drinkwatertechnologieën is gebleken dat reactivatie van actieve kool tot tweemaal hogere kosten kan leiden dan ozonisatie (Barrios et al., 2008).

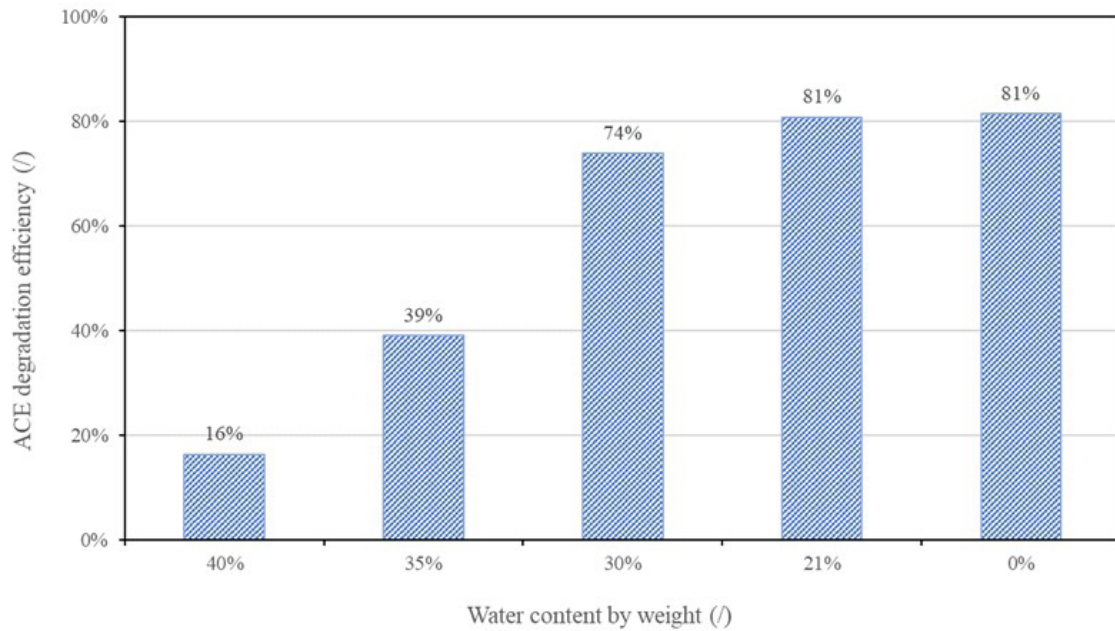
In hoofdstuk 6 en 8 wordt in detail ingegaan op de CO₂-voetafdruk en kosten.

2.4 FASE VAN ONTWIKKELING VAN ADOX

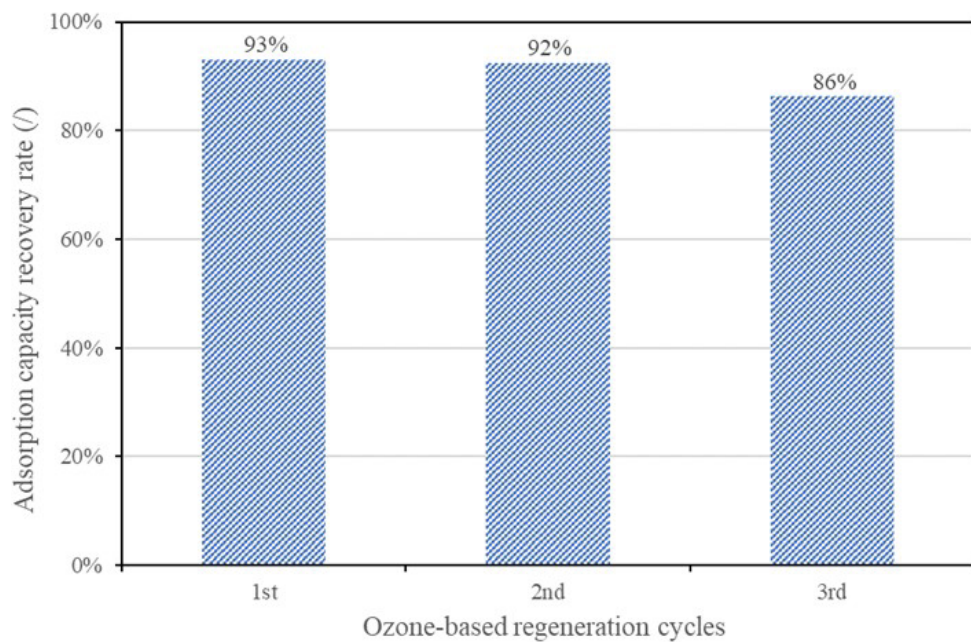
Op laboratoriumschaal is het *proof-of-principle* aangetoond van regeneratie van zeolietkorrels met ozongas (Fu et al., 2021, Doekhi-Bennani et al., 2021). De belangrijkste bevindingen zijn weergegeven in Figuur 2.4 en Figuur 2.5. Figuur 2.4 laat zien dat regeneratie met ozongas het best verloopt bij een zo laag mogelijk vochtgehalte van de zeolieten. Optimaal is waarschijnlijk om ca. 50% van het water uit de zeolietkorrels te verwijderen (van 40% vocht via drain

naar 20% vocht via actief drogen). Figuur 2.5 laat zien dat de zeolietkorrels geen adsorptiecapaciteit verliezen door opeenvolgende regeneraties met ozon. Uit de experimenten is ook gebleken dat regeneratie in een relatief kort tijdsbestek (< 1 uur) mogelijk is. De techniek bevindt zich thans op het niveau van TRL-4. De volgende stap in de ontwikkeling van AdOx is *proof-of-practice*, om het te brengen naar TRL-7. Daartoe dient een pilot-plant over langere tijd bedreven te worden op echt afvalwater, onder praktijkcondities. Het voorgestelde onderzoek richt zich op het pilot-plant onderzoek en de belangrijkste onderzoeksvragen zijn samengevat in hoofdstuk 9.

FIGUUR 2.4 EFFECT VOCHTGEHALTE OP REGENERATIE (ACE = ACETAMINOPHEN, OP DE ZEOLIETKORREL GEADSORBEERD ACE WORDT DOOR OZON GEOXIDEERD MET EEN ZEKERE EFFICIËNTIE)



FIGUUR 2.5 EFFECT OPEENVOLGENDE OZONREGENERATIES OP ADSORPTIECAPACITEIT VAN DE ZEOLIETKORRELS



3

LITERATUURSTUDIE TECHNOLOGIE

Dit hoofdstuk vat literatuurstudie naar de technologie samen. Tot nu toe is er zeer beperkte ervaring in het buitenland, en die is dan vooral gericht op de adsorptie met zeolieten. De huidige resultaten zijn binnen drie jaar verzameld uit laboratoriumschaal experimenten.

3.1 LITERATUURSTUDIE: ZEOLIET ALS ADSORBENS

Een overzicht van het onderzoek in de relevante studies om de haalbaarheid van adsorptie met hoog-silica zeoliet te beoordelen is hieronder weergegeven:

1. Adsorptie met zeoliet met hoog silica-gehalte geeft een hoger verwijderingsrendement dan adsorptie met actieve kool in korrelvorm en directe ozonatie door minder concurrentie met NOM (Jiang et al., 2018).
2. Engineering van poedervormig zeoliet tot korrels door toevoeging van bindmiddel en het analyseren van de invloed van de porositeit van de korrels op de adsorptieprestaties in gedemineraliseerd water (Elshof, 2019).
3. Positief geladen micro's werden beter geadsorbeerd aan zeolieten dan de negatief- en neutraal geladen micro's (Jiang, 2019).
4. De hogere hydrofobiciteit van de micro's leidt tot de hogere adsorptiecapaciteit (Jiang, 2019).
5. De lading en de hydrofobiciteit van micro's waren de twee belangrijkste factoren die de adsorptiecapaciteit van micro's door zeolieten beïnvloedden, terwijl het effect van de micro's-grootte op de adsorptiecapaciteit verwaarloosbaar was (Hu, 2020). Dit onderzoek omvat onderzoek naar de adsorptiecapaciteit en de kinetiek van alle beoogde micro's door zeolietkorrels, zowel in batch-experimenten met gedemineraliseerd water en gezuiverd afvalwater, als in kolomexperimenten met gedemineraliseerd water. Uit dit onderzoek bleek dat Beta (BEA) en Mordernite (MOR) de meest geschikte types zeoliet met een hoog silica-gehalte zijn voor de micro's.
6. Het lange termijn gedrag met betrekking tot doorbraak- en evenwichtscondities in echt afvalwater wordt in het laboratorium onderzocht (Jiang, 2021). Dit resultaat is afkomstig van een experiment met een adsorptiekolom op laboratoriumschaal met zeolietkorrels van het gemengde type (BEA, MOR, MFI), waarbij gebruik is gemaakt van echt afvalwater (Jiang, 2020).
7. Gelijktijdige verwijdering van ammonium en sulfamethoxazol door ozon geregenereerde zeolieten met een hoog silica-gehalte (Doekhi-Bennani, et al., 2021).

3.2 LITERATUURSTUDIE: IN-SITU REGENERATIE MET OZONGAS

Een overzicht van het onderzoek in de relevante studies om de haalbaarheid van zeoliet in-situ regeneratie met ozongas te beoordelen is hieronder weergegeven:

1. De regeneratie van gedroogde zeolietkorrels met ozongas is efficiënter dan die van uitgelekte korrels (Fu, et al., 2021). Dit onderzoek omvat het onderzoek van de regeneratie van een met acetaminophen (ACE) geladen zeoliet met ozongas in een kolomexperiment met gedemineraliseerd water.
2. Het drogen van het zeolietbed vóór de ozonatie, door het te verwarmen, vermindert de

vereiste regeneratietijd omdat het de waterfilms in de zeolietkorrels verwijdert en het contactoppervlak met ozongas vergroot (He, 2019).

3. Er is een positief verband tussen de ozondosis en de soorten oxideerbare micro's (Mathon, et al., 2021). Het leidt tot verschillende vereiste duur van ozonatie voor elke microverontreiniging. Voor micro's met lage en gemiddelde adsorptie (diclofenac, hydrochloorthiazide, benzotriazol, methyl-benzotriazol en sulfamethoxazol) wordt een ozonatie van een uur met een ozongasconcentratie van 30 mg/l voldoende geacht (Wang, 2020).
4. Onderzoek naar de regeneratie haalbaarheid van zeoliet korrels in lange termijn adsorptie-regeneratie cycli met gebruik van gedemineraliseerd water in een kolom experiment (Wang, 2020). In dit onderzoek werd ook vastgesteld dat de bijproducten van de geoxideerde micro's een belangrijke rol kunnen spelen in het ozonatie- en re-adsorptieproces.
5. Regelmatig geplande regeneratie voordat het adsorptieproces het doorbraakpunt bereikt geeft een meer constante kwaliteit van het adsorptie effluent dan regeneratie na evenwicht, iets wat mogelijk zal zijn met deze gekoppelde opstelling (Rietveld et al., 2016).
6. Lange termijn gedrag en re-adsorptie capaciteit in echt afvalwater wordt in het laboratorium onderzocht (Fu, 2020).

4

LABORATORIUMONDERZOEK

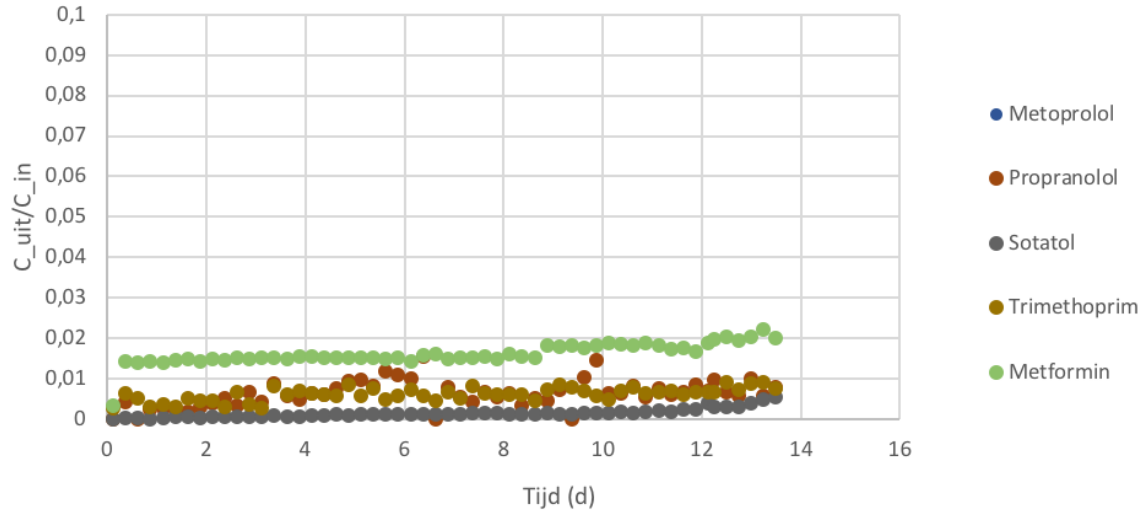
De onderzoeksresultaten op labschaal experimenten uitgevoerd in het Waterlab van de TU Delft worden in dit hoofdstuk beschreven.

4.1 AL EERDER UITGEVOERD ONDERZOEK NAAR ADOX

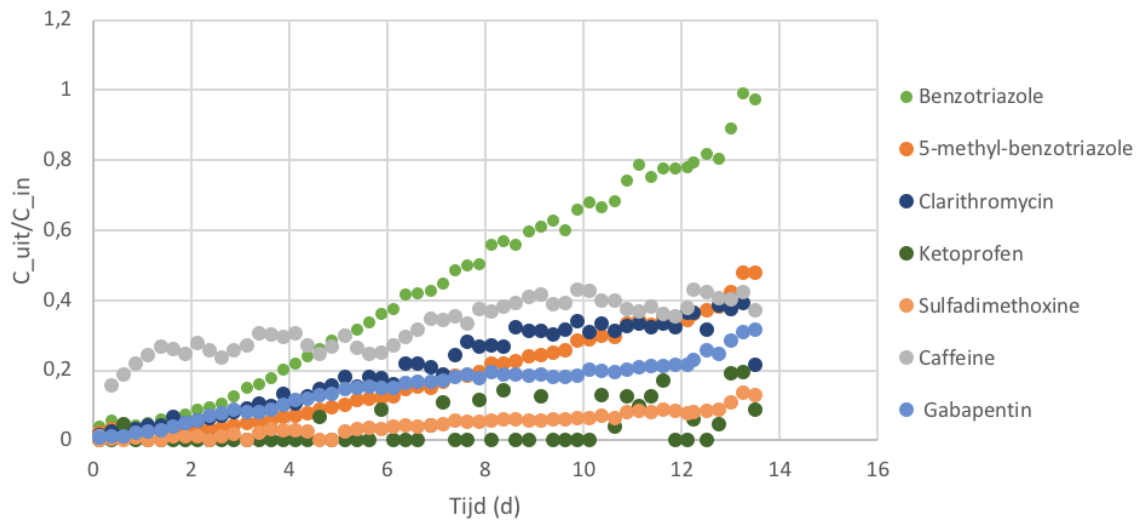
Het voorgestelde onderzoek richt zich op de verwijdering van organische microverontreiniging met zeolieten en de regeneratie van verzadigde zeolieten met ozongas. Van belang is dat zeolieten inderdaad selectief organische microverontreinigingen adsorberen. Dat is vastgesteld door de Ridder et al. (2012) voor zeolietpoeders en organische microverontreinigingen opgelost in demiwater. Dit betroffen batch experimenten op laboratoriumschaal. In het lopende project *AdOx – A Next Generation Adsorption and Oxidation Process*, onderdeel van het Partnership programma STW/STOWA/KWR/TKI Watertechnology “*Contaminants of Emerging Concern in the Water Cycle*” is dat vastgesteld voor zeolietkorrels in laboratorium kolom experimenten, met gebruik van afvalwater van RWZI Horstermeer gespiket met de gidsstoffen. Verwijderingsrendementen zijn > 70%. De kolomexperimenten weergegeven in Figuur 4.1 – Figuur 4.4 zijn uitgevoerd met zeolietkorrels gemaakt uit BEA-poeder waardoor in de kolomexperimenten een gemiddelde verwijdering > 80% wordt bereikt voor meer dan 7 gidsstoffen bij een standtijd van acht dagen (EBCT = 6 minuten, bedhoogte = 20 cm). Paragraaf 6.3 gaat hier nader op in (microverontreinigingen zijn gespiket tot met een concentratie van 4 µg/L).

De selectiviteit van zeolieten voor organische microverontreinigingen verschilt per zeoliet. Dat is ook het geval voor de elf gidsstoffen. Door verschillende zeolietpoeders te combineren in één korrel kan een zeolietfilter het hele palet aan gidsstoffen beslaan. Dit is weergegeven in Tabel 4.1. Hier is de adsorptie van de elf gidsstoffen weergegeven voor twee verschillende zeolietpoeders: BEA en MOR, voor zowel demiwater als afvalwater, gemeten in batch experimenten.

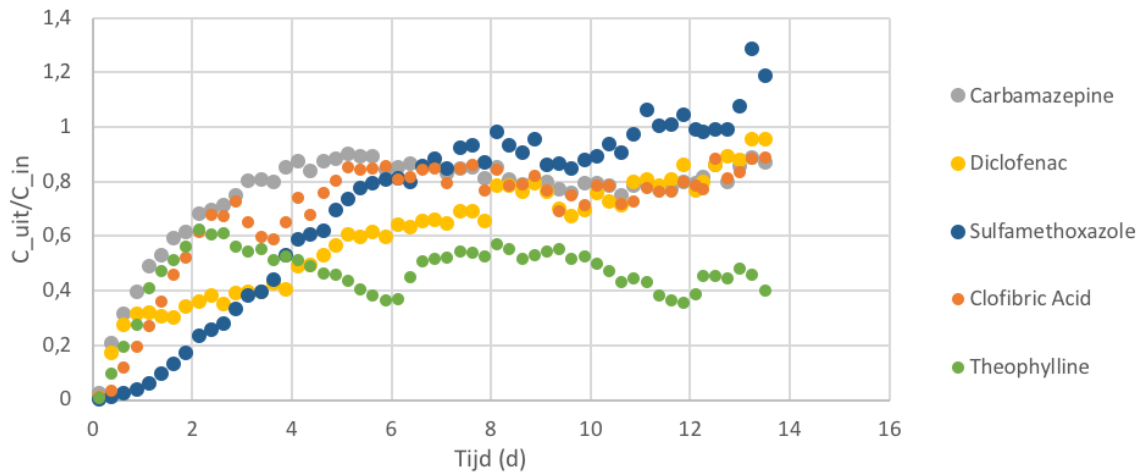
FIGUUR 4.1 BESTE VERWIJDERING GIDSSTOFFEN UIT GESPIKET RWZI-EFFLUENT HORSTERMEER IN KOLOMEXPERIMENTEN GEVULD MET ZEOLIETKORRELS



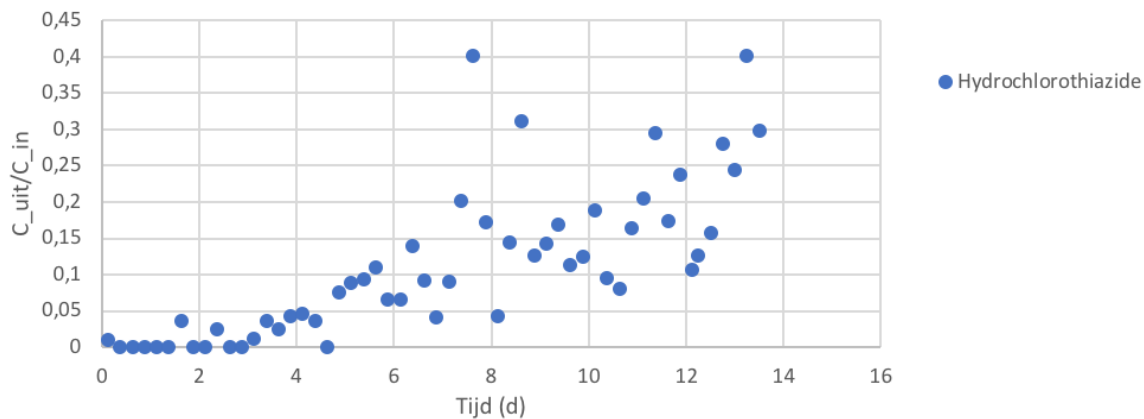
FIGUUR 4.2 GEMIDDELDE VERWIJDERING GIDSSTOFFEN UIT GESPIKET RWZI-EFFLUENT HORSTERMEER IN KOLOMEXPERIMENTEN GEVULD MET ZEOLIETKORRELS



FIGUUR 4.3 SLECHTSTE VERWIJDERING GIDSSTOFFEN UIT GESPIKET RWZI-EFFLUENT HORSTERMEER IN KOLOMEXPERIMENTEN GEVULD MET ZEOLIETKORRELS



FIGUUR 4.4 BEPERKTE VERWIJDERING GIDSSTOFFEN IN KOLOMEXPERIMENTEN GEVULD MET ZEOLIETKORRELS UIT RWZI-EFFLUENT HORSTERMEER



TABEL 4.1 VERWIJDERING VAN GIDSSTOFFEN MINISTERIE I&W UIT DEMIWATER EN RWZI-EFFLUENT HORSTERMEER DOOR TWEE VERSCHILLENDE ZEOLIETPOEDERS IN BATCH EXPERIMENTEN: BEA EN MOR

Gidsstof	BEA		MOR	
	Demiwater	RWZI-effluent	Demiwater	RWZI-effluent
Trimethoprim	Goed (99%)	Medium (88%)	Goed (99%)	Slecht (15%)
Propranolol	Goed (99%)	Medium (93%)	Goed (99%)	Goed (99%)
Metoprolol	Goed (98%)	Medium (92%)	Goed (99%)	Goed (99%)
Sotalol	Goed (99%)	Medium (88%)	Goed (99%)	Goed (99%)
Clarithromycin	Goed (99%)	Slecht (1%)	Goed (98%)	Slecht (13%)
Benzotriazole	Medium (24%)	Slecht (2%)	Medium (50%)	Slecht (2%)
4,5-methyl-benzotriazole	Medium (71%)	Medium (56%)	Medium (87%)	Medium (55%)
Hydrochlorothiazide	Medium (26%)	Medium (62%)	Medium (22%)	Slecht (15%)
Sulfamethoxazole	Medium (41%)	Slecht (6%)	Medium (51%)	Slecht (2%)
Carbamazepine	Slecht (5%)	Slecht (4%)	Medium (47%)	Slecht (8%)
Diclofenac	Slecht (6%)	Slecht (1%)	Slecht (9%)	Slecht (6%)

* Bij een zeoliet dosis van 1000 mg L⁻¹

Aanwezigheid van organisch materiaal in het RWZI-effluent (ordegrootte mg/l) blijkt niet te leiden tot snelle doorslag van de organische microverontreinigingen (ordegrootte µg/l). Aanwezigheid van organisch materiaal (mg/l) naast organische microverontreinigingen (µg/l) blijkt wel te leiden tot enige competitie tussen organisch materiaal en organische microverontreinigingen (zie Tabel 4.1 verschil tussen demiwater (PW) en afvalwater (WW)), maar dit effect is zeer beperkt. Dit is in overeenstemming met batch experimenten weergegeven in Figuur 2.3 in hoofdstuk 2: daar bleek de DOC verwijdering door zeolieten zeer beperkt te zijn. Een verwijdering 20-70% uit RWZI-effluent in Tabel 4.1 voor benzotriazol, diclofenac en sulfamethoxazol betreft batch experimenten. In kolommen kan nog altijd een goede verwijdering > 70% optreden, echter zal de doorbraak iets eerder optreden. Dit is zichtbaar in de doorbraakprofielen van benzotriazol, diclofenac en sulfamethoxazol in Figuur 4.4.

Wat betreft de regeneratie van beladen zeolieten met ozongas is door Fu et al. (2021) onderzoek verricht met zeolietkorrels, beladen met organische microverontreinigingen geadsorbeerd vanuit demiwater. Recent zijn dezelfde experimenten ook succesvol uitgevoerd met zeolietkorrels beladen met organische microverontreinigingen geadsorbeerd vanuit RWZI-effluent (Horstermeer). Uit andere experimenten blijkt dat de adsorptiecapaciteit voor carbamazepine lager wordt na regeneratie. Voor de overige componenten wordt de adsorptiecapaciteit

volledig hersteld (vijf adsorptie-regeneratie cycli). Of dat ook op de lange duur nog gebeurt is niet onderzocht en is onderdeel van het voorgestelde pilotonderzoek. Op dit moment nemen we aan dat we één keer per week moeten regenereren, maar deze regeneratiefrequentie is ook een optimalisatieparameter in het pilotonderzoek.

4.2 BIOLOGISCHE EFFECTMETINGEN

Er zijn tot nu toe geen biologische effectmetingen uitgevoerd. Gezien de goede verwijdering van de elf target organische microverontreinigingen (>70%) en het ontbreken van bromaat en andere oxidatie bijproducten in behandeld afvalwater is de verwachting dat biologische effectmetingen een positief resultaat zullen geven in dezelfde ordegrrootte als de verwijdering van de organische microverontreinigingen. In ieder geval scoort AdOx gelijk aan poederkool-dosering in actiefslibsystemen (PACAS) met betrekking tot reductie ecotoxicologische risico's (50%). Oxidatie bijproducten in het terugspoelwater na regeneratie (volume < 1% van de afvalwaterstroom, zie Hoofdstuk 6) zijn naar verwachting goed afbreekbaar. Dit spoelwater kan daarom toegevoegd worden aan het RWZI-influent zonder biologische en ecotoxische effecten op het ontvangende water.

4.3 TYPE GEBRUIKT AFVALWATER

In het reeds uitgevoerde laboratoriumonderzoek is gebruik gemaakt van effluent van RWZI Horstermeer, zowel voor adsorptie experimenten als voor regeneratie experimenten. RWZI Horstermeer behandelt stedelijk afvalwater.

