



Ministerie van Infrastructuur
en Waterstaat

stowa

PILOTONDERZOEK BODAC

BIOLOGISCH ACTIEF KOOLFILTRATIE MET ZUURSTOFDOSERIG VOOR VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN UIT RWZI-AFVALWATER



RAPPORT

2023
50

PILOTONDERZOEK BODAC

BIOLOGISCH ACTIEF KOOLFILTRATIE MET ZUURSTOFDOSERIG VOOR
VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN UIT RWZI-AFVALWATER

RAPPORT

2023

50

ISBN 978.94.6479.045.0



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

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

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Simon Dost - WMD
Judith Kloosterman-Greftenhuis - Waterschap Vechtstromen
Ilse Verburg -WLN
Astrid Mous - WLN

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Joost van den Bulk - Tauw
Alexandra Deeke – Waterschap de Dommel
Ruud Schemen – Waterschap de Dommel
Christa Morgenschweis - Waternet
Veerle Luimstra - Witteveen+Bos
Manon Bechger - Waternet
Philip Schyns - Waterschap Rijn en IJssel
Miriam Verdurmen - Waterschap Vallei en Veluwe
Jantien Foekema - Norit Activated Carbon
Hans Wouters - Brightwork
Annette Kramer - Brightwork
Gerard Rijs - RWS-WVL
Mirabella Mulder - Mirabella Mulder Waste Water Management
Cora Uijterlinde - STOWA

VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2023-50
ISBN 978.94.6479.045.0

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

BODAC IS EEN VEELBELOVENDE TECHNOLOGIE VOOR DE VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN UIT RWZI EFFLUENT.

BODAC is een technologie welke gebruik maakt van adsorptie aan granulair actieve kool bij opstart en zich ontwikkelt naar een biologisch systeem voor de afbraak van organische microverontreinigingen. Door de lange koolstandtijd in de full scale, minimaal 12 jaar, is dit een veelbelovende technologie. In dit pilot onderzoek is de robuustheid van de technologie onderzocht met een pilot gevuld met oude kool (BODAC oud) en een met nieuwe kool (BODAC nieuw).

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. In navolging op de eerder afgeronde haalbaarheidsstudie zijn in dit pilotonderzoek de kritische procesparameters van de technologie nader onderzocht. De onderzoeksvragen richtten zich op minder intensieve voorbehandeling, het volgen van de opstart van een nieuw filter en optimalisatie van de contacttijd.

De toepassing van deze technologie is veelbelovend omdat in vergelijking met conventionele granulair actief kool filters BODAC een significant langere standtijd heeft en daarmee een verlaagde CO₂ footprint in toepassing. Door biologische omzetting is het een chemicaliën arm concept. Er wordt enkel pure zuurstof gedoseerd. Tijdens het onderzoek is gebleken dat het niet nodig is om ultrafiltratie als voorbehandeling toe te passen op de BODAC. Een trommelzeef is voldoende barrière voor een robuuste bedrijfsvoering. De technologie (tezamen met de voorbehandeling door een trommelzeef) kan worden toegepast voor 0,25 €/m³. In een BODAC systeem met verse kool wordt bij het passeren van 25.000 koolbedvolumes biologische omzetting geconstateerd. Op dat moment zijn zowel adsorptie als biologische omzetting actief. Het is nog onbekend hoelang adsorptie voor specifieke componenten doorloopt. Bij toepassing kan 72-80% van de top 7 gidsstoffen verwijderd worden (volgens rekenregels STOWA en IenW).

In de toepassing van BODAC is zuurstof en de benodigde druk voor het oplossen hiervan bepalend in de kosten van de technologie. In vervolgonderzoek wordt gekeken of zuurstof op een energievriendelijkere manier optimaler kan worden ingebracht. Daarnaast heeft de RWZI Emmen een relatief hoog ammoniumgehalte, waardoor op andere zuiveringen mogelijk geen pure zuurstof, en daarmee ook geen drukfiltratie, nodig is. Ten behoeve van inzet van BODAC voor de Kaderrichtlijn Water en aankomende organische eisen voor microverontreiniging, wordt in een vervolgstudie ervaring opgedaan met ijzerdosering in de aanvoer naar het filter zodat fosfaat gebonden en afgevangen wordt in het filter. Middels deze 'ad-on' is BODAC in staat om gelijktijdig te nitrificeren, te defosfateren en breekt het ook medicijnresten af.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

Sinds 2010 wordt bij de UPW in Emmen ultrapuur water geproduceerd door NieuWater. In het zuiveringsproces wordt Biological Oxygen Dosed Activated Carbon (BODAC) filtratie toegepast als voorzuivering ter voorkoming van biofouling op de omgekeerde osmose membranen. De technologie verwijdert aanvullend ook medicijnresten vergaand, terwijl de actieve kool sinds de opstart in 2010 niet is vervangen. De geconstateerde medicijnrestverwijdering maakt het BODAC-concept, zoals dat in Emmen wordt toegepast, een potentieel veelbelovende techniek voor nabehandeling van RWZI-effluent.

Van mei 2019 tot mei 2020 is haalbaarheidsonderzoek uitgevoerd naar de potentie van BODAC als concurrerende techniek voor de verwijdering van medicijnresten uit afvalwater (de Vogel, et al., 2020). Het onderzoek is uitgevoerd in het kader van het Innovatieprogramma microverontreinigingen uit water (IPMV) van STOWA en het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Het haalbaarheidsonderzoek omvatte verschillende onderdelen, zoals een meetcampagne op de RWZI Emmen en bij de full scale BODAC-installatie van NieuWater. De resultaten van dat onderzoek zijn vertaald naar ontwerputgangspunten en grondslagen voor het bepalen van de juiste afmetingen van de BODAC installatie. Uit dit haalbaarheids-onderzoek werd geconcludeerd dat BODAC een aantrekkelijke techniek lijkt voor medicijnrestverwijdering uit afvalwater. Er waren op dat moment nog onzekerheden met betrekking tot de noodzaak tot deeltjesverwijdering voorafgaand aan BODAC-filtratie en er bestond de interesse om de contacttijd te optimaliseren.

Om te komen tot kritische proces-/ontwerpparameters van BODAC is pilotonderzoek uitgevoerd in de periode 2022-2023. Ook dit pilotonderzoek is uitgevoerd in het kader van het IPMV. In het pilotonderzoek dienen de eerder gehanteerde ontwerputgangspunten te worden bevestigd en geoptimaliseerd. Enerzijds dat BODAC filtratie met eenvoudige voorfiltratie voldoet aan de zuiveringsprestaties zoals geformuleerd in het IPMV. Anderzijds om inzicht te krijgen in de opstart van BODAC filtratie en daarmee inzicht in de zuiveringsprestaties vlak nadat (verse) actieve kool is verzadigd met medicijnresten. Daarom zijn twee BODAC pilot installaties gebouwd: BODAC oud, gevuld met oude kool, waarop de microbiologie al aanwezig is vanuit de praktijkinstallatie, en BODAC nieuw, gevuld met verse kool waarop dus nog geen microbiologie aanwezig is en waarbij medicijnrestverwijdering eerst plaatsvindt door middel van adsorptie.

1. ALGEMENE CONCLUSIES:

BODAC in combinatie met een trommelzeef is een geschikt systeem om als nabehandeling toe te passen op RWZI-effluent met als doel medicijnrestenverwijdering:

- De verwijdering van de top 7 gidsstoffen is stabiel, waarbij altijd dezelfde gidsstoffen onder de top 7 vallen, namelijk: diclofenac, gabapentine, hydrochloorthiazide, metropolol, sotalol, trimethoprim en venlafaxine. Volgens de rekenregels gehanteerd binnen het IMPV worden deze 7 stoffen tussen 72-80% verwijderd over de RWZI en de nageschakelde BODAC en liggen daarmee boven de norm van 70%. De pilot had een verwijderingsrendement variërend tussen 74-84%.
- De resultaten laten zien dat over het algemeen meer stoffen verwijderd worden in BODAC dan dat er stoffen gevormd worden of juist vrijkomen (desorberen).
- Bio-assay resultaten suggereren dat er geen schadelijke stoffen in grote hoeveelheden worden gevormd na toepassing van BODAC.

- Vastgesteld is dat twee bekende stoffen toenemen na toepassing, namelijk de gidsstoffen benzotriazool en methylbenzotriazool. Deze stoffen zijn of een afbraakproduct of een product dat mogelijk voorkomt uit (tijdelijke zuurstofloosheid en) desorptie van kool. Dit is in eerder onderzoek geconstateerd. Bij een langere empty bed contacttijd (EBCT) is de toename hoger, wat suggereert dat deze twee stoffen metaboliëten van andere stoffen zijn. Het mechanisme wordt in parallel onderzoek door Wetsus verder uitgezocht.
- Gezien het gegeven dat de ammoniumdoorslag in BODAC beperkt was (maximaal 0,35 mg N/l), ondanks hoge pieken richting 11 mg/l, kan de BODAC ook additioneel worden ingezet om de ammoniumpiek van het RWZI effluent te verlagen.
- Zowel temperatuur, voedingsconcentratie als EBCT hebben een effect op de verwijderingsrendementen bereikt in BODAC.

2. ROBUUSTHEID:

Bij de BODAC techniek speelt microbiologie, welke gevoelig kan zijn voor een te laag zuurstofgehalte, een belangrijke rol. Korte periodes van zuurstofloosheid door technische storingen of wel een verhoogd ammoniumgehalte hebben echter geen (langdurige) invloed gehad op de prestaties van BODAC en daarmee is het dus een robuust systeem.

3. CO₂ FOOTPRINT:

BODAC is met het oog op CO₂ footprint (EBCT 23 minuten) competitief t.o.v. de technieken: PACAS, ozon en zandfiltratie en GAK. De toevoeging van BODAC aan de CO₂ footprint is bij een EBCT van 23 minuten 114 g CO₂/m³ behandeld afvalwater. De andere technieken hebben een toevoeging van > 120 g/m³. De verwijderingsrendementen voor de top 7 in de BODAC zijn bij een EBCT van 23 minuten rond de 80% jaargemiddeld (76-84%). Dit is iets lager dan ozon en zandfiltratie en GAK (80-84%).

4. KOSTEN:

Berekend voor een standaard RWZI met een capaciteit van 100.000 i.e. komen de stichtingskosten uit op € 8.616.000,-. De jaarlijkse kosten (CAPEX + OPEX) komen in totaal op € 1.365.800,- voor een debiet van 5.365.500 m³/jaar. De totale kosten zijn € 0,25 / m³ behandeld afvalwater voor toepassing van BODAC, met voorgeschakelde trommelzeef. In de berekening is uitgegaan van een standtijd van 12 jaar voor het kool.

AANVULLEND KAN NOG WORDEN GECONCLUDEERD:

BODAC oud:

BODAC oud, de pilot gevuld met oude kool uit de praktijk installatie, liet zien dat zowel temperatuur, voedingsconcentratie als EBCT een (sterk) effect hebben op de verwijderingsrendementen die worden bereikt. Het beoogde verwijderingsrendement van minimaal 80% verwijdering in het BODAC filter van de top 7 gidsstoffen werd bereikt bij een EBCT van 20 en 23 minuten waarbij de temperatuur in het voedingswater hoger dan 18 ° Celsius is en bij een EBCT van 30 minuten.

BODAC nieuw:

BODAC nieuw, de pilot gevuld met nieuwe kool, toonde na 25.000 KBV een biologische omzetting van medicijn(resten) in het filter en bij verlaging van EBCT naar 23 minuten waren de prestaties vergelijkbaar met BODAC-oud. De medicijnrestverwijdering werd aan het einde van het pilotonderzoek bereikt door zowel adsorptie van specifieke gidsstoffen als biologische omzetting.

BEGRIPPENLIJST

Aqualysis	Laboratorium van vijf samenwerkende waterschappen, waaronder Waterschap Vechtstromen en gespecialiseerd in het analyseren van afvalwater.
ATP	Adenine TriPhosphate
BAKF	Biologisch Actief Kool Filter
BDS	Bio Detection Systems Amsterdam
BM	Bemonsteringsmoment
BODAC	Biological Oxygen Dosed Activated Carbon
DOC	Dissolved organic carbon
DSW	Dutch Standard Water
DWA	Droogweerafvoer
EBCT	Empty bed contact time
EC50-waarde	Berekend door effecten in duplo bij vier verschillende concentraties te bepalen met 2x, 4x 8x en 16x verdunning
IPMV	Innovatie Programma Micro Verontreinigingen
KBV	Koolbedvolume
kDa	kiloDalton
N-Kjeldahl	Som organische stikstof, ammonium en ammoniak
NTS	Non Target Screening
LC-MS	Liquid chromatography – mass spectrometry
LC-OCD	liquid chromatography organic carbon detection
PAC	Poly aluminium chloride
PFD	process flow diagram
P&ID	process and instrumentation diagram
PV	Probability Value
RO	Reversed Osmosis
RWA	Regenwaterafvoer
RWZI	Rioolwaterzuiveringsinstallatie
TU	Toxic Unit = 100/ EC50-waarde
UF	Ultrafiltratie

UPW	Ultrapuur water
Waterproef	Laboratorium, verricht tevens veel veldwerk
WLN	Waterlab Noord
WVS	Waterschap Vechtstromen

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.

PILOTONDERZOEK BODAC BIOLOGISCH ACTIEF KOOLFILTRATIE MET ZUURSTOFDOSERIG VOOR VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN UIT RWZI-AFVALWATER

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	BEGRIPPENLIJST	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Ultrapuur water uit RWZI effluent	1
1.3	De technologie BODAC	2
1.4	Actief koolfiltratie en biologische actief koolfiltratie	2
1.5	Pilotonderzoek	3
1.5.1	Onderzoeksvragen	3
2	ONDERZOEK EN UITVOERING	4
2.1	Beschrijving van de pilotinstallatie	4
2.2	Pilotonderzoek	5
2.3	Materialen en methoden	5
2.3.1	Verwijdering van gidsstoffen	5
2.3.2	Verlaging van ecotoxicologische druk	6
2.3.3	Aanvullende metingen	6
2.3.4	Algemene parameters	6
3	RESULTATEN	7
3.1	Beschrijving onderzoeksperiode	7
3.2	Trommelzeef versus UF	8
3.3	BODAC-oud – beladen kool uit de full scale installatie	11
3.3.1	Gidsstoffen	11
3.3.2	Invloed variabelen op verwijderingsrendementen	15
3.3.3	Algemene parameters	15
3.3.4	Ecotoxicologie	17
3.3.5	Non-target LCMS screening	18

3.4	BODAC-nieuw – verse kool	20
3.4.1	Gidsstoffen	21
3.4.2	Algemene parameters	22
3.4.3	Ecotoxicologie	24
3.4.4	Non-target LCMS screening	24
3.5	Aanvullend onderzoek uitgevoerd door Wetsus	25
3.5.1	Ideeën voor vervolgonderzoek	26
3.6	Discussie	27
3.6.1	Trommelzeef vs UF	27
3.6.2	Prestaties BODAC-oud vs nieuw	28
3.6.3	Prestaties pilot BODAC-oud vs full scale	29
4	OPERATIONELE ASPECTEN	30
4.1	Trommelzeef	30
4.2	Spoeling pilot	30
4.3	Zuurstofdoserig	31
5	INPASSING IN DE NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK	32
5.1	Verwijderingsrendement en ontwerpdebiet	32
5.2	CO₂ footprint	32
5.3	Kostenberekening	34
5.4	Gevoeligheidsanalyse opstart BODAC	35
5.5	Samenvatting en vergelijking kosten en CO₂ footprint	37
5.6	EU wetgeving Richtlijn Stedelijk Afvalwater	37
6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	40
6.1	Conclusies	40
6.1.1	Algemene conclusies op basis van prestaties	41
6.1.2	Standaardzuivering 100.000 i.e. (CO ₂ -footprint en kosten)	42
6.2	Aanbevelingen	42
	VERWIJZINGEN	43
	BIJLAGEN	45
BIJLAGE I	PFD EN P&ID BODAC PILOT	46
BIJLAGE II	VERWIJDERINGSPERCENTAGE IN BODAC-LOUD PER GIDSSTOF BIJ VERSCHILLENDE EBCT EN TEMPERATUUR	51
BIJLAGE III	RELATIE GIDSSTOFFEN CONCENTRATIE VOEDING EN TEMPERATUUR IN BODAC-LOUD	53
BIJLAGE IV	NON TARGET SCREENING BODAC-LOUD	54
BIJLAGE V	NON TARGET SCREENING BODAC-NIEUW	77
BIJLAGE VI	BEKENDE STOFFEN NTS	90
BIJLAGE VII	GEMIDDELDE VERWIJDERINGSPERCENTAGE PER GIDSSTOF BIJ VERSCHILLENDE EBCT'S IN BODAC-LOUD	92
BIJLAGE VIII	TEMPERATUUR FLUCTUATIE FULL SCALE BODAC	93
BIJLAGE IX	PERFORMANCE BODAC-LOUD	95
BIJLAGE X	PERFORMANCE BODAC-NIEUW	102
BIJLAGE XI	SPECIFICATIES, INSTELLINGEN EN OVERIGE INFORMATIE TROMMELZEEF	107
BIJLAGE XII	SUMMARY OF BIOLOGICAL OXYGEN-DOSED ACTIVATED CARBON (BODAC) FILTERS RESEARCH AT WETSUS	111
BIJLAGE XIII	ACHTERGRONDINFORMATIE CO ₂ FOOTPRINT EN INFORMATIE M.B.T. KOSTENBEREKENING	118

1

INLEIDING

1.1 ACHTERGROND

Veel medicijnresten en andere microverontreinigingen komen in het riool terecht via communaal afvalwater. De rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) zijn op dit moment niet voldoende uitgerust om het grote scala aan organische microverontreinigingen uit het afvalwater te verwijderen. De aanwezigheid van deze stoffen is over de jaren toegenomen maar ook de mogelijkheid om de stoffen op lage concentraties te meten is verbeterd.

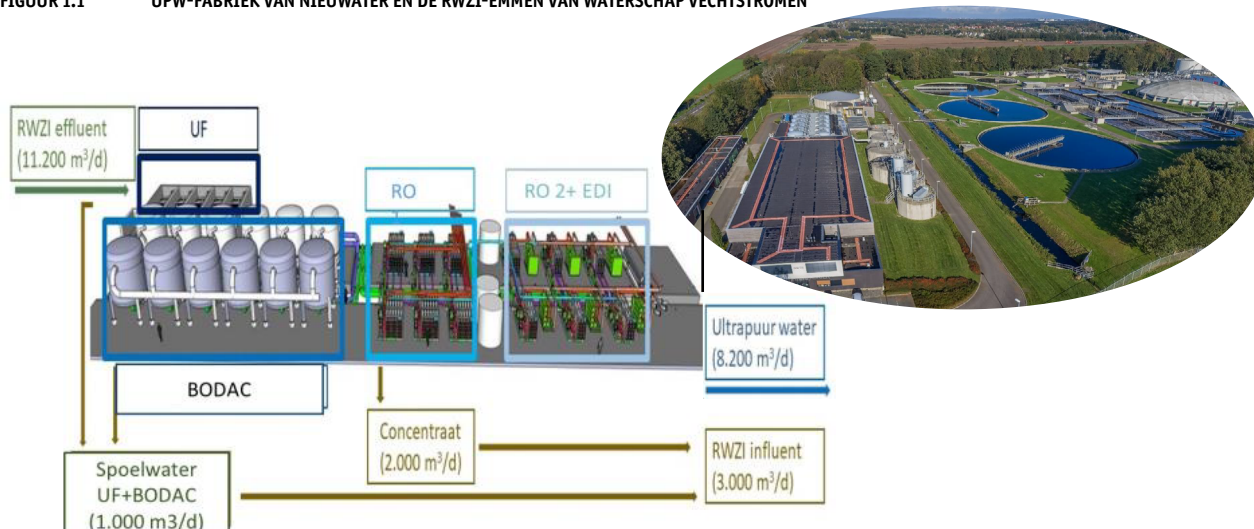
In het Innovatie Programma Micro Verontreinigingen uit RWZI- afvalwater (IPMV) wordt de weg vrij gemaakt voor veelbelovende nieuwe technieken, verbeteringen op bestaande technieken of innovatieve combinaties van bestaande technieken om microverontreinigingen uit het rioolwater te verwijderen. Op die manier krijgen waterschappen binnen vijf tot zeven jaar meer verwijderingstechnieken tot hun beschikking waaruit ze de beste keuze kunnen maken voor hun eigen RWZI. Het IPMV wordt begeleid en mede gefinancierd door STOWA.

In de haalbaarheidsstudie is de mogelijkheid om medicijnresten met biological oxygen dosed activated carbon (BODAC) te verwijderen verkend. Op basis van de geconstateerde medicijnrestverwijdering is het BODAC-concept, zoals dat in Emmen op praktijkschaal wordt toegepast, een potentieel veelbelovende techniek voor nabehandeling van RWZI-effluent (de Vogel, et al., 2020).

