



Ministerie van Infrastructuur  
en Waterstaat

stowa

PILOTONDERZOEK BIO-GAK

# BIOLOGISCH GEACTIVEERDE CONTINU FILTRATIE OVER GRANULAIR ACTIEF KOOL



RAPPORT

2023  
51

BIOLOGISCH GEACTIVEERDE CONTINUFILTRATIE OVER  
GRANULAIR ACTIEF KOOL

RAPPORT

2023

51

ISBN 978.94.6479.061.0



[stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl) [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)

# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Hans Wouters - Brightwork  
Annette Kramer - Brightwork  
Gerrit Veenendaal - NieuWater  
Jaap Nonnekens - Waterschap Vechtstromen  
Emiel Nijhuis - RWB

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Judith Kloosterman-Greftenhuis - Waterschap Vechtstromen  
Alexandra Deeke - Waterschap de Dommel  
Philip Schyns - Waterschap Rijn en IJssel  
Miriam Verdurmen - Waterschap Vallei en Veluwe  
Jantien Foekema - Norit  
Joost van den Bulk - TAUW  
Astrid Mous - WLN  
Gerard Rijs - RWS-WVL  
Mirabella Mulder - Mirabella Mulder Waste Water Management  
Cora Uijterlinde - STOWA

VORMGEVING Buro Vormvast  
STOWA STOWA 2023-51  
ISBN 978.94.6479.061.0

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 MET INBRENG VAN LUCHT LIJKT VEELBELOVEND**

Op de rwzi Emmen is een pilot onderzoek uitgevoerd naar de potentie van biologische geactiveerde continu-filtratie over granulair actief kool met het inbrengen van lucht voor de zuurstofvoorziening voor de verwijdering van medicijnresten en andere microverontreinigingen uit afvalwater. Met name vanwege de combinatie van stabiele verwijderingsrendementen en een lange standtijd van de kool, zijn de operationele kosten gunstig en leidt de techniek tot een beperkte CO<sub>2</sub> voetafdruk.

Binnen het Innovatieprogramma Microverontreinigingen (IPMV) van STOWA en het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat worden diverse technologieën onderzocht voor de verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater. Dit pilot onderzoek is uitgevoerd in de periode 2022 – 2023 op een schaalgrootte die opschaling mogelijk maakt. In het filterbed vindt een combinatie van adsorptie en biologische omzetting plaats. De biologische omzetting wordt bevorderd door beluchting onderin het filtermedium. 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 dosering van coagulant. Daarmee kan tegelijkertijd invulling gegeven worden aan de opgave uit de kaderrichtlijn water (KRW).

Het pilot onderzoek liet zien dat de verwijdering van gidsstoffen, uitgedrukt in het behaalde verwijderingsrendement van de top 7, gedurende de onderzoeksperiode voor de nageschakelde zuivering boven de grenswaarde van 80% bleef. De onderzoeksperiode was te kort om eenduidig vast te stellen dat de gecreëerde biologische activiteit in de reactor verantwoordelijk was voor de stabilisering van de verwijdering. Vervolg op dit onderzoek moet hierover meer duidelijkheid geven. De onderzochte technologie verwijderd 80 – 85% van 7 van de 11 gidsstoffen (overall rwzi rendement) en leidt tot een CO<sub>2</sub> voetafdruk van 109 gram CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup> behandeld afvalwater en een specifieke kostprijs van € 0,21 per m<sup>3</sup> behandeld afvalwater.

De vergaande verwijdering van opgelost fosfaat door simultane coagulant dosering is mogelijk, zonder dat dit een negatief effect lijkt te hebben op de biologische activiteit. De verwijdering van totaal fosfaat in de reactor is nog onvoldoende onderbouwd en in vervolgonderzoek zal hieraan verder aandacht worden besteed.

Joost Buntsma  
Directeur STOWA



# SAMENVATTING

Continufiltratie is een tertiaire afvalwaterzuiveringstechniek 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.

Voor de inzet van opwaarts doorstroomde continufiltratie voor het vergaand verwijderen van medicijnresten, zoals beoogd in het Innovatieprogramma Microverontreinigingen (IPMV), is granulair actief kool gebruikt als filtermedium in een continufilter. Pilotonderzoek is uitgevoerd op RWZI Emmen op een representatieve schaalgrootte (3 – 4 m<sup>3</sup>/h capaciteit, reactor inhoud 1,7 m<sup>3</sup>, EBCT 20 – 25 minuten). Bijzondere kenmerken bij dit onderzoek zijn:

- 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, ammonium-stikstof en microverontreinigingen gestimuleerd. Het primaire doel voor het IPMV onderzoek is het realiseren van een significante verlenging van de standtijd van de kool voor regeneratie.
- Het realiseren van een simultane verwijdering van fosfaat door middel van 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.

Dit pilotonderzoek maakt onderdeel uit van het Innovatieprogramma Microverontreinigingen (IPMV) van STOWA en het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Het onderzoek is uitgevoerd conform de richtlijnen, zoals vastgelegd door STOWA. De uitvoering van het onderzoek is verzorgd door de projectgroep, bestaande uit Waterschap Vechtstromen, NieuWater, RWB Water en Brightwork. Daarnaast was een klankbordgroep actief, waarmee de tussentijdse resultaten werden gedeeld. De leden van de klankbordgroep waren: Waterschap Rijn & IJssel, Waterschap Drents Overijsselse Delta, Waterschapsbedrijf Limburg, Waterschap Vallei en Veluwe en Aquafin. De laatste partij voerde simultaan een vergelijkbaar onderzoek uit op rwzi Aartselaar, België.

De pilot is ontworpen en gebouwd in de eerste helft van 2022. Vanaf juni 2022 is het onderzoek gestart. Het onderzoek is doorgezet tot en met oktober 2023, waarna de eindrapportage is opgesteld, conform de tijdslijn van het Innovatie Programma.

Het onderzoek leidt tot de volgende conclusies:

De verwijdering van gidsstoffen, uitgedrukt in het behaalde verwijderingsrendement van de top 7, is gedurende de onderzoeksperiode (tot 18.000 BV) voor de nageschakelde zuivering boven de grenswaarde van 80% gebleven. Aanvankelijk lag het rendement erg hoog (98%); naarmate het onderzoek vorderde nam dat af en stabiliseerde het rendement op 80 – 85%.

De onderzoeksperiode was te kort om eenduidig vast te stellen dat de gecreëerde biologische activiteit in de reactor verantwoordelijk was voor de stabilisering van de verwijdering. Het vervolg op dit onderzoek moet hierover meer duidelijkheid geven.

De vergaande verwijdering van opgelost fosfaat door simultane coagulant dosering is mogelijk, zonder dat dit een negatief effect lijkt te hebben op de biologische activiteit. Er is 6 maanden aaneensluitend coagulant gedoseerd, terwijl dit geen negatieve invloed heeft gehad op de biologische nitrificatie in de reactor. Dit sluit aan bij de praktijkervaring waarbij combinaties van coagulant dosering en biologische stikstofverwijdering in één reactor mogelijk zijn.

De verwijdering van totaal fosfaat in de reactor is nog onvoldoende onderbouwd door de beperkte analyses. Dit hangt mede samen met de lage influentconcentraties. In het vervolgonderzoek zal hieraan verder aandacht worden besteed.

De LC-MS screeningsresultaten laten een significante afname zien van het aantal organische stoffen in de pilot.

De metingen aan de ecotoxiciteit, conform de verschillende gehanteerde methodes, laten steeds een afname van de ecotoxiciteit zien van het water na behandeling in de pilot.

De onderzoeksresultaten zijn vertaald naar de ontwerpgrondslagen voor een standaard rwzi van 100.000 i.e., zodat daarmee de investeringskosten, de operationele kosten en de CO<sub>2</sub> voetafdruk konden worden bepaald. Hiermee is een goede vergelijking met de andere potentiële technieken voor de verwijdering van microverontreinigingen te maken. De onderzochte technologie verwijdert 80 – 85% van 7 van de 11 gidsstoffen (overall rwzi rendement) en leidt tot een CO<sub>2</sub> voetafdruk van 109 gram CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup> behandeld afvalwater, een specifieke kostprijs van € 0,21 per m<sup>3</sup> behandeld afvalwater.

Vergelijking van de behaalde resultaten voor de gidsstoffen conform de Nederlandse Richtlijn met de concept Europese Richtlijn laat zien dat vrijwel dezelfde verwijderingsrendementen worden behaald.

# SUMMARY

Continuous filtration is a common tertiary waste water treatment technology. The main focus is the removal of suspended (organic) solids, nitrogen en phosphorus. Sand is the typical filter medium applied; the filtration mechanism is based on physical-chemical particle filtration and/or biological conversion of nitrogen compounds by biomass in the filter bed.

In this research, which is part of the Innovation Program Micropollutants (abbr IPMV), continuous filtration is used to remove medicine residues by applying granular activated carbon instead of sand: biological granular activated carbon continuous filtration, abbreviated bio-GAK.

A pilot is designed, built and tested at wwtp Emmen, the Netherlands, with a capacity of 3 – 4 m<sup>3</sup>/h, a reactor volume of 1.7 m<sup>3</sup> and a EBCT of 24 minutes.

The specifics of the pilot are highlighted below:

- The biological activity in the filter bed has been enhanced by introducing air to create oxidic conditions and to stimulate biological growth. In this way biological degradation of organic matter, conversion of ammonia nitrogen and micropollutants is promoted. With the ultimate goal to extend the regeneration frequency of the granular activated carbon.
- A simultaneous removal of phosphorus by dosing coagulant in the feed to the reactor. Floccs are formed within the filterbed and effectively removed. In this way the KRW objectives may be met.

The research is part of the IPMV program, supported by STOWA and the Ministry of Infrastructure and Water. The IPMV guidelines have been followed. The day to day operations have been organized by the project team, consisting of Waterschap Vechtstromen, NieuWater, RWB Water and Brightwork. Furthermore a feedback group was used to evaluate the results. The group is represented by the Dutch Water Authorities Rijn & IJssel, Drents Overijsselse Delta, Waterschapsbedrijf Limburg, Vallei en Veluwe and the Belgian Aquafin. The latter executed a separate research with a similar process set-up at wwtp Aartselaar in Belgium.

The pilot is designed and built in the first half of 2022. From June 2022 onwards the research was started. The research has been concluded in October 2023, after which the final report was composed, as per the IPMV timeline.

The research results led to the following conclusions:

The removal of micropollutants, expressed in the removal percentage of the top seven specified guidance substances in the post treatment pilot, has been higher than 80% throughout the full research period, up to a treated water volume of 18,000 bed volumes. At the start of the research period the efficiency was 98%, gradually decreasing and stabilizing at rates of 80 – 85%.

The research period appeared to be too short to clearly determine the impact of the biology on the removal of micropollutants. The follow-up research will be used to create more clarity.

The removal of soluble phosphorus has been effective without impacting the biological activity. During 6 months coagulant has been dosed, and biological nitrification remained present. This coincides with the experiences elsewhere, applying simultaneous coagulant dosing and biological nitrogen removal in one reactor.

The removal of total phosphorus in the system has not been fully confirmed by the limited amount of samples. This is partly due to the low influent P concentrations. This will be investigated further in the follow-up research.

The LC-MS screening results (non-target substances screening) showed a consistent decrease of the number of detected organic components. This also holds true for the ecotoxicity analysis.

The results of the research have been translated into a basis of design for a template full scale tertiary filter plant, with a capacity of 100,000 PE. Based on the IPMV guidelines this plant design has been used to calculate the investment costs, the operational costs and the carbon footprint. It makes it possible to compare the technology with other potential technologies for micropollutant removal.

Bio-GAK removes 80 – 85% of seven from eleven guidance substances (overall wwtp efficiency), and leads to a carbon footprint of 109 gram CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup> treated waste water. The specific costs price is calculated at € 0,21 per m<sup>3</sup> treated waste water.

A final comparison of the achieved removal rates for the guidance substances, according to the Dutch guidelines, with the draft European guideline, shows the consistency of the results.

# DE STOWA IN HET KORT

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

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

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

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

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

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

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

# BIOLOGISCH GEACTIVEERDE CONTINUFILTRATIE OVER GRANULAIR ACTIEF KOOL

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	SUMMARY	
	DE STOWA IN HET KORT	
<b>1</b>	<b>INLEIDING EN LEESWIJZER</b>	<b>1</b>
	1.1 Achtergrond	1
	1.2 Beschrijving van de technologie	1
	1.3 Onderzoeksvragen	2
	1.4 Pilot Emmen	3
	1.5 Pilot Aartselaar (Aquafin)	3
	1.6 Leeswijzer	4
	1.7 Partners in het onderzoek	4
<b>2</b>	<b>ONDERZOEK EN UITVOERING</b>	<b>5</b>
	2.1 Beschrijving van de proefinstallatie	5
	2.1.1 P&ID	5
	2.1.2 Voeding en voorbehandeling	5
	2.1.3 Continufilter installatie	7
	2.1.4 Actief kool	7
	2.1.5 Coagulant dosering	8
	2.1.6 Persluchtvoorziening	8
	2.1.7 Intermitterende koolwassing	9
	2.1.8 Koolvang	9
	2.1.9 Meet-en regelsysteem	10
	2.1.10 Aanpassingen ontwerp filter internals	11
	2.2 Materialen en methodes	12
	2.2.1 Verwijdering gidsstoffen	12
	2.2.2 Ecotoxicologie	12
	2.2.3 Algemene parameters	12

<b>3</b>	<b>RESULTATEN</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	Inleiding	13
<b>3.2</b>	Resultaten gidsstoffen en kandidaat gidsstoffen	13
3.2.1	Inleiding	13
3.2.2	Verwijderingsrendementen	13
3.2.3	Rendementen versus bedvolume	17
<b>3.3</b>	Verwijderingsrendementen algemene parameters	18
3.3.1	Inleiding	18
3.3.2	DOC	18
3.3.3	Ammonium-N	19
3.3.4	TSS/troebeling	20
3.3.5	ATP	21
3.3.6	Fosfaat	21
<b>3.4</b>	LC-MS screening	23
<b>3.5</b>	Ecotoxicologie	24
<b>3.6</b>	Operationele aandachtspunten	25
<b>3.7</b>	Vertaling resultaten onder toekomstige Europese richtlijn	25
<b>4</b>	<b>INPASSING IN NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK</b>	<b>30</b>
<b>4.1</b>	Inleiding en uitgangspunten	30
<b>4.2</b>	Dimensioneringsgrondslagen	31
<b>4.3</b>	Lay-out Bio-GAK continufiltratie- installatie	32
<b>4.4</b>	Inzet hulpstoffen/ chemicaliën	33
<b>4.5</b>	Energieverbruik	33
<b>4.6</b>	Slibproductie	34
<b>4.7</b>	Spoelwaterproductie	34
<b>4.8</b>	CO <sub>2</sub> -footprint	35
<b>4.9</b>	Bouw- en Stichtingskosten	37
<b>4.10</b>	Jaarlijkse specifieke kosten	38
<b>5</b>	<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	<b>41</b>
<b>5.1</b>	Conclusies	41
<b>5.2</b>	Aanbevelingen	42
<b>6</b>	<b>REFERENTIES</b>	<b>43</b>
BIJLAGE 1	PROCESBESCHRIJVING CONTINUFILTRATIE	47
BIJLAGE 2	P&ID PROEFINSTALLATIE	50
BIJLAGE 3	VERWIJDERINGSRENDEMENT GIDSSTOFFEN	51
BIJLAGE 4	LC-MS NON-TARGET SCREENING	53
BIJLAGE 5	CONCENTRATIES GIDSSTOFFEN	68
BIJLAGE 6	BEPALING VAN ONTWERP-STANDTIJD FULL SCALE INSTALLATIE	75
BIJLAGE 7	GEVOELIGHEID STANDTIJD KOOL OP CO <sub>2</sub> AFDRUK EN OPEX	77

# 1

## INLEIDING EN LEESWIJZER

### 1.1 ACHTERGROND

In het Innovatieprogramma Microverontreinigingen (IPMV), geïnitieerd door Stowa en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, worden diverse technieken getoetst op geschiktheid voor de verwijdering van medicijnresten uit huishoudelijk afvalwater. In dit kader is de technologie gebaseerd op biologisch actieve granulair koolfiltratie in een continufilter op praktijkschaal getest. Voorafgaand aan het proefonderzoek is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd. In de haalbaarheidsstudie is op basis van de toen bekende informatie een ontwerp uitgewerkt voor een full scale installatie, conform de richtlijnen van Stowa (STOWA, 2021). Voorts is een kostencalculatie opgezet en de CO<sub>2</sub> voetafdruk vastgesteld. De (positieve) resultaten van de haalbaarheidsstudie zijn aanleiding geweest om het pilot onderzoek uit te voeren. Dit onderzoek is uitgevoerd op RWZI Emmen (Waterschap Vechtstromen, zie figuur 1.1.1) en gestart in juli 2022 en volgt de werkwijze zoals vastgelegd in de richtlijnen. De schaalgrootte van het onderzoek op locatie is zo gekozen dat opschaling ervan mogelijk is.

FIGUUR 1.1.1 OVERZICHTSFOTO RWZI EMMEN (RECHTS) EN PUURWATERFABRIEK (LINKS)



Het onderzoek heeft voor een deel parallel aan het onderzoek naar BODAC (biological oxygen dosed activated carbon) gelopen. Daardoor was het mogelijk (een deel van) de bemonstering simultaan uit te voeren. In nauwe samenwerking met het BODAC projectteam zijn activiteiten op elkaar afgestemd.

### 1.2 BESCHRIJVING VAN DE TECHNOLOGIE

Tertiaire zuivering van afvalwater behelst een nageschakelde techniek, waarmee specifieke stoffen verwijderd worden voordat lozing op oppervlaktewater plaatsvindt. Eén van de technieken, die in Nederland sinds halverwege de negentiger jaren is toegepast is continufiltratie.



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 is gegeven in figuur 1.2.1.

**FIGUUR 1.2.1** NAGESCHAKELDE BIOLOGISCHE CONTINUFILTRATIE - WWTW HOLBEACH, ANGLIAN WATER



In enkele Europese landen (Duitsland, Zwitserland, Zweden) zijn al continufilters ingezet waarbij het filtermedium is vervangen door granulair actief kool. Doel is om vergaande verwijdering van microverontreinigingen te realiseren. Zie ook (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); (Buchwald, 2021); (Ingenieursgesellschaft Knollmann , 2019); (Rödel, S., Prof. Günther, W., Christ, O., Miller, E., Schatz, R., Zech, T., Bleisteiner, S., Sengl, M., Eßlinger, M., Rehbein, V., Steinle, E., 2017).

In de pilot is het concept van continufiltratie met een filtervulling van granulair actief kool onderzocht voor de verwijdering van microverontreinigingen. Daarbij zijn de volgende aanvullende condities gecreëerd:

- Het introduceren van een gecontroleerde biologische activiteit in de reactor door het inbrengen van fijne luchtbelletjes onderin het filtermedium door middel van een beluchtingsnet. Hiermee wordt biologische groei in het filterbed bevorderd, waardoor de standtijd van de kool tussen twee regeneraties verlengd kan worden.
- Het realiseren van een simultane verwijdering van fosfaat door middel van een coagulant dosering in de toevoer naar de reactor. Vlokvorming en vlokverwijdering vinden plaats in de filterreactor en opgelost fosfaat wordt verwijderd. Met als doel invulling te geven aan de KRW doelstellingen voor sommige afvalwaterzuiveringen.

### 1.3 ONDERZOEKSVRAGEN

De haalbaarheidsstudie heeft inzicht gegeven in de potentie van biologische GAK continufiltratie en geleid tot een onderbouwing van de potentie ervan ten opzichte van de huidige bewezen technieken voor de verwijdering van microverontreinigingen uit afvalwater. In de

pilot is onderzoek uitgevoerd om antwoorden te krijgen op een aantal vragen, die hieronder zijn samengevat in hoofdzaken (verwijdering van microverontreinigingen) en bijvangst (simultane fosfaatverwijdering).

**Hoofdzaken:**

- Kunnen we voldoende specifieke biomassa ontwikkelen in de GAK reactor, om daarmee de regeneratiefrequentie van de GAK van 24 - 30 maanden (28.000 – 35.000 BV) 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 met een beperkte doorlooptijd van de proefperiode, is hoe we de biologische invloed kunnen kwantificeren over de looptijd van de proef.

**Bijvangst:**

- Is de combinatie vlokingsfiltratie (voor P-verwijdering) en de verwijdering van microverontreinigingen mogelijk en haalbaar?
- 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?

#### 1.4 PILOT EMMEN

De pilot bestaat uit een reactor met een inhoud van 1,7 m<sup>3</sup> granulair actief kool en een filteroppervlak van 0,7 m<sup>2</sup>. De installatie bestaat uit de volgende onderdelen:

- BIO-GAK reactor met een koolinhoud met geïntegreerd beluchtingsnet en spoelinrichting voor het filtermedium; in combinatie met het beoogde voedingsdebiet is de gemiddelde EBCT circa 30 minuten.
- Meet- en regelapparatuur voor het besturen van de installatie, remote monitoring.
- Voorbehandeling van het te behandelen effluent om deeltjes van 2 mm of groter effectief te verwijderen. In aanvang is gebruik gemaakt van een inline filter, later is gebruik gemaakt van een trommelzeef met maaswijdte van 50 µm maaswijdte, als voorbehandeling voor de pilot.
- Regeling en monitoring van de spoelcyclus reactor.
- Doseervoorzieningen voor coagulant-dosering (opslag en doseerpompen, doseerregeling).
- Monsternamen voorzieningen.

De schaalgrootte van de pilot is zo gekozen dat opschaling naar grotere capaciteiten op demonstratieschaal goed kan plaatsvinden.

#### 1.5 PILOT AARTSELAAR (AQUAFIN)

Op RWZI Aartselaar is een met Emmen vergelijkbare pilot opgesteld. Deze pilot wordt bedreven door Aquafin. De resultaten zijn gedurende de proefperiode uitgewisseld en kennis en kunde is gedeeld. De resultaten van deze pilot worden separaat gerapporteerd door Aquafin.

## 1.6 LEESWIJZER

In dit rapport wordt verslag gedaan van het pilotonderzoek. Met de volgende leeswijzer:

- Hoofdstuk 2 beschrijft de pilotinstallatie, de onderzoeksopzet, de methodes en materialen.
- Hoofdstuk 3 presenteert de resultaten van het onderzoek en de conclusies, die uit het onderzoek kunnen worden getrokken.
- In hoofdstuk 4 wordt de inpassing van de technologie in de Nederlandse zuiveringspraktijk uitgewerkt, gebaseerd op de criteria zoals vastgelegd in het Innovatieprogramma. Het ontwerp van de installatie op volle schaal vormt de basis voor de lay-out, CO<sub>2</sub> voetafdruk en de kostenberekeningen.
- Hoofdstuk 5 bevat de conclusies en aanbevelingen.
- Een uitgebreide referentielijst is opgenomen in hoofdstuk 6, daarbij zijn voor de volledigheid ook de referenties, zoals gebruikt in de haalbaarheidsstudie, opgenomen.

## 1.7 PARTNERS IN HET ONDERZOEK

In tabel 1.7.1 zijn de partners en hun rol in het project weergegeven.

TABEL 1.7.1 PARTNERS IN HET ONDERZOEK

Partner	Onderdeel van	Rol in project
Waterschap Vechtstromen	Projectgroep	Penvoerder, proeflocatie, partner in onderzoek
NieuWater	Projectgroep	Partner in onderzoek
RWB Water	Projectgroep	Realisatie van de proefinstallatie, partner in onderzoek
Brightwork	Projectgroep	Realisatie van de proefinstallatie, partner in onderzoek Projectleiding en rapportage
Waterschap Rijn en IJssel	Klankbordgroep	Klankbord
Waterschap Drents Overijsselse Delta	Klankbordgroep	Klankbord
Waterschapsbedrijf Limburg	Klankbordgroep	Klankbord
Waterschap Vallei & Veluwe	Klankbordgroep	Klankbord
Aquafin	Klankbordgroep	Klankbord, simultaan onderzoek RWZI Aartselaar

# 2

## ONDERZOEK EN UITVOERING

### 2.1 BESCHRIJVING VAN DE PROEFINSTALLATIE

#### 2.1.1 P&ID

De P&ID van de proefinstallatie is in bijlage 2 opgenomen. In dit hoofdstuk vindt een gedetailleerde beschrijving plaats van de installatie en de onderdelen ervan. De installatie bestaat in hoofdlijnen uit de volgende componenten:

- Voedingspomp van RWZI effluent naar de filterinstallatie
- Voorbehandeling van het RWZI effluent (trommelzeef)
- Continufilter installatie, gevuld met granulair actief kool
- Opslag en doseervoorziening van coagulant

Een foto van de opstelling van de installatie, naast de proefopstelling van BODAC is hieronder weergegeven in figuur 2.1.1.

FIGUUR 2.1.1 PILOT OPSTELLING RWZI EMMEN



#### 2.1.2 VOEDING EN VOORBEHANDELING

De voedingspomp wordt gebruikt voor het voeden van het continufilter met effluent van de RWZI. In eerste instantie (periode medio 2022 – eind 2022) werd het effluent rechtstreeks in het filter gevoerd vanuit de effluentput (zie figuur 2.1.2). De voedingspomp schakelde af bij Laag-Laag nivo in de effluentput. Dit gebeurde vooral in periodes van droogte. Hierdoor is met enige regelmaat de aanvoer naar de proefinstallatie onderbroken. Aanpassingen aan de regeling en verplaatsen van de voedingspomp heeft hierin verbetering gebracht.

FIGUUR 2.1.2 EFFLUENTPUT, VOEDING PILOT BIO-GAK



FIGUUR 2.1.3 VERVUILING ZEEFKORF



In de toevoerleiding naar de filterinstallatie is in eerste instantie voorzien in twee in serie geschakelde zeefkorven, ter bescherming van de installatie tegen grove delen. In de praktijk bleek op beide korven bovenmatige slibophoping plaats te vinden, waardoor zeer regelmatig een handmatige reiniging moest plaats vinden om de installatie operationeel te houden. Figuur 2.1.3 illustreert de aangroei van organisch materiaal op de zeefkorf na enkele dagen voeding.

Deze situatie is vooral toe te schrijven aan de wijze waarop de installatie wordt gevoed. De pompinstallatie staat opgesteld op de vloer van de pompput, achter de nabezinktanks. Uit dezelfde pompput wordt water aangezogen voor de BODAC pilot. Aangezien de BODAC pilot preferent wordt gevoed, is het schakelnivo voor de voedingspomp naar de bio-GAK pilot vrij laag. Dit betekent dat veel vaste stof wordt aangezogen uit de pompput. Dit leidt tot overmatige aangroei, zoals gesignaleerd. Dit betekent ook dat voeding naar de bio-GAK pilot met enige regelmaat wordt onderbroken.

Gedurende de onderzoeksperiode is ruimte ontstaan in de capaciteit van de trommelzeef van de BODAC pilot en is besloten - om de situatie praktisch te verbeteren - om het effluent van de trommelzeef te gebruiken voor de voeding van de bio-GAK pilot.

Vanaf december 2022 is de voeding van de proefinstallatie omgeleid van het RWZI effluent naar het filtraat van de trommelzeef. Deze trommelzeef is uitgerust met een maaswijdte van 50 micron en wordt hydraulisch belast met een oppervlaktebelasting van circa 10 m/h.

De trommelzeef is uitgerust met nivosensors. Bij hoog nivo wordt de spoeling geactiveerd en wordt de zeef gereinigd door middel van een sproeiarm met nozzles.

In normaal bedrijf wordt een vast voedingsdebiet van 4 m<sup>3</sup>/h naar de pilot gepompt. In de aanvoerleiding is een debietsmeting opgenomen en een regelafsluiter. Hiermee wordt de installatie steeds met het gewenste debiet gevoed en vindt bijregeling plaats met de regelafsluiter.

Als het nivo in de voedingspompput te laag is, schakelt de voedingspomp automatisch uit. In dat geval wordt de luchttoevoer naar het continufilter onderbroken door het dichtsturen van de luchtafsluiter AV-004 in het pneumatisch paneel. Na opstart van de voedingspomp wordt automatisch de luchtafsluiter AV-004 met een vertraging open gestuurd en vindt de koolcirculatie en -wassing weer plaats.

De verstoppingsproblematiek en de inzet van de trommelzeef hangt samen met de specifieke omstandigheden van de pilot. Voor de normale praktijk is de inzet van een trommelzeef niet noodzakelijk, maar kan volstaan worden met een eenvoudiger voorzeving voor de verwijdering van grove delen.

### 2.1.3 CONTINUFILTER INSTALLATIE

De filterinstallatie is uitgerust met granulair kool, type Norit 830, korrelgrootte 0,60 – 2,36 mm. Deze koolsoort is geselecteerd vanwege de hardheid, de goede adsorptie eigenschappen en de ervaring die ermee is opgedaan op andere locaties, waaronder in de ULTRAPUURWATER fabriek van Emmen.

De filterreactor heeft een bed volume van 1,7 m<sup>3</sup>. Het filter wordt opwaarts doorstroomd met een constant debiet van 4 m<sup>3</sup>/h, zodat de corresponderende filtratiesnelheid 5,7 m/h is. De empty bed contact tijd (EBCT) bedraagt 26 minuten.

### 2.1.4 ACTIEF KOOL

Actief koolfiltratie is een zuiveringstechniek die gebaseerd is op adsorptie. Door de fysische eigenschappen van actief kool is deze in staat om een breed scala aan organische microverontreinigingen, waaronder medicijnresten, door middel van adsorptie uit het afvalwater te verwijderen. De mate van adsorptie van componenten aan de kool hangt af van de volgende eigenschappen:

- adsorptie eigenschappen van componenten, zoals de hydrofobiciteit (log Kow waarde);
- het type kool, zoals de fysieke vorm, de lading, de aanwezigheid van micro-, meso- en macroporiën, het adsorptie-oppervlak en het basismateriaal waaruit de kool is vervaardigd;
- de verhouding hydrofobe/hydrofiele componenten;
- de beschikbaarheid/concentratie van componenten;
- de aanwezigheid van concurrerende stoffen, zoals opgelost organisch koolstof (DOC).

Als vergaande verwijdering van microverontreinigingen gewenst is, moet de kool normaal gesproken na circa 8.000-15.000 BV (7 – 13 maanden) vervangen worden.

Door de beluchting in de koolkolom wordt aanvullend een biologische omzetting geactiveerd. Bij biologische actief koolfiltratie ontwikkelt zich een biofilm op het actief kool, waardoor uiteindelijk de biodegradatie dominant wordt en, als gevolg van verzadiging van de actief kool, adsorptie nauwelijks meer een rol speelt. Hoe effectief biodegradatie en bioregeneratie verloopt hangt af van vele factoren, onder andere:

- Omkeerbaarheid van de adsorptie van de stoffen;
- Mogelijkheid om de geadsorbeerde stoffen biologisch af te breken;
- Het vermogen van de microbiologische populatie om de substraten biologisch af te breken;
- De aanwezige microverontreinigingen;
- De aanwezige opgeloste biomassa in het actief koolfilter.

De biologische afbraak is, onder de juiste omstandigheden, een oneindig proces (in tegenstelling tot adsorptie). Hierdoor kan biologische activiteit de standtijd van de actief kool verlengen.

De zuurstofdosing, waarmee de biologische afbraak wordt gestimuleerd, vindt plaats door middel van een beluchting in de koolkolom, waarbij er naar gestreefd wordt om voldoende zuurstof over te houden om aerobe condities in het filterbed te waarborgen. Zuurstofmetingen in het bovenstaande water moeten dat aantonen.

#### 2.1.5 COAGULANT DOSERING

In de toevoer naar het continu filter kan 40%-FeClSO<sub>4</sub> oplossing worden gedoseerd ten behoeve van de fosfaatverwijdering. Hiervoor is een IBC opslag voorzien en een doseerpomp. De doseerpomp wordt in de besturing ingesteld op een vast debiet, waarmee de gewenste dosering kan plaatsvinden. Uitgaande van een opgelost fosfaat concentratie in het effluent van de RWZI in de orde van 0,5 – 0,8 mg/l P, wordt een molaire Fe/o-P dosering van 2 – 6 toegepast. Dosing vindt plaats op een statische menger, zodat een instantane menging plaatsvindt. De vlokvorming en vlokverwijdering vindt plaats in de filterkolom.