5

DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN

Dit hoofdstuk bevat de algemene basis van de techniek voor een *full-scale* installatie (100.000 i.e.) volgens STOWA-richtlijnen. Het omvat; de adsorptiecapaciteit, standtijd tot regeneratie, duur van de regeneratiestappen, droogtemperatuur en ozongasdosering.

Deze dimensioneringsgrondslagen zijn ontleend aan het hiervoor beschreven laboratorium onderzoek en literatuuronderzoek.

TABEL 5.1 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN ADSORPTIE

Adsorptiecapaciteit zeolieten (bij actuele concentratie organische microverontreiniging (4-6 µg/L))	20-50 µg/g (afhankelijk van organische microverontreinigingen)
Contacttijd	5 - 10 min. (met als doel 5 min)
Debiet	6 - 12 BV/h
Influent concentratie per microverontreiniging	Werkelijke concentratie, zonder spiking (0-5 µg/L)
DOC concentratie (effluent Horstermeer)	10-15 mg/l
Standtijd tot regeneratie	5-7 dagen

TABEL 5.2 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN OZONREGENERATIE

Ozongas dosering	3,64 kg/BV/h
Ozongas concentratie	90 g/m ³
Regeneratieduur	3 uur

TABEL 5.3 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN TERUGSPOELEN, DROGEN EN KOELEN

Terugspoelen vóór regeneratie	1 - 3 BV
Drogen vóór regeneratie	5 uur, lucht 60°C (ventilator)
Koelen na regeneratie	30 min., omgevingslucht (ventilator)
Terugspoelen na regeneratie	1 - 3 BV

Op basis van de dimensioneringsgrondslagen blijkt dat het terugspoelwater minder dan 1% is. De standtijd van 5 dagen met 6 - 12 BV/h betekent dat er 720 - 1440 BV worden behandeld. Het terugspoelwater water dat ontstaat bij elke regeneratie is 1 - 3 BV; als percentage van behandeld afvalwater is dit < 1%. De samenstelling van dit spoelwater is thans nog niet bekend. Naar verwachting zijn hierin geen oorspronkelijke organische microverontreinigingen meer aanwezig, maar wel oxidatie bijproducten en afbraakproducten van natuurlijk organisch materiaal. Deze hebben een minder complexe structuur dan de uitgangsstoffen en zijn naar verwachting zeer goed biologisch afbreekbaar. Dit terugspoelwater wordt daarom teruggevoerd naar het influent van de RWZI en toegevoegd aan het ruwe afvalwater. Ter verificatie wordt dit spoelwater geanalyseerd op de aanwezigheid van oxidatie bijproducten (zie Hoofdstuk 9.2, onderzoeksvraag 5). Daarnaast produceert AdOx geen slib uit het proces, daarom wordt er geen intensieve terugspoeling verwacht.

6

ONDERBOUWING VAN ONTWERPCRITERIA

In dit hoofdstuk wordt besproken hoe de AdOx-technologie presteert in relatie tot de STOWA-richtlijnen. Het omvat de CO₂-voetafdruk, verwijderingsefficiëntie van de organische microverontreinigingen en de vermindering van ecotoxiciteit. Vanwege het lopende onderzoek en de optimalisatie is de exacte contacttijd (*empty bed contact time* (EBCT)) nog niet bepaald, en zijn er twee scenario's gebruikt: 5 minuten en 10 minuten. De berekeningen van energieverbruik, CO₂-voetafdruk en kosten omvatten beide scenario's.

6.1 CO₂-VOETAFDRUK

De schatting van de CO₂-voetafdruk van de AdOx-technologie werd uitgevoerd in overeenstemming met de laatste versie van STOWA's spreadsheetmodel van "CO₂-voetafdruk RWZI micros 100.000 i.e.". De invoerwaarden waren afkomstig van berekeningen van het energieverbruik volgens de richtlijnen van STOWA IPMV Call 2020. Het overzicht van CO₂-emissie/jaar van de AdOx-technologie in vergelijking met de bestaande RWZI en andere technologieën is te vinden in bijlage A-1 voor EBCT van 5 minuten en bijlage A-2 voor EBCT van 10 minuten.

AdOx zal naar verwachting worden gebruikt als een post-filtratie voor het effluent van de bestaande afvalwaterzuiveringsinstallatie. Net als bij ozon met zandfiltratie (Ozon+ZF) en GAK wordt het voldoende geacht 70% van het totale effluent te behandelen. Bij regenweer afvoer is een by-pass vereist. Aangenomen is dat voor de full-scale toepassing 21 kolommen worden geïnstalleerd, elk met een debiet van 50 m³/u, een diameter van 2 m en een zeoliet-filterbed hoogte van 1 m. Per week worden ongeveer 3-4 kolommen gedurende 8 uur geregenereerd, met inbegrip van de voorspoeling (15 minuten), het drogen (5 uur), het injecteren van ozongas (3 uur) en de terugspoeling (15 minuten).

6.1.1 ADOX-INFLUENT OPVOERHOOGTE

Een kortere contacttijd kan de benodigde hoogte van de filtratiekolom verminderen. Daarom werd voor een EBCT van 5 minuten de opvoerhoogte voor de filtratiepomp berekend uit de kolomhoogte, de operationele opvoerhoogte en het hoogteverschil tussen de effluentuitlaat van de nabezinktank en de bodem van de filtratiekolom van AdOx. De kolomhoogte werd verkregen door de optelling van de bedhoogte, 30% bedhoogte voor het anticiperen op verstopping, 50% bedhoogte voor expansie tijdens terugspoelen en 10% bedhoogte als vrijboord. Dit resulteert in een totale hoogte van 2 m. De operationele opvoerhoogte (ten gevolge van aanzuiging en wrijving) wordt verondersteld 30% te zijn van de kolomhoogte als zijnde de statische opvoerhoogte, die gelijk is aan 0,6 m. Tenslotte wordt het hoogteverschil tussen de uitlaat van de nabezinktank en de bodem van de kolom verondersteld 1 m te bedragen. De totale opvoerhoogte van het influent rioolwater bedraagt derhalve 3,6 m (ingevoerd als 4 m in het CO₂-model).

Met dezelfde schatting is de totale opvoerhoogte voor opvoeren rioolwater met EBCT van 10 minuten 6,9 m (ingevoerd als 7 m in het CO₂-model). Deze invoerhoogte is in overeenstemming met de STOWA-norm van 8 m opvoerhoogte voor andere filtratietechnologieën (Ozon+ZF en GAK) met een EBCT van 15 minuten.

6.1.2 WARMTE VOOR DROGEN

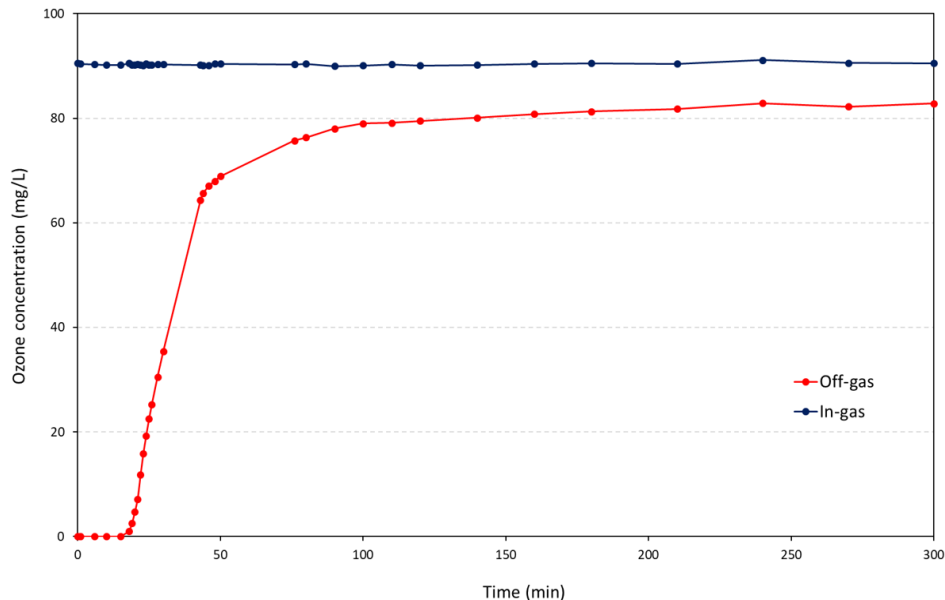
De droging vóór de ozonregeneratie wordt in-situ uitgevoerd, waarbij de warmte rechtstreeks uit fossiele brandstoffen wordt gegenereerd (zonder deze vooraf in elektriciteit om te zetten). Op basis van de richtlijnen komt 1 Nm³ aardgas overeen met 1,79 kg CO₂, terwijl met hetzelfde volume 11 kWh warmte wordt geproduceerd (Swedish Gas Centre, 2007). Dit betekent dat de warmte uit aardgas 0,16 kg CO₂/kWh produceert, oftewel slechts 31% van de hoeveelheid CO₂ die door elektriciteit wordt geproduceerd voor dezelfde benodigde energie.

6.1.3 OZONPRODUCTIE EN -VERBRUIK

De in-situ-regeneratie met ozon begint met de injectie van ozongas onderin de kolom (in-gas). Het overtollige gas wordt aan de bovenzijde van de kolom afgevoerd (off-gas). Het resultaat van in-situ-regeneratie met ozon op laboratoriumschaal is afgebeeld in Figuur 6.1.

FIGUUR 6.1

RESULTAAT VAN LABORATORIUMSCHAAL IN-SITU REGENERATIE MET EEN IN-GAS CONCENTRATIE VAN 90 MG/L



Het resultaat toont aan dat na ongeveer 30 minuten regeneratie ozon in het off-gas wordt gedetecteerd. Binnen een uur is de concentratie van ozon in het off-gas bijna constant op 80 mg/l. Dit zou kunnen betekenen dat het ozonverbruik geleidelijk afneemt; om ozongas te besparen zal daarom een recirculatiesysteem worden ingevoerd. Deze recirculatie zal het mogelijk maken het ozon off-gas terug te voeren naar het in-gas, wat zal resulteren in een efficiënter ozongebruik en bijgevolg in een lager elektriciteitsverbruik voor het genereren van ozon. Aangezien de volledige ozonregeneratie gepland is gedurende 3 uur, zal de energie voor het opwekken van ozon alleen in het eerste uur op volle capaciteit nodig zijn. De laatste 2 uur zullen afhangen van het recirculatiesysteem dat gebruik maakt van een kleine gaspomp met een te verwaarlozen energieverbruik in vergelijking met de ozongenerator. Daarom is in deze haalbaarheidsstudie het energieverbruik voor de ozongenerator (90 mg/l gedurende 180 min zonder gasrecirculatie) gedeeld door een factor 3 vanwege het efficiëntere gebruik van ozon door gasrecirculatie.

6.1.4 TERUGSPOELEN

In hoofdstuk 5 is vermeld dat het terugspoelwater in volume slechts 1% van het effluent bedraagt, wat betekent dat 2% effluent nodig is voor het voor- en terugspoelen. De belangrijkste functie van de voorspoeling is het verwijderen van verstoppingen en het opnieuw ordenen van de zeolietkorrels in het bed, zodat dit gereed is voor drogen en ozonregeneratie. De terugspoeling voert restanten van de geoxideerde micro's naar het (biologische) hoofdbehandelingsproces.

Bij het AdOx-proces wordt er geen slib en neerslag geproduceerd in het filter. Daarom is aangenomen dat de laatste stap van de bestaande zuiveringsinstallatie (de nabezinktank) reeds de verwijdering van vlokken en precipitaten omvat. Deze omstandigheden kunnen worden vergeleken met de filtratiestap in de drinkwaterzuivering, en daarom is aangenomen dat de hoeveelheid effluent van AdOx dat nodig is voor de terugspoeling (terugspoeling gebeurt met filtraat) hetzelfde is als die voor het drinkwaterfiltratieproces (namelijk 4%). Of in het midden van de adsorptiestap (binnen 5-7 dagen) nog een terugspoeling nodig is, kan later in de proefinstallatie worden nagegaan.

6.1.5 ENERGIEGEBRUIK VOOR ZEOLIETMATERIAAL

Hoog-silicagehalte zeolietkorrels zijn nog niet opgenomen in de materialendatabase van het STOWA CO₂-model. Daarom is het energiegebruik berekend door de energie te nemen voor het synthetiseren van zeoliet (BEA-type) om een chemische katalysator te produceren (Zaykovskaya, et al., 2020) en deze op te tellen bij de energie voor het (laboratoriumschaal) granulatieproces uitgevoerd door Delft Solids Solutions (DSS). De benodigde energie voor het synthetiseren van zeoliet is 0,03 kWh/kg zeoliet en voor het granuleren is dat 6,35 kWh/g. Het vereiste gewicht van de korrels is 51 ton voor een EBCT van 5 minuten en 102 ton voor een EBCT van 10 minuten. Met gebruikmaking van een conversiefactor uit de IPMV-richtlijnen (1 kWh = 0,53 kg CO₂) draagt het energieverbruik voor de zeolietproductie bij tot 0,73 kg CO₂/kg zeoliet als korrels. Om de waarden in het CO₂-model in te vullen wordt een conversiefactor gegeven door het energieverbruik voor de productie van zeolietkorrels met een hoog silica-gehalte te vergelijken met actieve kool in korrelvorm (GAK), waarbij 1 kg GAK een bijdrage van 11 kg CO₂ oplevert (Latunussa, et al., 2020). De conversiefactor is dus 0,07 kg zeoliet/kg GAK. De input voor het CO₂-model in de GAK-cel was daarom 3,4 ton voor een EBCT van 5 minuten en 6,8 ton voor een EBCT van 10 minuten.

Het ozongas wordt geproduceerd uit vloeibare zuurstof (LOX). Het jaarlijks verbruik van LOX bedraagt respectievelijk 71 ton voor een EBCT van 5 minuten en 142 ton voor een EBCT van 10 minuten. Er wordt een close-loop uitgevoerd (recirculatie) om het ozongas dat uit de uitlaat komt op te slaan en het tijdens de ozonisatieperiode met behulp van een gaspomp naar de kolom terug te voeren.

6.2 TOTAAL ENERGIEGEBRUIK

De volledige berekening voor het energiegebruik is te vinden in bijlage B-1 voor een EBCT van 5 minuten en bijlage B-2 voor een EBCT van 10 minuten. De samenvatting van de schatting van het energiegebruik voor de EBCT van 5 minuten en 10 minuten wordt gepresenteerd in respectievelijk Tabel 6.1 en Tabel 6.2. Geconstateerd werd dat het eerste jaar het hoogste energiegebruik heeft als gevolg van de bijdrage van de productie van het opstart materiaal van zeolietkorrels. Vanaf het tweede jaar zal het energiegebruik naar verwachting lager en stabiel zijn.

De aannames per processtap worden hieronder weergegeven:

1. Adsorptie : alle kolommen zijn in bedrijf (met uitzondering van 1 kolom in regeneratie)
2. Drogen : reductie vochtgehalte 25% van gedraineerd filter; warmtebron van aardgas
3. Ozonisatie : met dezelfde ozon factor als STOWA 2015-27 (12 kWh/kg ozon)
4. Zeoliet productie : poeder productie en granulatie proces

TABEL 6.1 JAARLIJKS ENERGIEGEBRUIK VAN ADOX VOOR EBCT 5 MIN. (EERSTE JAAR EN VOLGENDE JAREN)

SAMENVATTING (EERSTE JAAR)		
Proces stap	kWh/m ³	Percentage
Adsorptie	0,06	51,0%
Voorspoelen	4,85E-07	0,0%
Drogen	0,02	17,4%
Ozonisatie	0,03	24,3%
Terugspoelen	4,85E-07	0,0%
Zeoliet productie	0,01	7,3%
TOTAAL	0,11	100,0%
SAMENVATTING (VANAF TWEDE JAAR)		
Proces stap	kWh/m ³	Percentage
Adsorptie	0,06	55,1%
Voorspoelen	4,85E-07	0,0%
Drogen	0,02	18,7%
Ozonisatie	0,03	26,2%
Terugspoelen	4,85E-07	0,0%
Zeoliet productie	-	0,0%
TOTAAL	0,10	100,0%

TABEL 6.2 JAARLIJKS ENERGIEGEBRUIK VAN ADOX VOOR EBCT 10 MIN. (EERSTE JAAR EN VOLGENDE JAREN)

SAMENVATTING (EERSTE JAAR)		
Proces stap	kWh/m ³	Percentage
Adsorptie	0,03	20,7%
Voorspoelen	4,85E-07	0,0%
Drogen	0,04	28,1%
Ozonisatie	0,06	39,3%
Terugspoelen	4,85E-07	0,0%
Zeoliet productie	0,02	11,9%
TOTAAL	0,14	100,0%
SAMENVATTING (VANAF TWEDE JAAR)		
Proces stap	kWh/m ³	Percentage
Adsorptie	0,03	23,5%
Voorspoelen	4,85E-07	0,0%
Drogen	0,04	31,9%
Ozonisatie	0,05	44,6%
Terugspoelen	4,85E-07	0,0%
Zeoliet productie	-	0,0%
TOTAAL	0,12	100,0%

Uit de tabellen kan worden afgeleid dat de energie wordt gebruikt voor het pompen van water in het zeolietfilter, het voor- en terugspoelen, het drogen en het regenereren met ozongas. Het filtraatwater en het voerspoelwater kunnen rechtstreeks worden geloosd op het ontvangende oppervlaktewater, terwijl het naspoelwater (dat enkele tussenproducten van de geoxideerde microverontreinigingen kan bevatten) wordt teruggestuurd naar de hoofdzuivering van de RWZI. Bij deze technologie wordt geen slib geproduceerd, zodat er geen slibverwerking nodig is.

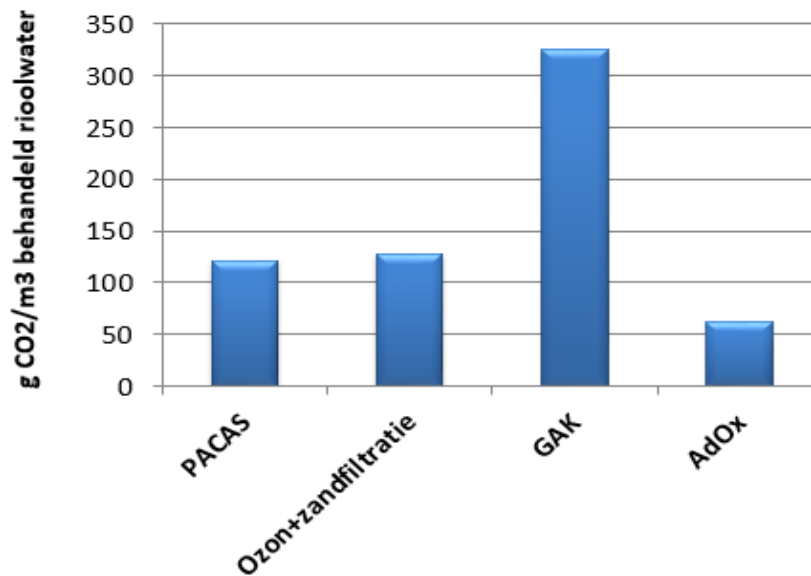
De prestaties van AdOx bij een EBCT van 5 minuten vergeleken met de andere technologieën zijn weergegeven in Tabel 6.3, Figuur 6.2 en Figuur 6.3. Geconstateerd wordt dat AdOx de laagste CO₂-voetafdruk heeft.

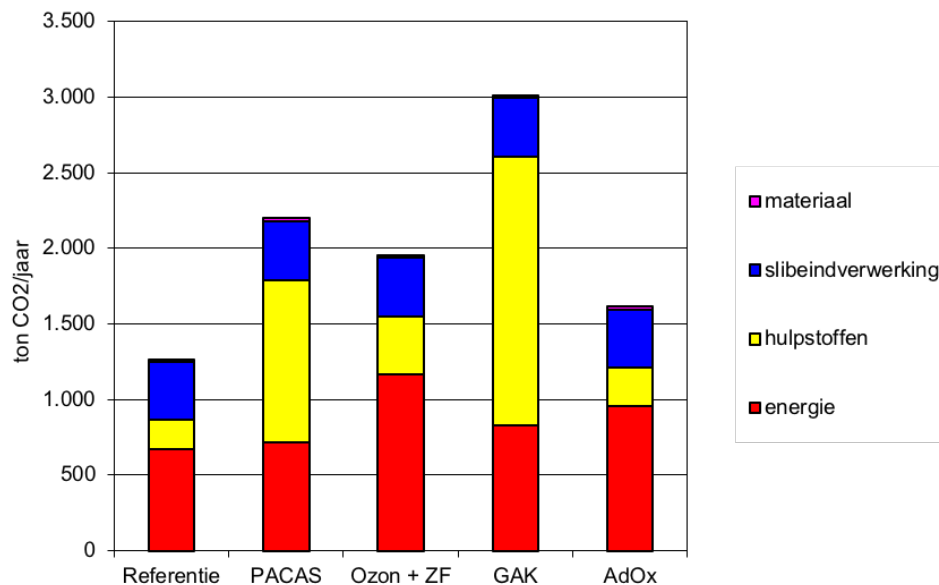
TABEL 6.3 CO₂-VOETAFDruk VAN ADOX VOOR VERWIJDERING MICRO'S MET EBCT 5 MIN.

		Ref ¹	PACAS ²	Ozon+ZF ³	GAK ⁴	AdOx
CO ₂ -voetafdruk totaal	ton CO ₂ /jaar	1265	2198	1953	3009	1612
behandelde hoeveelheid	m ³ /jaar	0	7.665.000	5.365.500	5.365.500	5.365.500
CO ₂ -voetafdruk verwijdering micro's	g CO ₂ /m ³		122	128	325	65

- 1 Ref : referentie RWZI met voorbezinking en gisting zonder vergaande verwijdering van micro's (STOWA 2015-27)
 2 PACAS : poedervormige actieve kool in een biologisch actief slib systeem (STOWA 2018-02)
 3 Ozon+ZF : nabehandeling RWZI-effluent met ozon en zandfiltratie (STOWA 2017-36)
 4 GAK : nabehandeling RWZI-effluent met granulair actieve koolfiltratie (STOWA 2015-27)

FIGUUR 6.2 CO₂-VOETAFDruk VERWIJDERING MICRO'S MET ADOX EBCT 5 MIN.

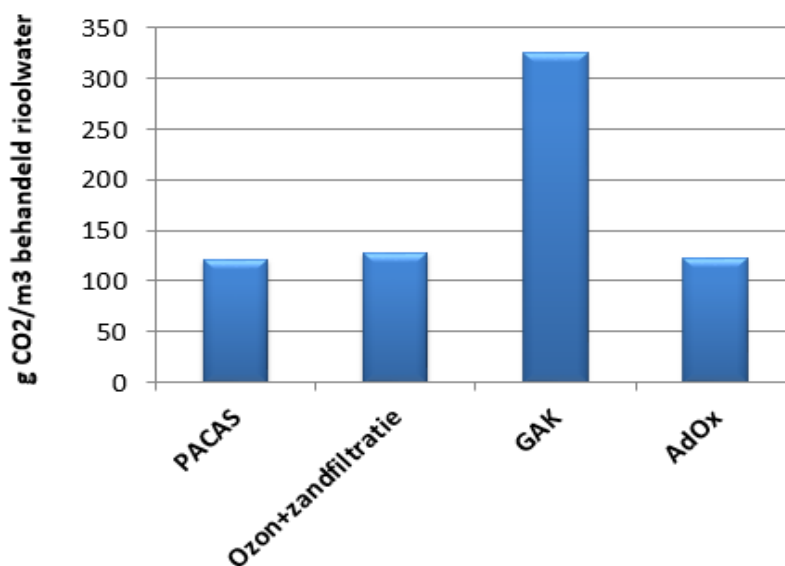


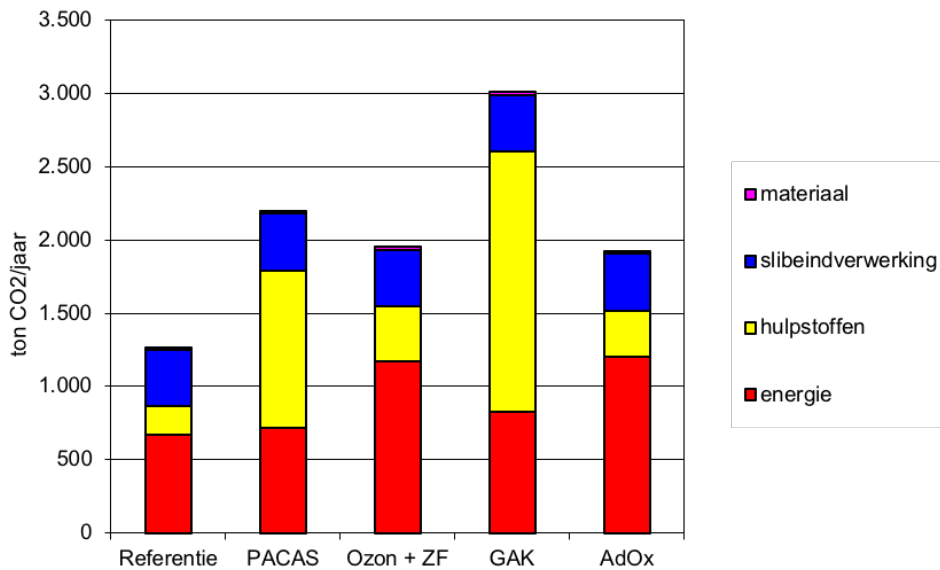
FIGUUR 6.3 CO₂-VOETAFDRUK TOTALE RWZI INCLUSIEF VERWIJDERING MICRO'S MET ADOX EBCT 5 MIN.

