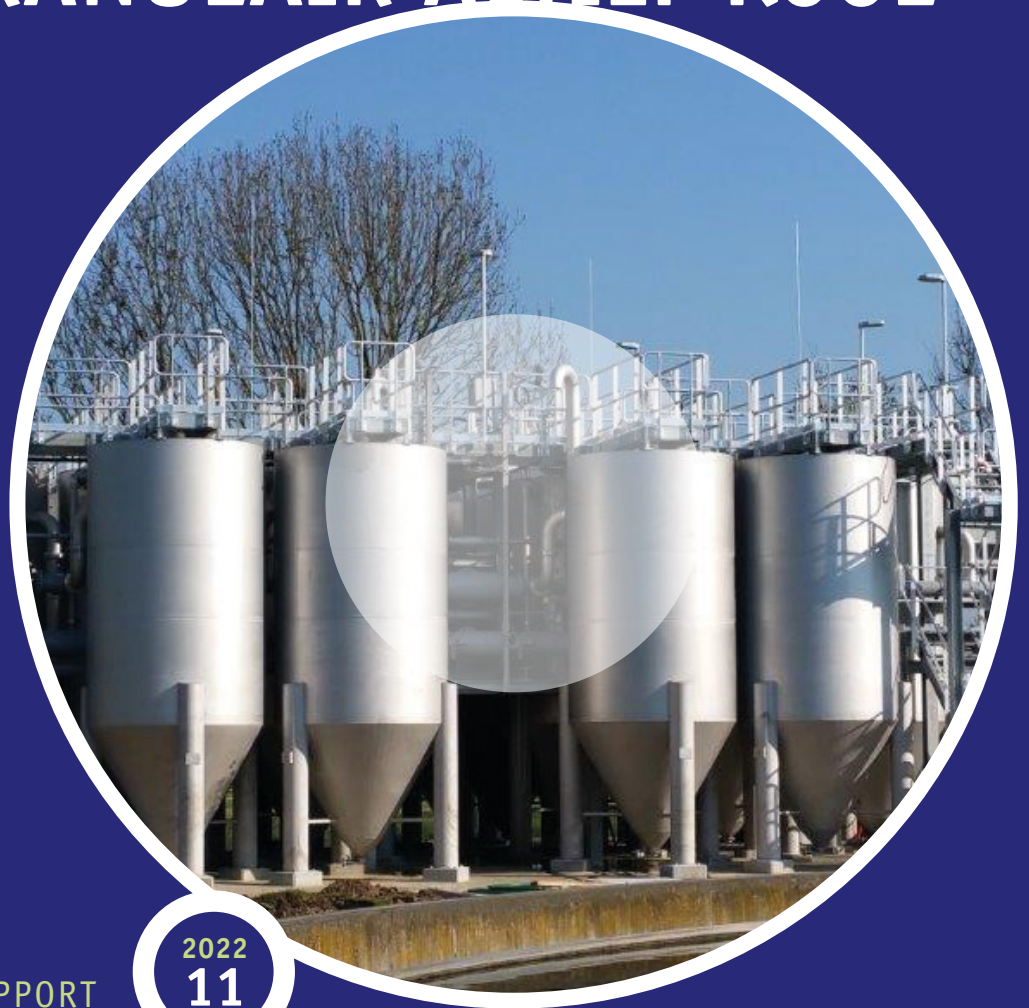


HAALBAARHEIDSSSTUDIE BIOLOGISCH GEACTIVEERDE CONTINUFILTRATIE OVER GRANULAIR ACTIEF KOOL



RAPPORT

2022

11

HAALBAARHEIDSSSTUDIE BIOLOGISCH GEACTIVEERDE
CONTINUFILTRATIE OVER GRANULAIR ACTIEF KOOL

RAPPORT

2022

11

ISBN 978.90.5773.981.1



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS H. Wouters (Brightwork)
A. Kramer (Brightwork)
E. van Opijnen (Brightwork)
J. Swart (Brightwork)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

M. Bechger - Waternet
J. van den Bulk – TAUW
A. Deeke - Waterschap de Dommel
J. Foekema - CABOT
C. de Jong – Witteveen en Bos
J. Kloosterman – Greffenhuis – Waterschap Vechtstromen
J. Kramer – Witteveen en Bos
P. van der Maas – Van Hall Larenstein
M. Mulder - Mirabella Mulder Wastewater management
G. Rijs – WVL, Rijkswaterstaat
P. Schyns – Waterschap Rijn en IJssel
C. Uijterlinde - STOWA
P. Wessels - Isle Utilities

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau bv
STOWA STOWA 2022-11
ISBN 978.90.5773.981.1

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

BIOLOGISCHE ACTIEF KOOLFILTRATIE LIJKT VEELBELOVENDE TECHNOLOGIE VOOR DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN UIT AFVALWATER

Biologische actief koolfiltratie met inbreng van lucht voor de zuurstofvoorziening lijkt een veelbelovende techniek voor de verwijdering van medicijnresten en andere microverontreinigingen uit afvalwater. De lange standtijd van de kool, zorgt voor gunstige operationele kosten en CO₂ voetafdruk.

In het kader van het Innovatieprogramma Microverontreinigingen (IPMV) is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd naar de potentie van biologische geactiveerde continu-filtratie over granulair actief kool.

Continufiltratie - met zand als filtermedium - is een bewezen en betrouwbare nabehandelingstechniek voor gezuiverd afvalwater, die veelvuldig wordt toegepast. Verwijdering van zwevende en organische stof, stikstof en/of fosfaat is vaak de reden voor inzet. In dit haalbaarheidsonderzoek is de alternatieve inzet van continu-filtratie voor het vergaand verwijderen van medicijnresten onderzocht. Daarbij wordt granulair actief kool gebruikt als filtermedium. In het filterbed vindt een combinatie van adsorptie en biologische omzetting plaats. De biologische omzetting wordt bevorderd door het inbrengen van fijne luchtbellens onderin het filtermedium. De luchtbellens migreren door het filterbed en zorgen ervoor dat biomassa zich kan ontwikkelen én hechten aan het filtermedium. Hiermee wordt biologische afbraak van organische stof en microverontreinigingen gestimuleerd. Het uiteindelijke doel is een significante verlenging van de standtijd van de kool voor regeneratie. Simultaan wordt in de installatie de verwijdering van fosfaat gerealiseerd door middel van een gecontroleerde dosering van een coagulant in de toevoer naar de reactor. Daarmee kan tegelijkertijd invulling gegeven worden aan de opgave uit de Kaderrichtlijn Water.

Het onderzoek toont aan dat de technologie aantrekkelijk lijkt voor de verwijdering van medicijnresten uit afvalwater. De mogelijke verwijderingsrendementen voor medicijnresten zijn hoog; er vindt een simultane verwijdering van organische microverontreinigingen plaats, waardoor de ecotoxicologische risico's voor lozing van het effluent in het watermilieu worden verlaagd. De CO₂ voetafdruk, het energieverbruik en de operationele kosten lijken gunstig in vergelijking met de referentietechnieken.

Waterschap Vechtstromen heeft aangegeven haar locatie Emmen beschikbaar te willen stellen voor een pilot. Tijdens de pilot wordt de technologie op een schaalbaar niveau operationeel bedreven en zullen de onderzoeksvragen, die tijdens het haalbaarheidsonderzoek zijn gedefinieerd worden beantwoord.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

Continufiltratie is een bewezen en betrouwbare effluent nabehandelingstechniek, die veelvuldig wordt toegepast. Verwijdering van zwevende en organische stof, stikstof en/of fosfaat is vaak de reden voor inzet. Het filtermedium is zand en het filtermechanisme is gebaseerd op fysisch-chemische filtratie van deeltjes en/of biologische conversie van stikstof (ammonium of nitraat-N) door biomassa in het filterbed.

In deze haalbaarheidsstudie is de alternatieve inzet van continufiltratie voor het vergaand verwijderen van medicijnresten onderzocht. Daarbij wordt granulair actief kool gebruikt als filtermedium. In deze configuratie is het systeem al onderwerp van onderzoek in het Innovatieprogramma microverontreinigingen (IPMV) en vinden testen plaats op rwzi Hapert (Waterschap De Dommel). *Echter de in dit haalbaarheidsonderzoek uitgewerkte systeemopzet wijkt wezenlijk af van de "standaard" opzet, vanwege:*

- Het introduceren van een gecontroleerde biologische activiteit in de reactor door het inbrengen van fijne luchtbellen onderin het filtermedium. De luchtbellen migreren door het filterbed en zorgen ervoor dat biomassa zich kan ontwikkelen én hechten aan het filtermedium. Hiermee wordt biologische afbraak van organische stof en microverontreinigingen gestimuleerd. Het uiteindelijke doel is een significante verlenging van de standtijd van de kool voor regeneratie.
- Het realiseren van een simultane verwijdering van fosfaat door middel van een gecontroleerde dosering van een coagulant in de toevoer naar de reactor. Vlokvorming en vlokverwijdering vinden plaats in de filterreactor en opgelost fosfaat wordt effectief verwijderd. Hiermee wordt simultaan invulling gegeven aan de KRW doelstellingen voor sommige zuiveringen.

Als grondslag voor het uitvoeren van het haalbaarheidsonderzoek dient het projectvoorstel *biologisch geactiveerde continufiltratie over granulair actief kool* (afgekort tot **BC-GAK**), dat per 1 januari 2021 is goedgekeurd in categorie 1: referentietechnologie nageschakeld (O₃ + zandfiltratie).

Deze haalbaarheidsstudie maakt onderdeel uit van het Innovatie Programma Microverontreinigingen (IPMV) van STOWA en het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. De haalbaarheidsstudie is uitgevoerd conform de richtlijnen, zoals vastgelegd door STOWA voor projecten, die zijn goedgekeurd in de tweede call van het programma in 2020.

Het onderzoek toont aan dat BC-GAK aantrekkelijk lijkt voor de verwijdering van medicijnresten uit afvalwater, bij toetsing aan de STOWA richtlijnen:

- Verwijderingsrendementen voor medicijnresten van 80% op basis van de gidsstoffen Ministerie I&W.
- Simultane verwijdering van organische microverontreinigingen, waardoor de ecotoxicologische risico's voor lozing van het effluent in het watermilieu worden verlaagd.
- De CO₂ voetafdruk wordt berekend op 115 g CO₂ per m³ behandeld water bij een standtijd van het granulair actief kool van 30 maanden.
- De totale kosten voor implementatie en instandhouding van de zuiveringsopzet worden berekend op € 0,17 per m³ behandeld water.

Naast de toetsing aan de STOWA richtlijnen is in enkele kortstondige testen op installaties in Duitsland (ZKA Rietberg en KA Baden-Baden) bevestigd dat de techniek kan worden gecombineerd met fosfaatverwijdering door het doseren van coagulant in de toevoer naar de reactor. Die combinatie van P-verwijdering en medicijnrestverwijdering leidt in de praktijk tot een (financieel) aantrekkelijke oplossing voor sommige waterschappen.

Om de openstaande vragen goed te kunnen beantwoorden is het uitvoeren van een pilot gewenst, waarbij de technologie op een schaalgrootte van circa 5 m³/h wordt ingezet op RWZI effluent. Aandachtspunten bij dat onderzoek zijn de wijze waarop de aerobe biologische activiteit kan worden gehandhaafd in het filter, de wijze van spoeling van het filtermedium kan worden geoptimaliseerd en de ontwerpgrondslagen (EBCT, filtratiesnelheid, medium-circulatie, weerstandsopbouw, combi met P-verwijdering) kunnen worden bevestigd.

Met de voorgestelde procesopzet en de combinatie van functies wordt voorzien in een duidelijke behoefte bij de Nederlandse waterschappen, getuige de interesse voor een eventueel pilot traject op basis van deze technologie. Zes waterschappen (WRIJ, WDO Delta, WSF, WSV, WBL en Aquafin) hebben aangegeven interesse te hebben in actieve deelname in de pilot en zich te willen committeren aan de doelstellingen en criteria voor uitvoering ervan. Waterschap Vechtstromen heeft aangegeven haar locatie Emmen hiervoor beschikbaar te willen stellen en als penvoerder op te willen treden. Daarmee kan een directe vergelijking worden gemaakt met de lopende BODAC pilot op die locatie.

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 BIOLOGISCH GEACTIVEERDE CONTINUFILTRATIE OVER GRANULAIR ACTIEF KOOL

INHOUD

	COLOFON	
	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
	1.1 Effluent nabehandeling met continu-filtratie	1
	1.2 Leeswijzer	3
2	PROCESBESCHRIJVING	4
	2.1 Procesbeschrijving van een standaard continufilter	4
	2.2 Biologisch geactiveerde continufiltratie met GAK	7
	2.3 Processchema	8
3	LITERATUUR STAND DER TECHNIEK	11
	3.1 Inleiding	11
	3.2 Procesmechanismen	11
	3.3 Bio-GAK RWZI Henriksdal en RWZI Stengarden, Zweden	14
	3.4 BIOMAC – Aquafin, België	16
	3.5 BODAC Emmen	17
	3.6 Internationale GAK referenties in continu filters	18
	3.6.1 KA WeiBenburg - Duitsland	18
	3.6.2 ZKA Rietberg - Duitsland	18
	3.6.3 WwTW Stengarden - Zweden	21
	3.6.4 WwTW Baden-Baden, Duitsland	21
	3.7 Verwijdering van microverontreinigingen	22
	3.8 Conclusies	24
4	BIOLOGISCHE EFFECT EN ECOTOXICITEIT	25
	4.1 Inleiding	25
	4.2 BioMAC (project Neptune, Aquafin)	25
	4.3 Australisch onderzoek ecotoxiciteit nabehandeling rwzi effluent	26
	4.4 Project BODAC	26

5	DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN	27
5.1	Inleiding	27
5.2	Dimensioneringsgrondblagen	27
5.3	Lay-out BC-GAK continufiltratie	28
6	KWANTIFICERING EN ONDERBOUWING VAN DE ONTWERPCRITERIA	30
6.1	Inleiding	30
6.2	Te behandelen hoeveelheid afvalwater	30
6.3	Verwijderingsrendementen gidsstoffen	30
6.4	Inzet hulpstoffen/ chemicaliën	32
6.5	Energieverbruik	32
6.6	Slibproductie	32
6.7	Spoelwaterproductie	33
6.8	CO ₂ -footprint conform STOWA model	33
6.9	Toxiciteit van het effluent	34
6.10	Bouw- en Stichtingskosten	35
6.11	Jaarlijkse specifieke kosten	36
7	TECHNOLOGY READINESS LEVEL	37
8	INPASSING IN DE NEDERLANDS AFVALWATERZUIVERINGEN	39
8.1	Inleiding	39
8.2	Effect op de bedrijfsvoering van de RWZI	39
8.3	Geschikte RWZI's	40
9	CONCLUSIE EN VERVOLG	41
9.1	Onderzoeksvragen	41
9.2	Conclusies	41
9.3	Potentiële partners en onderzoekslocatie	42
9.4	Pilot specificaties	42
9.5	Planning	44
9.6	Financiering	44
10	REFERENTIES	45
BIJLAGE 1	ZKA RIETBERG PRAKTIJKRESULTATEN VERWIJDERING MICRO'S	49
BIJLAGE 2	KOSTEN SPECIFICATIE VAN DE BC-GAK CONTINU-INSTALLATIE	51

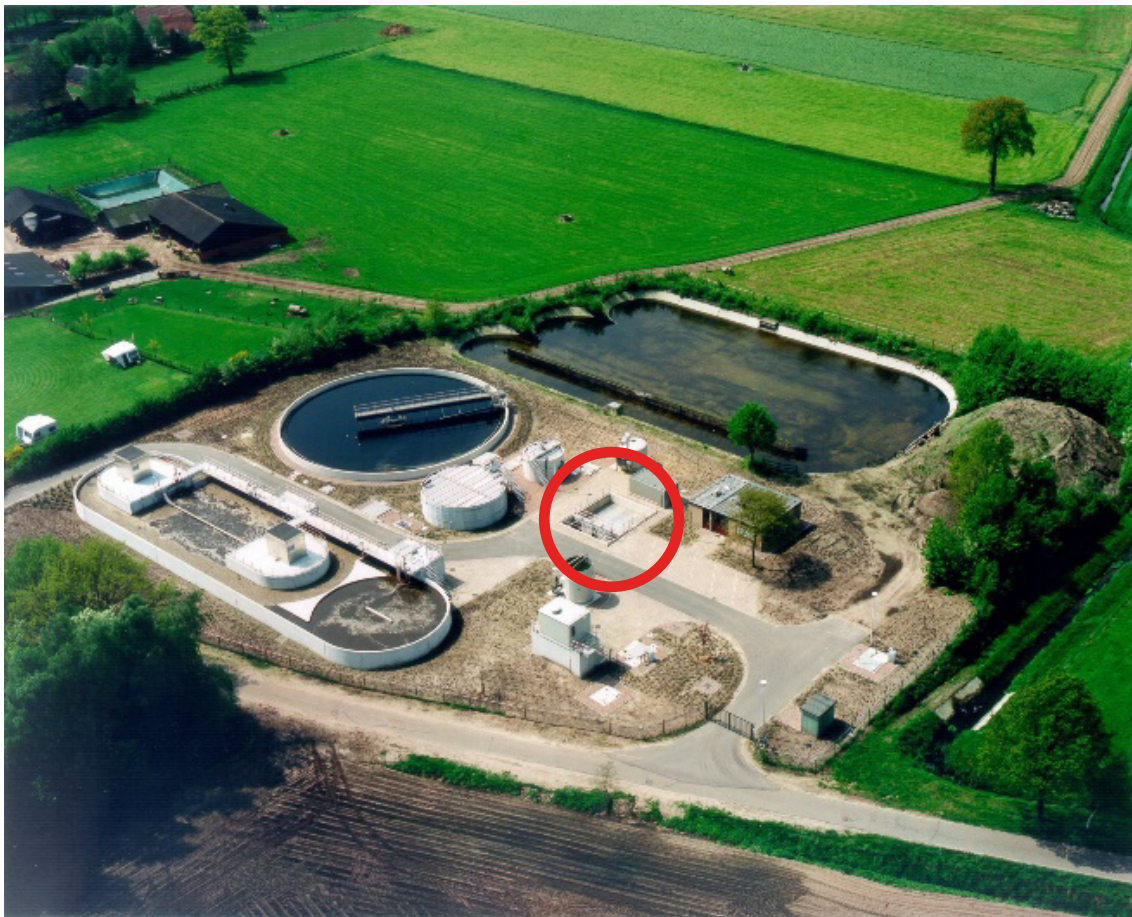
1

INLEIDING

1.1 EFFLUENT NABEHANDELING MET CONTINU-FILTRATIE

Met een nageschakelde techniek worden specifieke stoffen verwijderd voordat lozing op oppervlaktewater plaatsvindt. Eén van de technieken, die in Nederland sinds halverwege de negentiger jaren is toegepast is continufiltratie. In figuur 1.1.1. is de nabehandeling (in rode cirkel) van RWZI Ruurlo weergegeven.

FIGUUR 1.1.1 NAGESCHAKELDE CONTINU-FILTRATIE (RODE CIRKEL) OP RWZI RUURLO



Continufiltratie blijkt in de praktijk uitermate geschikt als “bioreactor”, waarbij biologische omzetting op en rond het filtermedium plaatsvindt. Door middel van gecontroleerde beluchting in het filterbed is bijvoorbeeld een effectieve omzetting van ammonium-N in nitraat-N mogelijk door nitrificerende biomassa, die zich afzet op het filtermedium. Een voorbeeld van een grootschalige installatie hiervan is gegeven in figuur 1.1.2.

FIGUUR 1.1.2

NAGESCHAKELDE CONTINU-FILTRATIE - BIOLOGISCHE NITRIFICATIE WWTW HOLBEACH, ANGLIAN WATER



In enkele Europese landen (Duitsland, Zwitserland, Zweden) zijn continufilters ingezet waarbij het filtermedium is vervangen door granulair actief kool. Doel is om vergaande verwijdering van microverontreinigingen te realiseren. De resultaten laten zien dat vergaande verwijdering mogelijk is en de installatie robuust en bedrijfszeker kan worden bedreven.