#### 2.1.6 PERSLUCHTVOORZIENING

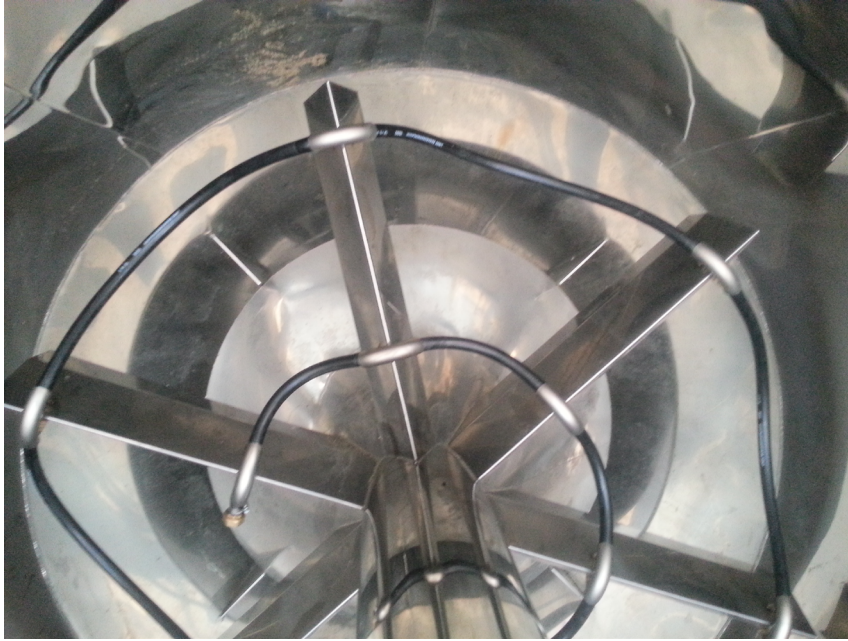
De installatie maakt gebruik van perslucht, dat wordt afgenomen van het persluchtsysteem van de Ultrapuurwaterfabriek. Perslucht (minimale persluchtdruk 5 bar) is aangesloten op de pneumatische regelkast, die is voorzien van een drukreducer, gestuurde luchtafsluiters en rotameters voor de aflezing van de afgenomen luchtdebieten. Perslucht wordt gebruikt ten behoeve van:

- De circulatie van de kool in de reactor, door luchtinjectie op de airlift. De hoeveelheid perslucht, nodig voor de koolcirculatie is gering: in de orde van 0,8 – 1,2 N-liter per minuut.
- De beluchting van het koolbed, door luchtinjectie op de luchtslang (Lindeslang) die is gemonteerd in het filterbed ter hoogte van de instroom van het water in de reactor, zie figuur 2.1.4. De luchtbelletjes migreren door het koolbed en zorgen voor zuurstofrijke condities ten behoeve van de biologische groei. De hoeveelheid ingebrachte lucht kan worden gevarieerd, en ligt in de orde van grootte van 6 – 20 N-liter per minuut. Naast de Linde slang voor de beluchting in het kool bed is de mogelijkheid aanwezig om lucht in te brengen door middel van een RVS beluchtingsnet met lucht-slits.

In de praktijk is de inbreng van lucht in het filterbed getest met beide systemen. Geconcludeerd is dat het systeem met de Linde slangen het best voldeed. Dat systeem is verder gebruikt voor de luchtinbreng.



FIGUUR 2.1.4 LUCHTINBRENGSYSTEEM DOOR MIDDEL VAN LINDE SLANGEN



Tijdens de proeven is gebleken dat de luchtinbreng voor de koolcirculatie kritisch is: bij kleine variaties in weerstandsopbouw loopt de luchtinbreng terug en kan de circulatie worden onderbroken. Om dit te verbeteren is tussentijds een regeling geïmplementeerd, waarbij het setpoint voor het luchtdebiet naar de airlift wordt ingesteld en de regeling erin voorziet dat dat setpoint wordt vastgehouden. Deze regeling heeft goed gefunctioneerd.

#### 2.1.7 INTERMITTERENDE KOOLWASSING

De proefinstallatie is ook uitgerust met een intermitterende wassing van het kool. Dit houdt in dat het filterbed niet continu wordt gecirculeerd en gewassen, maar periodiek, dus bijvoorbeeld 5 minuten circulatie/wassing en 10 minuten geen circulatie/wassing. De tijdintervallen kunnen daarbij worden aangepast in functie van de weerstandsopbouw over het filterbed. Voor deze intermitterende wassing is het filter uitgerust met een gestuurde afsluiter in de waswaterafvoer en een regeling van de aansturing van de luchtafsluiter in het pneumatisch paneel.

#### 2.1.8 KOOLVANG

De proefinstallatie is voorzien van een extra beveiliging tegen uitspoeling van kooldeeltjes, in zowel de waswaterafvoer als de filtraatafvoer. In beide gevallen is voorzien in een buffervat met overstortvoorziening, waarin eventueel uitgespoelde kooldeeltjes tot bezinken worden gebracht en niet met het waswater of filtraat weggespoeld worden. Deze voorzieningen zijn bedoeld om te voorkomen dat bij extreme procesomstandigheden tijdens de proefperiode het kool bed verloren gaat. Een dergelijke extreme omstandigheid kan zijn het toepassen van een zeer hoge luchtbelasting. Bij de realisatie van een full scale installatie zullen die extreme procesomstandigheden niet aan de orde zijn, zodat uitspoeling niet aan de orde is.

De eventuele uitspoeling van kooldeeltjes is tijdens de proef gemonitord door meting van de effectieve bed hoogte in de reactor.

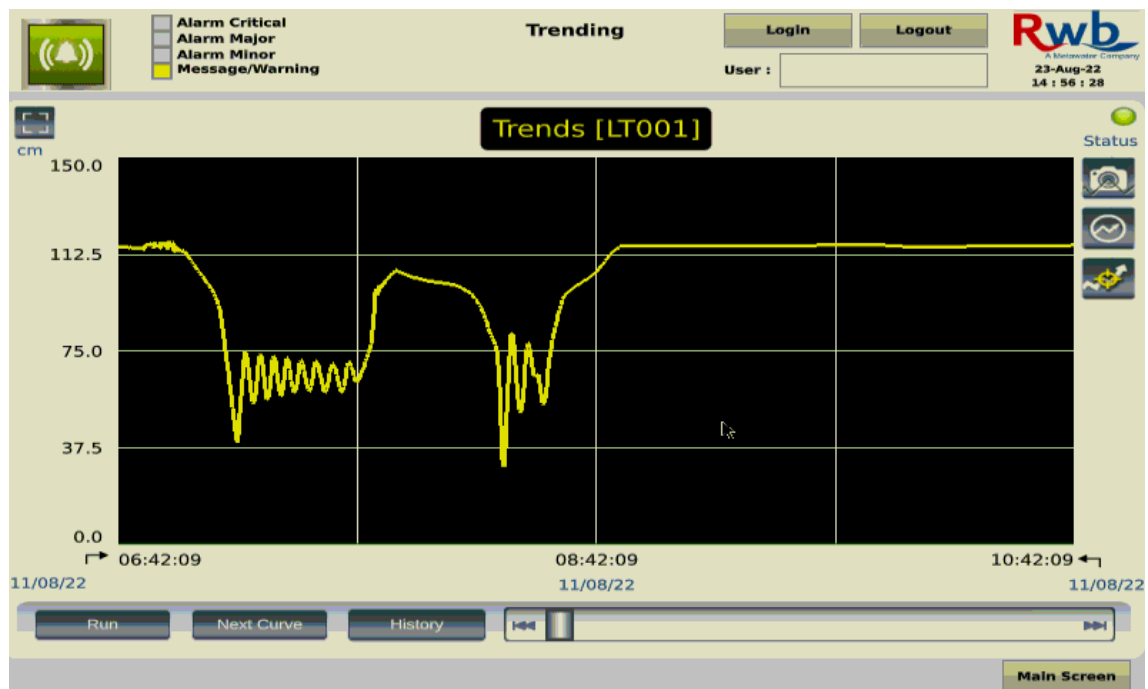


### 2.1.9 MEET-EN REGELSYSTEEM

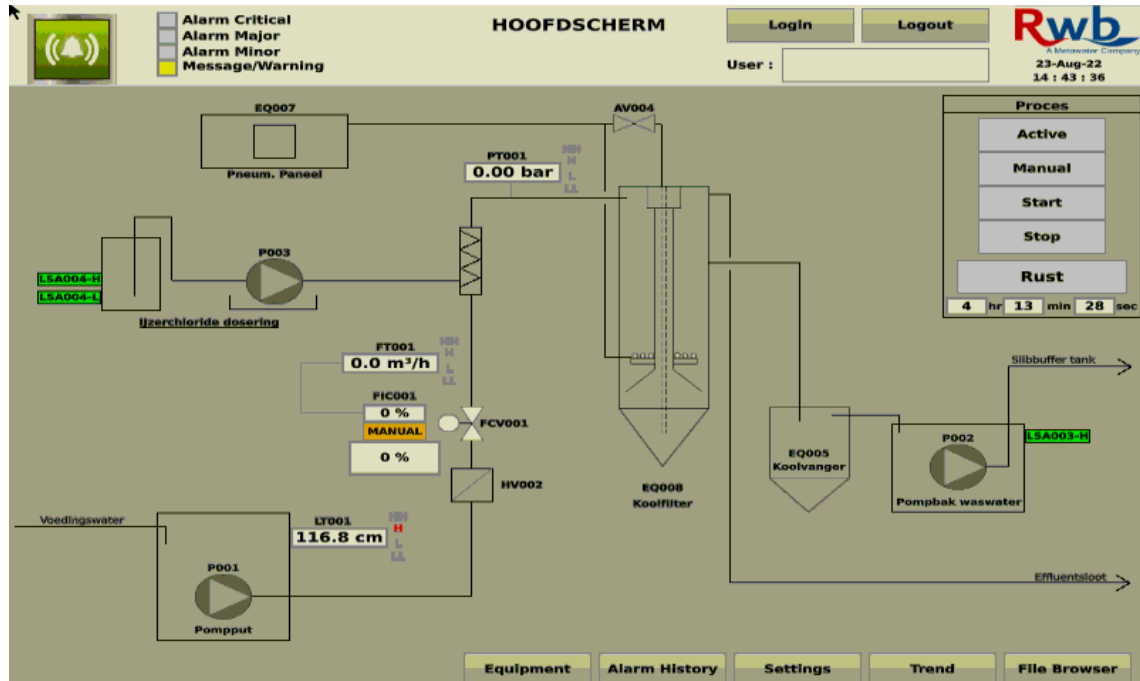
De installatie is voorzien van de nodige automatische regelingen en metingen waarmee een constant bedrijf kan worden gerealiseerd en tevens de relevante parameters kunnen worden gelogd. De volgende dashboards zijn gebruikt:

- De trendlijnen van de volgende parameters:
  - Ammonium-N in effluent van de RWZI (geïmplementeerd vanaf eind 2022)
  - Nivo meting in effluentbuffertank (ter beveiliging tegen droogloop voedingspomp (zie figuur 2.1.5))
  - Drukhoogte in toevoerleiding van de reactor (als maat voor de actuele filterbedweerstand, en alarmering voor eventuele te hoge filterbed weerstand)
  - Debietsmeting van de toevoer naar de reactor.
- De actuele instellingen van de installatie (zie screenshot, figuur 2.1.6):
  - Debietsmeting
  - Klepstand in toevoerleiding naar reactor
  - Dosering coagulant
- De circulatie van het filtermedium (Sand-Cycle) (zie screenshot, figuur 2.1.7):
  - Filterhomogeniteit
  - Actief bed volume
  - Gemiddelde circulatiesnelheid en bandbreedte

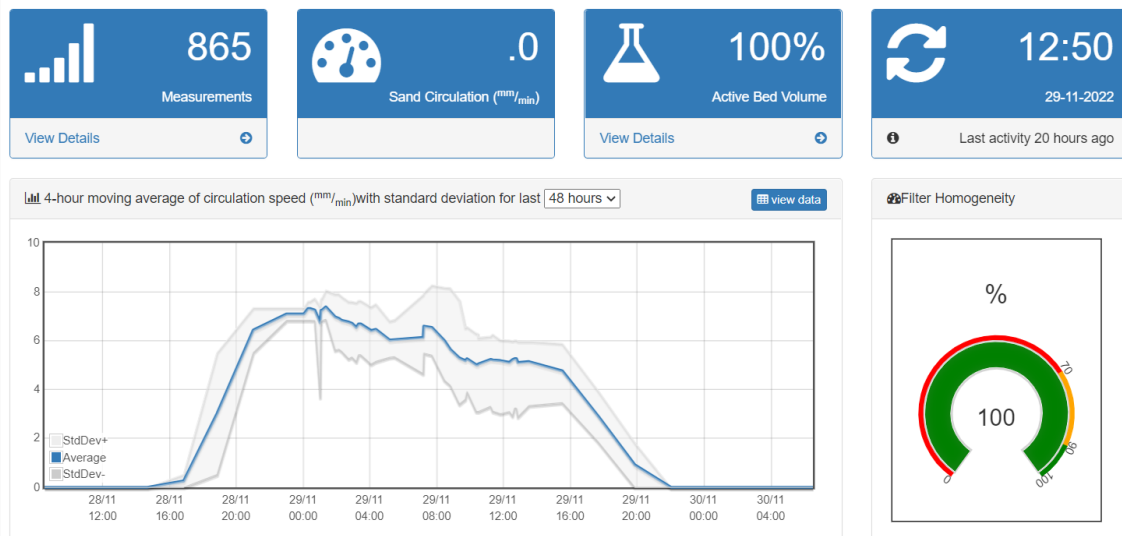
FIGUUR 2.1.5 TRENDLIJN NIVOMETING IN AANVOERPUT PILOT



FIGUUR 2.1.6 DASHBOARD PILOT MET RELEVANTE ONLINE METINGEN



FIGUUR 2.1.7 DASHBOARD MEDIUM CIRCULATIE (SAND-CYCLE.COM)



### 2.1.10 AANPASSINGEN ONTWERP FILTER INTERNALS

Twee belangrijke processen die continu filtratie mogelijk maken zijn:

- transport van verontreinigd filtermateriaal vanuit de conus onderin het filter via de airlift naar de wasinrichting
- wassing en scheiding van granulair kool en verontreinigingen in de wasinrichting.

De standaard filtervulling voor een continu filter is filterzand. De soortelijke massa hiervan is  $2.600 \text{ kg/m}^3$ . De toegepaste korrelafmetingen liggen doorgaans tussen 1 en 2,5 mm. Toepassing van granulaire actieve kool met een veel lagere soortelijke massa – ca.  $1.500 \text{ kg/m}^3$  heeft effect op de werking van de airlift en wasinrichting.

Vanwege de lagere soortelijke massa zal de transportsnelheid van actieve kool in de airlift hoger zijn dan die van zandkorrels; daarom kan de airlift kleiner zijn, en de luchtinjectie lager.

In de wasinrichting bezinken en vallen de korrels weer schoon op het filterbed. Door de opwaartse filtraatstroom door de wasinrichting worden verontreinigingen meegevoerd en afgevoerd als waswater. De filterkorrels moeten goed bezinken in de wasinrichting; de kool korrels met veel lagere dichtheid zullen minder snel bezinken. Ophoping van korrels in de wasinrichting of zelfs uitspoeling van kooldeeltjes met het waswater moet worden voorkomen en vraagt aanpassing van de wasinrichting. In het onderzoek is ruim aandacht besteed aan het ontwerp en het testen van de airlift en de wasinrichting.

## 2.2 MATERIALEN EN METHODES

### 2.2.1 VERWIJDERING GIDSSTOFFEN

De verwijdering van gidsstoffen is bepaald met behulp van monitoring van influent en effluent van de Bio-GAK pilotinstallatie. Daarnaast is ook het influent van de RWZI bemonsterd, met in acht name van de verblijftijd in de zuivering. Dat wil zeggen dat het influent van de RWZI 55 uur eerder wordt bemonsterd dan het influent en effluent van de pilot. Voor de werkwijze van de bemonstering en analyse wordt de instructie gevolgd zoals vastgelegd in (STOWA, 3 april 2020). Deze stromen zijn - voor zover mogelijk - maandelijks bemonsterd door middel van tijd-proportionele bemonstering tijdens periodes van DWA. De bemonstering en analyse van de 11 gidsstoffen en 8 kandidaat gidsstoffen is uitgevoerd door Aqualysis.

### 2.2.2 ECOTOXICOLOGIE

De verlaging van de ecotoxicologische druk op oppervlaktewater door lozing van RWZI effluent is inzichtelijk gemaakt door biologische effectmetingen en LC-MS screening. Tijdens de onderzoeksperiode zijn elk kwartaal biologische effectmetingen uitgevoerd op RWZI effluent en het effluent van de pilotreactor. De monsternamen en metingen worden uitgevoerd conform (STOWA, 3 april 2020). Onder regie van Aqualysis worden door Waterproef en BDS verschillende effectmetingen uitgevoerd: Daphniatox, Microtox, PAH-Calux, ER-Calux, PXR-Calux en GR-Calux.

De monsters waarin biologische effectmetingen worden uitgevoerd, worden tevens door Water Lab Noord (WLN) gescreend met LC-MS. Deze screening levert per monster een omvangrijk aantal organische microverontreinigingen op die op basis van molecuulmassa van elkaar kunnen worden onderscheiden, maar waarvan de identiteit (naam) onbekend kan zijn (Non Target Screening – NTS). Door de chromatogrammen van de verschillende monsters onderling te vergelijken, kan een uitspraak worden gedaan over de toe- of afname van bepaalde componenten. Hiermee wordt een beeld verkregen van de verwijdering van een breed scala organische microverontreinigingen en, in het verlengde daarvan, een indicatie van (de afname van) ecotoxicologische druk.

### 2.2.3 ALGEMENE PARAMETERS

Maandelijks zijn de volgende standaard analyses uitgevoerd op het RWZI effluent (influent pilot) en het effluent van het bio-GAK filter: troebelheid, onopgeloste bestanddelen, DOC, N-kj, NH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, t-P en ATP. Deze analyses zijn uitgevoerd door WLN.

# 3

## RESULTATEN

### 3.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk worden de resultaten gerapporteerd en vindt een nadere evaluatie plaats. Niet alle resultaten zijn in dit hoofdstuk opgenomen, vanwege de leesbaarheid. De resultaten die niet zijn opgenomen in de hoofdtekst zijn weergegeven in de bijlagen:

- Bijlage 3: Verwijderingsrendementen gidsstoffen;
- Bijlage 4: LC-MS screening;
- Bijlage 5: Per individuele gidsstoffen concentraties in influent RWZI, effluent RWZI en filtraat pilot gedurende het onderzoek.

### 3.2 RESULTATEN GIDSSTOFFEN EN KANDIDAAT GIDSSTOFFEN

#### 3.2.1 INLEIDING

Er zijn 13 vierwekelijkse metingen (september 2022 t/m augustus 2023) van gidsstoffen bekend, waarop de hier gepresenteerde resultaten zijn gebaseerd. Bij de bespreking van de resultaten maken we telkens onderscheid in drie groepen van microverontreinigingen:

- de groep van alle microverontreinigingen, 19, waarvan 11 gidsstoffen en 8 kandidaat gidsstoffen;
- de groep van 11 gidsstoffen;
- de top 7 van best verwijderde gidsstoffen.

Daarnaast zijn de resultaten zowel gerelateerd aan het influent van RWZI Emmen (voor zover dit is gemeten), als aan het influent van het pilotfilter.

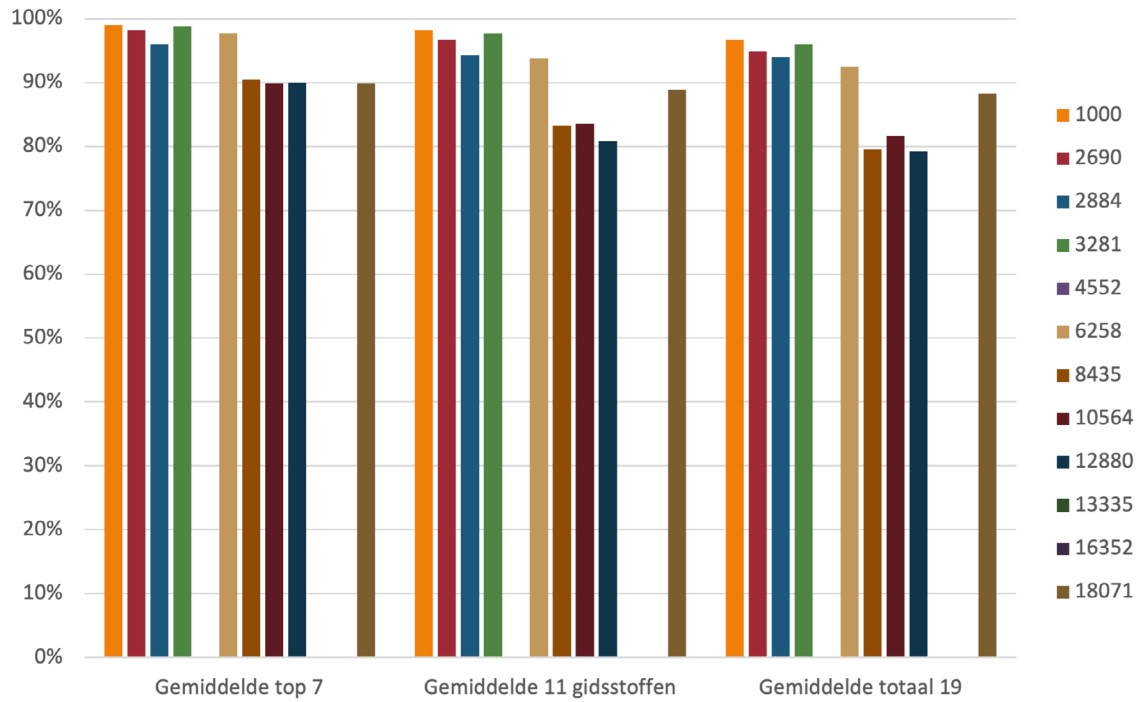
#### 3.2.2 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN

Figuur 3.2.1 laat de gemiddelde verwijderingsrendementen zien voor de top 7 gidsstoffen, de 11 gidsstoffen en de 19 (kandidaat)gidsstoffen, voor de metingen vanaf september 2022 (1.000 BV behandeld) tot en met augustus 2023 (18.071 BV behandeld), gerelateerd aan het influent van de zuivering. Enkele metingen van het influent van de RWZI zijn niet gemeten vanwege regenweercondities. Dit betreft de metingen van januari, juni en juli 2023 met respectievelijk 4.552 BV; 13.335 BV en 16.352 BV.

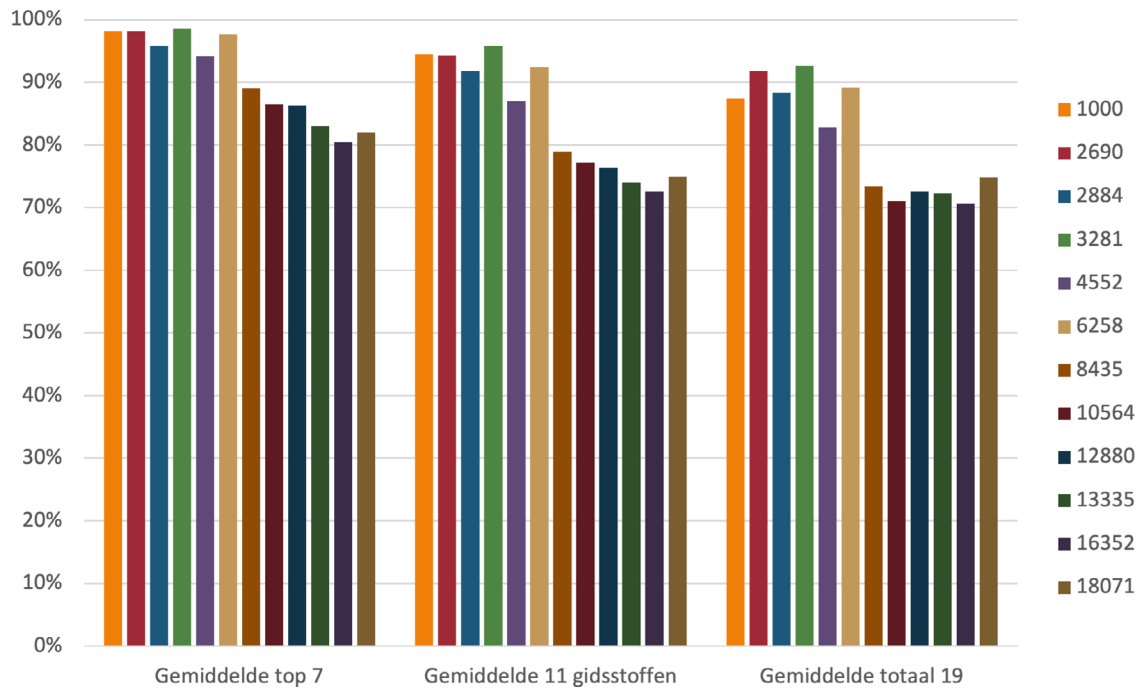
Figuur 3.2.2 laat hetzelfde zien, nu gerelateerd aan het verwijderingsrendement over de bio-GAK pilot.

Eind augustus 2023 (18.671 BV) heeft een meting plaatsgevonden tijdens een storing aan het filter. Door een verstopping is het filterbed stilgevallen, met als gevolg kortsluitstroming en een zeer korte EBCT. De verwijderingsrendementen voor de (kandidaat) gidsstoffen zijn hiermee niet representatief en verder buiten beschouwing gelaten. De meting is overgedaan, maar de resultaten zijn nog niet beschikbaar.

**FIGUUR 3.2.1 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VAN 19 GIDSSTOFFEN BEPAALD OVER DE RWZI + BIO-GAK VERSUS VERWERKTE AANTAL BV'S**



**FIGUUR 3.2.2 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN 19 GIDSSTOFFEN BEPAALD OVER BIO-GAK PILOT VERSUS HET AANTAL BEHANDELDE BV'S**



**VERWIJDERINGSRENDEMENT GEMIDDELTE TOP 7 GIDSSTOFFEN**

Het gemiddelde van de verwijderingsrendementen van de top 7 gidsstoffen is van september 2022 tot augustus 2023 (18.071 BV) langzaamaan gedaald van 99% naar 90% verwijdering ten opzichte van de influentwaarden van RWZI Emmen (figuur 3.2.1).

Gerelateerd aan het effluent van de RWZI (voeding bio-GAK) is het verwijderingsrendement gedaald van 98% in het begin van het onderzoek tot 83% bij 18.071 BV, zie figuur 3.2.2. Na een aanvankelijke daling lijkt het verwijderingsrendement in de periode vanaf 13.000 BV te stabiliseren. Bij de meting bij 18.071 BV is de influent concentratie van de pilot overigens duidelijk lager dan voorheen, terwijl het rendement is verbeterd.

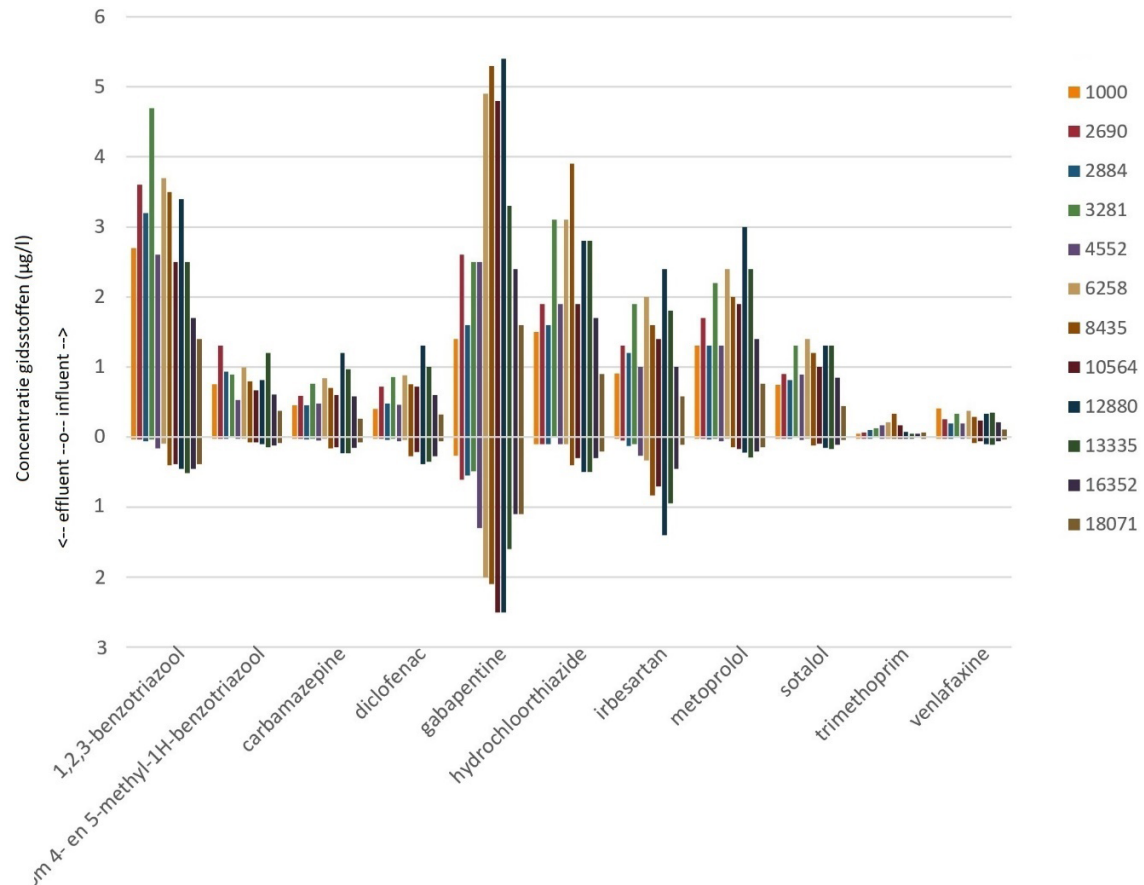
Tabel 3.2.1 geeft het overzicht van de parameters die behoren tot de top 7 gidsstoffen per meting. Er zijn vijf stoffen, die (bijna) elke meting tot de top 7 behoren: 1,2,3-benzotriazool, som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool, carbamazepine, metoprolol, sotalol. Gedurende het eerste deel van het onderzoek (tot en met 3.281 BV) behoorde venlafaxine tot de top 7 van de gidsstoffen. Twee andere stoffen (hydrochloorthiazide en trimethoprim) behoren juist vanaf een later tijdstip in het onderzoek tot de top 7 best verwijderde gidsstoffen.

**TABEL 3.2.1 TOP 7 GIDSSTOFFEN PER METING, BETROKKEN OP HET INFLUENT VAN DE PILOT**

aantal Bed Volumina (BV)	1.000	2.690	2.884	3.281	4.552	6.258	8.435	10.564	12.880	13.335	16.352	18.071
gemiddeld												
verwijderingsrendement top 7	98%	98%	96%	99%	94%	98%	89%	87%	86%	83%	80%	82%
EBCT (minuten)	27	27	24	24	23	22	21	18	18	17	23	24
1,2,3-benzotriazool	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
carbamazepine	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
diclofenac		X		X		X						X
gabapentine												
hydrochloorthiazide			X		X	X	X	X	X	X	X	X
irbesartan	X											X
metoprolol	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
sotalol	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
trimethoprim					X		X	X	X	X	X	X
venlafaxine	X	X	X	X								

Figuur 3.2.3 laat de concentraties van de 11 gidsstoffen per meting in de toevoer naar de pilot zien. Voor een aantal stoffen uit de top 7, diclofenac, trimethoprim en venlafaxine zijn deze concentraties erg laag.

FIGUUR 3.2.3 BIO-GAK CONCENTRATIES GIDSSTOFFEN IN DIVERSE MEETCAMPAGNES (PILOT INFLUENT BOVEN EN PILOT EFFLUENT BENEDEN)



#### GEMIDDELDE 11 GIDSSTOFFEN

Het gemiddelde van de verwijderingsrendementen van 11 gidsstoffen – gerelateerd aan het influent van RWZI Emmen - is van september 2022 tot augustus 2023 (overeenkomend met 18.071 BV) aanvankelijk gedaald naar een minimum 81% en vervolgens weer gestegen. In de meting van 18.071 BV is het gemiddelde rendement toegenomen; dit is maar ten dele toe te schrijven aan een verbeterd rendement in de pilot, het grootste deel is toe te schrijven aan een verbeterd rendement in de hoofdzuivering. In de hoofdzuivering wordt bij deze meting een gemiddeld verwijderingsrendement van 48% gemeten, terwijl dit doorgaans 15 – 30% is.