Voor een EBCT van 10 minuten is berekend dat AdOx meer CO₂ zal uitstoten, zoals te zien is in Tabel 6.4, Figuur 6.4 en Figuur 6.5. Deze toename van energiegebruik is voornamelijk afkomstig van de materialen en het regeneratieproces.

TABEL 6.4 CO₂-VOETAFDRUK VAN ADOX VOOR VERWIJDERING MICRO'S MET EBCT 10 MIN.

		Ref	PACAS	Ozon+ZF	GAK	AdOx
CO ₂ -voetafdruk totaal	ton CO ₂ /jaar	1265	2198	1953	3009	1924
behandelde hoeveelheid	m ³ /jaar	0	7.665.000	5.365.500	5.365.500	5.365.500
CO ₂ -voetafdruk verwijdering micro's	g CO ₂ /m ³		122	128	325	123

FIGUUR 6.4 CO₂-VOETAFDRUK VERWIJDERING MICRO'S MET ADOX EBCT 10 MIN.

FIGUUR 6.5 CO₂-VOETAFDRIJK TOTALE RWZI INCLUSIEF VERWIJDERING MICRO'S MET ADOX EBCT 10 MIN.

6.3 VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN

Uit de laboratoriumresultaten (Hoofdstuk 4), blijkt dat de verwijderingsrendementen per stof als volgt verschillen:

- Volgens Figuur 4.1, zijn metoprolol, propranolol, trimethoprim en sotalol na 14 dagen niet doorgebroken, wat betekent dat voor deze verbindingen het verwijderingspercentage > 99% is. Er was een lichte doorbraak van metformine op de tweede dag (1%) en dit bleef constant tot 14 dagen, wat betekent dat het gedeeltelijk werd geadsorbeerd met ongeveer 95% verwijdering.
- Figuur 4.2 laat zien dat 5-methyl-benzotriazol en claritromycine 30% doorbraak vertoonden na 10 dagen, wat neerkomt op 85% verwijdering bij een adsorptietijd tussen 5 en 7 dagen. Benzotriazol daarentegen gaf 35% doorbraak na 6 dagen, wat ongeveer overeenkomt met 75% verwijdering tussen 5 en 7 dagen. Sulfadimethoxine vertoonde 10% doorbraak na 12 dagen, of ongeveer 95% verwijdering. Gabapentine vertoonde 20% doorbraak na 8 dagen, wat neerkomt op 85% verwijdering over de gehele looptijd van 5-7 dagen.
- Figuur 4.3 toont de stoffen die niet volledig door BEA-korrels konden worden verwijderd. Carbamazepine, diclofenac, clofibrinezuur en theofylline kunnen niet goed geadsorbeerd worden vanaf de eerste dag, terwijl sulfamethoxazol 80% doorbraak vertoonde na 6 dagen, wat betekent dat het voor minstens 20% verwijderd wordt.
- Figuur 4.4 laat zien dat na 5 dagen hydrochloorthiazide 15% doorbraak, maar daarna is de gemiddelde verwijdering beperkt tot 25%.

Deze verwijderingspercentages dragen bij aan het gemiddelde verwijderingsrendement van BEA-korrels, zoals weergegeven in Tabel 6.5.

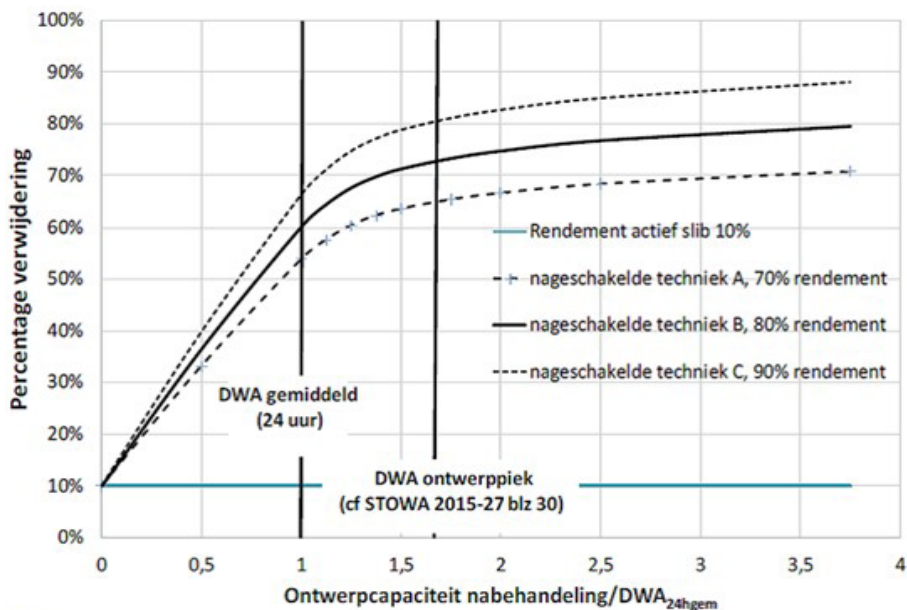
TABEL 6.5 DOORBRAAK EN GESCHATTE VERWIJDERING VAN ORGANISCHE MICROVERONTREINIGINGEN MET BEA-KORRELS

Stof	Type (zoals per 3 April 2020*)	Doorbreek tijd (dagen)	Doorbreek percentage	Gemiddelde verwijdering over 7 dagen
Metoprolol	Indicator	>14	0%	>99%
Propranolol	Monitoring		0%	>99%
Trimethoprim	Indicator	>14	0%	>99%
Sotalol	Indicator	>14	0%	>99%
Metformine	-	>14	1%	95%
5-methyl-benzotriazol	Indicator	10	30%	85%
Clarithromycine	Monitoring	10	30%	85%
Benzotriazol	Indicator	6	35%	75%
Sulfadimethoxine	-	12	10%	95%
Gabapentine	Indicator	8	20%	85%
Carbamazepine	Indicator	1	-	<1%
Diclofenac	Indicator	1	-	<1%
Clofibrinezuur	-	1	-	<1%
Theofylline	-	1	-	<1%
Sulfamethoxazol	Monitoring	6	80%	20%
Hydrochloorthiazide	Indicator	5	15%	15%

* (STOWA, ILOW, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2020)

In totaal zijn er 8 gidsstoffen met een gemiddeld verwijderingsrendement van 85 - 99% bij een adsorptieperiode van 7 dagen met BEA-korrels. Bij regenweer afvoer is echter een *by-pass* nodig, waardoor het verwijderingspercentage zal afnemen zoals aangegeven in Figuur 6.6.

FIGUUR 6.6 VOORBEELDIGRAFIEK RENDEMENTSCURVE/ PERCENTAGE VERWIJDERING (BIJ DEFAULT RENDEMENT IN HET ACTIEF SLIB VAN 10%) (STOWA, 2015)



Uit Figuur 6.6 blijkt dat het verwijderingsrendement van AdOx naar verwachting ongeveer 80% zal bedragen. Het gemiddelde verwijderingsrendement van de indicatorstoffen zal worden gevalideerd met behulp van de komende pilot-plant. Door optimalisatie van de gebruikte typen zeolieten en het mengen van verschillende typen, wordt verwacht dat ook verbindingen die met BEA een laag verwijderingspercentage laten zien met een hoger percentage verwijderd kunnen worden. Dit wordt bevestigd in Tabel 4.1.

6.4 VERMINDERING ECOTOXICITEIT EFFLUENT

Gezien de goede verwijdering van de gidsstoffen van organische microverontreinigingen (> 80%, zie paragraaf 6.3) en het ontbreken van bromaat en andere oxidatie bijproducten in behandeld afvalwater is de verwachting dat metingen van biologische effecten een positief resultaat zullen geven in dezelfde ordegrootte als de verwijdering van de organische microverontreinigingen (vermindering ecotoxiciteit > 50%). Restanten van oxidatie bijproducten, mogelijk aanwezig in het terugspoelwater water na regeneratie (volume <1% van de afvalwaterstroom), zijn naar verwachting goed afbreekbaar. Dit spoelwater kan daarom toegevoegd worden aan het RWZI-influent.

De vermindering van de ecotoxiciteit van PACAS ligt tussen 36% en 65%, afhankelijk van de dosering. Aangezien zowel AdOx als PACAS geen broomhoudende verbindingen in het effluent vormen en er in de hoofdstroom geen omzettingsproducten vrijkomen, zal de vermindering van de ecotoxiciteit van AdOx ongeveer even groot zijn als die van PACAS (> 50%).

6.5 KOSTEN

Jaarlijkse kosten per m³ afvalwater (hoofdstuk 8) zijn tussen € 0,13 – 0,24 per m³. De variatie wordt veroorzaakt door het verschil in de EBCT- en de bulk materiaalprijs voor zeoliet (zie Hoofdstuk 7 voor uitgangspunten, informatie en berekening).

7

MOGELIJKE TOEPASSINGEN IN NEDERLAND

Dit hoofdstuk beschrijft mogelijkheden van toepassing van de AdOx technologie in de Nederlandse RWZI, inclusief de realisatie van andere zuiveringsdoelstellingen.

7.1 VOORZIENINGEN, INSTALLATIES, KOSTEN EN RUIMTEBESLAG

1. Vereiste voorzieningen om AdOx te kunnen laten functioneren op een RWZI
AdOx wordt als laatste stap in een afvalwaterzuivering toegepast. Met een relatief korte regeneratietijd (< 3 uur, inclusief spoelen en drogen < 8 uur) en standtijden die aanmerkelijk langer zijn, zullen meerder zeolietfilters parallel aan elkaar bedreven worden, waarbij één filter in regeneratie is ("merry-go-round" opstelling). Contacttijden in het zeolietfilter zijn aanmerkelijk korter dan de contacttijden in een actief koolfilter. Er is een pompfase nodig om het afvalwater door het zeolietfilter te leiden. Vergelijkbaar met koolfilters is een spoelvoorziening nodig voor de zeolietfilters. Ten opzichte van directe ozonisatie volstaat een kleinere ozoninstallatie (want er is geen oxidatie van NOM) en is geen aparte doseer- en contactruimte vereist (want ozonisatie vindt plaats in de zeolietreactor). AdOx heeft dus een vergelijkbare installaties als ozon-koolfiltratie nodig, maar de totale voetafdruk is geringer.
2. Permanente en verplaatsbare installaties, tanks en overige constructies
De zeolietfilters kunnen modulair worden uitgevoerd en zijn door de korte contacttijd (en dus beperkte grootte) goed verplaatsbaar. Doordat geen aparte ozon doseer- en contactruimte nodig is, is ook de ozonproductie installatie modulair en verplaatsbaar uit te voeren.
3. Verhouding tussen vaste investeringskosten en variabele operationele kosten
AdOx gebruikt energie voor pompen en drogen, en energie en zuurstof voor ozonproductie. Zowel energie- als ozongebruik van AdOx zijn laag, zoals hiervoor beschreven. De totale kosten zijn voornamelijk investeringskosten voor de technische installaties, zie ook hoofdstuk 8.

TABEL 7.1 RATIO CAPEX EN OPEX (INSTALLATIE 100.000 I.E.)

Kosten type	Jaarlijkse kosten (€/jaar)	Kosten per behandeld water (€/m ³)	Ratio
CAPEX	790.300 - 1.426.200	0,10 - 0,19	75% - 80%
OPEX	205.500 - 397.200	0,03 - 0,05	20% - 25%
TOTAAL	995.800 - 1.823.500	0,13 - 0,24	100%

4. Ruimtebeslag van de benodigde installaties en constructies
Het ruimtebeslag van AdOx zal iets groter zijn dan dit van een nageschakeld actief koolfilter doordat naast het zeolietfilter ook een ozoninstallatie nodig is. Het ruimtegebruik is echter geringer dan een nageschakeld ozon + zandfilter doordat geen ozon doseer- en contactruimte vereist is.

7.2 ANDERE DOELEN

Met AdOx kunnen ook andere componenten dan organische microverontreinigingen uit afvalwater verwijderd worden.

- verwijdering van microplastics: de zeolieten worden toegepast als korrels waardoor het zeolietfilter een fysieke filtratiestap is. Microplastics zullen (deels) verwijderd worden; nanoplastics zullen waarschijnlijk niet verwijderd worden. In de spoelfase van het zeolietfilter voorafgaand aan de regeneratie, zullen microplastic deeltjes in geconcentreerde vorm (en dus goed behandelbaar) in het spoelwater terecht komen. Meerdere onderzoeken met betrekking tot het gebruik van filtratiemethoden voor de verwijdering van micro- en nanoplastics zijn uitgevoerd voor zowel drinkwater, zoet (oppervlakte) water en grondwater. (Bauerlein, et al., 2021) (Bertelkamp, et al., 2018) (Koelmans, et al., 2019) (Mintenig, et al., 2019) (Vercauteren, et al., 2021).
- vermindering antibioticaresistentie: effect van de AdOx technologie op vermindering van antibioticaresistentie is tot dusver onbekend.
- verwijdering van overige opkomende stoffen welke momenteel beperkt verwijderd kunnen worden (bijvoorbeeld röntgencontrastmiddelen, complexvormers, PFAS): afhankelijk van de molecuulgrootte van deze stoffen en de fysisch-chemische eigenschappen zullen ze deels geadsorbeerd worden in het zeolietfilter. Het is nog niet bekend in welke mate deze stoffen tijdens de regeneratiefase van het zeolietfilter worden geoxideerd.
- verwijdering van virussen en pathogenen (desinfectie): het zeolietfilter is een fysieke filtratiestap. Virussen en pathogenen zullen (deels) verwijderd worden, te vergelijken met snelle zandfiltratie en actieve koolfiltratie.
- verwijdering van nutriënten: uit recent onderzoek is gebleken dat synthetische zeolieten ammonium en organische microverontreinigingen simultaan kunnen verwijderen. Tijdens regeneratie met ozon blijkt ook het geadsorbeerde ammonium geoxideerd te worden (Doekhi-Bennani et al., 2021).
- circulaire economie (minder gebruik grondstoffen, minder afval, sluiten kringlopen): doordat de zeolieten selectief zijn voor organische microverontreinigingen en geen of in zeer beperkte mate NOM adsorberen, is het ozonverbruik (en dus zuurstof en energieverbruik voor ozonproductie) laag ten opzichte van directe ozonisatie van afvalwater. Doordat ozonisatie plaats vindt in een zijstroom wordt geen bromaat als toxische afvalstof geproduceerd.

7.3 TOEPASBAARHEID OP RWZI'S IN NEDERLAND

AdOx is een vierdetraps zuivering en wordt nageschakeld op de bestaande zuivering. Daardoor is de techniek breed inzetbaar op de huidige RWZI's.

8

JAARLIJKSE KOSTEN

Dit hoofdstuk bevat de kostenraming voor AdOx-technologie voor een installatie met een capaciteit van 100.000 i.e.. Op basis van de huidige inzichten zijn er vier scenario's in beschouwing genomen:

- EBCT 5 minuten met de huidige zeolietprijs
- EBCT van 5 minuten met de verwachte bulkzeolietprijs
- EBCT van 10 minuten met de huidige zeolietprijs
- EBCT van 10 minuten met de verwachte bulkzeolietprijs

Voor deze scenario's worden zowel de investeringen (CAPEX) als de variabele kosten (OPEX) gepresenteerd.

8.1 INVESTERINGEN OF CAPITAL EXPENDITURE (CAPEX)

Met inachtneming van de STOWA IPMV Call 2020-richtlijnen werden de investeringskosten of CAPEX onderverdeeld in 5 disciplines: Civiel, Mechanisch, Elektrisch en Procesautomatisering. De waarden van de kosten werden overgenomen uit RHDHV Kostencalculator (RHDHV, 2021). De zeolietkorrels met hoog silicagehalte werden verondersteld als het opstartmateriaal, zonder jaarlijkse toevoeging of vervanging, en zijn daarom opgenomen als CAPEX. De volledige berekening is te vinden in bijlage C-1 voor de EBCT van 5 minuten en bijlage C-2 voor de EBCT van 10 minuten.

Bij deze investeringskosten zijn 25% aannemersloon, 25% onvolledigheidsfactor en 80% ingenieurs - projectmanagement kosten opgeteld, behalve voor het opstartmateriaal omdat er geen constructie nodig is en het te leveren eindproduct naar verwachting volledig gereed zal zijn. In de huidige prijs is ook het vervoer over zee inbegrepen.

Om de CAPEX en de OPEX op gelijke wijze samen te voegen en de jaarlijkse totale kosten te bepalen, werden de eenmalige investeringskosten geprojecteerd op basis van hun levensduur; 30 jaar voor de civiele, 15 jaar voor de mechanische en elektrische, 5 jaar voor de procesautomatisering en 30 jaar voor het opstartmateriaal. De projectie werd uitgevoerd met behulp van een analyse van de Jaarlijkse Equivalente Kosten (JEK) aan de hand van de volgende formule:

$$A = P \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

waar :

A = geraamde jaarlijkse kosten

P = huidige kosten (netto kontante waarde of NPV)

n = levensduur van elke kosteninvestering

i = rente percentage (4%, zie de STOWA IPMV Call 2020-richtlijnen)

8.1.1 CAPEX VOOR ADOX (EBCT 5 MINUTEN)

De CAPEX voor het eerste kostenscenario gaat uit van € 120/kg als de kleinhandelsprijs van zeolietkorrels met een hoog silicagehalte van de leverancier van laboratoriumexperimenten, Tosoh. Tabel 8.1 presenteert het resultaat van de JEK analyse voor deze contacttijd en Figuur 8.1 (links) visualiseert het aandeel van de CAPEX voor een EBCT van 5 minuten.

TABEL 8.1 CAPEX VOOR ADOX EBCT 5 MIN.

Jaarlijkse Equivalente Kosten (JEK) Analyse				
Constructiekosten per Type	Totale Prijs (€)	Levensduur (jaar)	Rentepercentage	EAC (€/jaar)
Civiel	4.934.900	30	4%	285.400
Mechanisch	3.365.400	15	4%	302.700
Elektrisch	1.419.500	15	4%	127.700
Procesautomatisering	2.700	5	4%	600
Opstartmateriaal	6.137.700	30	4%	354.900
TOTALE JAARLIJKSE CONSTRUCTIEKOSTEN	15.860.200			1.071.300

Aangezien minimaal 70% van het jaarlijkse afvalwater moet worden gezuiverd, zal het jaarlijkse volume 7.665.000 m³ bedragen. De investeringskosten zullen dus voor € 0,14/m³ bijdragen aan de totale kosten.

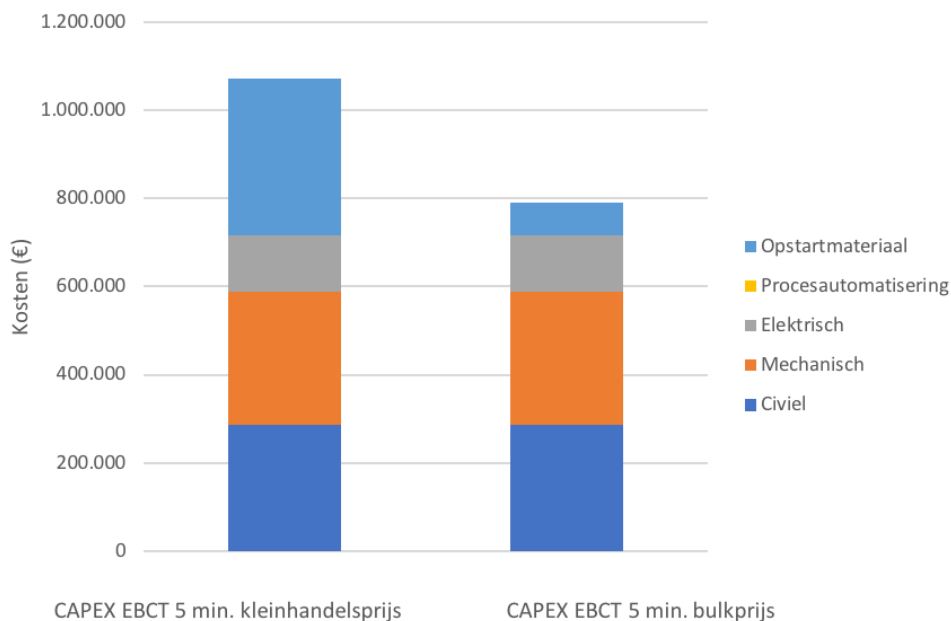
Er dient te worden opgemerkt dat de kosten voor het opstartmateriaal afkomstig zijn van de kleinhandelsprijs per kg zeoliet. In een reële situatie kan de prijs worden verlaagd als gevolg van de grotere hoeveelheid bulk zeolietkorrels die moet worden aangekocht (per ton). Ervan uitgaande dat de prijs van bulkmateriaal per kan dalen tot € 25/kg (Virta, 2002), werd de voorspelde CAPEX voor EBCT van 5 minuten uit het tweede scenario gewijzigd zoals te zien in Figuur 8.1 (rechts) en Tabel 8.2.

TABEL 8.2 CAPEX VOOR ADOX EBCT 5 MIN. EN MINIMALE ZEOLIET BULKPRIJS

Jaarlijkse Equivalente Kosten (JEK) Analyse				
Constructiekosten per Type	Totale Prijs (€)	Levensduur (jaar)	Rentepercentage	EAC (€/jaar)
Civiel	4.934.900	30	4%	285.400
Mechanisch	3.365.400	15	4%	302.700
Elektrisch	1.419.500	15	4%	127.700
Procesautomatisering	2.700	5	4%	600
Opstartmateriaal	1.278.700	30	4%	73.900
TOTALE JAARLIJKSE CONSTRUCTIEKOSTEN	11.001.100			790.300

Bij een gelijkblijvend jaarlijks volume gezuiverd water zullen de investeringskosten voor € 0,10/m³ bijdragen aan de totale kosten.

FIGUUR 8.1 CAPEX VOOR ADOX EBCT 5 MINUTEN MET KLEINHANDELSPRIJS (LINKS) EN MET MINIMALE ZEOLIET BULKPRIJS (RECHTS)



8.1.2 CAPEX VOOR ADOX (EBCT 10 MINUTEN)

Net als in paragraaf 8.1.1, wordt voor de CAPEX voor het derde kostenscenario uitgegaan van € 120/kg als verkoopprijs van zeolietkorrels/pellets met een hoog silicagehalte van de leverancier van laboratoriumexperimenten, Tosoh. In Figuur 8.2 (links) wordt het aandeel van de CAPEX gevisualiseerd en in Tabel 8.3 wordt het resultaat van de EAC-analyse gepresenteerd.

TABEL 8.3 CAPEX VOOR ADOX EBCT 10 MIN.

Jaarlijkse Equivalente Kosten (JEK) Analyse				
Constructiekosten per Type	Totale Prijs (€)	Levensduur (jaar)	Rentepercentage	EAC (€/jaar)
Civiel	4.934.900	30	4%	285.400
Mechanisch	3.365.400	15	4%	302.700
Elektrisch	1.419.500	15	4%	127.700
Procesautomatisering	2.700	5	4%	600
Opstartmateriaal	12.275.400	30	4%	709.900
TOTALE JAARLIJKSE CONSTRUCTIEKOSTEN	21.997.900			1.426.200

Bij een gelijkblijvend jaarlijks volume gezuiverd water (van 7.665.000 m³) zullen de investeringskosten voor € 0,19/m³ bijdragen aan de totale kosten.

Net als bij de EBCT van 5 minuten kan de prijs van het opstartmateriaal worden verlaagd tot € 25/kg vanwege de grotere hoeveelheid zeolietkorrels die moet worden aangekocht (per ton). De voorspelde CAPEX voor EBCT van 10 minuten werd daarom ook gewijzigd, zoals weergegeven in Figuur 8.2 (rechts) en Tabel 8.4.

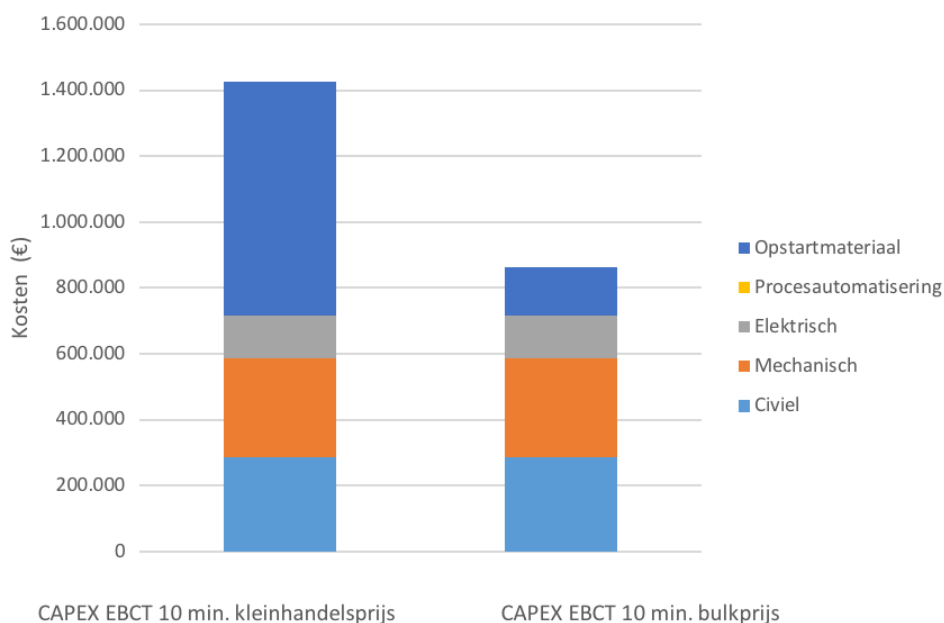
TABEL 8.4 CAPEX VOOR ADOX EBCT 10 MIN. EN MINIMALE ZEOLIET BULKPRIJS

Jaarlijkse Equivalente Kosten (JEK) Analyse

Constructiekosten per Type	Totale Prijs (€)	Levensduur (jaar)	Rentepercentage	EAC (€/jaar)
Civiel	4.934.900	30	4%	285.400
Mechanisch	3.365.400	15	4%	302.700
Elektrisch	1.419.500	15	4%	127.700
Procesautomatisering	2.700	5	4%	600
Opstartmateriaal	2.557.400	30	4%	147.900
Jaarlijkse Equivalente Kosten (JEK) Analyse	12.279.800			864.200

Bij een gelijkblijvend jaarlijks volume gezuiverd water (van 7.665.000 m³) zullen de investeringskosten voor € 0,11/m³ bijdragen aan de totale kosten.