Het onderwerp van deze haalbaarheidsstudie is de inzet van het concept van continufiltratie met een filtervulling van granulair actief kool, echter met een wezenlijk andere aanvliegroute:

- Het introduceren van een gecontroleerde biologische activiteit in de reactor door het inbrengen van fijne luchtbellens onderin het filtermedium. De luchtbellens migreren door het filterbed en zorgen ervoor dat biomassa zich kan ontwikkelen én hechten aan het filtermedium. Hiermee wordt biologische afbraak van organische stof en microverontreinigingen gestimuleerd. Het uiteindelijke doel is een significante verlenging van de standtijd van de kool voor regeneratie.
- Het realiseren van een simultane verwijdering van fosfaat door middel van een gecontroleerde dosering van een coagulant in de toevoer naar de reactor. Vlokvorming en vlokverwijdering vinden plaats in de filterreactor en opgelost fosfaat wordt effectief verwijderd. Hiermee wordt simultaan invulling gegeven aan de KRW doelstellingen voor sommige zuiveringen.

Uit de literatuur is bekend dat microverontreinigingen effectief kunnen worden verwijderd door biologisch geactiveerd kool. Dit is granulair kool, waarbij er een biofilm gevormd wordt, op de oppervlakte van de GAK, zie onder andere (Weemaes, M., Fink, G., Lachmund, C., Magdeburg, A., Stalter, D., Thoeye, C., Gueldre, G., van de Steen, B., 2011), (Simpson, 2008), (Baresel, C., Harding, M., Fang, J., 2021).

Deze haalbaarheidsstudie is uitgevoerd om de combinatie van biologische geactiveerde continu-filtratie met granulair kool als filtermateriaal te onderzoeken. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het 'Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit RWZI-afvalwater' van STOWA en het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Het onderliggende projectvoorstel "*Biologisch geactiveerde continufiltratie over granulair actief kool*" (afgekort tot BC-GAK) is ingediend bij de tweede call van het IPMV en op 1 januari 2021 door STOWA goedgekeurd in categorie 1: referentietechnologie nageschakeld (ozonisatie + zandfiltratie).

1.2 LEESWIJZER

In dit rapport wordt verslag gedaan van de haalbaarheidsstudie naar biologisch geactiveerde continufiltratie over granulair actief kool (BC-GAK):

- Hoofdstuk 2 beschrijft de technologie en het concept BC-GAK continufiltratie.
- Hoofdstuk 3 presenteert de resultaten van een literatuurstudie naar de verwijdering van medicijnresten door middel van biologische geactiveerde granulair actief kool en de rol van de biofilm op de standtijd van de kool en de verwijderingsrendementen. Tevens is in dit hoofdstuk verslag gedaan van interviews met diverse personen en instanties, die zijn betrokken geweest bij proef- en praktijkinstallaties en referenties in het buitenland.
- In hoofdstuk 4 wordt specifiek aandacht besteed aan de ecotoxicologische effecten van BC-GAK filtratie, ter beoordeling van de risico's voor lozing van rwzi effluent in het watermilieu.
- In hoofdstuk 5 worden de dimensioneringsgrondslagen voor de BC-GAK technologie uitgewerkt, mede gebaseerd op de resultaten, die zijn gerapporteerd in de voorgaande hoofdstukken. Het resultaat vormt de basis voor de lay-out van de installatie en de kostenberekeningen.
- In hoofdstuk 6 worden de dimensioneringsgrondslagen onderbouwd op basis van de literatuurstudie en nader uitgewerkt met aandacht voor: de behandelde afvalwaterhoeveelheid, hulpstoffen, energieverbruik, slibproductie, CO₂ voetafdruk, jaarlijkse kosten. Tevens is hier gekwantificeerd en onderbouwd de jaarlijkse kosten per m³ behandeld afvalwater, aan de hand van een breakdown van de investeringskosten en de variabele kosten.
- Hoofdstuk 7 gaat in op het TRL-niveau van de voorgestelde technologie en de doelstelling voor het te bereiken TRL-niveau na uitvoering van de pilottesten.
- In hoofdstuk 8 worden uitgelegd op welke wijze de BC-GAK toegepast kan worden bij bestaande Nederlandse afvalwaterzuiveringen.
- De kennis- en onderzoeksvragen, die niet zijn beantwoord in de haalbaarheidsstudie zijn in hoofdstuk 9 samengevat. Hier worden ook de conclusies van de haalbaarheidsstudie samengevat en aanbevelingen gedaan voor het vervolgtraject.
- Hoofdstuk 10 bevat de referentielijst.

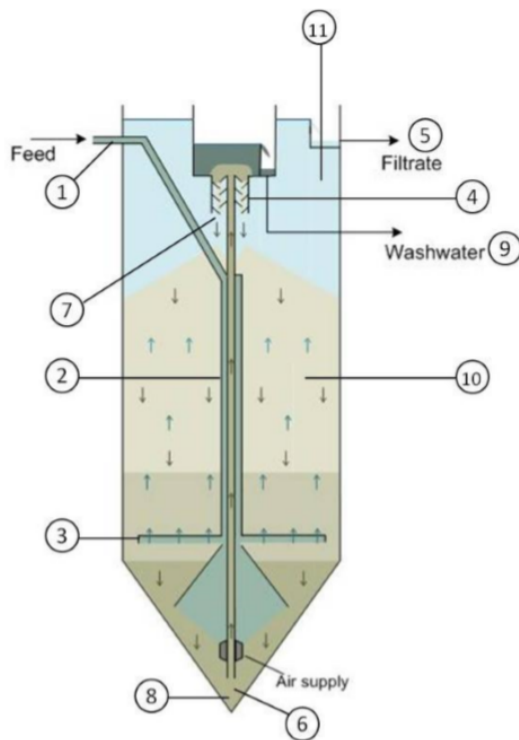
2

PROCESBESCHRIJVING

2.1 PROCESBESCHRIJVING VAN EEN STANDAARD CONTINUFILTER

Het continufilter (afgekort tot MBF: moving bed filter) is een filtratieproces waarbij het filtermedium continu gereinigd wordt. Dit betekent dat het niet nodig is om het filter uit bedrijf te nemen om het filtermedium te wassen. In dit hoofdstuk wordt het filtratieproces beschreven voor een standaard toepassing waarbij het filter wordt ingezet voor het afscheiden van discrete deeltjes.

FIGUUR 2.1.1 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE MBF



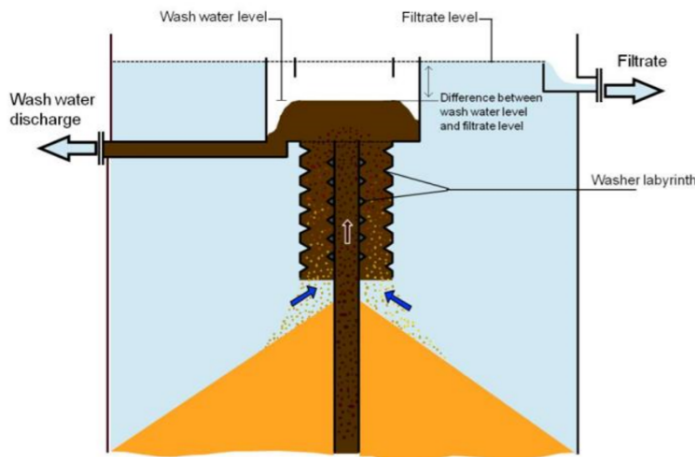
De filtratie vindt plaats in opwaartse stroming door het filterbed, terwijl het filtermedium (bijvoorbeeld zandkorrels) langzaam verplaatst worden in tegenovergestelde richting. Gedurende het filtratie proces worden verontreinigde korrels schoongemaakt in het waslabyrinth en worden de verontreinigingen meegenomen met het waswater.

Het filtratie proces is weergegeven in Figuur 2.1.1. De procesbeschrijving refereert naar het nummer in deze figuur.

Het water, dat gezuiverd gaat worden, wordt getransporteerd naar het filter, door de invoerleiding (1). Het water komt het via de voedingsspijp (2) en de verdeelarmen (3) het filterbed binnen. Het water wordt gezuiverd wanneer het door het filterbed stroomt. Het filtraat verlaat het systeem via een overloop leiding in het bovenste gedeelte van de reactor (5).

Het filterbed beweegt continu neerwaarts tegelijkertijd stroomt het water in opwaartse richting. Het verontreinigde zand (8) wordt afgenomen aan de onderkant van het filterbed (6) en wordt in het waslabyrint gewassen, hierna valt het gereinigde zand (7) op de top van het filterbed. Hierdoor wordt een continue circulatie gerealiseerd en een continue wassing van zandkorrels.

FIGUUR 2.1.2 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET WASLABYRINTH



Het waslabyrint (4), figuur 2.1.2, bestaat uit meerdere ringen, die rondom de airlift geplaatst zijn. Dit labyrint is ontworpen om hydraulische stromingen te gebruiken, voor de wassing van het filtermedium. De zandkorrels vallen door het waslabyrint, terwijl de verontreinigingen meegenomen worden door een opwaartse stroom van water. Dit waswater is een klein gedeelte van het filtraat, de stroming van het waswater wordt gerealiseerd door een verschil in level tussen filtraat en waswater afvoer.

De circulatie van het filtermedium is gebaseerd op het airlift principe. De airlift transporteert verontreinigd zand van de onderkant van het filterbed naar het waslabyrint. De airlift bestaat uit een lange pijp, waar onderin lucht geïnjecteerd wordt. Hierdoor ontstaat een lage dichtheid van een mengsel van zand/ water/ lucht in vergelijking met de omgeving, dat ervoor zorgt dat dit mengsel omhoog getransporteerd wordt. De hoge turbulentie, in de airlift, zorgt ervoor dat de verontreinigingen van de korrels verwijderd worden. Aan de bovenkant van de airlift, komt de lucht vrij en het verontreinigde water met de zandkorrels stroomt door het waslabyrint. De hoeveelheid zand, dat getransporteerd wordt door de airlift hangt af van de luchtinbreng in de airlift.

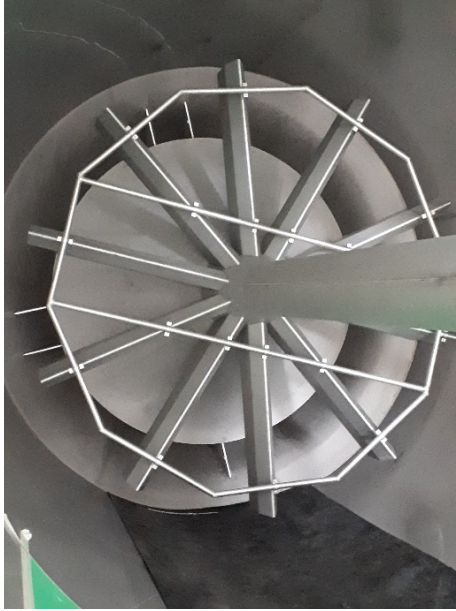
Naast het afvangen van zwevende stof, kan het continue zandfilter ook ingezet worden om biologische wijze stikstof (zowel denitrificatie als nitrificatie) te verwijderen of op chemische wijze fosfaat te verwijderen.

Voor de toepassing van het continufilter in dit haalbaarheidsonderzoek is de biologische omzetting in het filter van groot belang. Daarmee is op praktijkschaal veel ervaring opgedaan in de toepassing waarbij biologische nitrificatie wordt nagestreefd in het filterbed. Daarom wordt daaraan hier extra aandacht besteed.

Bij biologische nitrificatie in het zandfilter wordt ammonium-N omgezet in nitraat-N, door nitrificerende biomassa, die zich vormt op de zandkorrels. Voor dit biologisch proces is zuurstof nodig, die wordt toegevoegd onderin het filterbed door middel van een beluchttingsnet

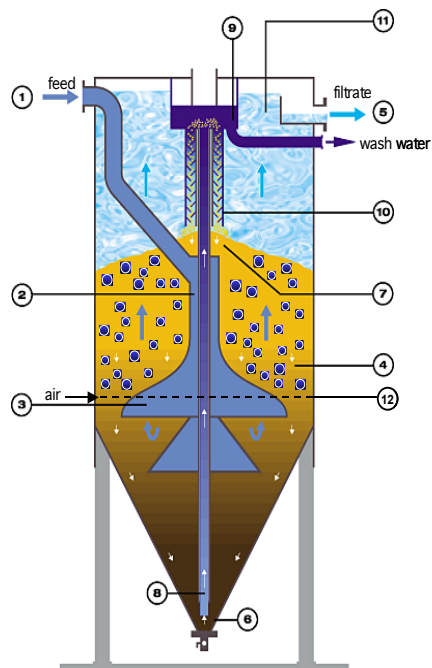
(zie figuur 2.1.3). Hiermee wordt een fijn belLENpatroon, in combinatie met een goede luchtverdeling, gecreëerd. In het filter vindt een opwaartse luchtstroom plaats terwijl het filterzand met de gebonden biomassa neerwaarts stroomt. Deze interactie tussen de biomassa en de zuurstof in de ingebrachte lucht zorgt voor aerobe condities in de reactor en goede omstandigheden voor de vorming van een actieve biofilm.

FIGUUR 2.1.3 BOVENAANZICHT VAN EEN BELUCHT MOVING BED FILTER



Naast het gebruik van de reactor als bioreactor bestaat de mogelijkheid om fysisch-chemische omzettingen te laten plaatsvinden in de reactor. Van dat principe wordt gebruik gemaakt door het doseren van coagulant op de toevoer naar het filter. Hiermee wordt opgelost P omgezet in onopgelost P en ingevangen in vlokken, die in het filter medium worden afgescheiden en met het spoelwater verwijderd.

FIGUUR 2.1.4 DOORSNEDE BELUCHT CONTINU-FILTER



De combinatie van biologische omzetting van stikstof en fysische-chemische verwijdering van fosfaat kan plaatsvinden in één reactor, waardoor een efficiënte oplossing wordt geboden. Zie als voorbeeld de continu-filterinstallatie op RWZI Wijnre (WBL), figuur 2.1.5.

FIGUUR 2.1.5 NAGESCHAKELDE FILTERINSTALLATIE VOOR N EN P VERWIJDERING, RWZI WIJLRE (WBL)



2.2 BIOLOGISCH GEACTIVEERDE CONTINU-FILTRATIE MET GAK

In afwijking van de procesbeschrijving van een continu-filter in paragraaf 2.1 wordt in de voorgestelde procesopzet gebruik gemaakt van granulair actief kool in plaats van zand als filtermateriaal. Dit heeft een aantal consequenties voor het ontwerp en de procescondities van de reactor:

- Door het verschil in soortelijk gewicht tussen zand en granulair kool is het noodzakelijk het ontwerp van de airlift en wasser aan te passen, om te voorkómen dat kool uitspoelt, terwijl de wassing van de kool onverminderd effectief moet verlopen.
- Het lagere soortelijke gewicht van het granulair actief kool betekent voor het ontwerp van het opwaarts doorstroomde continu-filter dat de maximaal toelaatbare filtratiesnelheid in belangrijke mate wordt bepaald door de korrelgrootte verdeling in combinatie met de stofbelasting. De keuze van de juiste korrelgrootte is daarbij zeer relevant.
- De wijze van mediumtransport door de airlift en mediumwassing in de wasinrichting stelt eisen aan de slijtvastheid van het korrelkool.

De functionaliteit van de BC-GAK reactor bestaat uit de volgende onderdelen:

- De granulaire actief kool zorgt voor de adsorptie van de microverontreinigingen aan de kool tijdens het doorstromen van de koolkolom.
- De granulaire actief kooldeeltjes vormen het oppervlak voor de geleidelijke groei van een biofilm rondom de kooldeeltjes, die bijdragen aan de afbraak van organische stoffen tijdens de filtratie.
- De kooldeeltjes vormen een filtermedium, dat zwevende stof en – in geval van coagulant dosering en vlokvorming – fosfaatvlokken uit het afvalwater filtert en verwijderd.

Ten opzichte van vast-bed-GAK-filtratie heeft continu-GAK-filtratie een aantal kenmerken, die hieronder specifiek benoemd zijn:

- Het spoelen van het vast-bed-filter vindt discontinu plaats, afhankelijk van de stofopbouw in het filter. Bij veel toepassingen is de stoflast in de toevoer naar het koolfilter erg laag (BODAC, IVL, beide met een UF voorbehandeling), waardoor de terugspoelfrequentie van de koolkolom laag is en het systeem beheersbaar blijft. Om een effectieve spoeling te bewerkstelligen moet het filterbed in een (gedeeltelijke) expansie worden gebracht. Hierdoor wordt de ideale propstroomconfiguratie negatief beïnvloed. Dit is vooral voor het adsorptieprofiel in de reactor een nadeel voor vast-bed-filtratie.
- In het continu-filter wordt een klein deel van het filtermedium gecontroleerd onder uit de reactor onttrokken en gewassen. Dit proces kan volledig beheerst worden door een meet- en regelsysteem. Hierdoor blijft de propstroom intact en wordt de biomassa beter in het systeem gehouden. Er ontstaat een goed en stabiel evenwicht.
- In het continu-filter is de maximale filtratiesnelheid afhankelijk van het filtermedium en de korrelgrootte. GAK heeft een lagere soortelijke dichtheid dan filterzand, waardoor het proces eerder begrensd wordt in filtratiesnelheid. Andersom geredeneerd: een keuze voor een grovere GAK korrelgrootte verdeling kan deze beperking deels compenseren, maar leidt dan tot een geringer specifiek contactoppervlak in de reactor.

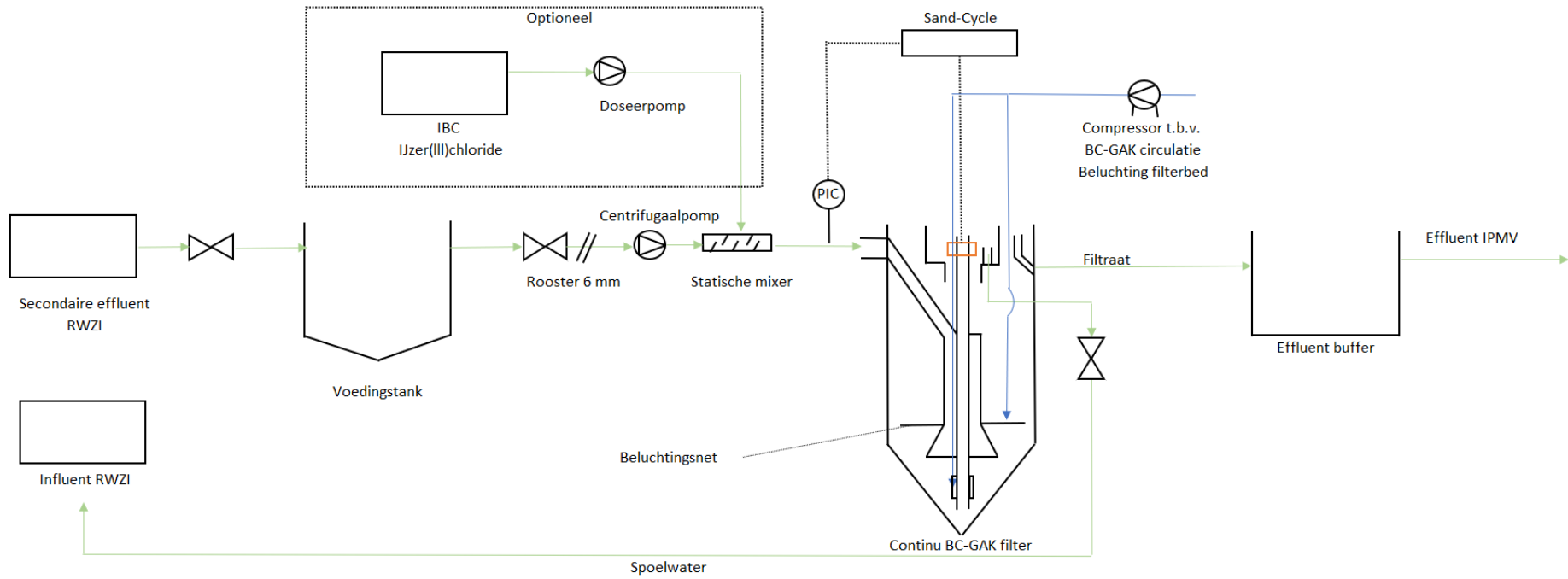
2.3 PROCESSCHEMA

In figuur 2.3.1 is het procesflow diagram van de BC-GAK reactor weergegeven. De reactor wordt geplaatst als extra zuiveringsstap, achter de biologische behandeling van een rioolwaterzuivering. Hier volgt een toelichting op het schema:

- Het effluent van RWZI na nabezinking wordt gepompt naar de reactor. Afhankelijk van het flow-profiel van de zuivering wordt voorzien in een buffervolume, zodat de reactor 24 uur per dag in bedrijf kan blijven en stilstand voorzieningen achterwege kunnen blijven.
- In de voedingsleiding vindt een voorscreening van 6 mm plaats. Dit is ter voorkoming dat er grove delen in het filter terechtkomen, die de werking van de airlift nadelig beïnvloeden. Als de bestaande RWZI voldoende waarborgen heeft om te voorkomen dat deeltjes van deze grootte in de reactor komen, dan kan die voorziening achterwege blijven.
- Optioneel is een coagulant dosering aan het proces schema toegevoegd voor P-verwijdering. Hierbij wordt een coagulant op de toevoerleiding van de reactor gedoseerd, ter hoogte van een statische menger in de toevoerleiding naar de reactor. De vlokvorming vindt plaats in de reactor.
- In de reactor is het filtratiemedium granulair actief kool. Op het granulair kool kan zich een biofilm vormen dat in staat is voor het verwijderen van organisch materiaal en organische microverontreinigingen. Om de biofilmvorming te stimuleren wordt proceslucht ingebracht onderin de reactor door middel van een beluchtingsnet in het filterbed. Fijne luchtbelletjes migreren door het filterbed omhoog, zodat continu zuurstof beschikbaar is voor de biomassa. De persluchtvoorziening voor de biofilm en de medium-circulatie wordt gecombineerd.
- Medium circulatie wordt gestuurd en beheerst door een monitoring en control unit (www.sand-cycle.com), die specifiek is ontwikkeld om de groei van biomassa te stimuleren en het actief kool zo beperkt mogelijk te wassen. Daarvoor wordt onder andere gebruik gemaakt van een druksensor op de toevoerleiding, waarmee de actuele filterbedweerstand kan worden gemeten. Door sturing van de luchtinbreng in de airlift kan de filterbedweerstand op de gewenste waarde worden gehouden.