Gemiddelde verwijderingsrendementen van de 11 gidsstoffen beschouwd over de pilot zijn afgenomen van 95% naar 76% en stijgen in de laatste meting weer. De trend is hetzelfde als die van de top 7. Bij de meting van 18.071 BV was sprake van een verbeterd rendement, terwijl de ingaande concentraties naar de pilot lager waren dan de periodes ervoor. Dit zou een aanwijzing kunnen zijn dat stabilisatie optreedt.

#### GEMIDDELDE 19 (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN

De gemiddelde verwijdering van alle 19 gemeten stoffen ten opzichte van het influent van RWZI Emmen is eerst gedaald van 97% naar 79%, daarna gestabiliseerd. In de meting van 18.071 BV is het rendement weer verbeterd tot 88%, zie ook de uitleg hierover bij de evaluatie van de rendementen van de 11 gidsstoffen.

Als alleen naar de prestaties van de bio-GAK pilot wordt gekeken, dan daalde het gemiddelde verwijderingsrendement eerst van 87% naar 73%, maar blijven de rendementen vanaf 8.826 BV redelijk stabiel.

In bijlage 3 zijn de verwijderingsrendementen van de afzonderlijke gidsstoffen verzameld en gepresenteerd in grafiekvorm. Hierbij zijn de rendementen gepresenteerd voor het totaal van RWZI en bio-GAK én de rendementen over de bio-GAK pilot afzonderlijk.

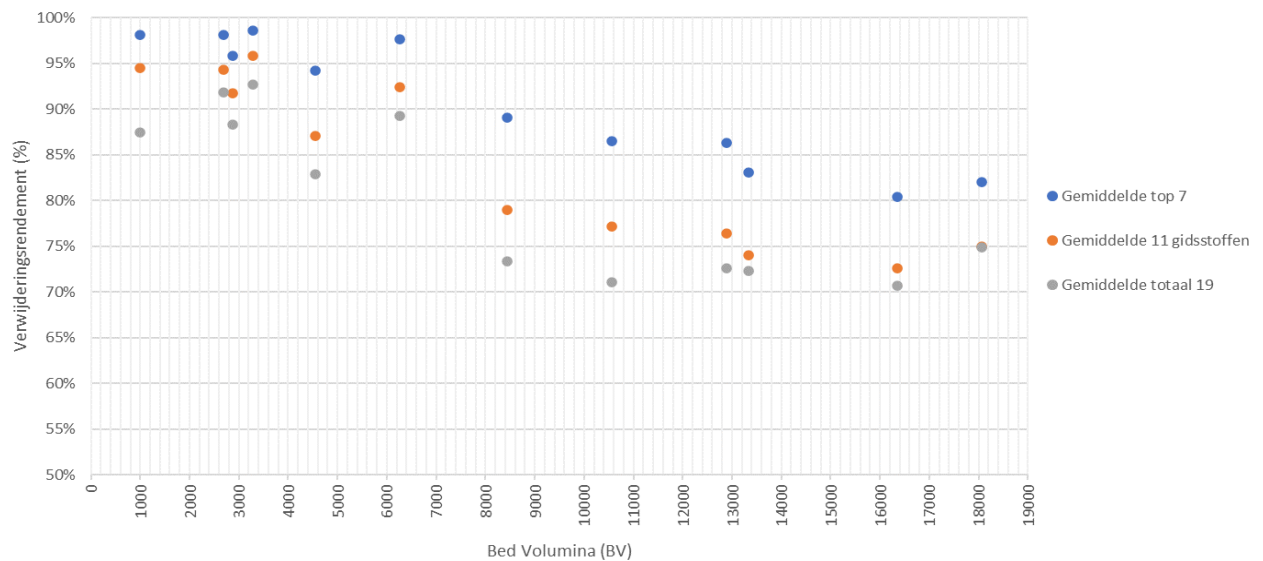
In bijlage 5 zijn ook de concentraties van de stoffen afzonderlijk weergegeven, voor zowel influent RWZI, effluent RWZI en filtraat pilot.

### 3.2.3 RENDEMENTEN VERSUS BEDVOLUME

In figuur 3.2.4 zijn de voorgaande resultaten voor de rendementen van alleen de koolfiltratie uitgezet tegen het bedvolume. Bij de laatste metingen – bij bedvolumina van ca. 11.000 – 18.000 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> lijkt de daling van de verwijdering te stabiliseren, of het rendement zelfs te verbeteren.

Opvallend is dat bij de meting bij 1.000 BV het gemiddelde verwijderingsrendement van de 19 microverontreinigingen relatief gezien een stuk lager lijkt te liggen dan bij de erop volgende metingen. Dit kan worden verklaard door de meting van amisulpride, dat niet tot de groep van de 11 gidsstoffen behoort. De concentratie hiervan in het voedingswater van het filter bedroeg 0,01 µg/l, en in het filtraat < 0,01 µg/l. Aangezien voor de vaststelling van het verwijderingsrendement 0,01 µg/l wordt aangehouden bij de waarde “< 0,01 µg/l” wordt het verwijderingsrendement in dit specifieke geval 0%. Daarmee wordt het gemiddelde verwijderingsrendement voor de 19 stoffen in negatieve zin beïnvloed.

FIGUUR 3.2.4 GEMIDDELDE VERWIJDERINGSRENDEMENT GIDSSTOFFEN VERSUS BEHANDELD BEDVOLUME OVER DE PILOT<sup>1</sup>



De resultaten zoals gepresenteerd in figuur 3.2.4 zijn hieronder nader geëvalueerd.

In de looptijd tot 6.258 BV wordt een min of meer stabiel hoog verwijderingsrendement vastgesteld, toe te schrijven aan de adsorptieve werking van de verse kool. In die periode is de EBCT afgenomen van 27 naar 22 minuten. De afname van de EBCT was het gevolg van het uitspoelen van filtermateriaal, tijdens de proefnemingen.

<sup>1</sup> de verwijderingsrendementen voor het gemiddelde van de 11 gidsstoffen en voor het gemiddelde van 19 (kandidaat) gidsstoffen vallen samen voor 18.071 BV

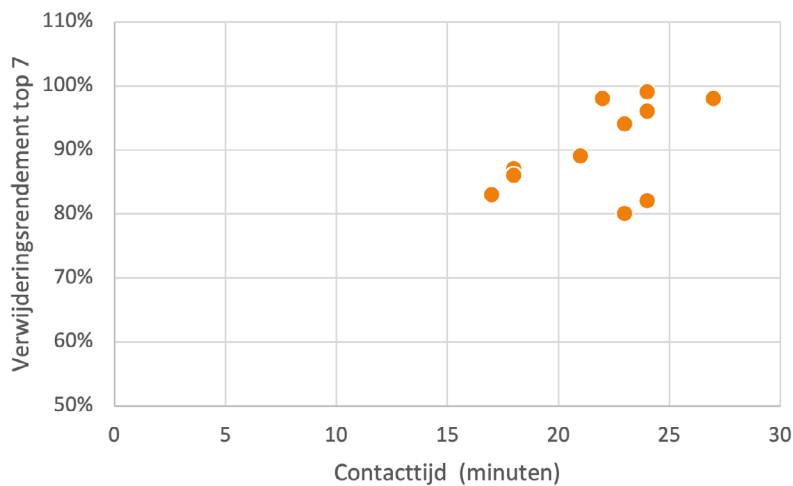


In de periode na 6.258 BV zijn de rendementen afgenomen, maar voor de top 7 stoffen nog steeds boven de grenswaarde van 80% verwijderingsrendement. De combinatie van een meer beladen kool en een verdere afname van de EBCT tot 17 minuten bij 13.335 BV ligt hieraan ten grondslag. De invloed van de parameter EBCT op het verwijderingsrendement is gevisualiseerd in figuur 3.2.5.

In de laatste metingen (bij 16.352 en 18.071 BV) is de EBCT aangepast tot 23 - 24 minuten, zie ook tabel 3.2.1. Bij deze metingen is sprake van een relatief lage influent concentratie voor de diverse gidsstoffen, waardoor een lager rendement verwacht mag worden. Desondanks lijkt sprake van een stabilisering van de verwijderingsrendementen.

Nieuwe metingen zullen moeten aantonen of de stabilisatie van de verwijderingsrendementen zich doorzet.

**FIGUUR 3.2.5 EBCT VERSUS VERWIJDERINGSRENDEMENT GIDSSTOFFEN TOP 7**



### 3.3 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN ALGEMENE PARAMETERS

#### 3.3.1 INLEIDING

Gedurende de proefperiode zijn de 48-uurs monsters, naast de gidsstoffen, ook geanalyseerd op een aantal algemene parameters. De resultaten voor de volgende parameters zijn hieronder nader besproken:

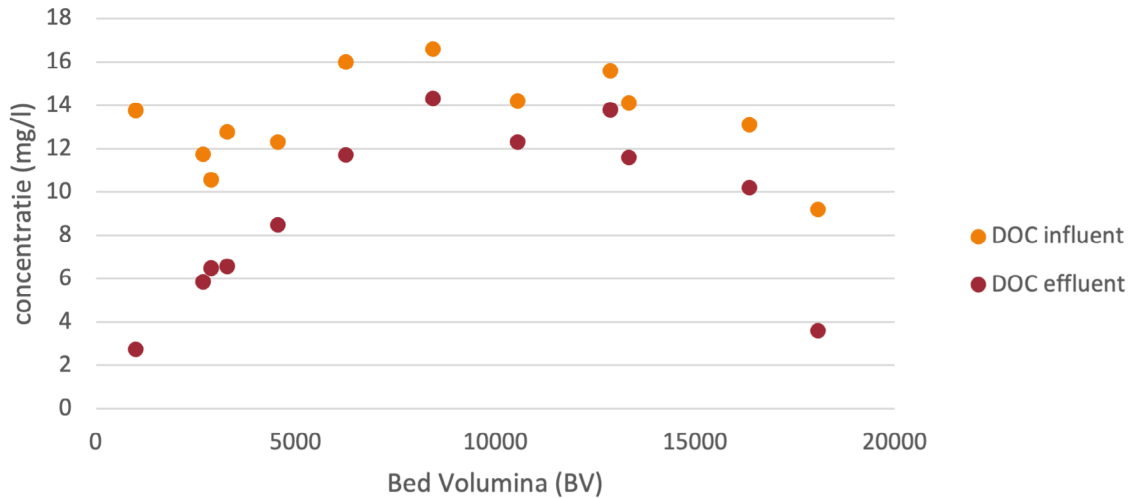
- DOC
- Ammonium-N
- TSS/troebeling
- ATP
- fosfaat

#### 3.3.2 DOC

In figuur 3.3.1 is weergegeven de relatie tussen DOC in voeding en filtraat over de looptijd van de pilot in bed volumina. De voedingsconcentratie DOC ligt in de orde van 10 – 16 mg/l, iets hoger dan hetgeen wordt aangehouden in de gemiddelde samenstelling van RWZI effluent, zie (Mulder, Berekening CO<sub>2</sub> footprint en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit rwzi afvalwater, 28 december 2022). Bij aanvang van het onderzoek en de start met verse kool is de verwijdering van DOC door middel van adsorptie aan het kool hoog. Naarmate de adsorptieplaatsen in het kool worden ingenomen door geadsorbeerd materiaal,

zien we een afname van de verwijdering van ook DOC. Ook hier lijkt de verminderde afname te stabiliseren en weer toe te nemen.

FIGUUR 3.3.1 VERLOOP DOC CONCENTRATIE OVER DE BIO-GAK PILOT IN MG/L ALS FUNCTIE VAN HET BEHANDELDE BV

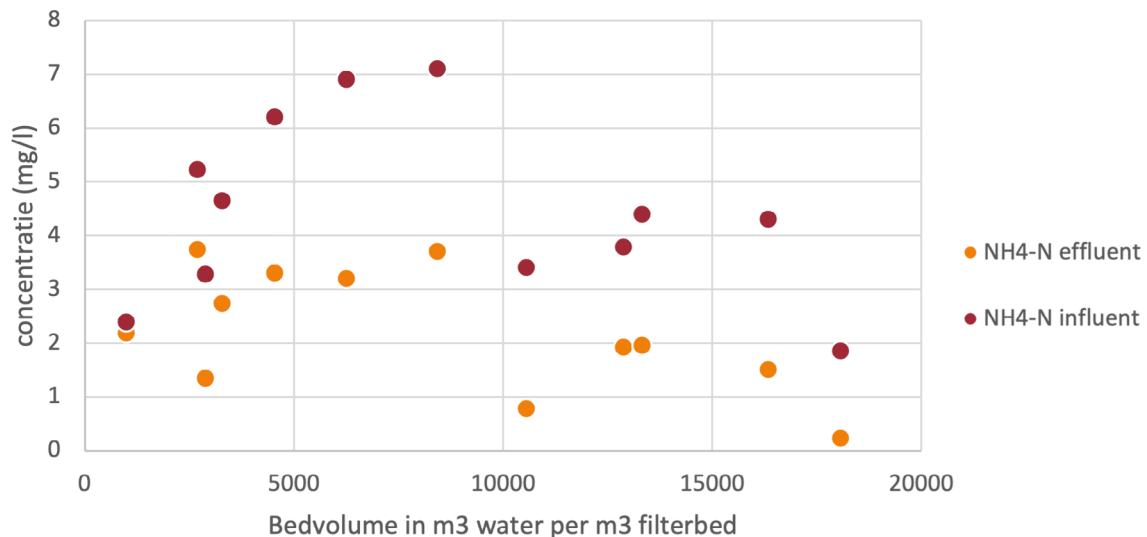


### 3.3.3 AMMONIUM-N

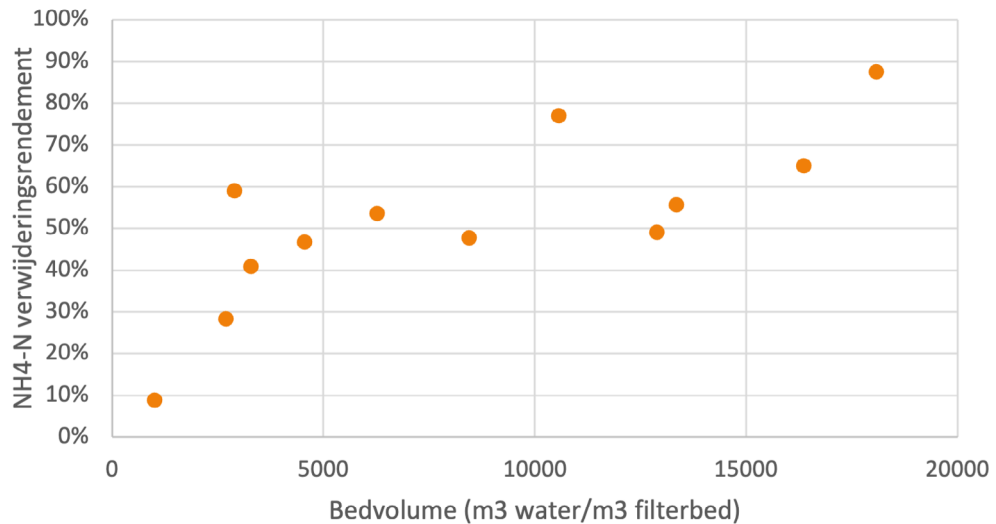
De biologische nitrificatie is gevolgd in de tijd. De nitrificatie is bewerkstelligd door inbreng van zuurstof door middel van beluchting van het filterbed. Nadat de beluchting was ingesteld is de biologische nitrificatie op gang gekomen. In de loop van de tijd is een redelijk stabiele verwijdering van ammonium-N te zien, zie figuur 3.3.2. De verwijdering van ammonium-N is consistent met de toename van de  $\text{NO}_x\text{-N}$  concentratie in het filtraat. In figuur 3.3.3 is het verwijderingsrendement voor ammonium-N weergegeven.

Vanaf 8.000 BV wordt coagulant gedoseerd. Dat heeft geen duidelijk nadelige invloed op de biologische nitrificatie in het filterbed.

FIGUUR 3.3.2 VERLOOP AMMONIUM-N CONCENTRATIE IN VOEDING EN FILTRAAT VAN DE BIO-GAK PILOT IN MG/L ALS FUNCTIE VAN HET BEHANDELDE BV



FIGUUR 3.3.3 VERWIJDERINGSRENDEMENT VOOR AMMONIUM-N IN BIO-GAK PILOT ALS FUNCTIE VAN HET BEHANDELDE BV



### 3.3.4 TSS/TROEBELING

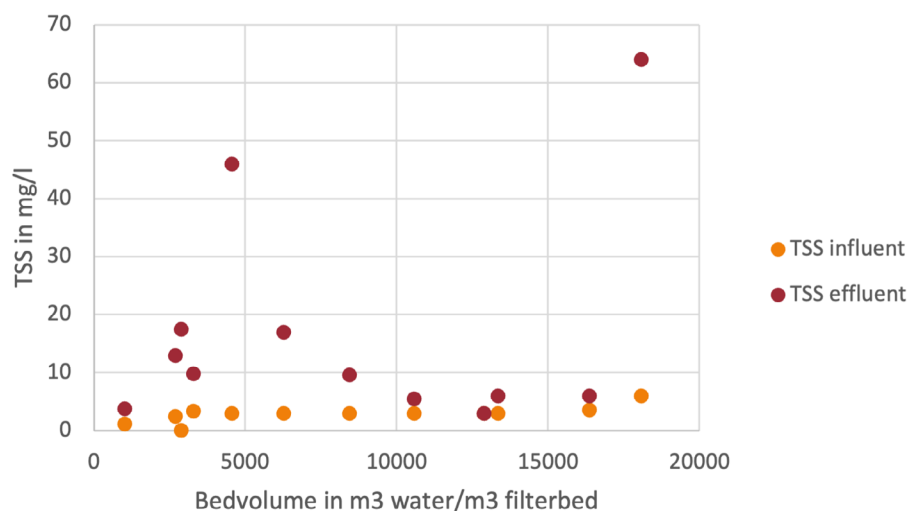
In de gehele proefperiode is een toename te zien van TSS en troebeling in het effluent, ten opzichte van het influent van de pilot. De zwevende stof concentratie stijgt van gemiddeld 3 mg/l naar 12 mg/l. De troebeling stijgt van gemiddeld 1,5 FNU naar 3,2 FNU. Het verloop van de TSS concentratie in influent en effluent van de pilot is weergegeven in figuur 3.3.4. Vanaf 8.000 BV wordt Fe gedoseerd en is er over het algemeen slechts een beperkte toename van zwevende stof, met uitzondering van de meting bij 18.071 BV. In die specifieke periode was er sprake van een procesverstoring, waardoor deze meting minder betrouwbaar is.

Bij de toename van zwevende stof spelen meerdere factoren een rol:

- de biologische activiteit in het filterbed, met groei van biomassa;
- de beluchting in het filterbed;
- de dosering van coagulant, in combinatie met de beluchting.

In het vervolg van het onderzoek wordt aan de optimalisatie van de verwijdering van zwevende stof nog nader aandacht besteed.

FIGUUR 3.3.4 VERLOOP TSS CONCENTRATIE IN VOEDING EN FILTRAAT VAN DE BIO-GAK PILOT IN MG/L ALS FUNCTIE VAN HET BEHANDELDE BV

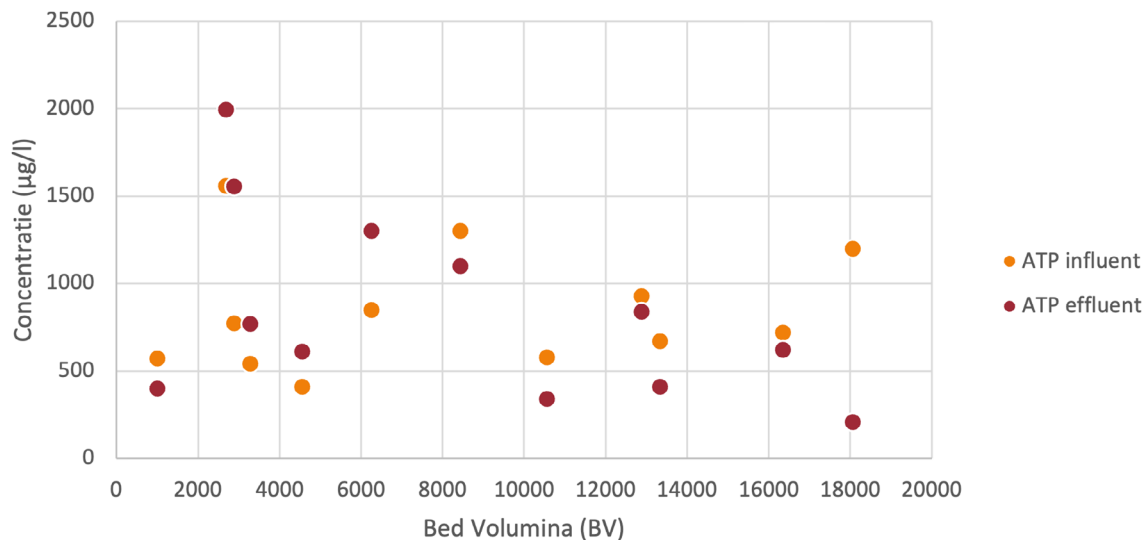


### 3.3.5 ATP

De metingen aan ATP geven een indruk van de biologische activiteit in het filterbed. Een toename van het opgelost ATP in het filtraat ten opzichte van de filtervoeding duidt op biologische activiteit. In figuur 3.3.5 is de ATP concentratie in de tijd gevolgd voor voeding en filtraat. Duidelijk is zichtbaar dat er sprake is van een toename van ATP tot circa 8.000 BV. Daarna neemt de ATP concentratie in het filtraat af ten opzichte van de voeding. Rond dit moment is ook de coagulant dosering gestart. Het zou kunnen zijn dat de afname van ATP hiermee samenhangt.

De vraag is in hoeverre de coagulant dosering hiermee een negatieve invloed heeft op de biologische activiteit in het filter bed. Vooral nog is de biologische nitrificatie niet nadelig beïnvloed. Dit wordt mede bevestigd door andere praktijkinstallaties, waarbij de combinatie van coagulant dosering en biologische nitrificatie dan wel denitrificatie wordt toegepast.

FIGUUR 3.3.5 ATP CONCENTRATIE VOEDING – FILTRAAT IN PILOT IN FUNCTIE VAN DE BEHANDELDE BED VOLUMINA



### 3.3.6 FOSFAAT

Figuur 3.3.6 laat de totaal-fosfaat metingen (in mg P/l) zien gedurende het onderzoek in de 48-uurs metingen. Er is een wisselend beeld qua verwijdering: soms is de effluentwaarde lager dan de influentwaarde, dan weer geldt het omgekeerde.

In een deel van het onderzoek – vanaf ca. 8.000 BV – is  $Fe^{3+}$  gedoseerd om defosfatering te bewerkstelligen als een simultaan proces. De doseerpomp bleek echter groot in relatie tot de benodigde dosering aangezien de influentwaarde van totaal-fosfaat lager was dan aanvankelijk verwacht. Daardoor waren het aantal pulsen beperkt. Dit betekent dat onvoldoende menging optrad en er onvoldoende fosfaatverwijdering is gemeten.

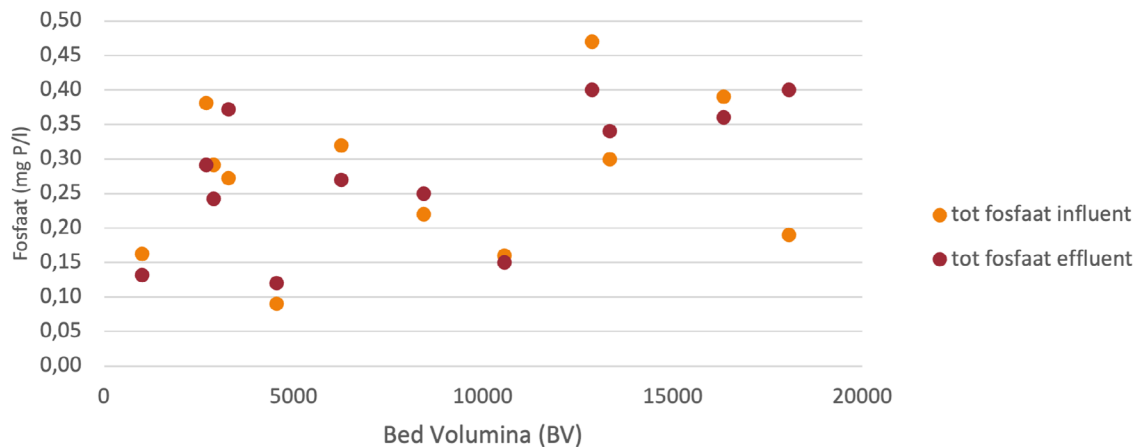
Vanaf 12 juli 2023 (circa 15.000 BV) is een kleinere doseerpomp toegepast, waardoor een betere dosering en menging kon plaatsvinden. Het effect daarvan is niet zichtbaar in figuur 3.3.4, waar voor de laatste twee metingen (> 15.000 BV) een duidelijke afname van totaal fosfaat was verwacht.

Vervolgens is onderzoek uitgevoerd naar het vóórkomen van de verschillende fracties P in het influent om verder inzicht te krijgen. De resultaten van deze fractioneringsmetingen zijn samengevat in tabellen 3.3.1 (meetdatum 19 september 2023) en 3.3.2 (meetdatum

29 september 2023). De tabellen laten precies tegenovergestelde resultaten zien qua afnames en toenames van bepaalde fracties. Dit en de extreem lage ortho-P waarde van het influent van 19 september 2023 doen vermoeden dat bij deze meting monsters van influent en effluent zijn verwisseld.

De meting van 29 september 2023 (tabel 3.3.2) laat een beeld zien dat vanuit de coagulatie/filtratie goed verklaarbaar is. Ortho-P wordt vrijwel geheel verwijderd, zoals ook te verwachten na dosering van coagulant. Totaal fosfaat wordt echter slechts met 61% gereduceerd, ondanks de volledige ortho-P verwijdering. Dit lijkt toegeschreven te kunnen worden aan de toename van het organisch gebonden fosfaat.

FIGUUR 3.3.6 TOTAAL-FOSFAAT METINGEN (IN MG P/L) OVER DE LOOPTIJD VAN HET ONDERZOEK, UITGEDRUKT IN BV



TABEL 3.3.1 FRACTIONERING INFLUENT EN EFFLUENT PILOT FOSFAAT (METING 19 SEPTEMBER 2023, LOOPTIJD > 20.000 BV)<sup>2</sup>

Parameter	Influent (mg P/l)	Effluent (mg P/l)
Totaal fosfaat	0,34	0,68
Totaal opgelost fosfaat	0,06	0,58
Opgelost organisch fosfaat	0,04	0,12
Ortho fosfaat	<0,02	0,46
Totaal gebonden fosfaat	0,28	0,1
Metaal gebonden fosfaat	0	0,02
Gebonden organisch fosfaat	0,28	0,08

TABEL 3.3.2 FRACTIONERING INFLUENT EN EFFLUENT PILOT FOSFAAT (METING 29 SEPTEMBER 2023, LOOPTIJD > 20.000 BV)

Parameter	Influent (mg P/l)	Effluent (mg P/l)
Totaal fosfaat	0,94	0,37
Totaal opgelost fosfaat	0,88	0,03
Opgelost organisch fosfaat	0,09	0,01
Ortho fosfaat	0,79	<0,02
Totaal gebonden fosfaat	0,06	0,34
Metaal gebonden fosfaat	0,01	0
Gebonden organisch fosfaat	0,05	0,34

2 Bij deze meting bestaat het vermoeden dat influent en effluent zijn verwisseld.

De afname van het ortho-fosfaat, zoals gemeten in de fractionering van tabel 3.3.2 wordt bevestigd door de vele handmetingen van ortho-fosfaat. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 3.3.3. Bij deze metingen zijn op één dag op meerdere opeenvolgende tijdstippen steekmonsters genomen.

**TABEL 3.3.3 HANDMETINGEN ORTHO-FOSFAAT INFLUENT EN EFFLUENT PILOT (STEEKMONSTERS)**

datum	n	PO <sub>4</sub> -P influent (mg P/l)	PO <sub>4</sub> -P effluent (mg P/l)	PO <sub>4</sub> -P verwijdering
7-8-2023	15	0,18	0,13	28%
14-8-2023	10	0,10	0,04	59%
16-8-2023	10	0,21	0,05	77%
18-9-2023	3	0,43	0,19	55%

Van belang is te benadrukken dat het bij dit onderzoek om lage gehalten aan P in het influent van de pilot gaat. Hierdoor is de betrouwbaarheid van de meetresultaten beperkt.

Een voorzichtige conclusie is dat totaal opgelost fosfaat (opgelost organisch P + ortho-P) goed verwijderd wordt. Voor totaal-P is dat nog onvoldoende aangetoond. Het loslaten van biologisch materiaal uit het filterbed, als gevolg van de beluchting, speelt een mogelijke rol bij een toename van organisch gebonden P.

Verwijdering van het organisch gebonden fosfaat kan verder geoptimaliseerd worden, bijvoorbeeld door wijziging van de positie van de beluchting in het filterbed. Dit is echter niet meer onderzocht in het kader van deze onderzoeksperiode.

### 3.4 LC-MS SCREENING

De screening is uitgevoerd door WLN en heeft driemaal plaatsgevonden (2 december 2022, 17 april 2023, 24 mei 2023).

De monsters waarin biologische effectmetingen worden uitgevoerd, worden tevens door WLN gescreend met LC-MS. Deze screening levert per monster een omvangrijk aantal organische microverontreinigingen op die op basis van molecuulmassa van elkaar kunnen worden onderscheiden, maar waarvan de identiteit (naam) onbekend kan zijn (Non Target Screening – NTS). Door de chromatogrammen van de verschillende monsters onderling te vergelijken, kan een uitspraak worden gedaan over de toe- of afname van bepaalde componenten. Hiermee wordt een beeld verkregen van de verwijdering van een breed scala organische microverontreinigingen en, in het verlengde daarvan, een indicatie van (de afname van) ecotoxicologische druk. De resultaten zijn geplott in bijlage 4 en samengevat in tabel 3.4.1.

De conclusie kan worden getrokken dat er overall sprake is van een significante afname van zowel het aantal negatief als positief ioniserende stoffen, en daarmee van de ecotoxicologische druk voor alle metingen. Bijlage 4 toont per meting alle bekende stoffen die zijn afgenomen dan wel toegenomen.

Voor de metingen geldt dat in ieder geval alle stoffen die behoren tot de groep top-7 verwijderde gidsstoffen ook in de LC-MS screening naar voren komen als stoffen met een significante afname. Een uitzondering hierop is venlafaxine in de meting van 2 december 2022: deze is aangemerkt als stof die hoort tot de top-7 verwijderde gidsstoffen, maar is niet gevonden in de LC-MS screening. Hetzelfde geldt voor sotalol in de meting van 17 april 2023.

TABEL 3.4.1 LC-MS SCREENINGRESULTATEN

Datum	negatief ioniserende stoffen		positief ioniserende stoffen	
	afname	toename	afname	toename
<b>2 - 4 dec 2022 (2.884 BV)</b>				
totaal aantal stoffen	779	13	1237	40
aantal bekende stoffen	8	0	40	0
aantal (kandidaat)gidsstoffen	3	0	10	0
<b>17 - 19 april 2023 (10.564 BV)</b>				
totaal aantal stoffen	664	101	3257	265
aantal bekende stoffen	10	3	68	2
aantal (kandidaat)gidsstoffen	3	0	12	0
<b>22 - 24 mei 2023 (12.880 BV)</b>				
totaal aantal stoffen	813	184	2231	365
aantal bekende stoffen	14	1	72	1
aantal (kandidaat)gidsstoffen	3	0	11	0

### 3.5 ECOTOXICOLOGIE

De metingen aan de ecotoxicologie (biologische effectmetingen) zijn uitgevoerd door Waterproef en BDS (onder regie van Aqualysis). Er zijn drie metingen uitgevoerd (2 december 2022, 15 februari 2023 en 24 mei 2023). De resultaten zijn samengevat in respectievelijk tabel 3.5.1, tabel 3.5.2. en tabel 3.5.3. De metingen laten zien dat voor alle verschillende methodes, die zijn gehanteerd het filtraat van de bio-GAK een lagere ecotoxiciteit heeft dan de voeding van de bio-GAK. Voor de methode PAH-CALUX is het opvallend dat voor de meting op 2 december 2022 de blanco een veel hogere waarde laat zien dan beide metingen in voeding/filtraat van de bio-GAK.

Geconcludeerd kan worden dat de Bio-GAK pilot de ecotoxiciteit van het effluent verder verlaagt.