FIGUUR 8.2 CAPEX VOOR ADOX EBCT 10 MINUTEN MET KLEINHANDELSPRIJS (LINKS) EN MET MINIMALE ZEOLIET BULKPRIJS (RECHTS)



8.2 VARIABELE KOSTEN OF OPERATIONAL EXPENDITURE (OPEX)

De waarden voor variabele kosten of OPEX werden als volgt bepaald volgens de STOWA IPMV Call 2020-richtlijnen:

- civiele operationele kosten zijn 0,5% van de civiele CAPEX.
- voor mechanische-, elektrische- en procesautomatisering zijn operationele kosten 3% van hun CAPEX-waarden.
- de personeelskosten bedragen € 50.000/FTE. In AdOx kunnen bijna alle operationele taken automatisch worden gepland, daarom werd slechts 0,5 VTE ingevuld.
- de elektriciteitskosten bedragen € 0,1/kWh. Voor de AdOx behandeling bestaan de elektriciteitskosten uit het pompen van het effluent van de RWZI als het influent van de filtratiekolom, twee terugspoelstappen en ozongeneratie.
- de kosten voor zuivere zuurstof bedragen € 0,20/kg.
- de kosten van het terugspoelen bedraagt € 0,04/m³ waswater. AdOx heeft twee spoelingen, daarom omvat het volume van de voorspoeling- en terugspoeling.
- de verwerkingskosten van het spoelwater bedragen € 0,01/m³ spoelwater. In AdOx wordt het voorspoelwater direct geloosd op het oppervlaktewater, daarom hoeft alleen

het terugspoelwater te worden teruggevoerd naar de hoofd-RWZI. De totale spoelwaterproductie bedraagt 107.310 m³/jaar en het verwerkte water van de terugspoeling bedraagt 53.665 m³/jaar.

Omdat de OPEX nauw samenhangt met de CAPEX, varieert deze ook volgens de vier kosten-scenario's.

Voor het droogproces is warmte nodig, waarvan wordt aangenomen dat deze wordt gewonnen uit fossiele brandstoffen (zie sectie 6.1.2). De prijs wordt berekend per kWh, en is dus gelijk aan de prijs van elektriciteit (€ 0,1/kWh).

Voor de berekening van de OPEX zijn er ook extra kosten voor zeolietkorrels/pellets. Hoewel er in principe geen verlies van zeoliet wordt verwacht, kan vervanging in de praktijk nodig zijn; daarom is ervan uitgegaan dat 5% van de korrels/pellets aan de kolommen wordt toegevoegd. De kosten van deze extra pellets hangen af van de kosten van het opstartmateriaal en variëren daarom in de vier al eerder beschreven scenario's. Gedetailleerde informatie en berekeningen zijn te vinden in bijlage D-1 voor de EBCT van 5 minuten en bijlage D-2 voor de EBCT van 10 minuten.

In de OPEX is het verschil in totale kosten onder andere afhankelijk van de gekozen contacttijd, naast de variërende materiaalkosten. Uitgebreide uitleg betreffende de OPEX voor de vier verschillende scenario's per contacttijd volgt in paragraaf 8.2.1 en 8.2.2.

8.2.1 OPEX VOOR ADOX (EBCT 5 MIN.)

De OPEX van het eerste scenario is weergegeven in Figuur 8.3 (links).

Jaarlijkse eenheidsprijs voor extra zeolietkorrels aan de hand van een analyse van de Jaarlijkse Equivalente Kosten (JEK):

Eenheidsprijs van zeolietkorrels	=	120 €/kg
Levensduur	=	5 jaar
Rentepercentage	=	4%
JEK	=	26,96 €/kg

Aangezien minimaal 70% van het jaarlijkse afvalwater moet worden gezuiverd, bedraagt het jaarlijkse volume 7.665.000 m³. De totale exploitatie- en onderhoudskostendragen dus voor 0,03 €/m³ bij aan de totale kosten.

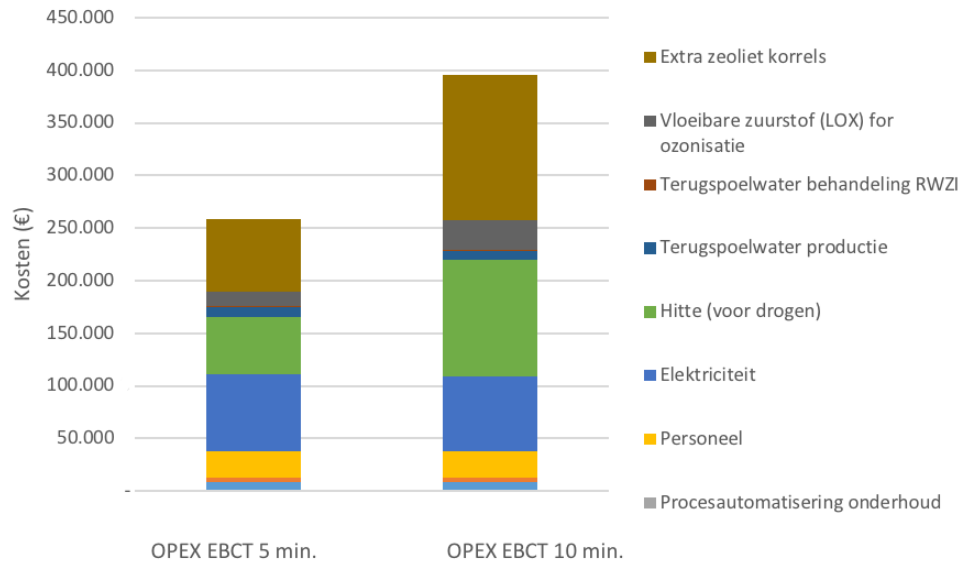
Het verschil tussen de kleinhandelsprijs en de bulkprijs van zeoliet is ook van invloed op de OPEX, zoals aangegeven in Figuur 8.4 (links). Zodoende is de JEK van zeolietkorrels (met een bulkprijs van 25 €/kg) 5,62 €/kg. Bij een gelijkblijvend jaarlijks volume gezuiverd water (van 7.665.000 m³) zullen de exploitatie- en onderhoudskosten ook voor € 0,03 /m³ bijdragen aan de totale kosten.

8.2.2 OPEX VOOR ADOX (EBCT 10 MIN.)

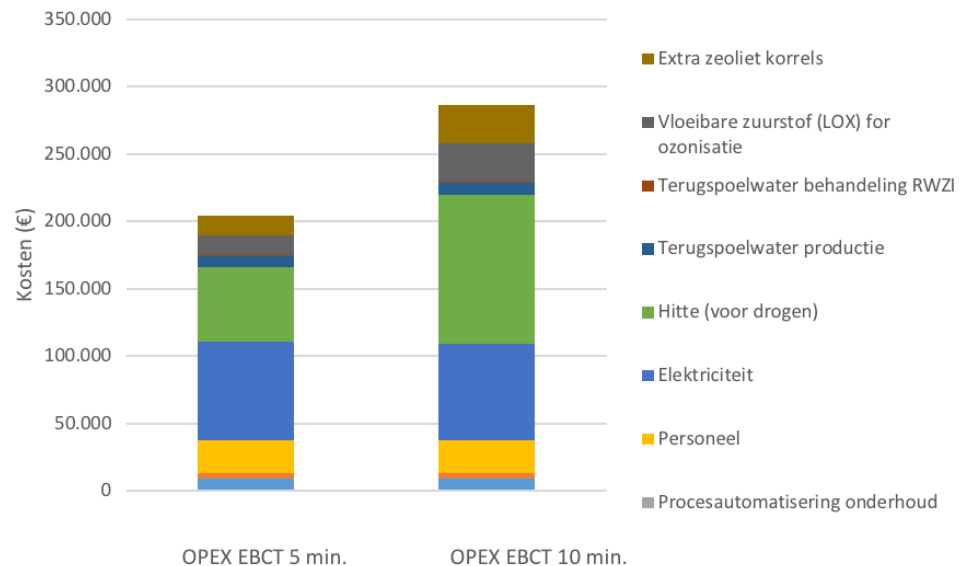
De OPEX van het tweede scenario is weergegeven in Figuur 8.3 (rechts).

De jaarlijkse eenheidsprijs voor extra zeolietkorrels kwam uit dezelfde EAC-analyse voor de EBCT van 5 minuten. De totale exploitatie- en onderhoudskosten bedragen dus 0,05 €/m³. Net als bij de EBCT van 5 minuten, kan de prijs van het opstartmateriaal worden verlaagd. De OPEX voor de EBCT van 10 minuten is te zien in Figuur 8.4 (rechts). In deze opstelling met een ECBT van 10 minuten zullen de totale exploitatie- en onderhoudskosten voor € 0,04 /m³ bijdragen aan de totale kosten.

FIGUUR 8.3 OPEX VOOR ADOX EBCT 5 MINUTEN (LINKS) EN VOOR EBCT 10 MINUTEN (RECHTS) MET KLEINHANDELSPRIJS



FIGUUR 8.4 OPEX VOOR ADOX EBCT 5 MINUTEN (LINKS) EN EBCT 10 MINUTEN (RECHTS) VOOR MINIMALE ZEOLIET BULKPRIJS



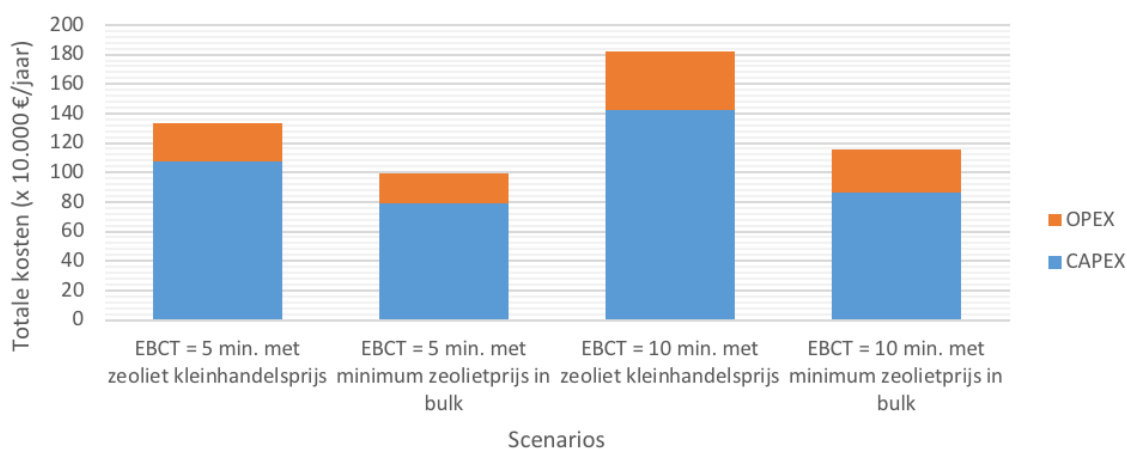
8.3 TOTALE JAARLIJKSE KOSTEN

De totale jaarlijkse kosten van de vier scenario's wordt weergegeven in Tabel 8.5 en Figuur 8.5.

TABEL 9.5 ADOX TOTALE JAARLIJKSE KOSTEN (4 SCENARIO'S)

Scenario	CAPEX			OPEX			Totaal	
	(€/jaar)	(€/m ³)	Ratio	(€/jaar)	(€/m ³)	Ratio	(€/jaar)	(€/m ³)
1 EBCT = 5 min. met zeoliet kleinhandelsprijs	1.071.300	0,14	80%	260.100	0,03	20%	1.331.400	0,17
2 EBCT = 5 min. met minimum zeolietprijs in bulk	790.300	0,10	79%	205.500	0,03	21%	995.800	0,13
3 EBCT = 10 min. met zeoliet kleinhandelsprijs	1.426.200	0,19	78%	397.200	0,05	22%	1.823.500	0,24
4 EBCT = 10 min. met minimum zeolietprijs in bulk	864.200	0,11	75%	288.100	0,04	25%	1.152.300	0,15

FIGUUR 8.5 ADOX TOTALE JAARLIJKSE KOSTEN (4 SCENARIO'S)



Samengevat liggen de kosten tussen € 0,13 en € 0,24 per m³ behandeld afvalwater. Met de verwachte contacttijd van 5 minuten liggen de kosten tussen € 0,13 en € 0,17 per m³ behandeld afvalwater. De gemiddelde kosten (gemiddeld over de vier scenario's) zijn € 0,17 per m³ en de standaarddeviatie is 0,05.

Tabel 8.6 toont de vergelijking tussen AdOx en andere bestaande technologieën (PACAS, Ozon+ZF en GAK). De CAPEX en OPEX voor deze technologieën zijn ontleend aan hun berekende kosten voor 100.000 i.e. tijdens de haalbaarheidsstudie, die in de STOWA-rapporten zijn gepresenteerd.

TABEL 8.6 TOTALE KOSTEN VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN PER BEHANDELDE M³ RWZI-EFFLUENT (PACAS, OZON+ZF, GAK, ADOX)

Totale Kosten	PACAS (25 mg/L)	Ozon+ZF	GAK	AdOx (EBCT 5 min.)
€/m ³	0,06	0,17	0,26	0,13 – 0,17
€/i.e.	3,38	8,9	13,7	9,96 – 13,31
Bron	STOWA 2018-02	STOWA 2017-36	STOWA 2015-27	Hoofdstuk 8

9

KENNIS- EN ONDERZOEKSVRAGEN

Zoals reeds verwoord in de voorgaande hoofdstukken richt het onderzoek zich behalve op de verwijdering van organische microverontreinigingen vooral op de regeneratie van de zeolietfilters met ozon. De onderzoeksvragen zijn onderverdeeld in drie subcategorieën en luiden als volgt:

9.1 ADSORPTIE VAN ORGANISCHE MICROVERONTREINIGINGEN MET ZEOLIETEN

1. Wat is de verwijdering van de beoogde organische microverontreinigingen met zeoliet?
2. Blijft de verwijderingscapaciteit op niveau na langere bedrijfsvoering (tenminste een half jaar)?
3. In welke mate treedt er verstopping van het zeolietfilter op door gesuspendeerde materie gedurende de looptijd tussen twee regeneraties in het RWZI-effluent?
4. Is er uitspoeling van zeolietkorrels tijdens de periodieke terugspoeling van het zeolietfilter?
5. Hoe zal de samenstelling RWZI-effluent (zoals; zwevende stoffen, DOC, pH, ionen en andere specifieke stoffen) de verwijdering beïnvloeden?

9.2 REGENERATIE VAN ZEOLIETEN MET OZON

1. Wat is op de lange termijn de regeneratie efficiëntie?
2. Wat is het verlies aan adsorptie capaciteit van de zeolieten na een langere periode van belading-regeneratie cycli?
3. Heeft een wisselende samenstelling van afvalwater, en wisselende hydraulische belasting, effect op het regeneratieproces?
4. Wat zijn de optimale regeneratie condities voor de parameters; ozongas concentratie, ozongas toevoer en duur van de regeneratie?
5. Wat is de concentratie aan oxidatie bijproducten in het terugspoelwater van het zeolietfilter na ozonregeneratie (ter verificatie van de veronderstelling dat dit minimaal is)?

9.3 BEOORDELING VAN DE GEHELE TECHNOLOGIE (ADSORPTIE EN REGENERATIE)

1. Wat is de (werkelijke) CO₂-voetafdruk van de technologie?
2. Wat zijn de kosten van de technologie? (investering en operationeel, inclusief arbeidsintensiviteit)
3. Wat is de vermindering van ecotoxicologische risico's van de technologie?
4. Wat is de optimale verhouding tussen het aantal zeolietfilters in bedrijf voor adsorptie en in regeneratie om een zo constant mogelijke effluent kwaliteit te bereiken?

10

CONCLUSIES

Op basis van de laboratoriumexperimenten, literatuurstudie en de score van AdOx op de prestatie -indicatoren; CO₂-voetafdruk, kosten, verwijderingsrendement gidsstoffen en reductie ecotoxicologische risico's blijkt dat AdOx tenminste kan concurreren en vaak beter scoort dan de referentie technieken PACAS en Ozon+ZF. De resultaten van de haalbaarheidsstudie zijn samengevat in Tabel 10.1 en Tabel 10.2.

TABEL 10.1 PRESTATIES ADOX MET EBCT = 5 MIN.

	Eenheid	1. Geïntegreerd in actief slib (PACAS)	2. Nageschakeld (Ozon+ZF)	AdOx
1. CO ₂ -voetafdruk	g CO ₂ / m ³ ⁽¹⁾	122	130	65
2. Kosten	€/m ³ ⁽¹⁾	0,06	0,17	0,13 - 0,17
3. Verwijderingsrendement gidsstoffen Min I&W	% ⁽²⁾	70-75	80-85	80-85
4. Reductie ecotoxicologische risico's	%	≥ 50	≥ 50	> 50

TABEL 10.2 PRESTATIES ADOX MET EBCT = 10 MIN.

	Eenheid	1. Geïntegreerd in actief slib (PACAS)	2. Nageschakeld (Ozon+ZF)	AdOx
1. CO ₂ -voetafdruk	g CO ₂ / m ³ ⁽¹⁾	122	130	123
2. Kosten	€/m ³ ⁽¹⁾	0,06	0,17	0,15 - 0,24
3. Verwijderingsrendement gidsstoffen Min IenW	% ⁽²⁾	70-75	80-85	80-85
4. Reductie ecotoxicologische risico's	%	≥ 50	≥ 50	> 50

¹ Per m³ behandeld rioolwater

² Gemiddeld verwijderingsrendement op basis van concentraties in effluent RWZI ten opzichte van influent RWZI voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen benzotriazol, clarithromycine, carbamazepine, diclofenac, metropolol, hydrochloorthiazide, mengsel van 4- en 5- methylbenzotriazol, propranolol, sotalol, sulfamethoxazol, trimethoprim in elk 24h of 48h debiets- of tijdsproportioneel monster, waarbij rekening is gehouden met verblijftijd van het water in de RWZI.

Een vergelijking van Tabel 10.1 met Tabel 10.2 laat zien dat de kosten vooral verschillen als gevolg van de contacttijd. Het is de verwachting dat de EBCT dichter bij de 5 minuten dan bij 10 minuten zal komen te liggen. Meer zekerheid wat betreft de contacttijd kan verkregen worden door het uitvoeren van een pilot plant onderzoek. De werkelijke bulkprijs van de zeoliet korrels kan worden onderzocht door in contact te komen met leveranciers.

REFERENTIES

- Barrios, R., Siebel, M., Helm, A. v., Bosklopper, K., & Gijzen, H. (2008). Environmental and financial life cycle impact assessment of drinking water production at Waternet. *Journal of Cleaner Production* 16, 471-476.
- Bauerlein, P. S., Pieke, E., & Hofman-Caris, C. H. (2021). *Verwijdering van microplastics in drinkwaterproductie Evides*. Nieuwegein, the Netherlands: KWR 2021.057. KWR Water Research Institute.
- Bertelkamp, C., Bauerlein, P., & Siegers, W. (2018). *Nanodeeltjes in de drinkwaterzuivering - Meetcampagne coagulatie/flocculatie en filtratie met actief kool en zand*. Nieuwegein, The Netherlands: BTO 2018.021. KWR Water Research Institute.
- Braschi, I., Blasioli, S., Buscaroli, E., Montecchio, D., & Martucci, A. (2016). Physicochemical regeneration of high silica zeolite Y used to clean-up water polluted with sulfonamide antibiotics. *Journal of Environmental Science (China)* 43, 302-312.
- de Ridder, D. J., Verberk, J. Q., Heijman, S. G., Amy, G. L., & van Dijk, J. C. (2012). Zeolites for nitrosamine and pharmaceutical removal from demineralised and surface water: mechanisms and efficacy. *Separation and Purification Technology* 89, 71-77.
- Doekhi-Bennani, Y., Leilabady, N. M., Fu, M., Rietveld, L. C., van der Hoek, J. P., & Heijman, S. G. (2021). Simultaneous removal of ammonium ions and sulfamethoxazole by ozone regenerated high silica zeolites. *Water Research* 188, 116472. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116472>.
- Elshof, A. (2019). *Engineering zeolite pellets for the adsorption of organic micropollutants*. Master Thesis. Delft. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:12cd16a6-eb4a-4083-bb68-bef2e2755591>: Delft University of Technology.
- Fu, M. (2020). *Column Test Planning. Big column adsorption and regeneration*. Presentation Slide. Delft University of Technology.
- Fu, M., He, M., Heijman, S. G., & van der Hoek, J. P. (2021). Ozone-based regeneration of granular zeolites loaded with acetaminophen. *Separation and Purification Technology* 256, 117616. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117616>.
- He, M. (2019). *On-site Regeneration of Acetaminophen Loaded Zeolite Granules by Applying Gaseous Ozone Based Oxidation Process*. Master Thesis. Delft. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:7da1cc68-1a34-4853-a31a-74794e2579db>: Delft University of Technology.
- Hu, R. (2020). *Adsorption of Organic Micro-pollutants by Zeolite Granules: Batch and Column Studies*. Master Thesis. Delft. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:269fbf06-6714-436c-852f-bd99e0ee7c1a>: Delft University of Technology.
- Jiang, N. (2019). *High-silica Zeolites as Novel Adsorbents for the Removal of Organic Micro-pollutants in Water Treatment*. Doctoral Thesis. Delft. <https://doi.org/10.4233/uuid:d4e7d2a8-aed1-48c8-98c3-eb61f18dde0b>: Delft University of Technology.
- Jiang, N. (2020, June 26). Adsorption of organic micropollutants in the effluent of wastewater treatment plants by high-silica zeolites. Presentation Slide. Delft: AdOx User Committee Meeting.

Jiang, N., Shang, R., Heijman, S. G., & Rietveld, L. C. (2018). High-silica zeolites for adsorption of organic micro-pollutants in water treatment: a review. *Water Research* 144, 145-161. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.017>.

Jiang, N., Shang, R., Heijman, S. G., & Rietveld, L. C. (2020). Adsorption of triclosan, trichlorophenol and phenol by high-silica zeolites: Adsorption efficiencies and mechanisms. *Separation and Purification Technology*, 116152. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116152>.

Jiang, S. (2021). *Proposal for removal of organic micropollutants present in wastewater by zeolite granules: Adsorption mechanisms and efficacy*. Delft University of Technology.

Koelmans, A. A., Nor, N. H., Hermesen, E., Kooi, M., Mintenig, S. M., & France, J. D. (2019). Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Research* 155, 410-422.

Latunussa, C. E., Georgitzikis, K., Matos, C. T., Grohol, M., Eynard, U., Wittmer, D., . . . Blengini, G. A. (2020). *European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020), Factsheets on Critical Raw Materials*. doi: 10.2873/92480: GROW.C.2. European Commission.

Mathon, B., Coquery, M., Liu, Z., Penru, Y., Guillon, A., Esperanza, M., . . . Choubert, J. -M. (2021). Ozonation of 47 organic micropollutants in secondary treated municipal effluents: Direct and indirect kinetic reaction rates and modelling. *Chemosphere Vol. 262*, 127969. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127969>.

Mintenig, S. M., Löder, M. G., Primpke, S., & Gerdt, G. (2019). Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Science of the Total Environment* 648, 631-635.

Mirabella Mulder Waste Water Management, STOWA, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2021). *Review of indicator substances*. STOWA. Final version 2.0. 9-July.

Mohapatra, P., Siebel, M., Gijzen, H., van der Hoek, J., & Groot, C. A. (2002). Improving eco-efficiency of Amsterdam Water Supply: A LCA approach. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 51(4), 217-227.

Mulder, M., Antakyali, D., & Ante, S. (2015). *Costs of Removal of Micropollutants from Effluents of Municipal Wastewater Treatment Plants - General Cost Estimates for the Netherlands based on Implemented Full Scale Post Treatments of Effluents of Wastewater Treatment Plants in Germany and Switzerland*. <http://www.tapes-interreg.eu/uploads/Stowa%20TAPES%20Final%20report.pdf>: STOWA and Waterboard the Dommel.

RHDHV. (2021). *Kostenstandaard*. Opgehaald van Kostenstandaard: <https://kostenstandaard.nl/>

Rietveld, L. C., Heijman, S. G., & van der Hoek, J. P. (2016). *AdOx - a next generation adsorption-oxidation process for removal of CECs from municipal wastewater*. Delft: Partnership STW/STOWA/KWR/TKI Water Technology. Contaminants of Emerging Concern in the Water Cycle.

Rossner, A., & Knappe, D. R. (2008). MTBE adsorption on alternative adsorbents and packed bed adsorber performance. *Water Research* 42, 2287-2299. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.12.009>.

STOWA. (2015). *Verwijdering van Microverontreinigingen uit Effluenten van RWZI's*. Amersfoort, Nederland. <https://www.stowa.nl/publicaties/verwijdering-van-microverontreinigingen-uit-effluenten-van-rwzis>: STOWA 2015-27. ISBN 978-90-5773-677-3.

STOWA. (2017). *Verkenning van technologische mogelijkheden voor verwijdering van geneesmiddelen uit afvalwater*. Amersfoort, Nederland: STOWA 2017-36. ISBN 978.90.5773.761.9.

STOWA. (2018). *Proof of Concept en Laboratoriumonderzoek Verwijdering Microverontreinigingen uit RWZI-Effluent met het O3-STEP® Filter*. Amersfoort, Nederland. <https://www.stowa.nl/publicaties/proof-concept-en-laboratoriumonderzoek-verwijdering-microverontreinigingen-uit-rwzi>: STOWA 2018-67. ISBN 978.90.5773.826.5.