- Het vrijkomende spoelwater bevat met name de afgevangen zwevende stof en biomassa, dat vrijkomt van de korrel tijdens de wassing. Dit spoelwater wordt teruggevoerd naar de terreinriolering en doorloopt de RWZI. Er is dus geen sprake van een separate spoelwaterbehandeling.

FIGURE 2.3.1 PROCES FLOW DIAGRAM BC-GAK FILTER



3

LITERATUUR STAND DER TECHNIEK

3.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk is relevante literatuur samengevat en is bovendien verslag gedaan van inhoudelijke gesprekken die zijn gevoerd met internationale onderzoekers, die aandacht hebben besteed aan de combinatie van adsorptie en biologische degradatie in granulair actief koolfilters. Een zeer relevant project van Nederlandse bodem is het BODAC project, waarover gedurende deze haalbaarheidsstudie inhoudelijk is gesproken met de verantwoordelijke projectleden.

3.2 PROCESMECHANISMEN

In biologisch geactiveerde granulair kool reactoren is de hypothese dat een samenspel van processen leidt tot de verlenging van de standtijd van de kool, onder handhaving van de goede verwijderingspercentages van de microverontreinigingen. Echter hoe deze processen op elkaar ingrijpen is nog onderwerp van studie. Momenteel zijn twee PhD-studies gestart bij Wetsus, die gericht zijn op het achterhalen van de mechanismen.

In een bio-GAK filter kunnen medicijnresten verwijderd worden door adsorptie, biodegradatie en bioregeneratie (Rattier, M., Reungoat, J., Gernjak, W., Joss, A., Keller, J., 2012); (El Gamal, M., Mousa, H.A., El-naas, M.H., Zacharia, R., Judd, S., 2018). In de literatuur zijn verscheidene referenties te vinden, waar biologisch geactiveerd kool wordt ingezet voor de verwijdering van microverontreinigingen. Voorbeelden van deze referenties gebaseerd op vaste filterbedden zijn:

1. BODAC (biologisch actiefkoolfiltratie met zuurstof dosering), in Emmen waarbij de voeding het effluent is van een ultrafiltratie. Het onderzoek heeft aangetoond dat BODAC veel medicijnresten voor méér dan 80% verwijderd, zelfs na extreem lange standtijden van 200.000 bed volumes (van der Maas, P. Veenendaal, G., Nonnenkens, J., Brink, H., de Vogel, D., 2020).
2. BioMAC, waarbij effluent van de RWZI aan een belucht biologisch geactiveerd koolfilter (vast bed principe) wordt gevoed (Weemaes, M., Fink, G., Lachmund, C., Magdeburg, A., Stalter, D., Thoeye, C., Gueldre, G., van de Steen, B., 2011). Het onderzoek werd beperkt in de tijd waardoor de impact van de biologie op de standtijd van de kool maar ten dele is vastgesteld.
3. IVL onderzoek RWZI Henriksdal, waarbij MBR effluent als voedingsbron werd gebruikt. Het effluent bevat nagenoeg geen vaste stof en BZV (< 2 ppm) en lage concentraties fosfaat (< 0.10 mg/l). Het behandelde effluent is oververzadigd met zuurstof, en dat betekent dat de koolkolommen onder aerobe condities worden doorstroomd. Vastgesteld is dat de standtijd van de GAK kolommen kunnen oplopen tot 60.000 BV zonder afbreuk op het verwijderingsrendement van de microverontreinigingen.

Bovenstaand zijn bio-GAK filters met vast filter bed. In de bovengenoemde voorbeelden is een vast-bed filter prima inzetbaar, vanwege de geringe vuilopbouw, door de lage (organische) stofconcentraties in het effluent. Echter voor een standaard Nederlandse RWZI dient rekening

gehouden te worden met een hogere stofbelasting en periodiek hoge concentraties aan nutriënten, zoals bijvoorbeeld is geconstateerd op RWZI Emmen (periodiek hoge ammonium-N concentraties). Onder die omstandigheden biedt de inzet van continu-filtratie voordelen, door de specifieke verschillen tussen vast-bed en continu-filtratie:

- Het filterbed in een continu-filter wordt niet in expansie gebracht voor het terugspoelen. Spoeling vindt gematigd plaats, zodat de biomassa op de korrel beter vastgehouden kan worden.
- Vuilopbouw in het continu-filter vindt plaats vanaf de onderzijde van het filterbed. Vanwege de continue medium circulatie van boven naar onder (met een gemiddelde lage snelheid in de orde van grootte van 10 - 20 cm/uur) blijft de weerstandopbouw beperkt.
- Inbreng van perslucht (door middel van fijne luchtbelletjes) aan de onderzijde van het filterbed in het continu-filter leidt – in combinatie met de neerwaartse beweging van het filtermedium – tot een goede dispersie van de lucht. Hierdoor worden aerobe condities in de reactor steeds gewaarborgd. In een vast-bed reactor kunnen deze condities in delen van de reactor niet aanwezig zijn.
- Het variabele spoelmechanisme in het continu-filter (meer/minder circulatielucht op de airlift) is een belangrijke stuurparameter om optimale condities voor zowel adsorptie, filtratie en biologische afbraak te bewerkstelligen.
- Een hogere vaste stofbelasting van een vast-bed GAK filter vraagt om een effectieve periodieke water/luchtspoeling. Hiermee kan vuilopbouw worden uitgespoeld en de opgebouwde vuil bed weerstand worden verwijderd. Echter, het terugspoelen met water/lucht in een GAK filter moet beheerst plaatsvinden, om uitspoelen van filtermateriaal te voorkómen. Derhalve is de combinatie van fysisch-chemische P verwijdering (door dosering van een coagulant) en GAK filtratie in een vast-bed-filter in de praktijk niet goed mogelijk.

In een granulair actief koolfilter hangt de mate van adsorptie van stoffen af van de volgende factoren:

- Adsorptie-eigenschappen van de stoffen, zoals de hydrofobie
- Type kool
- De organische stof belasting van het te behandelen water, uitgedrukt in DOC

Na verzadiging van de kool voor een bepaalde stof vindt doorslag plaats en kan de concentratie van die betreffende stof hoger zijn in het effluent dan in de voeding. De doorslagcurve kan worden bepaald op basis van de zogenaamde Freundlich-isotherm en is afhankelijk van de stoffeigenschappen. Zowel de vorm van de curve als de absolute adsorptiegraad (uitgedrukt in g stof per kg kool) bepaalt wanneer de doorslag plaatsvindt.

Een procesmechanisme dat alleen is gericht op adsorptie leidt tot een verzadiging van de kool na verloop van tijd. Dit wordt uitgedrukt in bed volumina: de hoeveelheid behandeld water in m³ per m³ koolbed dat is behandeld, voordat verzadiging optreedt. Als vergaande verwijdering van microverontreinigingen is vereist is activering van de kool noodzakelijk na circa 8.000 – 15.000 BV.

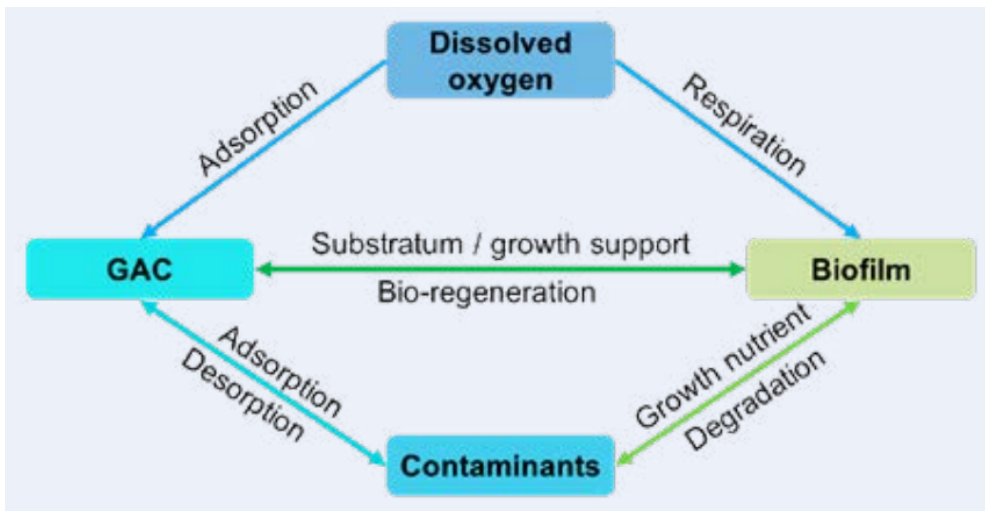
In biologische GAK volgt na initiële adsorptie een proces van biodegradatie, als voldoende biomassa beschikbaar is in de reactor en specifieke bacteriën kunnen gedijen in de beschermde omgeving van het filtermedium. Dit wordt gestimuleerd door de inbreng van lucht (zuurstof) in de reactor, waardoor in de propstroomreactor aerobe condities heersen. De biofilm groeit voornamelijk aan de buitenkant van de kooldeeltjes aan; de afgescheiden enzymen kunnen verder in de kool dringen en daar een bijdrage leveren aan de biodegradatie.

Het proces van biodegradatie kan worden gevolgd door bioregeneratie, waarbij micro-organismen de beschikbare adsorptiecapaciteit in de reactor herstellen. Dit is een bijzonder evenwicht, dat in een gecontroleerde propstroomreactor met een goede balans tussen aan- en afvoer van stoffen kan worden benaderd.

Bovengenoemde processen vormen de basis voor een verlenging van de standtijd van de GAK, waardoor – zoals in het geval van de BODAC installatie – hoge verwijderingsrendementen voor microverontreinigingen worden behaald bij standtijden van de kool van > 200.000 BV en 10 jaar.

De exacte interactie tussen de benoemde procesmechanismen (figuur 3.2.1) zijn onderwerp van wetenschappelijke studie (Bernadet, 2020).

FIGUUR 3.2.1 PROCESINTERACTIES IN EEN BIO-GAK REACTOR



3.3 BIO-GAK RWZI HENRIKSDAL EN RWZI STENGARDEN, ZWEDEN

Het Zweedse Milieu Onderzoeksinstituut IVL heeft uitgebreid onderzoek gedaan naar biologische GAK filtratie op effluent van de MBR op RWZI Henriksdal, nabij Stockholm, Zweden. Hierover is gepubliceerd (zie referentielijst). Met de onderzoeksleider (Christian Baresel) zijn gesprekken gevoerd over de resultaten, het geplande vervolgonderzoek en de lessons learned.

Primaire doel van het uitgevoerde onderzoek in Zweden is het vaststellen van de meest betrouwbare en economische zuiveringstrein voor de verwijdering van microverontreinigingen uit huishoudelijk afvalwater. Daarbij zijn diverse oplossingsrichtingen met elkaar vergeleken en worden de effluenten beoordeeld op PNEC (predicted no effect concentrations) waardes.

IVL heeft uitgebreid aandacht besteed aan (biologische) granulair koolfiltratie. Alle GAK kolommen zijn statische kolommen en worden gevoed met heel schoon effluent, benedenstrooms van een MBR zuivering. De koolsoort is Chemviron F400 12 x 40 mesh (1,70 – 0,54 mm), een typische drinkwaterkoolsoort, die niet mag worden belast met hoge stofconcentraties in de toevoer. Dat is ook precies de toepassing van IVL, omdat de voeding van de installatie in de RWZI komt van een MBR. Typische concentraties in de voeding naar de bio-GAK zijn: TSS: 2 – 5 mg/l, BZV < 2 mg/l en Totaal-P < 0,10 mg/l.

Het onderzoek heeft plaatsgevonden op relatief kleine schaal, met onderstaande karakteristieken:

- Voedingsdebiet constant: 1,4 m³/h
- Filtratieoppervlak: 0,3 m²
- Bed hoogte koolkolom: 1,0 m
- Bed volume: 0,3 m³

De corresponderende EBCT is 13 minuten. De impact van EBCT op de standtijd van de kool is niet verder onderzocht, maar zal in gepland vervolgonderzoek aandacht krijgen. De totale doorlooptijd van de proefperiode leidde tot een totaal aantal behandelde bedvolumina van circa 60.000 BV.

De biologische activiteit in de kool ontstaat spontaan, er hoeft niet belucht te worden. Dit komt mede omdat de MBR is opgebouwd uit ondergedompelde UF membranen, die door middel van lucht worden schoongehouden. Er is dus altijd een maximale verzadiging van zuurstof.

Vanaf oktober 2020 is door IVL een vervolgonderzoek gestart met vastbed filtratie achter de MBR, waarbij met name gekeken wordt naar de standtijd van de kool op langere termijn. Men streeft naar standtijden van 3-5 jaar.

IVL is ook betrokken geweest bij het onderzoek op RWZI Stengarden met nageschakelde koolfiltratie, zandfiltratie en ozonbehandeling. De kool- en zandfilters zijn beide continu-filters (Nordic Water, DynaSand, DynaCarbon).

Alhoewel de onderzoeken van IVL niet goed te vergelijken zijn met het in dit rapport voorgestelde onderzoek, zijn de volgende punten relevant voor de voorgestelde pilot met biologische GAK continu-filtratie:

- Bij een hogere stofbelasting op het continue koolfilter is de maximaal toelaatbare opwaartse filtratiesnelheid gerelateerd aan de toegepast korrelfractie van de kool. Door de keuze van een iets grovere koolsoort dan toegepast in het IVL onderzoek in Henriksdal, kan deze beperking worden weggenomen.
- Voor de applicaties achter een MBR (UF membraanfiltratie) is door IVL geconcludeerd dat continue GAK filtratie geen toegevoegde waarde heeft ten opzichte van vastbed filtratie, vanwege de lage stofbelasting op het GAK filter. Deze situatie is in Nederland anders: hier is sprake van een hogere stofbelasting door inzet van GAK filtratie benedenstrooms van de nabezinking.

Een samenvattende tabel, met de resultaten van het uitgevoerde onderzoek in Henriksdal (2018 – 2020) is weergegeven in tabel 3.3.1. GAK-biofilter betreft hier een vastbed filter met biofilmvorming.

TABEL 3.3.1 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VOOR VERSCHILLENDE MICROVERONTREINIGINGEN PER PROCES

Priority micro pollutants and effects	Treatment technology/-combination				
	O ₃ *	GAC-Biofilter	PAC-UF	O ₃ /GAC-Biofilter	UF/GAC-Biofilter
Pharmaceuticals					
Azithromycin (<i>antibiotic</i>)					
Ciprofloxacin (<i>antibiotic</i>)					
Clarithromycin (<i>antibiotic</i>)		#	#	#	#
Diclofenac (<i>painkiller</i>)					
E2 (17β-estradiol) (<i>hormone</i>)				#	
EE2 (17α-ethinylestradiol) (<i>synthetic hormone</i>)				#	
Erythromycin (<i>antibiotic</i>)		#	#	#	#
Ibuprofen (<i>antiinflammatory and analgesic</i>)					
Carbamazepine (<i>antidepressant</i>)					
Levonorgestrel (<i>synthetic hormone</i>)		#	#	#	#
Metoprolol (<i>beta blockers, antihypertensive</i>)					
Oxazepam (<i>anti-anxiety</i>)					
Propranolol (<i>beta blockers, antihypertensive</i>)					
Sertraline (<i>antidepressant</i>)					
Sulfamethoxazole (<i>antibiotic</i>)					
Trimethoprim (<i>antibiotic</i>)			#		
Effect					
Risk of infection (<i>bacteria, pathogens</i>)					
Antibiotic resistance (ARB)					
Estrogenic effects (YES) (<i>effect of hormones</i>)			#		#
Other micropollutants					
Bisphenol A (<i>in plastic, hormone-destructive</i>)					
Cybutryne/Irgarol (<i>Herbicide</i>)		#	#	#	#
Dioxins and PCB (<i>in coolants</i>)		#	#	#	#
Endotoxins (<i>toxic bioaerosols</i>)		#	#	#	#
Phthalates (e.g. DEHP) (<i>plasticisers</i>)					
Flame retardants (e.g. HBCD)					
Chloroalkanes (C10 to C13) (<i>lubricants</i>)		#	#	#	#
Linear alkyl sulfonates (LAS) (C10 to C13)		#	#	#	#
Nonylphenol (<i>incl. additive in cleaning products</i>)					
Octylphenol (<i>incl. additives in cleaning products</i>)					
PFAS (<i>incl. PFOS</i>) (<i>Tenside</i>)					
Sucralose (<i>sweetener</i>)					
Terbutryn (<i>Herbicide</i>)		#	#	#	#
Tributyltin (TBT) (<i>Biocid</i>)		#	#	#	#
Trichlorobenzene (<i>solvents & insecticides</i>)		#	#	#	#
Triclosan (<i>antiseptic</i>)					
Microplastics 1 µm–5 mm					

Removal efficiency: ■ - >80%, ■ - 20-80%, ■ - <20%, ■ - none;

#Expected effect based on substance properties and technology purification mechanism

* For an ozone dose of between 0.5-1 mg O₃/g DOC

3.4 BIOMAC – AQUAFIN, BELGIË

Dit onderzoek, uitgevoerd door Aquafin, op RWZI Aartselaar is uitgebreid beschreven in de literatuur. Mede na consultatie van één van de onderzoekers in dit project is aanvullend op de literatuur volgende informatie uitgewisseld.

Ondanks de beperkte onderzoeksperiode (9 maanden) rapporteren de onderzoekers aanwijzingen dat sprake is van biologische activiteit in de koolkolom, naast de constante verwijdering van microverontreinigingen gedurende de proeven: steeds > 80%. De koolkolom werd daarbij gevoed met rwzi effluent.

Die aanwijzingen voor biologische activiteit komen voort uit de simultane vergelijking van de resultaten van de BIOMAC pilot (voeding 450 l/h, EBCT: 26 minuten) en de lab-GAK kolom, die op dezelfde wijze is gevoed en onder dezelfde operationele condities is bedreven, op het spoelregime van de kolommen na. Beide kolommen werden bedreven onder aerobe condities door recirculatie van 100% van het voedingsdebiet vanuit de nageschakelde UF opstelling, die wordt belucht ten behoeve van de reiniging van de ondergedompelde membranen.

De BIOMAC pilot werd regelmatig teruggespoeld, waardoor het aannemelijk is dat aangroei van biomassa grotendeels teniet werd gedaan. Dit in tegenstelling tot de lab-GAK kolom, waar terugspoeling niet plaatsvond. De aanwezigheid van biomassa in de lab-GAK kolom leidde tot een groter verwijderingsrendement van een aantal opgeloste organische stof parameters (DOC, opgelost COD): 70% in de lab-GAK kolom ten opzichte van 40% in de BIOMAC pilot. Daarnaast wordt ook een hoog verwijderingsrendement voor microverontreinigingen, die biologisch afbreekbaar (specifiek ibuprofen en naproxen) zijn, gerapporteerd.