TABEL 3.5.1 RESULTATEN ECOTOXICOLOGIE BIO-GAK (2 DECEMBER 2022, 2.884 BV)

test	eenheid	blanco	influent bio-GAK	filtraat bio-GAK
Daphniatox	TU	<0,015	0,02	<0,015
Microtox	TU	0,03	0,09	0,04
ERa CALUX	ng/l 17bestDol	0,052	1,3	0,045
GR CALUX	ng/l dexmtsn	<4,4	180	7,8
PAH CALUX	ng/l BaP	250	49	19
PXR CALUX	µg/l nicdpne	40	120	32

TABEL 3.5.2 RESULTATEN ECOTOXICOLOGIE BIO-GAK (15 FEBRUARI 2023, 6.258 BV)

test	eenheid	blanco	Influent bio-GAK	filtraat bio-GAK
Daphniatox	TU	<0,015	0,02	<0,015
Microtox	TU	0,06	0,13	0,04
ERa CALUX	ng/l 17bestDol	<0,018	0,6	0,028
GR CALUX	ng/l dexmtsn	<4,5	320	18
PAH CALUX	ng/l BaP	2,8	60	18
PXR CALUX	µg/l nicdpne	3,8	50	20

TABEL 3.5.3 RESULTATEN ECOTOXICOLOGIE BIO-GAK (24 MEI 2023, 12.880 BV)

test	eenheid	blanco	Influent bio-GAK	filtraat bio-GAK
Microtox	TU	0,09	0,19	0,12
Cytotox CALUX	TC4ySnactt	1,2	3,7	1,3
ERa CALUX	ng/l 17bestDol	0,044	0,69	0,24
PAH CALUX	ng/l BaP	28	100	36
PXR CALUX	µg/l nicdpne	15	160	100

### 3.6 OPERATIONELE AANDACHTSPUNTEN

Tijdens het onderzoek is vastgesteld dat onder specifieke omstandigheden uitspoeling van filtermateriaal plaatsvond. Het gevolg hiervan is dat de bed hoogte afneemt, zodat de EBCT lager wordt. Dit is uiteraard ongewenst. Nader onderzoek is uitgevoerd naar de omstandigheden, die leiden tot uitspoeling.

Uit het nader onderzoek bleek dat de uitspoeling met name plaatsvond door binding van luchtbelletjes van de in het bed ingebrachte lucht aan het korrelmateriaal. Hierdoor ontstond een verlies van kooldeeltjes met de filtraatstroom. Dit effect trad met name op bij hogere specifieke luchtbelastingen in het filterbed. Toegepast zijn luchtbelastingen van 0,9 – 5 Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h. Bij luchtbelastingen kleiner dan circa 2 m/h is de uitspoeling beperkt. Daarboven neemt het risico voor uitspoeling toe.

Om uitspoeling te voorkomen wordt de luchtdosering beperkt door toepassing van een luchtbelasting van maximaal 1,5 Nm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h. Zuurstofmetingen vlak boven het bed laten zien dat er nog steeds enkele mg/l zuurstof aanwezig zijn. Hoe het zuurstofprofiel dieper in het bed is, is niet bekend omdat betrouwbare meting ervan lastig is.

Om te voorkomen dat als gevolg van calamiteiten via het filtraat filtermateriaal kan uitspoelen is in de proefopstelling uit voorzorg een koolvang op de filtraatafvoer geplaatst. Op de waswaterafvoer was deze voorziening al vanaf het begin van het onderzoek aanwezig.

Door het verlies van filtermateriaal is de EBCT afgenomen van 27 minuten tot 17 minuten (bij 13.335 BV). Om dit te compenseren is het voedingsdebiet verlaagd, zodat de EBCT naar 24 minuten is teruggebracht.

### 3.7 VERTALING RESULTATEN ONDER TOEKOMSTIGE EUROPESE RICHTLIJN

Door de EU is een voorstel gedaan voor een revisie van de Richtlijn Stedelijk Afvalwater<sup>3</sup>. Hierin worden verwijderingsrendementen voorgesteld voor organische microverontreinigingen, die enigszins afwijken van de Nederlandse stoffen voor de bijdrageregeling voor demo's en het IPMV. Er is sprake van twee categorieën stoffen, zie tabel 3.7.1. In de revisie wordt gesteld dat rwzi's groter dan 100.000 i.e. moeten zijn voorzien van een aanvullende verwijdering voor 'micropollutants' en daarnaast kleinere zuiveringen met een capaciteit van 10.000-100.000 i.e. die lozen op gevoelig oppervlaktewater vanwege risico's voor de humane gezondheid of het (water)milieu. E.e.a. dient gerealiseerd te zijn in de periode 2030-2035 voor rwzi's groter dan 100.000 i.e. en uiterlijk in 2040 voor kleinere rwzi's.

3 Proposal for a revised Urban Wastewater Treatment Directive (europa.eu)



TABEL 3.7.1

**STOFFENLIJST VAN DE VOORGESTELDE NIEUWE EUROPESE RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER IN VERGELIJKING MET DE NEDERLANDSE 7 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN**

Categorie 1 EU	Categorie 2 EU	Gidsstoffen NL
amisulpride	benzotriazol	carbamazepine
carbamazepine	candesartan	diclofenac
citalopram	irbesartan	hydrochloorthiazide
clarithromycine	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol	metoprolol
diclofenac		venlafaxine
hydrochloorthiazide		1,2,3-benzotriazol
metoprolol		irbesartan
venlafaxine		som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol
		gabapentine
		sotalol
		thrimethoprim

Het verwijderingspercentage moet conform de nieuwe concept Europese Richtlijn Stedelijk Afvalwater berekend worden over tenminste 6 van de 12 stoffen. Hierbij dient de verhouding tussen stoffen uit Categorie 1 en Categorie 2 altijd 2:1 te zijn. Hiermee zijn de volgende combinaties mogelijk:

- 6 stoffen: 4 stoffen uit categorie 1 en 2 stoffen uit categorie 2
- 9 stoffen: 6 stoffen uit categorie 1 en 3 stoffen uit categorie 2
- 12 stoffen: 8 stoffen uit categorie 1 en 4 stoffen uit categorie 2

De verwijdering wordt conform het concept EU-voorstel berekend op basis van de gemiddelde verwijdering van de beschouwde stoffen in elk 24h- of 48h-monster op basis van concentraties. Het gemiddelde verwijderingsrendement per monster dient minimaal 80% te bedragen over de nageschakelde behandelingsinstallatie. Volgens de Nederlandse richtlijnen van het Ministerie van IenW dient het verwijderings-rendement berekend te worden over 7 van de 11 gidsstoffen. De verwijdering wordt berekend op dezelfde manier. Hierbij geldt een minimaal verwijderingsrendement in elk monster van 70%.

In tabel 3.7.2 zijn de behaalde verwijderingsrendementen over de looptijd van het onderzoek, uitgedrukt in behandelde bed volumina, samengevat voor de categorie 1 EU stoffen en de categorie 2 EU stoffen. In de tabel is voor de drie opties (12, 9 respectievelijk 6 stoffen) het maximale rendement per meting berekend. De parameters die gebruikt zijn voor het gemiddelde verwijderingsrendement van 9 stoffen zijn aangegeven in oranje of geel. De stoffen die zijn gebruikt voor de berekening van de verwijderingsrendementen van 6 stoffen zijn oranje gekleurd. Alleen de optie 6 stoffen (4 in categorie 1 en 2 in categorie 2) leidt altijd tot een rendement van minimaal 80%.

Vergelijking van de verwijderingsrendementen, bepaald op basis van de concept Europese Richtlijn Stedelijk Afvalwater met die van de Nederlandse Richtlijn van het Ministerie van IenW, zie tabel 3.7.2, laat zien dat er nauwelijks een verschil in resultaat is tussen beide richtlijnen. Overigens geldt voor alle stoffen dat de concentraties in het influent boven de rapportagegrens liggen.

**TABEL 3.7.2 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN VOOR DE INDIVIDUELE GIDSSTOFFEN OVER DE LOOPTIJD VAN HET ONDERZOEK EN VERGELIJKING VAN DE OVERALL RENDEMENTEN OP BASIS VAN DE EUROPESE EN NEDERLANDSE RICHTLIJN**

aantal BV in m3	1.000	2.690	2.884	3.281	4.552	6.258	8.435	10.564	12.880	13.335	16.352	18.071
<b>Categorie 1 EU</b>												
amisulpride	0%	67%	50%	67%	50%	75%	75%	67%	83%	83%	67%	50%
carbamazepine	98%	98%	93%	99%	90%	98%	77%	77%	81%	76%	74%	73,1%
citalopram	92%	94%	93%	96%	92%	95%	81%	88%	86%	82%	83%	90%
claritromycine	89%	94%	93%	96%	83%	92%	65%	57%	50%	73%	75%	83%
diclofenac	98%	97%	92%	99%	87%	95%	64%	71%	71%	65%	55%	81%
hydrochloorthiazide	93%	95%	94%	97%	95%	97%	90%	84%	82%	82%	82%	78%
metoprolol	99%	99%	98%	100%	95%	99%	93%	91%	93%	88%	86%	82%
venlafaxine	98%	96%	95%	97%	89%	95%	72%	75%	70%	69%	71%	73%
<b>Categorie 2 EU</b>												
1,2,3-benzotriazool	99%	99%	98%	99%	94%	98%	89%	85%	87%	80%	74%	73%
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	97%	98%	98%	98%	96%	98%	91%	90%	88%	88%	80%	78%
candesartan	94%	90%	77%	85%	62%	64%	18%	27%	39%	35%	24%	58%
irbesartan	98%	96%	89%	95%	74%	84%	48%	50%	42%	48%	55%	81%
<b>Concept Europese Richtlijn Stedelijk Afvalwater</b>												
8 en 4 stoffen	88%	94%	89%	94%	84%	91%	72%	72%	73%	72%	69%	75%
6 en 3 stoffen	97%	97%	95%	98%	90%	95%	80%	79%	79%	78%	76%	80%
4 en 2 stoffen	98%	98%	96%	99%	94%	97%	87%	86%	86%	84%	80%	82%
<b>Nederlandse Richtlijn Ministerie IenW</b>												
top 7 gidsstoffen	98%	98%	96%	99%	94%	98%	89%	87%	86%	83%	80%	82%

Tabel 3.7.3 geeft per richtlijn de stoffen aan waarop het berekende rendement is gebaseerd. De stoffen die bij beide richtlijnen zijn gebruikt zijn aangegeven in groen. In de berekeningen volgens de EU richtlijn is daarnaast citalopram en enkele malen amisulpride of claritromycine, stoffen die niet tot de Nederlandse gidsstoffen behoren. Omgekeerd zijn bij de berekening van het rendement op basis van de top 7 (Nederlandse richtlijn) vaak de stoffen sotalol en trimethoprim meegenomen.

**TABEL 3.7.3 LIJST VAN STOFFEN OP BASIS WAARVAN HET VERWIJDERINGSRENDEMENT IS BEREKEND VOOR VERSCHILLENDE BEDVOLUMINA VOOR DE EU EN NEDERLANDSE RICHTLIJN**

aantal BV in m3	1000	2690	2884	3281	4552	6258	8435	10564	12880	13335	16352	18071
<b>Concept Europese Richtlijn Stedelijk Afvalwater</b>												
<b>4 en 2 stoffen</b>												
<b>Categorie 1 EU</b>												
amisulpride									X	X		
carbamazepine	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
citalopram					X		X	X	X	X	X	X
claritromycine											X	X
diclofenac	X	X		X		X						
hydrochloorthiazide			X		X	X	X	X	X	X	X	X
metoprolol	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
venlafaxine	X	X	X	X								
<b>Categorie 2 EU</b>												
1,2,3-benzotriazool	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
irbesartan	X											X
<b>Nederlandse Richtlijn Ministerie IenW</b>												
<b>top 7 gidsstoffen</b>												
1,2,3-benzotriazool	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
carbamazepine	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
diclofenac		X		X		X						X
hydrochloorthiazide			X		X	X	X	X	X	X	X	X
irbesartan	X											X
metoprolol	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
sotalol	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
trimethoprim				X			X	X	X	X	X	X
venlafaxine	X	X	X	X								

Op basis van de concept EU-gidsstoffen is een inschatting gemaakt van de verwijderingsrendementen die te behalen zijn met de referentietechnologieën ozonisatie, PACAS en Granulair Actief Koolfiltratie (GAK-filtratie) voor de standaard rwzi van het IPMV, zie tabel 3.7.3. Deze zijn gelijk voor de concept EU-gidsstoffen en de Nederlandse gidsstoffen voor

de nageschakelde verwijderings-rendementen van ozonisatie en GAK-filtratie. Voor de toepassing van PACAS betekent het voldoen aan de 80% EU-norm dat de PAK-dosering naar verwachting verhoogd moet worden naar 20 mg/l in plaats van 15 mg/l. Voor alle referentie technologieën geldt dat de gekozen gidsstoffen anders zijn voor de EU-methode dan voor de Nederlandse methode.

Het aangenomen actiefslibrendement van de standaard rwzi kan voor de concept EU-gidsstoffen 40% zijn, net zoals voor de Nederlandse gidsstoffen<sup>4</sup>. Dit is echter afhankelijk van in welke mate de concept EU-gidsstoffen daadwerkelijk voorkomen. De concept EU-gidsstoffen Amisulpride, Candesartan en Clarithromycine komen over het algemeen in onvoldoende mate voor in Nederlandse influenten en effluenten van rwzi's. Dit is ook de reden waarom deze niet zijn opgenomen als gidsstof in Nederland. De concept EU-gidsstof Citalopram komt wel voldoende voor, maar is afgefallen als Nederlandse gidsstof vanwege een mogelijk te hoog verwijderingsrendement door het actiefslib (>50%)<sup>5</sup>. Voorgaande betekent niet dat de stoffen Amisulpride, Candesartan en Clarithromycine helemaal niet voorkomen in Nederlandse rwzi influenten en effluenten. Of dit het geval is hangt af van de specifieke rwzi.

De grotere spreiding in actiefslibrendementen op basis van de concept EU-gidsstoffen betekenen ook een grotere spreiding in overall verwijderingsrendementen over de rwzi (effluent rwzi ten opzichte van influent rwzi). Het 'EU actief slib rendement' is afhankelijk van de stoffen die aanwezig zijn in het influent van de rwzi en kan terugzakken naar 25% in plaats van 40% indien niet alle EU gidsstoffen aanwezig zijn. In tabel 3.7.4 is uitgegaan van gidsstoffen die voldoende aanwezig zijn in Nederlandse influenten en effluenten van rwzi's: Citalopram is wel meegenomen, Amisulpride, Candesartan en Clarithromycine niet. Dit betekent dat het actiefslib rendement 25-35% bedraagt. Bij deze tegenvallende actiefslibrendementen is een nageschakeld rendement van 80% onvoldoende om het overall rendement van 80% te behalen: het overall rendement zal dan circa 75% bedragen.

In tabel 3.7.3 zijn de verwijderingsrendementen weergegeven op basis van de concept EU gidsstoffen en Nederlandse gidsstoffen voor de uitgewerkte standaard rwzi van 100.000 i.e. voor de referentietechnologieën ozonisatie, PACAS en Granulair Actief Kool (GAK) filtratie<sup>6</sup> in vergelijking met de technologie in dit rapport. De informatie in deze tabel is gebaseerd op expert judgement en eerste resultaten van pilotinstallaties en actiefslibinstallaties in Nederland en dient daarom alleen als grove indicatie om het verschil tussen de concept EU-wetgeving en de Nederlandse richtlijnen te duiden en kunnen zeker niet als absolute getallen worden gebruikt.

4 Voor kenmerken van de standaard rwzi in het IPMV wordt verwezen naar Mulder, M., Berekening CO2 footprint en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit rwzi-afvalwater, versie 28 december 2022

5 Bron: Mulder, M., Evaluatie Gidsstoffen - Ten behoeve van de bijdrageregeling 'Zuivering Medicijnresten' van het Ministerie van IenW en het Innovatie Programma Microverontreinigingen uit RWZI-afvalwater van STOWA en het Ministerie van IenW, Definitieve versie 2, 9 juli 2021

6 Op basis van expert judgement Mirabella Mulder – Mirabella Mulder Waste Water Management, 4 augustus 2023

**TABEL 3.7.4 VERWIJDERINGSRENDEREMENTEN, BEREKEND VOLGENS DE VOORGESTELDE REKENREGELS VAN DE NIEUWE EUROPESE RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER IN VERGELIJKING MET DE NEDERLANDSE SYSTEMATIEK CONFORM DE BIJDRAGEREGELING EN HET IPMV VANUIT HET MINISTERIE VAN IENW VOOR DE 7 VAN DE 11 GIDSSTOFFEN**

	Ozonisatie	PACAS	Granulair Actief Kool (GAK)	Bio-GAK
Instelling	0,7 g O <sub>3</sub> /g DOC	15-20 mg PAK/L	EBCT (verblijftijd): 30 min; standtijd 6 maanden	EBCT (verblijftijd): 24 min; standtijd 18.000 BV
Nageschakeld verwijderings-rendement (%)	80-90%	nvt	80-90%	80%
Overall verwijderings-rendement (%) volgens rekenregels concept EU Richtlijn Stedelijk Afvalwater dd 26/10/2022 (6 van de 12 onderverdeeld in categorieën)	75-85%	70-80%	75-85%	75-85%
Gekozen gidsstoffen EU (6 van de 12; verhouding van 2:1 voor aantal stoffen uit categorie 1 ten opzichte van aantal stoffen uit categorie 2)	Benzotriazol, Carbemazepine Diclofenac, Citalopram, - keuze tussen metoprolol of venlafaxine - keuze tussen irbesartan of som 4,5-methyl benzotriazol	Benzotriazol, som 4,5-methyl benzotriazol, Hydrochloor-thiazide, Metoprolol; Venlafaxine Citalopram	Benzotriazol, som 4,5-methyl benzotriazol, Hydrochloor-thiazide, Metoprolol; Venlafaxine Citalopram	Metoprolol; Hydrochloor-thiazide; Claritromycine; Citalopram; Benzotriazol; som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol
Overall verwijderings-rendement (%) volgens rekenregels bijdrageregeling Ministerie IenW en IPMV (7 van de 11)	80-85%	70-80%	80-85%	80-85%
Gekozen gidsstoffen NL (7 van de 11)	Carbemazepine, Diclofenac, Hydrochloor-thiazide, Sotalol, Metoprolol, Trimethoprim, Venlafaxine	Benzotriazole, som 4,5-methyl benzotriazol, Hydrochloor-thiazide, Sotalol, Metoprolol, Trimethoprim, Venlafaxine	Benzotriazole, som 4,5-methyl benzotriazol, Hydrochloor-thiazide, Sotalol, Metoprolol, Trimethoprim, Venlafaxine	Som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol; Hydrochloor-thiazide; Sotalol; Metoprolol; Trimethoprim; Irbesartan; Diclofenac

# 4

## INPASSING IN NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK

### 4.1 INLEIDING EN UITGANGSPUNTEN

Dit hoofdstuk beschrijft de dimensioneringsgrondslagen van de technologie, bij een projectie op een standaard zuivering. De dimensioneringsgrondslagen zijn gebaseerd op de informatie, die is verzameld in de vorige hoofdstukken. In het IPMV wordt gebruik gemaakt van gestandaardiseerde berekeningsmethoden voor kosten en CO<sub>2</sub>-footprints. Elke onderzochte technologie wordt doorgerekend op basis van een standaard RWZI van 100.000 i.e. 150 gram TZV. Dit heeft als doel om alle technologieën onderling goed te kunnen vergelijken op prestaties (Mulder, Berekening CO2 footprint en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit rwzi afvalwater, 28 december 2022).

Voor een nageschakelde GAK filtratie wordt als prestatiekenmerk gehanteerd een verwijdering van 80 - 85% voor minimaal 7 van de 11 gidsstoffen benzotriazool, carbamazepine, diclofenac, irbesartan, gabapentine, metropolol, hydrochloorthiazide, mengsel van 4- en 5-methylbenzotriazool, sotalol, trimethoprim en venlafaxine in elk 24h of 48h debiets- of tijdsproportioneel monster, waarbij rekening is gehouden met verblijftijd van het water in de RWZI. De procescondities, waaronder dit verwijderingsrendement kan worden gehaald, zijn de basis voor het ontwerp van de nageschakelde installatie.

Met behulp van de aangereikte rekentool (STOWA, 2020) is de ontwerpcapaciteit van de installatie vastgesteld op 1.040 m<sup>3</sup>/h (gelijk aan de DWA ontwerppiek). Bij deze capaciteit kan de droogweeraanvoer te allen tijde worden behandeld. Uitgaande van het standaard DWA-patroon wordt nu 80% van het aangevoerde afvalwater behandeld in de nageschakelde zuivering. Dit komt overeen met een volume van 6,12 miljoen m<sup>3</sup>. De operationele kosten zijn gerelateerd aan dit behandelde watervolume.

Het geloosde effluent na de nageschakelde installatie dient daarbij te voldoen aan de volgende eisen: Ntotaal (jaargemiddeld) mg N/l ≤ 10; Ptotaal (jaargemiddeld) mg P/l ≤ 1; BZV (maximaal) mg/l ≤ 20; CZV (maximaal) mg/l ≤ 125; Onopgeloste bestanddelen (jaargemiddeld/maximaal) mg/l ≤ 10 / ≤ 30; NH<sub>4</sub>-N (jaargemiddeld/maximaal) mg N/l ≤ 1,5 / ≤ 3,0. De maximale waarde mag in geen enkel etmaalmonster worden overschreden.

Voor RWZI Emmen voldoet het huidige effluent aan alle criteria, behalve voor ammonium-N. De maximale waarde in een etmaalmonster kan hoger zijn dan de gestelde grenswaarde.

## 4.2 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN

De dimensioneringsgrondslagen van de nageschakelde bio-GAK installatie zijn gebaseerd op de operationele condities in de pilot en samengevat in tabel 4.2.1. 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 luchtbelasting – om aerobe condities te kunnen realiseren over de volledige bed hoogte – is berekend op maximaal  $1,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ . Bij deze waarde wordt geen verstoring van het filtermedium verwacht zodat de reactor als een gepakte propstroom kolom kan worden bedreven. Afhankelijk van de specifieke procesomstandigheden (temperatuur, overige biologisch afbreekbaar materiaal) kunnen ammonium pieken worden afgevlakt en wordt 3 – 5 mg/l ammonium stikstof verwijderd.

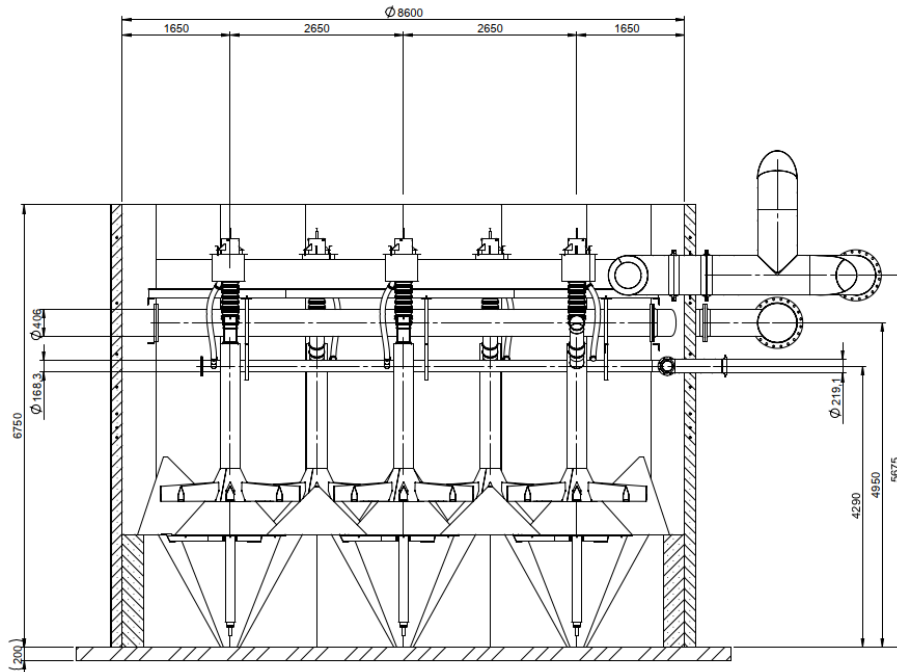
**TABEL 4.2.1 DIMENSIONERINGSGRONDSLAGEN BIO-GAK CONTINU-FILTRATIE**

Ontwerpparameter	Waarde	Eenheid
Ontwerp uurdebiet (DWA ontwerp piek)	1.040	m <sup>3</sup> /h
Behandeld jaardebiet in nageschakelde zuivering	6.130.000	m <sup>3</sup> /jaar
Gemiddelde debiet	700	m <sup>3</sup> /h
EBCT bij DWA ontwerp piek	25	minuten
EBCT bij gemiddeld debiet	37	minuten
Benodigde bedvolume	430	m <sup>3</sup>
bedhoogte	3,0	m
benodigde filteroppervlak	140	m <sup>2</sup>
filtratiesnelheid bij DWA ontwerp piek	7,4	m/h
filtratiesnelheid, gemiddeld debiet	4,9	m/h
Aantal filtereenheden	3	
filteroppervlak/eenheid	55,0	m <sup>2</sup>
totale geïnstalleerde filteroppervlak	165	m <sup>2</sup>
GAK koolsoort	Norit 830	
GAK meshwidth	8 x 30	0,64 - 2,36 mm
GAK dichtheid (na wassing)	400	kg/m <sup>3</sup>
OB stofconcentratie in aanvoer + biomassagroei	30	mg/l
Stofbelasting door OB in aanvoer + biomassagroei	150	g/m <sup>2</sup> /h
Molaire ratio coagulant dosering voor P-verwijdering	5,0	mol/mol Me/oP
Additional stoffbelasting door simultane P-verwijdering	18	mg/l
Additional stoffbelasting door coagulant dosering	100	g/m <sup>2</sup> /h
Totale stoffbelasting inclusief simultane P-verwijdering	250	g/m <sup>2</sup> /h

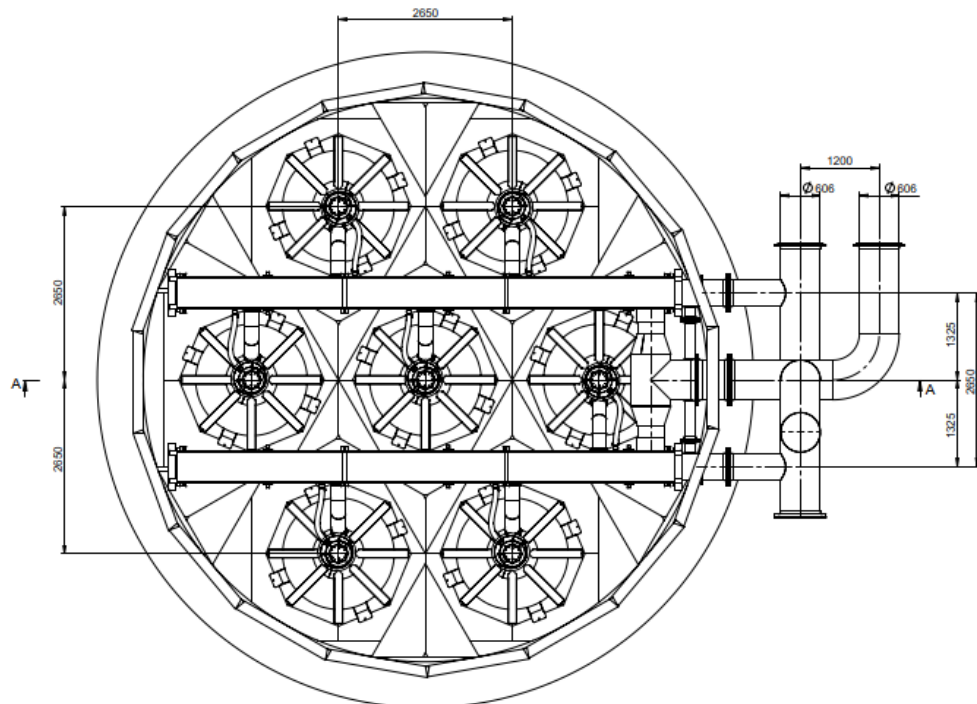
### 4.3 LAY-OUT BIO-GAK CONTINUFILTRATIE- INSTALLATIE

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 4.3.1, 4.3.2. In totaal is het ontwerp van de installatie voor 100.000 i.e. gebaseerd op drie identieke units.

FIGUUR 4.3.1 DOORSNEDE BIO-GAK CONTINUFILTER INSTALLATIE



FIGUUR 4.3.2 BOVENAANZICHT BIO-GAK CONTINUFILTER INSTALLATIE



De nageschakelde installatie is voor de schaalgrootte van 100.000 i.e. uitgewerkt in de vorm van een betoninstallatie, opgebouwd uit drie 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 500 – 600 m<sup>2</sup>, ofwel 0,5 – 0,6 m<sup>2</sup> per m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/h.

#### 4.4 INZET HULPSTOFFEN/ CHEMICALIËN

Voor de verwijdering van de microverontreinigingen in de bio-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 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 CO<sub>2</sub> voetafdruk.

#### 4.5 ENERGIEVERBRUIK

Het energieverbruik voor het bedienen van de 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 voorzeving wordt uitgevoerd in de vorm van een inline 2D zeef (duplex filter of vergelijkbaar). De voedingspompen zijn hierop uitgelegd, zodat voor de voorzeving geen extra energieverbruik is meegenomen.

De berekening van het jaarlijkse energieverbruik en de specifieke energieconsumptie per behandelde m<sup>3</sup> water is weergegeven in tabel 4.5.1. 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.

Tijdens de proefperiode is onderzocht of de installatie kan worden bedreven in een zogenaamde intermitterende spoelcyclus. Daarbij wordt de spoeling periodiek onderbroken om



het spoelwaterverbruik te beperken en de energie-inbreng voor het circuleren van het filtermedium te verlagen. In de praktijk blijkt de hoeveelheid perslucht, die nodig is voor het circuleren van de kool lager te zijn dan ingeschat en is het energieverbruik hiervoor sowieso beperkt. Derhalve is de noodzaak om over te gaan op een intermitterende spoeling niet groot. Er is daarom uitgegaan van een continue koolcirculatie.

Het spoelwater komt vrij aan de bovenzijde van de reactor en kan onder vrij verval worden teruggevoerd naar bijvoorbeeld de AT.

Voor de proceslucht is de benodigde luchtbelasting voor een effectieve inbreng van zuurstof in het filterbed in de pilot bepaald, gebruik makend van een beluchtingsnet met Linde slangen, waarmee fijne bellen in het bed kunnen worden gebracht. Boven het koolbed zijn zuurstofmetingen uitgevoerd en is vastgesteld dat de zuurstof concentratie voldoende is om onder normale omstandigheden (ammonium-N pieken maximaal 10 mg/l N) de biomassa van zuurstof te voorzien.

**TABEL 4.5.1 ENERGIEVERBRUIK VOOR HET BEDRIJVEN VAN DE NAGESCHAKELDE INSTALLATIE**

Ontwerpparameter	Waarde	Eenheid
Opvoerhoogte effluent naar bio-GAK	1,00	bar
Afgenomen vermogen voedingspompfase	28	kW
Airlift luchtdebiet voor medium circulatie	0,10	Nm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h bij 4 bar(o)
Procesluchtdebiet	0,80	Nm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h bij 4 bar(o)
Totaal benodigd luchtdebiet	0,90	Nm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h bij 4 bar(o)
Afgenomen vermogen persluchtinstallatie	20	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 <sup>3</sup> behandeld water	0,073	kWh/m <sup>3</sup>
Specifiek energieverbruik per m <sup>3</sup> behandeld water, exclusief opvoer van water	0,030	kWh/m <sup>3</sup>

#### 4.6 SLIBPRODUCTIE

De slibproductie is een optelsom van de volgende componenten:

- De in het filter afgevangen OB
- De opbouw van biomassa door biologische groei in de reactor
- Het uitgevlokte fosfaat door dosering van coagulant

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 280 ton DS bij gelijktijdige fosfaat verwijdering, uitgaande van een influent ortho-P concentratie van 1 mg/l P.

Zonder fosfaatverwijdering is de slibproductie circa 220 ton DS per jaar.

#### 4.7 SPOELWATERPRODUCTIE

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

- Continue spoeling van het filtermedium
- Nominale spoelwaterproductie tijdens spoeling per filter eenheid: 17 m<sup>3</sup>/h
- Totale spoelwaterproductie voor de hele nageschakelde filterinstallatie: 50 m<sup>3</sup>/h

De spoelwaterproductie op jaarbasis wordt hiermee berekend op 440.000 m<sup>3</sup>/jaar, ofwel 7,2%. Deze waarde is ingevoerd in het CO<sub>2</sub> berekeningsmodel.