STOWA, ILOW, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2020). *Voorlopige werkinstructie bemonstering en chemische analyse medicijnresten in RWZI-afvalwater t.b.v. bijdrageregeling 'zuivering medicijnresten' (I&W) en innovatieprogramma 'microverontreinigingen uit RWZI-afvalwater' (STOWA/I&W)*. STOWA. Versie 0.7.

Swedish Gas Centre. (2007). *Biogas: Basic data on biogas - Sweden*. Malmö: GLN Reklambyrå AB.

Valdés, H., Sánchez-Polo, M., Rivera-Utrilla, J., & Zaror, C. A. (2002). Effect of ozone treatment on surface properties of activated carbon. *Langmuir* 18, 2111-2116. <https://doi.org/10.1021/la010920a>.

Vercauteren, M., Semmouri, I., Acker, E. v., Pequeur, E., Esch, L. v., Uljee, I., . . . Janssen, C. (2021). *Onderzoek naar verspreiding, effecten en risico's van microplastics in het Vlaamse oppervlaktewater. Kernrapport*. Ghent, Belgium: VMM, Universiteit Gent, VITO. Opdrachtgever: Vlaamse Milieumaatschappij.

Virta, R. L. (2002). *Zeolites*. Reston, Virginia, USA: US Geological Survey Minerals Yearbook.

Wang, J. (2020). *Ozone-Based Regeneration of Granular Zeolites Loaded with Organic Micropollutants*. Master Thesis. Delft. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:593f2bd9-175e-453a-8882-5184b859e161>: Delft University of Technology.

Wang, S., Li, H., Xie, S., Liu, S., & Xu, L. (2006). Physical and chemical regeneration of zeolitic adsorbents for dye removal in wastewater treatment. *Chemosphere* 65(1), 82-87.

Zaykovskaya, A. O., Kumar, N., Kholkina, E. A., Li-Zhulanov, N. S., Mäki-Arvela, P., Aho, A., . . . Yu, D. M. (2020). Synthesis and physico-chemical characterization of Beta zeolite catalysts: Evaluation of catalytic properties in Prins cyclization of ()-isopulegol. *Microporous and Mesoporous Materials*, 110236. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110236>.

Zhang, Y., Mancke, R. G., Sabelfeld, M., & Geißen, S. U. (2014). Adsorption of trichlorophenol on zeolite and adsorbent regeneration with ozone. *Journal of Hazardous Materials* 271, 178-184. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.02.020>.

BIJLAGEN

A-1. CO₂-voetafdruk for EBCT of 5 minutes

A-2. CO₂-voetafdruk for EBCT of 10 minutes

B-1. Sizing and energy use for EBCT of 5 minutes

B-2. Sizing and energy use for EBCT of 10 minutes

C-1 (1). CAPEX for EBCT of 5 minutes (with zeolite retail price)

C-1 (2). CAPEX for EBCT of 5 minutes (with zeolite bulk price)

C-2 (1). CAPEX for EBCT of 10 minutes (with zeolite retail price)

C-2 (2). CAPEX for EBCT of 10 minutes (with zeolite bulk price)

D-1 (1). OPEX for EBCT of 5 minutes (with zeolite retail price)

D-1 (2). OPEX for EBCT of 5 minutes (with zeolite bulk price)

D-2 (1). OPEX for EBCT of 10 minutes (with zeolite retail price)

D-2 (2). OPEX for EBCT of 10 minutes (with zeolite bulk price)

A-1. CO2 footprint for EBCT of 5 minutes**Afvalwaterzuivering in GER-waarden**

Primair energieverbruik		ton CO2/jaar		ton CO2/jaar		ton CO2/jaar		ton CO2/jaar		ton CO2/jaar	
Totaal		1265	100%	2198	100%	1953	100%	3009	100%	1612	100%
energie		670	53%	718	33%	1169	60%	827	27%	953	59%
hulpstoffen		193	15%	1072	49%	380	19%	1778	59%	256	16%
slibeindverwerking		386	30%	391	18%	386	20%	386	13%	386	24%
materiaal		17	1,3%	17	1%	18	1%	18	1%	18	1%
	Omreken- factor kg CO2/eenheid	Referentie ton CO2/jaar		PACAS ton CO2/jaar		Ozon + ZF ton CO2/jaar		GAK ton CO2/jaar		AdOx ton CO2/jaar	
Inkoop energie		670		718		1.014		672		881	
<i>Inkoop energie</i>											
Inkoop elektriciteit	0,53 kWh	628		676		972		630		839	
Inkoop aardgas	1,79 Nm3	7		7		7		7		7	
Inkoop warmte	1110,00 GJ	0		0		0		0		0	
<i>Inkoop brandstoffen</i>											
Diesel	2,21 kg	35		35		35		35		35	
Overig invloed nabehandeling op rwzi		0		0		155		155		72	
Energieverbruik opvoeren rioolwater	0,53 kWh	0		0		99		99		49	
Energieverbruik productie en bewerking spoelwater	0,53 kWh	0		0		56		56		23	
Inkoop hulpstoffen		193		1.072		380		1.778		256	
Actieve kool	9,60 kg	0		883		0		799		33	
Actieve kool geregenereerd	2,52 kg	0		0		0		786		0	
Actieve kool biologische oorsprong	3,94 kg	0		0		0		0		0	
Aluminiumchloride, hydraatvorm	0,35 kg	0		0		0		0		0	
Aluminiumsulfaat, poedervorm	0,55 kg	0		0		0		0		0	
Antiscalants (polycarboxylaten)	1,73 kg	0		0		0		0		0	
Azijnzuur	3,06 kg	0		0		0		0		0	
Bio-ethanol	4,12 kg	0		0		0		0		0	
Calciumoxide (ongebuste kalk; poeder)	0,34 kg	0		0		0		0		0	
Citroenzuur	0,90 kg	0		0		0		0		0	
Glycerine uit epichloorhydrine	5,96 kg	0		0		0		0		0	
Glycerine uit koolzaadolie	5,84 kg	0		0		0		0		0	
IJzer(III)chloride	0,38 kg	99		99		99		99		99	
IJzerchloridesulfaat	0,72 kg	0		0		0		0		0	
Ijzersulfaat	0,20 kg	0		0		0		0		0	
Kalkhydraat	0,26 kg	0		0		0		0		0	
Kalkmelk op basis van gebuste kalk	0,25 kg	0		0		0		0		0	
Koolstofdioxide, vloeibaar	0,64 kg	0		0		0		0		0	
Magnesiumchloride	0,07 kg	0		0		0		0		0	
Magnesiumchloride, anhydride	1,38 kg	0		0		0		0		0	
Magnesiumchloride, hydraat, vaste vorm	0,19 kg	0		0		0		0		0	
Magnesiumoxide	0,16 kg	0		0		0		0		0	
Melasse uit suikerbieten	0,36 kg	0		0		0		0		0	
Methanol	2,20 kg	0		0		0		0		0	
Natriumaluminaat oplossing	0,47 kg	0		0		0		0		0	
Natriumchloride (zout), poedervorm	0,19 kg	0		0		0		0		0	
Natriumhypochloriet	0,15 kg	0		0		0		0		0	
Natronloog kwikcelproces	0,66 kg	0		0		0		0		0	
Natronloog, membraanproces	0,60 kg	0		0		0		0		0	
Natronloog, productiemix	0,67 kg	0		0		0		0		0	
Polymeer, anionisch	4,48 kg	0		0		0		0		0	
Polymeer, anionisch, vloeibaar	3,64 kg	0		0		0		0		0	
Polymeer, kationisch, poeder	5,00 kg	0		0		0		0		0	
Polymeer, kationisch, vloeibaar	3,90 kg	90		86		90		90		90	
Polyaluminiumchloride	1,13 kg	4		4		4		4		4	
Polyaluminiumsulfaat, poeder	1,01 kg	0		0		0		0		0	
Waterstofperoxide	1,21 kg	0		0		0		0		0	
Zoutzuur, reactie propyleen en chloor	0,05 kg	0		0		0		0		0	
Zoutzuur uit de reactie van waterstof en chloor	1,64 kg	0		0		0		0		0	
Zoutzuur uit het Mannheim proces	0,41 kg	0		0		0		0		0	
Zuurstof (vloeibaar)	0,42 kg	0		0		187		0		30	
Zwavelzuur, vloeibaar	0,12 kg	0		0		0		0		0	
Materialen		17		17		18		18		18	
Gewapend beton	133,00 m3	17		17		18		18		18	
Slibeindverwerking		386		391		386		386		386	
Droging en verbranding van ontwaterd slib	0,05 kg	305		310		305		305		305	
Transport vloeibaar slib	0,13 tonkm	0		0		0		0		0	
Transport ontwaterd slib	0,13 tonkm	81		82		81		81		81	

In Vulblad parameters: geel gearceerde velden invullen voor zover van toepassing

Onderwerp	Eenheid	Parameter per jaar	Parameter per jaar	Parameter per jaar	Parameter per jaar	Parameter per jaar	Invalhulp
		Variant 1 Referentie	Variant 2 PACAS	Variant 3 Ozon + ZF	Variant 4 GAK	Variant 5 AdOx	
Naam							
Hoeveelheden							
Aanvoer rioolwater	m3	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	Niet aanpasbaar
Influent CZV	kg	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	Niet aanpasbaar
Influent Nkj	kg	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	Niet aanpasbaar
Effluent Nit	kg	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	Niet aanpasbaar
Verwijderde i.e. 150 g TZV	i.e. 150 g TZV	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	Niet aanpasbaar
Behandelde i.e. in influent 150 g TZV	i.e. 150 g TZV	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	Niet aanpasbaar
DOC effluent	mg/l	11	11	11	11	11	Niet aanpasbaar
Dimensionering verwijdering micro's							
Minimale jaarhoeveelheid nabehandeling	m3/jaar	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	Te behandelen jaarhoeveelheid minimaal 70%
Behandelde jaarhoeveelheid nabehandeling	m3/jaar	5.365.500	7.665.000	5.365.500	5.365.500	5.365.500	
Geproduceerd slib	ton ontwaterd slib	6.100	6.192	6.100	6.100	6.100	Mag alleen worden aangepast bij geïntegreerde maatregelen, niet bij nabehandeling
Drogestofgehalte slib	%	21,10%	22,29%	21,10%	21,10%	21,10%	Mag alleen worden aangepast bij geïntegreerde maatregelen, niet bij nabehandeling
Geproduceerd slib	ton ds	1.287	1.380	1.287	1.287	1.287	
Transport vloeibaar slib	km	50	50	50	50	50	Niet aanpasbaar
Transport ontwaterd slib	ton	0	0	0	0	0	Niet aanpasbaar
Transport ontwaterd slib	km	100	100	100	100	100	Niet aanpasbaar
Transport ontwaterd slib	ton	6.100	6.192	6.100	6.100	6.100	Niet aanpasbaar
Inkoop energie rwzi exclusief verwijdering micro's							
<i>Inkoop energie</i>							
Inkoop elektriciteit	kWh	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	Niet aanpasbaar
Inkoop aardgas	Nm3	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	Niet aanpasbaar
Inkoop warmte	GJ						Niet aanpasbaar
<i>Inkoop brandstoffen</i>							
Diesel	kg	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	Niet aanpasbaar
Inkoop energie rwzi voor verwijdering micro's							
<i>Inkoop energie</i>							
Inkoop elektriciteit	kWh	0	91.104	654.591	4.380	402.049	Excl. opvoeren effluent en spoelwater; excl. productie en behandeling spoelwater
Overig invloed nabehandeling op rwzi							
Opvoeren rioolwater	meter	0	0	8	8	4	Bij nageschakelde behandeling 8 meter opvoeren conform standaard
Percentage spoelwater		0%	0%	10%		4%	Bij nageschakelde behandeling 10% spoelwater toepassen conform standaard
Gebruik spoelwater	m3	0	0	536.550	536.550	214.620	
Afvoeren spoelwater	m3	0	0	536.550	536.550	214.620	
Inkoop hulpstoffen							
<i>Oplissing</i>							
Actieve kool	kg	100%	91.980		83.200	3.404	NB let bij GAK op bulkgewicht per m3 actieve kool
Actieve kool geregenereerd	kg	100%			312.000		NB let bij GAK op bulkgewicht per m3 actieve kool
Actieve kool biologische oorsprong	kg	100%					NB CO2-waarde obv haalbaarheidsstudie biokolen
Aluminiumchloride, hydraatvorm	kg	40%					Voor chemicaliën let op % oplissing (zie opmerking handleiding cel A8)
Aluminiumsulfaat, poedervorm	kg	100%					
Antiscalants (polycarboxylaten)	kg	100%					
Azijnzuur	kg	98%					
Bio-ethanol	kg	100%					
Calciumoxide (ongebuste kalk; poeder)	kg	100%					
Chloorzuur	kg	50%					
Glycerine uit epichloorhydrine	kg	100%					
Glycerine uit koolzaadolie	kg	100%					
IJzer(III)chloride	kg	40%	260.000	260.000	260.000	260.000	
IJzerchloridesulfaat	kg	100%					
IJzersulfaat	kg	100%					
Kalkhydraat	kg	100%					
Kalkmeik op basis van gebuste kalk	kg	100%					
Koolstofdioxide, vloeibaar	kg	100%					
Magnesiumchloride	kg	54%					
Magnesiumchloride, anhyride	kg	100%					
Magnesiumchloride, hydraat, vaste vorm	kg	100%					
Magnesiumoxide	kg	100%					
Melasse uit suikerbieten	kg	100%					
Methanol	kg	100%					
Natriumalminaat oplossing	kg	38%					
Natriumchloride (zout), poedervorm	kg	100%					
Natriumhypochloriet	kg	15%					
Natronloog kwicelproces	kg	50%					
Natronloog, membraanproces	kg	50%					
Natronloog, productiemix	kg	50%					
Polymeer, anionisch	kg	100%					
Polymeer, anionisch, vloeibaar	kg	100%					
Polymeer, kationisch, poeder	kg	100%					
Polymeer, kationisch, vloeibaar	kg	100%	23.168	22.083	23.168	23.168	
Polyaluminiumchloride	kg	100%	3.200	3.200	3.200	3.200	Niet aanpasbaar
Polyaluminiumsulfaat, poeder	kg	100%					
Waterstofperoxide	kg	50%					
Zoutzuur, reactie propyleen en chloor	kg	36%					
Zoutzuur uit de reactie van waterstof en chloor	kg	100%					
Zoutzuur uit het Mannheim proces	kg	100%					
Zuurstof (vloeibaar)	kg	100%		445.337		71.194	
Zwavelzuur, vloeibaar	kg	100%					
Materialen							
Gewapend beton	m3	3.800	3.805	4.050	4.030	4.050	
Levensduur gewapend beton	jaar	30	30	30	30	30	Niet aanpasbaar

A-2. CO2 footprint for EBCT of 10 minutes

Afvalwaterzuivering in GER-waarden

Primair energieverbruik		ton CO2/jaar		ton CO2/jaar		ton CO2/jaar		ton CO2/jaar		ton CO2/jaar	
Totaal		1265	100%	2198	100%	1953	100%	3009	100%	1924	100%
energie		670	53%	718	33%	1169	60%	827	27%	1202	62%
hulpstoffen		193	15%	1072	49%	380	19%	1778	59%	318	17%
slibeindverwerking		386	30%	391	18%	386	20%	386	13%	386	20%
materiaal		17	1,3%	17	1%	18	1%	18	1%	18	1%

	Omreken- factor kg CO2/eenheid	Referentie ton CO2/jaar	PACAS ton CO2/jaar	Ozon + ZF ton CO2/jaar	GAK ton CO2/jaar	AdOx ton CO2/jaar
Inkoop energie		670	718	1.014	672	1.093
<i>Inkoop energie</i>						
Inkoop elektriciteit	0,53 kWh	628	676	972	630	1.051
Inkoop aardgas	1,79 Nm3	7	7	7	7	7
Inkoop warmte	1110,00 GJ	0	0	0	0	0
<i>Inkoop brandstoffen</i>						
Diesel	2,21 kg	35	35	35	35	35
Overig invloed nabehandeling op rwzi		0	0	155	155	109
Energieverbruik opvoeren rioolwater	0,53 kWh	0	0	99	99	86
Energieverbruik productie en bewerking spoelwater	0,53 kWh	0	0	56	56	23
Inkoop hulpstoffen		193	1.072	380	1.778	318
Actieve kool	9,60 kg	0	883	0	799	65
Actieve kool geregenereerd	2,52 kg	0	0	0	786	0
Actieve kool biologische oorsprong	3,94 kg	0	0	0	0	0
Aluminiumchloride, hydraatvorm	0,35 kg	0	0	0	0	0
Aluminiumsulfaat, poedervorm	0,55 kg	0	0	0	0	0
Antiscalants (polycarboxylaten)	1,73 kg	0	0	0	0	0
Azijnzuur	3,06 kg	0	0	0	0	0
Bio-ethanol	4,12 kg	0	0	0	0	0
Calciumoxide (ongebuste kalk; poeder)	0,34 kg	0	0	0	0	0
Citroenzuur	0,90 kg	0	0	0	0	0
Glycerine uit epichloorhydrine	5,96 kg	0	0	0	0	0
Glycerine uit koolzaadolie	5,84 kg	0	0	0	0	0
IJzer(III)chloride	0,38 kg	99	99	99	99	99
IJzerchloridesulfaat	0,72 kg	0	0	0	0	0
IJzersulfaat	0,20 kg	0	0	0	0	0
Kalkhydraat	0,26 kg	0	0	0	0	0
Kalkmelk op basis van gebuste kalk	0,25 kg	0	0	0	0	0
Koolstofdioxide, vloeibaar	0,64 kg	0	0	0	0	0
Magnesiumchloride	0,07 kg	0	0	0	0	0
Magnesiumchloride, anhydride	1,38 kg	0	0	0	0	0
Magnesiumchloride, hydraat, vaste vorm	0,19 kg	0	0	0	0	0
Magnesiumoxide	0,16 kg	0	0	0	0	0
Melasse uit suikerbieten	0,36 kg	0	0	0	0	0
Methanol	2,20 kg	0	0	0	0	0
Natriumaluminaat oplossing	0,47 kg	0	0	0	0	0
Natriumchloride (zout), poedervorm	0,19 kg	0	0	0	0	0
Natriumhypochloriet	0,15 kg	0	0	0	0	0
Natronloog kwikcelproces	0,66 kg	0	0	0	0	0
Natronloog, membraanproces	0,60 kg	0	0	0	0	0
Natronloog, productiemix	0,67 kg	0	0	0	0	0
Polymeer, anionisch	4,48 kg	0	0	0	0	0
Polymeer, anionisch, vloeibaar	3,64 kg	0	0	0	0	0
Polymeer, kationisch, poeder	5,00 kg	0	0	0	0	0
Polymeer, kationisch, vloeibaar	3,90 kg	90	86	90	90	90
Polyaluminiumchloride	1,13 kg	4	4	4	4	4
Polyaluminiumsulfaat, poeder	1,01 kg	0	0	0	0	0
Waterstofperoxide	1,21 kg	0	0	0	0	0
Zoutzuur, reactie propyleen en chloor	0,05 kg	0	0	0	0	0
Zoutzuur uit de reactie van waterstof en chloor	1,64 kg	0	0	0	0	0
Zoutzuur uit het Mannheim proces	0,41 kg	0	0	0	0	0
Zuurstof (vloeibaar)	0,42 kg	0	0	187	0	60
Zwavelzuur, vloeibaar	0,12 kg	0	0	0	0	0
Materialen		17	17	18	18	18
Gewapend beton	133,00 m3	17	17	18	18	18
Slibeindverwerking		386	391	386	386	386
Droging en verbranding van ontwaterd slib	0,05 kg	305	310	305	305	305
Transport vloeibaar slib	0,13 tonkm	0	0	0	0	0
Transport ontwaterd slib	0,13 tonkm	81	82	81	81	81

Invalblad parameters: geel gearceerde velden invullen voor zover van toepassing

Onderwerp	Eenheid	Parameter per jaar	Parameter per jaar	Parameter per jaar	Parameter per jaar	Parameter per jaar	Invalhulp
		Variant 1 Referentie	Variant 2 PACAS	Variant 3 Ozon + ZF	Variant 4 GAK	Variant 5 AdOx	
Naam							
Hoeveelheden							
Aanvoer rioolwater	m3	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	Niet aanpasbaar
Influent CZV	kg	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	Niet aanpasbaar
Influent Nkj	kg	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	Niet aanpasbaar
Effluent Nit	kg	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	Niet aanpasbaar
Verwijderde i.e. 150 g TZV	i.e. 150 g TZV	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	Niet aanpasbaar
Behandelde i.e. in influent 150 g TZV	i.e. 150 g TZV	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	Niet aanpasbaar
DOC effluent	mg/l	11	11	11	11	11	Niet aanpasbaar
Dimensionering verwijdering micro's							
Minimale jaarhoeveelheid nabehandeling	m3/jaar	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	Te behandelen jaarhoeveelheid minimaal 70%
Behandelde jaarhoeveelheid nabehandeling	m3/jaar	5.365.500	7.665.000	5.365.500	5.365.500	5.365.500	
Geproduceerd slib	ton ontwaterd slib	6.100	6.192	6.100	6.100	6.100	Mag alleen worden aangepast bij geïntegreerde maatregelen, niet bij nabehandeling
Drogestofgehalte slib	%	21,10%	22,29%	21,10%	21,10%	21,10%	Mag alleen worden aangepast bij geïntegreerde maatregelen, niet bij nabehandeling
Geproduceerd slib	ton ds	1.287	1.380	1.287	1.287	1.287	
Transport vloeibaar slib	km	50	50	50	50	50	Niet aanpasbaar
Transport ontwaterd slib	ton	0	0	0	0	0	Niet aanpasbaar
Transport ontwaterd slib	km	100	100	100	100	100	Niet aanpasbaar
Transport ontwaterd slib	ton	6.100	6.192	6.100	6.100	6.100	Niet aanpasbaar
Inkoop energie rwzi exclusief verwijdering micro's							
<i>Inkoop energie</i>							
Inkoop elektriciteit	kWh	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	Niet aanpasbaar
Inkoop aardgas	Nm3	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	Niet aanpasbaar
Inkoop warmte	GJ						Niet aanpasbaar
<i>Inkoop brandstoffen</i>							
Diesel	kg	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	Niet aanpasbaar
Inkoop energie rwzi voor verwijdering micro's							
<i>Inkoop energie</i>							
Inkoop elektriciteit	kWh	0	91.104	654.591	4.380	804.098	Excl. opvoeren effluent en spoelwater; excl. productie en behandeling spoelwater
Overig invloed nabehandeling op rwzi							
Opvoeren rioolwater	meter	0	0	8	8	7	Bij nageschakelde behandeling 8 meter opvoeren conform standaard
Percentage spoelwater		0%	0%	10%	10%	4%	Bij nageschakelde behandeling 10% spoelwater toepassen conform standaard
Gebruik spoelwater	m3	0	0	536.550	536.550	214.620	
Afvoeren spoelwater	m3	0	0	536.550	536.550	214.620	
Inkoop hulpstoffen							
Oplossing							
Actieve kool	kg	100%	91.980		83.200	6.808	NB let bij GAK op bulkgewicht per m3 actieve kool
Actieve kool geregenereerd	kg	100%			312.000		NB let bij GAK op bulkgewicht per m3 actieve kool
Actieve kool biologische oorsprong	kg	100%					NB CO2-waarde obv haalbaarheidsstudie biokolen
Aluminiumchloride, hydraatvorm	kg	40%					Voor chemicaliën let op % oplossing (zie opmerking handleiding cel A8)
Aluminiumsulfaat, poedervorm	kg	100%					
Antiscalants (polycarboxylaten)	kg	100%					
Azijnzuur	kg	98%					
Bio-ethanol	kg	100%					
Calciumoxide (ongebuste kalk; poeder)	kg	100%					
Chloorzuur	kg	50%					
Glycerine uit epichloorhydrine	kg	100%					
Glycerine uit koolzaadolie	kg	100%					
IJzer(III)chloride	kg	40%	260.000	260.000	260.000	260.000	
IJzerchloridesulfaat	kg	100%					
IJzersulfaat	kg	100%					
Kalkhydraat	kg	100%					
Kalkmeik op basis van gebuste kalk	kg	100%					
Koolstofdioxide, vloeibaar	kg	100%					
Magnesiumchloride	kg	54%					
Magnesiumchloride, anhyride	kg	100%					
Magnesiumchloride, hydraat, vaste vorm	kg	100%					
Magnesiumoxide	kg	100%					
Melasse uit suikerbieten	kg	100%					
Methanol	kg	100%					
Natriumalminaat oplossing	kg	38%					
Natriumchloride (zout), poedervorm	kg	100%					
Natriumhypochloriet	kg	15%					
Natronloog kwicelproces	kg	50%					
Natronloog, membraanproces	kg	50%					
Natronloog, productiemix	kg	50%					
Polymeer, anionisch	kg	100%					
Polymeer, anionisch, vloeibaar	kg	100%					
Polymeer, kationisch, poeder	kg	100%					
Polymeer, kationisch, vloeibaar	kg	100%	23.168	22.083	23.168	23.168	
Polyaluminiumchloride	kg	100%	3.200	3.200	3.200	3.200	Niet aanpasbaar
Polyaluminiumsulfaat, poeder	kg	100%					
Waterstofperoxide	kg	50%					
Zoutzuur, reactie propyleen en chloor	kg	36%					
Zoutzuur uit de reactie van waterstof en chloor	kg	100%					
Zoutzuur uit het Mannheim proces	kg	100%					
Zuurstof (vloeibaar)	kg	100%		445.337		142.388	
Zwavelzuur, vloeibaar	kg	100%					
Materialen							
Gewapend beton	m3	3.800	3.805	4.050	4.030	4.050	
Levensduur gewapend beton	jaar	30	30	30	30	30	Niet aanpasbaar

B-1. Sizing and energy use for EBCT of 5 minutes

ENERGY USE AND OPERATIONAL COST DUE TO ELECTRICITY

Disclaimer: all empty cells (N/A) mean they are still waiting for data from equipment's datasheets

Process Schedule

Total specific energy use will be calculated based on the schedule of one complete cycle, as follows:

Adsorption	=	159,42 h	(5 days)
Backwash 1	=	0,25 h	(15 min.)
Drying - Heating	=	5,00 h	(5 hours)
Drying - Fan only	=	0,08 h	(5 min. or ASAP)
Ozonation	=	3,00 h	(3 hours)
Backwash 2	=	0,25 h	(15 min.)