De onderzoekers koppelen de biologische activiteit aan de biomassa verblijftijd in de reactor (SRT). Een SRT > 10 dagen wordt als grenswaarde aangegeven voor het bereiken van additionele biologische omzetting in de reactor. De relatie tussen SRT en de biologische activiteit in een continufilter is eerder door ons onderzocht voor nitrificerende filters. Aan de hand van die analogie is vastgesteld welke specifieke organische stof belasting wordt gerealiseerd in het continufilter:

- Uitgaande van een bereikbare stabiele biomassa concentratie in het continufilter van 3 – 6 kg/m³ reactor is de aanwezige specifieke biomassa 9 – 18 kg VLSS/m² filteroppervlak.
- Uitgaande van een ontwerp filtratiesnelheid van 7,5 m/h en een gemiddelde DOC concentratie van 11 mg/l (bijlage 2, uitgangspunten berekeningen rwzi 100.000 i.e.) is de specifieke DOC vracht circa 2 kg/(m² filteroppervlak.dag).
- De specifieke organische stofbelasting van de beschikbare biomassa in het continufilter wordt hiermee 0,1 – 0,2 kg DOC per kg VLSS per dag.

Met deze lage specifieke organische stofbelasting worden goede procesomstandigheden gerealiseerd, die leiden tot de gewenste biologische activiteit, in combinatie met de adsorptie.

Nader overleg met de R&D afdeling van Aquafin leert, dat Aquafin erg geïnteresseerd is in nader onderzoek naar de effectiviteit van de biologie in een continu GAK filter. Zie ook hoofdstuk 9.

3.5 BODAC EMMEN

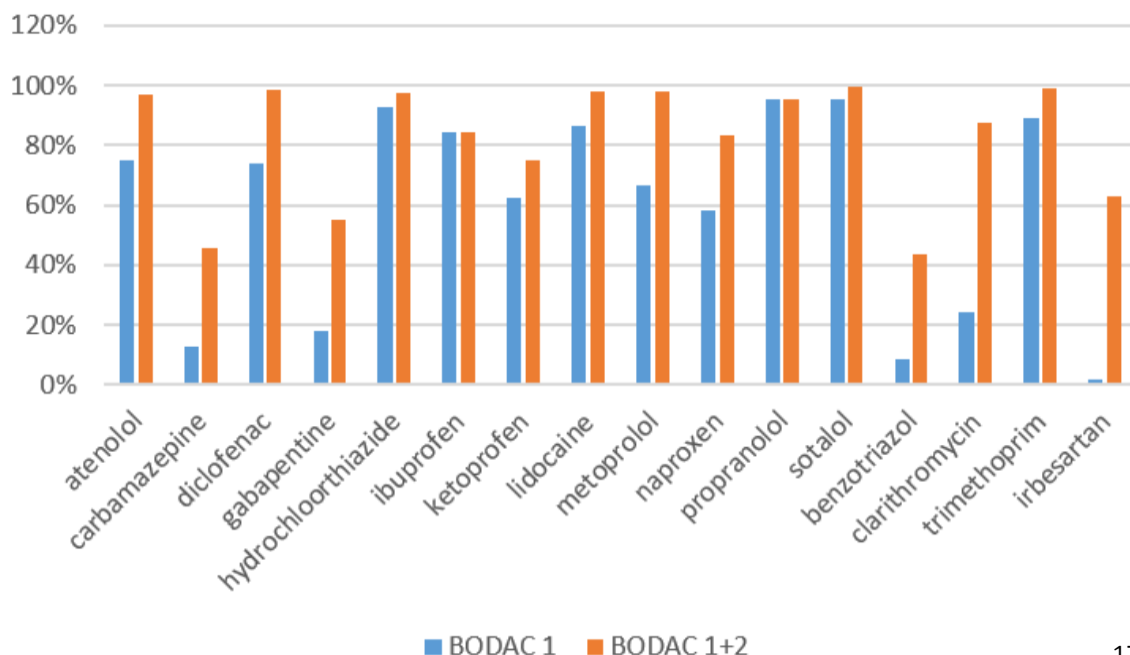
Het project BODAC maakt onderdeel uit van het IPMV. De haalbaarheidsstudie is afgerond en de pilot wordt ingericht voor het uitvoeren van het onderzoek. Hier wordt volstaan met enkele relevante conclusies van de behaalde resultaten en wordt de relatie gelegd met het onderhavige onderzoek.

Sinds 2010 produceert Nieuwater ultrapuur water uit effluent van RWZI Emmen, met een maximale capaciteit van 8.200 m³/dag. Dit ultrapuur water wordt geleverd aan de NAM in Schoonebeek, voor de winning van aardolie (Veenendaal, G., Kuiper, D., Dost, S., van der Maas, M., 2019). Om het gebruik van chemicaliën te minimaliseren is er gekozen voor filtratietechnieken. Effluent wordt eerst gevoed aan een UF, om zwevende bestanddelen uit het effluent te filteren. Waarna het effluent gevoed wordt aan de BODAC, om de biofouling op de RO-membranen te verminderen door het verwijderen van organisch materiaal. BODAC bestaat uit twee filtratiestappen, met een empty bed contact time van respectievelijk 16 minuten (stap 1) en 32 minuten (stap 2). Aan het influent van beide stappen wordt zuurstof gedoseerd. Tot slot wordt het BODAC effluent gevoed aan een RO-installatie (Veenendaal, G., Kuiper, D., Dost, S., van der Maas, M., 2019).

Het BODAC concept in Emmen blijkt in de praktijk, naast het verwijderen van DOC, ook medicijnresten vergaand te verwijderen. De verwijdering van medicijnresten, na negen jaar, is in het eerste BODAC-filter (contacttijd 16 minuten) voor veel geneesmiddelen meer dan 70%. Na de tweede BODAC-filtratie wordt vergaande verwijdering (>90%) bereikt voor diclofenac, hydrochloorthiazide, metoprolol, lidocaïne, propranolol, sotalol, trimethoprim en claritromycine. De verwijdering van carbamazepine, gabapentine, benzotriazol en irbesartan (40 – 70%) blijft daarbij achter (van der Maas, P. Veenendaal, G., Nonnenkens, J., Brink, H., de Vogel, D., 2020)

Na negen jaar en de doorzet van 200.000 bed volumes is het filter nog steeds in staat organische stof en medicijnresten te verwijderen. Regeneratie van de kool heeft niet plaatsgevonden. Dit is een sterke aanwijzing dat sprake is van biologische activiteit in het BAC-filter (van der Maas, P. Veenendaal, G., Nonnenkens, J., Brink, H., de Vogel, D., 2020).

FIGURE 3.1 RWZI EMMEN, PROCENTUELE VERWIJDERING VAN GENEESMIDDELEN MET BODAC, GEMIDDELDEN VAN TWEE MEETRONDES, DECEMBER 2018. ORANJE: TOTALE VERWIJDERING (EERSTE EN TWEEDE FILTER), BLAUW: VERWIJDERING IN EERSTE BODAC FILTER (VAN DER MAAS, P. VEENENDAAL, G., NONNENKENS, J., BRINK, H., DE VOGEL, D., 2020)



Het IPMV onderzoek, dat gepland is op RWZI Emmen richt zich op een eenvoudiger procesopzet, zodat de economische haalbaarheid gunstiger wordt voor de toepassing voor de verwijdering van microverontreinigingen:

- Enkelvoudige GAK filtratie (in plaats serie-filtratie) op basis van neerwaarts doorstroomde vastbed filtratie met periodieke terugspoeling.
- Eenvoudiger voorfiltratie (effluentbehandeling door bijvoorbeeld trommelzeving).
- Handhaven van de inbreng van zuivere zuurstof voor het creëren van aerobe condities voor biologische groei in de GAK filtratie.

Ten opzichte van deze procesopzet zijn de verschillen met de door ons beoogde procesopzet de volgende:

- Enkelvoudige GAK filtratie op basis van continufiltratie met in-situ reiniging van het filtermedium in functie van de stofophoping.
- Geen voorfiltratie (effluentbehandeling uit nabezinking)
- Beluchting in het filterbed door inbreng van fijne luchtbelletjes, die door het bed migreren, voor de biologische groei.
- Combinatie van P-verwijdering en verwijdering van microverontreinigingen, door inline coagulant dosering.

3.6 INTERNATIONALE GAK REFERENTIES IN CONTINU FILTERS

3.6.1 KA WEIBENBURG - DUITSLAND

Op de RWZI van WeiBenburg is een full-scale ozon installatie gevolgd door een parallel opgestelde filtratietechniek van zandfiltratie en GAK filtratie, in oktober 2017 gestart. Gedurende de tien maanden dat de installatie in bedrijf was, zijn de prestatie van verschillende parameters en procesfuncties in kaart gebracht. Waaronder biologische activiteit en standtijd van actief kool. Bij in bedrijfname werd een gemiddelde EBCT van 27 minuten gehanteerd (minimaal 14 minuten) (Rödel, S., Prof. Günhert, W., Christ, O., Miller, E., Schatz, R., Zech, T., Bleisteiner, S., Sengl, M., Eßlinger, M., Rehbein, V., Steinle, E., 2017). Microverontreiniging concentraties zijn bepaald, om het verwijderingsrendement te bepalen. De combinatie ozon-GAK leidt tot verwijderingsrendementen tot 95% voor twaalf geselecteerde microverontreinigingen (Rödel, S., Prof. Günhert, W., Christ, O., Miller, E., Schatz, R., Zech, T., Bleisteiner, S., Sengl, M., Eßlinger, M., Rehbein, V., Steinle, E., 2017).

Alhoewel deze referentie voor ons onderzoek minder relevant, vanwege de voorgeschakelde ozonbehandeling (Rattier, M., Reungoat, J., Gernjak, W., Keller, J., 2012), is in de set-up met ozon en biologische actief koolfiltratie aangetoond dat lange looptijden werden bereikt (tot 55.000 BV in het onderzoek), én een vergaande biologische afbraak van organische stof. Dit wordt deels toegeschreven aan de beter afbreekbare componenten na ozonbehandeling, maar ook vanwege de overwegend aerobe condities in de koolkolom ((LfU), 2021).

3.6.2 ZKA RIETBERG - DUITSLAND

Eind 2014 is een nageschakelde continue zandfiltratie omgebouwd tot een full-scale GAK continue filterinstallatie, zie figuur 3.6.2.1. Hiervoor zijn de internals vervangen, maar is de basisfunctionaliteit van de filtratie gehandhaafd. Deze full-scale installatie bestaat uit twee straten met elk 30 m² filteroppervlak en 3,5 meter bed hoogte (F1 en F2). Deze installatie wordt gevoed vanuit de biologische zuivering. De EBCT, waarop de filters worden bedreven is

circa 30 minuten, er is naast de inbreng van lucht voor de GAK circulatie geen actieve beluchting in het filterbed toegepast (Ingenieursgesellschaft Knollmann, 2019).

De installatie is vanaf 1 januari 2015 in bedrijf genomen. Gedurende meerdere jaren zijn analyses uitgevoerd om de verwijderingsrendementen voor medicijnresten vast te stellen. Daarbij is ook gekeken naar de impact van de stand-tijd op de rendementen en zijn kortstondige testen uitgevoerd met coagulant-dosering voor simultane fosfaat verwijdering.

FIGURE 3.6.2.1 ZKA RIETBERG NAGESCHAKELDE GAK FILTERINSTALLATIE VOOR VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN



In het najaar van 2021 zijn de laatste resultaten gerapporteerd en openbaar gemaakt van de bemonsteringscampagnes, die zijn uitgevoerd op de rwzi in de periode 2017 - 2019. De verwijderingsresultaten voor diverse microverontreinigingen zijn samengevat in bijlage 1 (Ingenieursgesellschaft, 2019). Alle metingen zijn uitgevoerd met in acht name van de verblijftijd in de zuivering: monsternamen vond plaats op: T = 0: invoer RWZI; T = 28 uur: toevoer GAK F1 en F2 en T = 29 uur: filtraat GAK F1 en F2.

De operationele condities van de filterinstallatie tijdens de looptijd zijn in tabel 3.6.2.1 samengevat. Er is onderscheid gemaakt in de standtijd van de kool in beide filters. Filter 1 is geregenereerd in november 2017, na een looptijd van 34 maanden. Filter 2 is in maart 2019 voor het eerst geregenereerd, na een looptijd van 50 maanden.

TABEL 3.6.2.1 OPERATIONELE CONDITIES GAK FILTERINSTALLATIE ZKA RIETBERG

Parameter	Waarde	Eenheid
Aantal eenheden	2,0	
Stramien	2,5	m
Filteropp/eenheid (bruto)	37,5	m ²
Filteropp/eenheid (netto)	30,0	m ²
bedhoogte	3,5	m
GAK volume/eenheid	125,0	m ³
Totale GAK volume	250,0	m ³
DWA debiet naar GAK	360,0	m ³ /h
DWA dagdebiet	5.460,0	m ³ /dag
Behandelde DWA over GAK	81	%
Jaardebiet behandeld met GAK	1.614,249	m ³ /j
Eerste vulling GAK F1	1-1-2015	
Eerste vulling GAK F2	1-1-2015	
Tweede vulling GAK F1	15-11-2017	Regeneratie
Tweede vulling GAK F2	15-3-2019	Regeneratie

In de filterinstallatie op ZKA Rietberg is géén sprake van een actieve beluchting van het filterbed. Het effluent (voeding GAK filters) bevat slechts 4 – 7 mg/l zuurstof. Dat betekent dat de groei van biomassa op het filtermateriaal slechts in beperkte mate kan plaatsvinden. Hierdoor zijn er geen ideale condities voor simultane adsorptie en biologische afbraak van microverontreinigingen.

Toch laten de resultaten een aanwijzing zien voor biologische activiteit, zie tabel 3.6.2.2. In de tabel is voor 6 gemeten gidsstoffen het verwijderingsrendement bepaald in functie van de standtijd van het granulair actief kool, gebaseerd op de resultaten zoals samengevat in bijlage 1. Voor sommige gidsstoffen blijft het verwijderingsrendement hoog gedurende de looptijd, terwijl de verwachting is dat de verzadigingsgraad voor kooladsorptie wordt bereikt. Filter 2 geeft hetzelfde beeld. In beide gevallen is de gemiddelde EBCT van 30 minuten aangehouden.

Twee factoren zullen de biologische afbraak bevorderen, die nu niet zijn doorgevoerd in de installatie op ZKA Rietberg:

- Actieve beluchting van het filterbed, zodat over de volledige bedhoogte een zuurstofconcentratie van tenminste 6 mg/l aanwezig is.
- De implementatie van een regeling van de medium circulatie op basis van de weerstandsoopbouw over het filter, zodat de biologische groei maximale potentie heeft.
- Een aanpassing van de airlift en wasser configuratie, waarmee de biomassa aanhechting op de kool zoveel mogelijk gehandhaafd blijft.

De ontwerpgrondslagen, die zijn gebruikt voor de filterinstallatie van Rietberg, lijken daarmee geschikt als basis voor het ontwerp van de biologische geactiveerde continue GAK filtratie: filtratiesnelheden in de orde van 5 – 8 m/h en een EBCT van circa 30 minuten.

TABEL 3.6.2.2 VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN IN CONTINUE GAK-FILTER F1 OP ZKA RIETBERG (D), (WAARDES AANGEGEVEN IN µG/L) IN FUNCTIE VAN DE GAK STANDTIJD

Standtijd GAK (jaren)	0,33	0,49	0,66	0,99	1,15	1,31
Stof	F1 eff (%)	F1 eff (%)	F1 eff (%)	F1 eff (%)	F1 eff (%)	F1 eff (%)
Carbamazepin	91,3	65,5	98,0	87,9	69,7	74,4
Clarithromycin	46,3	35,9	69,4	30,8	-11,1	33,3
Diclofenac	74,7	85,3	90,3	59,5	38,7	37,8
Metoprolol	97,3	98,6	98,2	94,2	84,0	90,6
Sotalol	91,3	92,0	85,7	92,0	91,3	92,6
Benzotriazol	98,9	98,6	97,9	96,4	93,8	94,7

Naast de verwijdering van microverontreinigingen is op de filterinstallatie ook een test uitgevoerd met de dosering van coagulant in de toevoer naar de GAK filters ten behoeve van de aanvullende P-verwijdering. Daarbij is gedurende twee weken een coagulant gedoseerd in de toevoer naar de filters teneinde verdergaand opgelost P te verwijderen. P concentraties konden daarmee effectief verlaagd worden van 0.7 – 0.9 mg/l totaal-P naar waarden < 0.2 mg/l totaal-P. De dosering had geen noemenswaardig effect op de bedrijfswijze van het filter. De extra stofopbouw was via de interne spoelcyclus goed af te voeren in de spoelstroom.

3.6.3 WWTW STENGARDEN - ZWEDEN

Het onderzoek op de full scale installatie van de Kommune Simrishamn (Zweden, rwzi Stengarden, figuur 3.6.3.1) is uitgevoerd door IVL Swedish Environmental Research Institute in samenwerking met Simrishamn Municipality. Het onderzoeksproject is onlangs afgesloten.

Bij dit project zijn wij zijdelings betrokken, vanwege de implementatie van ons monitoringsinstrument Sand-Cycle (www.sand-cycle.com) via onze partner Nordic Water. Voorts waren hierbij betrokken Uppsala University, Sweden's Agricultural University, KTH, Lund University and Rise.

De resultaten van dit onderzoek zijn onlangs beschikbaar geworden, maar zijn minder goed bruikbaar voor ons onderzoek, omdat slechts een paar maanden is gedraaid op een GAK continu-filter en bovendien de toegepaste EBCT slechts 15 minuten bedroeg. Desalniettemin is een aantal bevindingen noemenswaardig:

- De inzet van de operationele meting met Sand-Cycle technologie leert dat de installatie goed beheerst kon worden.
- De verwijderingsrendementen voor de onderzochte microverontreinigingen zijn hoog, gedurende de beperkte meetperiode: > 85 – 90%.
- De impact van de granulair actief kool op de materiaalkeuze van de filtertanks is een aandachtspunt. Bij de operationele installatie was sprake van corrosievorming op de lasnaden van de filtertank, met als gevolg lekkage van de filtertanks. De keuze voor RVS 316 in plaats van RVS 304 voor tank en internals is daarbij de juiste beheersmaatregel.

3.6.4 WWTW BADEN-BADEN, DUITSLAND

Op deze rwzi wordt een pilot onderzoek gedaan met een continu filter van 0,7 m² en 2 m bedhoogte. De resultaten daarvan zijn onlangs gerapporteerd (Buchwald, 2021). Tijdens dit onderzoek van circa 6 maanden is ingezet op simultane P verwijdering door coagulant dosering op de toevoer naar het filter. De resultaten laten zien dat bij molaire verhoudingen van 2 – 5 mol Fe/mol o-P een vergaande verwijdering van totaal P plaatsvindt, zonder dat er verstoringen optreden in de operationele condities, zoals inhomogene circulatie van het koolmedium. Effluent concentraties voor totaal-P van < 0,15 mg/l zijn daarbij vastgesteld.

3.7 VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN

Binnen het programma zuivering medicijnresten, is door STOWA een lijst van 11 gidsstoffen vastgesteld (Evaluatie gidsstoffen, versie 2, 9 juli 2021). Deze lijst is aangevuld met 5 monitoringsstoffen. Dit zijn stoffen waarvan het effect op het oppervlaktewater of de aanwezigheid in het effluent bij verschillende zuiveringen is vastgesteld. Toetsing van de verwijderingsrendementen van de pilot op basis van 7 van de 11 gidsstoffen vindt plaats om een objectief beeld te krijgen van de prestaties. In tabel 3.7.1 zijn deze gidsstoffen en monitoringsstoffen weergegeven.

TABEL 3.7.1 GIDSSTOFFEN EN MONITORINGSTOFFEN CONFORM EVALUATIE GIDSSTOFFEN, VERSIE 2, 9 JULI 2021

Stof	Doel gidsstof (op basis van deze evaluatie)
Som 4-,5-methylbenzotriazol	<i>gidsstof</i>
Azithromycine	monitoring
Benzotriazol	<i>gidsstof</i>
Candesartan	monitoring
Carbamazepine	<i>gidsstof</i>
Clarithromycine	monitoring
Diclofenac	<i>gidsstof</i>
Gabapentine	<i>gidsstof</i>
Hydrochlorothiazide	<i>gidsstof</i>
Irbesartan	<i>gidsstof</i>
Metoprolol	<i>gidsstof</i>
Propranolol	monitoring
Sotalol	<i>gidsstof</i>
Sulfamethoxazol	monitoring
Trimethoprim	<i>gidsstof</i>
Venlafaxine	<i>gidsstof</i>

De verzamelde resultaten uit de diverse proef- en praktijkinstallaties, zoals gerapporteerd in deze haalbaarheidsstudie, zijn – voor zover mogelijk - samengevat in tabel 3.7.2, gerelateerd aan de gids- en monitoringsstoffen uit tabel 3.7.1. De verwijzing naar het betreffende onderzoek/rapport is in de eerste kolom van de tabel gegeven. Vervolgens zijn de onderzoeksresultaten voor GAK filtratie op hoofdlijnen gekarakteriseerd door het behandelde bed volume en de gehanteerde empty bed contacttijd (EBCT). Uiteraard is dit een sterke versimpeling van de werkelijkheid, maar levert het wel een beeld op van de gerealiseerde verwijderingsrendementen van de diverse gids- en monitoringsstoffen.