#### 4.8 CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT

De CO<sub>2</sub> voetafdruk is berekend met behulp van de STOWA systematiek (Mulder, Berekening CO<sub>2</sub> footprint en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit rwzi afvalwater, 28 december 2022), (Mulder, CO<sub>2</sub>-footprint voor verwijdering van microverontreinigingen, excel rekensheet, 2019).

De standtijd van de kool heeft invloed op de CO<sub>2</sub> voetafdruk. Derhalve is een nadere analyse van de standtijd van de kool op zijn plaats. In de pilot is tot een standtijd van 18.000 BV vastgesteld dat kon worden voldaan aan de criteria volgende de Nederlandse richtlijn. Echter het onderzoek loopt nog door en de verwijderingsrendementen in de komende periode zullen worden vastgesteld. Mogelijk is dus sprake van een langere standtijd waarbij de installatie nog voldoet aan de criteria.

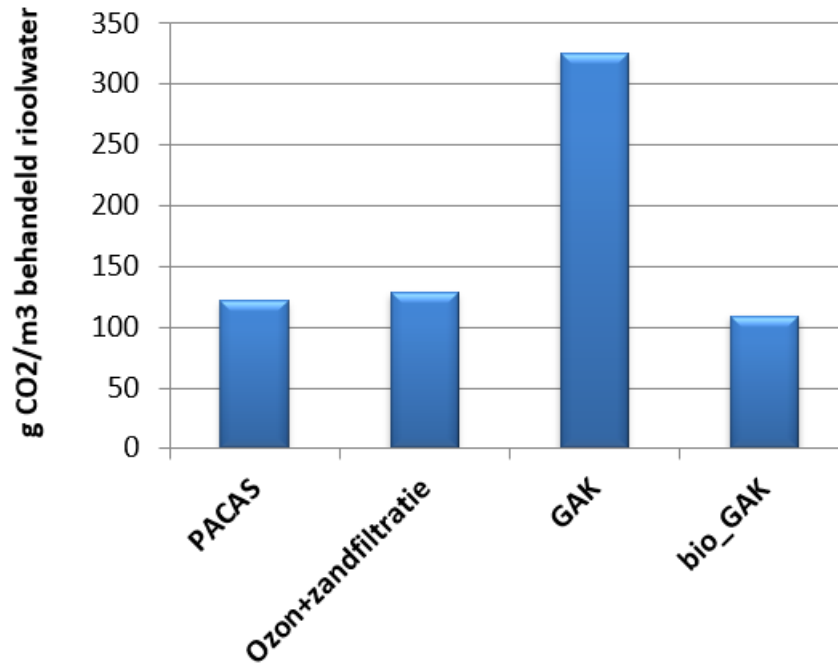
Voor de opschaling van de installatie naar een full scale installatie mag rekening gehouden worden met het effect, dat meerdere filtereenheden operationeel zijn met verschillende standtijden van de kool. Elke standtijd van de kool representeert een ander verwijderingsrendement. Deze analyse en de impact ervan op de ontwerp standtijd voor de full scale installatie is uitgewerkt in bijlage 6. De analyse leert dat voor de full scale installatie gerekend kan worden met een gemiddelde standtijd van 24 maanden (overeenkomend met 28.000 BV).

Voor de bepaling van de CO<sub>2</sub> voetafdruk is het van belang om de jaarlijks benodigde hoeveelheden verse kool en geregenereerde kool vast te stellen. Omdat dit sterk wordt beïnvloed door de gehanteerde standtijd van de kool, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De analysere-sultaten zijn samengevat in bijlage 7. In alle berekeningen in bijlage 7 is rekening gehouden met een koolverlies van 15% per regeneratie, dat aangevuld moet worden met verse actieve kool. Dit is gebaseerd op een opgave van enkele leveranciers van granulair actieve kool. Die geven aan dat dit verlies normaal gesproken 10 – 15% van het regeneratievolume bedraagt. Naast het koolverlies als gevolg van regeneratie is rekening gehouden met een extra koolver-vanging door een maximale regeneratiefrequentie van 5 maal.

De analyse leidt tot de conclusie dat door verlenging van de standtijd van de kool van 18.000 BV naar 28.000 BV de specifieke CO<sub>2</sub> voetafdruk circa 25% lager wordt.

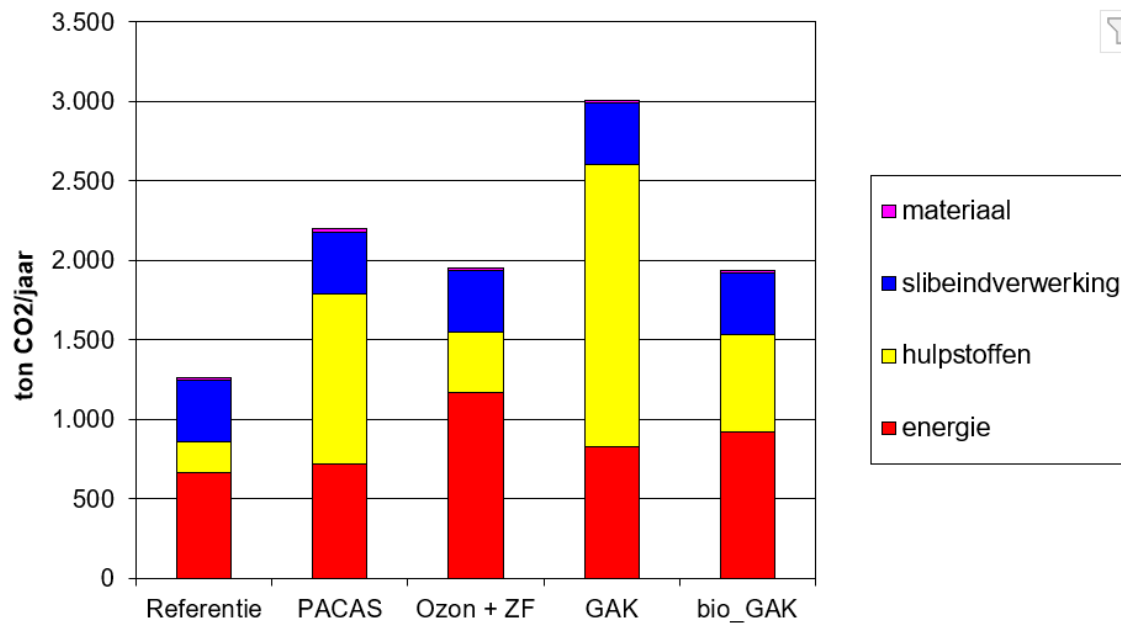
De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in de figuren 4.8.1 en 4.8.2 waarbij het laatste staafdiagram betrekking heeft op biologisch geactiveerde continu-filtratie over GAK (bio-GAK).

FIGUUR 4.8.1 CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT CONFORM (MULDER, CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT VOOR VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN, EXCEL REKENSHEET, 2019)



In figuur 4.8.2 is de CO<sub>2</sub>-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.

FIGUUR 4.8.2 CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT TOTALE RWZI INCLUSIEF VERWIJDERING MICRO'S, CONFORM (MULDER, CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT VOOR VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN, EXCEL REKENSHEET, 2019)



#### 4.9 BOUW- EN STICHTINGSKOSTEN

De bouw- en stichtingskosten van de bio-GAK installatie zijn berekend op basis van de ontwerpuitgangspunten van de installatie en de systematiek zoals beschreven in (Mulder, Berekening CO2 footprint en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit rwzi afvalwater, 28 december 2022). De kostengrondslag is 2018. De resultaten ervan zijn samengevat in tabel 4.9.1.

TABEL 4.9.1 BOUW- EN STICHTINGSKOSTEN NAGESCHAKELDE INSTALLATIE

omschrijving	hoeveelheid	eenheid	prijs	totaal
<b>Civiele werkzaamheden</b>				
Totaal civiele werkzaamheden, behuizing (specificatie tab componenten)	1	€	€ 920.000	€ 920.000
	0	€	-	-
	0	€	-	-
<b>Totaal civiele werkzaamheden</b>				<b>€ 920.000</b>
<b>Werktuigbouwkundige werkzaamheden</b>				
Installatie, compleet, componentenspecificatie tab componenten WTB)	1	€	€ 1.515.000	€ 1.515.000
	0	€	-	-
	0	€	-	-
	0	€	-	-
<b>Totaal werktuigbouwkundige werkzaamheden</b>				<b>€ 1.515.000</b>
<b>Electrotechnische en besturingsinstallaties</b>				
Totale lokale besturingsinstallatie, componentenspecificatie tab componenten	1	€	€ 518.000	€ 518.000
	0	€	-	-
	0	€	-	-
<b>Totaal Electrotechnische en besturingsinstallaties</b>				<b>€ 518.000</b>
<b>Benoemde directe bouwkosten</b>				<b>€ 2.953.000</b>
Onbenoemde (nader te detailleren) bouwkosten	25,0%		€ 2.953.000	€ 738.250
<b>Directe bouwkosten</b>				<b>€ 3.691.250</b>
Initiële kosten	5,0%	€	€ 3.691.250	€ 184.563
Algemene bouwplaatskosten	5,0%	€	€ 3.691.250	€ 184.563
Uitvoeringskosten	5,0%	€	€ 3.691.250	€ 184.563
Algemene kosten	5,0%	€	€ 3.691.250	€ 184.563
Winst en risico	5,0%	€	€ 3.691.250	€ 184.563
<b>Indirecte bouwkosten</b>				<b>€ 922.813</b>
<b>Directe en indirecte bouwkosten</b>				<b>€ 4.614.063</b>
Van bouwkosten naar stichtingskosten	80,0%	€	€ 4.614.063	€ 3.691.250
<b>TOTAAL STICHTINGSKOSTEN</b>				<b>€ 8.305.313</b>

Bij de opbouw van de kostencalculatie kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt:

- Er is uitgegaan van een normale grondslag van de installatie, dus geen onderheien 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.

#### 4.10 JAARLIJKSE SPECIFIEKE KOSTEN

De jaarlijkse kosten per m<sup>3</sup> behandeld afvalwater zijn berekend conform (Mulder, Berekening CO<sub>2</sub> footprint en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit rwzi afvalwater, 28 december 2022).

Specifieke aandacht is hier besteed aan de uitgangspunten voor de bepaling van de specifieke jaarlijkse kosten voor inbreng en regeneratie van de granulaire actief kool:

- De gerealiseerde standtijd van de kool in de pilot is 18.000 BV. Het verwijderingsrendement voldoet dan nog aan de gestelde eisen, en er is sprake van een stabilisering van het verwijderingsrendement, zie hoofdstuk 3. De rapportage is bij dit bedvolume opgesteld, terwijl nog sprake is van een stabiel verwijderingsrendement. Dat betekent dat verwacht mag worden dat de standtijd, uitgedrukt in BV langer zal zijn dan 18.000 BV. Hoeveel langer is niet in te schatten, maar wordt nog nader onderzocht in het vervolg van het onderzoek.
- In de onderzoeksopzet is actief gestuurd op de realisatie van biologische activiteit in het filterbed, door inbreng van zuurstof en het creëren van een relatief lange EBCT. Dat er sprake is van biologische activiteit in het filterbed is duidelijk, gezien de consistente verwijdering van ammonium-stilstof door nitrificerende biomassa. In hoeverre de aanwezigheid van nitrificerende biomassa randvoorwaardelijk is voor de omzetting van microverontreinigingen is onderwerp van wetenschappelijk onderzoek (Bernadet, 2020).
- Het overgangsmoment van een puur adsorptief verwijderingsmechanisme van microverontreinigingen naar een combinatie van adsorptie en biologie is moeilijk in de praktijk vast te stellen. Op grond van het verwijderingsprofiel in functie van het behandelde bedvolume lijkt er sprake te zijn van een stabiliseringsfase, die wordt ingezet na een looptijd van 16.000 BV. De veronderstelling dat daarmee de biologie een rol speelt in het verwijderingsmechanisme is gerechtvaardigd. Het vervolg van het onderzoek zal hiervoor meer onderbouwing geven.
- Voor de full scale installatie is een opstelling uitgewerkt met drie identieke filtereenheden, die elk een derde deel van het toevoerdebiet behandelt. Als alle filters een andere looptijd (ofwel aantal BV) hebben op een bepaald tijdstip, dan zal het filter met het laagst aantal BV het beste verwijderingsrendement hebben. Naarmate een filter een langere looptijd heeft, heeft het een lager verwijderingsrendement. Om te voldoen aan de Richtlijn moet het gemiddelde verwijderingsrendement van de drie filters minimaal 80% zijn. In bijlage 6 is een analyse uitgewerkt, waarbij het overall rendement van minimaal 80% is bepaald met filters, die op één moment verschillende standtijden (en dus verwijderingsrendementen) hebben. Daarbij is gebruik gemaakt van de werkelijke verwijderingsrendementen, behaald tot een standtijd van 18.000 BV. Voor langere standtijden zijn aannames gedaan voor het verwijderingsrendement: bij een standtijd van 23.000 en 28.000 BV respectievelijk 76% en 70%. Met een maximale standtijd van 28.000 BV wordt nog een overall rendement van 80% behaald, waarmee nog steeds voldaan wordt aan de criteria, zie tabel 4.10.1. Derhalve is in het ontwerp van de installatie rekening gehouden met een maximale looptijd van 24 maanden, ofwel 28.000 BV.
- Om een indruk te krijgen van de gevoeligheid van de aannames voor de standtijd van de actieve kool op de jaarlijkse kosten zijn de jaarlijkse kosten bepaald voor vier scenario's met verschillende standtijden, namelijk: 10.000 BV; 18.000 BV; 28.000 BV en 35.000 BV. Deze analyse is nader uitgewerkt in bijlage 7. Het verschil in standtijd van de kool van 18.000 BV en 28.000 BV heeft een beperkte impact op de operationele kosten: circa EUR 0,01/m<sup>3</sup>.

- Bij regeneratie van de kool is sprake van koolverlies. De verzadigde actieve kool wordt in een meervoudige oven gebracht onder een gecontroleerde atmosfeer bij zeer hoge temperaturen van 900 - 950°C. De uiteindelijke gereactiveerde kool heeft een adsorptie-gedrag dat gelijkwaardig is aan de verse actieve kool. Inventarisatie bij verschillende leveranciers van granulaire actieve kool leert dat sprake is van een koolverlies in dit proces van 10 - 15%. In de kosten projecties is hier uitgegaan van een koolverlies van 15%, zodat per jaar 15% van het te regenereren actieve kool aangevuld moet worden met nieuwe kool. Voor de bepaling van de jaarlijkse kosten is daarmee rekening gehouden.

TABEL 4.10.1 SCENARIO ANALYSE FILTERSTATUS OP OVERALL VERWIJDERINGSRENDEMENT

Rendement 7/11 gidsstoffen	98%	98%	87%	83%	82%	76%	70%	
Behandelde bedvolume	1.000	6.258	10.564	13.335	18.071	23.000	28.000	
Standtijd in maanden	1	5	9	11	15	20	24	
Filter 1	1							
Filter 2				1				
Filter 3						1		
Rendement per filter	0,98			0,83		0,76		86%
Rendement 7/11 gidsstoffen	98%	98%	87%	83%	82%	76%	70%	
Behandelde bedvolume	1.000	6.258	10.564	13.335	18.071	23.000	28.000	
Standtijd in maanden	1	5	9	11	15	20	24	
Filter 1			1					
Filter 2					1			
Filter 3							1	
Rendement per filter			0,87		0,82		0,7	80%
Rendement 7/11 gidsstoffen	98%	98%	87%	83%	82%	76%	70%	
Behandelde bedvolume	1.000	6.258	10.564	13.335	18.071	23.000	28.000	
Standtijd in maanden	1	5	9	11	15	20	24	
Filter 1	1							
Filter 2			1					
Filter 3					1			
Rendement per filter	0,98		0,87		0,82			89%

De resultaten van de kostencalculaties zijn samengevat in tabel 4.10.2 en resulteren in een specifieke kostprijs per behandelde m<sup>3</sup> afvalwater van € 0,21. 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 4.10.2 JAARLIJKE SPECIFIEKE KOSTEN NAGESCHAKELDE BIO-GAK INSTALLATIE (OP BASIS VAN STANDTIJD VAN 28.000 BV, 24 MAANDEN)**

<b>Component</b>	<b>Subcomponent</b>	<b>Aantal/ percentage</b>	<b>Jaarkosten</b>
Vaste jaarlasten	civiele componenten		€ 149.635 incl BTW
Vaste jaarlasten	wtb/e componenten		€ 383.233
Vaste jaarlasten	procesautomatisering		€ 94.765
Onderhoudskosten	van bouwkosten C	0,5%	€ 7.188
Onderhoudskosten	van bouwkosten W/E/PA	3,0%	€ 88.266
Personeelskosten		1 FTE	€ 50.000
Elektriciteit	pomp/perslucht	48,31 kW	€ 42.318
GAK	jaarlijkse verversing GAK	76 m3	€ 90.620
GAK reactivatie	jaarlijkse reactivatievolume	216 m3	€ 107.881
spoelwaterproductie	geen externe productie	1.170 m3/dag	€ 17.086
spoelwaterverwerking		1.170 m3/dag	€ 4.272
slibverwerking	geen P-verwijdering	279 ton DS/j	€ 167.349
slibverwerking	met extra P-verwijdering	111 ton DS/j	€ 66.441
<b>TOTAAL</b>			<b>€ 1.269.055</b>
TOTAAL SPECIFIEK	behandelde volume per jaar	6.130.000 m3/j	€ 0,207 /m3

# 5

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 5.1 CONCLUSIES

Uit de onderzoeksresultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken met betrekking tot de primaire doelstelling voor de verwijdering van microverontreinigingen:

- De verwijdering van gidsstoffen, uitgedrukt in het behaalde verwijderingsrendement van de top 7, is gedurende de onderzoeksperiode (tot 18.000 BV) boven de grenswaarde van 80% gebleven. Aanvankelijk lag het rendement erg hoog (98%); naarmate het onderzoek vorderde nam dat af en stabiliseerde het rendement op 80 – 85%.
- De onderzoeksperiode was te kort om eenduidig vast te stellen dat de gecreëerde biologische activiteit in de reactor verantwoordelijk was voor de stabilisering van de verwijdering. Dit is ook één van de redenen geweest om het onderzoek door te zetten.
- De LC-MS screeningsresultaten laten een significante afname zien van het aantal organische stoffen in de pilot. Dit resultaat is gedurende de gehele proefperiode behaald.
- De metingen aan de ecotoxiciteit, conform de verschillende gehanteerde methodes, laten een afname van de ecotoxiciteit zien van het water na behandeling in de pilot, gedurende de gehele proefperiode.

Naast de primaire doelstelling is aandacht besteed aan de simultane verwijdering van ammonium stikstof en fosfaat. De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- De vergaande verwijdering van opgelost fosfaat door simultane coagulant dosering is mogelijk, zonder dat dit een negatief effect lijkt te hebben op de biologische activiteit. Er is 6 maanden aaneensluitend coagulant gedoseerd, terwijl dit geen negatieve invloed heeft gehad op de biologische nitrificatie in de reactor. Dit sluit aan bij de praktijkervaring waarbij combinaties van coagulant dosering en biologische stikstofverwijdering in één reactor mogelijk zijn.
- De verwijdering van totaal fosfaat in de reactor is nog onvoldoende onderbouwd door de beperkte analyses. Dit hangt mede samen met de lage influent concentraties. In het geplande nadere onderzoek wordt hieraan verder aandacht besteed.
- In de proefinstallatie wordt ammonium stikstof omgezet in nitraat stikstof, er is dus sprake van een actieve biologische nitrificatie.

In de operationele bedrijfsvoering is vastgesteld dat voor de specifieke situatie op rwzi Emmen de voorbehandeling van het influent van de pilot in aanvang ontoereikend was, waardoor verstopping van de installatie aan de orde was. Dit is opgelost door inzet van de aanwezige trommelzeef, voorafgaand aan de voeding van de pilot. Voor de opschaling van de technologie is de verwachting dat een normale vorm van voorzeving (inline duplex filter of vergelijkbaar) voldoende is. Hiermee is rekening gehouden voor de bepaling van de (investerings)kosten en de CO<sub>2</sub> voetafdruk.



In het onderzoek was soms sprake van uitspoeling van kool deeltjes. Aandacht is besteed aan de specifieke omstandigheden, waarbij dit plaatsvond. Daarmee zijn de grenzen voor de toepasbare procescondities vastgelegd. Met name de ingebrachte hoeveelheid lucht in het filterbed voor de biologie speelt een belangrijke factor. Een maximaal toepasbare luchtsnelheid in het filterbed is vastgesteld.

Tijdens de proefperiode zijn de verwijderingsrendementen voor microverontreinigingen vastgesteld en getoetst conform de Nederlandse Richtlijn van het Ministerie van IenW. Ook zijn de resultaten getoetst aan de concept Europese Richtlijn Stedelijk Afvalwater. In beide gevallen wordt over de nageschakelde zuivering een rendement gehaald van minimaal 80%. Daarnaast is er nauwelijks een verschil in resultaat in de vergelijking van de concept Europese Richtlijn en de Nederlandse Richtlijn.

De onderzoeksresultaten en de uitwerking van de ontwerpgrondslagen voor de full scale installatie leiden tot de prestatiekenmerken van de bio-GAK technologie, zoals gepresenteerd in de vergelijkingsmatrix in tabel 5.1.1.

**TABEL 5.1.1 PRESTATIEKENMERKEN BIO-GAK**

Prestatiekenmerk	Eenheid	PACAS	O <sub>3</sub> + zandfiltratie	bio-GAK
CO <sub>2</sub> voetafdruk	gram CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	122	128	109
Kosten	EUR/m <sup>3</sup>	0,05	0,17	0,21
Verwijderingsrendement 7/11 gidsstoffen	%	70-75%	80-85%	80-85%

## 5.2 AANBEVELINGEN

Met steun van de leden van de klankbordgroep, die nauw betrokken zijn bij het onderzoek, is het proefonderzoek voortgezet. Hiermee kan de verdere ontwikkeling van het verwijderingsrendement van de proefinstallatie voor microverontreinigingen gevolgd worden en een nadere onderbouwing voor de te behalen standtijd van de koolkolom worden gegeven. Daarnaast wordt in dit vervolgonderzoek verder aandacht besteed aan de verwijdering van fosfaat, ammonium en zwevende stof.

## 6

## 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](http://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. Wouters, 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., Magnetc, 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.
- Mulder, M. (2019, oktober 26). CO2-footprint voor verwijdering van microverontreinigingen, excel rekensheet.
- Mulder, M. (28 december 2022). *Berekening CO2 footprint en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit RWZI afvalwater*. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- 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., Muphy, S., ver strat, 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.
- STOWA. (2020). *Voorbeeld webtool STOWA 2020-06 standaard RWZI*.
- STOWA. (2021). *Bepaling verwijderingsrendement medicijnresten RWZI-afvalwater, koepelvoorschrift en onderbouwende eindrapportage, rapport 2021-15*.
- STOWA. (3 april 2020). *Voorlopige handreiking voor het uitvoeren van biologische effectmonitoring bij vergaande zuivering van RWZI-effluenten*.
- 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 zuurstofdoserings: 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*.

Weemaes, 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.

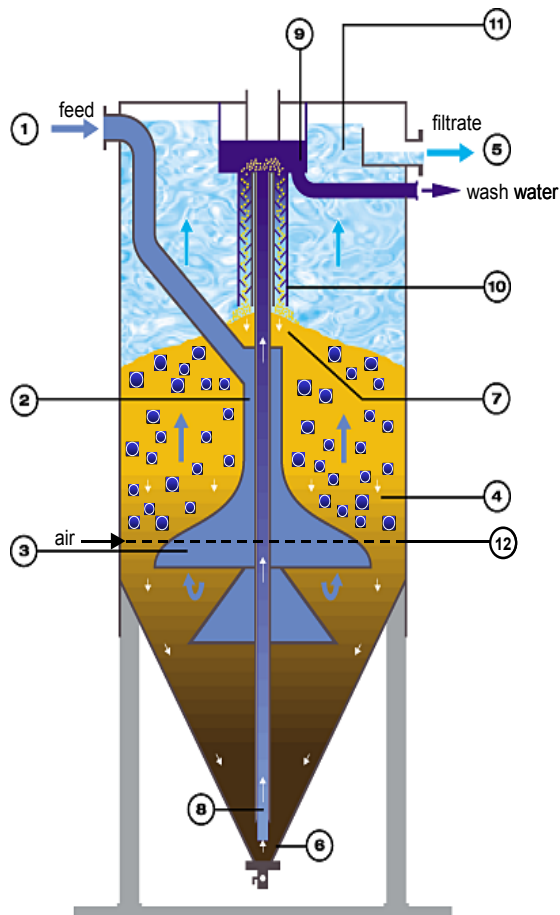
Zhang, Z.H., Shao, L. (2008). Study on control of micropollutants by BAC filtration. *IWA Water Science & technology*, 677-682.

## BIJLAGE 1

# PROCESBESCHRIJVING CONTINUFILTRATIE

Het continufilter (afgekort 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 B.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 waslabijnth en worden de verontreinigingen meegenomen met het waswater.

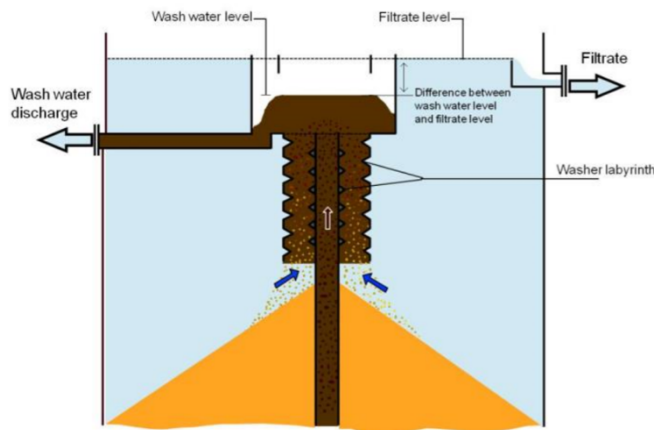
Het filtratie proces is weergegeven in bijgaande figuur B.1.1. De procesbeschrijving refereert naar de nummers in deze figuur.

Het water, dat gezuiverd gaat worden, wordt getransporteerd naar het filter, door de invoerleiding (1). Het water komt via de centrale voedingspijp (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 filtermateriaal wordt onderin de conus van de filtertank in de airlift (8) gezogen en naar boven gestuwd. Het filtermateriaal wordt bovenin het filter in de wasser geleid en gescheiden van het vuil, voordat het gereinigde filtermateriaal (7) weer bovenop het filterbed valt. Het vuil wordt in een continue stroom afgevoerd. Hierdoor wordt een continue circulatie en wassing van filtermateriaal gerealiseerd.

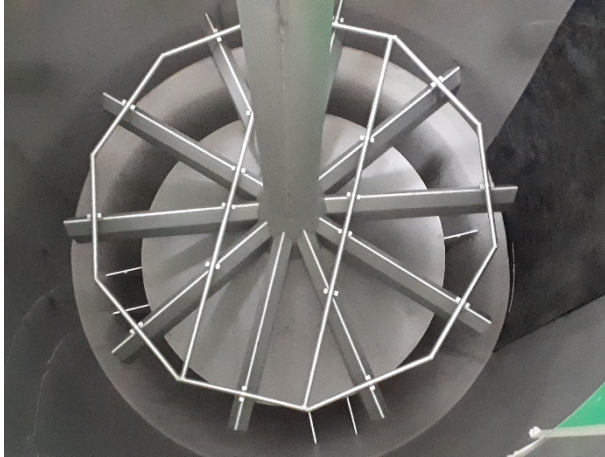
Het waslabyrint uit figuur B.1.2 bestaat uit meerdere ringen, die rondom de airlift geplaatst zijn. Het filtermateriaal dat uit de monding van de airlift komt bezinkt door dit waslabyrint in tegenstroom met een kleine hoeveelheid water, dat door een waternivo verschil tussen het filtraat en het waswater naar boven stroomt door het labyrint. Het waswater neemt de vuildeeltjes mee zodat een continue scheiding van vuil en filtermateriaal plaatsvindt.

FIGUUR B.1.2 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET WASLABYRINTH



Voor de toepassing van het continufilter in dit onderzoek 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.

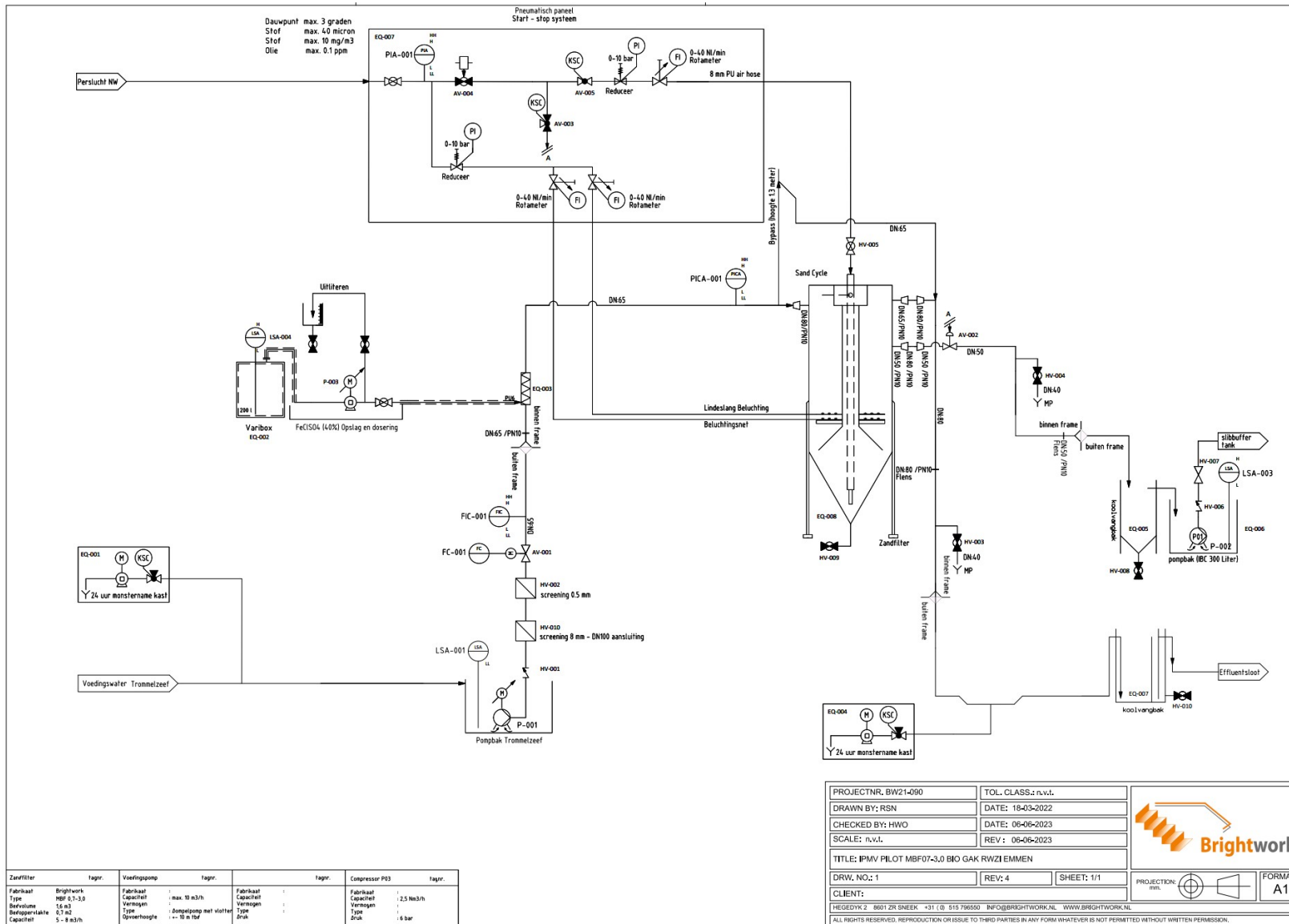
Bij biologische nitrificatie in het zandfilter wordt ammonium-N omgezet in nitraat-N, door nitrificerende biomassa, die zich vormt op de zandkorrels. Voor dit biologisch proces is zuurstof nodig, die wordt toegevoegd onderin het filterbed door middel van een beluchtingsnet (zie figuur B.1.3). Hiermee 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 B.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.