1.2 ULTRAPUUR WATER UIT RWZI EFFLUENT

Sinds 2010 produceert NieuWater BV, een venture van waterschap Vechtstromen (WVS), ultrapuur water (UPW) uit het effluent van de RWZI-Emmen. Het UPW wordt, met een maximale capaciteit van 8.200 m³ per dag, als proceswater geleverd aan de NAM in Schoonebeek, waar het wordt toegepast als ketelvoedingswater voor stoomproductie. In de UPW-fabriek van NieuWater wordt Omgekeerde Osmose (RO) als belangrijkste ontzoutingstechniek toegepast. Voorafgaand aan de RO wordt biologische actief koolfiltratie met zuurstofdosering (BODAC) toegepast om biologische vervuiling (biofouling) van de RO-membranen te beheersen (Boorsma, et al., 2020). Zie Figuur 1.1 voor een overzicht van de UPW fabriek.

FIGUUR 1.1 UPW-FABRIEK VAN NIEUWATER EN DE RWZI-EMMEN VAN WATERSCHAP VECHTSTROMEN



1.3 DE TECHNOLOGIE BODAC

De maximale capaciteit van de BODAC-filters in Emmen bedraagt circa 500 m³/u. De BODAC-installatie bestaat uit twee filtratiestappen in serie met ontwerpverblijftijden (empty bed contact time, EBCT) van respectievelijk 16 (stap 1) en 32 minuten (stap 2). Aan het influent van beide filtratiestappen wordt zuurstof gedoseerd om anaerobe omstandigheden in de BODAC-filters te voorkomen. De zuurstofdoserings is nodig om te voldoen aan de zuurstofvraag tijdens de biologische filtratie. Met name wanneer het RWZI effluent verhoogde ammoniumconcentraties bevat, is de zuurstofvraag in de BODAC-filters relatief hoog als gevolg van nitrificatie. Om voldoende zuurstof in te brengen wordt het zuurstof onder 1-1,5 bar druk ingevoerd. De BODAC wordt om die reden onder druk bedreven.

De BODAC-filters worden periodiek teruggespoeld om overtollige biomassa te verwijderen. De spoelfrequentie is hierbij 0,5 tot 2 keer per week, afhankelijk van de temperatuur. Indien een BODAC-filterstraat om productietechnische redenen niet nodig is, vindt circulatie van filtraat plaats met behoud van zuurstofdoserings om zuurstofloosheid te voorkomen. Het spoelwater van de BODAC-filters wordt terugg geleid naar de inname van de UPW. De actieve kool (Norit 830P) in de BODAC-filters is in 2010 geplaatst en sindsdien niet gereactiveerd.

1.4 ACTIEF KOOLFILTRATIE EN BIOLOGISCHE ACTIEF KOOLFILTRATIE

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 (Rattier, et al., 2012; Guillosou, et al., 2019; Snyder, et al., 2007). De mate van adsorptie van componenten aan de kool hangt af van de volgende eigenschappen (Abromaitis, 2018):

- adsorptie eigenschappen van componenten, zoals de hydrofobiciteit (log K_{ow} 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). DOC is deels hydrofoob en concurreert met andere hydrofobe stoffen om de beschikbare adsorptieplaatsen. Daarnaast kunnen deeltjes de macroporiën verstopen ("blocking" van de macroporiën) met als gevolg dat er minder adsorptieplaatsen vrij zijn.

Als vergaande verwijdering van microverontreinigingen gewenst is, moet de kool na circa 8.000-15.000 bedvolumes vervangen worden. Zonder reactivatie is de vergaande verwijdering van medicijnresten beperkt tot circa 6 maanden (STOWA, 2017).

Het bovenstaande is van toepassing mits er geen biologische omzetting van microverontreinigingen plaatsvindt op de kool. Bij biologische actief koolfiltratie (BAKF) ontwikkelt zich een biofilm op en in het actief kool, waardoor uiteindelijk de biodegradatie dominant wordt en, als gevolg van verzadiging van de actief kool, adsorptie nauwelijks meer een rol speelt (Abromaitis, 2018). Wanneer er ook zuurstof wordt gedoseerd wordt gesproken over BODAC. Hoe effectief biodegradatie en bioregeneratie in een BAKF verloopt hangt af van vele factoren, onder andere (El Gamal, et al., 2018):

- 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 in een BAKF is, onder de juiste omstandigheden, een oneindig proces (in tegenstelling tot adsorptie). Hierdoor kan biologische activiteit de actieve levensduur van de actief kool verlengen. De aanwezigheid van zuurstof heeft een positief effect op de afbraak van de meeste medicijnresten (De Wilt, 2018). De biologische afbraak van microverontreinigingen, waaronder medicijnresten, wordt namelijk gestimuleerd door de aanwezigheid van zuurstof (Sbardella, et al., 2018; STOWA).

1.5 PILOTONDERZOEK

Primair doel van het pilotonderzoek is om de ontwerpuitgangspunten die zijn gehanteerd in de haalbaarheidsstudie in de praktijk te bevestigen. Het pilotonderzoek moet dus aantonen dat BODAC filtratie met eenvoudige voorfiltratie en een contacttijd van 16 minuten minimaal voldoet aan de zuiveringsprestaties zoals geformuleerd in het Innovatieprogramma 'Microverontreinigingen uit RWZI-afvalwater'. Daarnaast beoogt het pilotonderzoek inzicht te geven in de opstart van BODAC filtratie, d.w.z. in de zuiveringsprestaties vlak nadat (verse) actieve kool is verzadigd met opgeloste organische componenten (DOC).

1.5.1 ONDERZOEKSVRAGEN

De onderzoeksvragen die centraal staan tijdens die onderzoek zijn:

1. Wat zijn de verwijderingsrendementen voor medicijnresten (gidsstoffen) indien BODAC, met een contacttijd van 16 minuten, niet wordt voorafgegaan door ultrafiltratie, maar door een eenvoudig zelfreinigende trommelzeef?
2. Hoe verloopt de verwijdering van medicijnresten ((kandidaat)gidsstoffen) bij de opstart van het BODAC concept? Is er sprake van een (tijdelijke) achteruitgang in verwijderingsrendement nadat de actieve kool verzadigd is met DOC, of blijft de verwijdering op peil? Hoe verhouden zich de verwijderingsrendementen bij 'jonge kool' (< 1 jaar oud) ten opzichte van 'oude kool' (> 10 jaar oud)?

2

ONDERZOEK EN UITVOERING

2.1 BESCHRIJVING VAN DE PILOTINSTALLATIE

Het onderzoek wordt uitgevoerd met behulp van een pilotinstallatie op het terrein van NieuWater BV. De pilotinstallatie bestaat uit twee parallelle BODAC filters:

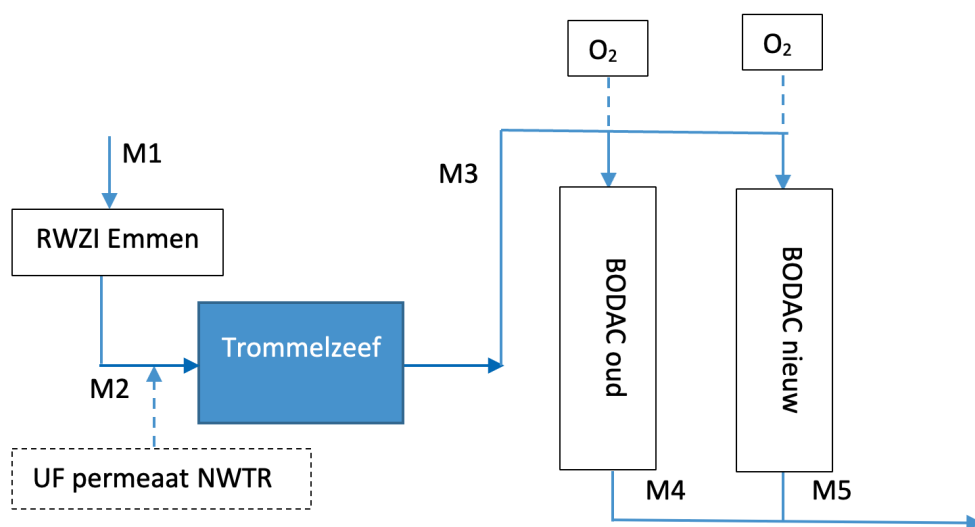
- BODAC-oud: gevuld met filtermateriaal uit de full scale BODAC installatie van NieuWater (NORIT® GAC 830 P)
- BODAC-nieuw: gevuld met verse actieve kool (NORIT® GAC 830 P)

De kool uit de full scale installatie is sinds de opstart in 2010 niet meer ververs of gereactiveerd. Daarom wordt verwacht dat BODAC-oud meteen vergelijkbaar zal presteren als de full scale installatie, en kan dit filter gebruikt worden om te onderzoeken hoe BODAC met een zelfreinigende trommelzeef functioneert. BODAC-nieuw zal inzicht geven in het verloop van medicijnrestenverwijdering bij de opstart van het BODAC concept.

De filters worden gevoed met effluent van RWZI Emmen (WVS) dat is gefiltreerd door een zelfreinigende trommelzeef (poriegrootte 50 µm), m.u.v. van de eerste maand van opstart, dan wordt BODAC oud gevoed met UF permeaat van de full scale installatie. De capaciteit van elk BODAC filter bedraagt maximaal 5 m³/u (EBCT circa 15 minuten). Elk koolbed heeft een volume van 1,2 m³.

De onderstaande figuur presenteert een vereenvoudigd PFD van de pilotinstallatie. In Bijlage I staan de uitgebreide PFD en P&ID van de pilots weergegeven.

FIGUUR 2.1 VEREENVOUDIGD PFD VAN DE PROEFINSTALLATIE MET TWEE PARALLELLE BODAC FILTERS: OUD (RIJPE KOOL, NWTR FULL SCALE) EN NIEUW (VERSE KOOL). MONSTERPUNTEN M1 (RWZI INFLUENT), M2 (RWZI EFFLUENT), M3 (VOEDING BODAC), M4 (FILTRAAT BODAC OUD) EN M5 (FILTRAAT BODAC NIEUW)



Aan het influent van de actiefkool (druk)filters wordt zuivere zuurstof gedoseerd. De zuurstofregeling is gelijk aan de BODAC praktijkinstallatie, d.w.z. dat de zuurstofdosering wordt geregeld op basis van een setpoint van de zuurstofconcentratie in het BODAC filtraat, en op basis van de (online gemeten) ammoniumconcentratie in het RWZI effluent. Deze ammoniumconcentratie kan, onder bepaalde condities, in korte tijd sterk stijgen, waardoor een feed forward sturing op ammonium gewenst is. De pilot BODAC filters worden, conform de full scale-installatie, periodiek teruggespoeld met BODAC filtraat. Daarbij wordt BODAC oud teruggespoeld met filtraat van BODAC oud en BODAC nieuw wordt teruggespoeld met filtraat van BODAC nieuw, om kruiscontaminatie te voorkomen.

2.2 PILOTONDERZOEK

Gedurende een periode van 12 maanden is de BODAC oud proefinstallatie gevoed met gefiltreerd effluent van de RWZI Emmen. De eerste weken bestond de voorfiltratie uit ultrafiltratie, BODAC oud werd gevoed met UF permeaat van de full scale installatie van NieuWater. Nadat werd aangetoond dat de pilotinstallatie (d.w.z. het filter gevuld met BODAC filtermateriaal) qua zuurstof verbruik, spoelfrequentie en verwijdering van gidsstoffen vergelijkbaar presteerde met het BODAC voorfilter van de full scale is overgeschakeld op een trommelzeef (poriegrootte 50 µm) als voorfiltratie.

De BODAC oud proefinstallatie werd aanvankelijk bedreven met een contacttijd van 16 minuten, d.w.z. gelijk aan de ontwerp contacttijd van de eerste BODAC filtratiestap in de praktijkinstallatie. Al snel bleek in werkelijkheid de full scale op langere contacttijden te draaien en bleek dat ook bij BODAC oud gezocht moest worden naar de optimale EBCT. Tijdens het pilotonderzoek vond monitoring van verschillende parameters plaats, zodanig dat de prestatiekenmerken van de BODAC technologie, adequaat en volgens STOWA-richtlijnen kon worden vastgesteld.

2.3 MATERIALEN EN METHODEN

2.3.1 VERWIJDERING VAN GIDSSTOFFEN

De verwijdering van gidsstoffen is bepaald met behulp van monitoring van het influent en het effluent van de BODAC-pilotinstallatie. Deze stromen zijn maandelijks bemonsterd m.b.v. tijd-proportionele bemonstering over een periode van 2 dagen zo veel mogelijk tijdens droogweerafvoer (DWA). De monsters worden door Aqualysis geanalyseerd op de 11 gidsstoffen en 8 kandidaat gidsstoffen conform de voorlopige werkinstructie 'Bemonstering en chemische analyse 7 medicijnresten in RWZI-afvalwater t.b.v. bijdrageregeling 'zuivering medicijnresten' en Innovatie Programma 'Micro Verontreinigingen uit RWZI-afvalwater' (versie 0.7, 3 april 2020) (IenW).

Maandelijks is ook het influent van de RWZI-Emmen meegenomen in de bemonstering en analyse, om zo de verwijdering van gidsstoffen door de hoofdzuivering te kunnen bepalen, en 'de toename in verwijderingscapaciteit door de BODAC als nazuivering'. Tijdens het voorgaande pilotonderzoek (WLN, 2020) is vastgesteld dat de hydraulische verblijftijd van de RWZI-Emmen tijdens DWA condities 55 uur bedraagt. De bemonstering van het RWZI-effluent startte hiermee 55 uur later dan het RWZI-influente. Op de bemonstering van de BODAC in en uit is geen vertraging ingesteld, omdat een EBCT van 15-30 minuten t.o.v. 48 uur verwaarloosbaar is.

2.3.2 VERLAGING VAN ECOTOXICOLOGISCHE DRUK

De verlaging van de ecotoxicologische druk op oppervlaktewater door lozing van RWZI-effluent is inzichtelijk gemaakt door biologische effectmetingen en LC-MS (liquid chromatography – mass spectrometry) screening. Tijdens de onderzoeksperiode zijn kwartaalwijs biologische effectmetingen uitgevoerd op RWZI effluent en het effluent van de twee parallelle BODAC filters. De monsternamen en metingen worden uitgevoerd conform de voorlopige handreiking voor het uitvoeren van biologische effectmonitoring bij vergaande zuivering van RWZI-effluent (versie 0.7, 3 april 2020) (Ecofide, 2020). Onder regie van Aqualysis worden door Waterproef en BDS verschillende effectmetingen uitgevoerd: Daphniatox, Microtox, PAH-Calux, ER-Calux, PXR-Calux en GR-Calux (Tabel 1). Sinds begin 2023 is de Daphniatox komen te vervallen en is de Cytotox-Calux toegevoegd als bioassay. Dit is n.a.v. de herziening van de handreiking (Ecofide, 2022).

TABEL 1 INDICATOR VOOR EFFECT EN BIJBEHORENDE EFFECTMETING

Effectmeting	Indicator voor effect
Daphnia/Cytotox	Apicale effecten zoals schade aan cellen, groeiremming en sterfte
Microtox	Apicale effecten zoals schade aan cellen, groeiremming en sterfte
PAH-Calux	Activering van de omzetting van lichaamsvreemde stoffen
ER-Calux	Hormoonreceptor-gemedieerde effecten
PXR-Calux	Activering van de omzetting van lichaamsvreemde stoffen
GR-Calux	Adaptieve stress responsen, zoals oxidatieve stress en DNA-beschadiging

2.3.3 AANVULLENDE METINGEN

De monsters waarin biologische effectmetingen zijn uitgevoerd, zijn tevens door WLN gescreend met non target LC-MS screening (NTS). Deze screening leverde 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. Door de chromatogrammen van de verschillende monsters onderling te vergelijken, kan een uitspraak worden gedaan over de toe- of afname van bepaalde componenten tijdens BODAC filtratie. 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. Daarnaast is er eenmalig door Wetsus een LC-OCD meting uitgevoerd waarin werd gekeken wat het verschil is tussen voedingswater uit de trommelzeef en uit de UF (zie paragraaf 3.5).

2.3.4 ALGEMENE PARAMETERS

Maandelijks zijn de volgende standaard analyses uitgevoerd op het RWZI effluent en het filtraat van de BODAC filters: troebelheid, onopgeloste bestanddelen, DOC, N-Kjeldahl, ammonium, nitriet, nitraat, totaal fosfaat en ATP. Deze analyses zijn uitgevoerd door WLN.

3

RESULTATEN

3.1 BESCHRIJVING ONDERZOEKSPERIODE

BODAC-oud is opgestart in januari 2022, met kool uit de full scale-installatie. Er is gestart met een EBCT van 15 minuten, overeenkomstig het originele ontwerp full scale eerste BODAC filter. In realiteit draait dit eerste full scale BODAC filter op een EBCT van 22 minuten door verlaagde afname vanuit de klant. De EBCT is over het verloop van de testperiode geoptimaliseerd en sinds januari 2023 staat deze ingesteld op 23 minuten, welke ongeveer vergelijkbaar is met de huidige EBCT van de full scale-installatie, zie Tabel 2.

Het filter is een maand lang gevoed met UF permeaat om na te gaan of de prestaties van de pilot vergelijkbaar waren met de full scale, zie paragraaf 3.2. Na een maand bleek dit het geval en is de voeding gewijzigd naar de trommelzeef.

Er is tijdens de onderzoeksperiode driemaal gemeten tijdens regenwaterafvoer (RWA). De rest van de monsternames waren tijdens DWA. Bij de dikgedrukte meetrondes in Tabel 2 is ook de NTS en/of ecotoxicologie meegenomen.

TABEL 2 ONDERZOEKSPERIODE VAN BODAC-OUDE

Datum	Inwoners aan het woord	Meetronde	Conditie	Temp.	Onderzoekperiode
04.01.'22	Voeding UF-filtraat – EBCT 15 min	-	-	-	04.01 - 08.02.'22
08.02.'22	EBCT 15 min	1	DWA	11	26.02 - 02.03.'22
		2	DWA	12	19.03 - 23.03.'22
		3	DWA	15	24.04 - 28.04.'22
23.05.'22	EBCT 30 min	4	DWA	17	28.05 - 01.06.'22
		5	DWA	19	11.06 - 15.06.'22
		6	DWA	21	16.07 - 20.07.'22
12.08.'22	EBCT 20 min	7	DWA	22	13.08 - 17.08.'22
		8	RWA	18	19.09 - 23.09.'22
		9	RWA	17	17.10 - 21.10.'22
31.10.'22	EBCT 17 min	10	DWA	13	28.11 - 02.12.'22
		11	DWA	12	10.12 - 14.12.'22
		12	RWA	12	07.01 - 11.01.'23
11.01.'23	EBCT 23 min	13	DWA	12	11.02 - 15.02.'23
		14	DWA	12	18.03 - 22.03.'23
		15	DWA	13	15.04 - 19.04.'23
		16	DWA	17	22.05 - 24.05.2023
		17	DWA	18	05.06 - 07.06.2023
		18	DWA+	21	17.07 - 19.07.2023
		19	DWA +	20	14.08 - 16.08.2023
		20	DWA	20	28.08 - 30.08.2023

BODAC-nieuw is opgestart in augustus 2022 met verse kool. Door leveringsproblemen van onderdelen was het niet mogelijk eerder in bedrijf te gaan. In augustus is het filter gestart met een EBCT van 30 minuten; omwille van koolverzadiging is begin november besloten het

debiet over het filter te verhogen naar een EBCT van 15 minuten. Er is ook tijdens de onderzoeksperiode van dit filter driemaal gemeten tijdens RWA. De andere monsternames waren tijdens DWA. Bij de dikgedrukte meetrondes in Tabel 3 is ook de NTS en/of ecotoxicologie meegenomen.