Hieruit leiden we volgende af:

- Voor sommige stoffen zijn relatief weinig of geen resultaten beschikbaar: dit betreft de stoffen som4,5-methylbenzotriazol, azithromycine en candesartan. Voor de stof sulfamethoxazol worden in de onderzochte bio-GAK wisselende verwijderingsresultaten gerapporteerd.
- De contacttijd (EBCT) heeft invloed op het verwijderingsrendement van de gidsstoffen. Een langere contacttijd heeft een positieve invloed. Een gemiddelde contacttijd (gedefinieerd als de empty bed contacttijd bij het gemiddelde debiet over de installatie) van 30 minuten is een goed uitgangspunt voor het realiseren van hoge verwijderingsrendementen én de beoogde biologische groei in de koolkolom.
- Een groot aantal gerapporteerde onderzoeken zijn niet gericht geweest op het stimuleren van biologische activiteit in het de GAK kolom. Daar waar een vermoeden bestaat van biologische activiteit, is dit het gevolg van de procesomstandigheden, waarbij sprake is van aerobe condities in de reactor.

TABEL 3.1 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE GIDSSTOFFEN IN VERSCHILLENDE STUDIES

Naam artikel/referentie	Voorbehandeling	EBCT [min]	Bed volume	Schaal	Verwijderingsrendementen gidsstoffen (over nageschakelde techniek)																
					Som 4-5-methylbenzotriazol	Azithromycine	Benzotriazol	Candesartan	Carbamazepine	Clarithromycine	Diclofenac	Gabapentine	Hydrochloorthiazide	Irbesartan	Metoprolol	Propranolol	Sotalol	Sulfamethoxazol	Trimethoprim	Venlafaxine	
					gids	monitoring	gids	monitoring	gids	monitoring	gids	gids	gids	gids	gids	monitoring	gids	monitoring	gids	gids	
Micropollutant removal with saturated biological activated carbon (BAC) in ozonation-BAC process (H.K. Woo, 1997)	Ozon	50														83					
Ultrafiltration/ granulated active carbon-biofilter: Efficient removal of a broad range of micropollutants (Baresel, 2021)	UF	13		Full-scale				80-85		>95		>95		95							
Removal of micropollutants in WWTP effluent by biological assisted membrane carbon filtration (Weemaes, 2011)	voeding is secundair effluent	13	13.800	Pilot				35	15	60-65								0	55		
Advanced biological activated carbon filter for removing pharmaceutically active compounds from treated wastewater, (Bardella, 2018)	Voeding secundair effluent	50	9.200	Pilot				86				93		90		83		73	90		
Investigating the role of adsorption and biodegradation in the removal of organic micropollutants during biological activated carbon filtration of treated wastewater (Rattier, 2012)	Voeding is secundaire effluent	60	35.000	lab				50-55		70-75		75		70-75				25		75-80	
Biodegradation and adsorption of micropollutants by biological activated carbon from a drinking water production plant (Piai, 2020)	Drinkwater behandeling		100.000	Lab				83		75											
The performance of biological activated carbon in removing pharmaceuticals in drinking water treatment plant (Nugroho, 2010)	Drinkwater behandeling	120		pilot				>95				>95						>90	>90		
ZKA Rietberg (Knollmann, 2019)	Vlokkingsfiltratie	30	66.000	Full-scale				92						92		64		0			
Wwtp Stengarden (Baresel, 2020)	Microfiltratie			Full-scale				>83	-8	44		94		91	93			41	>88		
								-29	39	-329		64		77	59			45	>92		
Biologische actiefkoolfiltratie met zuurstofdosing: veel belovende techniek voor verwijdering geneesmiddelen (Van der Maas, 2020)	UF	16+32		Full-scale				40-45		40-45	>90	>90	50-55	>90	60-65	>90	>90			>90	

3.8 CONCLUSIES

Na inventarisatie van de resultaten van proef- en praktijkinstallaties met de inzet van nageschakelde GAK filtratie is inzicht verkregen in de zuiveringsprestaties voor de verwijdering van microverontreinigingen. De biologische component in de GAK filtratie is tot op heden minder goed onderzocht voor continufiltratie. Echter de referenties met vast-bed GAK filtratie laten zien dat het stimuleren van de biologie in de GAK reactor een significante impact heeft op de standtijd van de kool bij handhaving van de verwijderingsrendementen voor microverontreinigingen. Derhalve is het uitvoeren van een pilot met biologisch geactiveerde GAK continufiltratie zinvol en kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- In de huidige praktijkinstallaties, waarbij continufiltratie wordt ingezet voor GAK-toepassingen is het actief toevoeren van lucht in het filterbed niet toegepast. Daarmee worden de zuurstofrijke condities van biologische afbraakprocessen niet of in geringe mate gerealiseerd. Door de inzet van het beluchtingsnet – zoals toegepast voor biologische nitrificatie in een continufilter - wordt er een gecontroleerde inbreng van zuurstof in het filter gerealiseerd. Projectie van deze vorm van beluchting in een GAK continufilter laat zien dat de specifieke organische stofbelasting, uitgedrukt in g DOC/(g VLSS.d) voldoende laag is om een positieve bijdrage te leveren aan de langdurige verwijdering van microverontreinigingen. Een slibverblijftijd van tenminste 10 dagen zal er voorts voor zorgdragen dat specifieke biomassa kan worden vastgehouden, die bijdraagt aan de afbraakmechanismen van specifieke microverontreinigingen.
- Belangrijker dan de toegepaste filtratiesnelheden van de aangehaalde praktijkinstallaties zijn de contacttijden in het medium, uitgedrukt in empty-bed-contact-time (EBCT). Voor het stimuleren van de biologische groei (en dus afbraak van geadsorbeerde stoffen) is een voldoende lange EBCT nodig, ofwel door middel van een voldoende lage filtratiesnelheid, ofwel door middel van een hogere bed hoogte. De in de praktijkinstallaties gehanteerde filtratiesnelheden zijn representatief voor onze aannames. Het ontwerp van de biologische actieve continue GAK filtratie zal derhalve worden uitgelegd op een EBCT van tenminste 30 minuten onder de gemiddelde belasting.
- De geïnventariseerde continue filterinstallaties laten een verwijderingsrendement zien voor de gids- en monitoringsstoffen in de orde van 75%. Met de voorgestelde aanpassingen (voldoende hoge EBCT, bed hoogte, aerobe condities en biomassagroei) is het aanneemelijk dat de verwijderingsdoelstelling in het kader van IPMV gehaald wordt. De vast bed referenties, waarbij de impact van de biologie is aangetoond onderstrepen dit.
- Er zijn enkele testen uitgevoerd op continufilter installaties in Duitsland (Rietberg, Baden-Baden) waarbij in de toevoer met succes coagulant is gedoseerd voor simultane P-verwijdering in het GAK filterbed. Die combinatie maakt ook onderdeel uit van de voorgestelde pilot.
- De inzet van continufiltratie als basis voor de biologische GAK-filtratie kan worden gecombineerd met de toepassing van een geavanceerde filterregeling. Daarmee wordt het speelregime volledig gekoppeld aan de stofbelasting en de biologische groei. Dit is tot op heden niet onderdeel geweest van operationele internationale installaties. Verwacht wordt dat hiermee de positieve bijdrage van de biologie in het filter wordt versterkt.
- De combinatie van een ontwerp EBCT van tenminste 30 minuten bij het gemiddelde ontwerpdebiet, de introductie van zuurstof in de reactor voor biologische groei wordt geacht voldoende te zijn om een standtijd van de GAK van tenminste 40.000 BV te realiseren voordat de verwijderingsrendementen van 7 van de 11 gidsstoffen onder de drempelwaarde van 80% komt. Met die uitgangspunten is het ontwerp van de biologisch geactiveerde continue GAK filtratie verder uitgewerkt en wordt een standtijd van 30 maanden nagestreefd.

4

BIOLOGISCHE EFFECT EN ECOTOXICITEIT

4.1 INLEIDING

Eén van de doelen van het evalueren van kansrijke zuiveringstechnieken voor de verwijdering van microverontreinigingen is het verkrijgen van inzicht in de mate waarin die technieken een bijdrage leveren aan het verbeteren van de kwaliteit van het te lozen water. Die verbetering kan worden beoordeeld op basis van chemische analyses én biologische effectmetingen. Voor het uitvoeren van de biologische effectmonitoring is een handreiking opgesteld, zodat de resultaten ervan een betrouwbare vergelijking van de verschillende demonstratieprojecten mogelijk maakt (Ecofide, 2020).

De onderzoeksopzet voor de biologische effectmonitoring is primair gericht op de impact van de vergaande aanvullende zuiveringstechniek. Dat wil zeggen dat het effect wordt bepaald ten opzichte van het reguliere RWZI effluent, dat niet met de vergaande zuiveringstechniek is behandeld. Het effect van de behandeling op de mogelijke ecotoxicologische effecten op het oppervlakte water hangt in belangrijke mate af van de gemeten concentratie van de stof en de schade die de stof kan aanbrengen aan het waterleven (Posthuma, L., de Zwart, D., Osté, L., van der Oost, R., Postma, J., 2016). Met behulp van vloeistofchromatografie en massaspectrometrie, kunnen de concentraties van microverontreinigingen in zowel de voeding als het filtraat bepaald worden. Echter naast de geanalyseerde stoffen kunnen nog duizenden andere stoffen aanwezig zijn, die mogelijk ook schadelijk zijn (Posthuma, L., de Zwart, D., Osté, L., van der Oost, R., Postma, J., 2016). Daarom geeft deze studie geen volledig beeld van de mogelijke risico's voor het waterleven.

In de voor oppervlaktewater ontwikkelde methodiek worden in totaal 15 verschillende bio-assays toegepast. Voor het onderzoek in dit programma wordt gewerkt met een selectie van deze bio-assays (Stowa, 2020) op grond van de volgende criteria:

- de bio-assays moeten een meetbare respons geven;
- er moet een substantiële afname over de techniek kunnen worden vastgesteld;
- de bio-assay moet relevant zijn voor het te verwachte ecologische effect in het ontvangende oppervlaktewater;
- de bio-assay moet goed en economisch verantwoord toepasbaar zijn;
- de set bio-assays moet elkaar versterken en aanvullen.

Door middel van een literatuurstudie is geprobeerd om het biologische effect van een nageschakelde continu biologisch geactiveerd GAK-filter inzichtelijk te maken. In de volgende paragrafen wordt hieraan aandacht besteed.

4.2 BIOMAC (PROJECT NEPTUNE, AQUAFIN)

In het onderzoek FP6 project Neptune, is een combinatie van een biologisch geactiveerd koolfilter (stilstaand bed) gevolgd door een ultrafiltratie (bioMAC) getest, voor de verwijdering van

microverontreinigingen, pathogenen en ecotoxiciteit. Middels Yeast estrogen screen (YES) en Yeast androgen screen (YAS), zijn de ecotoxicologische effecten in kaart gebracht. Zie onderstaande tabel 4.2.1 voor de resultaten: (Weemaes, M., Fink, G., Lachmund, C., Magdeburg, A., Stalter, D., Thoeye, C., Gueldre, G., van de Steen, B., 2011). Dit onderzoek liet zien dat de BioMAC installatie (een combinatie van bio-GAK filtratie en UF) een verlaging van de ecotoxiciteit bewerkstelligt.

TABEL 4.2.1 ONDERZOEKSRISULTATEN ECOTOXICITEIT BIO-GAK FILTRATIE IN BIOMAC STUDIE

Toxicologisch effect	Definitie	Voeding BioMAC	Effluent BioMAC	Eenheid
Estrogenisch effect		0,35-0,90	0,05-0,30	Ng/l EEQ (estradiol equivalentie)
Anti-estrogenisch effect	Estrogeen blokkers	Geen significante verlaging		
Androgenisch effect		Geen significante verlaging		
Anti-androgenisch effect	Testosteron blokkers	190-350	50-150	Ng/l FEQ (flutamide equivalentie)

4.3 AUSTRALISCH ONDERZOEK ECOTOXICITEIT NABEHANDELING RWZI EFFLUENT

In dit onderzoek (Pipe-Martin, C., Reungoat, J., Keller, J., 2008) is de verlaging van de ecotoxiciteit door inzet van nageschakelde bio-GAK filtratie eveneens aangetoond. De resultaten voor drie verschillende gemeten parameters voor en na bio-GAK filtratie zijn samengevat in tabel 4.3.1. De volgende parameters zijn daarvoor gebruikt:

- Bacteriële acute toxiciteit: de test geeft de toxische potentie aan van een breed spectrum van verontreinigingen; om de monsters te vergelijken, is er gebruik gemaakt van IC_{50} waarden. Dit wordt weergegeven in volume van het originele monster dat een remming veroorzaakt van bioluminescentie. Monsters met een lager volume geven een hogere mate van remming, zijn dus “giftiger”.
- Estrogenische activiteit: E-screen assay; het effect wordt uitdrukt in relatieve proliferatieve effect (RPE). Bij $RPE > 0,8$ is, is sprake van volledig agonistisch gedrag waargenomen, bij $RPE < 0,5$ wordt er geen agonistisch gedrag waargenomen.
-

TABEL 4.3.1 ONDERZOEKSRISULTATEN ECOTOXICITEIT BIO-GAK FILTRATIE IN AUSTRALISCHE STUDIE¹

Monstername punt	Proces schema	Voeding IC_{50}	Effluent IC_{50}	Voeding EEQ ng/l	Effluent EEQ ng/l	Voeding RPE	Effluent RPE
Blanco meting		8,85		nd		0,05	
Effluent BAK 1	Effluent (S4)	1,48	5,33 ^b	9,75	BDL	1,03	0,12

^b geen significant verschil ten opzichte van de blanco meting

¹ (Pipe-Martin, C., Reungoat, J., Keller, J., 2008)

4.4 PROJECT BODAC

De resultaten van de LC-MS screenings, uitgevoerd in het BODAC project, waarbij zowel de eerste als tweede GAK filtratietrap is onderzocht (zie tabel 13, pagina 25 van de haalbaarheidsstudie) laten zien dat sprake is van een substantiële afname van de ecotoxicologische druk van het rwzi effluent op oppervlaktewater. Dit is weliswaar een moment opname, en geldt voor de vast bed configuratie van de BODAC opstelling. Desalniettemin lijkt het aannemelijk dat de voorgestelde procesopzet met biologisch geactiveerde GAK continufiltratie ook een verlaging van de ecotoxicologische druk bewerkstelligd. In het pilot onderzoek moet dit worden bevestigd.

5

DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN

5.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk beschrijft de dimensioneringsgrondslagen van de voorgestelde technologie. Hierbij wordt ingegaan op de relevante procesonderdelen. De dimensioneringsgrondslagen zijn gerelateerd aan en/of gebaseerd op de informatie, die is verzameld in de vorige hoofdstukken.

5.2 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN

De dimensioneringsgrondslagen zijn gebaseerd op de bevindingen in de voorgaande hoofdstukken en zijn vastgesteld en samengevat in onderstaande tabel. De inbreng van proceslucht voor het creëren van de aerobe condities in het filter vindt plaats ter hoogte van de invoer van het te behandelen effluent. De gasbelasting – om aerobe condities te kunnen realiseren over de volledige bed hoogte – is berekend op maximaal $2,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Bij deze waarde wordt geen verstoring van het filtermedium verwacht zodat de reactor als een gepakte propstroom kolom kan worden bedreven.

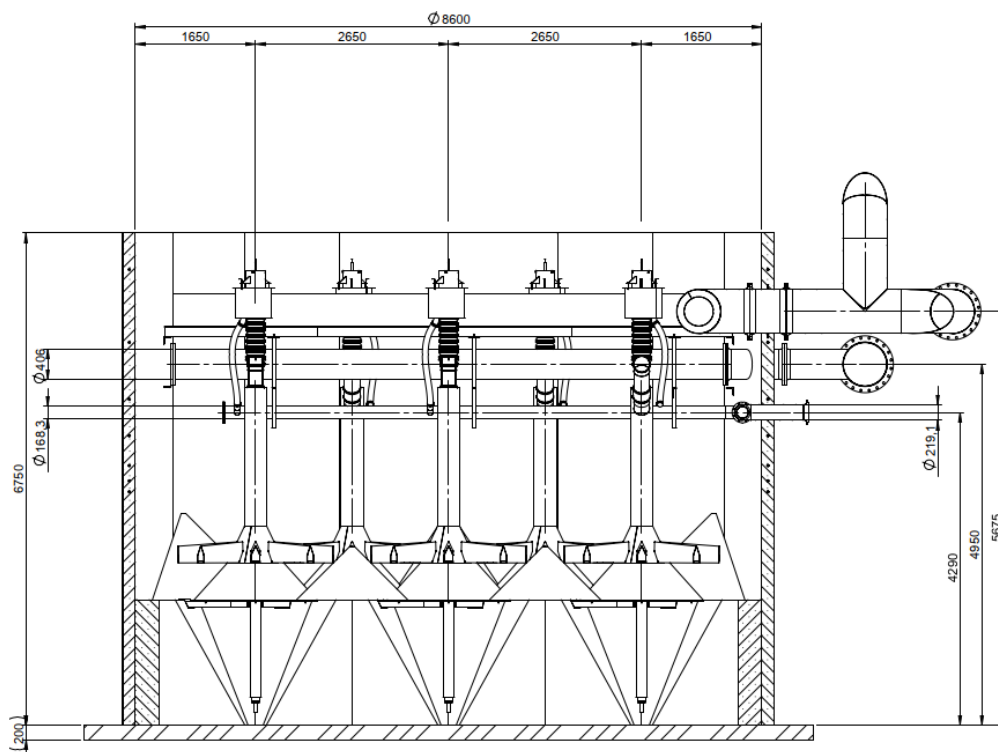
TABEL 5.2.1 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN BC-GAK CONTINU-FILTRATIE

Ontwerpparameter	Waarde	Eenheid
Ontwerp uurdebiet	1.040	m ³ /h
Behandeld jaardebiet	5.365.500	m ³ /jaar
Gemiddelde debiet	613	m ³ /h
EBCT bij max uurdebiet	19,50	minuten
EBCT bij gemiddeld debiet	33,11	minuten
Benodigde bedvolume	338	m ³
bedhoogte	3,00	m
benodigde filteroppervlak	113	m ²
filtratiesnelheid ontwerp	9,23	m/h
filtratiesnelheid, gemiddeld debiet	5,44	m/h
Aantal filtereenheden	2	
filteroppervlak/eenheid	56,70	m ²
totale geïnstalleerde filteroppervlak	113,40	m ²
GAK koolsoort	Jacobi Aquasorb	
GAK meshwidth	8 x 18	1,18 - 2,36 mm
GAK dichtheid (na wassing)	450	kg/m ³
GAK specifiek oppervlak	950	m ² /g
Filterbedweerstand (bij 10 graden C)	0,10	m/m bedhoogte
OB stofconcentratie in aanvoer	10,00	mg/l
Stofbelasting door OB in aanvoer	0,05	kg/m ² /h
Molaire ratio coagulant dosering voor P-verwijdering	2,50	mol/mol Me/oP
Additionalle stofbelasting door simultane P-verwijdering	9,03	mg/l
Additionele stofbelasting door coagulant dosering	0,05	kg/m ² /h
Totale stofbelasting inclusief simultane P-verwijdering	0,10	kg/m ² /h

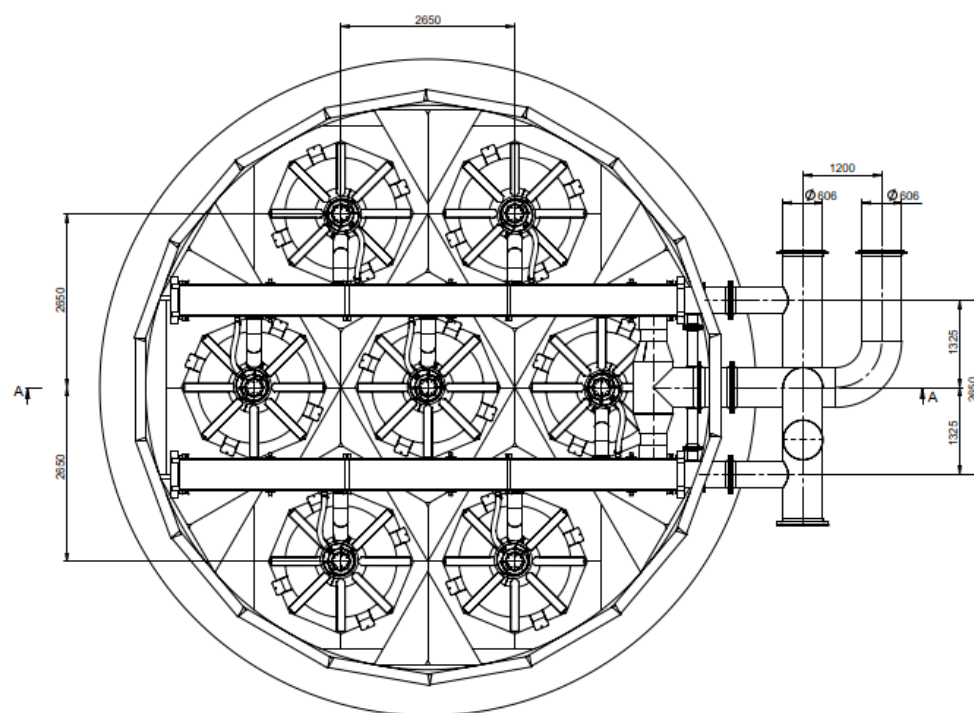
5.3 LAY-OUT BC-GAK CONTINUFILTRATIE

Om een indruk te krijgen van de lay-out van de plant op basis van de gehanteerde ontwerpgrondslagen is een doorsnede en plattegrond weergegeven voor één filterunit in de figuren 5.3.1, 5.3.2 en 5.3.3. In totaal is het ontwerp van de installatie voor 100.000 i.e. gebaseerd op twee identieke units.