# P&ID PROEFINSTALLATIE

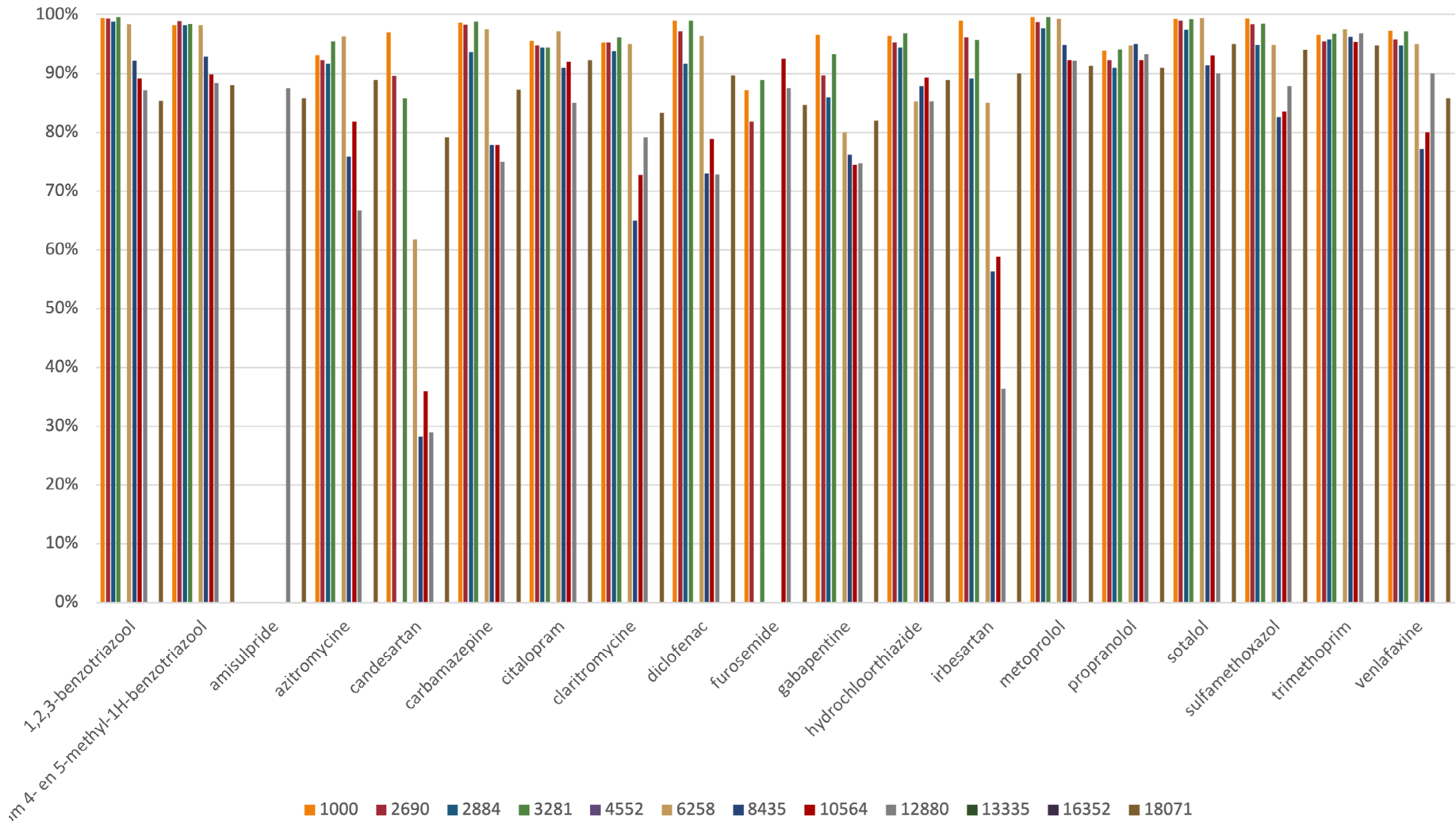


Zandfilter	lager	Voedingspomp	lager	Compressor PE3	lager
Fabriek Type Berekening Berepingslaie Capaciteit	Brightwork MBF 2,1-3,0 5,0 m3 0,5 m2 5 - 8 m3/h	Fabriek Capaciteit Vernagen Type Opvoerhoogte	. max. 10 m3/h . Bompeomp met vlotter - 1 - 10 m tbt	Fabriek Capaciteit Vernagen Type druk	. .25 m3/h . . . 1,6 bar

PROJECTNR, BW21-090	TOL. CLASS: n.v.l.
DRAWN BY: RSN	DATE: 18-03-2022
CHECKED BY: HWO	DATE: 06-06-2023
SCALE: n.v.l.	REV: 06-06-2023
TITLE: IPMV PILOT MBF07-3.0 BIO GAK RWZI EMMEN	
DRW. NO.: 1	REV: 4 SHEET: 1/1
CIENT:	PROJECTION:
HEGEDYK 2 8801 ZR SNEEK +31 (0) 515 790550 INFO@BRGHTWORK.NL WWW.BRGHTWORK.NL	
FORMAT: A1	

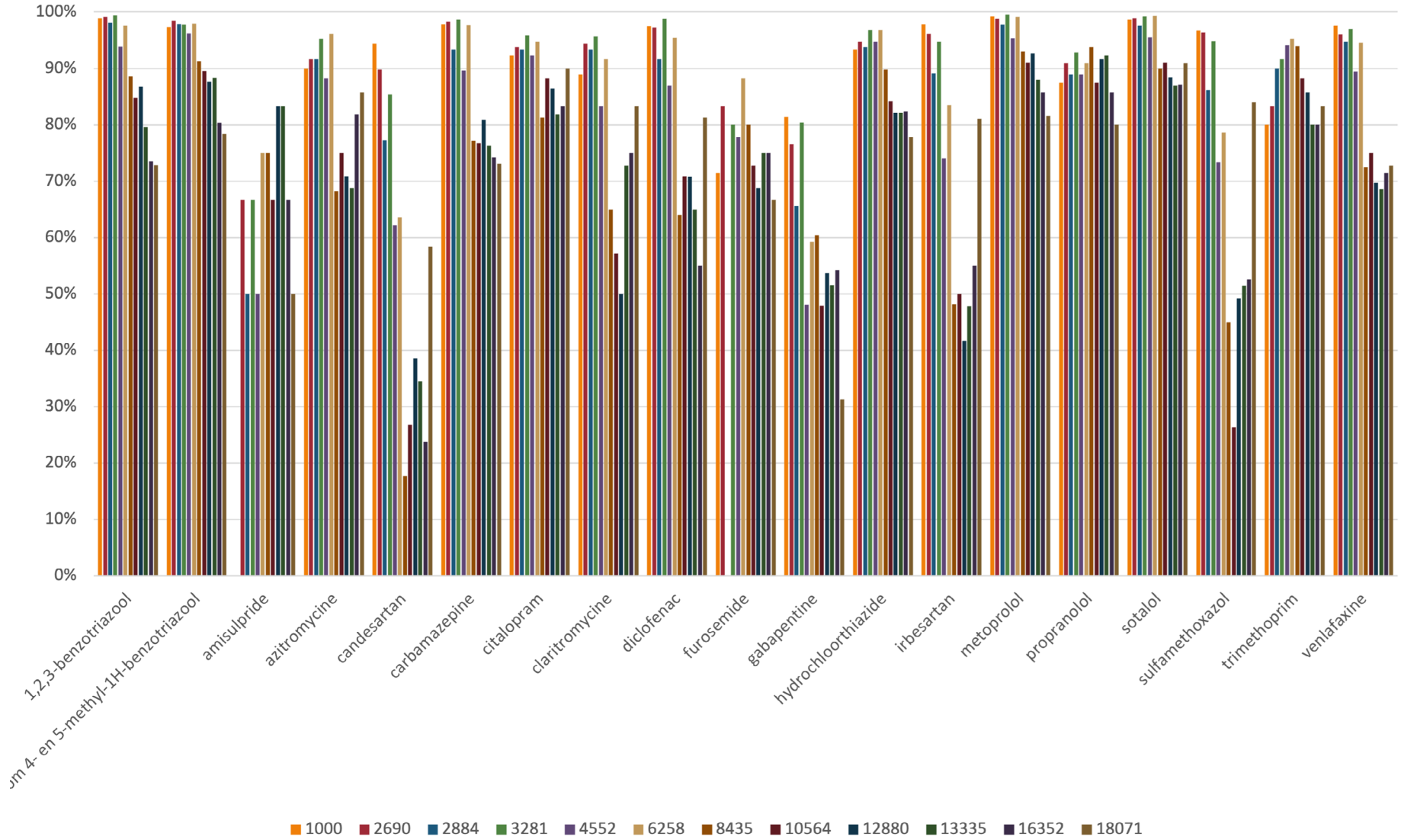
# VERWIJDERINGSRENDEMENT GIDSSTOFFEN

Verwijdering tov influent rwzi



# Verwijdering tov effluent rwzi

52



## BIJLAGE 4

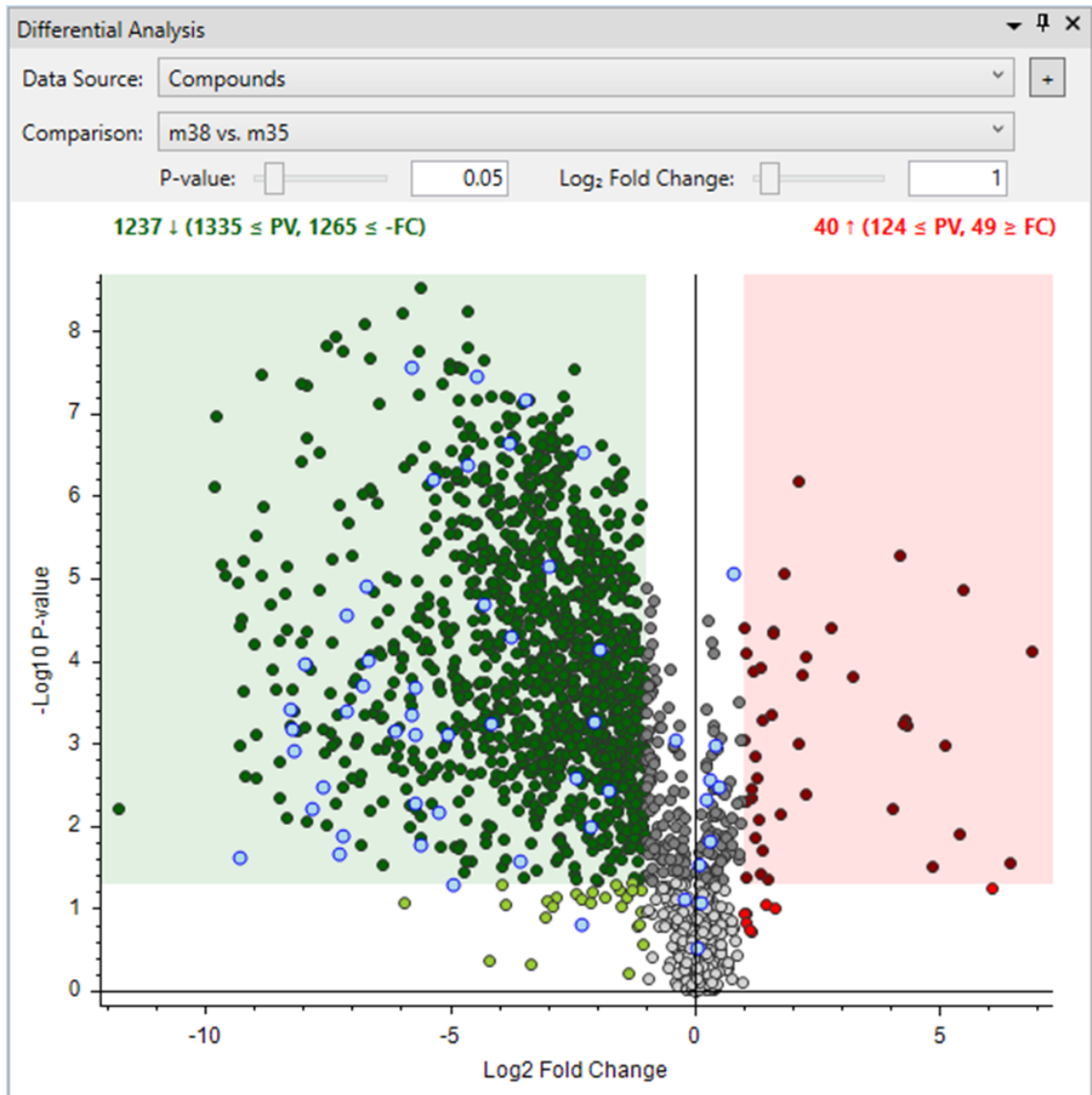
## LC-MS NON-TARGET SCREENING

## 4.1 METING 2 DECEMBER 2022

## PLOT VAN DE POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

m35 is de analyse van het watermonster afgenomen uit het effluent van de trommelzeef.

m38 is de analyse van het watermonster afgenomen uit het effluent van de filter bio-GAK.



**PLOT: LCMS-ONBEKENDEN SCREENING RESULTATEN VAN POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN**

Elke stip staat voor een stof.

Rode en groene stippen betekenen dat er stoffen zijn aangetroffen waarvan de naam onbekend is.

Blauwe stippen betekenen dat er stoffen zijn aangetroffen waarvan de naam bekend is.

In het groene vlak zijn stoffen weergegeven die significant zijn afgenomen in het effluent van de filter bio-GAK (m38) ten opzichte van het influent (m35).

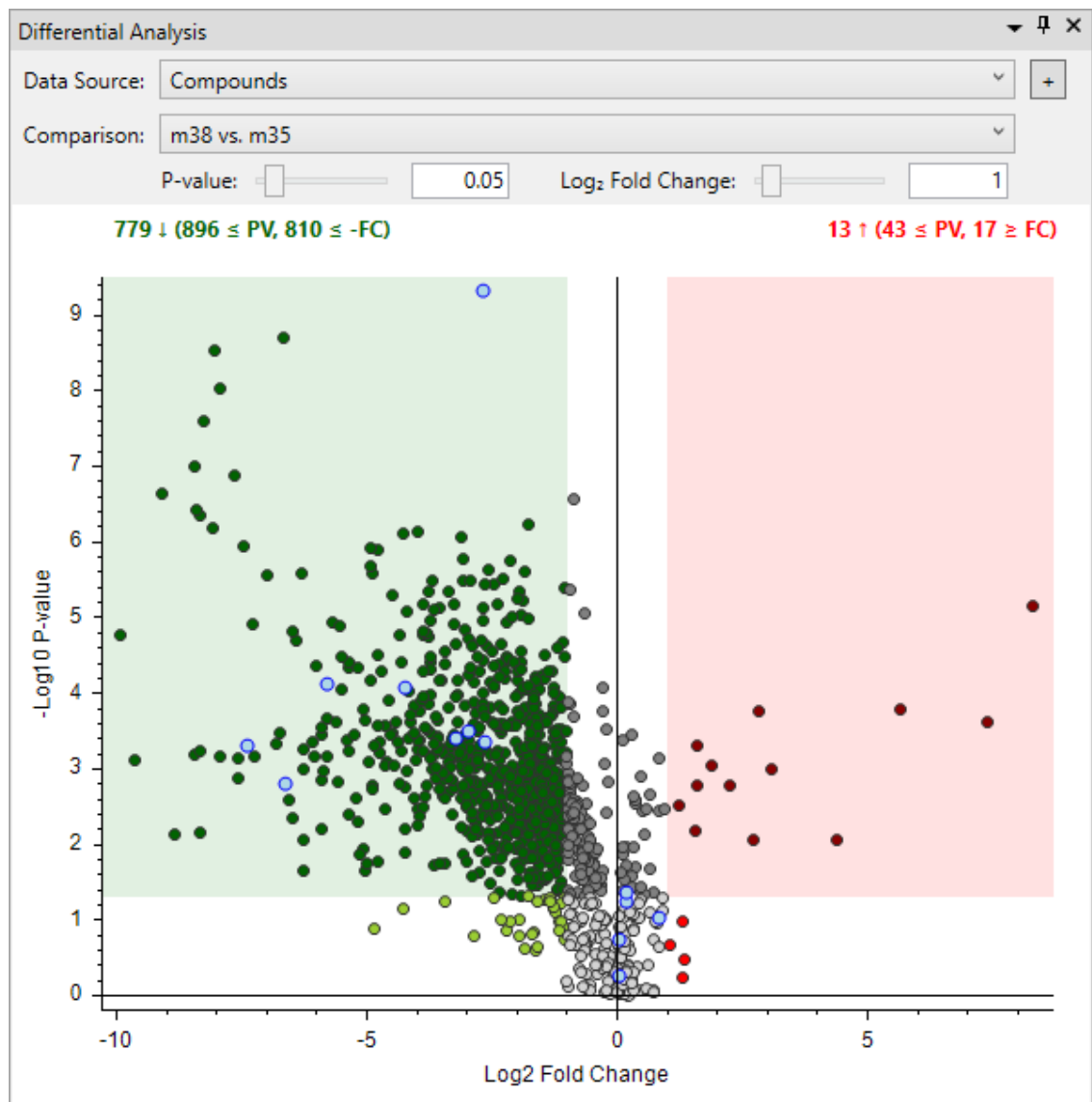
In het rode vlak zijn stoffen weergegeven die significant zijn toegenomen in het effluent van de filter bio-GAK (m38) ten opzichte van het influent (m35).

Stoffen die buiten de gekleurde vlakken vallen zijn niet significant ( $\leq$  PV) toe- ( $\geq$  FC) of afgenomen ( $\leq$  -FC).

**PLOT VAN DE NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN**

m35 is de analyse van het watermonster afgenomen uit het effluent van de trommelzeef.

m38 is de analyse van het watermonster afgenomen uit het effluent van de filter bio-GAK.



**PLOT: LCMS-ONBEKENDEN SCREENING RESULTATEN VAN NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN**

Elke stip staat voor een stof.

Rode en groene stippen betekenen dat er stoffen zijn aangetroffen waarvan de naam onbekend is.

Blauwe stippen betekenen dat er stoffen zijn aangetroffen waarvan de naam bekend is.

In het groene vlak zijn stoffen weergegeven die significant zijn afgenomen in de filter bio-GAK.

In het rode vlak zijn stoffen weergegeven die significant zijn toegenomen in de filter bio-GAK. Stoffen die buiten de gekleurde vlakken vallen zijn niet significant toe- of afgenomen. Blauwe stippen zijn bekende stoffen.

In onderstaande tabellen is de toename en afname van de geïdentificeerde stoffen in de LC-MS screening weergegeven. De in rood aangegeven stoffen zijn stoffen die voorkomen op de lijst van (kandidaat) gidsstoffen.

**Meting 1 – Negatief ioniserende stoffen - Afname geïdentificeerde stoffen**

Tags	Name	Formula	Log2 Fold Change	-log10 Pvalue
1	Sucralose	C12 H19 Cl3 O8	-2,95	3,50
1	Hydrochlorothiazide	C7 H8 Cl N3 O4 S2	-6,6	2,80
1	Candesartan	C24 H20 N6 O3	-2,64	3,34
1	Furosemide	C12 H11 Cl N2 O5 S	-5,78	4,11
1	Saccharin	C7 H5 N O3 S	-2,68	9,31
2	Fludioxonil	C12 H6 F2 N2 O2	-7,37	3,30
1	Losartan	C22 H23 Cl N6 O	-4,22	4,06
2	Xylenesulfonate	C8 H10 O3 S	-3,2	3,39

**Meting 1 – Negatief ioniserende stoffen - Toename geïdentificeerde stoffen**

Er zijn geen stoffen geïdentificeerd.

## Meting 1 – Positief ioniserende stoffen - Afname geïdentificeerde stoffen

Tags	Name	Formula	Log2 Fold Change	-log10 Pvalue
1	Irbesartan	C25 H28 N6 O	-3,78	6,63
1	Metoprolol	C15 H25 N O3	-8,25	3,41
1	ijzer EDTA	C13 H10 F N3 O2 S2	-0,39	3,04
1	Carbamazepine	C15 H12 N2 O	-6,12	3,15
2	Triphenylphosphine oxide	C18 H15 O P	-2,4	2,57
2	Temazepam	C16 H13 Cl N2 O2	-4,64	6,38
1	Benzotriazole	C6 H5 N3	-7,1	4,56
1	Tramadol	C16 H25 N O2	-6,68	4,00
2	Flecainide	C17 H20 F6 N2 O3	-7,94	3,96
1	Gabapentin	C9 H17 N O2	-1,95	4,14
2	Atenolol acid	C14 H21 N O4	-4,3	4,69
1	10,11-Dihydro-10,11-dihydroxycarbamazepine	C15 H14 N2 O3	-3,73	4,28
1	Sotalol	C12 H20 N2 O3 S	-6,7	4,90
1	Bisoprolol	C18 H31 N O4	-7,8	2,21
1	Gabapentin-lactam	C9 H15 N O	-2,27	6,52
1	Carbamazepine 10,11-epoxide	C15 H12 N2 O2	-4,44	7,45
1	Atenolol	C14 H22 N2 O3	-7,1	3,40
1	Sulfamethoxazole	C10 H11 N3 O3 S	-3,45	7,16
1	Valsartan	C24 H29 N5 O3	-2,96	5,13
1	N,N'-Diphenylguanidine	C13 H13 N3	-5,69	3,10
2	Sulfapyridine	C11 H11 N3 O2 S	-6,77	3,70
1	Caprolactam	C6 H11 N O	-0,2	1,10
1	Losartan	C22 H23 Cl N6 O	-4,14	3,23
1	Carbamazepine 10,11-epoxide	C15 H12 N2 O2	-5,78	3,34
1	Lidocaine	C14 H22 N2 O	-7,59	2,46
2	5-Methylbenzotriazole	C7 H7 N3	-8,2	3,17
2	MDMA	C11 H15 N O2	-5,78	7,55
1	N-(3-Bromo-5-methyl-2-pyridinyl)-4-pentylbenzenesulfonamide	C17 H21 Br N2 O2 S	-5,71	2,27
1	Propranolol	C16 H21 N O2	-7,24	1,65
1	4-Methylbenzotriazole	C7 H7 N3	-8,2	2,90
1	Boscalid	C18 H12 Cl2 N2 O	-7,18	1,89
1	Azoxystrobin	C22 H17 N3 O5	-2,13	1,98
1	N,N'-Dicyclohexylurea	C13 H24 N2 O	-2,29	0,81
2	5-Hydroxydiclofenac	C14 H11 Cl2 N O3	-5,69	3,67
1	Trimethoprim	C14 H18 N4 O3	-9,31	1,61
1	Cyprodinil	C14 H15 N3	-4,94	1,29
1	Flutolanil	C17 H16 F3 N O2	-5,59	1,77
1	Clarithromycin	C38 H69 N O13	-5,23	2,15
1	Gabapentin	C9 H15 N O	-2,05	3,26
1	Prosulfocarb	C14 H21 N O S	-3,56	1,56

## Meting 1 – Positief ioniserende stoffen - Toename geïdentificeerde stoffen

Er zijn geen stoffen geïdentificeerd.

#### 4.2 METING 17/19 APRIL 2023

De LC-MS onbekenden screening of Non-Target Screening (NTS) is een analyse om onbekende verbindingen op te sporen en te identificeren.

De resultaten van een screening zijn in een figuur geplot. De screening is opgesplitst in positief en negatief ioniserende componenten. Elke stip in een plot staat voor een stof. De blauwe stippen zijn bekende stoffen. De groene stippen zijn onbekende stoffen die zijn afgenomen. De rode stippen zijn onbekende stoffen die zijn toegenomen.

In het groene vlak van de plot zijn de stoffen weergegeven die significant zijn afgenomen in het filtraat ten opzichte van het influent van de BODAC filter. In het rode vlak van de plot zijn de stoffen weergegeven die significant zijn toegenomen in het filtraat ten opzichte van het influent van de BODAC filter. Stoffen die buiten de gekleurde vlakken vallen zijn niet significant ( $\leq$  PV) toe- ( $\geq$  FC) of afgenomen ( $\leq$  -FC).

De tabel geeft de zekerheid index weer die als niveau (als Tags kolom in Excelbestand) wordt benoemd bij de stofnaam (zie Excel bestanden). Het niveau geeft een bepaalde zekerheid aan in de identificatie van de desbetreffende stof.

#### ZEKERHEID INDEX VOOR LC-MS ONBEKENDEN SCREENING

Niveau	Zekerheid identificatie	Minimum data eisen
1	Structuur bevestigd met referentie standaard	MS, MS2, RT, Reference Std
2	Eenduidige structuur door: a) Spectrum uit bibliotheek b) Diagnostische bewijsmateriaal	a) MS, MS2, Library MS2 b) MS, MS2, Experimentele data

#### PLOT VAN DE POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Monsternummer 2318250 is de analyse van het watermonster afgenomen uit het effluent van de trommelzeef.

Monsternummer 2318253 is de analyse van het watermonster afgenomen uit het effluent van de filter bio-GAK.





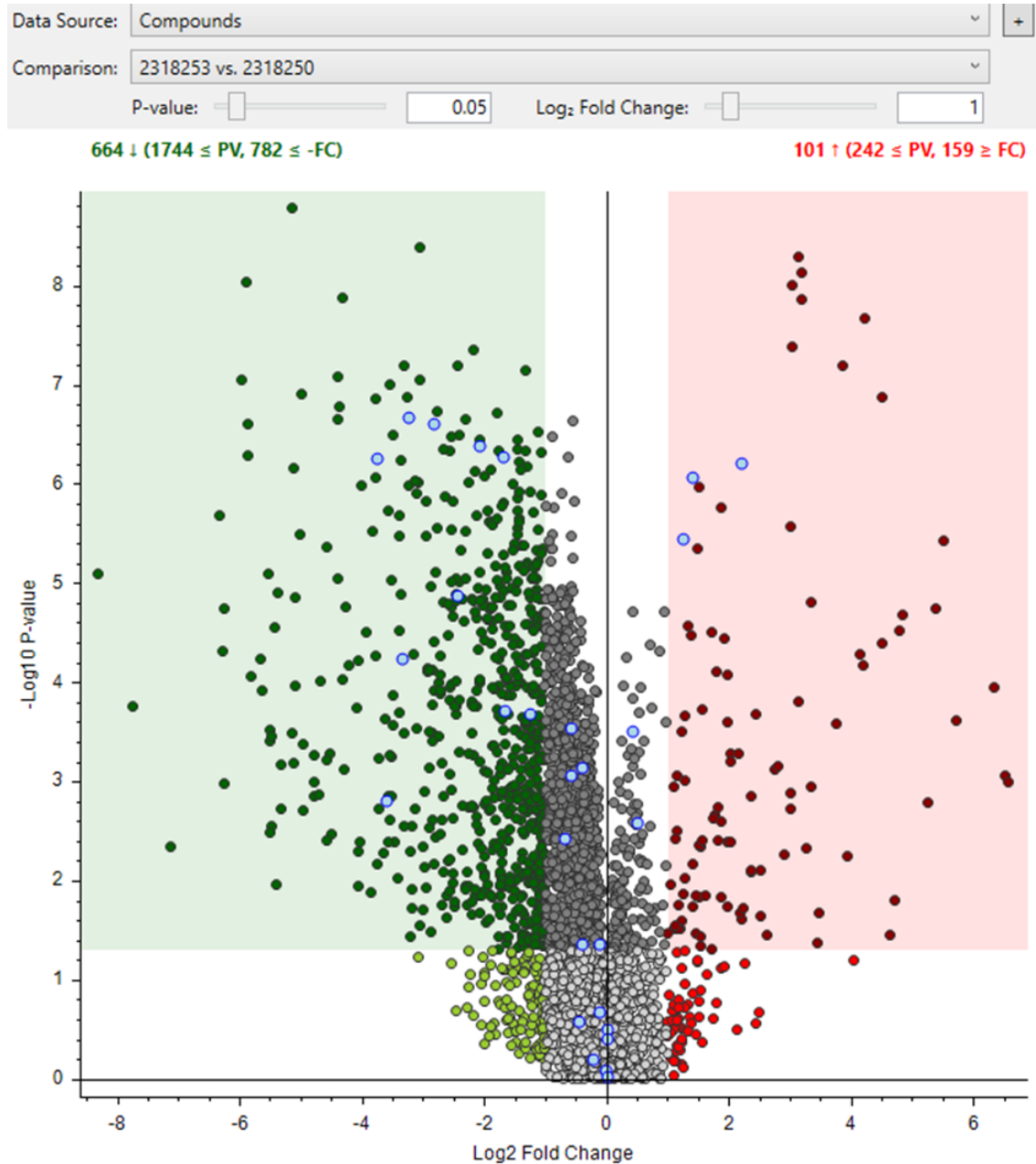
**PLOT: NTS RESULTATEN VAN POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN**

Blauwe stippen zijn bekende stoffen. Groene en rode stippen zijn onbekende stoffen. In het groene vlak zijn de stoffen weergegeven die significant zijn afgenomen. In het rode vlak zijn de stoffen weergegeven die significant zijn toegenomen. Stoffen die buiten de gekleurde vlakken vallen zijn niet significant toe- of afgenomen.

**PLOT VAN DE NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN**

Monsternummer 2318250 is de analyse van het watermonster afgenomen uit het effluent van de trommelzeef.

Monsternummer 2318253 is de analyse van het watermonster afgenomen uit het effluent van de filter bio-GAK.

**PLOT: NTS RESULTATEN VAN NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN**

NTS resultaten van negatief ioniserende componenten. Blauwe stippen zijn bekende stoffen. Groene en rode stippen zijn onbekende stoffen. In het groene vlak zijn de stoffen weergegeven die significant zijn afgenomen. In het rode vlak zijn de stoffen weergegeven die significant zijn toegenomen. Stoffen die buiten de gekleurde vlakken vallen zijn niet significant toe- of afgenomen.

In onderstaande tabellen is de toename en afname van de geïdentificeerde stoffen in de LC-MS screening weergegeven. De in rood aangegeven stoffen zijn stoffen die voorkomen op de lijst van (kandidaat) gidsstoffen.