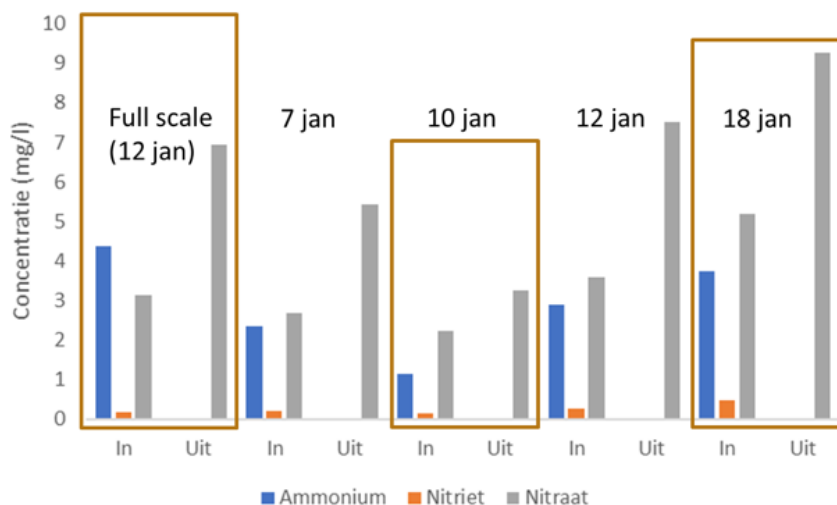
TABEL 3 ONDERZOEKSPERIODE VAN BODAC-NIEUW

Datum	Omschrijving	Meetronde	Conditie		Onderzoeksperiode
02.08.'22	EBCT 30 min	1	DWA	22	13.08 - 17.08.'22
		2	RWA	18	19.09 - 23.09.'22
		3	RWA	17	17.10 - 21.10.'22
31.10.'22	EBCT 15 min	4	DWA	13	28.11 - 02.12.'22
		5	DWA	12	10.12 - 14.12.'22
		6	RWA	12	07.01 - 11.01.'23
		7	DWA	12	11.02 - 15.02.'23
		8	DWA	12	18.03 - 22.03.'23
		9	DWA	13	15.04 - 19.04.'23
		10	DWA	17	22.05 - 24.05.2023
		11	DWA	18	05.06 - 07.06.2023
		12	DWA+	21	17.07 - 19.07.2023
19.06.'23	EBCT 23 min	13	DWA+	20	14.08 - 16.08.2023
		14	DWA	20	28.08 - 30.08.2023

3.2 TROMMELZEEF VERSUS UF

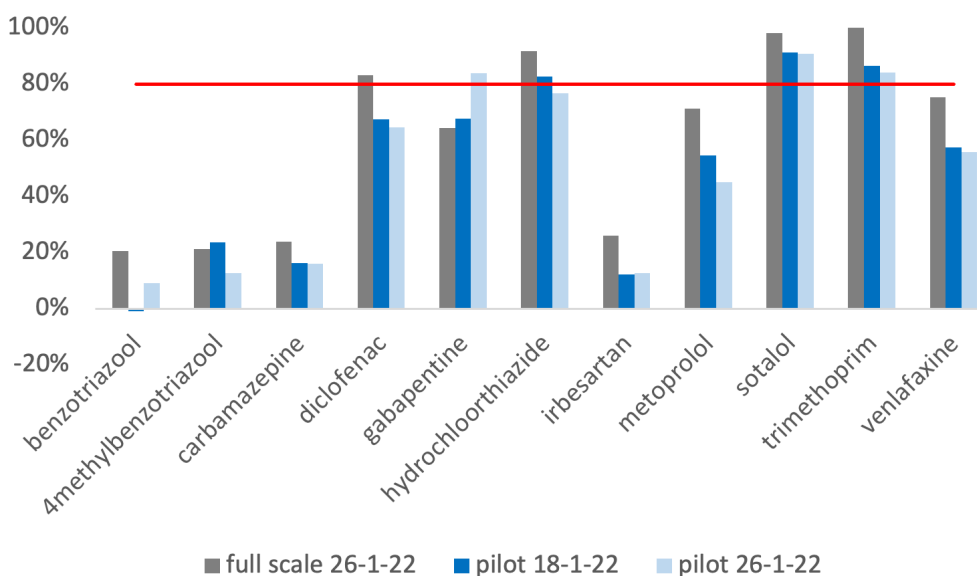
Na het vullen van BODAC-oud met kool uit de full scale installatie is deze gevoed met UF-filtraat (5 m³/uur; EBCT van 15 min). Vervolgens zijn er regelmatig stikstofmetingen uitgevoerd (Figuur 3.1) om de nitrificatie te volgen. Tijdens deze metingen is ammonium, nitriet en nitraat gemeten in de voeding en het filtraat van de pilot. De resultaten zijn vergeleken met de full scale en laten zien dat de stikstof omzetting in pilotinstallatie vergelijkbaar is. Stikstof is in de voeding aanwezig als ammonium, nitriet en nitraat en in het filtraat alleen als nitraat. Deze resultaten geven een goede indicatie dat de nitrificerende micro-organismen in de pilotinstallatie actief zijn.

FIGUUR 3.1 NITRIFICATIE RESULTATEN IN DE FULL SCALE INSTALLATIE EN PILOT BODAC-oud TIJDENS DE OPSTARTFASE. IN BEIDE INSTALLATIES KOMT STIKSTOF BINNEN IN DE VORM VAN AMMONIUM, NITRIET EN NITRAAT EN VERLAAT STIKSTOF HET SYSTEEM IN DE VORM VAN NITRAAT



Tijdens de opstartfase (met UF-permeaat als voeding) is BODAC-oud tweemaal bemonsterd om de gidsstoffen verwijdering te bepalen. Deze analyses zijn uitgevoerd door WLN en de resultaten zijn te zien in Figuur 3.2. De gidsstoffen verwijdering in de pilot ligt dicht bij de full scale. De gemiddelde verwijdering van de top 7 gidsstoffen was 72,5% en 71,5% in de pilot versus 83,5% in de full scale (meting 26-1-22). Dat het verwijderingsrendement in de full scale iets hoger ligt heeft naar verwachting met name te maken met de hogere EBCT in de full scale, namelijk 22 minuten. Ook verstoring van de microbiologie in de kool door de verplaatsing naar de pilot zou een rol kunnen spelen.

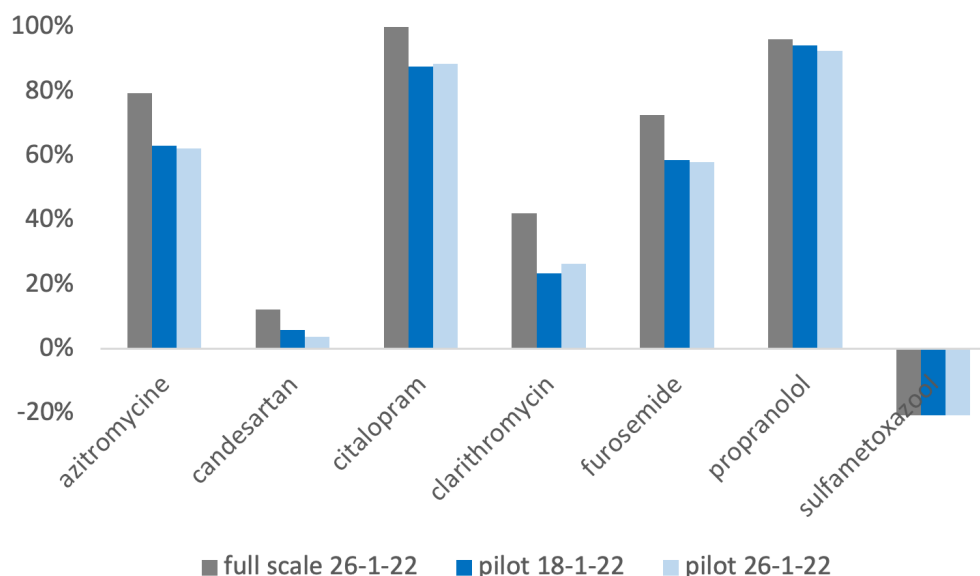
FIGUUR 3.2 GIDSSTOFFENVERWIJDERING (%) FULL SCALE INSTALLATIE EN BODAC-OUDE TIJDENS DE OPSTARTFASE. DE PRESTATIES VAN DE FULL SCALE INSTALLATIE LIGGEN IETS HOGER DAN DE PILOT INSTALLATIE MET EEN GEMIDDELTE VERWIJDERING TOP 7 GIDSSTOFFEN VAN 83,5% T.O.V. 72,5% EN 71,5% VERWIJDERING



Ook het verwijderingsrendement van de kandidaat gidsstoffen in de pilot ligt dichtbij het verwijderingsrendement van de full scale, zie Figuur 3.3. Amisulpride werd niet aangetroffen. Sulfamethoxazool neemt toe in zowel de full scale als de pilot. Een oorzaak hiervan is niet bekend, maar mogelijk is sulfamethoxazool ook een metaboliet van een andere stof, die wordt omgezet in de BODAC. Daarnaast zag Wetsus in parallel onderzoek een effect van de watermatrix op de sulfamethoxazool analyse, waardoor het verwijderingsrendement negatief werd beïnvloed.

FIGUUR 3.3

VERWIJDERING KANDIDAAT-GIDSSTOFFEN (%) FULL SCALE INSTALLATIE EN BODAC-OUDE TIJDENS DE OPSTARTFASE. DE PRESTATIES VAN DE FULL SCALE INSTALLATIE LIGGEN IETS HOGER DAN DE PILOT INSTALLATIE MET EEN GEMIDDELTE VERWIJDERING TOP 5 KANDIDAAT-GIDSSTOFFEN VAN 78.1% T.O.V. 65.5% EN 65.7% VERWIJDERING



Het doel is een gemiddelde verwijdering van 80% van de top 7 gidsstoffen t.o.v. het RWZI-effluent. De resultaten tijdens de opstartfase laten zien dat het verwijderingsrendement van de pilot installatie dicht bij dit doel komt en daarom is de performance tijdens de opstartfase als voldoende beschouwd om de pilot aan te sluiten op het filtraat van de trommelzeef en daarmee de daadwerkelijke onderzoeksfase te starten.

Aanvullend is door Wetsus een LC-OCD meting (liquid chromatography organic carbon detection) uitgevoerd op het effluent van de UF en de trommelzeef, tezamen met de BODAC full scale en BODAC-oud pilot. De bemonstering vond plaats op 28 april 2022 en de resultaten zijn weergegeven in Tabel 4. Met deze meting kunnen DOC-bestanddelen (Dissolved Organic Carbon) worden gekarakteriseerd.

Wat opvalt en gezien de poriegrootte (50 µm) van de trommelzeef verwacht mocht worden is dat het aandeel biopolymeren in DOC niet verwijderd wordt door de trommelzeef, maar wel tegengehouden wordt door de UF. Dit heeft te maken met de grootte van deze DOC-bestanddelen. Dit betekent dat de BODAC pilot zwaarder belast wordt met deze stoffen. Omdat de biopolymeren beperkt worden tegengehouden in de pilot en dus niet zullen ophopen, is de verwachting dat deze stoffen geen drukverhoging of een prestatieverslechtering met zich meebrengen in de pilot.

TABEL 4 LC-OCD METINGEN UITGEVOERD DOOR WETSUS OP DE FULL SCALE INSTALLATIE (UF, BODAC 1 EN BODAC 2) EN OP DE BODAC-OUDE PILOT INSTALLATIE (TROMMELZEEF (DS) EN BODAC-OUDE EFFLUENT (PINELA, ET AL., 2023))

Sampling port		LC-OCD (µg/L)						
		Biopolymers C (>10 kDa)	Biopolymers N (>10 kDa)	Humic acids C	Humic acids N	LMW neutrals	LMW acids	DOC
Full-scale	UF in	1214 ± 65	289 ± 1	9462 ± 54	940 ± 0	2490 ± 156	657 ± 13	15050 ± 806
	UF out	77 ± 5	22 ± 1	8720 ± 57	899 ± 7	2100 ± 57	587 ± 13	13180 ± 339
	BODAC 1 out	48 ± 1	0 ± 0	8450 ± 14	863 ± 4	1996 ± 204	541 ± 10	12040 ± 28
	BODAC 2 out	28 ± 0	0 ± 0	7730 ± 14	769 ± 1	1746 ± 88	424 ± 8	10700 ± 28
Pilot-scale	DS in (M2)	1315 ± 7	303 ± 1	9990 ± 14	965 ± 4	2230 ± 14	581 ± 7	15550 ± 96
	DS out (M3)	1324 ± 25	306 ± 0	9940 ± 28	951 ± 4	2210 ± 42	566 ± 6	16019 ± 44
	BODAC out (M4)	1252 ± 3	262 ± 0	9530 ± 14	888 ± 0	1939 ± 115	472 ± 6	14708 ± 48

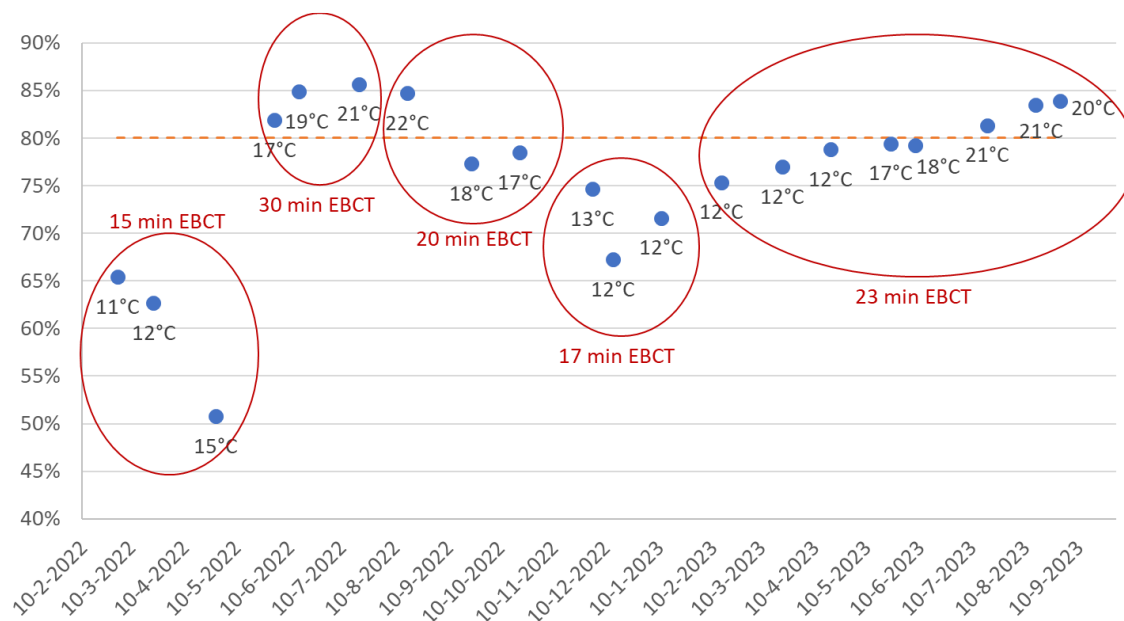
3.3 BODAC-OUDE – BELADEN KOOL UIT DE FULL SCALE INSTALLATIE

3.3.1 GIDSSTOFFEN

Het gemiddelde verwijderingsrendement van de top 7 gidsstoffen ten opzichte van het RWZI effluent is, tezamen met de temperatuur ten tijde van monsternamen, weergegeven in Figuur 3.4. In eerste instantie is per drie monsternamen de EBCT gewijzigd op zoek naar een optimum. Bij een EBCT van 23 minuten is het optimaliseren gestopt en onderzocht wat het effect van temperatuur was op de verwijderingsrendementen. De lagere EBCT van 15 en 17 minuten zijn beide toegepast in het voor- en najaar (bij lagere watertemperaturen) en de EBCT van 30 en 20 minuten in de zomer.

Bij een EBCT van 30 minuten ligt het verwijderingsrendement van de top 7 gidsstoffen boven 80%. Dit is ook het geval bij 1 bemonsteringsronde bij 20 minuten en bij 3 van de 8 bemonsteringsrondes bij een EBCT van 23 minuten. Opvallend is dat het verwijderingsrendement van > 80% verwijdering bij een EBCT van 20 en 23 minuten wordt bereikt bij een temperatuur > 20 °C in de voeding BODAC.

FIGUUR 3.4 BODAC-OUDE GEMIDDELTE TOP 7 GIDSSTOFFEN VERWIJDERINGSRENDEMENT T.O.V. HET RWZI EFFLUENT



Gezien de verwijderingsrendementen is een EBCT van 23 minuten het optimum, maar is het goed te weten hoe lang de periode is dat het voedingswater van de BODAC een temperatuur heeft van > 18 °C. In het geval van de BODAC pilot liggen de leidingen bovengronds, om die reden is ervoor gekozen om de temperatuur van de ultrafiltratie van de full scale te pakken. Deze heeft net als BODAC een voorzuivering met trommelzeef, maar heeft een representatievere temperatuur over het jaar, zie resultaten in Tabel 5. De ultrafiltratie wordt periodiek belucht, met buitenlucht, wat mogelijk een lagere temperatuur laat zien dan zonder ultrafiltratie, maar voor nu is dit de referentie. Jaargemiddeld zal het verwijderingsrendement van de top 7 gidsstoffen net op of net onder 80% komen te liggen in de BODAC installatie bij een EBCT van 23 minuten.

TABEL 5

SAMENVATTING VERWIJDERINGSRENDEMENTEN, TEMPERATUUR EN VOORKOMEN OVER HET JAAR

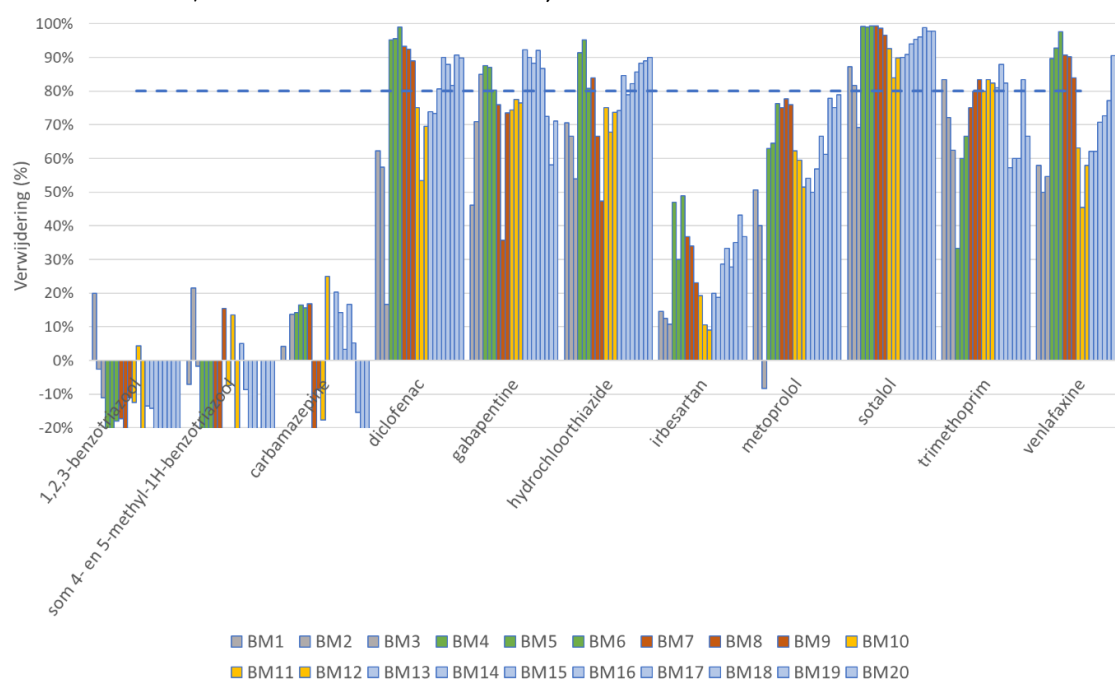
Temperatuur	Verwijderingsrendement	Over het jaar
20-25 °C	81-84%	3 mnd
15-20 °C	79%	3 mnd
10-15 °C	75-78%	6 mnd

In Bijlage II is het verwijderingsrendement bij de verschillende temperaturen en EBCT's per stof van alle (kandidaat) gidsstoffen weergegeven. De top 7 gidsstoffen bestaat, ondanks de verschillende omstandigheden, altijd uit dezelfde 7 gidsstoffen, namelijk: diclofenac, gabapentine, hydrochloorthiazide, metropolol, sotalol, trimethoprim en venlafaxine. Ook is te zien dat benzotriazool en methylbenzotriazool toenemen, en dat de toename sterker is bij een langere EBCT en hogere temperatuur. Dit suggereert dat deze twee stoffen metabolieten van andere stoffen zijn, maar mogelijk speelt desorptie ook een rol. Dit wordt in een parallel onderzoek bij Wetsus verder uitgezocht.