Total population equivalent	=	100.000,00 p.e.	
Total influent flow rate	=	1.040,00 m ³ /h	(Richtlijnen haalbaarheidsstudie IPMV CALL 2020)
Total volume of treated water in a week	=	165.793,33 m ³	(assumed 5 days of adsorption)

Number of columns and specifications

Assumed number of columns	=	21 pc.	
Number of columns to be regenerated in 1 week	=	25 pc.	(see schedule below: row 246 - 273)

Column sizing

Zeolite granules diameter, Øz	=	2,00 mm	
Column diameter, D	=	2,29 m	(trial)
Ratio of bed height and diameter, H/D	=	14,44	(trial)
Bed height, H	=	1,00 m	(bed height + 30% clogging + 50% bed expansion during backwash + 10% freeboard)
Column height, Hc	=	1,90 m	
Influent flow rate for 1 column, Q	=	49,52 m ³ /h	
Surface area, A	=	4,13 m ²	
Filtration velocity, v	=	12,00 m/h	(rapid sand filter = 5 - 12 m/h)
Bed volume, BV	=	4,13 m ³	
Empty bed contact time, EBCT	=	5,00 min.	OK

ADSORPTION

Influent flow rate	=	49,52 m ³ /h	
Volume of treated water in 1 cycle	=	7.894,92 m ³	(assumed for 1 week with 5 days of adsorption)
Static head required for 1 pump	=	2,00 m	(c column height, Hc)
Suction head and friction head	=	0,60 m	(assumed 30% static head)
Elevation difference at site	=	1,00 m	(between the intake point to and the bottom of installation)
Required total head	=	3,60 m	(= 4 m for CO2-model)
Max. pump capacity	=	50,00 m ³ /h	(from pump's specification graph: ECO SNM 150-250, 1450 rpm)
Max. pump head	=	5,00 m	(from pump's specification graph: ECO SNM 150-250, 1450 rpm)
(Based on pump's specification):			
Electrical input (P1)	=	3,00 kW	(from pump's specification table: ECO SNM 65-125, 1450 rpm, assumed IEC 180M)
Motor efficiency (P2/P1)	=	90%	(from pump's specification table: ECO SNM 65-125, 1450 rpm)
Motor work output (P2)	=	2,70 kW	(from pump's specification table: ECO SNM 65-125, 1450 rpm)
Electric voltage	=	220,00 V	(assumed single-phase)
Pump specific energy	=	0,06 kWh/m ³ of water delivered	
Influent pump energy for 1 column, 1 week	=	473,70 kWh	
Influent pump energy for all columns, 1 week	=	9.473,90 kWh	(assumed that 1 column is in regeneration-mode)
Influent pump energy for all columns, 1 day	=	1.353,41 kWh/day	
Required energy for influent pumping per year	=	492.643,05 kWh/year	
Electricity cost	=	13,61 cents/kWh	(Statista.com)
Electricity cost for influent pumping per year	=	€ 6.704,87	
Pumping energy in 1 week	=	0,0571 kWh/m ³ of treated water	

Backwash

Backwash flow rate	=	4,95 m ³ /h	(STOWA 2015-27 = 10% from main flow rate per single backwash)
Volume of backwashed water in 1 cycle	=	1,24 m ³	(assumed for 1 week with 2 backwashes, each for 15 min.)
Static head required for 1 pump	=	2,00 m	(c column height, Hc = depth of effluent tank)
Suction head and friction head	=	0,60 m	(assumed 30% static head)
Elevation difference at site	=	-	(between the effluent tank and the bottom of the installation)
Required total head	=	2,60 m	
Max. pump capacity	=	5,00 m ³ /h	(from pump's specification table: Sulzer MF154 D)
Max. pump head	=	8,30 m	(from pump's specification table: Sulzer MF154 D)

(Based on pump's specification):

Electrical input (P1)	=	0,65 kW	
Motor efficiency (P2/P1)	=	65%	
Motor work output (P2)	=	0,42 kW	
Electric voltage	=	220,00 V	(assumed single-phase)
Backwash pump specific energy	=	0,13 kWh/m ³ of backwashed water	
Backwash pump energy for 1 week	=	0,16 kWh	
Required energy for backwashing per year	=	8,37 kWh	
Electricity cost	=	13,61 cents/kWh	(Statista.com)
Electricity cost for backwashing per year	=	€ 0,01361	
Backwashing energy in 1 week	=	€ 0,113909	
	=	0,000001 kWh/m ³ of treated water	

REGENERATION

Assumed that each day there will be 1 column to be regenerated, then:			
Assumed number of columns	=	21 pc.	
Number of columns to be regenerated in 1 week	=	25 pc.	
Bed volume in 1 column	=	4,13 m ³	
Volume of zeolite bed to be regenerated in 1 week	=	103,15 m ³	
Zeolite bulk density	=	590,32 kg/m ³	(calculated from column dimensions of Mingjing He's MSc Thesis)
Zeolite mass in 1 column	=	2.435,60 kg	
Zeolite mass in 1 column to be regenerated in 1 week	=	60.889,96 kg	

Drying

<u>1. Heating</u>			
Blower electric voltage, E	=	(To Be Announced)	V
Frequency, f	=	(To Be Announced)	Hz
Zeolite bed volume, Vz	=	4,13 m ³	(1 column)
Water content in the zeolite pores	=	40%	(Mingjing He's thesis)
Water volume inside zeolite, vv	=	1,650 m ³	
Water content required for regeneration	=	30%	(in order to have min. 70% regeneration) (Mingjing He's thesis)
Evaporation percentage	=	25%	
Volume of water to be evaporated	=	0,413 m ³	(duration: 5,00 h)
Mass density of water, ρ	=	1.000	kg/m ³
Mass of required water to be evaporated	=	413	kg/column
Per hour:			
Mass of evaporated water per hour, m	=	82,52 kg	(1 column)
Estimated temperature before heating, T1	=	18,00 deg C	(assumed as ambient temperature)
Target temperature after heating, T2	=	60,00 deg C	(Mingjing He's thesis)
Temperature change, ΔT	=	315,00 K	ΔT = (T2 - T1) + 273 K
Isochoric specific heat coefficient, cv	=	4,06 kJ/kg K	(at ΔT)
Specific heat unit target temperature, Cs	=	105,523,27 kJ	(https://www.engineeringtoolbox.com/water-properties-d_1573.html)
Enthalpy of vaporization at target temperature, ch	=	2.357,70 kJ/kg	(at T2) (https://www.engineeringtoolbox.com/water-properties-d_1573.html)
Latent heat at target temperature, Cl	=	194.552,87 kJ	Cl = m · ch
Total heat for 1 hour drying period, C	=	300.085,24 kJ	C = Cs + Cl
Required heating energy per kg water dried	=	3.636,60 kJ/kg	
Per heating period (5 hours):			
Required energy per heating period	=	416,78839 kWh	(1 kJ = 0,000277778 kWh)
2. Cooling			
Required energy per cooling period	=	3,4732 kWh	(assumed for 1 week with 5 minutes of cooling, and cooling energy will be 50% from heating because only the blower is moving, but not heating needed anymore)
Required cooling energy per kg water dried	=	0,0084 kWh/kg	
<u>3. Total</u>			
Required energy for drying for 1 week	=	10.506,54 kWh	(for the same number of columns to be regenerated)
Required energy for drying per year	=	546.340,12 kWh	(1 year = 52 weeks)
Electricity cost	=	13,61 cents/kWh	(Statista.com)
Electricity cost for drying per year	=	€ 0,01361	
Drying energy in 1 week	=	€ 7.455,69	
	=	0,0634 kWh/m ³ of treated water	

Ozonation

Generator use in full-scale plant	=	(To Be Announced)	
Max. ozone production	=	(To Be Announced)	g/h
Number of generator unit	=	1	
Efficiency	=	100,00 %	(assumed)
Actual ozone production	=	(To Be Announced)	kg/h
Required ozone concentration	=	90,00 mg/L	
Assumed that each cycle there will be 1 column to be regenerated, then:			
Required ozone loading per hour	=	15,02 kg/h	
Required energy per ozone demand	=	12,00 kWh/kg ozone	(STOWA 2015-27: 10 kWh for production, 2 kWh for cooling the generator)
Required ozonation energy per hour	=	180,23 kWh/h	
<u>Energy use (calculated weekly)</u>			
Recirculation system factor	=	3	(only 1 hour of full ozone generation → the rest is with recirculation system)
Ozone generation energy for 1 week	=	4.505,86 kWh	(assumed 1 week = 3 hours of ozonation → 25 columns to be regenerated)
Ozone generation energy per year	=	234.304,58 kWh	(1 year = 52 weeks)
Electricity cost	=	13,61 cents/kWh	(Statista.com)
Electricity cost for ozonation per year	=	€ 0,01361	
Ozone generation energy in 1 week	=	€ 3.188,89	
	=	0,0272 kWh/m ³ of treated water	

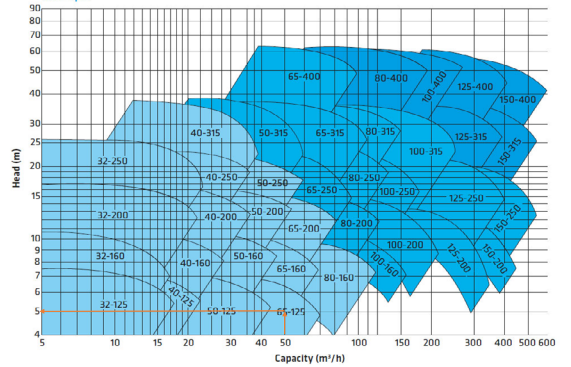
Liquid oxygen (LOX) consumption

Ozone concentration	=	90 mg/L	Mingjing He's MSc Thesis (ozone gas supply flow rate = 0.8 L/min.)
Required ozone gas per kg of zeolite in 3 hours	=	16,50 g/kg	(from Max's latest column experiment)
Required zeolite mass in 1 column	=	2.435,60 kg	
Required ozone load in 1 column	=	40,56 kg	
Required ozone loading per hour	=	15,02 kg/h	(for checking)
Oxygen gas per ozone factor	=	7,00 Nm ³ oxygen/kg ozone	
Voor de zuurstofconsumptie van de ozongenerator is uitgegaan van 7 Nm ³ O ₂ /kg O ₃ op basis van informatie over verschillende typen ozongeneratoren.			
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).			
LOX compression factor from oxygen gas	=	0,92 Nm ³ /L	(from STOWA 2020-18)

1450 rpm (4 Pole Motor)

DIN A	Pump Type	MOTOR	ECO SNM INSTALLATION DIMENSIONS (mm)																					
			Overall Dimensions									Foot Dimensions												
F2	65-200	1,5	900	80	65	100	176	246	523	405	180	225	90	63	95	125	125	158	250	320	160	190	14	10
F2	65-200	2,2	1000	80	65	100	179	242	571	405	180	225	100	63	95	125	160	178	250	320	160	192	14	12
F2	65-200	3	1000	80	65	100	179	242	571	405	180	225	100	63	95	125	160	178	250	320	160	192	14	12
F2	65-200	4	1034	80	65	100	179	336	615	405	180	225	112	70	95	125	160	176	250	320	160	220	14	12

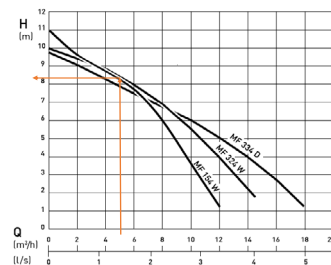
1450 rpm



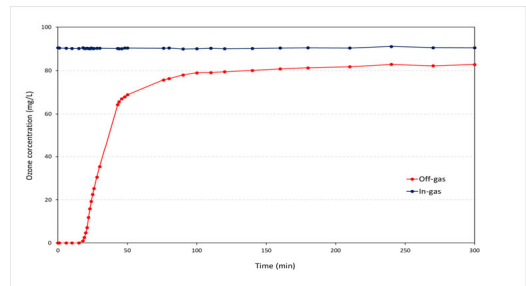
Flow rate =	49,52 m ³ /h	=	825,40 L/min.
Flow rate =	12,0031418 BV/h		
Adsorption volume =	1913,50085 BV		
Backwash flow =	1,20031418 BV/h		1440
Backwash volume =	0,30 BV		

0,02%

(other reference for full-scale: 4% capacity per single backwash in drinking water, refer to RHVDH kostenkalkulator)



MF	Discharge connection*	G 1 1/2" - 1 1/4"
	Motor power (kW)	P ₁ 0,85
		P ₂ 0,42
	Speed (1/min)	2900
	Rated voltage [V]	220-240 1-
	Rated current [A]	2,8
	Cable type (H07RN8S-F)	3x1,0
	Cable length [m]	3; 10; 20; 30
	Weight [kg]	8,5
	Solids size [mm]	20



LOX per ozone factor	=	7,61 L/kg ozone	
Required LOX per hour	=	114,28 L/h	
Required LOX per 1-time regeneration of 1 column	=	0,34 m ³	(assumed 1 week = 3 hours of ozonation)
With 1 tank of LOX = 50 L and expansion rate from the LOX to oxygen gas = 1 : 861, the number of tanks required will be	=	1 pc.	
Using a mass density of LOX, the weight of required LOX can be obtained:			
LOX mass density	=	1141 kg/m ³	
Required LOX weight for 1 column	=	391,18 kg	
Required LOX weight per day (3-4 columns in regeneration)	=	1.369,12 kg	
Required LOX weight for a year	=	71.194,21 kg	

ZEOLITE PRODUCTION

High-silica zeolite powder production energy	=	0,03 kWh/kg powder	(value from Zaykovskaya, et al, 2020)
--	---	--------------------	---------------------------------------

The most efficient zeolite catalyst H-Beta-17 h-R-150 °C exhibited well-developed textural and structural properties as well as mild acidity together with the highest ratio between Brønsted and Lewis acid sites (Zaykovskaya, et al. 2020).<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110236>.

Granulation process

Power (from the machine), P	=	1 kW	(info from Delft Solids Solutions)
Electric voltage, V	=	230 V	(info from Delft Solids Solutions)
Motor frequency, f	=	50 Hz	(info from Delft Solids Solutions)
Powder weight for feasibility study, w	=	0,15 kg	(info from Delft Solids Solutions)
Granulation time for feasibility study, t	=	40 min.	(info from Delft Solids Solutions)

Prinz cyclization temperature	=	150 deg C	(assumed the lab temperature is 18 deg C)
Duration	=	17 day	
Mass of zeolite measured	=	1 kg	
Specific heat for silica, c	=	703 J/kg/K	(assumed that the heat capacity is based on silica as higher ratio of the zeolite)
Energy, Q	=	m c ΔT	
		92.796,00 J/kg	
		0,03 kWh/kg	

It is assumed that after granulation approximately 70% of the powder weight becomes usable granules, hence:			
Percentage of granulation efficiency	=	70%	
Actual power per hour of granulation	=	0,67 kWh	
Actual power per kg of granules	=	6,35 kWh/kg granules	
Total zeolite production energy	=	6,37 kWh/kg granules	

Weight of granules for full-scale	=	51.147,57 kg	
Granulation energy for full-scale	=	326.064,88 kWh	

It is also assumed that re-adsorption capacity after regeneration decreases after a few years, hence there will be 30% of zeolite replenishment after between 5-year period

Replenishment of zeolite granules	=	30%	
Operational period until replenishment	=	5 years	

Volume of water to be treated during operational period	=	39.790.400,00 m ³	
Granulation specific energy (first load)	=	0,0082 kWh/m ³ of treated water (for the first year)	
Granulation specific energy (replenishment)	=	0,0025 kWh/m ³ of treated water/5-year-period	

RECAP (FIRST YEAR)

Process step	kWh/m ³	Percentage	Remark
Adsorption	0,0571	51,03%	All in operation (excluding 1 column in regeneration)
Pre-backwash	4,85401E-07	0,00%	
Drying	0,0195	17,38%	Drying 70% from water content, heat from natural gas
Ozonation	0,0272	24,27%	Same ozone factor with STOWA 2015-27
Post-backwash	4,85401E-07	0,00%	
Zeolite production	0,0082	7,32%	powder production and granulation process
TOTAL	0,1120	100,00%	

CO2 footprint estimation (first year)

Factor:			
1 kWh	=	0,53 kg CO2	(Richtlijnen haalbaarheidsstudie IPMV CALL 2020)
Total CO2 footprint will be:	=	52,20 g CO2/m ³ of treated water	
	=	450,03 ton CO2/year	(only in the first year)

CO2 footprint zeolite production	=	0,004 kg CO2/m ³ of treated water	
CO2 footprint GAC	=	0,73 kg CO2/kg zeolite	
Converted weight of zeolite	=	11 kg CO2/kg GAC	(Bayer, et al, 2005)
		0,07	

RECAP (SECOND YEAR ONWARDS)

Process step	kWh/m ³	Percentage	Remark
Adsorption	0,0571	55,06%	All in operation (excluding 1 column in regeneration)
Pre-backwash	4,85401E-07	0,00%	
Drying	0,0195	18,75%	Drying 70% from water content, heat from natural gas
Ozonation	0,0272	26,19%	Same ozone factor with STOWA 2015-27
Post-backwash	4,85401E-07	0,00%	
Zeolite production	-	0,00%	powder production and granulation process
TOTAL	0,1038	100,00%	

CO2 footprint for heating			
<i>Heat energy from natural gas</i>			
1 Nm ³ natural gas	=	11,00 kWh	(Swedish Gas Centre, 2007)
1 Nm ³ natural gas	=	1,79 kg CO2	(IPMV CALL 2020)
Heat from natural gas	=	0,1627 kWh/m ³	
To calculate CO2 footprint for drying:			
Energy for drying	=	0,0634 kWh/m ³ of treated water	
CO2 footprint for drying	=	10,31 g CO2/m ³	

CO2 footprint estimation (second year onwards)

Factor:			
1 kWh	=	0,53 kg CO2	(Richtlijnen haalbaarheidsstudie IPMV CALL 2020)
Total CO2 footprint will be:	=	47,86 g CO2/m ³ of treated water	
	=	412,58 ton CO2/year	(only in the first year)

<i>CO2 footprint comparison for drying</i>			
From natural gas	=	10,31 g CO2/m ³	
From electricity	=	33,59 g CO2/m ³	
Conversion factor	=	0,31	
Thus, required drying energy per year	=	167.744,22 kWh/year	

RECAP (FIFTH YEAR)

Process step	kWh/m ³	Percentage	Remark
Adsorption	0,0571	53,79%	All in operation (excluding 1 column in regeneration)
Pre-backwash	4,85401E-07	0,00%	
Drying	0,0195	18,31%	Drying 70% from water content, heat from natural gas
Ozonation	0,0272	25,58%	Same ozone factor with STOWA 2015-27
Post-backwash	4,85401E-07	0,00%	
Zeolite production	0,0025	2,31%	30% added zeolite granules
TOTAL	0,1062	100,00%	

CO2 footprint estimation (fifth year)

Factor:			
1 kWh	=	0,53 kg CO2	(Richtlijnen haalbaarheidsstudie IPMV CALL 2020)
Total CO2 footprint will be:	=	49,16 g CO2/m ³ of treated water	
	=	423,82 ton CO2/year	(only in the first year)

B-2. Sizing and energy use for EBCT of 10 minutes

ENERGY USE AND OPERATIONAL COST DUE TO ELECTRICITY

Disclaimer: all empty cells (N/A) mean they are still waiting for data from equipment's datasheets

Process Schedule

Total specific energy use will be calculated based on the schedule of one complete cycle, as follows:

Adsorption	=	159,42 h	(5 days)
Backwash 1	=	0,25 h	(15 min.)
Drying - Heating	=	5,00 h	(5 hours)
Drying - Fan only	=	0,08 h	(5 min. or ASAP)
Ozonation	=	3,00 h	(3 hours)
Backwash 2	=	0,25 h	(15 min.)
Total population equivalent	=	100.000,00 p.e.	
Total influent flow rate	=	1.040,00 m ³ /h	(Richtlijnen haalbaarheidstudie IPMV CALL 2020)
Total volume of treated water in a week	=	165.793,33 m ³	(assumed 5 days of adsorption)

Number of columns and specifications

Assumed number of columns	=	21 pc.	
Number of columns to be regenerated in 1 week	=	25 pc.	(see schedule below: row 246 - 273)

Column sizing

Zeolite granules diameter, Øz	=	2,00 mm	
Column diameter, D	=	2,28 m	(trial)
Ratio of bed height and diameter, H/D	=	0,87	empirical estimation from GAC column ratio is ~10
Bed height, H	=	2,00 m	(trial)
Column height, Hc	=	3,80 m	(bed height + 30% clogging + 50% bed expansion during backwash + 10% freeboard)
Influent flow rate, Q	=	49,52 m ³ /h	
Surface area, A	=	4,13 m ²	
Filtration velocity, v	=	12,00 m/h	(rapid sand filter is 5 - 12 m/h)
Bed volume, BV	=	8,25 m ³	
Empty bed contact time, EBCT	=	10,00 min.	OK

ADSORPTION

Influent flow rate	=	49,52 m ³ /h	
Volume of treated water in 1 cycle	=	7.894,92 m ³	(assumed for 1 week with 5 days of adsorption)
Static head required for 1 pump	=	3,80 m	(= column height, Hc)
Suction head and friction head	=	1,14 m	(assumed 30% static head)
Elevation difference at site	=	2,00 m	(between the intake point to and the bottom of installation)
Required total head	=	6,94 m	(= 7 m for G20-model)
Max. pump capacity	=	50,00 m ³ /h	(from pump's specification graph: ECO SNM 65-160, 1450 rpm)
Max. pump head	=	7,00 m	(from pump's specification graph: ECO SNM 65-160, 1450 rpm)
(Based on pump's specification):			
Electrical input (P1)	=	1,50 kW	(from pump's specification graph: ECO SNM 65-160, 1450 rpm)
Motor efficiency (P2/P1)	=	90%	
Motor work output (P2)	=	1,35 kW	(from pump's specification graph: ECO SNM 65-160, 1450 rpm)
Electric voltage	=	220,00 V	(assumed single-phase)
Pump specific energy	=	0,03 kWh/m ³ of water delivered	
Influent pump energy for 1 column, 1 week	=	236,85 kWh	
Influent pump energy for all columns, 1 week	=	4.970,45 kWh	(assumed that 1 column is in regeneration-mode)
Influent pump energy for all columns, 1 day	=	676,71 kWh/day	
Required energy for influent pumping per year	=	246.321,52 kWh/year	
Electricity cost	=	13,61 cents/kWh	(Statista.com)
Electricity cost for influent pumping per year	=	€ 0,01361 /kWh	
Pumping energy in 1 week	=	€ 2.352,44	
		0,0286 kWh/m ³ of treated water	

Backwash

Backwash flow rate	=	4,95 m ³ /h	(STOWA 2015-27 = 10% from main flow rate per single backwash)
Volume of backwashed water	=	1,24 m ³	(assumed for 1 week with 2 backwashes, each for 15 min.)
Static head required for 1 pump	=	3,80 m	(= column height, Hc + depth of effluent tank)
Suction head and friction head	=	1,14 m	(assumed 30% static head)
Elevation difference at site	=	2,00 m	(between the effluent tank and the bottom of the installation)
Required total head	=	6,94 m	
Max. pump capacity	=	5,00 m ³ /h	(from pump's specification table: Sulzer MF154 D)
Max. pump head	=	8,30 m	(from pump's specification table: Sulzer MF154 D)
(Based on pump's specification):			
Electrical input (P1)	=	0,65 kW	
Motor efficiency (P2/P1)	=	65%	
Motor work output (P2)	=	0,42 kW	
Electric voltage	=	220,00 V	(assumed single-phase)
Backwash pump specific energy	=	0,13 kWh/m ³ of backwashed water	
Backwash pump energy for 1 week	=	0,16 kWh	
Required energy for backwashing per year	=	0,37 kWh	
Electricity cost	=	13,61 cents/kWh	(Statista.com)
Electricity cost for backwashing per year	=	€ 0,01361 /kWh	
Backwashing energy in 1 week	=	€ 0,113909	
		0,000001 kWh/m ³ of treated water	

REGENERATION

Assumed that each day there will be 1 column to be regenerated, then:			
Assumed number of columns	=	21 pc.	
Number of columns to be regenerated in 1 week	=	25 pc.	
Bed volume in 1 column	=	8,25 m ³	
Volume of zeolite bed to be regenerated in 1 week	=	206,30 m ³	
Zeolite bulk density	=	590,32 kg/m ³	(calculated from column dimensions of Mingxing He's MSc Thesis)
Zeolite mass in 1 column	=	4.871,20 kg	
Zeolite mass in 1 column to be regenerated in 1 week	=	121.779,93 kg	