#### Meting 2 – Negatief ioniserende stoffen - Afname geïdentificeerde stoffen

Tags	Name	Formula	Log2 Fold Change	-log10 Pvalue
1	<b>Furosemide</b>	C12 H11 Cl N2 O5 S	-2,06	6,388
1	Fludioxonil	C12 H6 F2 N2 O2	-3,23	6,674
2	<b>Hydrochlorothiazide</b>	C7 H8 Cl N3 O4 S2	-2,81	6,596
2	Bicalutamide	C18 H14 F4 N2 O4 S	-2,42	4,877
2	Rivaroxaban	C19 H18 Cl N3 O5 S	-3,34	4,228
2	Chlorothiazide	C7 H6 Cl N3 O4 S2	-1,69	6,277
1	Fipronil	C12 H4 Cl2 F6 N4 O S	-1,24	3,674
1	<b>4-Methylbenzotriazole</b>	C7 H7 N3	-3,59	2,808
1	<b>5-Methylbenzotriazole</b>	C7 H7 N3	-3,74	6,252
2	Telmisartan	C33 H30 N4 O2	-1,66	3,704

#### Meting 2 – Negatief ioniserende stoffen - Toename geïdentificeerde stoffen

Tags	Name	Formula	Log2 Fold Change	-log10 Pvalue
1	p-Toluenesulfonic acid	C7 H8 O3 S	2,21	6,211
1	Acesulfame	C4 H5 N O4 S	1,41	6,064
2	1-(Carboxymethyl)cyclohexanecarboxylic acid	C9 H14 O4	1,26	5,444

## Meting 2 – Positief ioniserende stoffen - Afname geïdentificeerde stoffen

Tags	Name	Formula	Log2 Fold Change	-log10 Pvalue
1	Diclofenac	C14 H11 Cl2 N O2	-1,83	4,38
1	Carbamazepine	C15 H12 N2 O	-2,26	5,01
1	Carbamazepine	C15 H12 N2 O	-1,52	3,10
1	Flutolanil	C17 H16 F3 N O2	-2,33	2,50
1	Clarithromycin	C38 H69 N O13	-1,29	2,67
1	Propiconazole	C15 H17 Cl2 N3 O2	-2,48	2,74
1	4'-Hydroxydiclofenac	C14 H11 Cl2 N O3	-1,44	3,08
1	MDMA	C11 H15 N O2	-3,64	2,98
1	10,11-Dihydro-10,11-dihydroxycarbamazepine	C15 H14 N2 O3	-1,22	3,96
1	Bisoprolol	C18 H31 N O4	-3,53	4,43
1	2-Methyl-S-benzothiazole	C8 H7 N S2	-3,05	4,43
1	Naproxen	C14 H14 O3	-1,97	4,42
1	4-Aminoantipyrine	C11 H13 N3 O	-1,31	2,01
1	N,N'-Diphenylguanidine	C13 H13 N3	-3,39	5,26
1	Fluopyram	C16 H11 Cl F6 N2 O	-1,59	3,13
1	Carbamazepine 10,11-epoxide	C15 H12 N2 O2	-2,65	4,77
1	4-Formylaminoantipyrine	C12 H13 N3 O2	-1,87	4,70
1	Atenolol	C14 H22 N2 O3	-3,02	4,90
1	Lidocaine	C14 H22 N2 O	-3,26	4,54
1	Irbesartan	C25 H28 N6 O	-1,11	3,12
1	Imidacloprid	C9 H10 Cl N5 O2	-3,22	6,04
1	4-Formylaminoantipyrine	C12 H13 N3 O2	-1,81	4,31
1	4-Methylbenzotriazole	C7 H7 N3	-3,33	4,43
1	Losartan	C22 H23 Cl N6 O	-1,2	3,04
1	Benzotriazole	C6 H5 N3	-2,69	4,22
1	Metoprolol	C15 H25 N O3	-3,52	4,38
1	Propranolol	C16 H21 N O2	-4,13	3,47
1	Propiconazole	C15 H17 Cl2 N3 O2	-2,48	3,69
1	Clozapine	C18 H19 Cl N4	-1,23	1,19
1	5-Methylbenzotriazole	C7 H7 N3	-3,59	5,82
1	Pirimicarb	C11 H18 N4 O2	-2,13	3,44
2	Trimethoprim	C14 H18 N4 O3	-3,48	5,96
2	O-Desmethylvenlafaxine	C16 H25 N O2	-2,07	3,80
2	Gliclazide	C15 H21 N3 O3 S	-7,51	4,95
2	Clopidogrel carboxylic acid	C15 H14 Cl N O2 S	-5,77	3,78
2	Fexofenadine	C32 H39 N O4	-1,05	3,14
2	Clopidogrel	C16 H16 Cl N O2 S	-2,52	4,16
1	Temazepam	C16 H13 Cl N2 O2	-1,51	2,92
2	4-Acetamidoantipyrine	C13 H15 N3 O2	-1,56	3,38
2	Venlafaxine	C17 H27 N O2	-2,14	3,79
2	Tetrakis(2-hydroxypropyl)ethylenediamine	C14 H32 N2 O4	-4,25	3,84
2	2-Amino-6-methylmercaptapurine	C6 H7 N5 S	-3,55	4,10
2	Escitalopram	C20 H21 F N2 O	-3,15	3,08
2	2,5-Dimethylpyrazine	C6 H8 N2	-3,78	4,22
2	Cimetidine	C10 H16 N6 S	-4,55	3,70
2	Cetirizine	C21 H25 Cl N2 O3	-1,19	3,68
2	Telmisartan	C33 H30 N4 O2	-1,71	3,63
2	3-Hydroxy-2-methylpyridine	C6 H7 N O	-1,99	4,58
2	Rivaroxaban	C19 H18 Cl N3 O5 S	-3,46	4,58
2	Desmethylcitalopram	C19 H19 F N2 O	-2,75	3,89
2	3-Methylbenzophenone	C14 H12 O	-3,46	3,13
2	Flecainide	C17 H20 F6 N2 O3	-2,75	4,99
2	Triphenyl phosphate	C18 H15 O4 P	-2,25	3,61
2	Labetalol	C19 H24 N2 O3	-3,99	2,33
2	Tetrakis(2-hydroxypropyl)ethylenediamine	C14 H32 N2 O4	-3,67	3,17
2	Desacetyl diltiazem	C20 H24 N2 O3 S	-4,04	6,04
2	Lacosamide	C13 H18 N2 O3	-1,47	3,03
2	Pirlimycin	C17 H31 Cl N2 O5 S	-2,14	5,28
2	Celiprolol	C20 H33 N3 O4	-2,79	4,71
2	9-acridinecarboxylic acid hydrate	C14 H9 N O2	-1,77	2,77
2	Sitagliptin	C16 H15 F6 N5 O	-3,14	3,41
2	Azithromycin	C38 H72 N2 O12	-2,08	2,80
2	Amisulpride	C17 H27 N3 O4 S	-3,27	3,00
2	Hydromorfinol	C17 H21 N O4	-2,46	6,44
2	Verapamil	C27 H38 N2 O4	-3,28	4,47
2	Sulpiride	C15 H23 N3 O4 S	-3,31	2,17
2	$\alpha$ -Hydroxymidazolam	C18 H13 Cl F N3 O	-1,64	2,72
2	2-Aminophenol	C6 H7 N O	-1,05	1,70

**Meting 2 – Positief ioniserende stoffen - Toename geïdentificeerde stoffen**

Tags	Name	Formula	Log2 Fold Change	-log10 Pvalue
1	N,N'-Dicyclohexylurea	C <sub>13</sub> H <sub>24</sub> N <sub>2</sub> O	1,83	3,97
1	Caprolactam	C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> N O	1,81	4,25

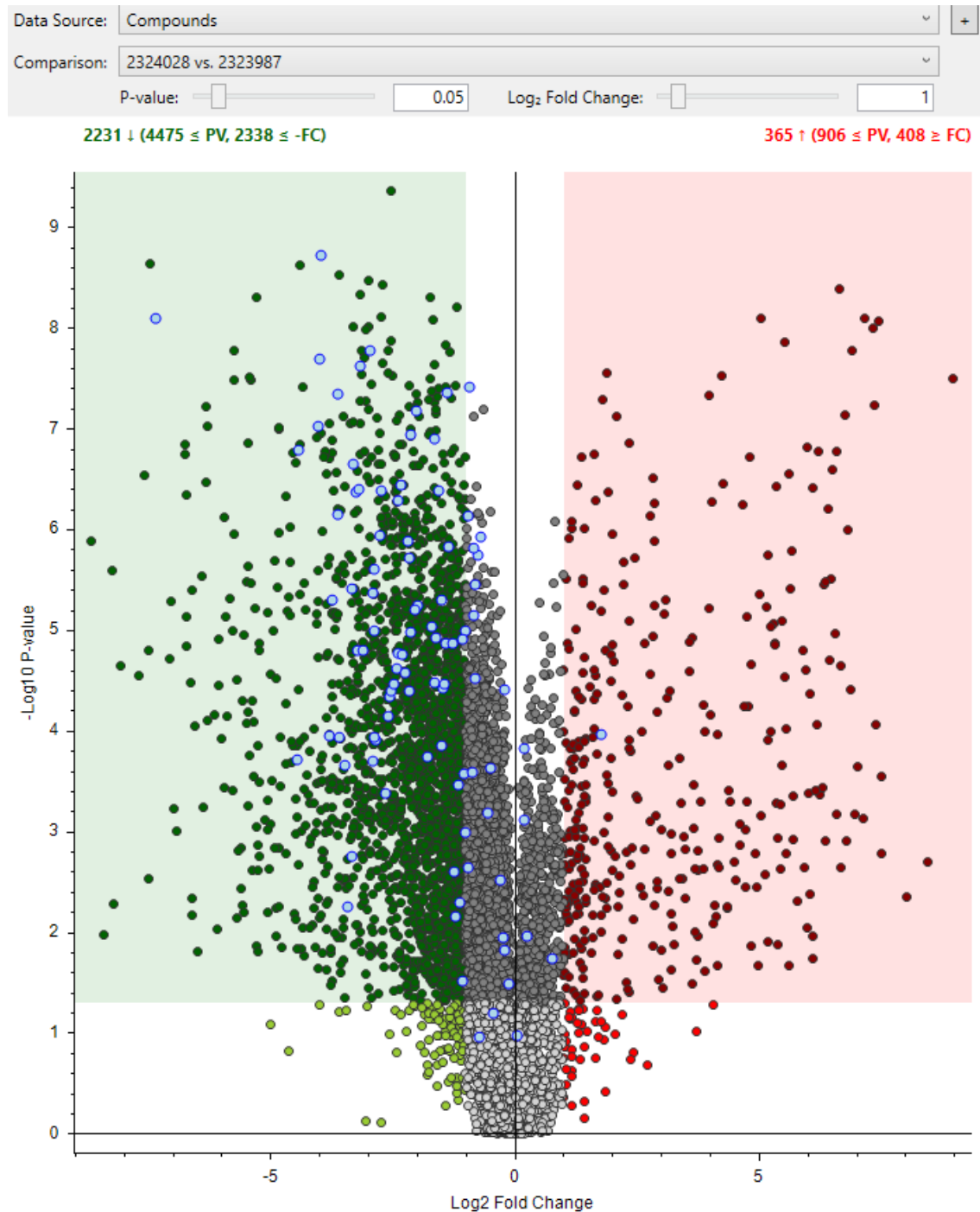
## 4.3 METING 22 – 24 MEI 2023

## PLOT VAN DE POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Monsternummer 2323987 is het effluent van de trommelzeef.

Monsternummer 2324028 is het effluent van de Bio-GAK filter.

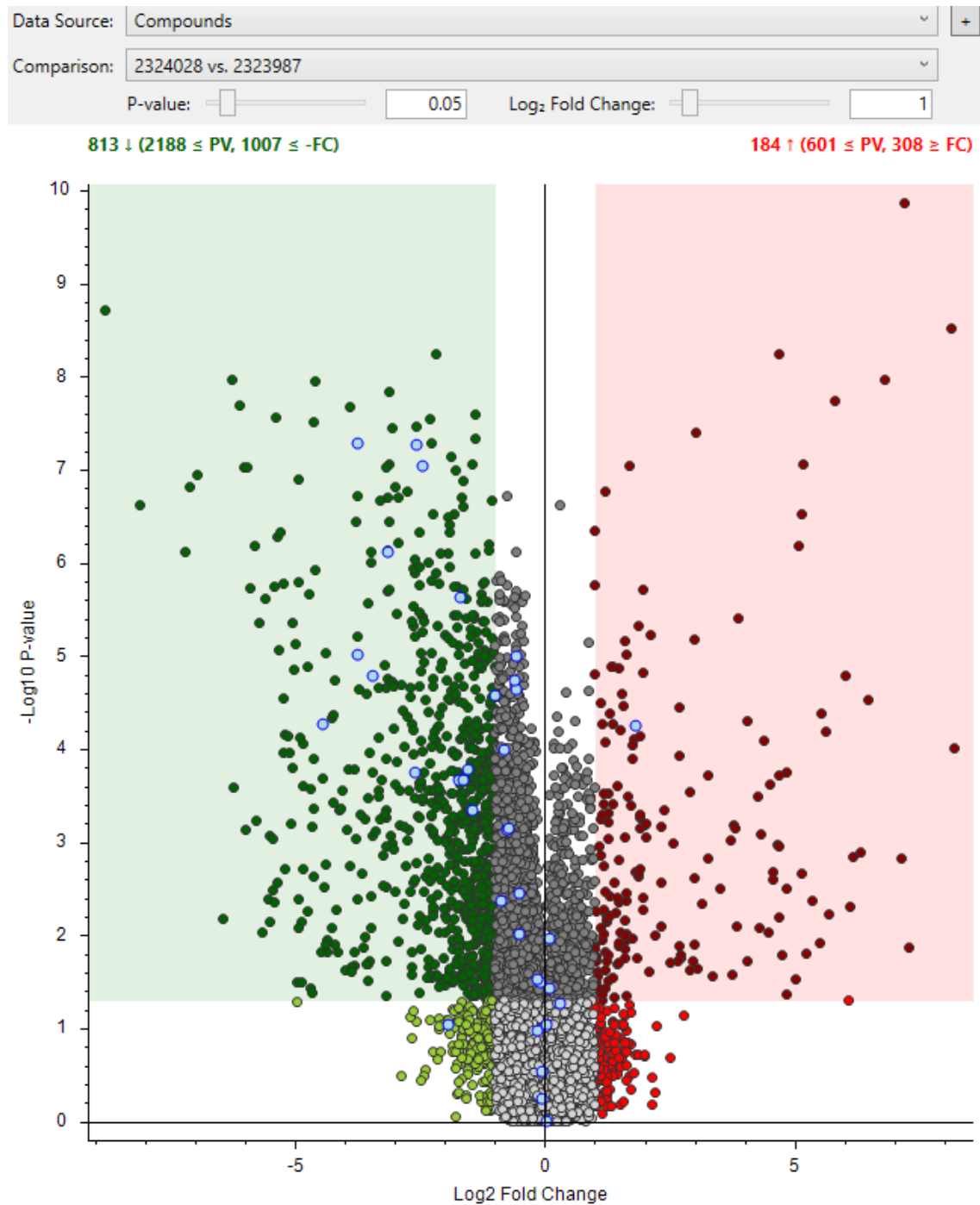
FIGUUR 1 PLOT NTS RESULTATEN VAN POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN. BLAUWE STIPPEN ZIJN BEKENDE STOFFEN. GROENE EN RODE STIPPEN ZIJN ONBEKENDE STOFFEN. IN HET GROENE VLAK ZIJN DE STOFFEN WEERGEGEVEN DIE SIGNIFICANT ZIJN AFGENOMEN. IN HET RODE VLAK ZIJN DE STOFFEN WEERGEGEVEN DIE SIGNIFICANT ZIJN TOEGENOMEN. STOFFEN DIE BUITEN DE GEKLEURDE VLAKKEN VALLEN ZIJN NIET SIGNIFICANT TOE- OF AFGENOMEN



**PLOT VAN DE NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN**

Monsternummer 2323987 is het effluent van de trommelzeef.

Monsternummer 2324028 is het effluent van de Bio-GAK filter.

**FIGUUR 2** PLOT NTS RESULTATEN VAN NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Blauwe stippen zijn bekende stoffen. Groene en rode stippen zijn onbekende stoffen. In het groene vlak zijn de stoffen weergegeven die significant zijn afgenomen. In het rode vlak zijn de stoffen weergegeven die significant zijn toegenomen. Stoffen die buiten de gekleurde vlakken vallen zijn niet significant toe- of afgenomen.

In onderstaande tabellen is de toename en afname van de geïdentificeerde stoffen in de LC-MS screening weergegeven. De in rood aangegeven stoffen zijn stoffen die voorkomen op de lijst van (kandidaat) gidsstoffen.

### Meting 3 – Negatief ioniserende stoffen - Afname geïdentificeerde stoffen

Tags	Name	Formula	Log2 Fold Change	-log10 Pvalue
1	Furosemide	C12 H11 Cl N2 O5 S	-1,69	5,63
2	Flutolanil	C17 H16 F3 N O2	-2,59	3,75
2	Hydrochlorothiazide	C7 H8 Cl N3 O4 S2	-2,56	7,28
2	Desamino metamidron	C10 H9 N3 O	-3,76	5,02
2	Caffeic acid	C9 H8 O4	-1,71	3,66
2	1,7-Dimethyluric acid	C7 H8 N4 O3	-4,45	4,27
2	Fludioxonil	C12 H6 F2 N2 O2	-3,45	4,79
2	Bicalutamide	C18 H14 F4 N2 O4 S	-2,44	7,04
2	Fipronil	C12 H4 Cl2 F6 N4 O S	-1,62	3,66
2	2,3-Dihydro-1-benzofuran-2-carboxylic acid	C9 H8 O3	-1,92	1,04
2	4-Methylbenzotriazole	C7 H7 N3	-3,13	6,12
2	3-Phenoxybenzoic acid	C13 H10 O3	-1,54	3,78
2	Rivaroxaban	C19 H18 Cl N3 O5 S	-3,75	7,29
2	Telmisartan	C33 H30 N4 O2	-1,44	3,34

### Meting 3 – Negatief ioniserende stoffen - Toename geïdentificeerde stoffen

Tags	Name	Formula	Log2 Fold Change	-log10 Pvalue
2	1-(Carboxymethyl)cyclohexanecarboxylic acid	C9 H14 O4	1,83	4,26



## Meting 3 – Positief ioniserende stoffen - Afname geïdentificeerde stoffen

Tags	Name	Formule	Log2 Fold Change	-log10 Pvalue
2	2,5-Dimethylpyrazine	C6 H8 N2	-3,74	5,30
1	<b>Benzotriazole</b>	C6 H5 N3	-2,4	6,28
2	1-Methylbenzotriazole	C7 H7 N3	-1,06	1,51
1	<b>5-Methylbenzotriazole</b>	C7 H7 N3	-3,11	4,79
1	<b>4-Methylbenzotriazole</b>	C7 H7 N3	-2,97	7,77
1	Chloridazon-desfenyl	C4 H4 Cl N3 O	-1	2,99
2	Propylhexedrine	C10 H21 N	-3,33	5,41
1	2-Methyl-5-benzothiazole	C8 H7 N S2	-3,99	7,69
2	2-Amino-6-methylmercaptapurine	C6 H7 N5 S	-3,24	6,38
1	Desamino metamitron	C10 H9 N3 O	-3,47	3,66
2	DEET	C12 H17 N O	-1,62	6,89
1	MDMA	C11 H15 N O2	-3,6	3,94
1	Caffeine	C8 H10 N4 O2	-1,24	2,60
1	Caffeine	C8 H10 N4 O2	-1,14	3,45
1	Metamitron	C10 H10 N4 O	-3,97	8,72
1	N,N'-Diphenylguanidine	C13 H13 N3	-3,62	6,15
1	Naproxen	C14 H14 O3	-1,51	5,30
1	Lidocaine	C14 H22 N2 O	-2,59	4,14
1	<b>Carbamazepine</b>	C15 H12 N2 O	-1,99	5,25
1	<b>Carbamazepine</b>	C15 H12 N2 O	-1,12	2,29
2	Bis(2-ethylhexyl) amine	C16 H35 N	-3,34	2,76
1	Sulfapyridine	C11 H11 N3 O2 S	-4,01	7,03
1	Prosulfocarb	C14 H21 N O S	-3,63	7,34
1	Carbamazepine 10,11-epoxide	C15 H12 N2 O2	-2,39	4,77
2	Oxcarbazepine	C15 H12 N2 O2	-2,05	5,20
2	Oxcarbazepine	C15 H12 N2 O2	-2,48	4,46
2	Cimetidine	C10 H16 N6 S	-4,41	6,79
1	<b>Sulfamethoxazole</b>	C10 H11 N3 O3 S	-2,86	4,99
2	Lamotrigine	C9 H7 Cl2 N5	-2,72	6,38
1	Imidacloprid	C9 H10 Cl N5 O2	-2,89	5,37
2	O-Desmethylvenlafaxine	C16 H25 N O2	-1,46	4,42
1	Atenolol	C14 H22 N2 O3	-2,88	5,61
2	Atenolol acid	C14 H21 N O4	-1,01	4,99
1	<b>Metoprolol</b>	C15 H25 N O3	-3,29	6,65
1	<b>Sotalol</b>	C12 H20 N2 O3 S	-2,84	3,91
2	Galaxolidone	C18 H24 O2	-1,41	4,87
2	1-(2,6-Dichlorophenyl)-2-indolone	C14 H9 Cl2 N O	-2,13	4,98
2	<b>Venlafaxine</b>	C17 H27 N O2	-1,68	5,03
2	Metalaxyl	C15 H21 N O4	-1,05	4,91
1	<b>Trimethoprim</b>	C14 H18 N4 O3	-2,87	3,94
2	Tetrakis(2-hydroxypropyl)ethylenediamine	C14 H32 N2 O4	-2,14	6,94
2	Tetrakis(2-hydroxypropyl)ethylenediamine	C14 H32 N2 O4	-2,15	5,72
2	Tetrakis(2-hydroxypropyl)ethylenediamine	C14 H32 N2 O4	-1,79	3,74
2	Tetrakis(2-hydroxypropyl)ethylenediamine	C14 H32 N2 O4	-2,19	5,88
1	<b>Diclofenac</b>	C14 H11 Cl2 N O2	-1,28	4,87
1	Mebendazole	C16 H13 N3 O3	-4,46	3,71
2	5-Hydroxymebendazole	C16 H15 N3 O3	-2,64	3,37
2	Temazepam	C16 H13 Cl N2 O2	-1,38	7,36
2	Clopidogrel carboxylic acid	C15 H14 Cl N O2 S	-2,52	4,39
2	4'-Hydroxydiclofenac	C14 H11 Cl2 N O3	-1,35	5,83
2	4'-Hydroxydiclofenac	C14 H11 Cl2 N O3	-1,44	4,46
2	Clopidogrel	C16 H16 Cl N O2 S	-2,23	4,58
1	Flutolanil	C17 H16 F3 N O2	-2,4	4,62
2	Gliclazide	C15 H21 N3 O3 S	-3,79	3,95
1	Bisoprolol	C18 H31 N O4	-3,15	7,62
2	Triphenyl phosphate	C18 H15 O4 P	-2,3	4,75
2	Sulpiride	C15 H23 N3 O4 S	-1,49	3,85
2	Omeprazole sulphone	C17 H19 N3 O4 S	-2,75	5,94
1	Flufenacet	C14 H13 F4 N3 O2 S	-1,55	6,39
2	<b>Amisulpride</b>	C17 H27 N3 O4 S	-2,91	3,70
2	Desacetyl diltiazem	C20 H24 N2 O3 S	-3,41	2,25
2	Celiprolol	C20 H33 N3 O4	-2,34	6,43
2	Pantoprazole	C16 H15 F2 N3 O4 S	-7,34	8,09
2	Cetirizine	C21 H25 Cl N2 O3	-1,04	3,58
2	Azoxystrobin	C22 H17 N3 O5	-1,6	4,92
2	Sitagliptin	C16 H15 F6 N5 O	-3,2	6,40
2	Flecainide	C17 H20 F2 N2 O3	-2,55	4,34
2	Rivaroxaban	C19 H18 Cl N3 O5 S	-3,21	4,79
2	Telmisartan	C33 H30 N4 O2	-1,2	2,15
2	Aliskiren	C30 H53 N3 O6	-2,01	7,17
2	Atazanavir	C38 H52 N6 O7	-2,17	4,40
2	<b>Azithromycin</b>	C38 H72 N2 O12	-1,63	4,48

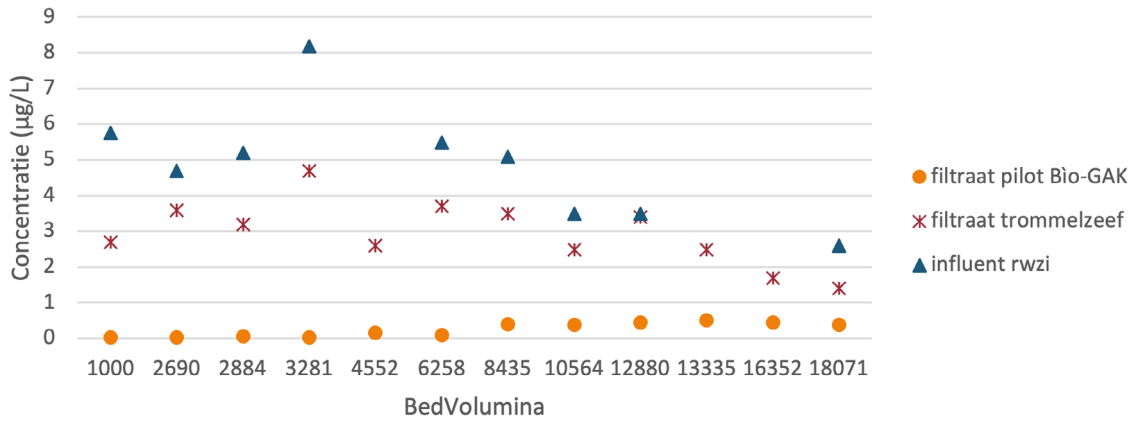
**Meting 3 – Positief ioniserende stoffen - Toename geïdentificeerde stoffen**

Tags	Name	Formula	Log2 Fold Change	-log10 Pvalue
1	N,N'-Dicyclohexylurea	C13 H24 N2 O	1,78	3,96

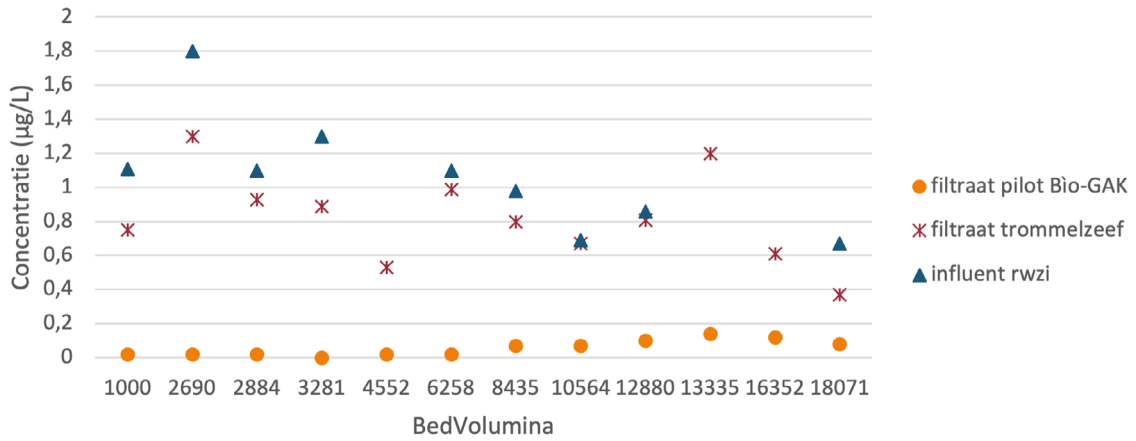
BIJLAGE 5

# CONCENTRATIES GIDSSTOFFEN

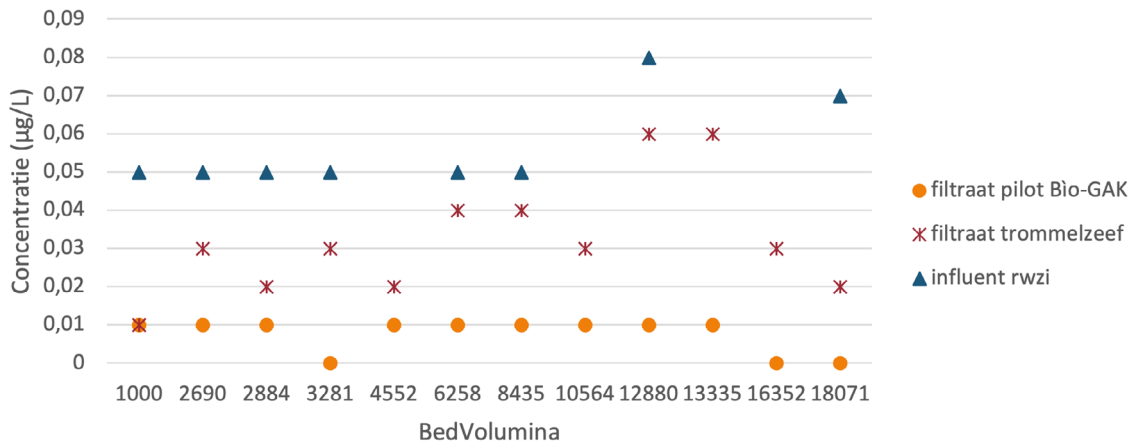
## 1,2,3-benzotriazool

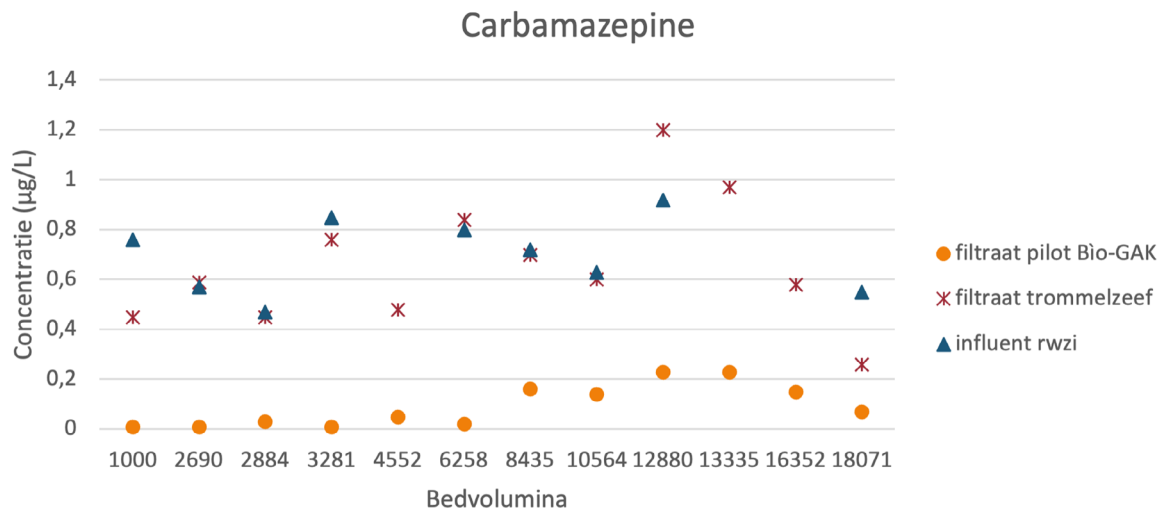
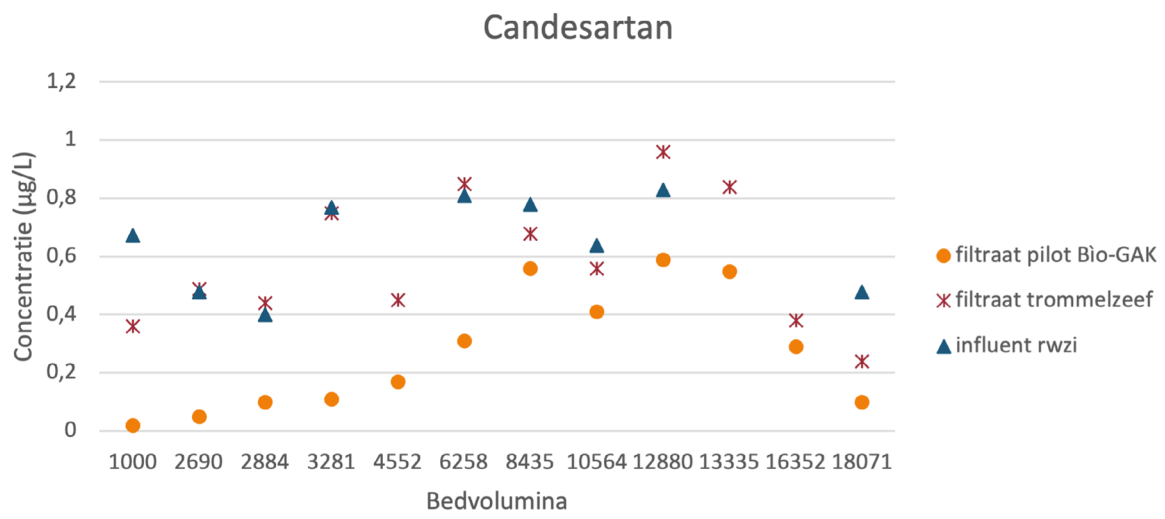
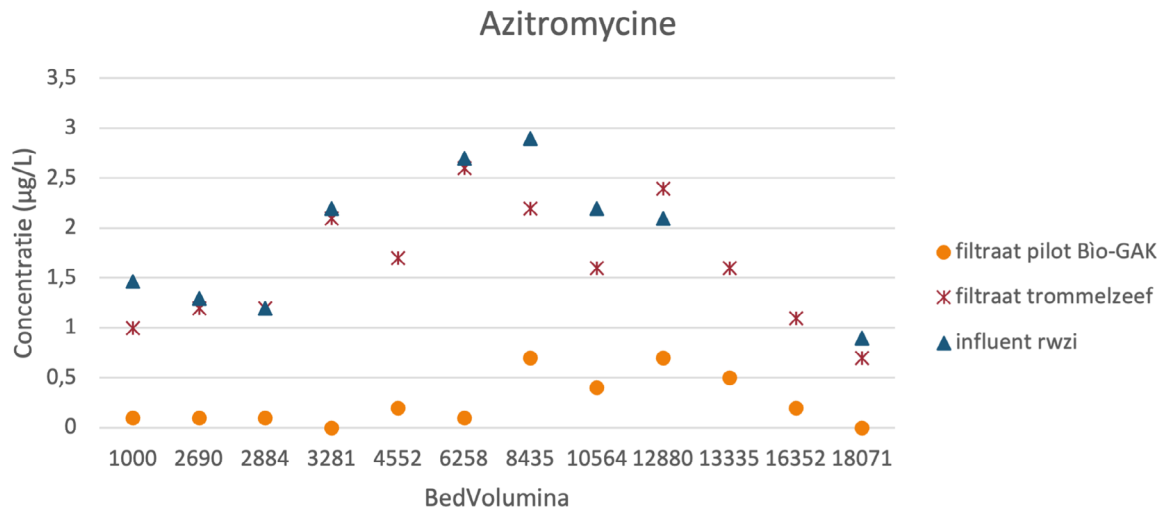