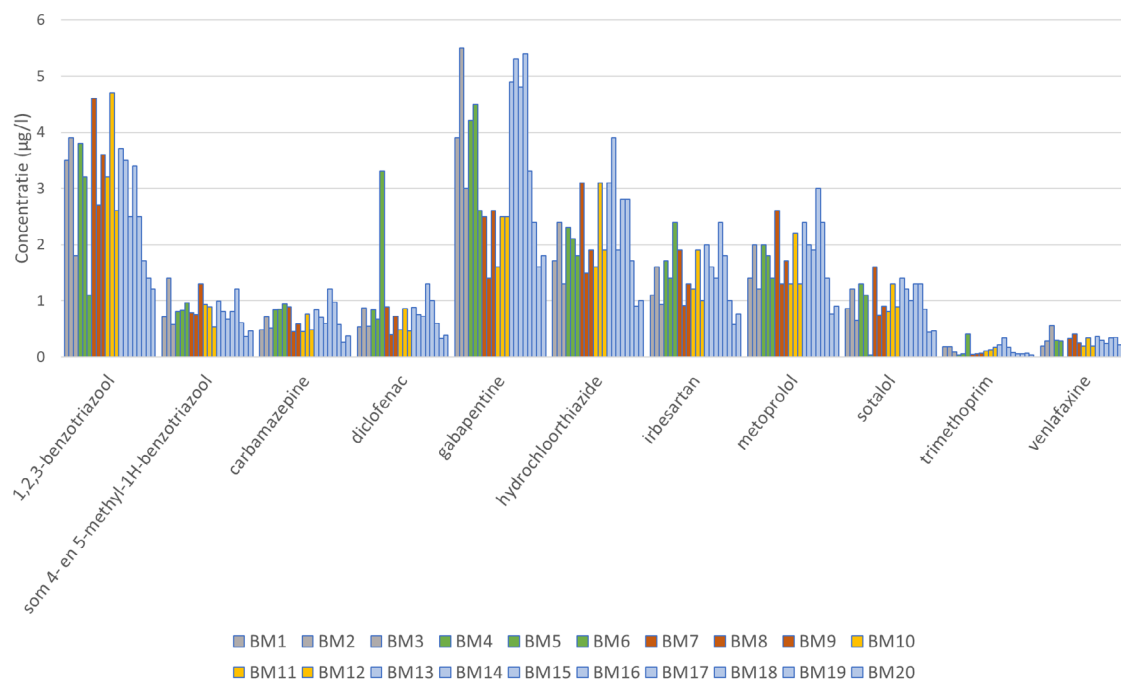
De verwijderingsrendementen per gidsstof per bemonsteringsronde (BM) staan weergegeven in Figuur 3.5. De gidsstoffen; diclofenac, gabapentine, chloorthiazide, sotalol, trimethoprim en venlafaxine worden over het algemeen goed verwijderd door de BODAC-oud.

Er zit een grote variatie in de verwijderingsrendementen wat o.a. voortkomt uit variatie in concentratie in de voeding van de BODAC-oud. Dit is te zien in Figuur 3.6. Afhankelijk van de aanvoer in de RWZI en deels belasting van de zuivering varieert de concentratie in de voeding van de BODAC-oud en rekenkundig ook het maximaal haalbare verwijderingsrendement.

FIGUUR 3.5 GIDSSTOFFEN VERWIJDERINGSRENDAMENT T.O.V. RWZI EFFLUENT (EBCT 15 MIN = GRIJS, EBCT 30 MIN = GROEN, EBCT 20 MIN = ROOD, EBCT 17 MIN = GEEL EN EBCT 23 MIN = BLAUW)

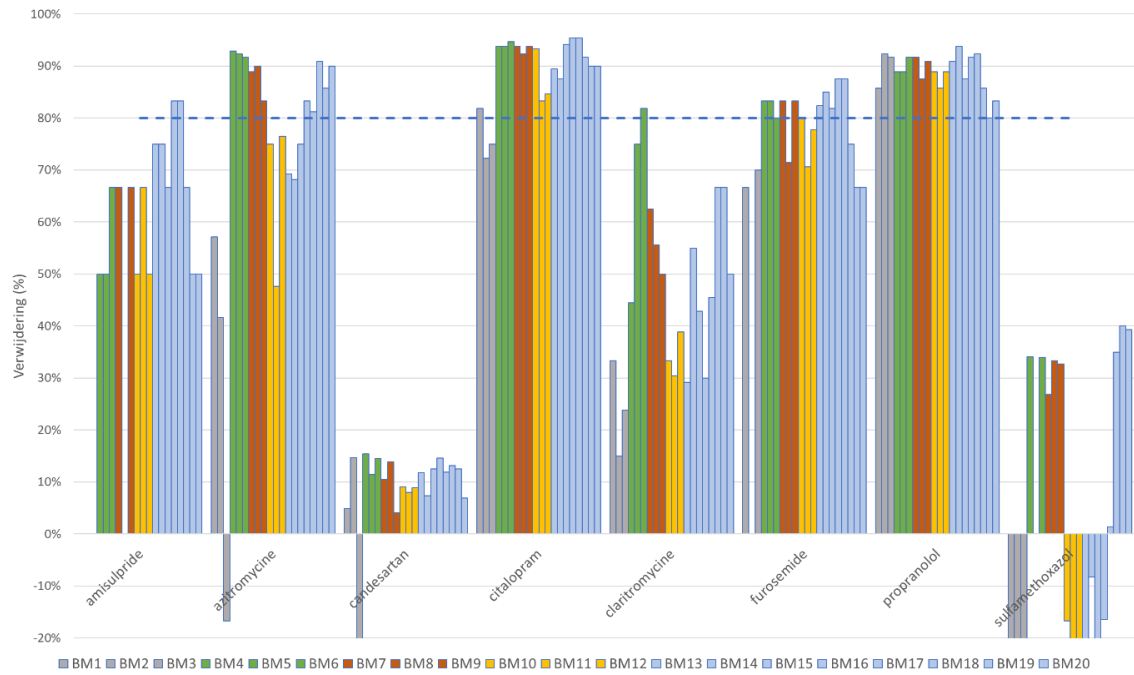


FIGUUR 3.6 GIDSSTOFFEN CONCENTRATIE ($\mu\text{g/L}$) IN INFLUENT PILOT (EBCT 15 MIN = GRIJS, EBCT 30 MIN = GROEN, EBCT 20 MIN = ROOD, EBCT 17 MIN = GEEL EN EBCT 23 MIN = BLAUW)

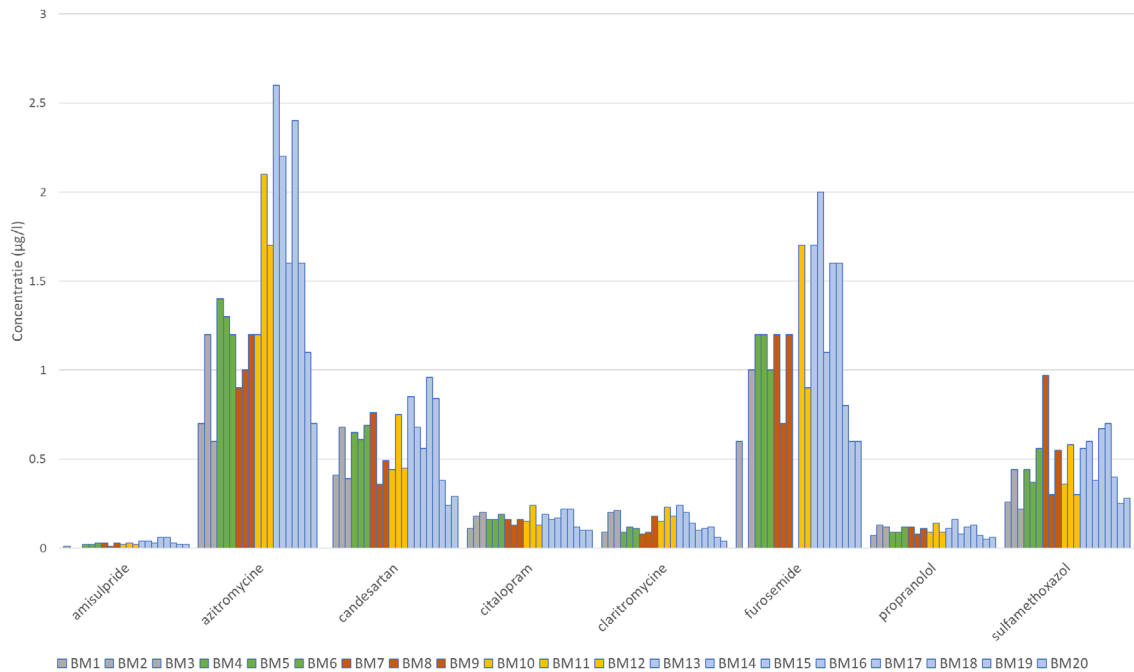


Het verwijderingsrendement van de kandidaat gidsstoffen staat weergegeven in Figuur 3.7. De kandidaat gidsstoffen; azitromycine, citalopram, furosemide en propranolol worden over het algemeen goed verwijderd door BODAC-oud. Ook in het geval van de kandidaat gidsstoffen heeft de voedingsconcentratie van de BODAC-oud effect op de verwijderingsrendementen. De variaties in voedingsconcentratie zijn zichtbaar gemaakt in Figuur 3.8.

FIGUUR 3.7 KANDIDAAT GIDSSTOFFEN VERWIJDERINGSRENDEMENT T.O.V. RWZI EFFLUENT (EBCT 15 MIN = GRIJS, EBCT 30 MIN = GROEN, EBCT 20 MIN = ROOD, EBCT 17 MIN = GEEL EN EBCT 23 MIN = BLAUW)



FIGUUR 3.8 KANDIDAAT GIDSSTOFFEN CONCENTRATIE ($\mu\text{g/L}$) IN INFLUENT PILOT (EBCT 15 MIN = GRIJS, EBCT 30 MIN = GROEN, EBCT 20 MIN = ROOD, EBCT 17 MIN = GEEL EN EBCT 23 MIN = BLAUW)



3.3.2 INVLOED VARIABELEN OP VERWIJDERINGSRENDEMENTEN

De eerder getoonde figuren; Figuur 3.5 en Figuur 3.7 doen vermoeden dat er mogelijk een relatie bestaat tussen voedingsconcentratie, EBCT, temperatuur en verwijderingsrendementen.

Om na te gaan of de voedingsconcentratie gelijk varieert met de voedingstemperatuur is gekeken of er een relatie was tussen beide. In Bijlage III staan de spreidingsgrafieken weergegeven en is duidelijk dat er geen relatie gevonden wordt tussen concentratie (kandidaat)gidsstoffen in de voeding en de watertemperatuur. Op basis van de trendlijnen wordt alleen voor trimethoprim een R^2 van 0,61 gehaald. De andere stoffen hebben een R^2 van 0,23 (carbamazepine), 0,1-0,2 (sotalol en metoprolol) en de rest $< 0,1$. De R^2 geeft informatie over of er een correlatie bestaat tussen twee parameters, in dit geval voedingsconcentratie en temperatuur. Bij een R^2 van $> 0,75$ wordt er gesproken over een zwakke relatie en $> 0,9$ een goede relatie. Op basis van deze informatie wordt verwacht dat er geen relatie is tussen temperatuur en voedingswaterconcentratie.

Voor diclofenac is aanvullend gekeken of er een relatie was tussen voedingsconcentratie en verwijderingsrendement. De R^2 die uit de trendlijn werd gedestilleerd kwam lag ruim onder 0,1.

In parallel onderzoek bij Wetsus is voor een aantal stoffen een relatie gevonden tussen temperatuur en verwijderingsrendement, waarbij een temperatuur lager dan 13 °C remmend bleek voor de verwijdering van hydrochloorthiazide en metoprolol (Bernadet, et al., 2023). Of de verwijderingsrendementen toenemen bij hogere temperaturen, ruim boven 13 °C, kan niet wetenschappelijk onderbouwd worden door de lage dichtheid aan data.

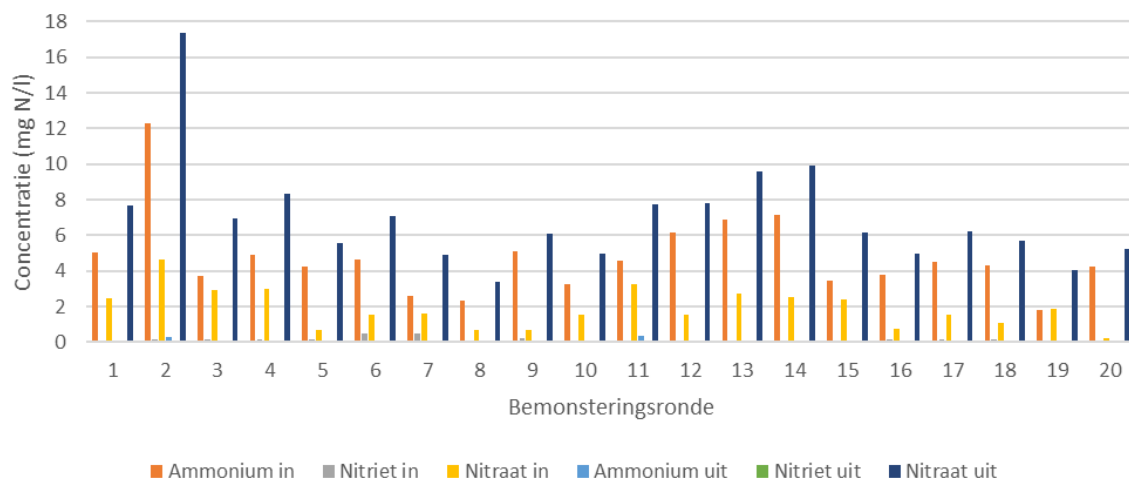
Door het grote aantal variabelen (4 stuks) is het lastig de vinger te leggen op welke van de variabelen daadwerkelijk effect hebben op de prestaties van de BODAC. Met zekerheid kan gezegd worden dat de EBCT doorslaggevend is voor het verwijderingsrendement en dat de andere variabelen in beperkte mate invloed hebben op het verwijderingsrendement.

3.3.3 ALGEMENE PARAMETERS

In Figuur 3.9 zijn de ammonium-, nitriet- en nitraatconcentraties weergegeven in het in- en effluent van BODAC-oud. Deze monsters worden op dezelfde manier bemonsterd als de (kandidaat)gidsstoffen. Tijdens de bemonsteringen fluctueerden de ammoniumconcentraties tussen 2-12,5 mg N/l. De BODAC pilot kan door de geïnstalleerde zuurstofdosering goed met deze concentraties omgaan. Gemiddeld gezien wordt er 98,7% van het inkomende ammonium omgezet naar nitraat. Bij de piek van 12,3 mg N/l (BM 2) en BM 11 is er geringe doorslag van ammonium. De ammonium doorslag is maximaal 0,36 mg N/l, wat betekent dat de BODAC naast medicijnverwijdering ook ingezet kan worden om de ammoniumpiek van RWZI effluent te verlagen.

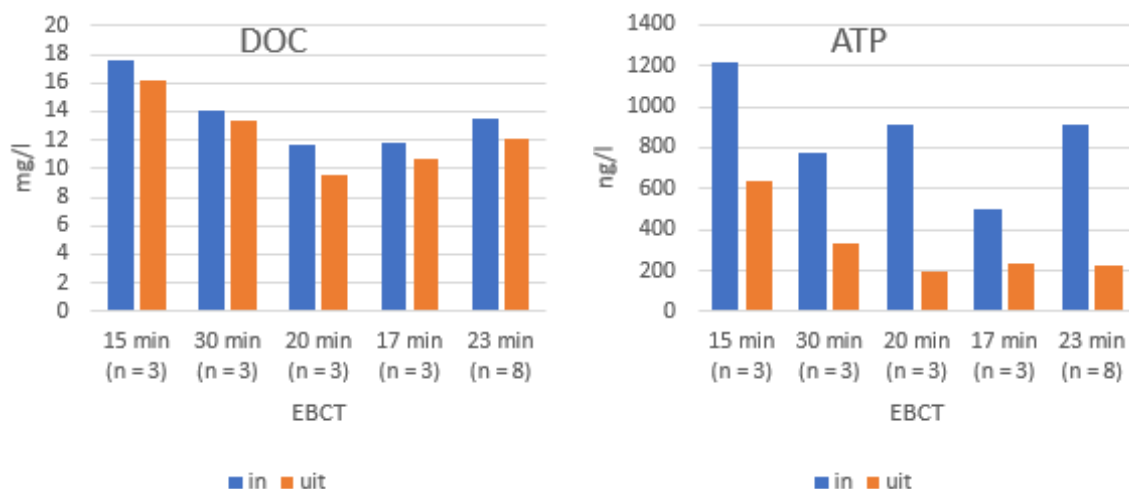
Tijdens BM2 was een van de beluchtingstanks van de RWZI buiten bedrijf waardoor ammoniumconcentraties relatief hoog waren en het zuurstof uitgaande RWZI relatief laag voor DWA. BM 11 werd de pilot zwaarder belast met onopgeloste bestanddelen dan de andere bemonsteringsrondes. Mogelijk is door vervuiling van het bed minder ruimte geweest voor omzetting van ammonium ten tijde van deze bemonstering.

FIGUUR 3.9 AMMONIUM-, NITRIET- EN NITRAATCONCENTRATIES PER BEMONSTERINGSRONDE IN- EN EFFLUENT



De gemiddelde ATP concentratie in het influent was 866 ng/l en was 64% lager in het uitgaande water. De effluentconcentratie was gemiddeld 312 ng/l, zie Figuur 3.10. DOC werd beperkt verwijderd in de BODAC-oud, voor 8%. Door het verzadigd raken van de kool speelt adsorptie nauwelijks een rol en daarmee wordt DOC beperkt (biologisch) verwijderd. Dit is conform de verwachting. Er lijkt geen verband te zijn tussen een langere EBCT en DOC/ATP verlaging.

FIGUUR 3.10 GEMIDDELDE ATP EN DOC CONCENTRATIE IN- EN EFFLUENT



Voor de andere parameters gold het volgende:

- De ingaande totaal fosfaat concentratie was gemiddeld 0,27 mg P/l en in het effluent 0,22 mg P/l. Het verwijderingsrendement varieerde tussen 8-25%.
- De ingaande troebelheid was gemiddeld 1,3 FTU en in het effluent 0,44 FTU. Dit resulteert in een gemiddelde verwijdering van 66%.
- De ingaande onopgeloste bestanddelen waren op 1 meting na onder de rapportagegrens van 3 mg/l en in het effluent werden onopgeloste bestanddelen niet meer boven de rapportagegrens aangetroffen.
- Broomaat is eenmalig bepaald in het in- en effluent van BODAC-oud. De ingaande concentratie was onder de rapportagegrens van 0,5 µg/l en de effluent concentratie lag op de rapportagegrens; 0,5 µg/l.

De performance van BODAC-oud tijdens de pilotfase is weergegeven in Bijlage IX.

3.3.4 ECOTOXICOLOGIE

De bemonsteringsronden voor ecotoxicologie en NTS zijn weergegeven in Tabel 6.

TABEL 6 ONDERZOEKSPERIODE ECOTOXICOLOGIE EN NTS VAN BODAC-OUDE

DWA/RWA condities	EBCT (min.)	Meetronde	Onderzoekperiode	Opmerkingen
DWA	15	2	19.03 - 23.03.'22	
DWA	30	6	16.07 - 20.07.'22	
DWA	17	10	28.11 - 02.12.'22	
DWA	23	13	11.02 - 15.02.'23	Alleen NTS uitgevoerd
DWA	23	16	22.05 - 24.05.'23	

Het effect van de BODAC pilot op de ecotoxiciteit is vastgesteld door een zestal testen (bio assays) uit te voeren op in- en effluent van de pilot. De resultaten van de ecotoxiciteit staan weergegeven in Tabel 7.

Over het algemeen nemen de waarden van alle bio assays af over de pilot, behalve de GR-CALUX tijdens bemonsteringsronde 6 (weergegeven in rood). De waardes liggen dichtbij elkaar, maar nemen iets toe over de pilot. In het influent is een verhoogde waarde voor alle bio assays aanwezig, in meer of mindere mate. De Microtox, Daphniatox en ER-CALUX zijn kleiner dan 1 toxic unit (TU) of ng/l. In het geval van GR-CALUX, PAK-CALUX en PXR-CALUX liggen de influent waardes in de ordegrrootte 10-100 ng/l. De verwijdering varieert per bio-assay, m.n. van ER-CALUX wordt de waarde verlaagd in de pilot.

TABEL 7 ECOTOXICOLOGISCHE RESULTATEN, INCLUSIEF PROCENTUELE VERWIJDERING IN BODAC OUD

		Microtox	Daphniatox	ER-CALUX	GR-CALUX	PAK-CALUX	PXR-CALUX
		TU	TU	ng/l	ng/l	ng/l	µg/l
BM 2	Blanco	0,05	0,038	< 0,015	< 4,2	18	6
	Influent	0,162	0,059	0,414	216	132	38
	Effluent	0,121	0,058	0,095	189	84	32
	% in-ef	25	2	77	13	36	16
BM 6	Blanco	0,026	< 0,016	< 0,019	< 3,8	9,1	4,4
	Influent	0,095	0,027	0,789	63	126	45
	Effluent	0,04	< 0,016	0,025	72	24	40
	% in-ef	58	100	97	-14	81	11
BM 10	Blanco	0,031	< 0,015	0,052	< 4,4	250 ¹	40
	Influent	0,092	0,021	1,3	180	49	120
	Effluent	0,061	< 0,015	0,052	140	32	74
	% in-ef	34	100	100	22	35	38

		Microtox	ERa-CALUX	Cytotox CALUX	PAH-CALUX	PXR-CALUX
		TU	ng/l	µg/l	ng/l	µg/l
BM 16	Blanco	0,09	0,044	1,2	28	15
	Influent	0,19	0,69	3,7	100	160
	Effluent	0,07	0,09	2,6	65	110
	% in-ef	100	93	44	49	34

¹ Deze waarde wordt niet betrouwbaar geacht ondanks de ingezette duplo.