FIGUUR 5.3.1 DOORSNEDE BC-GAK CONTINUFILTER INSTALLATIE



FIGUUR 5.3.2 BOVENAANZICHT BC-GAK CONTINUFILTER INSTALLATIE



FIGUUR 5.3.2 3D IMPRESSIE BC-GAK CONTINFILTER



6

KWANTIFICERING EN ONDERBOUWING VAN DE ONTWERPCRITERIA

6.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk worden de gehanteerde ontwerpcriteria onderbouwd, waarbij gerefereerd wordt aan de voorgaande hoofdstukken en de criteria zoals gesteld door STOWA. Hiermee zijn de prestatiekenmerken voor de toetsingscriteria (CO₂ voetafdruk, kosten en verwijderingsrendement) bepaald en de berekeningen uitgevoerd om te komen tot de prestatie-indicatoren voor de voorgestelde zuivering op basis van biologisch geactiveerde GAK continufiltratie. De resultaten zijn samengevat in dit hoofdstuk.

6.2 TE BEHANDELEN HOEVEELHEID AFVALWATER

We zijn uitgegaan van de behandeling van een maximaal debiet van 1.040 m³/h in de nageschakelde zuiveringsinstallatie. Daarmee wordt, conform de richtlijnen 70% van het jaarlijkse watervolume behandeld, ofwel 5,4 miljoen m³ per jaar. Bij een aanvoer hoger dan het genoemde maximale debiet, vindt een bypass plaats om de nageschakelde zuiveringsinstallatie.

6.3 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN GIDSSTOFFEN

De gemiddelde verwijderingsrendementen per gidsstof zijn bepaald aan de hand van het overzicht van referenties van nabehandelinginstallaties op RWZI effluent en samengevat in tabel 6.3.1. Per referentie is het verwijderingsrendement over de nabehandelinginstallatie per gids- en monitoringsstof weergegeven. Voor 7 van de 11 gidsstoffen, met het hoogste verwijderingsrendement is het gemiddelde rendement bepaald en aangegeven: 80,4%. Hierbij is een aantal kanttekeningen op zijn plaats:

- De procescondities zijn voor alle referenties verschillend: EBCT, behandelde bedvolumina, etc. Daar is geen rekening mee gehouden in de rendementsberekening.
- In de haalbaarheidsstudie van BODAC is aanvullend onderzoek gedaan naar de verwijderingsrendementen van stoffen die nu tot de gidsstoffen behoren. Die zijn niet meegenomen in dit overzicht.
- De spreiding in de verwijderingsrendementen per stof is groot voor sommige stoffen, afgaand op de behaalde rendementen in de verschillende onderzoeken per individuele stof.

Ondanks de diverse kanttekeningen bij de tabel is het aannemelijk dat de voorgestelde technologie een gemiddeld verwijderingsrendement kan behalen van 80% op basis van 7 van de 11 gidsstoffen, en daarbij een voldoende lange standtijd van de GAK kan bewerkstelligen.

TABEL 6.3.1 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN BIO-GAK (BEPaald OVER DE NAGESCHAKELDE TECHNIEK)

Naam referentie	Voorbehandeling	EBCT [min]	Bed volumes	Schaal	Verwijderingsrendementen gids- en monitoringsstoffen																	
					Som 4-,5-methylbenzotriazol	Azithromycine	Benzotriazol	Candesartan	Carbamazepine	Clarithromycine	Diclofenac	Gabapentine	Hydrochlorothiazide	Irbesartan	Metoprolol	Propranolol	Sotalol	Sulfamethoxazol	Trimethoprim	Venlafaxine		
					G	M	G	M	G	M	G	G	G	G	M	G	M	G	G			
Ultrafiltration/ granulated active carbon-biofilter: Efficient removal of a broad range of micropollutants	UF op RWZI effluent	13		Full-scale					83		95		95		95							
Removal of micropollutants in WWTP effluent by biological assisted membrane carbon filtration (BioMAC 2010)	UF op RWZI effluent	13	13.800	Pilot					35	15	63						0		55			
Advanced biological activated carbon filter for removing pharmaceutically active compounds from treated wastewater, (BioMAC 2018)	UF op RWZI effluent	50	9.200	Pilot					86				93		90	83		73		90		
Investigating the role of adsorption and biodegradation in the removal of organic micropollutants during biological activated carbon filtration of treated wastewater	RWZI effluent	60	35.000	lab					53		73		75		73			25		78		
KA Rietberg - Duitsland (continu GAK filtratie)	RWZI effluent	30	66.000	Full-scale					92		80	47	67		92		64		0			
BODAC - Emmen (vastbed GAK filtratie)	UF op RWZI effluent	16, 32	> 100.000	Full-scale					43		43	90	90	53	90	63	90	90		90		
					-	-	67,5	-	65,6	50,7	81,2	53,0	88,3	63,0	88,0	86,5	77,0	29,8	83,0	78,0	80,4	% gem

6.4 INZET HULPSTOFFEN/ CHEMICALIËN

Voor de verwijdering van de gidsstoffen in de BC-GAK installatie zijn geen hulpstoffen nodig. Voor de combinatie met P-verwijdering is uiteraard wél een dosering van coagulant nodig, in functie van de concentratie ortho-P in de voeding naar de BC-GAK installatie. Omdat die dosering niet gerelateerd wordt aan de verwijdering van de gidsstoffen is de inzet van hulpstoffen daarvoor niet relevant en worden de chemicaliën, die daarvoor nodig zijn niet meegerekend in het vaststellen van de CO₂ voetafdruk.

6.5 ENERGIEVERBRUIK

Het energieverbruik voor het bedienen van de BC-GAK installatie is gebaseerd op de volgende onderdelen:

- Voedingspompen voor het opvoeren van het te behandelen water;
- Perslucht voor de circulatie en de reiniging van het medium;
- Proceslucht voor de inbreng van zuurstof voor de biologische activiteit in de reactor.

De berekening van het jaarlijkse energieverbruik en de specifieke energieconsumptie per behandelde m³ water is weergegeven in tabel 6.5.1. Het grootste deel van het verbruik is gerelateerd aan het oppompen van het voedingswater.

Periodiek wordt de reactor gespoeld voor de verwijdering van de opbouw van zwevende stof. Hiervoor wordt perslucht gebruikt, die de circulatie en de reiniging van het medium bewerkstelligt. Op basis van de (beperkte) stofbelasting zijn we uitgegaan van een intermitterende spoeling, waarbij gedurende 20 – 30% van de tijd spoeling plaatsvindt. Dit vergt geen extra energieverbruik en het spoelwater komt vrij aan de bovenzijde van de reactor en kan onder vrij verval worden teruggevoerd naar bijvoorbeeld de AT.

TABEL 6.5.1 ENERGIEVERBRUIK VOOR HET BEDRIJVEN VAN DE BC-GAK INSTALLATIE

Ontwerpparameter	Waarde	Eenheid
Opvoerhoogte effluent naar bio-GAK	1,00	bar
Gemiddeld energieverbruik voedingspompfase	0,63	kW
Airlift luchtdebiet (30% start- 70% stop)	0,30	Nm ₃ /m ² /h bij 4 bar(o)
Procesluchtdebiet	1,00	Nm ₃ /m ² /h bij 4 bar(o)
Totaal benodigd luchtdebiet	1,30	Nm ₃ /m ² /h bij 4 bar(o)
Afgenomen vermogen persluchtinstallatie	20,34	kW
Energieverbruik per jaar voor perslucht	178.201	kWh/jaar
Energieverbruik per jaar voor oppompen voedingswater	268.275	kWh/jaar
Totaal energieverbruik per jaar	446.476	kWh/jaar
Totaal specifiek energieverbruik per m ³ behandeld water	0,08	kWh/m ³
Specifiek energieverbruik per m ³ behandeld water, exclusief opvoer van water	0,03	kWh/m ³

6.6 SLIBPRODUCTIE

De slibproductie is een optelsom van de volgende componenten:

- De in het filter afgevangen OB (circa 10 mg/l TSS)
- De opbouw van biomassa door biologische groei in de reactor (5 – 10 mg/l TSS)
- Het uitgevlokte fosfaat door dosering van coagulant (circa 10 mg/l TSS).

Het slib wordt afgevoerd uit de reactor door middel van het spoelwater en onder vrij verval teruggevoerd naar de AT. Op jaarbasis is de slibproductie 140 – 160 ton DS bij gelijktijdige fosfaat verwijdering. Zonder fosfaatverwijdering is de slibproductie circa 95 ton DS per jaar.

6.7 SPOELWATERPRODUCTIE

Op basis van het ontwerp van de reactor is de spoelwaterproductie berekend, met de volgende uitgangspunten:

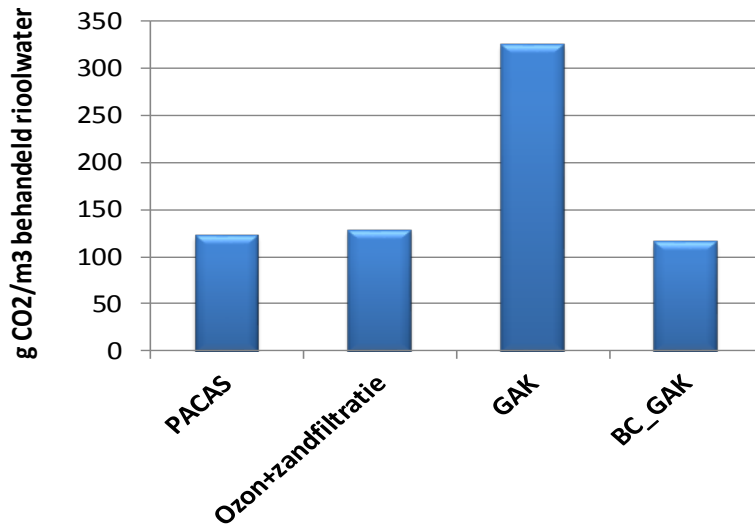
- Intermitterende spoeling van het filtermedium met een start/stop verhouding van 50%/50%
- Nominale spoelwaterproductie tijdens spoeling per filter internal: 2,4 m³/h; totale spoelwaterproductie tijdens spoeling: 35 m³/h

De spoelwaterproductie op jaarbasis wordt hiermee berekend op 150.000 m³/jaar, ofwel 2,8%.

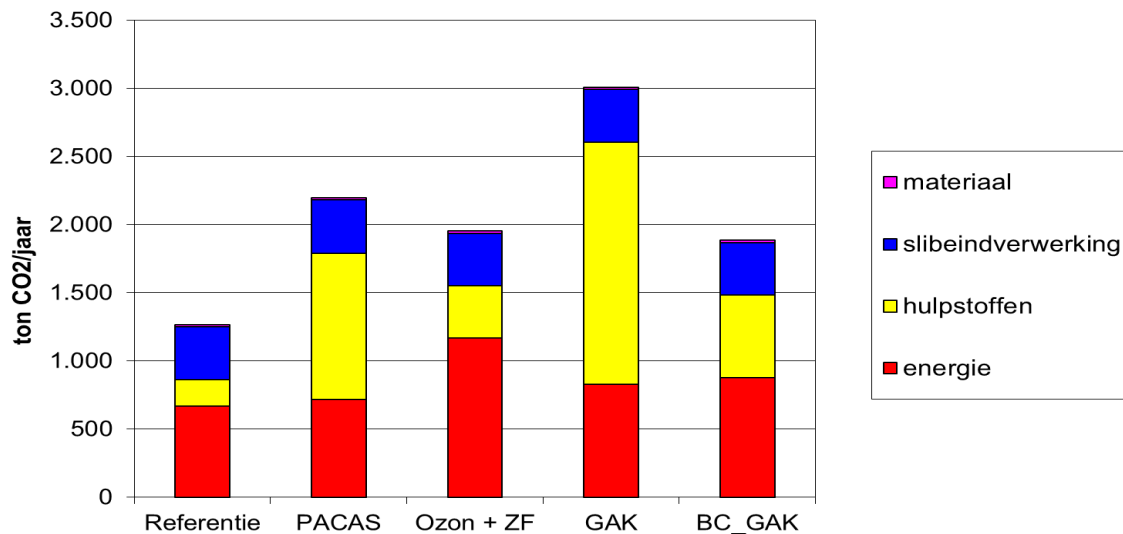
6.8 CO₂-FOOTPRINT CONFORM STOWA MODEL

De CO₂ voetafdruk is berekend met behulp van het STOWA model, waarbij met name de invloed van de standtijd van de kool op de voetafdruk aanzienlijk is. De resultaten zijn weergegeven in de figuren 6.8.1 en 6.8.2 waarbij het laatste staafdiagram betrekking heeft op biologisch geactiveerde continu-filtratie over GAK (BC-GAK). We zijn conservatief uitgegaan van een stand-tijd van de kool van 2,5 jaar en een verlies van kool door regeneratie van 25%, hetgeen aangevuld wordt met verse kool. Dat is een relatief hoog percentage, afgaande op de informatie van de kool leverancier. Met deze uitgangspunten achten we de kans aanzienlijk dat de simultane verwijdering van fosfaat door dosering van coagulant in de toevoer naar de reactor op een bedrijfszekere manier kan plaatsvinden.

De CO₂ voetafdruk is 115 gram CO₂ per m³ behandeld afvalwater. Daarbij is gerekend met een jaarlijks behandeld afvalwatervolume van 5.365.500 m³.

FIGUUR 6.8.1 CO₂-FOOTPRINT CONFORM STOWA MODEL "CO₂ FOOTPRINT RWZI'S MICRO'S 100.000 I.E."

In figuur 6.8.2 is de CO₂-voetafdruk voor de totale RWZI, inclusief de behandeling van micro's weergegeven. De referentie duidt op een RWZI van 100.000 IE zonder aanvullende zuivering voor microverontreinigingen. De CO₂-voetafdruk van BC-GAK is hoger dan de referentie, maar lager dan de alternatieve technieken.

FIGUUR 6.8.2 CO₂-FOOTPRINT TOTALE RWZI INCLUSIEF VERWIJDERING MICRO'S

6.9 TOXICITEIT VAN HET EFFLUENT

In hoofdstuk 4 zijn onderzoeken beschreven, waarbij aandacht is besteed aan de ontwikkeling van de ecotoxiciteit door een nageschakelde GAK filtratie, al dan niet met een biologische afbraakcomponent. In de studies kwam naar voren dat de introductie van (bio)-GAK positief bijdraagt aan het verlagen van de ecotoxiciteit. Daarnaast kan er met BC-GAK een breed scala aan microverontreinigingen verwijderd worden, waardoor het aannemelijk is dat BC-GAK positief bijdraagt aan het verlagen van de ecotoxiciteit van het afvalwater.

6.10 BOUW- EN STICHTINGSKOSTEN

De bouw- en stichtingskosten van de BC-GAK installatie zijn berekend op basis van de ontwerppuntgangpunten van de installatie en de SSK systematiek. De resultaten ervan zijn samengevat in tabel 6.10.1.

TABEL 6.10.1 BOUW- EN STICHTINGSKOSTEN NAGESCHAKELDE BC-GAK INSTALLATIE

omschrijving	hoeveelheid	eenheid	prijs	totaal
Civiele werkzaamheden				
Totaal civiele werkzaamheden, behuizing (specificatie tab componenten)	1	€	€ 645.000	€ 645.000
	0	€	€ -	€ -
	0	€	€ -	€ -
Totaal civiele werkzaamheden				€ 645.000
Werktuigbouwkundige werkzaamheden				
Installatie, compleet, componentenspecificatie tab componenten (WTB)	1	€	€ 1.080.000	€ 1.080.000
	0	€	€ -	€ -
	0	€	€ -	€ -
	0	€	€ -	€ -
Totaal werktuigbouwkundige werkzaamheden				€ 1.080.000
Electrotechnische en besturingsinstallaties				
Totale lokale besturingsinstallatie, componentenspecificatie tab componenten	1	€	€ 518.000	€ 518.000
	0	€	€ -	€ -
	0	€	€ -	€ -
Totaal Electrotechnische en besturingsinstallaties				€ 518.000
Benoemde directe bouwkosten				€ 2.243.000
Onbenoemde (nader te detailleren) bouwkosten	25,0%		€ 2.243.000	€ 560.750
Directe bouwkosten				€ 2.803.750
Initiële kosten	5,0%	€	€ 2.803.750	€ 140.188
Algemene bouwplaatskosten	5,0%	€	€ 2.803.750	€ 140.188
Uitvoeringskosten	5,0%	€	€ 2.803.750	€ 140.188
Algemene kosten	5,0%	€	€ 2.803.750	€ 140.188
Winst en risico	5,0%	€	€ 2.803.750	€ 140.188
Indirecte bouwkosten				€ 700.938
Directe en indirecte bouwkosten				€ 3.504.688
Van bouwkosten naar stichtingskosten	80,0%	€	€ 3.504.688	€ 2.803.750
TOTAAL STICHTINGSKOSTEN				€ 6.308.438

In bijlage 2 is de begroting van de onderliggende kostencomponenten op hoofdnlivo opgenomen, ter onderbouwing van de verzamelstaat. Daarbij kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt:

- Er is uitgegaan van een normale grondslag van de installatie, dus geen onderheiding van de procescomponenten.
- De filterinstallatie is niet voorzien van een gebouw, wel van een bordes voor toegang tot de filterelementen.
- Voorzieningen voor de dosering van coagulant zijn beperkt tot mengvoorzieningen in het leidingwerk naar de filterinstallatie. De doseerinstallatie zelf, inclusief de procesautomatisering is niet meegenomen, om de vergelijking met andere technieken conform de STOWA methodiek, specifiek gericht op de verwijdering van microverontreinigingen, mogelijk te maken.

6.11 JAARLIJKSE SPECIFIEKE KOSTEN

De jaarlijkse kosten per m³ behandeld afvalwater zijn berekend conform de richtlijnen van STOWA. De resultaten zijn hieronder samengevat in tabel 6.11.1 en resulteren in een specifieke kostprijs per behandelde m³ afvalwater van € 0,17. Daarbij wordt opgemerkt dat dit inclusief de slibverwerking is die wordt veroorzaakt door de simultane P-verwijdering, door coagulant dosering in de toevoer naar de reactor.