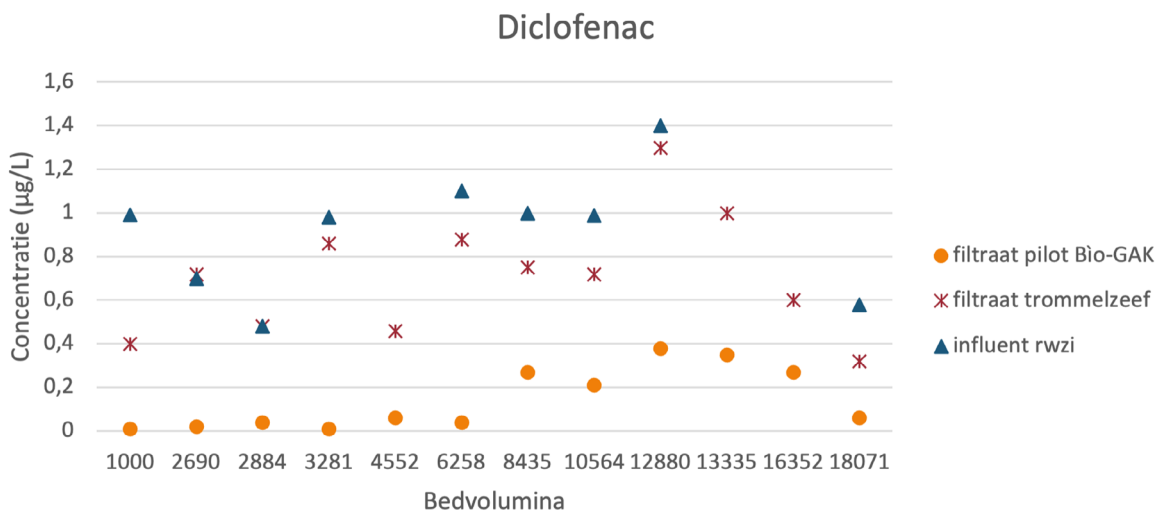
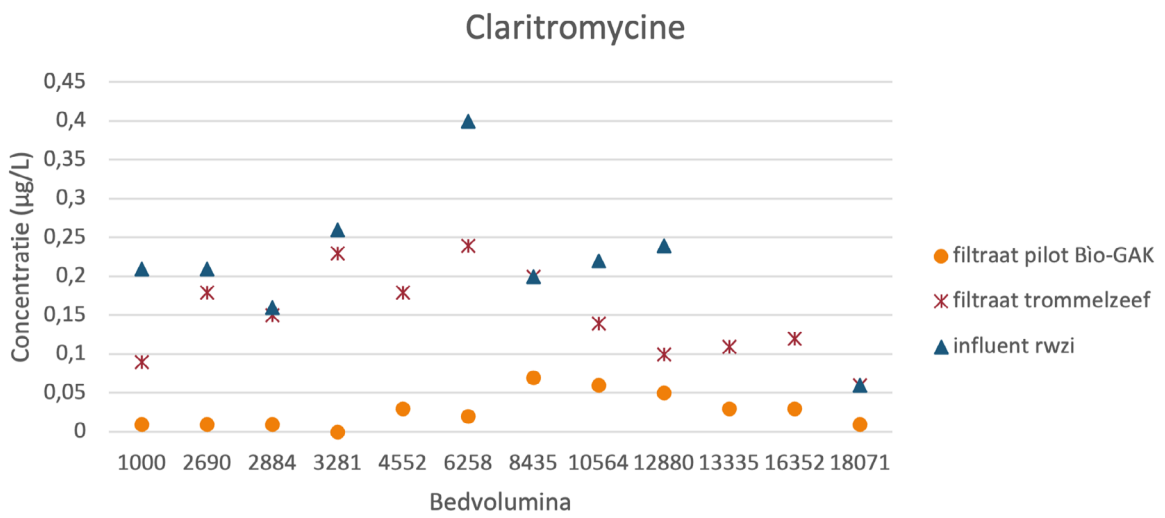
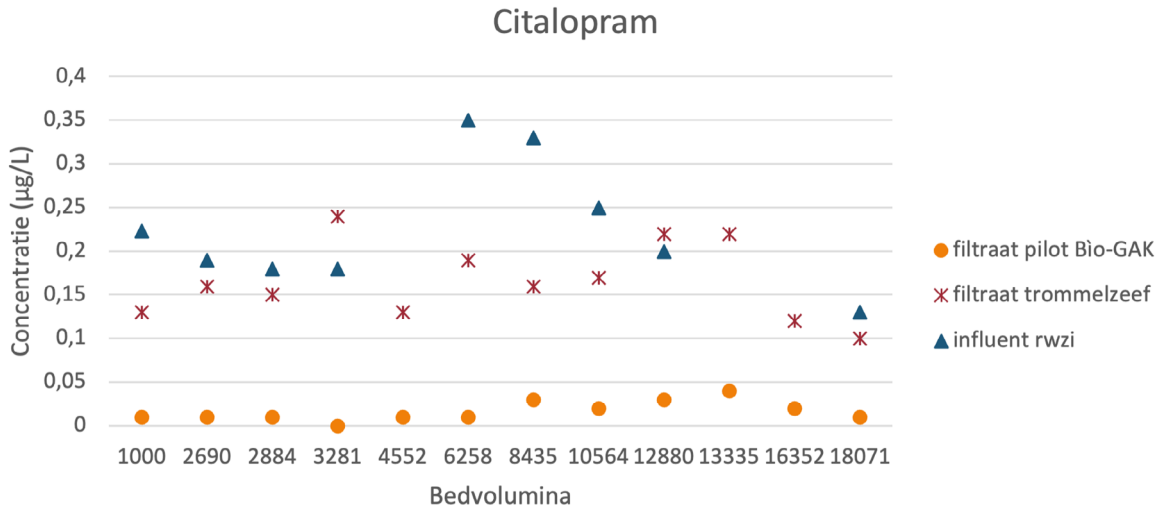
## som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool

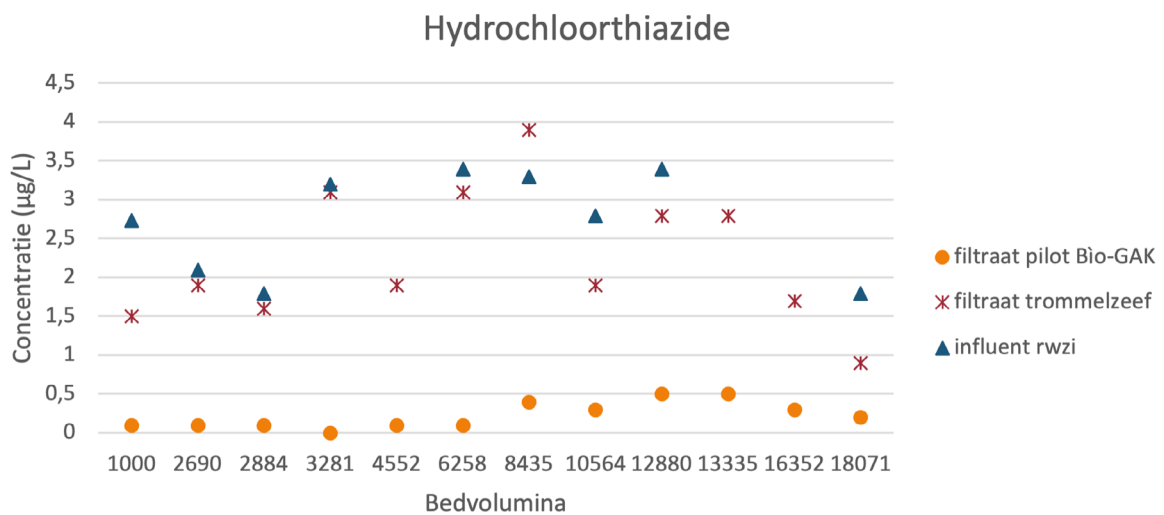
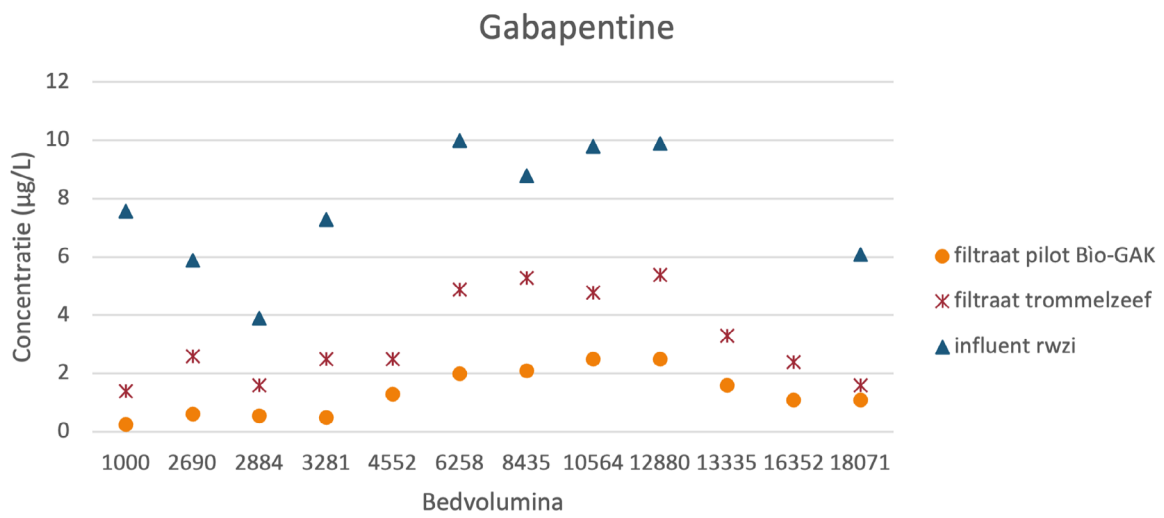
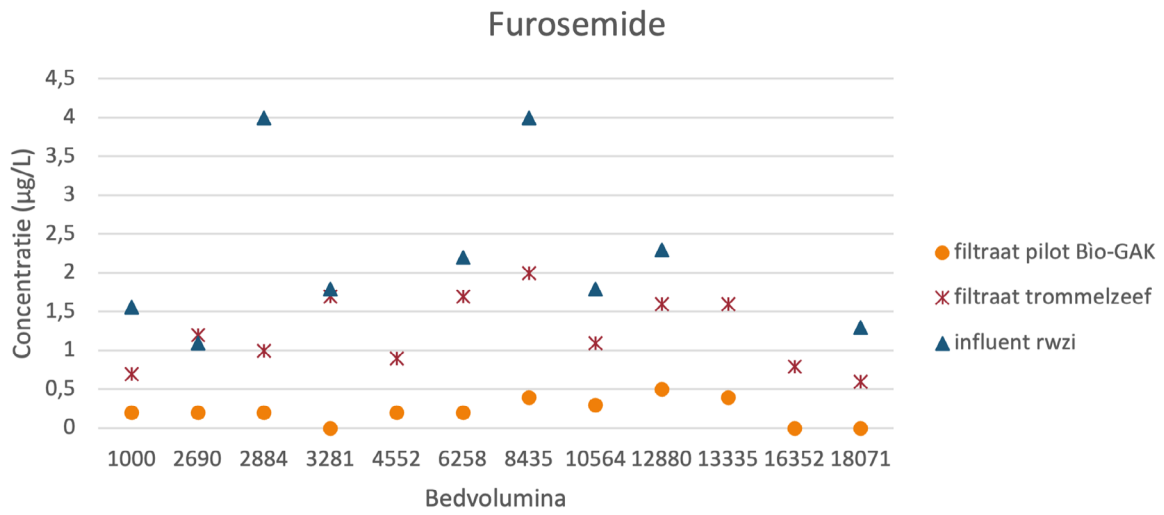


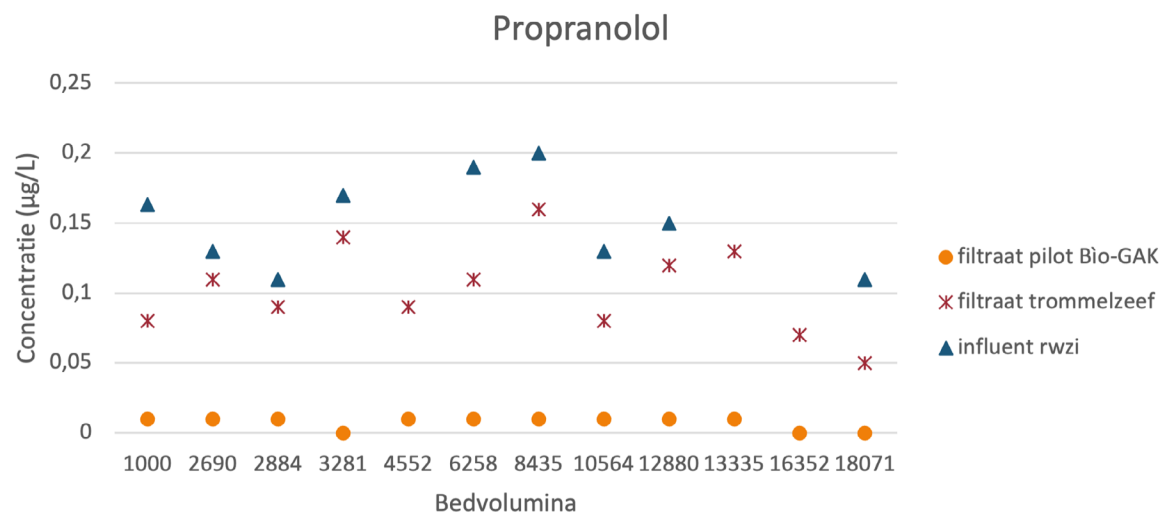
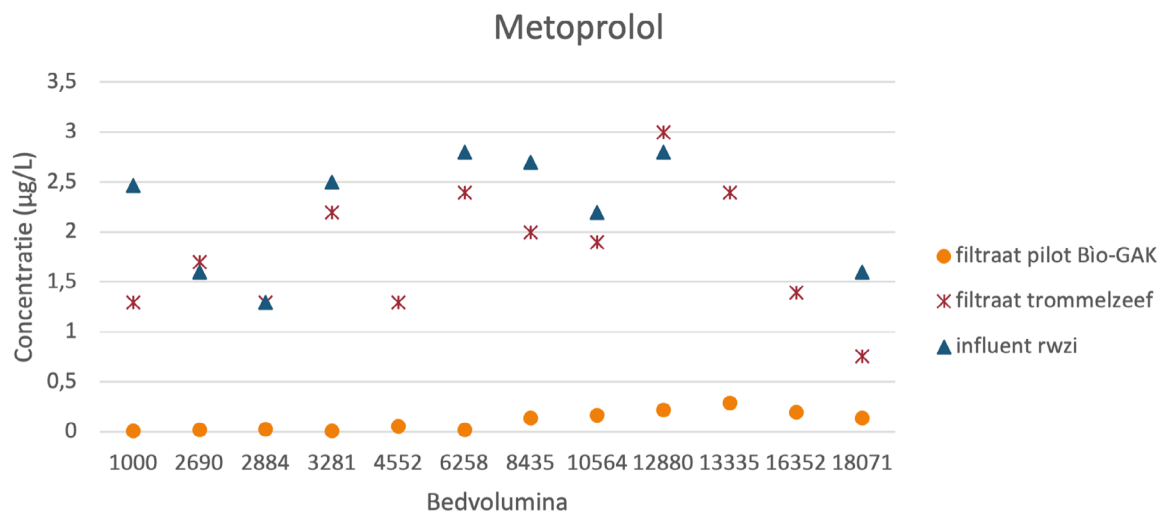
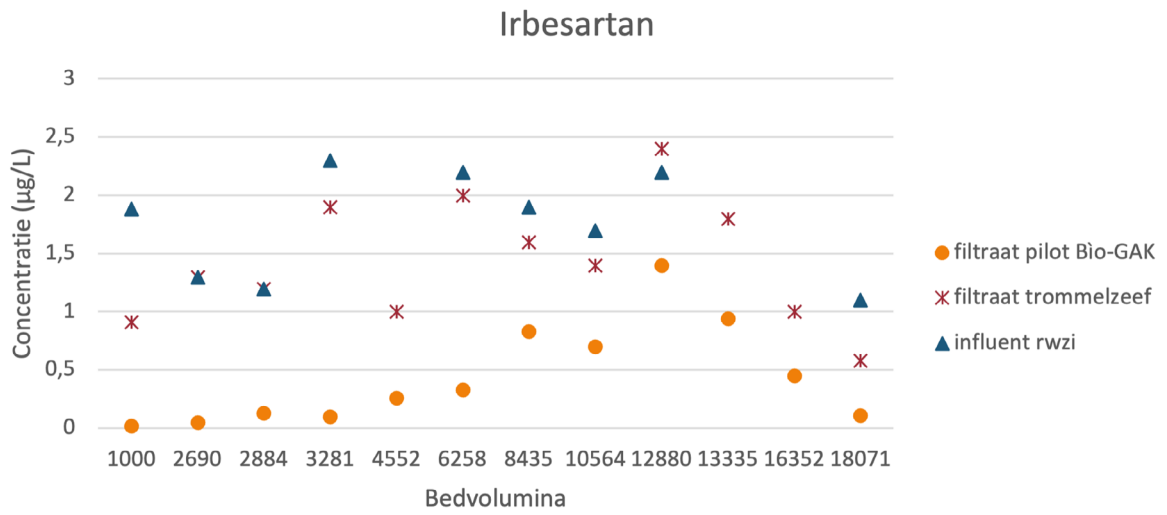
## Amisulpride

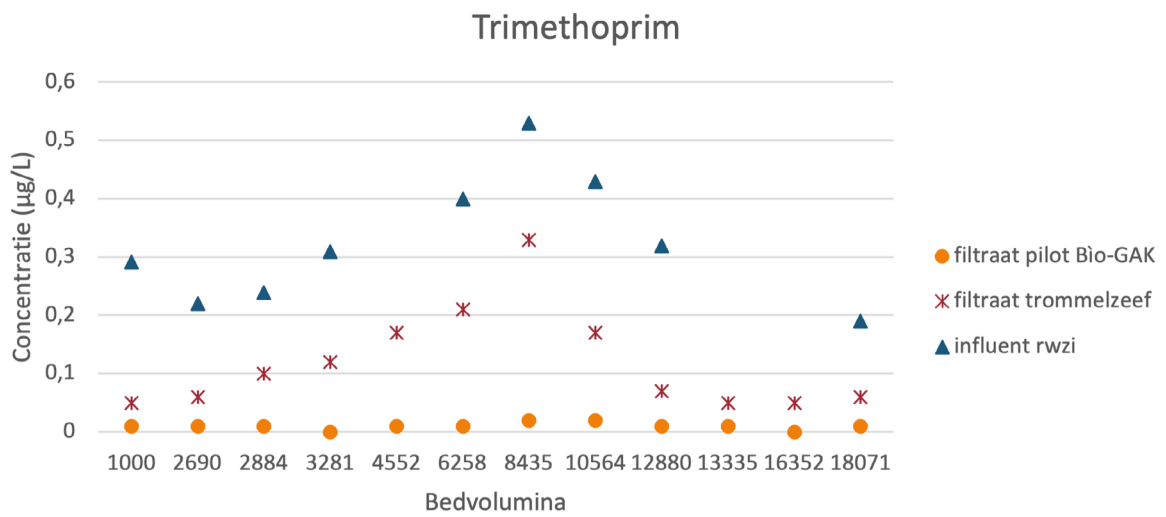
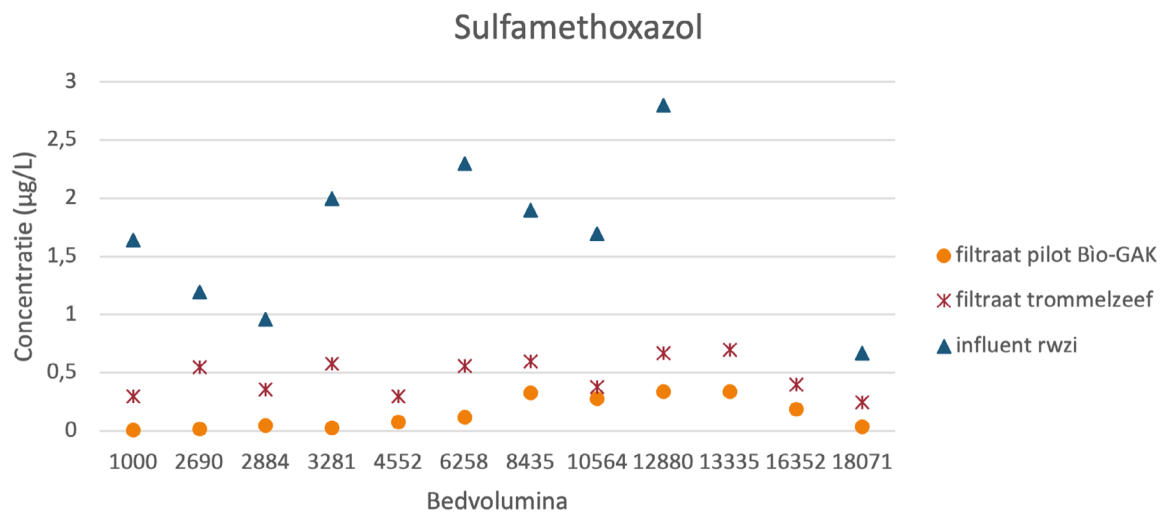
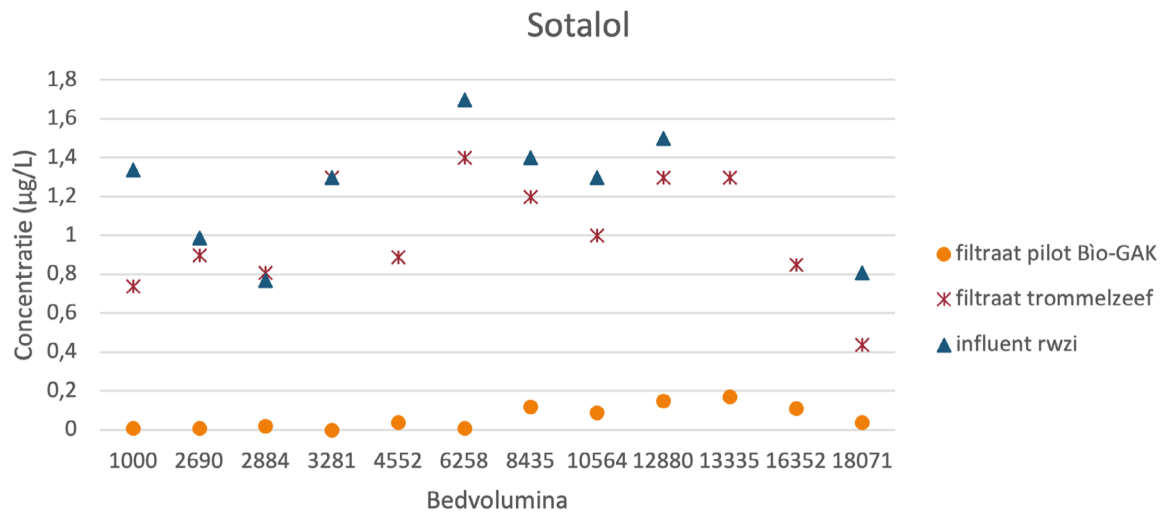




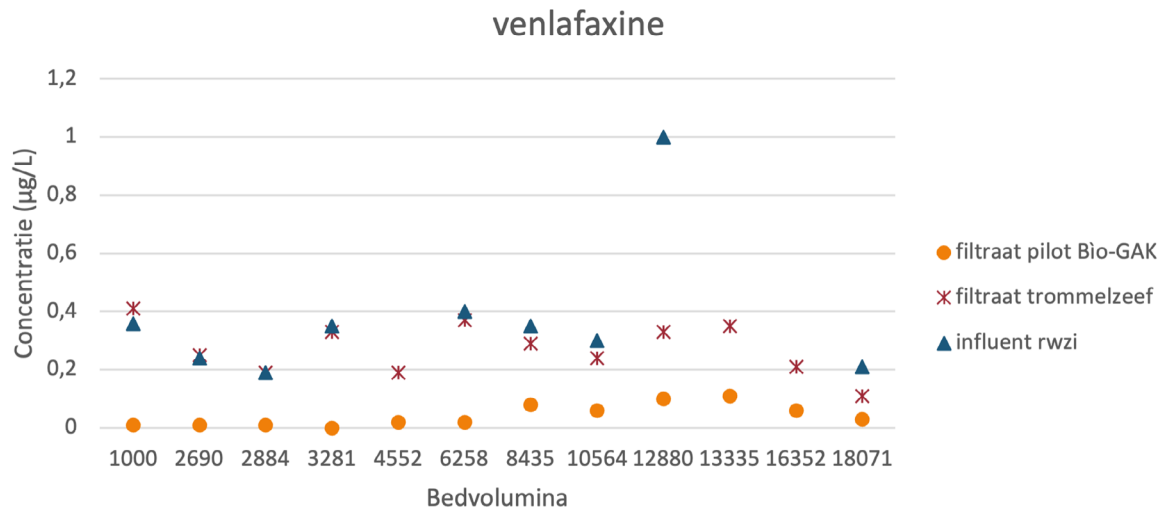












## BIJLAGE 6

# BEPALING VAN ONTWERP-STANDTIJD

## FULL SCALE INSTALLATIE

Voor de full scale installatie is een opstelling uitgewerkt met drie identieke filtereenheden, die elk een derde deel van het toevoerdebiet behandelt. Als alle filters een andere looptijd (ofwel aantal BV) hebben op een bepaald tijdstip, dan zal het filter met het laagst aantal BV het beste verwijderingsrendement hebben. Naarmate een filter een langere looptijd heeft, heeft het een lager verwijderingsrendement. Om te voldoen aan de Richtlijn moet het gemiddelde verwijderingsrendement van de drie filters minimaal 80% zijn.

Het behaalde rendement in de pilot was 82% verwijdering van de top 7 gidsstoffen bij een standtijd van 18.000 BV. Om een overall rendement te halen van 80% mag één van de filters dus een langere looptijd hebben, uitgedrukt in BV. Omdat dit niet getest is, is een aanname gedaan voor de verwijdering:

- Bij een standtijd van 23.000 BV: 76%
- Bij een standtijd van 28.000 BV: 70%

Door een regeneratiefrequentie van de kool te kiezen, die gelijkelijk verspreid wordt over de maximale standtijd van 24 maanden (overeenkomend met 28.000 BV) kan vastgesteld worden welk gemiddeld rendement wordt behaald. Dit is uitgevoerd voor drie scenario's:

- Scenario 1: filter 1 net geregenereerd (looptijd 1 maand); filter 2 looptijd = 11 maanden; filter 3 looptijd = 20 maanden.
- Scenario 2: filter 1 looptijd 9 maanden; filter 2 looptijd = 15 maanden; filter 3 looptijd = 24 maanden.
- Scenario 3: filter 1 looptijd 1 maand; filter 2 looptijd = 9 maanden; filter 3 looptijd = 15 maanden.

In onderstaande tabel wordt het verwachte verwijderingsrendement berekend.

TABEL SCENARIO ANALYSE FILTERSTATUS

Rendement 7/11 gidsstoffen	98%	98%	87%	83%	82%	76%	70%	
Behandelde bedvolume	1.000	6.258	10.564	13.335	18.071	23.000	28.000	
Standtijd in maanden	1	5	9	11	15	20	24	
Filter 1	1							
Filter 2				1				
Filter 3						1		
Rendement per filter	0,98			0,83		0,76		86%
Rendement 7/11 gidsstoffen	98%	98%	87%	83%	82%	76%	70%	
Behandelde bedvolume	1.000	6.258	10.564	13.335	18.071	23.000	28.000	
Standtijd in maanden	1	5	9	11	15	20	24	
Filter 1			1					
Filter 2					1			
Filter 3							1	
Rendement per filter			0,87		0,82		0,7	80%
Rendement 7/11 gidsstoffen	98%	98%	87%	83%	82%	76%	70%	
Behandelde bedvolume	1.000	6.258	10.564	13.335	18.071	23.000	28.000	
Standtijd in maanden	1	5	9	11	15	20	24	
Filter 1	1							
Filter 2			1					
Filter 3					1			
Rendement per filter	0,98		0,87		0,82			89%

In het meest negatieve scenario (scenario 2) wordt een overall rendement van 80% behaald, waarmee nog steeds voldaan wordt aan de criteria. Derhalve is in het ontwerp van de installatie rekening gehouden met een maximale looptijd van 24 maanden, ofwel 28.000 BV.

## BIJLAGE 7

# GEVOELIGHEID STANDTIJD KOOL OP CO<sub>2</sub>

## AFDRUK EN OPEX

Om een indruk te krijgen van de gevoeligheid van de aanname voor de standtijd van de actieve kool op de jaarlijkse kosten en de CO<sub>2</sub> voetafdruk is de volgende analyse uitgevoerd: er zijn 4 verschillende standtijden voor de actieve kool gesimuleerd, variërend van 8,6 maanden (10.000 BV) tot 30 maanden (35.000 BV). Per standtijd is bepaald hoeveel verse kool benodigd is per jaar en hoeveel kool geregenereerd moet worden. Daarbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Bij elke regeneratie wordt rekening gehouden met een koolverlies van 15%, dan met verse kool moet worden aangevuld. Dit is aan de conservatieve kant, leveranciers geven aan dat dit verlies in de praktijk circa 10% bedraagt.
- Het maximum aantal regeneraties, dat kan worden toegepast, is verondersteld op 5. Dat betekent dat – afhankelijk van de gehanteerde standtijd – er rekening gehouden moet worden met vervanging van de kool. Bij een standtijd van de kool van 24 maanden betekent dit dat na 10 jaar de initiële koolmassa moet worden vervangen. Dit is verdisconteerd door 10% extra vervanging per jaar mee te nemen.

De resultaten zijn gepresenteerd in onderstaande tabel.

**TABEL**      **IMPACT VAN STANDTIJD KOOL OP JAARLIJKSE KOSTEN EN CO<sub>2</sub> VOETAFDruk**

Standtijd kool (maanden)		8,6	18,0	24,0	30,0
behandelde bedvolumes		10.000	18.000	28.000	35.000
initiele koolvolume (m3)	432				
koolverlies per regeneratie (%)	15				
koolverlies per jaar (m3)		90	43	32	26
Dichtheid kool (kg/m3)	400				
koolverlies per jaar (ton)		36	17	13	10
regeneratievolume per jaar (m3)		602	288	216	173
levensduur kool (jaar)		4	8	10	13
aanvulling verse kool (m3)		120	58	43	35
jaarlijkse totale volume verversing (m3)		211	101	76	60
jaarlijkse kosten verversing kool (EUR/j)		€ 252.894	€ 120.827	€ 90.620	€ 72.496
jaarlijkse kosten regeneratie kool (EUR/j)		€ 301.065	€ 143.842	€ 107.881	€ 86.305
TOTALE jaarlijkse kosten kool (EUR/j)		€ 553.959	€ 264.669	€ 198.502	€ 158.802
TOTALE specifieke kosten kool (EUR/m3)		0,090	0,043	0,032	0,026
CO2 voetafdruk voor kool (ton CO2/j)		1.416	677	507	406
Specifieke CO2 voetafdruk voor kool (g/m3)		231	110	83	66

Voor de projectie van de pilotresultaten en de berekening van de operationele kosten en CO<sub>2</sub> voetafdruk is rekening gehouden met een standtijd van 24 maanden (28.000 BV).

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- De verschil in standtijd van de kool van 18.000 BV en 28.000 BV heeft een beperkte impact op de operationele kosten: circa EUR 0,01/m<sup>3</sup>.
- Bij lagere standtijden nemen de specifieke kool kosten significant toe: van 18.000 BV naar 10.000 BV betekent dit een verdubbeling van de kosten.
- De invloed van de standtijd van de kool op de specifieke CO<sub>2</sub> voetafdruk is groter: bij een verlenging van de standtijd van 18.000 BV naar 28.000 BV wordt de specifieke CO<sub>2</sub> voetafdruk circa 25% lager, als 35.000 BV standtijd wordt gehaald dan is de voetafdruk zelfs 40% lager.