Drying

1. Heating

Blower electric voltage, E	=	(To Be Announced)	V
Frequency, f	=	(To Be Announced)	Hz
Zeolite bed volume, Vz	=	8,25 m ³	(1 column)
Water content in the zeolite pores	=	40%	(Mingxing He's thesis)
Water volume inside zeolite, vw	=	3,300 m ³	
Water content required for regeneration	=	30%	(in order to have min. 70% regeneration)
Evaporation percentage	=	25%	(Mingxing He's thesis)
Volume of water to be evaporated	=	0,825 m ³	(duration: 5,00 h)
Mass density of water, ρ	=	1.000 kg/m ³	
Mass of required water to be evaporated	=	825 kg/column	
Per hour:			
Mass of evaporated water per hour, m	=	165,04 kg	(1 column)
Estimated temperature before heating, T1	=	18,00 deg C	(assumed as ambient temperature)
Target temperature after heating, T2	=	60,00 deg C	(Mingxing He's thesis)
Temperature change, ΔT	=	315,00 K	ΔT = (T2 - T1) + 273 K
Isochoric specific heat coefficient, cv	=	4,06 kJ/kg K	(at ΔT)
Specific heat until target temperature, Cs	=	211,064,74 kJ	(https://www.engineeringtoolbox.com/water-properties-d_1573.html)
Enthalpy of vaporization at target temperature, ch	=	2.357,70 kJ/kg	(https://www.engineeringtoolbox.com/water-properties-d_1573.html)
Latent heat at target temperature, Cl	=	389.105,74 kJ	(at T2)
Total heat for 1 hour drying period, C	=	600.170,48 kJ	Cl = m · ch
Required heating energy per kg water dried	=	3,636,80 kJ/kg	C = Cs + Cl
Per heating period (5 hours):			
Required energy per heating period	=	833,57679 kWh	(1 kJ = 0.00027778 kWh)
2. Cooling			
Required energy per cooling period	=	6,9465 kWh	(assumed for 1 week with 5 minutes of cooling, and cooling energy will be 50% from heating because only the blower is moving, but not heating needed anymore)
Required cooling energy per kg water dried	=	0,0084 kWh/kg	
3. Total			
Required energy for drying for 1 week	=	21.013,00 kWh	(for the same number of columns to be regenerated)
Required energy for drying per year	=	1.092.680,24 kWh	(1 year = 52 weeks)
Electricity cost	=	13,61 cents/kWh	(Statista.com)
Electricity cost for drying per year	=	€ 0,01361 /kWh	
Electricity cost for drying per year	=	€ 14.871,38	
Drying energy in 1 week	=	€ 0,1267 kWh/m ³ of treated water	

Ozonation

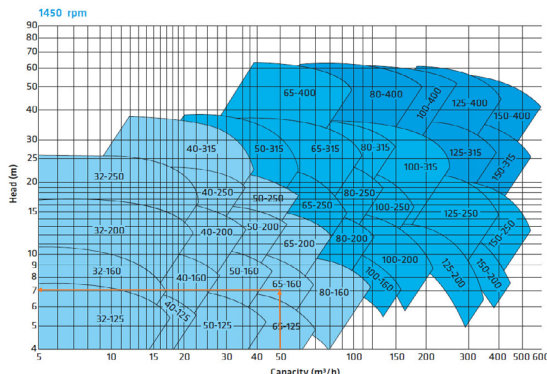
Generator size in full-scale plant	=	(To Be Announced)	
Max. ozone production	=	(To Be Announced)	g/h
Number of generator unit	=	1	
Efficiency	=	100,00 %	(assumed)
Actual ozone production	=	(To Be Announced)	kg/h
Required ozone concentration	=	90,00 mg/L	
Assumed that each cycle there will be 1 column to be regenerated, then:			
Required ozone loading per hour	=	30,04 kg/h	
Required energy per ozone demand	=	12,00 kWh/kg ozone	(STOWA 2015-27: 10 kWh for production, 2 kWh for cooling the generator)
Required ozonation energy per hour	=	360,47 kWh/h	
Recirculation system factor	=	3	(only 1 hour of full ozone generation → the rest is with recirculation system)
Ozone generation energy for 1 week	=	9.011,71 kWh	(assumed 1 week = 3 hours of ozonation → 25 columns to be regenerated)
Ozone generation energy per year	=	468.609,16 kWh	(1 year = 52 weeks)
Electricity cost	=	13,61 cents/kWh	(Statista.com)
Electricity cost for ozonation per year	=	€ 0,01361 /kWh	
Ozone generation energy in 1 week	=	€ 6.377,77	
		0,0544 kWh/m ³ of treated water	

Liquid oxygen (LOX) consumption

Ozone concentration	=	90 mg/L	Mingxing He's MSc Thesis (ozone gas supply flow rate = 0.8 L/min.)
Required ozone gas per kg of zeolite in 3 hours	=	2,357,70 g/kg	(from Max's latest column experiment)
Required zeolite mass in 1 column	=	4.871,20 kg	
Required ozone load in 1 column	=	90,12 kg	
Required ozone loading per hour	=	30,04 kg/h	(for checking)
Oxygen gas per ozone factor	=	7,00 Nm ³ oxygen/kg ozone	
Voor de zuurstofconsumptie van de ozongenerator is uitgegaan van 7 Nm ³ O ₂ /kg O ₃ op basis van informatie over verschillende typen ozongeneratoren.			
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).			
LOX compression factor from oxygen gas	=	0,92 Nm ³ /L	(from STOWA 2020-18)

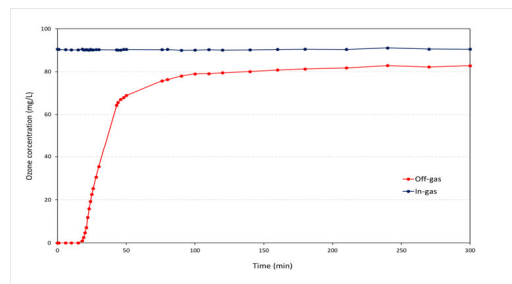
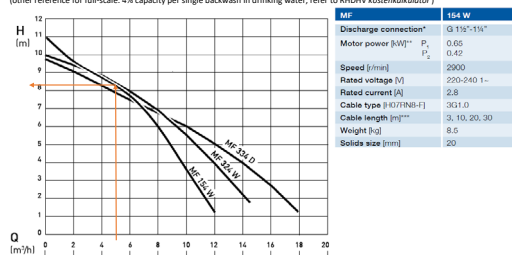
1450 rpm (4 Pole Motor)

FCM	Pump Type	MOTOR	ECO SNM INSTALLATION DIMENSIONS (mm)																					
			Overall Dimensions										Foot Dimensions											
F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20					
65-160	11	90L	80	65	100	156	267	523	360	180	200	90	56	95	125	158	212	280	140	190	14	10		
65-160	15	90L	80	65	100	156	267	523	360	180	200	90	56	95	125	158	212	280	140	190	14	10		
F1	65-160	2,2	900L	89	65	300	179	292	571	360	180	200	100	63	95	125	140	178	212	280	160	192	14	12



Flow rate = 49,52 m³/h = 825,40 L/min.
 Flow rate = 6,001571 BV/h
 Adsorption volume = 956,7504 BV
 Backwash flow = 0,600157 BV/h
 Backwash volume = 0,15 BV
 0,02%

(other reference for full-scale: 4% capacity per single backwash in drinking water, refer to RHDHV kostenkalkulator)



LOX per ozone factor	=	7,61 L/kg ozone	
Required LOX per hour	=	228,56 L/h	
Required LOX per 1-time regeneration of 1 column	=	0,69 m ³	(assumed 1 week = 3 hours of ozonation)
With 1 tank of LOX = 50 L and expansion rate from the LOX to oxygen gas = 1 : 861, the number of tanks required will be	=	1 pc.	
Using a mass density of LOX, the weight of required LOX can be obtained:			
LOX mass density	=	1141 kg/m ³	
Required LOX weight for 1 column	=	782,35 kg	
Required LOX weight per day (3-4 columns in regeneration)	=	2.738,24 kg	
Required LOX weight for a year	=	142.388,42 kg	

ZEOLITE PRODUCTION

High-silica zeolite powder production energy	=	0,03 kWh/kg powder	(value from Zaykovskaya, et al., 2020)
Granulation process			
Power (from the machine), P	=	1 kW	(info from Delft Solids Solutions)
Electric voltage, V	=	230 V	(info from Delft Solids Solutions)
Motor frequency, f	=	50 Hz	(info from Delft Solids Solutions)
Powder weight for feasibility study, w	=	0,15 kg	(info from Delft Solids Solutions)
Granulation time for feasibility study, t	=	40 min.	(info from Delft Solids Solutions)

The most efficient zeolite catalyst H-Beta-17 h-R-150 °C exhibited well-developed textural and structural properties as well as mild acidity together with the highest ratio between Brønsted and Lewis acid sites (Zaykovskaya, et al. 2020). https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110236 .			
Prinz cyclization temperature	=	150 deg C	(assumed the lab temperature is 18 deg C)
Duration	=	17 day	
Mass of zeolite measured	=	1 kg	
Specific heat for silica, c	=	703 J/kg/K	(assumed that the heat capacity is based on silica as higher ratio of the zeolite)
Energy, Q	=	m c ΔT	
	=	92.796,00 J/kg	
	=	0,03 kWh/kg	

It is assumed that after granulation approximately 70% of the powder weight becomes usable granules, hence:			
Percentage of granulation efficiency	=	70%	
Actual power per hour of granulation	=	0,67 kWh	
Actual power per kg of granules	=	6,35 kWh/kg granules	
Total zeolite production energy	=	6,37 kWh/kg granules	
Weight of granules for full-scale	=	102.295,14 kg	
Granulation energy for full-scale	=	652.129,77 kWh	

It is also assumed that re-adsorption capacity after regeneration decreases after a few years, hence there will be 30% of zeolite replenishment after between 5-year period			
Replenishment of zeolite granules	=	30%	
Operational period until replenishment	=	5 years	
Volume of water to be treated during operational period	=	39.790.400,00 m ³	
Granulation specific energy (first load)	=	0,0164 kWh/m ³ of treated water (for the first year)	
Granulation specific energy (replenishment)	=	0,0049 kWh/m ³ of treated water/5-year-period	

RECAP (FIRST YEAR)

Process step	kWh/m ³	Percentage	Remark
Adsorption	0,0286	20,67%	All in operation (excluding 1 column in regeneration)
Pre-backwash	4,85401E-07	0,00%	
Drying	0,0389	28,15%	Drying 70% from water content, heat from natural gas
Ozonation	0,0544	39,32%	Same ozone factor with STOWA 2015-27
Post-backwash	4,85401E-07	0,00%	
Zeolite production	0,0164	11,86%	powder production and granulation process
TOTAL	0,1382	100,00%	

CO2 footprint estimation (first year)

Factor:			
1 kWh	=	0,53 kg CO2	(Richtlijnen haalbaarheidsstudie IPMV CALL 2020)
Total CO2 footprint will be:	=	58,97 g CO2/m ³ of treated water	
	=	508,40 ton CO2/year	(only in the first year)

CO2 footprint zeolite production	=	0,009 kg CO2/m ³ of treated water
	=	0,73 kg CO2/kg zeolite
CO2 footprint GAC	=	11 kg CO2/kg GAC
Converted weight of zeolite	=	0,07
		(Bayer, et al, 2005)

CO2 footprint for heating

<i>Heat energy from natural gas</i>		
1 Nm ³ natural gas	=	11,00 kWh (Swedish Gas Centre, 2007)
1 Nm ³ natural gas	=	1,79 kg CO2 (IPMV CALL 2020)
Heat from natural gas	=	0,1627 kg CO2/kWh
<i>To calculate CO2 footprint for drying:</i>		
Energy for drying	=	0,1267 kWh/m ³ of treated water
CO2 footprint for drying	=	20,62 g CO2/m ³

RECAP (SECOND YEAR ONWARDS)

Process step	kWh/m ³	Percentage	Remark
Adsorption	0,0286	23,45%	All in operation (excluding 1 column in regeneration)
Pre-backwash	4,85401E-07	0,00%	
Drying	0,0389	31,94%	Drying 70% from water content, heat from natural gas
Ozonation	0,0544	44,61%	Same ozone factor with STOWA 2015-27
Post-backwash	4,85401E-07	0,00%	
Zeolite production	-	0,00%	powder production and granulation process
TOTAL	0,1218	100,00%	

CO2 footprint estimation (second year onwards)

Factor:			
1 kWh	=	0,53 kg CO2	(Richtlijnen haalbaarheidsstudie IPMV CALL 2020)
Total CO2 footprint will be:	=	50,28 g CO2/m ³ of treated water	
	=	433,51 ton CO2/year	(only in the first year)

CO2 footprint comparison for drying

From natural gas	=	20,62 g CO2/m ³
From electricity	=	67,17 g CO2/m ³
Conversion factor	=	0,31
Thus, required drying energy per year	=	335.488,44 kWh/year

RECAP (FIFTH YEAR)

Process step	kWh/m ³	Percentage	Remark
Adsorption	0,0286	22,54%	All in operation (excluding 1 column in regeneration)
Pre-backwash	4,85401E-07	0,00%	
Drying	0,0389	30,70%	Drying 70% from water content, heat from natural gas
Ozonation	0,0544	42,88%	Same ozone factor with STOWA 2015-27
Post-backwash	4,85401E-07	0,00%	
Zeolite production	0,0049	3,88%	30% added zeolite granules
TOTAL	0,1268	100,00%	

CO2 footprint estimation (fifth year)

Factor:			
1 kWh	=	0,53 kg CO2	(Richtlijnen haalbaarheidsstudie IPMV CALL 2020)
Total CO2 footprint will be:	=	52,89 g CO2/m ³ of treated water	
	=	455,98 ton CO2/year	(only in the first year)

C-1 (1). CAPEX for EBCT of 5 minutes (with zeolite retail price)

Project : AdOx full-scale (100,000 p.e.)
 Estimated date : 07-Jun-2021
 Revised date : 22-Sep-2021
 Estimated by : Nessler Fausta
 Reviewed by :

Approved by :

Capital Expenditure (CAPEX)

Tag	Item Description	Unit	Quantity	Material		Civil		Mechanical		Electrical		Process Automation		Total Cost (€)	Price Reference	Remark
				Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)			
i. Equipment units and instruments																
1	Influent pump															
	Working	pc.	21	-	-	2.514,67	52.808,13	295,84	6.212,72	147,92	3.106,36	-	-	62.127,21	RHDHV Kostenkalkulator	From buffer pumps (only the pumps, not the pumping station)
	Spared	pc.	1	-	-	2.514,67	2.514,67	295,84	295,84	147,92	147,92	-	-	2.958,44	[Working units]	
2	Filtration column	pc.	21	-	-	74.722,64	1.569.175,50	47.420,14	995.822,91	21.554,61	452.646,78	-	-	3.017.645,19	RHDHV Kostenkalkulator	From rapid sand filtration, incl. backwash pumps, backwash buffer tank and power supplies
3	Blower (with heater)															
	Working	pc.	1	-	-	801,29	801,29	901,45	901,45	300,48	300,48	-	-	2.003,22	Almond Techniek	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	1	-	-	801,29	801,29	901,45	901,45	300,48	300,48	-	-	2.003,22	[Working units]	
4	Ozone generator and power supply unit															
	Working	pc.	1	-	-	127.658,00	127.658,00	191.487,00	191.487,00	47.871,75	47.871,75	-	-	367.016,75	Wedeco PDO 1000-148 (2008)	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	0	-	-	127.658,00	-	191.487,00	-	47.871,75	-	-	-	-	[Working units]	
5	Liquid oxygen (LOX) cylinder incl. evaporator															
	Working	pc.	1	-	-	257,12	257,12	289,26	289,26	96,42	96,42	-	-	642,80	Multigaz BV	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	1	-	-	257,12	257,12	289,26	289,26	96,42	96,42	-	-	642,80	[Working units]	
6	Membrane gas pump for ozone recirculation															
	Working	pc.	1	-	-	225,14	225,14	253,28	253,28	84,43	84,43	-	-	562,84	Alibaba (pneumatic chemical pump)	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	0	-	-	225,14	-	253,28	-	84,43	-	-	-	-	[Working units]	
7	Ozone destructor															
	Working	pc.	1	-	-	123,56	123,56	139,00	139,00	46,33	46,33	-	-	308,89	Fruugo	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	0	-	-	123,56	-	139,00	-	46,33	-	-	-	-	[Working units]	
8	Process automation	LS	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1.200,00	1.200,00	1.200,00	RHDHV Kostenkalkulator	Incl. hardware, software and installation
Total Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation						1.754.621,81		1.196.592,18		504.697,38		1.200,00		3.457.111,36		
Contractor fee (25%)						438.655,45		299.148,04		126.174,34				864.277,84	IPMV Guidelines 2020	For Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation
Basic construction cost						2.193.277,26		1.495.740,22		630.871,72		1.200,00		4.321.389,20		
Incompleteness factor (25%)						548.319,32		373.935,06		157.717,93		300,00		1.080.347,30	IPMV Guidelines 2020	For Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation
Subtotal incl. incompleteness						2.741.596,58		1.869.675,28		788.589,65		1.500,00		5.401.736,50		
Engineering and project management cost (80%)						2.193.277,26		1.495.740,22		630.871,72		1.200,00		4.321.389,20	IPMV Guidelines 2020	For Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation
Total Construction Cost						4.934.873,84		3.365.415,50		1.419.461,37		2.700,00		9.723.125,71		
ii. Startup Material																
1	Zeolite pellets (BEA)	kg	25.573,78	120,00	3.068.854,14	-	-	-	-	-	-	-	-	3.068.854,14	Tosoh	Unit price in Japan, excl. transport cost
2	Zeolite pellets (MOR)	kg	25.573,78	120,00	3.068.854,14	-	-	-	-	-	-	-	-	3.068.854,14	Tosoh	Unit price in Japan, excl. transport cost
Total Startup Material														6.137.708,28		

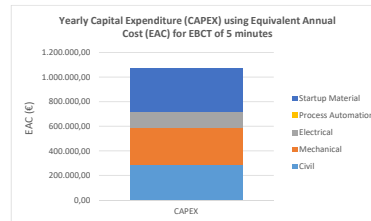
Abbreviations:

pc. pieces
 kg kilograms
 m meter
 LS Lumpsum cost type
 PVC polyvinyl chloride
 SS stainless steel
 BEA high-silica zeolite type Beta
 MOR high-silica zeolite type Mordenite
 incl. including

Equivalent Annual Cost (EAC) Analysis

Total Construction Cost Type	Total Price (€)	Lifespan (year)	Interest Rate	EAC (€/year)
Civil	4.934.873,84	30	4%	285.384,24
Mechanical	3.365.415,50	15	4%	302.689,17
Electrical	1.419.461,37	15	4%	127.667,92
Process Automation	2.700,00	5	4%	606,49
Startup Material	6.137.708,28	30	4%	354.944,28
TOTAL YEARLY CONSTRUCTION COST	15.860.158,98			1.071.292,11

Since minimum 70% of the yearly wastewater should be treated, the yearly volume will be: 7.665.000 m3
 Hence, the total investment cost will contribute to an addition of € 0,14 /m3



C-1 (2). CAPEX for EBCT of 5 minutes (with zeolite bulk price)

Project : AdOx full-scale (100,000 p.e.)
 Estimated date : 07-Jun-2021
 Revised date : 22-Sep-2021
 Estimated by : Nessia Fausta
 Reviewed by :

Approved by :

Capital Expenditure (CAPEX)

Tag	Item Description	Unit	Quantity	Material		Civil		Mechanical		Electrical		Process Automation		Total Cost (€)	Price Reference	Remark
				Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)			
I. Equipment units and instruments																
1	Influent pump															
	Working	pc.	21	-	-	2.514,67	52.808,13	295,84	6.212,72	147,92	3.106,36	-	-	62.127,21	RHDHV Kostenkalkulator	From buffer pumps (only the pumps, not the pumping station)
	Spared	pc.	1	-	-	2.514,67	2.514,67	295,84	295,84	147,92	147,92	-	-	2.958,44	[Working units]	
2	Filtration column	pc.	21	-	-	74.722,64	1.569.175,50	47.420,14	995.822,91	21.554,61	452.646,78	-	-	3.017.645,19	RHDHV Kostenkalkulator	From rapid sand filtration, incl. backwash pumps, backwash buffer tank and power supplies
3	Blower (with heater)															
	Working	pc.	1	-	-	801,29	801,29	901,45	901,45	300,48	300,48	-	-	2.003,22	Almond Techniek	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	1	-	-	801,29	801,29	901,45	901,45	300,48	300,48	-	-	2.003,22	[Working units]	
4	Ozone generator and power supply unit															
	Working	pc.	1	-	-	127.658,00	127.658,00	191.487,00	191.487,00	47.871,75	47.871,75	-	-	367.016,75	Wedeco PDO 1000-148 (2008)	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	0	-	-	127.658,00	-	191.487,00	-	47.871,75	-	-	-	-	[Working units]	
5	Liquid oxygen (LOX) cylinder incl. evaporator															
	Working	pc.	1	-	-	257,12	257,12	289,26	289,26	96,42	96,42	-	-	642,80	Multigaz BV	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	1	-	-	257,12	257,12	289,26	289,26	96,42	96,42	-	-	642,80	[Working units]	
6	Membrane gas pump for ozone recirculation															
	Working	pc.	1	-	-	225,14	225,14	253,28	253,28	84,43	84,43	-	-	562,84	Alibaba (pneumatic chemical pump)	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	0	-	-	225,14	-	253,28	-	84,43	-	-	-	-	[Working units]	
7	Ozone destructor															
	Working	pc.	1	-	-	123,56	123,56	139,00	139,00	46,33	46,33	-	-	308,89	Fruugo	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	0	-	-	123,56	-	139,00	-	46,33	-	-	-	-	[Working units]	
8	Process automation	LS	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1.200,00	1.200,00	1.200,00	RHDHV Kostenkalkulator	Incl. hardware, software and installation
Total Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation						1.754.621,81		1.196.592,18		504.697,38		1.200,00		3.457.111,36		
	Contractor fee (25%)					438.655,45		299.148,04		126.174,34				864.277,84	IPMV Guidelines 2020	For Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation
	Basic construction cost					-	2.193.277,26	-	1.495.740,22	-	630.871,72	-	1.200,00	4.321.389,20		
	Incompleteness factor (25%)					-	548.319,32	-	373.935,06	-	157.717,93	-	300,00	1.080.347,30	IPMV Guidelines 2020	For Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation
	Subtotal incl. incompleteness					-	2.741.596,58	-	1.869.675,28	-	788.589,65	-	1.500,00	5.401.736,50		
	Engineering and project management cost (80%)					-	2.193.277,26	-	1.495.740,22	-	630.871,72	-	1.200,00	4.321.389,20	IPMV Guidelines 2020	For Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation
Total Construction Cost						4.934.873,84		3.365.415,50		1.419.461,37		2.700,00		9.723.125,71		
II. Startup Material																
1	Zeolite pellets (BEA)	kg	25.573,78	25,00	639.344,61	-	-	-	-	-	-	-	-	639.344,61	Tosoh	Unit price in Japan, excl. transport cost
2	Zeolite pellets (MOR)	kg	25.573,78	25,00	639.344,61	-	-	-	-	-	-	-	-	639.344,61	Tosoh	Unit price in Japan, excl. transport cost
Total Startup Material														1.278.689,22		

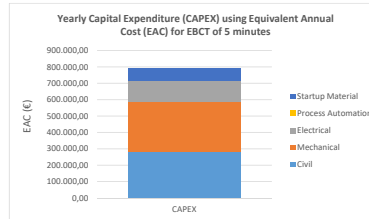
Abbreviations:

pc. pieces
 kg kilograms
 m meter
 LS Lumpsum cost type
 PVC polyvinyl chloride
 SS stainless steel
 BEA high-silica zeolite type Beta
 MOR high-silica zeolite type Mordenite
 incl. including

Equivalent Annual Cost (EAC) Analysis

Total Construction Cost Type	Total Price (€)	Lifespan (year)	Interest Rate	EAC (€/year)
Civil	4.934.873,84	30	4%	285.384,24
Mechanical	3.365.415,50	15	4%	302.689,17
Electrical	1.419.461,37	15	4%	127.667,92
Process Automation	2.700,00	5	4%	606,49
Startup Material	1.278.689,22	30	4%	73.946,72
TOTAL YEARLY CONSTRUCTION COST	11.001.139,93			790.294,55

Since minimum 70% of the yearly wastewater should be treated, the yearly volume will be: 7.665.000 m3
 Hence, the total investment cost will contribute to an addition of € 0,10 /m3



C-2 (1). CAPEX for EBCT of 10 minutes (with zeolite retail price)

Project : AdOx full-scale (100,000 p.e.)
 Estimated date : 07-Jun-2021
 Revised date : 22-Sep-2021
 Estimated by : Nessler Fausta
 Reviewed by :

Approved by :

Capital Expenditure (CAPEX)