3.3.5 NON-TARGET LCMS SCREENING

In Bijlage IV zijn de spreidingsgrafieken van de NTS analyses van BODAC-oud weergegeven, tezamen met een lijst van parameters die significant toe- of afnemen. Over het algemeen kan gesteld worden dat:

- bij elke NTS het aantal componenten dat afneemt significant groter is dan het aandeel dat toeneemt,
- er relatief veel variatie is in hoeveelheid aangetroffen stoffen tussen de monsternames,
- er meer positief ioniserende componenten worden aangetroffen dan negatief ioniserend componenten. De functionele groepen van een component bepalen of een stof negatief of positief ioniseert. Stikstof-groepen ioniseren altijd positief en zuurstofgroepen altijd negatief.

BODAC-oud heeft 6 NTS meetrondes gehad en BODAC-nieuw 3 NTS meetrondes. Alle NTS metingen zijn uitgevoerd tijdens DWA condities (Tabel 8).

TABEL 8 NTS ONDERZOEKSPERIODE VOOR BODAC-OUDE EN BODAC-NEUW

Meetronde	Onderzoekperiode	EBCT (min)	BODAC pilot
2	19.03 - 23.03.2022	15	Oud
6	16.07 - 20.07.2022	30	Oud
10	28.11 - 02.12.2022	17 (15)	Oud en nieuw
13	11.02 - 15.02.2023	23 (15)	Oud en nieuw
15	15.04 - 19.04.2023	23 (17)	Oud en nieuw
16	20.05 - 24.05.2023	23	Oud

Een deel van de gedetecteerde componenten van de NTS konden geïdentificeerd worden. Deze bekende stoffen zijn te verdelen onder niveau 1: de identiteit van de stof is 100% zeker, en niveau 2: de identiteit van de stof is vrijwel zeker. Een aantal van de bekende stoffen die zijn gedetecteerd in de NTS vallen onder (kandidaat) gidsstoffen. In Bijlage VI is weergegeven welke (kandidaat) gidsstoffen (positief en negatief ioniserend) afnemen in zowel BODAC-oud als nieuw. Ook andere (bekende niveau 1) stoffen die positief ioniserend toenemen bij BODAC-oud zijn hier weergegeven.

De (bekende niveau 1) stoffen die vaker dan eenmalig bij een bemonstering af- of toenemen bij BODAC-oud zijn in onderstaande tabel weergegeven.

TABEL 9 BEKENDE NIVEAU 1 STOFFEN DIE TIJDENS NTS TOENEMEN EN AFNEMEN BIJ BODAC-OUDE. STOFFEN IN BOLT ZIJN (KANDIDAAT) GIDSSTOFFEN

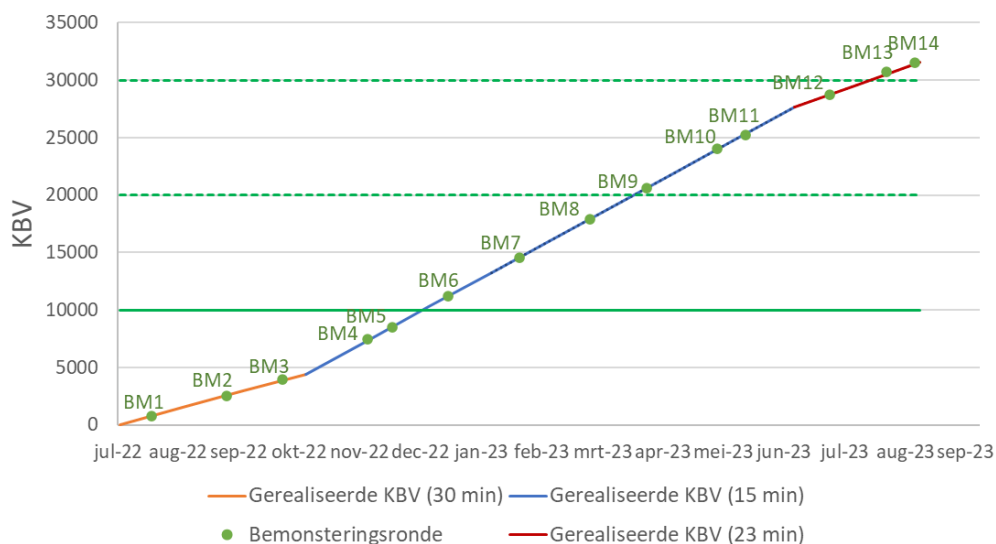
Positief ioniserend afname	Negatief ioniserend afname	Positief ioniserend toename	Negatief ioniserend toename
1,3-diphenylguanidine	3,4-Dimethylbenzenesulfonic acid	2,6-Dichlorobenzamide (BAM)	2-Methyl-4-chlorophenoxyacetic acid (MCPA)
Atenolol	4-Nitrophenol	4-Methylbenzotriazole	Acesulfame
Caffeine	Bentazone	Caffeine	
Caprolactam	Cyclamic acid	Desamino metatritron	
Carbamazepine	Fludioxonil	Linuron	
Clarithromycin	p-Toluenesulfonic acid	Paraxanthine	
Cyprodinil	3-Nitrofenol	Desaminometribuzin	
Desamino metatritron	Hydrochlorothiazide	Dimethenamid	
Difenoconazole	Valsartan	Fluoxastrobin	
Dipyridamole	Saccharin	Thiacloprid	
Flutolanil	Furosemide	Flutolanil	
Furosemide		Terbutylazine	
Hydrochlorothiazide		Chloridazon	
Metatritron			
Pirimicarb			
Praziquantel			
Primidone			
Saccharin			
Spinosyn A			
Tributyl phosphate			
2-Methyl-5-benzothiazole			
Azithromycin			
Benzafibrate			
Clozapine			
Ketoprofen			
Mebendazole			
Pencycuron			
Tramadol			
4-Aminoantipyrine			
4'-Hydroxydiclofenac			
N,N'-Diphenylguanidine			
Naproxen			
Prosulfocarb			
Valsartan			
4-Formylaminoantipyrine			
Bisoprolol			
Carbamazepine 10,11-epoxide			
Metoprolol			
Sotalol			
Sulfapyridine			
Trimethoprim			
Gabapentine			komt 1 x voor
Lidocaine			komt 2 x voor
MDMA			komt 3 x voor
Propranolol			komt 4 x voor
Diclofenac			komt 5 x voor
			komt 6 x voor

3.4 BODAC-NIEUW – VERSE KOOL

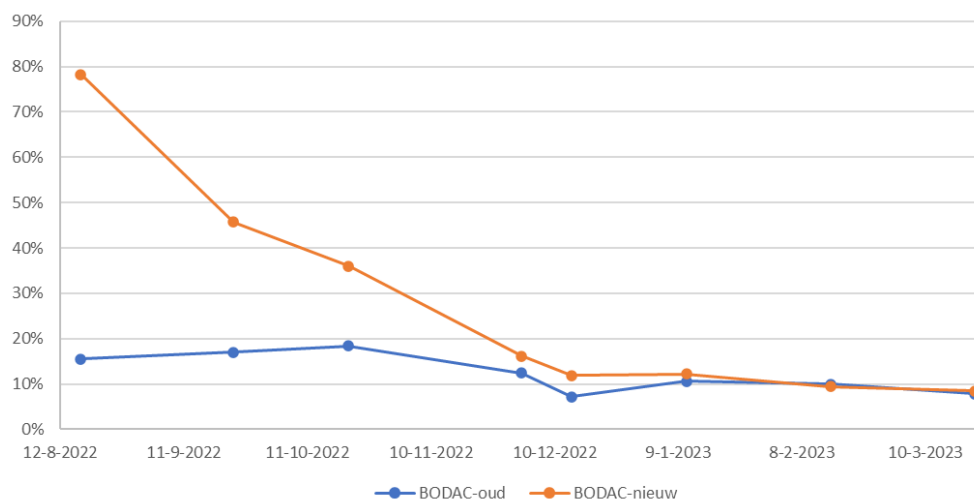
In Figuur 3.11 is het verloop van de koolbedvolumes (KBV) in BODAC-nieuw weergegeven. De verwachting was dat tussen 20.000-30.000 KBV adsorptie beperkt is en de gidsstoffen worden verwijderd door biologische omzetting. Het beladen van de kool met Dissolved Organic Carbon (DOC) is volledig rond de 10.000-12.000 KBV (WLN, 2020). Dit wordt onderbouwd door Figuur 3.12, waarin het DOC verwijderingsrendement van BODAC-nieuw is vergeleken met BODAC-oud. Vanaf januari 2023 (11.200 KVB) is de DOC verwijdering in BODAC-oud en nieuw vergelijkbaar.

Om het beladen van kool te versnellen is ervoor gekozen om het debiet over de pilot te verhogen van een EBCT van 30 minuten naar 15 minuten. Dit is gebeurd tussen BM3 en BM4, begin november 2022. Halverwege juni 2023 is na verbeteren van de verwijderingsrendementen gekozen om het debiet en EBCT over BODAC-nieuw gelijk te maken aan BODAC-oud, namelijk 23 minuten.

FIGUUR 3.11 VERLOOP KOOLBEDVOLUMES OVER DE LOOPTIJD VAN DE PILOT



FIGUUR 3.12 DOC VERWIJDERINGSRENDEMENT IN BODAC-OUDE EN BODAC-NIEUW

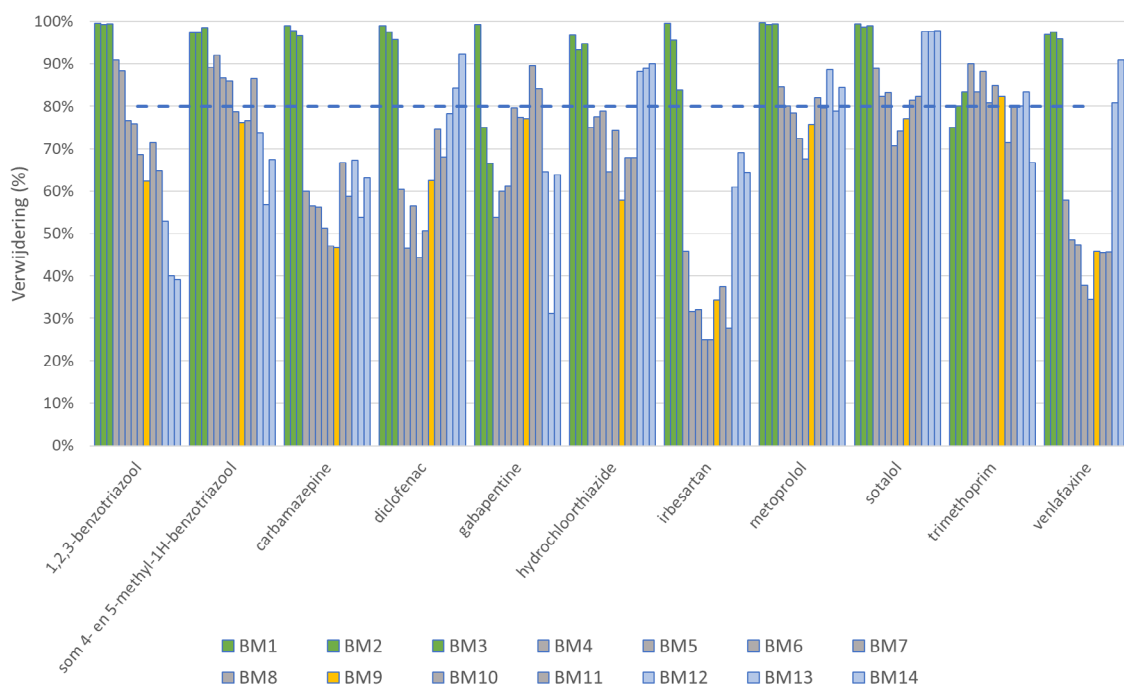


3.4.1 GIDSSTOFFEN

De verwijderingsrendementen van de gidsstoffen zijn weergegeven in Figuur 3.13. Bij een EBCT van 30 minuten werden alle stoffen, behalve gabapentine en trimethoprim, ruim boven de 80% verwijderd. Dit is met name het gevolg van adsorptie. Sinds de verlaging van de EBCT naar 15 minuten ligt de verwijdering van alle stoffen, behalve benzotriazool, som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool, metoprolol, sotalol en trimethoprim, onder 80% verwijdering.

Het is naar verwachting een combinatie van verlaging van de EBCT en gestage verzadiging van het actieve kool waardoor deze stoffen minder goed verwijderd worden. Vanaf BM 9 (ca. 20.000 KBV), in april, verbeteren de verwijderingsrendementen zich gestaag. Aangezien deze verbetering werd gezien en door navolgende metingen werd ondersteund is begin juni ervoor gekozen om de EBCT te verhogen naar 23 minuten, vergelijkbaar aan BODAC-oud. Op dat moment zijn er ruim 25.000 KBV gepasseerd. Hiermee kan worden nagegaan of de prestaties van beide BODAC's vergelijkbaar zijn.

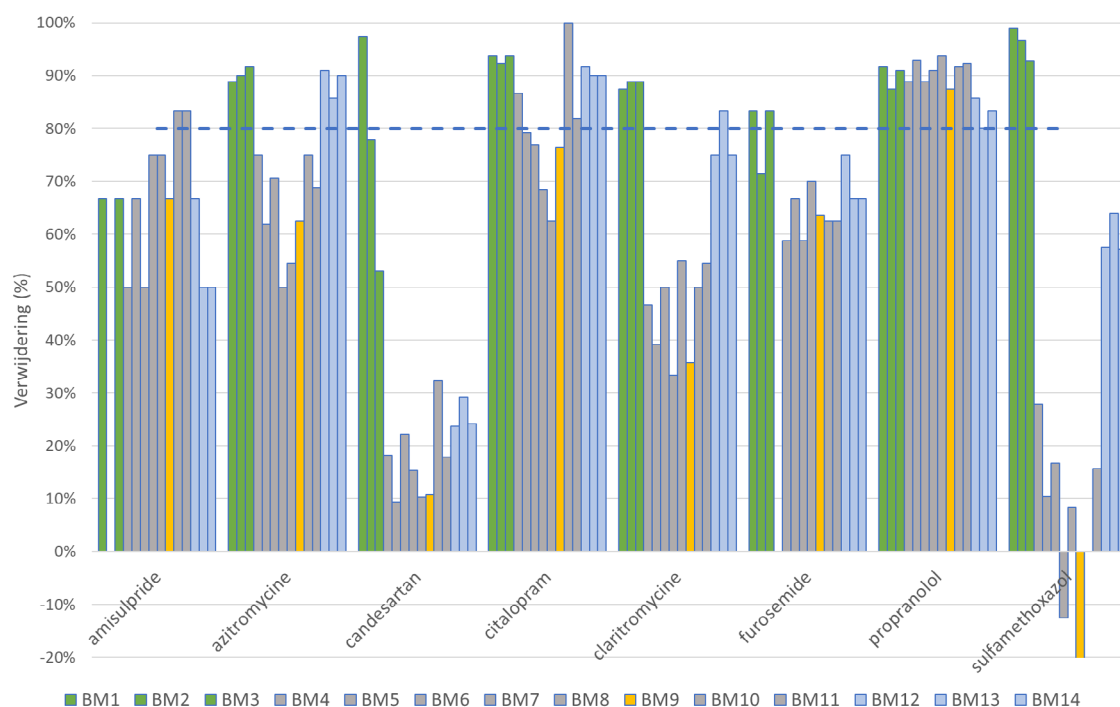
FIGUUR 3.13 GIDSSTOFFEN VERWIJDERINGSRENDEMENT T.O.V. RWZI-EFFLUENT. BM1-3 (GROEN) = EBCT 30 MIN, BM4-11 (GRIJS) = EBCT 15 MIN (UITZONDERING BM9 (GEEL) = EBCT 17 MIN), BM12-14 (BLAUW) = EBCT 23 MIN



De kandidaat gidsstoffen laten een grilliger beeld zien dan de gidsstoffen, zie Figuur 3.14. Over het algemeen werden alle stoffen, behalve amisulpride, gemiddeld > 80% verwijderd toen de EBCT 30 minuten was. Na verlaging van de EBCT naar 15 minuten is de verwijdering van nagenoeg alle parameters gedaald, behalve amisulpride en propranolol. De laatste twee laten een vergelijkbaar verwijderingsrendement zien, resp. gemiddeld 60% en 87%.

De verwijderingsrendementen zijn na verhoging van de EBCT naar 23 minuten verbeterd voor azitromycine, citalopram, claritromycine, furosemide en sulfamethoxazol. De verwijdering is na verhoging van de EBCT gemiddeld voor de top 7 gidsstoffen vergelijkbaar met BODAC oud.

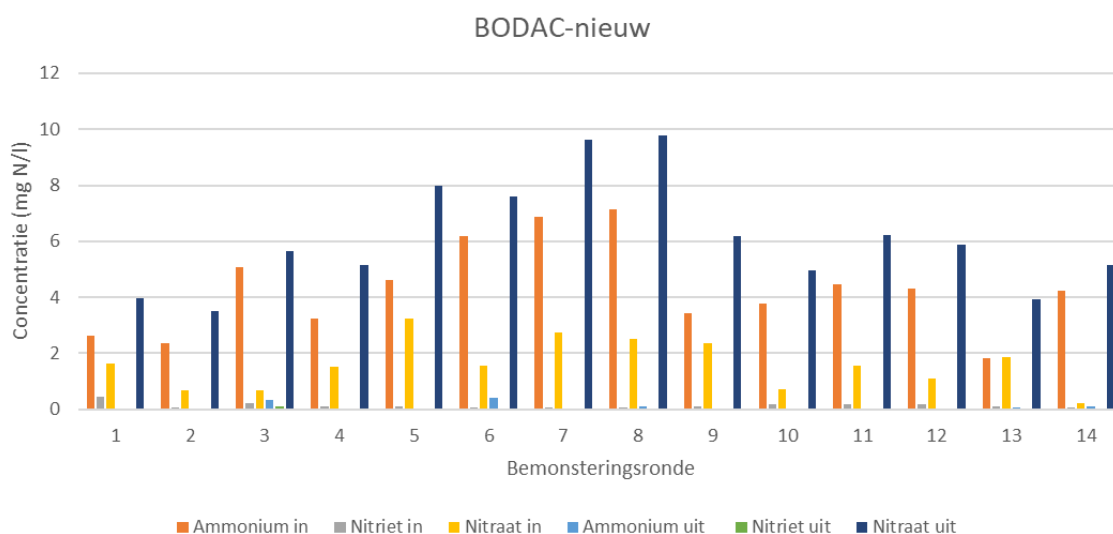
FIGUUR 3.14 KANDIDAAT GIDSSTOFFEN VERWIJDERINGSRENDEMENT T.O.V. RWZI-EFFLUENT. BM1-3 (GROEN) = EBCT 30 MIN, BM4-11 (GRIJS) = EBCT 15 MIN (UITZONDERING BM9 (GEEL) = EBCT 17 MIN), BM12-14 (BLAUW) = EBCT 23 MIN



3.4.2 ALGEMENE PARAMETERS

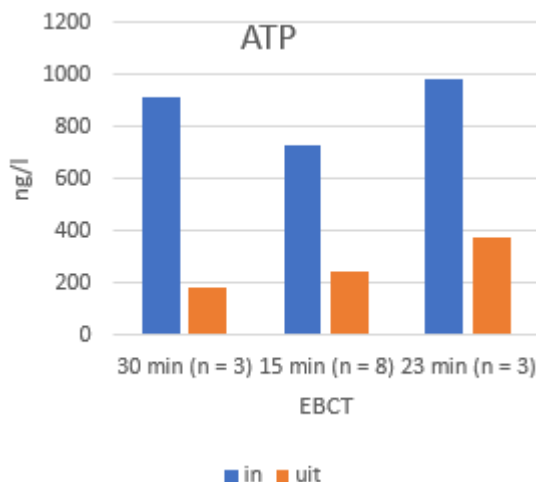
In Figuur 3.15 zijn de ammonium-, nitriet- en nitraatconcentraties weergegeven in het in- en effluent van BODAC-nieuw. Tijdens de bemonsteringen fluctueerde de ammoniumconcentraties tussen 2-7 mg N/l. De BODAC pilot kan door de geïnstalleerde zuurstofdosing goed met deze concentraties omgaan. Gemiddeld gezien wordt er 98 % van het inkomende ammonium omgezet naar nitraat. Bij bemonstering 3 (oktober) en 6 (januari) is er doorslag van ammonium, resp. 0,35 en 0,41 mg N/l. In beide gevallen is het verwijderingsrendement op dat moment 93%.