TABEL 6.11.1 JAARLIJKSE SPECIFIEKE KOSTEN NAGESCHAKELDE BC-GAK INSTALLATIE

Component	Subcomponent	Aantal/percentage	Jaarkosten	opmerkingen
Vaste jaarlasten	civiele componenten		€ 104.907	incl BTW
Vaste jaarlasten	wtb/e componenten		€ 273.196	
Vaste jaarlasten	procesautomatisering		€ 94.765	
Onderhoudskosten	van bouwkosten C	0,5%	€ 5.039	
Onderhoudskosten	van bouwkosten W/E/PA	3,0%	€ 67.875	
Personeelskosten		1 FTE	€ 50.000	
Elektriciteit	pomp/perslucht	51,21 kW	€ 44.857	
GAK	jaarlijkse verversing GAK	25%	€ 102.594	
GAK reactivatie	jaarlijkse reactivatievolume	137 m3	€ 68.396	
spoelwaterproductie	geen externe productie	410 m3/dag	€ 5.991	
spoelwaterverwerking		410 m3/dag	€ 1.498	
slibverwerking	geen P-verwijdering	83 ton DS/j	€ 49.899	
slibverwerking	met extra P-verwijdering	48 ton DS/j	€ 29.078	
TOTAAL			€ 898.095	
TOTAAL SPECIFIEK	behandelde volume per jaar	5.365.500 m3/j	€ 0,167	/m3

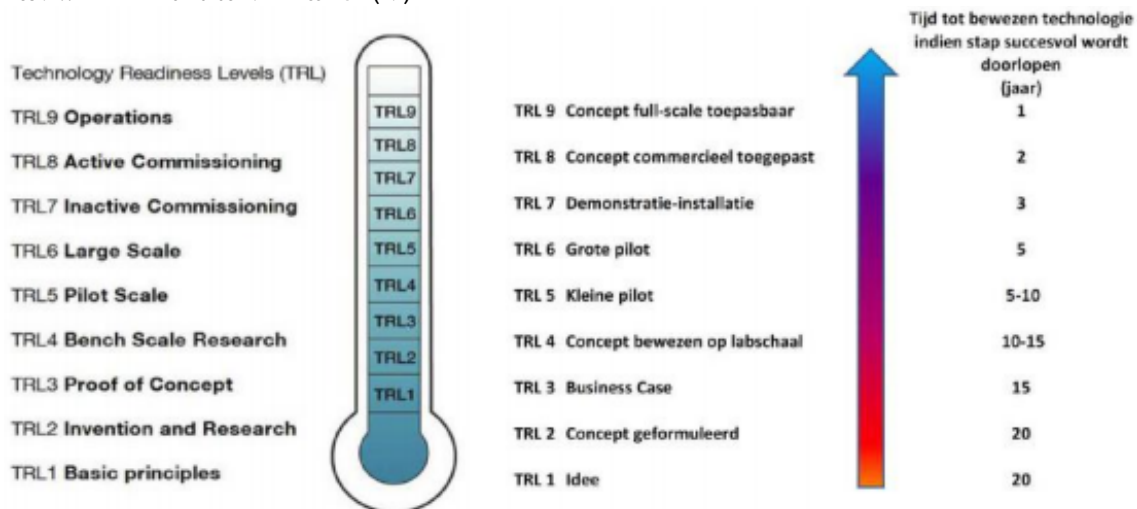
7

TECHNOLOGY READINESS LEVEL

De voorgestelde zuiveringsopzet is gebaseerd op een combinatie van bestaande en bewezen technieken, met elk een verschillend TRL nivo. Om te duiden worden die onderdelen hier benoemd:

- De kern van de procesinstallatie, continu filtratie, is op grote schaal ingezet voor diverse applicaties, zoals de verwijdering van zwevende stof, stikstof of fosfaat. Het TRL nivo is 9.
- Biologische aerobe medium filtratie is op full scale grootte toegepast, bijvoorbeeld voor biologische nitrificatie, waarbij door middel van een actieve en gecontroleerde beluchting in het filterbed condities voor biologische groei onder zuurstofrijke condities worden geborgd. Het TRL nivo is 9.
- In diverse Europese landen, zoals Duitsland en Zweden zijn verscheidene opstellingen operationeel waarbij continu filtratie en GAK ingezet om medicijnresten te verwijderen. Zie ook de besproken referenties eerder in deze rapportage. Het TRL nivo is 8 – 9.
- De impact van biologisch geactiveerde granulair koolfiltratie is aangetoond in vastbed filters (zoals BODAC), maar (nog) niet in continu-filters. Dit impliceert dat het TRL nivo hier lager is en onderzoek moet aantonen op welke wijze deze combinatie bedrijfszeker kan worden ingezet. Door combinatie met de voorgaande opmerkingen, kan deze technologie binnen enkele jaren op demoschaal worden toegepast, met een minimale TRL waarde van 7. Er zijn reeds concrete ideeën om bestaande Nederlandse continu-filterinstallaties om te bouwen als de bedrijfszekerheid voldoende is onderbouwd.
- De combinatie van biologische geactiveerde granulair koolfiltratie in continu filters én simultane coagulant dosering voor de verwijdering van fosfaat is niet eerder getest gedurende een voldoende lange periode. Initiële testen op een praktijkinstallatie in Duitsland hebben aangetoond dat het systeem functioneert, zodat het perspectiefrijk is. TRL 6 voor dit aspect lijkt reëel.

FIGURE 7.1 TECHNOLOGY READINESS LEVEL (TRL)



Met de pilot beogen we op een representatieve schaalgrootte de combinatie biologie-adsorbtie-fysisch/chemische P-verwijdering aan te tonen. De demonstratie-installatie moet daarmee het TRL nivo naar het nivo 7 – 8 brengen.

In de installatie besteden we daarbij onder andere aandacht aan de volgende aspecten:

- Ontwikkeling van een praktische zuurstofinbreng in de GAK reactor, die het kool bed niet verstoort, geen slijtage veroorzaakt, de zuurstofoverdracht naar de biomassa efficiënt verzorgt en aantoonbaar biologische afbraak realiseert van de geadsorbeerde organische componenten in de reactor.
- Ontwikkeling en testen van een regelsysteem om de mediumcirculatie af te stemmen op de belasting van de reactor; dit betekent dat met behulp van het bestaande (Sand-Cycle) meetsysteem een regelsysteem wordt ontwikkeld, dat de actuele procesparameters (debiet, stofbelasting, dosering coagulant, bedweerstand, mediumcirculatie, zuurstofconcentratie in filtraat) vertaalt in de reinigingssnelheid van het medium.
- Ontwikkeling van een methode om de biologische afbraaksnelheid in het GAK filter te kwantificeren, zodat in de beperkte pilot periode vastgesteld kan worden wat de impact van de biologische activiteit is op de standtijd van de kool.
- In de demonstratiefase: langdurige test op grotere schaal om de werkelijke standtijd verlenging van de kool te demonstreren.

Samengevat leidt dit tot de veronderstelling dat de combinatie binnen 5 jaar op demoschaal betrouwbaar kan worden toegepast.

8

INPASSING IN DE NEDERLANDS AFVALWATERZUIVERINGEN

8.1 INLEIDING

BC-GAK is een technologie voor de nabehandeling van RWZI effluent, dat gecombineerd kan worden ingezet voor de verwijdering van microverontreinigingen en nutriënten (fosfaat). In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de inpassing van de techniek in een Nederlandse afvalwaterzuivering. Het effect op de bedrijfsvoering, welke RWZI's zijn geschikt, zijn onderwerpen die hier zijn uitgewerkt.

8.2 EFFECT OP DE BEDRIJFSVOERING VAN DE RWZI

In voorgaande hoofdstukken is ingegaan op de haalbare effluentkwaliteit van de installatie, de slibproductie, chemicaliën- en energieverbruik. Afhankelijk van de hydraulische lijn kan de installatie onder vrij verval of gepompt gevoed worden. Dit hangt van de specifieke situatie af.

De nageschakelde installatie is voor de schaalgrootte van 100.000 i.e. uitgewerkt in de vorm van een betoninstallatie, opgebouwd uit twee ronde filtertanks met elk een diameter van 8,5 m. Naast de filterinstallatie is normaal gesproken sprake van de volgende componenten:

- Een voedingspompruimte voor het oppompen van effluent naar de filterinstallatie
- Een persluchtinstallatie voor de mediumcirculatie en de proceslucht (compressor, filters, droger, drukvat), die ondergebracht wordt in een aparte utilities ruimte.
- Een doseerinstallatie (opslag en doseerpompvoorzieningen) voor de dosering van coagulant (Fe, Al) in de toevoer naar de installatie voor P-verwijdering.

Het bruto ruimtebeslag voor de installatie zoals gedimensioneerd voor de schaalgrootte van 100.000 i.e. bedraagt circa 350 – 400 m², ofwel 0,35 – 0,40 m² per m³/h ontwerpcapaciteit. Er hoeft geen rekening gehouden te worden met buffer voorzieningen.

Voor kleinere RWZI's is een ontwerp in de vorm van een betoninstallatie vaak niet economisch en kan een installatie op basis van stand alone GAK filtereenheden worden uitgewerkt. Het omslagpunt voor een dergelijke installatie wordt bereikt bij een ontwerpcapaciteit van circa 750 m³/h.

8.3 GESCHIKTE RWZI'S

BC-GAK is in principe toepasbaar op elke RWZI, ongeacht de grootte. De compactheid van de installatie leidt ertoe dat de nageschakelde techniek meestal inpasbaar is.

Een economisch interessante mogelijkheid kan worden geboden als een bestaande continu-filter installatie kan worden omgebouwd tot een BC-GAK installatie. In opdracht van Waterschap Rijn en IJssel is dit geïnventariseerd voor de bestaande filterinstallatie op RWZI Ruurlo. Deze installatie is niet meer in gebruik, maar kan met relatief beperkte middelen worden ingezet voor de verwijdering van microverontreinigingen, door ombouw. In Nederland zijn diverse continu-filterinstallaties gerealiseerd, waar een combinatie van functies kan worden gerealiseerd. Genoemd kunnen onder andere worden de installaties op rwzi Land van Cuijk (Waterschap Aa en Maas), Kaatsheuvel (Waterschap Brabantse Delta), Simpelveld, Wijlre (beide Waterschapsbedrijf Limburg), De Groote Lucht (Hoogheemraadschap Delfland), Franeker (Wetterskip Fryslan), Steenwijk (Waterschap Drents Overijsselse Delta), Ruurlo, Wehl (beide Waterschap Rijn en IJssel), Leiden Noord (Hoogheemraadschap Rijnland).

9

CONCLUSIE EN VERVOLG

9.1 ONDERZOEKSVRAGEN

De haalbaarheidsstudie heeft inzicht gegeven in de potentie van biologische GAK continu-filtratie en geleid tot een redelijk nauwkeurige onderbouwing van de potentie ervan ten opzichte van de huidige bewezen technieken voor de verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater. Desalniettemin heeft het onderzoek ook een aantal vragen onvoldoende beantwoord gelaten, die in het pilotonderzoek aandacht behoeven. Hier volgt een korte opsomming van de meest relevante onderzoeksvragen voor dat pilotonderzoek; daarbij kan onderscheid gemaakt worden tussen de hoofdzaken in het programma (verwijdering van microverontreinigingen) en de bijvangst (simultane fosfaatverwijdering).

HOOFDZAKEN:

- Kunnen we voldoende specifieke biomassa ontwikkelen in de GAK reactor, om daarmee de regeneratiefrequentie van de GAK van tenminste 30 maanden te realiseren?
- Heeft de inbreng van zuurstof door persluchtinjectie in het filterbed invloed op de eigenschappen van het granulaire korrelkool? In hoeverre kan deze invloed worden beheerst en beperkt door meet- en regelsystemen?
- Een praktische onderzoeksvraag, die inherent is aan de randvoorwaarden, die worden gesteld in het IPMV, is hoe we de biologische invloed kunnen kwantificeren over de looptijd van de proef, die korter zal zijn dan de beoogde standtijd van de kool.

BIJVANGST:

- Kunnen we in de combinatie met vlokingsfiltratie (voor P-verwijdering) het minimale beoogde verwijderingsrendement voor de gidsstoffen handhaven?
- Heeft de dosering van coagulant in de toevoer (voor P-verwijdering) impact op de ontwikkeling en handhaving van de biomassa in de reactor? Zijn dit verenigbare processen en is dat goed te regelen en monitoren?

9.2 CONCLUSIES

De haalbaarheidsstudie heeft aannemelijk gemaakt dat de voorgestelde techniek een verbetering kan opleveren ten opzichte van de huidige bewezen technieken, door uitwerking ervan aan de hand van de gestelde criteria. In tabel 9.2.1 zijn de resultaten samengevat voor de benoemde prestatiekenmerken. De tabel laat zien dat de prestaties van BC-GAK het uitvoeren van een pilotonderzoek rechtvaardigen.

TABEL 9.2.1 PRESTATIEKENMERKEN BC-GAK

Prestatiekenmerk	Eenheid	O ₃ + zandfiltratie	BC-GAK
CO ₂ voetafdruk	G CO ₂ /m ³	128	115
Kosten	EUR/m ³	0,17	0,17
Verwijderingsrendement gidsstoffen	%	80-85%	80%

9.3 POTENTIËLE PARTNERS EN ONDERZOEKSLOCATIE

Voor het uitvoeren van het pilotonderzoek op basis van BC-GAK heeft een aantal waterschappen aangegeven geïnteresseerd te zijn, dit zijn:

- Waterschap Rijn en IJssel
- Waterschap Vechtstromen
- Wetterskip Fryslan
- Waterschap Drents Overijsselse Delta
- Waterschapsbedrijf van Limburg
- Aquafin

Als potentiële locatie voor de inzet van de pilot zijn de volgende locaties gesuggereerd:

- RWZI Oosterwolde, Wetterskip Fryslan
- RWZI Beilen (WDOdelta)
- RWZI Emmen (Vechtstromen), zelfde voeding als BODAC pilot
- RWZI Nieuwgraaf (Waterschap Rijn & IJssel)

Inmiddels heeft Waterschap Vechtstromen aangegeven haar locatie Emmen ter beschikking te willen stellen voor het onderzoek, en tevens de rol van penvoerder op zich te willen nemen. De overige waterschappen, die hun interesse hebben aangegeven kunnen hier mee instemmen.

9.4 PILOT SPECIFICATIES

De voorgestelde pilot bestaat uit een reactor met een inhoud van circa 2 m³ granulair actief kool, een filteroppervlak van 0,7 m² en een bed-hoogte van 3 m. De installatie zal op hoofdlijnen bestaan uit de volgende onderdelen:

- BC-GAK reactor met een koolinhoud van circa 2 m³ met geïntegreerd beluchtingsnet en spoelinrichting voor het filtermedium; in combinatie met het beoogde voedingsdebiet realiseren we een gemiddelde EBCT van 30 minuten.
- Meet- en regelapparatuur voor het besturen van de installatie, remote monitoring
- Voedingspomp met 6 mm screening geplaatst in een pompbuffer, pompcapaciteit maximaal 7 m³/h
- Leidingwerk en appendages
- Vorstvoorzieningen
- Regeling en monitoring van de spoelcyclus reactor
- Persluchtinstallatie, bestaande uit compressor, droger, filter, drukvat, pneumatisch regelpaneel voor proceslucht en mediumcirculatie, capaciteit 5 Nm³/h bij 4 bar(o)
- Doseervoorzieningen voor coagulantdosering (opslag en doseerpompen, doseerregeling)
- Monstername voorzieningen

De werktuigbouwkundige installatie en de meet- en regelapparatuur worden getest voor start van de proeven, de diverse onderdelen worden voor de pilot gebouwd, c.q. ingekocht. Het reactorontwerp wordt afgeschaald van een standaard ontwerp voor een nageschakelde continuïfiltratie van deze schaalgrootte, zie figuur 9.4.1.

FIGUUR 9.4.1 SCHAALGROOTTE PILOT



De schaalgrootte van de pilot met een capaciteit van 3,5 – 6 m³/h is representatief, zodat opschaling naar grotere capaciteiten op demonstratieschaal goed kan plaatsvinden.

Ten aanzien van de geformuleerde onderzoeksvragen voorzien we de volgende aanpak voor de beantwoording van die vragen, zie tabel 9.3.1. Deze aanpak wordt in nader detail verder uitgewerkt tijdens het ontwerp van de pilot, voorafgaande aan de start van de proefperiode.

TABEL 9.3.1 ONDERZOEKSVRAGEN EN WIJZE VAN BEANTWOORDING TIJDENS DE PILOT

Onderzoeksvraag	Aanpak in pilot
Kunnen we voldoende specifieke biomassa ontwikkelen in de GAK reactor, om daarmee de regeneratiefrequentie van de GAK van tenminste 30 maanden te realiseren?	<ul style="list-style-type: none"> - Massabalansen opstellen voor VLSS en DS voor het bepalen van de biomassa groei. - Microscopische analyse oppervlak kooldeeltjes op aanwezigheid biomassa. - Afbraakrendement DOC in de reactor. - Monitoring verwijderingsrendementen microverontreinigingen. - Adsorptielabtesten biologisch geactiveerde kool voor extrapolatie standtijd aan einde van de beschikbare proefperiode.
Kunnen we in de combinatie met vlokkingfiltratie (voor P-verwijdering) het minimale beoogde verwijderingsrendement voor de gidsstoffen handhaven?	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoring verwijderingsrendementen micro's en o-P tijdens periode van vlokkingfiltratie (vaste Me/o-P ratio). - Monitoring relatie weerstandsopbouw en spoelfrequentie en -intensiteit
Heeft de dosering van coagulant in de toevoer (voor P-verwijdering) impact op de ontwikkeling en handhaving van de biomassa in de reactor? Zijn dit verenigbare processen en is dat goed te regelen en monitoren?	<ul style="list-style-type: none"> - Massabalans VLSS bepalen tijdens vlokkingfiltratie, beoordeling groei/afname biomassa hoeveelheid in reactor. - Effect op DOC afbraak tijdens vlokkingfiltratie beoordelen.
Heeft de inbreng van zuurstof door persluchtinjectie in het filterbed invloed op de eigenschappen van het granulaire korrelkool? In hoeverre kan deze invloed worden beheerst en beperkt door meet- en regelsystemen?	<ul style="list-style-type: none"> - Vaststellen GAK deeltjesgrootteverdeling vóór, tijdens en na de proeven. - Massabalans: analyse op aanwezigheid GAK in spoelwater - Indien invloed is aangetoond, zo nodig wijziging inbreng zuurstof in de reactor.
Een praktische onderzoeksvraag, die inherent is aan de randvoorwaarden, die worden gesteld in het IPMV, is hoe we de biologische invloed kunnen kwantificeren over de looptijd van de proef, die korter zal zijn dan de beoogde standtijd van de kool.	<ul style="list-style-type: none"> - Zie ook boven, tijdens de proeven wordt de verzadigingsgraad van de GAK bepaald, zodat inschatting van de resterende looptijd wordt verkregen.

9.5 PLANNING

Een gedetailleerde planning moet nog worden opgesteld, een voorlopige planning en mijlpalen is in tabel 9.5.1 weergegeven. Doelstelling hierbij is om de resterende tijd voor het uitvoeren van de pilot binnen het kader van het IPMV zo goed mogelijk te benutten, zodat de proefperiode zo lang mogelijk kan duren.

TABEL 9.5.1 PLANNING (INDICATIEF)

Activiteit	Datum (begin/eind)	Mijlpaal
Definitief haalbaarheidsrapportage BC-GAK	09 - 2021	Advies BC
Goedkeuring pilotvoorstel BC-GAK	10 - 2021	Besluit beoordelingscie
Uitwerken plan van aanpak	11 - 2021	Opdracht pilot penvoerder
Vorbereiding realisatie, ontwerp, inkoop onderdelen, samenbouw, opstart	11-2021 / 01-2022	Functionele en geteste installatie
Proefonderzoek	02-2022 / 12-2023	
Demobilisatie pilot	12/2023	Definitieve rapportage

9.6 FINANCIERING

De geïnteresseerde waterschappen hebben aangegeven in cash of in natura te willen bijdragen aan de pilot. Details moeten nog nader worden afgestemd. Conform de regeling van IPMV is een totale bijdrage van de waterschappen van tenminste 25% van de totale projectkosten noodzakelijk.

De totale kosten voor de haalbaarheidsstudie en de pilot worden door ons vooralsnog ingeschat op circa € 350.000 inclusief BTW. Met een bijdrage vanuit IPMV van € 250.000 inclusief BTW is de bijdrage vanuit de waterschappen groot € 100.000, ofwel 28% van de totale projectkosten. Een gedetailleerde begroting en een nadere uitsplitsing van de bijdrages van de individuele waterschappen dient nog te worden vastgesteld.