Tag	Item Description	Unit	Quantity	Material		Civil		Mechanical		Electrical		Process Automation		Total Cost (€)	Price Reference	Remark
				Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)			
i. Equipment units and instruments																
1	Influent pump															
	Working	pc.	21	-	-	2.514,67	52.808,13	295,84	6.212,72	147,92	3.106,36	-	-	62.127,21	RHDHV Kostenkalkulator	From buffer pumps (only the pumps, not the pumping station)
	Spared	pc.	1	-	-	2.514,67	2.514,67	295,84	295,84	147,92	147,92	-	-	2.958,44	[Working units]	
2	Filtration column	pc.	21	-	-	74.722,64	1.569.175,50	47.420,14	995.822,91	21.554,61	452.646,78	-	-	3.017.645,19	RHDHV Kostenkalkulator	From rapid sand filtration, incl. backwash pumps, backwash buffer tank and power supplies
3	Blower (with heater)															
	Working	pc.	1	-	-	801,29	801,29	901,45	901,45	300,48	300,48	-	-	2.003,22	Almond Techniek	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	1	-	-	801,29	801,29	901,45	901,45	300,48	300,48	-	-	2.003,22	[Working units]	
4	Ozone generator and power supply unit															
	Working	pc.	1	-	-	127.658,00	127.658,00	191.487,00	191.487,00	47.871,75	47.871,75	-	-	367.016,75	Wedeco PDO 1000-148 (2008)	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	0	-	-	127.658,00	-	191.487,00	-	47.871,75	-	-	-	-	[Working units]	
5	Liquid oxygen (LOX) cylinder incl. evaporator															
	Working	pc.	1	-	-	257,12	257,12	289,26	289,26	96,42	96,42	-	-	642,80	Multigaz BV	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	1	-	-	257,12	257,12	289,26	289,26	96,42	96,42	-	-	642,80	[Working units]	
6	Membrane gas pump for ozone recirculation															
	Working	pc.	1	-	-	225,14	225,14	253,28	253,28	84,43	84,43	-	-	562,84	Alibaba (pneumatic chemical pump)	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	0	-	-	225,14	-	253,28	-	84,43	-	-	-	-	[Working units]	
7	Ozone destructor															
	Working	pc.	1	-	-	123,56	123,56	139,00	139,00	46,33	46,33	-	-	308,89	Fruugo	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	0	-	-	123,56	-	139,00	-	46,33	-	-	-	-	[Working units]	
8	Process automation	LS	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1.200,00	1.200,00	1.200,00	RHDHV Kostenkalkulator	Incl. hardware, software and installation
Total Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation						1.754.621,81		1.196.592,18		504.697,38		1.200,00		3.457.111,36		
Contractor fee (25%)						438.655,45		299.148,04		126.174,34				864.277,84	IPMV Guidelines 2020	For Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation
Basic construction cost						2.193.277,26		1.495.740,22		630.871,72		1.200,00		4.321.389,20		
Incompleteness factor (25%)						548.319,32		373.935,06		157.717,93		300,00		1.080.347,30	IPMV Guidelines 2020	For Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation
Subtotal incl. incompleteness						2.741.596,58		1.869.675,28		788.589,65		1.500,00		5.401.736,50		
Engineering and project management cost (80%)						2.193.277,26		1.495.740,22		630.871,72		1.200,00		4.321.389,20	IPMV Guidelines 2020	For Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation
Total Construction Cost						4.934.873,84		3.365.415,50		1.419.461,37		2.700,00		9.723.125,71		
ii. Startup Material																
1	Zeolite pellets (BEA)	kg	51.147,57		120,00	6.137.708,28	-	-	-	-	-	-	-	6.137.708,28	Tosoh	Unit price in Japan, excl. transport cost
2	Zeolite pellets (MOR)	kg	51.147,57		120,00	6.137.708,28	-	-	-	-	-	-	-	6.137.708,28	Tosoh	Unit price in Japan, excl. transport cost
Total Startup Material														12.275.416,55		

48

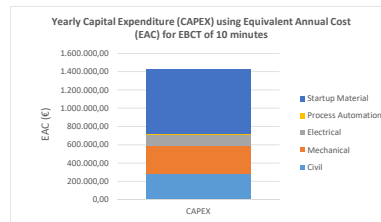
STOWA 2022-10 HAALBAARHEIDSTUDIE ADOX

Abbreviations:

pc. pieces
 kg kilograms
 m meter
 LS Lumpsum cost type
 PVC polyvinyl chloride
 SS stainless steel
 BEA high-silica zeolite type Beta
 MOR high-silica zeolite type Mordenite
 incl. including

Equivalent Annual Cost (EAC) Analysis

Total Construction Cost Type	Total Price (€)	Lifespan (year)	Interest Rate	EAC (€/year)
Civil	4.934.873,84	30	4%	285.384,24
Mechanical	3.365.415,50	15	4%	302.689,17
Electrical	1.419.461,37	15	4%	127.667,92
Process Automation	2.700,00	5	4%	606,49
Startup Material	12.275.416,55	30	4%	709.888,56
TOTAL YEARLY CONSTRUCTION COST	21.997.867,26			1.426.236,38



Since minimum 70% of the yearly wastewater should be treated, the yearly volume will be: 7.665.000 m3
 Hence, the total investment cost will contribute to an addition of € 0,19 /m3

C-2 (2). CAPEX for EBCT of 10 minutes (with zeolite bulk price)

Project : AdOx full-scale (100,000 p.e.)
 Estimated date : 07-Jun-2021
 Revised date : 22-Sep-2021
 Estimated by : Nessia Fausta
 Reviewed by :

Approved by :

Capital Expenditure (CAPEX)

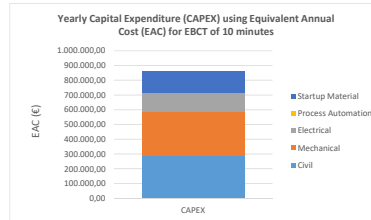
Tag	Item Description	Unit	Quantity	Material		Civil		Mechanical		Electrical		Process Automation		Total Cost (€)	Price Reference	Remark
				Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)	Unit Price (€)	Total Price (€)			
I. Equipment units and instruments																
1	Influent pump															
	Working	pc.	21	-	-	2.514,67	52.808,13	295,84	6.212,72	147,92	3.106,36	-	-	62.127,21	RHDHV Kostenkalkulator	From buffer pumps (only the pumps, not the pumping station)
	Spared	pc.	1	-	-	2.514,67	2.514,67	295,84	295,84	147,92	147,92	-	-	2.958,44	[Working units]	
2	Filtration column	pc.	21	-	-	74.722,64	1.569.175,50	47.420,14	995.822,91	21.554,61	452.646,78	-	-	3.017.645,19	RHDHV Kostenkalkulator	From rapid sand filtration, incl. backwash pumps, backwash buffer tank and power supplies
3	Blower (with heater)															
	Working	pc.	1	-	-	801,29	801,29	901,45	901,45	300,48	300,48	-	-	2.003,22	Almond Technik	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	1	-	-	801,29	801,29	901,45	901,45	300,48	300,48	-	-	2.003,22	[Working units]	
4	Ozone generator and power supply unit															
	Working	pc.	1	-	-	127.658,00	127.658,00	191.487,00	191.487,00	47.871,75	47.871,75	-	-	367.016,75	Wedeco PDO 1000-148 (2008)	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	0	-	-	127.658,00	-	191.487,00	-	47.871,75	-	-	-	-	[Working units]	
5	Liquid oxygen (LOX) cylinder incl. evaporator															
	Working	pc.	1	-	-	257,12	257,12	289,26	289,26	96,42	96,42	-	-	642,80	Multigaz BV	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	1	-	-	257,12	257,12	289,26	289,26	96,42	96,42	-	-	642,80	[Working units]	
6	Membrane gas pump for ozone recirculation															
	Working	pc.	1	-	-	225,14	225,14	253,28	253,28	84,43	84,43	-	-	562,84	Alibaba (pneumatic chemical pump)	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	0	-	-	225,14	-	253,28	-	84,43	-	-	-	-	[Working units]	
7	Ozone destructor															
	Working	pc.	1	-	-	123,56	123,56	139,00	139,00	46,33	46,33	-	-	308,89	Fruugo	Other unit price from RHDHV percentage: 40% C, 45% M, 15% E
	Spared	pc.	0	-	-	123,56	-	139,00	-	46,33	-	-	-	-	[Working units]	
8	Process automation	LS	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1.200,00	1.200,00	1.200,00	RHDHV Kostenkalkulator	Incl. hardware, software and installation
Total Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation						1.754.621,81		1.196.592,18		504.697,38		1.200,00		3.457.111,36		
Contractor fee (25%)						438.655,45		299.148,04		126.174,34				864.277,84	IPMV Guidelines 2020	For Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation
Basic construction cost						2.193.277,26		1.495.740,22		630.871,72		1.200,00		4.321.389,20		
Incompleteness factor (25%)						548.319,32		373.935,06		157.717,93		300,00		1.080.347,30	IPMV Guidelines 2020	For Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation
Subtotal incl. incompleteness						2.741.596,58		1.869.675,28		788.589,65		1.500,00		5.401.736,50		
Engineering and project management cost (80%)						2.193.277,26		1.495.740,22		630.871,72		1.200,00		4.321.389,20	IPMV Guidelines 2020	For Civil, Mechanical, Electrical, Process Automation
Total Construction Cost						4.934.873,84		3.365.415,50		1.419.461,37		2.700,00		9.723.125,71		
II. Startup Material																
1	Zeolite pellets (BEA)	kg	51.147,57	25,00	1.278.689,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Tosoh	Unit price in Japan, excl. transport cost
2	Zeolite pellets (MOR)	kg	51.147,57	25,00	1.278.689,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Tosoh	Unit price in Japan, excl. transport cost
Total Startup Material																2.557.378,45

Abbreviations:

pc. pieces
 kg kilograms
 m meter
 LS Lumpsum cost type
 PVC polyvinyl chloride
 SS stainless steel
 BEA high-silica zeolite type Beta
 MOR high-silica zeolite type Mordernite
 incl. including

Equivalent Annual Cost (EAC) Analysis

Total Construction Cost Type	Total Price (€)	Lifespan (year)	Interest Rate	EAC (€/year)
Civil	4.934.873,84	30	4%	285.384,24
Mechanical	3.365.415,50	15	4%	302.689,17
Electrical	1.419.461,37	15	4%	127.667,92
Process Automation	2.700,00	5	4%	606,49
Startup Material	2.557.378,45	30	4%	147.893,45
TOTAL YEARLY CONSTRUCTION COST	12.279.829,16			864.241,28



Since minimum 70% of the yearly wastewater should be treated, the yearly volume will be: 7.665.000 m3
 Hence, the total investment cost will contribute to an addition of € 0,11 /m3

D-1 (1). OPEX for EBCT of 5 minutes (with zeolite retail price)

Project : AdOx full-scale (100,000 p.e.)
 Estimated date : 07-Jun-2021
 Revised date : 22-Sep-2021
 Estimated by : Nessia Fausta
 Reviewed by :

Approved by :

Operational Expenditure (OPEX)

Tag	Item Description	Unit	Quantity	Yearly Cost		Price Reference	Remark
				Unit Price (€)	Total Price (€)		
I. Operation and Maintenance							
1	Maintenance cost for Civil	LS	1	1,426.92	1,426.92	IPMV Guidelines 2020	0.5% from civil construction cost
2	Maintenance cost for Mechanical	LS	1	9,080.68	9,080.68	IPMV Guidelines 2020	3% from mechanical construction cost
3	Maintenance cost for Electrical	LS	1	3,830.04	3,830.04	IPMV Guidelines 2020	3% from electrical construction cost
4	Maintenance cost for Process Automation	LS	1	18.19	18.19	IPMV Guidelines 2020	3% from process automation cost
5	Personnel	FTE	0.5	50,000.00	25,000.00	IPMV Guidelines 2020	Assumed to be fully automated and routinely scheduled
6	Electricity	kWh	726,956	0.10	72,695.60	IPMV Guidelines 2020	From influent pumping, backwashing, and generating ozone
7	Heat (for drying)	kWh	546,340	0.10	55,180.35	Eurostat 2020 (for NL)	Assumed from natural gas
8	Backwash water production	m3	214,620.00	0.04	8,584.80	IPMV Guidelines 2020	From STOWA CO2-model for EBCT = 5 min.
9	Backwash water treatment at WWTP	m3	107,310.00	0.01	1,073.10	IPMV Guidelines 2020	From STOWA CO2-model for EBCT = 5 min.
Total Operation and Maintenance					176,889.68		
II. Consumable Materials							
1	Polymer	kg	-	3.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
2	Liquid oxygen (LOX) for ozonation	kg	71,194.21	0.20	14,238.84	IPMV Guidelines 2020	From STOWA CO2-model for EBCT = 5 min.
3	Ferric chloride 40% w/w	ton	-	120.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
4	Polyaluminum chloride 40% w/w	ton	-	120.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
5	Methanol	ton	-	355.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
6	Sludge processing (dewatered)	ton (ds)	-	600.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
7	Additional fresh zeolite pellets	kg	2,557.38	26.96	68,934.78	Tosoh	Once every 5 years approx. 5% of pellets will be replenished*
Total Consumable Materials					83,173.63		
TOTAL OPEX (per year)					260,063.31		

Abbreviations:

pc. pieces
 kg kilograms
 m meter
 LS Lumpsum cost type
 PVC polyvinyl chloride
 SS stainless steel
 BEA high-silica zeolite type Beta
 MOR high-silica zeolite type Mordernite
 ton (ds) ton of produced sludge (thickened, dewatered, transported)

Since minimum 70% of the yearly wastewater should be treated, the yearly volume will be:

7,665,000 m3

Hence, the total operation and maintenance costs will contribute to an addition of

€ 0.03 /m3

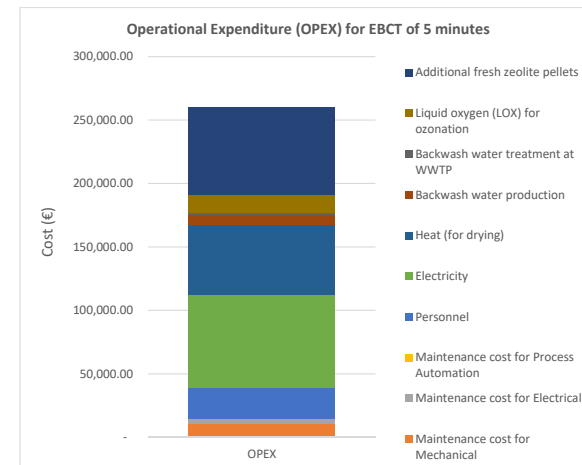
*)

Yearly unit price for additional fresh zeolite pellets using Equivalent Annual Cost (EAC) Analysis:

Unit price of zeolite pellets	=	120.00 €/kg
Lifespan	=	5 years
Interest rate	=	4%
EAC	=	€ 26.96 €/kg

Summary

Cost Type	Yearly Price (€/year)	Treated Water Price (€/m3)	Ratio
CAPEX	1,071,292.11	€ 0.14	80%
OPEX	260,063.31	€ 0.03	20%
TOTAL	1,331,355.41	€ 0.17	100%



D-1 (2). OPEX for EBCT of 5 minutes (with zeolite bulk price)

Project : AdOx full-scale (100,000 p.e.)
 Estimated date : 07-Jun-2021
 Revised date : 22-Sep-2021
 Estimated by : Nessia Fausta
 Reviewed by :

Approved by :

Operational Expenditure (OPEX)

Tag	Item Description	Unit	Quantity	Yearly Cost		Price Reference	Remark
				Unit Price (€)	Total Price (€)		
I. Operation and Maintenance							
1	Maintenance cost for Civil	LS	1	1,426.92	1,426.92	IPMV Guidelines 2020	0.5% from civil construction cost
2	Maintenance cost for Mechanical	LS	1	9,080.68	9,080.68	IPMV Guidelines 2020	3% from mechanical construction cost
3	Maintenance cost for Electrical	LS	1	3,830.04	3,830.04	IPMV Guidelines 2020	3% from electrical construction cost
4	Maintenance cost for Process Automation	LS	1	18.19	18.19	IPMV Guidelines 2020	3% from process automation cost
5	Personnel	FTE	0.5	50,000.00	25,000.00	IPMV Guidelines 2020	Assumed to be fully automated and routinely scheduled
6	Electricity	kWh	726,956	0.10	72,695.60	IPMV Guidelines 2020	From influent pumping, backwashing, and generating ozone
7	Heat (for drying)	kWh	546,340	0.10	55,180.35	Eurostat 2020 (for NL)	Assumed from natural gas
8	Backwash water production	m3	214,620.00	0.04	8,584.80	IPMV Guidelines 2020	From STOWA CO2-model for EBCT = 5 min.
9	Backwash water treatment at WWTP	m3	107,310.00	0.01	1,073.10	IPMV Guidelines 2020	From STOWA CO2-model for EBCT = 5 min.
Total Operation and Maintenance					176,889.68		
II. Consumable Materials							
1	Polymer	kg	-	3.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
2	Liquid oxygen (LOX) for ozonation	kg	71,194.21	0.20	14,238.84	IPMV Guidelines 2020	From STOWA CO2-model for EBCT = 5 min.
3	Ferric chloride 40% w/w	ton	-	120.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
4	Polyaluminum chloride 40% w/w	ton	-	120.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
5	Methanol	ton	-	355.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
6	Sludge processing (dewatered)	ton (ds)	-	600.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
7	Additional fresh zeolite pellets	kg	2,557.38	5.62	14,361.41	Tosoh	Once every 5 years approx. 5% of pellets will be replenished*
Total Consumable Materials					28,600.26		
TOTAL OPEX (per year)					205,489.94		

Abbreviations:

pc. pieces
 kg kilograms
 m meter
 LS Lumpsum cost type
 PVC polyvinyl chloride
 SS stainless steel
 BEA high-silica zeolite type Beta
 MOR high-silica zeolite type Mordernite
 ton (ds) ton of produced sludge (thickened, dewatered, transported)

Since minimum 70% of the yearly wastewater should be treated, the yearly volume will be: 7,665,000 m3
 Hence, the total operation and maintenance costs will contribute to an addition of € 0.03 /m3

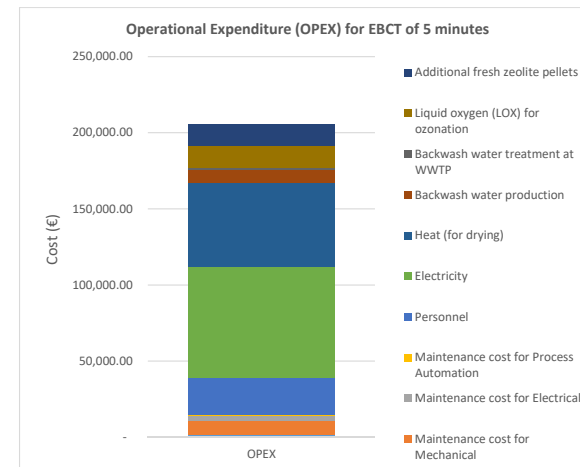
*)

Yearly unit price for additional fresh zeolite pellets using Equivalent Annual Cost (EAC) Analysis:

Unit price of zeolite pellets	=	25.00	€/kg
Lifespan	=	5	years
Interest rate	=	4%	
EAC	=	€ 5.62	€/kg

Summary

Cost Type	Yearly Price (€/year)	Treated Water Price (€/m3)	Ratio
CAPEX	790,294.55	€ 0.10	79%
OPEX	205,489.94	€ 0.03	21%
TOTAL	995,784.49	€ 0.13	100%



D-2 (1). OPEX for EBCT of 10 minutes (with zeolite retail price)

Project : AdOx full-scale (100,000 p.e.)
 Estimated date : 07-Jun-2021
 Revised date : 22-Sep-2021
 Estimated by : Nessia Fausta
 Reviewed by :

Approved by :

Operational Expenditure (OPEX)

Tag	Item Description	Unit	Quantity	Yearly Cost		Price Reference	Remark
				Unit Price (€)	Total Price (€)		
I. Operation and Maintenance							
1	Maintenance cost for Civil	LS	1	1,426.92	1,426.92	IPMV Guidelines 2020	0.5% from civil construction cost
2	Maintenance cost for Mechanical	LS	1	9,080.68	9,080.68	IPMV Guidelines 2020	3% from mechanical construction cost
3	Maintenance cost for Electrical	LS	1	3,830.04	3,830.04	IPMV Guidelines 2020	3% from electrical construction cost
4	Maintenance cost for Process Automation	LS	1	18.19	18.19	IPMV Guidelines 2020	3% from process automation cost
5	Personnel	FTE	0.5	50,000.00	25,000.00	IPMV Guidelines 2020	Assumed to be fully automated and routinely scheduled
6	Electricity	kWh	714,939	0.10	71,493.90	IPMV Guidelines 2020	From influent pumping, backwashing, and generating ozone
7	Heat (for drying)	kWh	1,092,680	0.10	110,360.70	Eurostat 2020 (for NL)	Assumed from natural gas
8	Backwash water production	m3	214,620.00	0.04	8,584.80	IPMV Guidelines 2020	From STOWA CO2-model for EBCT = 5 min.
9	Backwash water treatment at WWTP	m3	107,310.00	0.01	1,073.10	IPMV Guidelines 2020	From STOWA CO2-model for EBCT = 5 min.
Total Operation and Maintenance					230,868.34		
II. Consumable Materials							
1	Polymer	kg	-	3.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
2	Liquid oxygen (LOX) for ozonation	kg	142,388.42	0.20	28,477.68	IPMV Guidelines 2020	From STOWA CO2-model for EBCT = 5 min.
3	Ferric chloride 40% w/w	ton	-	120.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
4	Polyaluminum chloride 40% w/w	ton	-	120.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
5	Methanol	ton	-	355.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
6	Sludge processing (dewatered)	ton (ds)	-	600.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
7	Additional fresh zeolite pellets	kg	5,114.76	26.96	137,869.57	Tosoh	Once every 5 years approx. 5% of pellets will be replenished*
Total Consumable Materials					166,347.25		
TOTAL OPEX (per year)					397,215.59		

Abbreviations:

pc. pieces
 kg kilograms
 m meter
 LS Lumpsum cost type
 PVC polyvinyl chloride
 SS stainless steel
 BEA high-silica zeolite type Beta
 MOR high-silica zeolite type Mordernite
 ton (ds) ton of produced sludge (thickened, dewatered, transported)

Since minimum 70% of the yearly wastewater should be treated, the yearly volume will be: 7,665,000 m3
 Hence, the total operation and maintenance costs will contribute to an addition of € 0.05 /m3

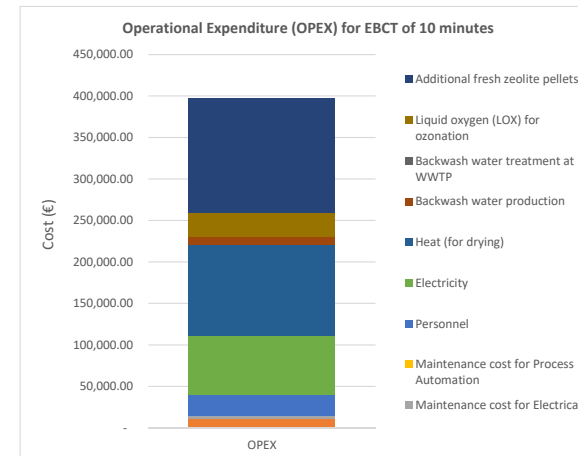
*)

Yearly unit price for additional fresh zeolite pellets using Equivalent Annual Cost (EAC) Analysis:

Unit price of zeolite pellets	=	120.00	€/kg
Lifespan	=	5	years
Interest rate	=	4%	
EAC	=	€ 26.96	€/kg

Summary

Cost Type	Yearly Price (€/year)	Treated Water Price (€/m3)	Ratio
CAPEX	1,426,236.38	€ 0.19	78%
OPEX	397,215.59	€ 0.05	22%
TOTAL	1,823,451.97	€ 0.24	100%



D-2 (2). OPEX for EBCT of 10 minutes (with zeolite bulk price)

Project : AdOx full-scale (100,000 p.e.)
 Estimated date : 07-Jun-2021
 Revised date : 22-Sep-2021
 Estimated by : Nessia Fausta
 Reviewed by :

Approved by :

Operational Expenditure (OPEX)

Tag	Item Description	Unit	Quantity	Yearly Cost		Price Reference	Remark
				Unit Price (€)	Total Price (€)		
I. Operation and Maintenance							
1	Maintenance cost for Civil	LS	1	1,426.92	1,426.92	IPMV Guidelines 2020	0.5% from civil construction cost
2	Maintenance cost for Mechanical	LS	1	9,080.68	9,080.68	IPMV Guidelines 2020	3% from mechanical construction cost
3	Maintenance cost for Electrical	LS	1	3,830.04	3,830.04	IPMV Guidelines 2020	3% from electrical construction cost
4	Maintenance cost for Process Automation	LS	1	18.19	18.19	IPMV Guidelines 2020	3% from process automation cost
5	Personnel	FTE	0.5	50,000.00	25,000.00	IPMV Guidelines 2020	Assumed to be fully automated and routinely scheduled
6	Electricity	kWh	714,939	0.10	71,493.90	IPMV Guidelines 2020	From influent pumping, backwashing, and generating ozone
7	Heat (for drying)	kWh	1,092,680	0.10	110,360.70	Eurostat 2020 (for NL)	Assumed from natural gas
8	Backwash water production	m3	214,620.00	0.04	8,584.80	IPMV Guidelines 2020	From STOWA CO2-model for EBCT = 5 min.
9	Backwash water treatment at WWTP	m3	107,310.00	0.01	1,073.10	IPMV Guidelines 2020	From STOWA CO2-model for EBCT = 5 min.
Total Operation and Maintenance					230,868.34		
II. Consumable Materials							
1	Polymer	kg	-	3.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
2	Liquid oxygen (LOX) for ozonation	kg	142,388.42	0.20	28,477.68	IPMV Guidelines 2020	From STOWA CO2-model for EBCT = 5 min.
3	Ferric chloride 40% w/w	ton	-	120.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
4	Polyaluminum chloride 40% w/w	ton	-	120.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
5	Methanol	ton	-	355.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
6	Sludge processing (dewatered)	ton (ds)	-	600.00	-	IPMV Guidelines 2020	Not required for AdOx
7	Additional fresh zeolite pellets	kg	5,114.76	5.62	28,722.83	Tosoh	Once every 5 years approx. 5% of pellets will be replenished*
Total Consumable Materials					57,200.51		
TOTAL OPEX (per year)					288,068.85		

Abbreviations:

pc. pieces
 kg kilograms
 m meter
 LS Lumpsum cost type
 PVC polyvinyl chloride
 SS stainless steel
 BEA high-silica zeolite type Beta
 MOR high-silica zeolite type Mordernite
 ton (ds) ton of produced sludge (thickened, dewatered, transported)

Since minimum 70% of the yearly wastewater should be treated, the yearly volume will be: 7,665,000 m3
 Hence, the total operation and maintenance costs will contribute to an addition of € 0.04 /m3

*)

Yearly unit price for additional fresh zeolite pellets using Equivalent Annual Cost (EAC) Analysis:

Unit price of zeolite pellets	=	25.00 €/kg
Lifespan	=	5 years
Interest rate	=	4%
EAC	=	€ 5.62 €/kg

Summary

Cost Type	Yearly Price (€/year)	Treated Water Price (€/m3)	Ratio
CAPEX	864,241.28	€ 0.11	75%
OPEX	288,068.85	€ 0.04	25%
TOTAL	1,152,310.13	€ 0.15	100%