FIGUUR 3.15 AMMONIUM, NITRIET EN NITRAAT CONCENTRATIES PER BEMONSTERINGSRONDE IN- EN EFFLUENT



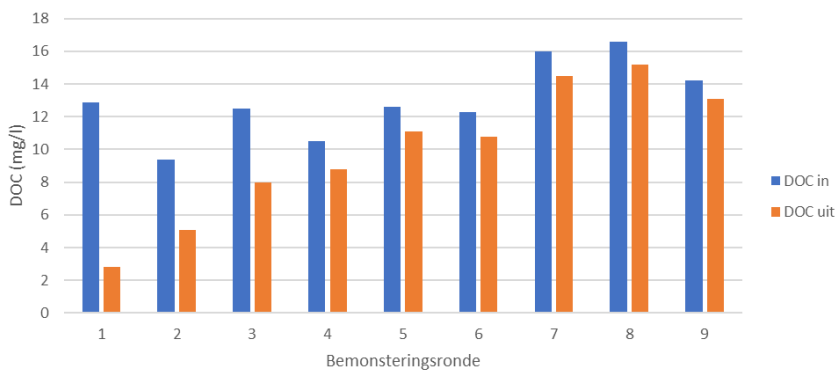
De gemiddelde ATP concentratie in het influent was 822 ng/l en deze was 69% lager in het effluent. De effluentconcentratie was gemiddeld 261 ng/l, zie Figuur 3.16 voor de ingaande en uitgaande concentraties per EBCT. Er lijkt geen verband te zijn tussen een langere EBCT en ATP verlaging.

FIGUUR 3.16 GEMIDDELTE ATP CONCENTRATIES IN- EN EFFLUENT



De DOC concentraties over het verloop van de bemonsteringsrondes zijn weergegeven in Figuur 3.17. Het proces van het beladen van de kool is goed in de figuur te zien. Over het verloop van de bemonsteringsrondes neemt de DOC verwijdering af. Bij bemonsteringsronde 5 (KBV rond 11.000) is de kool beladen met DOC en is de verwijdering gestabiliseerd rond 5-10% verwijdering.

FIGUUR 3.17 DOC CONCENTRATIES IN- EN EFFLUENT PER BEMONSTERINGSRONDE



Voor de andere parameters gold het volgende:

- De ingaande totaal fosfaat concentratie was gemiddeld 0,24 mg P/l en in het effluent 0,19 mg P/l. Dit resulteert in een gemiddelde verwijdering van 21%.
- De ingaande troebelheid was gemiddeld 1,1 FTU en in het effluent 0,43 FTU. Dit resulteert in een gemiddelde verwijdering van 61%.
- De ingaande onopgeloste bestanddelen lagen onder de rapportagegrens van 3 mg/l. Alleen tijdens de eerste bemonsteringsronde werden onopgeloste bestanddelen boven de rapportagegrens aangetroffen in het effluent, 4,7 mg/l.

De performance van BODAC-nieuw ten tijde van de pilotfase is weergegeven in Bijlage X.

3.4.3 ECOTOXICOLOGIE

De bemonsteringsronde voor ecotoxicologie en NTS is weergegeven in Tabel 10.

Het effect van BODAC nieuw op de ecotoxiciteit is vastgesteld door een zestal testen uit te voeren op in- en effluent van de pilot. De resultaten van de ecotoxiciteit staan weergegeven in Tabel 11.

TABEL 10 ONDERZOEKSPERIODE ECOTOXICOLOGIE EN NTS VAN BODAC-NIEUW

DWA/RWA condities	EBCT (min.)	Meetronde	Onderzoekperiode	Opmerkingen
DWA	15	4	28.11 - 02.12.'22	
DWA	15	7	11.02 - 15.02.'23	Alleen NTS uitgevoerd
DWA	17	9	15.04 - 19.04.'23	Alleen NTS uitgevoerd

Over het algemeen nemen alle bio assays af over de pilot. In het influent is voor alle bio assays een remmende component aanwezig, in meer of mindere mate. De Microtox, Daphniatox en ER-CALUX zijn kleiner dan 1 TU of ng/l. In het geval van GR-CALUX, PAK-CALUX en PXR-CALUX liggen de influent waarden in de orde grootte 10-100 ng/l. De verwijdering varieert per bio-assay, met name van ER-CALUX wordt de remming verlaagd in de pilot.

TABEL 11 EXOTOXICOLOGISCHE RESULTATEN

		Microtox TU	Daphniatox TU	ER-CALUX ng/l	GR-CALUX ng/l	PAK-CALUX ng/l	PXR-CALUX µg/l
BM 4	Blanco	0,031	< 0,015	0,052	< 4,4	250	40
	Influent	0,092	0,021	1,3	180	49	120
	Effluent	0,059	< 0,015	0,096	74	25	74
	% in-ef	36	100	93	59	49	38

3.4.4 NON-TARGET LCMS SCREENING

In Bijlage V zijn de NTS spreidingsgrafieken weergegeven, tezamen met een lijst van parameters die significant toe- of afnemen. Over het algemeen kan gesteld worden dat:

- bij elke NTS het aantal componenten dat afneemt significant groter is dan het aandeel wat toeneemt
- er relatief veel variatie is in hoeveelheid aangetroffen stoffen tussen de monsternames
- er meer positief ioniserende componenten worden aangetroffen dan negatief ioniserend componenten

De bekende stoffen die vaker dan eenmalig bij een bemonstering af- of toenemen zijn in Tabel 12 weergegeven.

TABEL 12 BEKENDE NIVEAU 1 STOFFEN DIE TIJDENS NTS TOENEMEN EN AFNEMEN BIJ BODAC-NIEUW

Positief ioniserend afname	Negatief ioniserend afname	Positief ioniserend toename	Negatief ioniserend toename
4-Aminoantipyrine	Xylenesulfonate	Acesulfame	-
Clarithromycin	4-Methylbenzotriazole		
Dipyridamole	4-Nitrophenol		
Fluopyram	5-Methylbenzotriazole		
Pirimicarb	Fludioxonil		
Propiconazole	Furosemide		
Prosulfocarb	Hydrochlorothiazide		
Sulfapyridine			
Thiabendazole			
Valsartan			
2-Methyl-S-benzothiazole			
4'-Hydroxydiclofenac			
4-Methylbenzotriazole			
5-Methylbenzotriazole			
Carbamazepine			
Diclofenac			
Imidacloprid			
Ketoprofen			
Mebendazole			
Naproxen			
Sotalol			
Trimethoprim			
Atenolol			
Benzotriazole			
Bisoprolol			
Carbamazepine 10,11-epoxide			
Flutolanil			
Gabapentin			
Lidocaine			
MDMA			
Metoprolol			komt 1 x voor
N,N'-Diphenylguanidine			komt 2 x voor
Propranolol			komt 3 x voor

Acesulfaam is een zeer hydrofiele zoetstof die goed oplost in water en is de enige niveau 1 stof die 1 keer is gedetecteerd als positief ioniserend toename, mogelijk door desorptie, door BODAC-nieuw.

De (bekende niveau 1) stoffen die zowel positief als negatief ioniserend afnemen bij BODAC-nieuw zijn 4- en 5-methylbenzotriazole.

3.5 AANVULLEND ONDERZOEK UITGEVOERD DOOR WETSUS

Aanvullend onderzoek uitgevoerd door Wetsus laat zien dat het beschikbaar kooloppervlak uit de full scale installatie (en BODAC oud) 70% is afgenomen ten opzichte van verse kool. Scanning electron microscopy (SEM) analyses laten zien dat zowel kool uit BODAC oud (>11 jaar looptijd; > 400.000 KBVs) als BODAC nieuw (1 maand looptijd (moment van monsternamen); ~2.500 KBVs) bedekt is met biofilm. Naast diverse micro-organismen zijn de kooldeeltjes bedekt met anorganische afzettingen (met name calcium, ijzer en mangaan), welke net als de micro-organismen na de spoelingen grotendeels aanwezig blijven op het

kool. Het is onbekend of deze laag effect heeft op de reactivatie mogelijkheden van het kool. De meest dominante groep micro-organismen die aangetroffen werden zijn betrokken bij nitrificatie (met name *Nitrospira* en *Nitrosomonadaceae*) en mangaan oxidatie (met name *Pedomicrobium* en *Hypomicrobium*), en deze processen spelen ook een rol in de verwijdering van medicijnresten.

De UF verwijderd 92% biopolymeren (> 10 kDa) en >50% ammonium, maar lijkt geen effect te hebben op de performance van de BODAC installatie wat betreft medicijnrestverwijdering. Zonder UF verwijderd BODAC-oud 5-26% van de biopolymeren, en de biologische verwijdering van ijzer (20-40%), mangaan (>90%) en CZV (15-30%) zijn vergelijkbaar met de full scale installatie, evenals de stikstof omzetting.

Tijdens de start van BODAC nieuw (720 KBVs) werden alle (kandidaat)gidsstoffen verwijderd tot onder de detectiegrens. In deze periode speelt zeer waarschijnlijk verwijdering door adsorptie de hoofdrol en verwijdering door micro-organismen een minimale rol. Ook de biologische verwijdering van ijzer (86%) en CZV (86%) was hoog. Mangaanverwijdering was 47%. Na een maand (2.500 KBV) was de verwijdering van ijzer (58%) en CZV (53%) lager terwijl mangaanverwijdering gestegen is tot 89%. Resultaten van scanning electron microscopy laten zien dat de biofilm op kooldeeltjes in dit stadium al aanwezig is in vergelijkbare hoeveelheid als op oude kooldeeltjes.

Ook is er gekeken naar het effect van zuurstofdoserig (zonder actief kool) op de verwijdering van benzotriazool, sotalol, gabapentine en irbesartan. Alleen benzotriazool en irbesartan werden bij zeer hoge zuurstofconcentraties (~62 mg O₂/l) verwijderd. Zie Bijlage XII voor een complete samenvatting van het aanvullende onderzoek uitgevoerd door Wetsus.

3.5.1 IDEEËN VOOR VERVOLGONDERZOEK

De zuurstoftoevoer wordt gestuurd op 7 mg O₂/l in het BODAC filtraat. Er is niet onderzocht hoe de prestaties zijn wanneer de zuurstoftoevoer lager is. Uit het onderzoek van Wetsus kwam naar voren dat zuurstof zonder kool alleen invloed heeft op benzotriazool en irbesartan, terwijl deze componenten in de BODAC slecht/niet verwijderd worden. Minder zuurstofdoserig kan leiden tot anaerobe zones in het filter, wat weer kan leiden tot denitrificatie en desorptie. Maar wat betreft de gidsstoffen verwijdering is het niet zeker of minder zuurstof een negatieve invloed heeft.

De BODAC pilot installatie fungeert met een trommelzeef als voorfilter vergelijkbaar als met UF. De doeken gebruikt in deze studie hadden een poriegrootte van 50 µm, mogelijk kan een nog grotere poriegrootte toegepast worden of kan de trommelzeef zelfs helemaal weggelaten worden.

De hoogte van de pilot installatie is hetzelfde als de full scale installatie, dit omdat er mogelijk stratificatie in microbiologie te vinden is. Dit is echter niet bewezen en zeer waarschijnlijk kan BODAC ook bij andere dimensies goed functioneren.

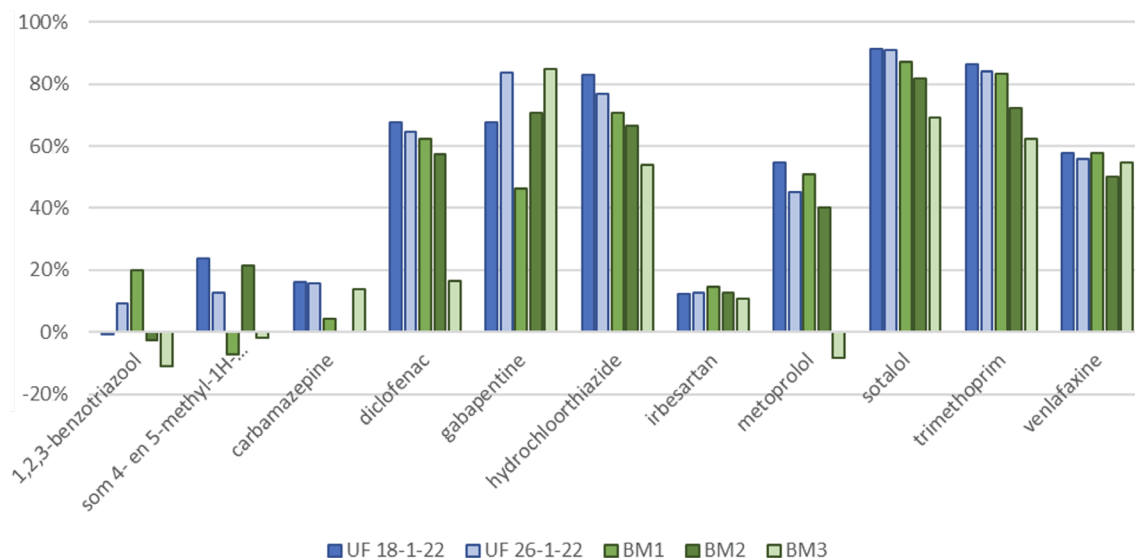
Mogelijk speelt het adsorberend vermogen van actief kool alleen tijdens de opstart een rol en zou een ander poreus substraat (zoals LECA) ook kunnen volstaan wanneer de microbiologie eenmaal aanwezig is.

3.6 DISCUSSIE

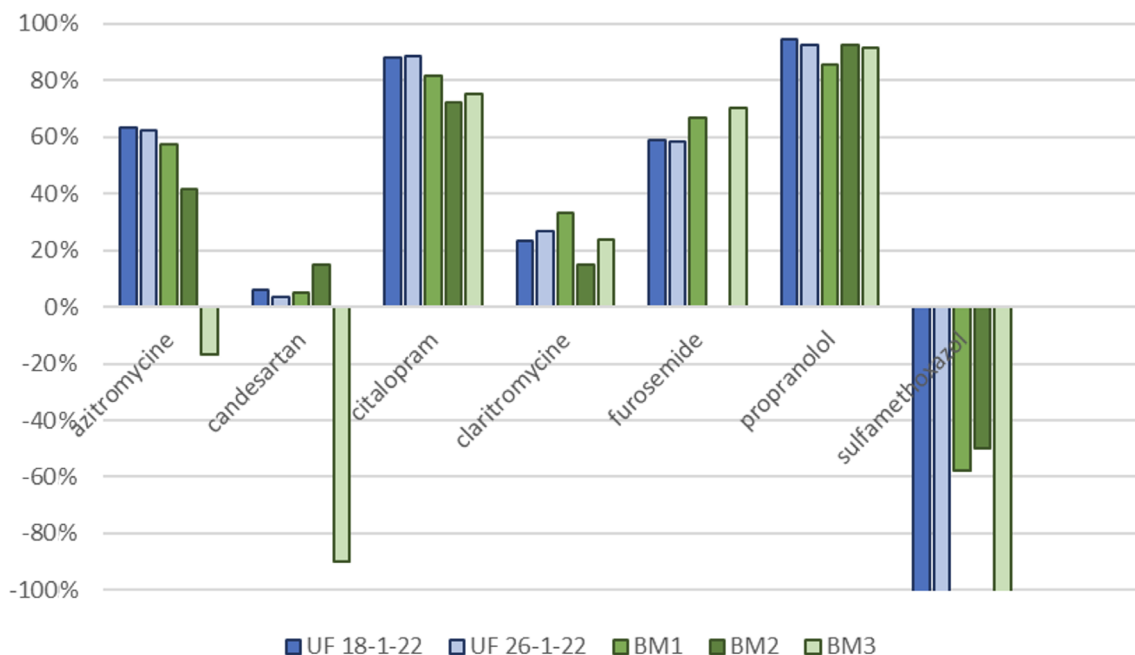
3.6.1 TROMMELZEEF VS UF

In Figuur 3.18 en Figuur 3.19 is de verwijdering van de gidsstoffen en kandidaat gidsstoffen bij een EBCT van 15 minuten met UF als voorfiltratie en trommelzeef als voorfiltratie (BM 1, 2 en 3) vergeleken. Voor een aantal stoffen lijkt het alsof de verwijdering achteruit gaat na de overgang naar de trommelzeef, maar niet voor alle stoffen. Het kan zijn dat de microbiologie een overgangperiode nodig heeft om te wennen aan de nieuwe voeding, maar ook de temperatuur (11-12 °C) en EBCT (15 minuten) waren relatief laag. Wanneer gekeken wordt naar de totale prestaties van de BODAC gevoed met trommelzeef effluent en de full scale installatie voorafgaand door UF (zie ook paragraaf 3.6.3) zijn de prestaties vergelijkbaar.

FIGUUR 3.18 GIDSSTOFFEN VERWIJDERING IN BODAC-OLD GEVOED MET UF WATER EN TROMMELZEEF WATER (BM1, 2 EN 3). DE EBCT WAS IN BEIDE GEVALLEN 15 MINUTEN.



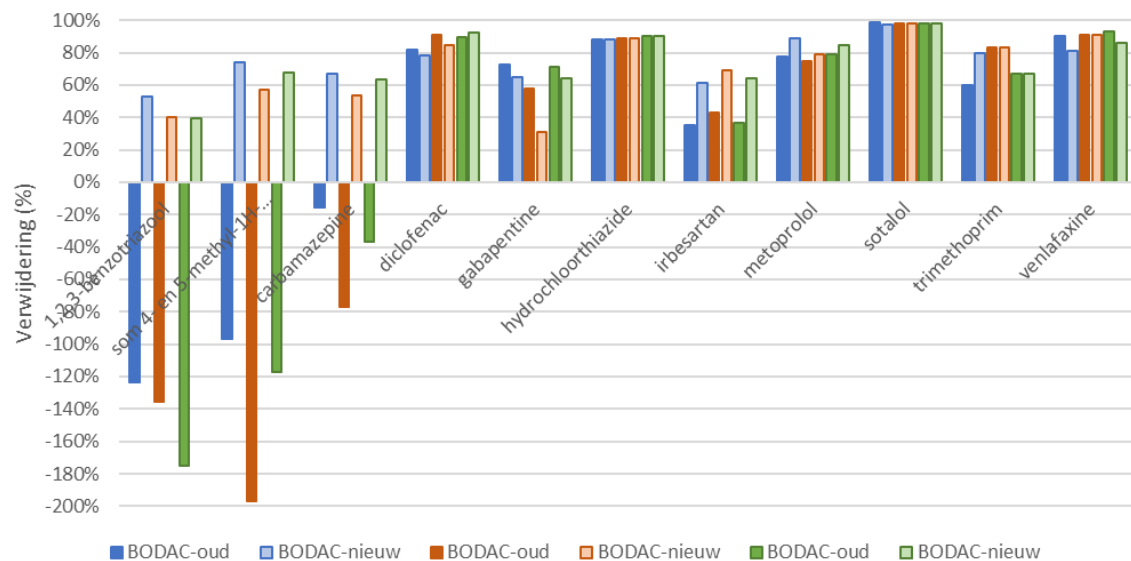
FIGUUR 3.19 KANDIDAAT GIDSSTOFFEN VERWIJDERING IN BODAC-OLD GEVOED MET UF WATER EN TROMMELZEEF WATER (BM1, 2 EN 3). DE EBCT WAS IN BEIDE GEVALLEN 15 MINUTEN



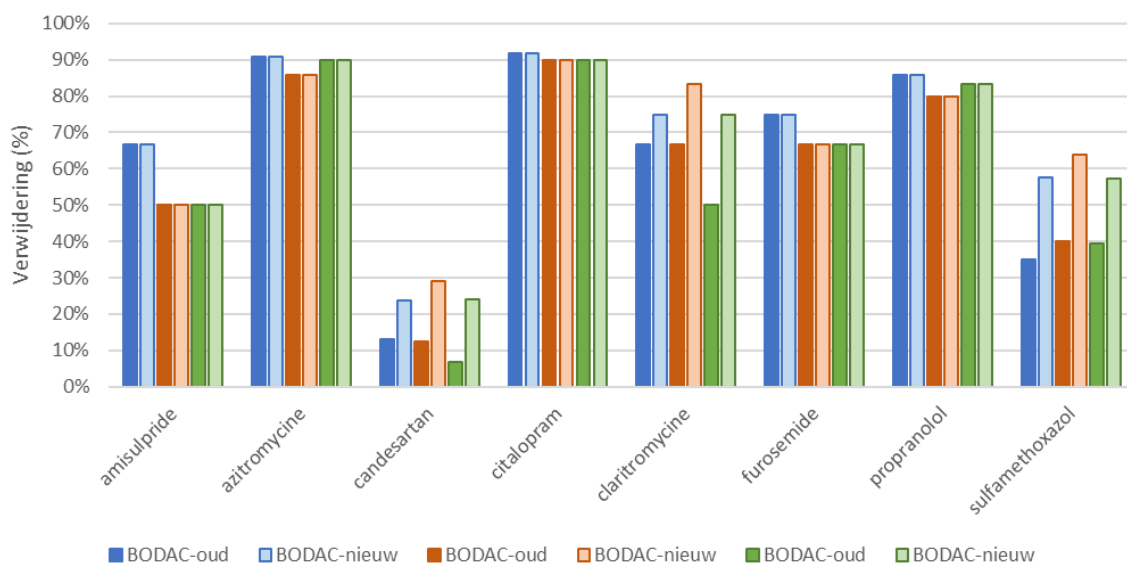
3.6.2 PRESTATIES BODAC-LOUD VS NIEUW

In Figuur 3.20 en Figuur 3.21 zijn de verwijderingsrendementen van de gidsstoffen en kandidaat gidsstoffen in BODAC-oud en BODAC-nieuw van de laatste drie bemonsteringen (EBCT 23 minuten) naast elkaar gezet. Van de meeste stoffen is de verwijdering vergelijkbaar. De gidsstoffen benzotriazool, methylbenzotriazool en carbamazepine nemen in BODAC-oud toe terwijl ze in BODAC-nieuw afnemen, zeer waarschijnlijk speelt adsorptie in BODAC-nieuw nog een rol. Ook de verwijdering van irbesartan, candesartan, claritromycine en sulfamethoxazol worden beter verwijderd in BODAC-nieuw. Naar verwachting is in BODAC-nieuw de microbiologie al vergelijkbaar met BODAC-oud, maar ondersteunt adsorptie ook nog in de verwijdering van medicijnresten.