10

REFERENTIES

- (LfU), B. L. (2021). *Schlussbericht zum Einzelvorhaben, Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe auf der KA Weissenburg, Erfahrungen im Regelbetrieb.*
- Abromaitis, V. (2018). *Metopropol adsorption, desorption and biodegradation dynamics in biological activated carbon systems.* Doctoral Thesis, Technological sciences, chemical engineering.
- Bardella, S., Comas, J., Fenu, A., Rodriguez-Roda, I., Weemaes, M. (2018). Advanced biological activated carbonfilter for removingpharmaceutically active compounds from treated wastewater. *Science of the Total Environment*, 519-529.
- Baresel, C., Ek, M., Ejhed, H., Allard, A.-S., Magnér, J., Dahlgren, L., Westling, K., Wahlberg, C., Fortkamp, U., Söhr, S., Harding, M., Fång, J., and Karlsson, J. (2019). Sustainable treatment systems for removal of pharmaceutical residues and other priority persistent substances. *Water Science & Technology*, 537-543.
- Baresel, C., Ekengren, Ö., Fillopson, S., Karlsson, J., Winberg, L., von Friesen, W., Blomqvist, S., Hasselgren, M., Lazic, A., Stapel, H., Feldthusen, M., Hellman, J., Nordin, A., . (2020). *The municipal wastewater treatment plant of the future – A water reuse facility.* Simrishamn: IVL Swedish Environmental Research Institute.
- Baresel, C., Harding, M., Fang, J. (2021, 05 10). *Ultrafiltration/Granulated Active Carbon-Biofilter: Efficient Removal of a Broad Range of Micropollutants.* Opgehaald van MDPI: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/4/710/htm>
- Bernadet, O. (2020). *Diverse and metabolic active biofilms on activated carbon for efficient in situ regeneration.* Opgehaald van www.wetsus.eu: <https://www.wetsus.nl/app/uploads/2020/01/adv-water-treatm-OBernadet-web.pdf>
- Boorsma, M., Dost, S., Prummel, H. (2020). Geen biofouling op omgekeerde-osmosemembranen door voorzuivering met biologisch-actiefkoolfiltratie. *H2O*.
- Buchwald, A. V. (2021). *untersuchung des Potentials eines modifizierten Dynasandfilters (GAK) bei der simultanen Elimination von Feststoffen, Phosphor und organischen Spurenstoffen in der kommunalen Abwasserreinigung.* Universität Stuttgart.
- Clara, M., Kreuzinger, N., Strenn, B., Gans, O., Kroiss, H. (2005). The solids retention time- a suitable design parameter to evaluate the capacity of wastewater treatment plants to remove micropollutants. *Water Research*, 97-106.
- Ecofide. (2020). *Handreiking voor uitvoeren van biologische effectmonitoring bij vergaande zuivering van RWZI-effluenten.*
- El Gamal, M., Mousa, H.A., El-naas, M.H., Zacharia, R., Judd, S. (2018). Bio-regeneration of activated carbon: a comprehensive review. *Separation and Purification Technology*, 345-359.

- H.A., d. W. (2018). *Pharmaceutical Removal: Synergy between Biological and Chemical Processes for Wastewater Treatment*. Doctoral thesis, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands.
- Han, L., Liu, W., Chen, M., Zhang, M., Liu, S., Sun, R., Fei, X. (2013). Comparison of NOM removal and microbial properties in up-flow/down-flow BAC filter. *Water Research*, 4861-4868.
- Ingenieursgesellschaft Knollmann . (2019). *DynaSand Carbon Filtration - ZKA Rietberg Abschlussbericht - Dokumentation 2. Erprobungsphase*.
- Ingenieursgesellschaft, K. (2019). *DynaSand Carbon Filtration - ZKA Rietberg, Abschlussbericht - Dokumentation 2. Erprobungsphase*.
- Ir. Wouter, H., Neef, R., van den Eijnde, T., ten Bosch, B. (2018). *Voorontwerp CoP case RWI Ruurlo*. Sneek: Brightwork.
- Jacobi. (z.d.). *Technical Datasheet AquaSorb® 2000*. z.p.: Jacobi.
- Karl, P., Börgers, A., Denecke, M., Gehrke, T., Jaschinski, K., Martin, E.J., Türk, J. (2016). *Weitergehende Abwasserreinigung mit Hilfe der Aktivkoks Festbettbiologie und UV-Oxidation: Teil II*. Langelsheim: AQUA-bioCarbon GmbH.
- Knezev, A. (2015). *Microbial Activity in Granular Activated Carbon Filters in Drinking Water Treatment*. Wageningen: Doctoral thesis.
- Mailler, R., Gasperi, J., Coquet, Y., Derome, C., Buleté, A., Vulliet, E., Bressy, A., Varrault, G., Chebbo, G., Rocher, V. (2016). Removal of emerging micropollutants from wastewater by activated carbon adsorption: Experimental study of different activated carbons and factors influencing the adsorption of micropollutants in wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1102-1109.
- Margota, J., Kienleb, C., Magnet, A., Weil, M., Rossi, L., de Alencastro, L.F., Abegglen, C., Thonney, D., Chèvre, N., Schärer, M., Barry, D.A. (2013). Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered carbon. *Science of the Total Environment*, 480-498.
- Nugroho, W.A., Reungoat, J., Keller, J. (2010). The performance of biological activated carbon in removing pharmaceuticals in drinking water treatment. *Journal of applied sciences in environmental sanitation*, 131-141.
- Okuda, T., Kobayashi, Y., Nagao, R., Yamashita, N., Tanaka, H., Tanaka, S., Fujii, S., Konishi, C., and Houwa, I. (2008). Removal efficiency of 66 pharmaceuticals during wastewater treatment process in Japan. *Water Science & Technology*, 65-71.
- Patil, A., Hatch, G., Michaud, C., Brotman, M., Regunathan, P., Tallon, R., Andrew, R., Murphy, S., Verstrat, S., Kom, M., Kappel, B., Battenberg, G. (2013). *Granular activated carbon (GAC) fact sheet*. Illinois: Water Quality Association.
- Piai, L., Blokland, M., van der Wal, A., Langenhoff, A. (2020). Biodegradation and adsorption of micropollutants by biological activated carbon from a drinking water production plant. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 388, 122028.
- Pipe-Martin, C., Reungoat, J., Keller, J. (2008). *Dissolved organic carbon removal by biological treatment No 76*. Queensland: WQRA.
- Posthuma, L., de Zwart, D., Osté, L., van der Oost, R., Postma, J. (2016). *STOWA ecologische sleutelfactor toxiciteit*. Amersfoort: STOWA.

- Postma, J. (2021, 05 21). STOWA. Opgehaald van Website van STOWA, nieuwsberichten: <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/NIEUWS/STOWA%20ter%20Info's/STOWA%20ter%20Info%2075/sti%2075%20achtergrondverhaal%20effectmonitoring.pdf>
- Rattier, M., Reungoat, J., Gernjak, W., Joss, A., Keller, J. (2012). Investigating the role of adsorption and biodegradation in the removal of organic micropollutants during BAC. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 127-139.
- Rattier, M., Reungoat, J., Gernjak, W., Keller, J. (2012). *Organic micropollutant removal by biological activated carbon filtration: a review*. Queensland: Urban Water Security Research Alliance.
- Rattier, M., Reungoat, J., Gernjak, W., Keller, J. (2012). Pharmaceuticals in drinking water treatment biological activated carbon filtration: A review. *Urban water security research alliance, technical report No. 53*, 45.
- Rödel, S. (2018). *KA Weißenburg 3. Testphase bis September 2018*. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München.
- Rödel, S., Prof. Günther, W., Christ, O., Miller, E., Schatz, R., Zech, T., Bleisteiner, S., Sengl, M., Eßlinger, M., Rehbein, V., Steinle, E. (2017). *Erfahrungen und Ergebnisse aus dem Betrieb der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg*. Weißenburg: Universität der Bundeswehr München.
- Scholz, M. and Martin, R. J. (1997). Ecological equilibrium on biological activated carbon. *Wat. Res.*, 2959-2968.
- Siegrist, H., Joss, A., Miladinovic, N. . (2010). *Neptune (New sustainable concepts and processes for optimization and upgrading municipal wastewater and sludge treatment)*. Eawag: EU.
- Simpson, D. (2008). Biofilm processes in biologically active carbon water purification. *IWA Water Research*, 2839-2848.
- STOWA. (2020). *Handreiking voor uitvoeren van biologische effectmonitoring bij vergaande zuivering van RWZI-effluenten*. Amersfoort: STOWA.
- Ternes, T., Janex-Habibi, M.-L., Knacker, T., Kreunzinger, N., Siegrist, H. (2006). *Assessment of Technologies for the Removal of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Sewage and Drinking Water Facilities to Improve the Indirect Potable Water Reuse*. Wiesbaden: Energy, Environment and Sustainable Development .
- van der Maas, P. Veenendaal, G., Nonnenkens, J., Brink, H., de Vogel, D. (2020). Biologische actiefkoolfiltratie met zuurstofdosering: veelbelovende techniek voor verwijdering geneesmiddelen? *H2O*.
- van der Maas, P., Majoor, E., Dost, S., Schippers, J. (2010). Beheersing vervuiling RO-membranen door biologische actiefkoolfiltratie . *H2O*, 41-44.
- van Nieuwenhuijzen, A. , Bloks, B., Essed, S., de Jong, C. (2017). *Verkenning technologische mogelijkheden voor verwijdering van geneesmiddelen uit afvalwater*. Amersfoort: STOWA.
- Veenendaal, G., Kuiper, D., Dost, S., van der Maas, M. (2019). Ultrapuur water uit RWZI-effluent; bijna 10 jaar ervaring in Emmen. *H2O*.
- Weamaes, M. (2019, November). Beat the micropollutants. *case Flanders*. Aquafin, STOWA Workshop.

Weemaes, M. , Fink, G., Lachmund, C., Magdeburg, A., Stalter, D., Thoeye, C., Gueldre, G., van de Steen, B. (2011). Removal of micropollutants in WWTP effluent by biological assisted membrane carbon filtration (BioMAC). *Water Sciences & Technology*, 72-79.

Zhang, Z.H., Shao, L. (2008). Study on control of micropollutants by BAC filtration. *IWA Water Science & technology*, 677-682.

BIJLAGE 1

ZKA RIETBERG PRAKTIJKRESULTATEN

VERWIJDERING MICRO'S

Aan de hand van de laatste rapportage van de meetcampagnes aan de DynaSand filter installatie op ZKA Rietberg is een compilatie gemaakt van de meetresultaten, waarbij de volgende meetpunten zijn gerapporteerd:

- Toevoer naar DynaSand GAK-filters 1 en 2
- Afvoer DynaSand GAK filter 1
- Afvoer DynaSand GAK filter 2

Vanwege de geringe verblijftijd in de nageschakelde GAK filters zijn de monsters op hetzelfde moment genomen. De operationele procesparameters van de DynaSand GAK filters zijn hieronder samengevat in tabel B1.1:

TABEL B1.1

OPERATIONELE PARAMETERS GAK FILTERINSTALLATIE ZKA RIETBERG

Parameter	waarde	eenheid
aantal eenheden	2,0	
stramien	2,5	m
filteropp/eenheid (bruto)	37,5	m ²
filteropp/eenheid (netto)	30,0	m ²
bedhoogte	3,5	m
GAK volume/eenheid	125,0	m ³
Totale GAK volume	250,0	m ³
DWA debiet naar GAK	360,0	m ³ /h
DWA dagdebiet	5.460,0	m ³ /dag
Behandelde DWA over GAK	81%	
Jaardebiet behandeld met GAK	1.614.249	m ³ /j
Eerste vulling GAK F1	1-1-2015	
Eerste vulling GAK F2	1-1-2015	
Tweede vulling GAK F1	15-11-2017	regeneratie
Tweede vulling GAK F2	15-3-2019	regeneratie

Voorts zijn in tabel B1.2 de analyseresultaten opgenomen van de micro's, die in de loop van de tijd zijn gemeten in de aan- en afvoer van de filters. Tevens is boven de tabel aangegeven wat de standtijd van de GAK is op het moment van de analyse .

TABEL B1.2 ANALYSE RESULTATEN MICRO'S AAN- EN AFVOER DYNASAND GAK FILTERS 1 EN 2, ZKA RIETBERG

Datum monstername	14-3-2018	14-3-2018	14-3-2018	13-5-2018	13-5-2018	13-5-2018	13-7-2018	13-7-2018	13-7-2018	5-9-2018	5-9-2018	5-9-2018	13-11-2018	13-11-2018	13-11-2018	10-1-2019	10-1-2019	10-1-2019	7-3-2019	7-3-2019	7-3-2019
Start schone GAK filtratie		15-11-2017	1-1-2015		15-11-2017	1-1-2015		15-11-2017	1-1-2015		15-11-2017	1-1-2015		15-11-2017	1-1-2015		15-11-2017	1-1-2015		15-11-2017	1-1-2015
Standtijd GAK (jaren)		0,33	3,20		0,49	3,36		0,658	3,532		0,805	3,679		0,995	3,868		1,153	4,027		1,307	4,181
Stof	F1/2 influent	F1 - filtraat	F2 - filtraat	F1/2 influent	F1 - filtraat	F2 - filtraat	F1/2 influent	F1 - filtraat	F2 - filtraat	F1/2 influent	F1 - filtraat	F2 - filtraat	F1/2 influent	F1 - filtraat	F2 - filtraat	F1/2 influent	F1 - filtraat	F2 - filtraat	F1/2 influent	F1 - filtraat	F2 - filtraat
Carbamazepin	0,700	0,061	0,540	1,100	0,380	0,460	1,000	< 0,05	0,050	0,920	1,000	0,920	0,770	0,093	0,360	0,760	0,230	0,520	0,900	0,230	0,730
Clarithromycin	0,540	0,290	0,540	0,390	0,250	0,290	0,170	0,052	0,130	< 0,05	0,056	< 0,05	0,130	0,090	0,130	0,180	0,200	0,140	0,330	0,220	0,280
Sulfamethoxazol	0,180	0,099	0,260	0,290	0,097	0,280	0,130	0,075	0,190	0,260	0,560	0,260	0,370	0,170	0,250	0,200	0,160	0,170	0,220	0,250	0,260
Diclofenac	3,400	0,860	2,900	3,600	0,530	2,200	3,400	0,330	1,900	3,600	3,700	3,600	3,700	1,500	2,900	3,100	1,900	3,100	3,700	2,300	3,100
Naproxen	0,240	< 0,05	0,200	0,130	< 0,05	0,073	0,120	0,050	0,066	0,180	2,500	0,180	0,150	< 0,05	0,130	0,190	0,082	0,160	0,280	0,110	0,210
Phenazon	0,180	< 0,05	0,150	0,290	< 0,05	0,170	0,130	< 0,05	0,068	0,180	0,110	0,180	0,220	< 0,05	0,150	0,220	< 0,05	0,190	0,300	0,097	0,190
Metoprolol	4,100	0,110	2,400	3,800	0,055	0,820	3,000	0,054	0,400	2,200	4,900	2,200	1,900	0,110	0,740	3,000	0,480	1,400	5,100	0,480	2,100
Sotalol	0,230	< 0,05	0,120	0,250	< 0,05	0,063	0,140	< 0,05	< 0,05	0,160	0,150	0,160	0,250	< 0,05	0,068	0,230	< 0,05	0,096	0,270	< 0,05	0,130
Atenolol	0,310	< 0,05	0,150	0,270	< 0,05	0,064	0,100	< 0,05	< 0,05	0,080	0,620	0,080	0,140	< 0,05	< 0,05	0,180	< 0,05	0,072	0,230	< 0,05	0,091
Bisoprolol	0,870	< 0,05	0,580	0,440	< 0,05	0,130	0,380	< 0,05	< 0,05	0,480	0,860	0,480	0,480	< 0,05	0,240	0,900	0,190	0,520	1,000	0,150	0,460
Amidotriozoesure	0,200	0,170	0,210	0,360	0,230	0,310	0,093	0,093	0,110	1,400	0,480	1,400	1,000	1,100	1,400	0,079	0,082	0,082	0,330	0,270	0,260
Iopamidol	0,086	0,073	0,077	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Iopromid	0,280	0,170	0,110	0,240	0,070	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,460	0,220	0,160	0,240	0,130	0,086
Iomeprol	2,500	1,300	0,720	0,660	0,160	0,084	0,750	0,220	0,170	0,470	5,100	0,470	0,350	0,130	0,094	1,400	0,660	0,490	2,500	1,200	0,910
Oxazepam	0,240	< 0,05	0,180	0,210	< 0,05	0,170	0,130	< 0,05	0,073	0,270	0,220	0,270	0,180	< 0,05	0,120	0,100	0,054	0,100	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Bezafibrat	0,140	< 0,05	0,110	0,056	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,380	< 0,05	0,100	< 0,05	0,079	0,230	0,110	0,180	0,260	0,130	0,180
Benzotriazol	8,500	0,091	1,600	6,000	0,083	1,300	4,700	0,099	0,690	6,200	18,000	6,200	7,300	0,260	0,950	6,100	0,380	1,200	5,900	0,310	1,300
Terbutryn	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,050	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,087	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,280	0,099	0,220	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Isoproturon	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,099	< 0,05	< 0,05	0,062	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,440	0,062	0,260	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Diuron	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05

BIJLAGE 2

KOSTEN SPECIFICATIE VAN DE BC-GAK CONTINU-INSTALLATIE

De kostenspecificatie op hoofdcomponenten voor de filterinstallatie, die geleid heeft tot de CAPEX berekeningen voor de referentie-installatie van 100.000 i.e. is samengevat in tabel B2.1. Daarbij is een uitsplitsing gemaakt in de volgende disciplines:

- Civiele werken
- Werktuigbouwkundige installatie
- Electro- en instrumentatie
- Procesautomatisering

Er is uitgegaan van een normale grondslag, zonder onderheing van de installatie onderdelen. Buffervoorzieningen zijn niet noodzakelijk en dus niet begroot. Voor de simultane P-verwijdering zijn voorzieningen opgenomen in het leidingwerk naar de installatie, maar is de doseerinstallatie en de daaraan gerelateerde voorzieningen (opslag, procesautomatisering) niet meegenomen in de calculatie, om een zuivere vergelijking conform de STOWA systematiek mogelijk te maken.

TABEL B2.1

KOSTEN SPECIFICATIE REFERENTIE INSTALLATIE CONTINUE BIO GAK FILTRATIE

discipline	Kostencomponent	subcomponent	CAPEX som	WTB CAPEX	EI CAPEX	PA CAPEX	C CAPEX
C	EcoBlue filter	civiele constructie-fundatie	€ 180.000	€ -	€ -	€ -	€ 180.000
C	EcoBlue filter	grondverbetering/verwerking	€ 90.000	€ -	€ -	€ -	€ 90.000
C	EcoBlue filter	civiele constructie-wandelementen	€ 280.000	€ -	€ -	€ -	€ 280.000
WTB	EcoBlue filter	bordessen/leuningwerk	€ 150.000	€ 150.000	€ -	€ -	€ -
WTB	EcoBlue filter	filterinternals	€ 315.000	€ 315.000	€ -	€ -	€ -
WTB	EcoBlue filter	piping/fittings/filtraatafvoer	€ 170.000	€ 170.000	€ -	€ -	€ -
EI	EcoBlue filter	Sand-Cycle	€ 63.000	€ -	€ 63.000	€ -	€ -
WTB	Filter voeding	voedingspomp/appendages	€ 110.000	€ 110.000	€ -	€ -	€ -
C	Filter voeding	pompput	€ 95.000	€ -	€ -	€ -	€ 95.000
WTB	Filter voeding	piping/fittings	€ 50.000	€ 50.000	€ -	€ -	€ -
EI	Filter voeding	besturing	€ 75.000	€ -	€ 75.000	€ -	€ -
EI	EcoBluefilter	bekabeling	€ 75.000	€ -	€ 75.000	€ -	€ -
EI	instrumentaria	nivosensors, flowsensors, PIC	€ 75.000	€ -	€ 75.000	€ -	€ -
EI	besturingsinstallatie, lokaal	remote access	€ 55.000	€ -	€ 55.000	€ -	€ -
WTB	persluchtinstallatie	proceslucht en mediumcirculatie	€ 150.000	€ 150.000	€ -	€ -	€ -
EI	persluchtinstallatie	aansturing	€ 25.000	€ -	€ 25.000	€ -	€ -
WTB	statische menger	aanvoerleiding filters	€ 15.000	€ 15.000	€ -	€ -	€ -
WTB	assemblage op site	montagewerkzaamheden, divers	€ 120.000	€ 120.000	€ -	€ -	€ -
WTB	eerste vulling	Granulair actief kool	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
PA	Procesautomatisering	stelpost	€ 150.000	€ -	€ -	€ 150.000	€ -
	KALE INVESTERINGSKOSTEN	exclusief BTW		€ 1.080.000	€ 368.000	€ 150.000	€ 645.000
	AANNEMERSKOSTEN	exclusief BTW		€ 270.000	€ 92.000	€ 37.500	€ 161.250
	ONVOLLEDIGHEID	exclusief BTW		€ 337.500	€ 115.000	€ 46.875	€ 201.563
	STICHTINGSKOSTEN	inclusief BTW		€ 3.037.500	€ 1.035.000	€ 421.875	€ 1.814.063