FIGUUR 3.20 RESULTATEN GIDSSTOFFEN VERWIJDERING BODAC-LOUD VERSUS BODAC-NIEUW TIJDENS 3 BEMONSTERINGEN IN DE PERIODE JULI-AUGUSTUS 2023, WAARBIJ DE EBCT IN BEIDE INSTALLATIES 23 MINUTEN WAS. BLAUW = BM 18 (LOUD)/BM 12 (NIEUW), ROOD = BM 19 (LOUD)/BM 13 (NIEUW), GROEN = BM 20 (LOUD)/BM 14 (NIEUW)



FIGUUR 3.21 RESULTATEN KANDIDAATGIDSSTOFFEN VERWIJDERING BODAC-LOUD VERSUS BODAC-NIEUW TIJDENS 3 BEMONSTERINGEN IN DE PERIODE JULI-AUGUSTUS 2023, WAARBIJ DE EBCT IN BEIDE INSTALLATIES 23 MINUTEN WAS. BLAUW = BM 18 (LOUD)/BM 12 (NIEUW), ROOD = BM 19 (LOUD)/BM 13 (NIEUW), GROEN = BM 20 (LOUD)/BM 14 (NIEUW)

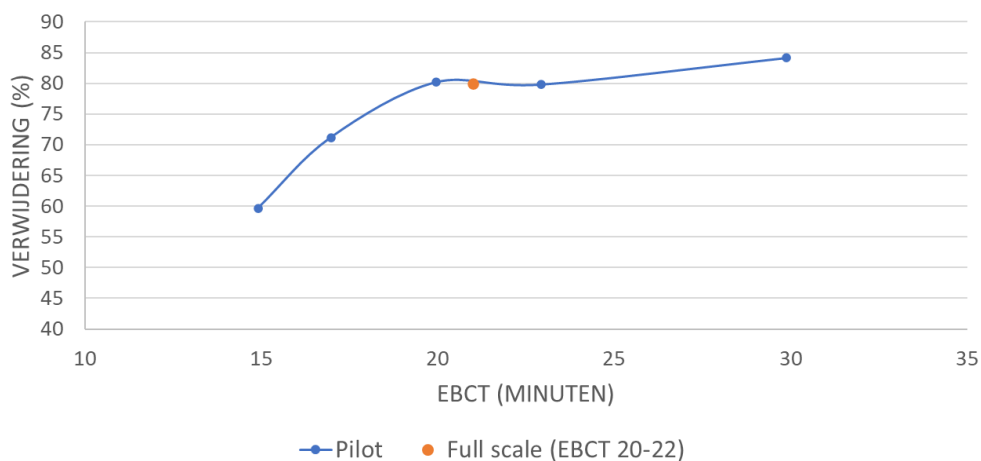


3.6.3 PRESTATIES PILOT BODAC-OUDE VS FULL SCALE

In de haalbaarheidsstudie was uitgegaan van een EBCT van 15 minuten voor de full scale BODAC. Dit is ook het ontwerpdebiet van de full scale BODAC, maar door de verlaagde vraag vanuit de klant draaide en draait de full scale BODAC op een lager debiet. Hiermee komt de EBCT van de full scale BODAC gemiddeld rond 22 minuten te liggen. Dit was ook het geval tijdens de haalbaarheidsstudie. Ook worden de full scale BODAC filters vanwege de lage vraag regelmatig op recirculatie gezet. Het effect van deze recirculatie met BODAC filtraat op verwijderingsrendementen is onbekend.

In Figuur 3.22 zijn de verschillende EBCT's van de pilot BODAC-oud met het gemiddelde verwijderingsrendement (top 7) uitgezet tegen het gemiddelde verwijderingsrendement (top 7) van de full scale bij een EBCT van 20-22 minuten. Wat opvalt is dat de full scale niet sterk afwijkt van de pilot. De prestaties zijn vergelijkbaar.

FIGUUR 3.22 GEMIDDELDE VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE FULL SCALE EN BODAC-OUDE, IN HET GEVAL VAN DE PILOT BIJ VERSCHILLENDE EBCT



4

OPERATIONELE ASPECTEN

4.1 TROMMELZEEF

Het doel van de trommelzeef is het beschermen van het actief kool tegen aanvoer van grotere deeltjes vanuit de RWZI. De trommelzeef is van fabrikant Plectrum en is ontworpen om vloeistoffen continu te filteren. Het RWZI effluent wordt vanuit de put (overloop nabezink-tank) gevoed aan de trommelzeef. Het is een roterende trommel, uitgerust met een zeefdoek van 50 µm. Als het water het doek is gepasseerd komt het in de buffertank. De trommelzeef is voorzien van een druksensor en niveaubewaking waarop automatisch gespoeld wordt. In Bijlage XI zijn de specificaties, instellingen en overige informatie over de trommelzeef te vinden.

4.2 SPOELING PILOT

De pilots worden teruggespoeld op tijd- of drukverschil over het filterbed. De ingestelde looptijd van BODAC-oud is sinds de start van de pilot gelijk geweest aan de full scale. In de zomermaanden staat de looptijd op 48 uur en in de wintermaanden staat deze ingesteld op 72 uur. Dit heeft te maken met biologische groei in het filter, naar aanleiding van de verhoogde watertemperatuur.

BODAC-nieuw is sinds de opstart ingesteld op 48 uur en in de wintermaanden niet verlengd. Op 2 mei 2023 is de looptijd van BODAC-nieuw verkort omdat BODAC-nieuw met een hoger debiet werd bedreven en verhoudingsgewijs frequent op verschildruk eerder ging spoelen. Om de belasting per looptijd gelijk te trekken met BODAC-oud is ervoor gekozen om beide pilots in te stellen op een gelijke belasting per spoeling. Hiermee is de looptijd tussen spoelingen bij BODAC-nieuw verkort naar 32 uur (i.p.v. 48 uur) bij een EBCT van 15 minuten. Na aanpassing van de EBCT naar 23 minuten zijn de looptijden weer gelijk met BODAC-oud.

Het spoelprogramma van beide pilots is weergegeven in Tabel 13. Er wordt om en om gespoeld met water en lucht. Dit is niet gelijktijdig om te voorkomen dat er kool wordt afgevoerd via het spoelwater. Door de biologische groei in het bed is het nodig om met lucht te spoelen om voldoende verwijdering van biologie te bewerkstelligen tijdens een spoeling.

TABEL 13

SPOELPROGRAMMA VAN DE BODAC PILOTS

Parameter	Waarde	Eenheid
Snelheid spoelwater 1	30	m/h
Snelheid spoellucht 1	30	% ventilator snelheid
Snelheid spoelwater 2	30	m/h
Snelheid spoellucht 2	30	% ventilator snelheid
Tijd spoelwater 1	8	minuten
Tijd spoellucht 1	8	minuten
Tijd spoelwater 2	10	minuten
Tijd spoellucht 2	8	minuten

TABEL 14 FILTRATIE-INSTELLINGEN VAN DE BODAC PILOTS

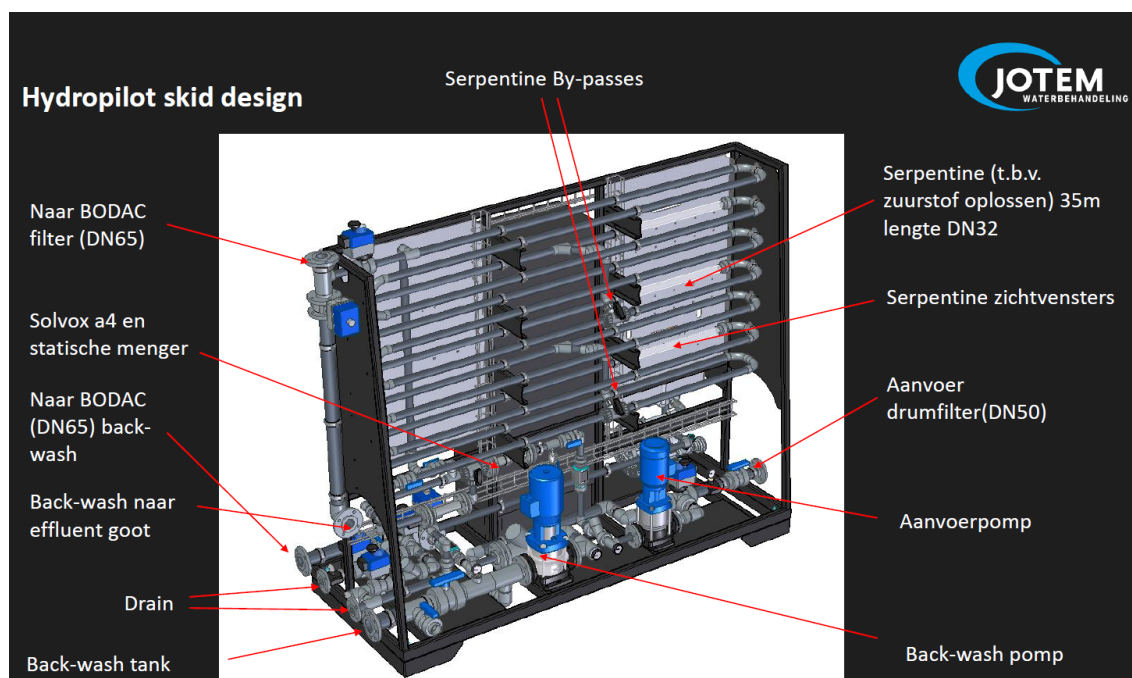
Parameter	Waarde	Eenheid
Filtratiesnelheid	3-6,5	m/h
Filtratiedebiet	2,5-5	m ³ /h
Recirculatie debiet	2,5	m ³ /h
Looptijd	48 (zomer) en 72 (winter)	uren
EBCT	15-30	minuten
Setpoint druk	20	mWk
dP drukverschil terugspoel trigger	2	mWk
Spoelwaterverlies	± 5	%

Het spoelwater wordt uit de filtraatbuffer onttrokken van de desbetreffende pilot. Hiermee wordt voorkomen dat er kruisbestuiving (en daarmee enting van biologie) optreedt.

4.3 ZUURSTOFDOSERING

Het zuurstof wordt via een zuurstofdoseringsysteem ingebracht in de voeding van de BODAC pilots. Vanuit de gasflessen wordt het gas via een Venturi op druk in de voeding gedrukt. Er is overdruk (1-1,5 bar) nodig om voldoende zuurstof op te kunnen lossen in het water. Door de lange verblijftijd in de aanvoer is de menging zo representatief mogelijk, Figuur 4.1.

FIGUUR 4.1 ZUURSTOFDOSERING IN DE AANVOER VAN DE BODAC PILOTS



Ondanks het representatieve ontwerp wordt er nog relatief veel zuurstof afgeblazen boven het filter. Op basis van de massabalans zuurstof treedt er een verlies van 35-50% zuurstof op in de BODAC pilots. Ook bij de full scale BODAC treedt verlies op, door schaalgrootte is het verlies daar ongeveer 10%. Bij een full scale-installatie zal de zuurstofdoseringsysteem efficiënter worden ingericht.

Er zal in de toekomst gekeken worden of aanvullende manieren van zuurstof/lucht inbreng voldoende is voor ammoniumomzetting en voorkoming van zuurstofloosheid in de BODAC, zodat deze niet onder overdruk bedreven hoeft te worden.

5

INPASSING IN DE NEDERLANDSE ZUIVERINGSPRAKTIJK

In dit hoofdstuk wordt de pilot omgerekend naar duurzaamheid en kosten voor een 100.000 i.e. standaardzuivering.

5.1 VERWIJDERINGSRENDEMENT EN ONTWERPDEBIET

Op basis van de resultaten vanuit het pilotonderzoek wordt de EBCT van 15 minuten, vanuit de haalbaarheidsstudie, niet als ontwerp EBCT meegenomen. De EBCT van 15 minuten is niet toereikend voor een verwijderingsrendement van jaargemiddeld 80% van de top 7 t.o.v. het RWZI effluent.

De verwachting is dat een EBCT van 23 minuten jaargemiddeld toereikend is voor een verwijdering van ongeveer 80% van de top 7 gidsstoffen t.o.v. het RWZI effluent en voor de gehele zuivering een jaargemiddeld rendement van 75%. Dit is volgens de STOWA-aanname. Dit resultaat zorgt ervoor dat t.o.v. de haalbaarheidsstudie een grotere hoeveelheid kool nodig is voor dezelfde verwijdering. Dit betekent een uitbreiding van 260 naar 400 m³ kool voor een ontwerpdebiet van 1.040 m³/u en een jaardebiet behandeld water van 5.365.500 m³.

5.2 CO₂ FOOTPRINT

Voor het berekenen van de CO₂ footprint van BODAC is gebruik gemaakt van het CO₂ footprint model voor het zuiveren van communaal afvalwater in Nederland conform STOWA 2012-06. Het model gaat specifiek in op de verwijdering van microverontreinigingen.

De actief kool in de full scale (en gevuld in BODAC oud) heeft een standtijd van 12 jaar. De kool laat tot op heden geen slijtage zien en heeft een vergelijkbare grootte verdeling zoals bij opstart. Het kool in BODAC nieuw is gevuld met hetzelfde type kool. De voorzuivering heeft beperkte invloed op de slijtage van het kool en de prestaties van de filters zijn vergelijkbaar met de kool in de full scale installatie. In de CO₂ footprint wordt gerekend met een levensduur van 12 jaar zoals nu gehaald in de full scale installatie, maar naar verwachting heeft de kool een nog langere levensduur.

De werking van de actief kool in de BODAC is niet gericht op adsorptie. De kool fungeert als drager voor biologische omzetting/ degradatie, behalve in de opstartfase. In deze hoedanigheid is er geen toevoeging van actief kool nodig over de looptijd en ook hoeft het niet gereactiveerd te worden.

Er zijn een aantal kanttekeningen/aannames bij de CO₂ footprint berekening, te noemen:

- De actief kool heeft een levensduur van op zijn minst 12 jaar. De benodigde hoeveelheid kool uitgesmeerd over 12 jaar.
- Er is uitgegaan van een zuurstofverbruik op basis van een ammoniumconcentratie

van jaargemiddeld 5 mg/l. Het rendement van de zuurstofinbreng is voor de pilot rond 50-65%. In de full scale ligt dit rendement op 90%. Dit heeft m.n. te maken met overdimensionering bij de pilot. Het rendement van de full scale is aangehouden in de CO₂ footprint berekening.

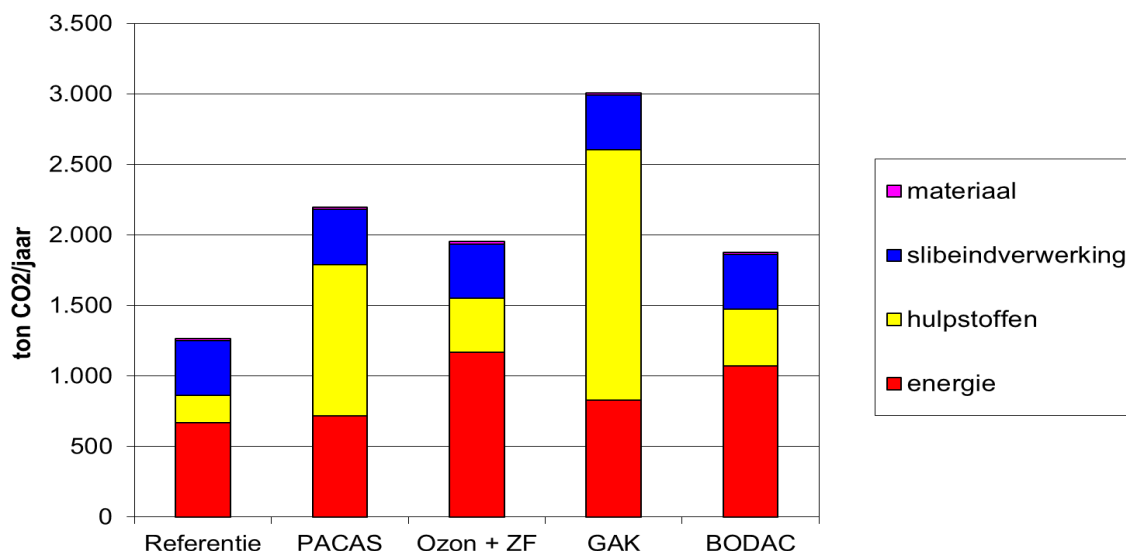
- Het energieverbruik van de trommelzeven is gebaseerd op de DHV kostenstandaard, zoals deze ook meegenomen was in de haalbaarheidsstudie.

In Figuur 5.1 staat de CO₂ footprint van de totale RWZI inclusief verwijdering micro's weergegeven. De BODAC is op basis van CO₂ footprint competitief met de andere technieken. Dit heeft te maken met het robuuste/eenvoudige concept van BODAC, waarbij reactivatie sinds opstart nog niet nodig is geweest (12 jaar). Daarnaast zijn de zuurstofdoserings en het op druk houden van de BODAC in hoofdzaak de grootste toevoegingen in energie.

Er wordt door de BODAC in totaal 114 g CO₂/m³ behandeld water bijgedragen aan de CO₂ footprint en komt daarmee uit op een totaal (RWZI en BODAC) van 1.878 ton CO₂/jaar. Voor de andere drie technieken varieert dit tussen 1.953-3.009 ton CO₂/jaar. De grootste bijdrage van BODAC wordt geleverd door energie (57% van het totaal), gevolgd door hulpstoffen (actief kool) en slibeindverwerking (beiden 21%) en materiaal (1%). In de CO₂ footprint is ook de voorzuivering met trommelzeef meegenomen. Hierdoor ligt het spoelwaterverlies van de BODAC lager dan de 10% meegenomen in de STOWA tool. In werkelijkheid ligt deze op 3-5%.

In de haalbaarheidsstudie was ingeschat dat de CO₂ footprint tussen 95 en 108 g CO₂ per m³ geproduceerd water kwam te liggen (WLN, 2020). Het effect van meer kool, t.o.v. alle andere bijdrages aan de CO₂ footprint t.o.v. wat er in de haalbaarheidsstudie is meegenomen, is echter beperkt en wordt verdeeld over de volledige looptijd van 12 jaar.

FIGUUR 5.1 CO₂ FOOTPRINT TOTALE RWZI INCLUSIEF VERWIJDERING MICRO'S DOORGEREKEND VOOR EEN STANDAARDZUIVERING 100.000 I.E.



Zoals eerder genoemd is de verwachting dat de BODAC een langere levensduur dan 12 jaar zal hebben, omdat er nog geen tekenen zijn van een verlaagde prestatie of slijtage aan het kool. Voor de volledigheid wordt er gerekend met een levensduur van de helft van de huidige standtijd, te noemen 6 jaar, en een levensduur van 20 jaar. Zodoende wordt duidelijk wat het effect van eerder reactiveren is op de CO₂ footprint. In het geval van een standtijd van 6 jaar is reactiveren en aanvullen met 20% kool meegenomen. In het geval van een standtijd van

20 jaar is de benodigde hoeveelheid kool verdeeld over 20 jaar. De resultaten zijn:

- Effect bij standtijd 6 jaar; de totale CO₂ footprint van de BODAC is dan 144 g CO₂/m³. Dit is 26% meer dan bij een standtijd van 12 jaar.
- Effect bij standtijd 20 jaar; de totale CO₂ footprint van BODAC is dan 102 g CO₂/m³. Dit is 11% minder dan bij een standtijd van 12 jaar.

Er is voor aanvulling 20% kool meegenomen na reactivatie omdat het kool significant is bedekt met een biofilm en de verwachting is dat bij reactivatie hierdoor een deel verlies van kool optreedt.

5.3 KOSTENBEREKENING

De kostenberekening is gebaseerd op het prijspeil van 2018 en wijkt daarmee niet sterk af van de haalbaarheidsstudie. Om die reden is de informatie uit de haalbaarheidsstudie gebruikt als basis van voor de kostenberekening (de Vogel, et al., 2020). De enige wijziging is de grootte van de koolfilters en de spoelwaterbuffer.

De uitgangspunten zijn:

- Kapitaallasten zijn berekend op basis van lineaire afschrijving over 30 jaar voor C en 15 jaar voor W/E en 5 jaar voor PA, rente van 4% en inflatie van 1,5%;
- De jaarlijkse onderhoudskosten zijn bepaald op basis van een percentage over de bouwkosten per discipline (C, W/E/PA) inclusief onvolledigheid/opslagen. Civiël: 0,5% en W/E/PA: 3%;
- De exploitatiekosten zijn gebaseerd op de eerdergenoemde verbruiken.
- Personeelskosten: € 50.000 per fte. Uit de praktijk blijkt dat voor de BODAC-filters ca. 0,3 fte benodigd is;
- Elektriciteit: € 0,10/kWh;
- Vloeibare zuurstof: € 0,20/kg;
- Actief kool (granulair): € 1.200/m³;
- Verwerking van spoelwater op de RWZI: € 0,01/m³.
- Jaar volume standaard zuivering: 5.365.500 m³/jaar en ontwerpdebiet van 1.040 m³/u.

De stichtingskosten, en de doorvertaling naar CAPEX, samen met aanvullende jaarkosten zijn weergegeven in Tabel 15. De stichtingskosten komen afgerond uit op € 8.616.000,- en daarmee de CAPEX (afschrijving en rente) jaarlijks op € 1.200.000,-. Samen met de jaarlijkse aanvullende kosten vertaalt dit zich in € 0,25/m³. Dit is het geval bij een standtijd van 12 jaar voor het actief kool.

TABEL 15 STICHTINGSKOSTEN EN OPERATIONELE KOSTEN BODAC DOORGEREKEND VOOR STANDAARDZUIVERING 100.000 I.E.

BODAC				Stichtingskosten	CAPEX (afschrijving en rente)
Trommelzeef				€ 881.763	€ 115.653
Pompfasen				€ 1.244.319	€ 230.236
Zuurstof dosering	20 mg/l	max		€ 134.614	€ 67.386
Drukfiltratie	10 m/u			€ 4.150.523	€ 512.835
Actief kool	Standtijd 12 jaar	23 min	398 m ³	€ 478.400	€ 39.867
Spoelwaterbuffer	400 m ³			€ 230.929	€ 25.511
Totaal				€ 7.120.548	€ 994.170
Incl. BTW (afgerond)				€ 8.616.000	€ 1.200.000
Jaarlijkse aanvullende kosten					
Dosering pure zuurstof				20 g/m ³	€ 23.847
Energieverbruik				638.750 kWh	€ 63.875
Toevoeging actief kool in afgelopen 12 jaar				0 m ³	€ -
Jaarlijkse onderhoudskosten	Civiel				€ 12.924
	W/E/PA				€ 38.771
Personeelskosten				0,3 FTE	€ 15.000
Spoelwaterverwerking				5% verlies	€ 2.683
Totaal jaarlijks					€ 1.356.800
					0,25 €/m³

In de kostenberekening is de voorgeschakelde trommelzeef ook meegenomen.

Voor de volledigheid zijn, net zoals bij de CO₂ footprint, ook de kosten voor een standtijd van 6 en 20 jaar van het actief kool meegenomen.

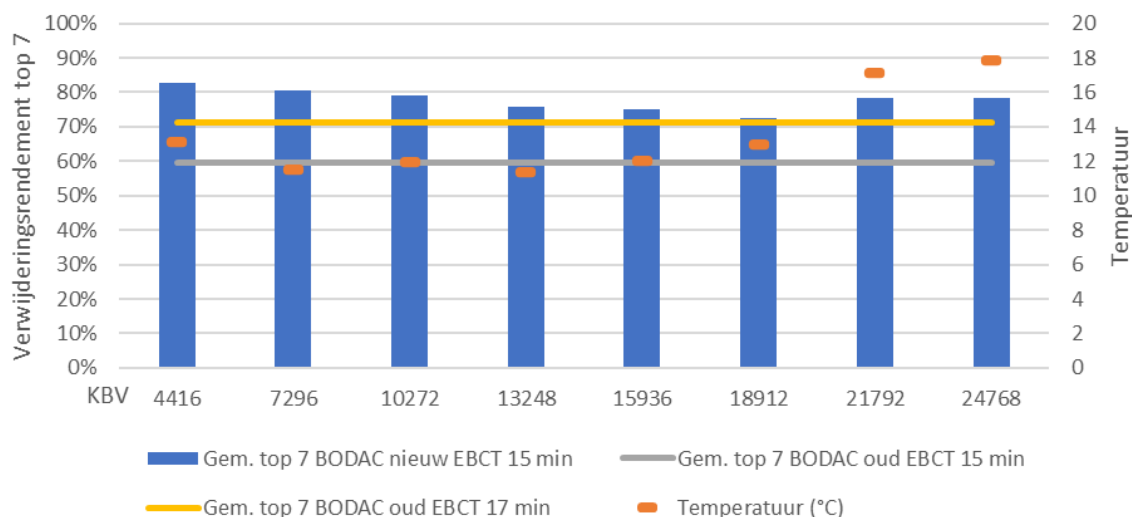
- Effect bij standtijd **6 jaar**: eenmalige aanschaf actief kool wordt verdeeld over 6 jaar i.p.v. 12 jaar en 20% verlies bij reactivatie zorgt voor een extra toevoeging van 80 m³ actief kool. De jaarlijkse kosten voor kool nemen toe van € 40.000,- naar € 96.000,-. De jaarlijkse kosten voor de BODAC worden dan **0,27 €/m³**.
- Effect bij standtijd **20 jaar**: eenmalige aanschaf actief kool wordt verdeeld over 20 jaar i.p.v. 12 jaar. De jaarlijkse kosten voor kool nemen af van € 40.000,- naar € 20.000,-. De jaarlijkse kosten voor de BODAC blijven **0,25 €/m³**.

5.4 GEVOELIGHEIDSANALYSE OPSTART BODAC

In de opstartperiode variëren de verwijderingsrendementen omdat de verwijdering middels adsorptie overgaat naar biologische omzetting. BODAC nieuw heeft vanaf 4.500 KBV geleidelijk een afname in verwijderingsrendementen van de top 7 van 11 gidsstoffen, doordat adsorptie afneemt. Het laagste punt wordt bereikt net iets voor 20.000 KBV. Biologische omzetting start rond 20.000 KBV en daarna nemen de verwijderingsrendementen van de top 7 van 11 gidsstoffen toe. Dit is te zien in Figuur 5.2.

Het minimale verwijderingsrendement van BODAC nieuw is 73% bij een EBCT van 15 minuten. Ondanks dat het niet ondersteund kan worden met analysedata, wordt verwacht dat bij een EBCT van 23 minuten het verwijderingsrendement beperkt terugloopt en hoger zal blijven dan 73%. Het gemiddelde verwijderingsrendement van de top 7 van 11 gidsstoffen is weergegeven bij een EBCT van 15 en 17 minuten in BODAC oud. Het verwijderingsrendement van BODAC nieuw ligt hoger bij dezelfde EBCT dan bij BODAC oud. De verwachting is dat dit te maken heeft met de combinatie van adsorptie én biologische omzetting. Maar omdat het tijdens het pilottesten niet is bewezen is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

FIGUUR 5.2 VERWIJDERINGSRENDEMENT BODAC NIEUW (EBCT 15 MINUTEN)



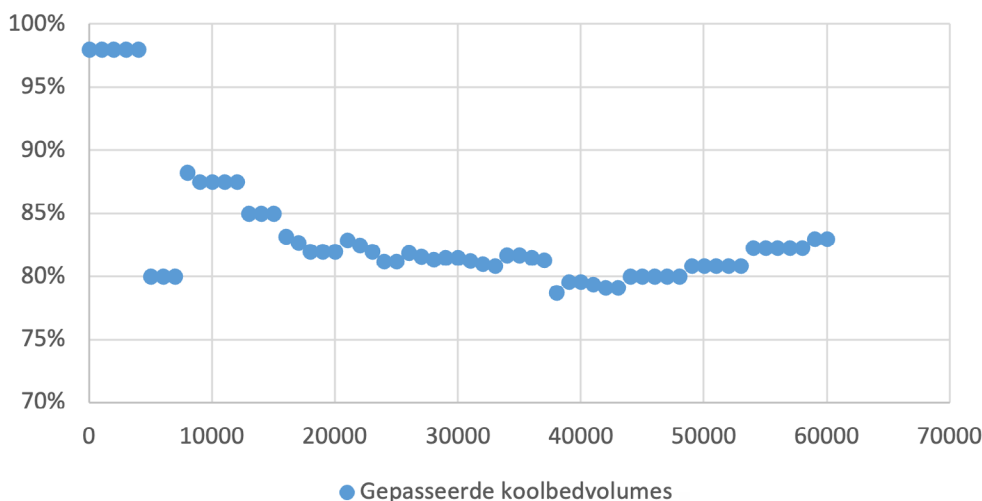
BENODIGD AANTAL FILTERS

In Figuur 5.3 is het opstarten van de filters geoptimaliseerd zodat de tijd dat de verwijderingsrendementen lager dan 80% zijn zo kort mogelijk is. Meest optimaal is opstarten van filter 1 en na 8.000 KBV filter 2 en navolgend alle andere filters elke 4.000 KBV's. In dit geval is er uitgegaan van 7 filters met een koolvolume van 57 m³. Dit komt overeen met de BODAC nafilters in de full scale installatie van de UPW in Emmen. Als er geen verbetering plaatsvindt van het verwijderingsrendement bij het verhogen van de EBCT totdat het filter biologisch stabiel is, dan in het ergste geval is er een korte tijd van een verlaagd verwijderingsrendement (79%) van ongeveer een passage van 6.000 KBV. In tijd komt dit overeen met 6.000*23 min (EBCT) = 95 dagen.

Het effect van het opstarten van 1 filter als de andere 6 filters normaal bedrijf voeren met een stabiele biologische omzetting, dan neemt het verwijderingsrendement gemiddeld met 1% af. Dit houdt 17.000 KBV aan. Dit vertaald zich in 271 dagen. Als elk 12 jaar 1 filter opnieuw opgestart dient te worden, dan vindt dit elke 2 jaar plaats. Ook als de reactivatie elke 6 jaar moet plaatsvinden, hebben de opstartende filters geen overlap en is de maximale afname ook 1%.

Als standaard verwijderingsrendement is voor de berekening uitgegaan van 83%. Dit is de laatst gemeten waarde van BODAC nieuw. BODAC oud varieert bij een EBCT van 23 minuten tussen 76-84%. Er is bij deze berekening geen rekening gehouden met het verwachte positieve effect van een hogere EBCT van 23 minuten op het verwijderingsrendement van BODAC nieuw.

FIGUUR 5.3 GEPASSEERDE KOOLBEDVOLUMES NA START FILTER 1 EN HET TOTALE VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN ALLE FILTERS IN BEDRIJF IN KOOLBEDVOLUMES GEPASSEERD NA START FILTER 1



5.5 SAMENVATTING EN VERGELIJKING KOSTEN EN CO₂ FOOTPRINT

De kosten en CO₂ footprint van de verschillende referentie technieken en BODAC zijn in Tabel 16 met de verwijderingsrendementen weergegeven.

TABEL 16 SAMENVATTING EN VERGELIJKING KOSTEN EN CO₂ FOOTPRINT

	Eenheid	PACAS	Ozon + ZF	GAK	BODAC
CO ₂ footprint Technologie	g CO ₂ /m ³ ¹	122	128	325	114
CO ₂ footprint RWZI + technologie	ton CO ₂ /jr	2.198	1.953	3.009	1.878
Kosten	€/m ³ ¹	0,05	0,17	0,26	0,25
Verwijderingsrendement ¹	% ²	70-75	80-85	80-85	77-82

¹ per m³ behandeld rioolwater

² Verwijderingsrendement methode 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 24 of 48h debiets- of tijdsproportioneel monster, waarbij rekening is gehouden met verblijftijd van het water in de RWZI. Hierbij is het rendement bepaald op basis van het totale effluent (nageschakelde behandeling inclusief bypass) ten opzichte van het influent van de RWZI.

5.6 EU WETGEVING RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER

Door de EU is een voorstel gedaan voor een revisie van de Richtlijn Stedelijk Afvalwater¹. 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 17. 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.

¹ Proposal for a revised Urban Wastewater Treatment Directive (europa.eu)

TABEL 17

DE 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-benzotriazool
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 verwijderingsrendement dient minimaal 80% te bedragen. Volgens de Nederlandse richtlijnen van het Ministerie van IenW dient het verwijderingsrendement 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%.

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 18. Deze zijn gelijk voor de concept EU-gidsstoffen en de Nederlandse gidsstoffen voor de nageschakelde verwijderingsrendementen 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 (Mulder, 2022). 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 afgevallen als Nederlandse gidsstof vanwege een mogelijk te hoog verwijderingsrendement door het actiefslib (>50%) (Mulder, 2021). 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 18 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 actiefslibrendement 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.

Tabel 18 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) filtratie² 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 kan zeker niet als absolute getallen worden gebruikt.

TABEL 18 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN, 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)	BODAC
Instelling	0,7 g O ₃ /g DOC	15-20 mg PAK/l	EBCT (verblijftijd): 30 min; standtijd 6 maanden	EBCT: 23 minuten, standtijd 12 jaar
Nageschakeld verwijderings-rendement (%)	80-90%	nvt	80-90%	75 – 84 %
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%	72 – 80%
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, Carbamazepine 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	Candesartan Citalopram Diclofenac Hydrochlorothiazide Irbesartan Venlafaxine
Overall verwijderings-rendement (%) volgens rekenregels bijdrageregeling Ministerie IenW en IPMV (7 van de 11)	80-85%	70-80%	80-85%	77 – 82%
Gekozen gidsstoffen NL (7 van de 11)	Carbamazepine, 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	Diclofenac Gabapentine Hydrochlorothiazide Metoprolol Sotalol Trimethoprim Venlafaxine

² Op basis van expert judgement Mirabella Mulder – Mirabella Mulder Waste Water Management, 4 augustus 2023

6

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 CONCLUSIES

Wat zijn de verwijderingsrendementen voor medicijnresten (gidsstoffen) indien BODAC, met een contacttijd van 16 minuten, niet wordt voorafgegaan door ultrafiltratie, maar door een eenvoudig zelfreinigende trommelzeef?

BODAC presteert met een trommelzeef als voorzuivering naar behoren en blijkt daarmee zonder UF als voorzuivering een robuuste zuiveringstechniek te zijn voor het verwijderen van organische microverontreinigingen. Tijdens de testperiode heeft de BODAC robuust gedraaid, met een beperkte hoeveelheid storingen. De zuurstofloze periodes n.a.v. een ammoniumpiek uitgaande RWZI zijn beperkt tot een aantal uur en hebben geen merkbaar effect op de verwijderingsrendementen van de medicijn(resten).

Een contacttijd/EBCT van 15 minuten is niet voldoende om jaargemiddeld een verwijderingsrendement van > 80% over de pilot te behalen. De full scale draait ondanks het ontwerpuitgangspunt van EBCT 15 min ook met een lagere belasting van 22 minuten. Een EBCT van 23 minuten bleek in de pilots voldoende voor > 80% verwijdering bij temperaturen > 18 °C. Bij temperaturen onder 18 °C ligt het verwijderingsrendement nageschakeld net onder 80%, 78-79%. Het overall verwijderingsrendement volgens de rekenregels van de bijdrageregeling Ministerie IenW en IPMV is hiermee 77-82% en daarmee ruim voldoende.

Wanneer de BODAC voorafgegaan wordt door een eenvoudige trommelzeef zijn de verwijderingsprestaties voor medicijnen vergelijkbaar aan die van een BODAC voorafgegaan door ultrafiltratie.

Hoe verloopt de verwijdering van medicijnresten ((kandidaat)gidsstoffen) bij de opstart van het BODAC concept? Is er sprake van een (tijdelijke) achteruitgang in verwijderingsrendement nadat de actieve kool verzadigd is met DOC, of blijft de verwijdering op peil? Hoe verhouden zich de verwijderingsrendementen bij 'jonge kool' (< 1 jaar oud) ten opzichte van 'oude kool' (> 10 jaar oud)?

De gidsstoffen worden bij toepassing van nieuwe, verse kool met name verwijderd door adsorptie aan de kool. Na ca. 10.000 KBV was het actief kool verzadigd met DOC. Na ca. 25.000 KBV werd biologische omzetting gezien. Vanaf de bemonstering in april (BM7, 14.500 KBV) vlak het verwijderingsrendement voor de gidsstoffen af en rond 25.000 KBV is het verwijderingsrendement in BODAC-nieuw stabiel. De EBCT is vanaf dat moment gelijkgetrokken met BODAC-oud (23 minuten). De verwijderingsrendementen zijn op dat moment gelijk voor beide BODAC, dus de verwijderingsrendementen van 'jonge kool' (< 1 jaar oud) en 'oude kool' (> 10 jaar oud) zijn vergelijkbaar.

Opvallend is dat de top 7 gidsstoffen, die het beste worden verwijderd in BODAC-oud, stabiel is. In BODAC-nieuw wisselt de beste 7 gidsstoffen verwijdering nog en is de BODAC meer onderhevig aan veranderingen in de samenstelling van het ruwwater. Dit doet vermoeden dat ondanks dat de biologische omzetting in BODAC-nieuw op gang is, de biologische stabiliteit

in BODAC-oud groter is. Aanvullend worden benzotriazolen nog goed verwijderd in BODAC-nieuw en gedesorbeerd in BODAC-oud. Dit doet vermoeden dat ondanks de biologische omzetting in BODAC-nieuw adsorptie voor specifieke parameters nog een rol speelt.

6.1.1 ALGEMENE CONCLUSIES OP BASIS VAN PRESTATIES

BODAC in combinatie met een trommelzeef is een geschikt en robuust systeem om als nabe-handeling toe te passen op RWZI effluent met als doel medicijnverwijdering. Als de BODAC volledig in evenwicht is, is de verwijdering van de top 7 gidsstoffen stabiel met altijd dezelfde gidsstoffen die onder de top 7 vallen, namelijk: diclofenac, gabapentine, hydrochloorthiazide, metropolol, sotalol, trimethoprim en venlafaxine.

De NTS resultaten laten zien dat er meer stoffen verwijderd worden in BODAC dan gevormd worden of desorberen. Daarnaast suggereren de bio-assay resultaten dat er geen schadelijke stoffen in grote hoeveelheden worden gevormd. Gezien het gegeven dat de ammoniumdoor-slag in BODAC beperkt was (maximaal 0,35 mg N/l bij pieken van 11 mg N/l) kan de BODAC additioneel worden ingezet om de ammoniumpiek van het RWZI effluent te verlagen. Ondanks dat het om een techniek gaat waarbij microbiologie een belangrijke rol speelt is BODAC een robuust systeem; korte periodes van zuurstofloosheid door technische storingen ofwel een verhoogd ammoniumgehalte in het RWZI-effluent hebben geen (langdurige) invloed gehad op de prestaties van BODAC.

Twee bekende stoffen die toenemen in de BODAC zijn de gidsstoffen benzotriazool en methylbenzotriazool. Bij een langere EBCT is de toename hoger, wat suggereert dat deze twee stoffen metabolieten van andere stoffen zijn. Ook kan er sprake van desorptie zijn gezien deze stoffen in BODAC-nieuw wel verwijderd worden. Het mechanisme wordt in parallel onderzoek door Wetsus verder uitgezocht.

BODAC-oud

De resultaten van BODAC-oud laten het volgende zien:

	EBCT	Rendement top 7	Temperatuur
BM 1 t/m 3	15	51-65 %	11-15 °C
BM 4 t/m 6	30	82-86 %	17-21 °C
BM 7 t/m 9	20	77-85 %	17-22 °C
BM 10 t/m 12	17	67-75 %	12-13 °C
BM 13 t/m 20	23	75-84 %	12-21 °C

- Het aantal stoffen in de NTS dat wordt verlaagd door de BODAC is significant groter dan de stoffen die toenemen. De toenemende bekende stoffen zijn of een afbraakproduct of een product dat mogelijk voorkomt uit tijdelijke zuurstofloosheid en desorptie van kool.
- Door de behandeling in BODAC-oud wordt de ecotoxiciteit van het effluent verder verlaagd.

Zowel temperatuur, voedingsconcentratie als EBCT hebben een effect gehad op de bereikte verwijderingsrendementen in BODAC-oud. Het beoogde verwijderingsrendement van minimaal 80% verwijdering van de top 7 gidsstoffen werd alleen bereikt bij een EBCT van 20 en 23 minuten waarbij de temperatuur in het voedingswater hoger dan 18 °C is en bij een EBCT van 30 minuten.

BODAC-NIEUW

De resultaten van BODAC-nieuw laten het volgende zien:

	EBCT	Rendement top 7
BM 1 t/m 3	30	98-100 %
BM 4 t/m 11	15	73-84 %
BM 12 t/m 14	23	74-81 %

- Na 25.000 KBV was biologische omzetting van medicijn(resten) actief in het filter en bij verhoging van de EBCT van 15 naar 23 minuten waren de prestaties vergelijkbaar met BODAC-oud (83-84%). Er is niet getest met een temperatuur onder 18 °C.
- Het aantal stoffen in de NTS die wordt verlaagd door de BODAC is significant groter dan de stoffen die toenemen. De toenemende bekende stoffen zijn of een afbraakproduct of een product dat mogelijk voorkomt uit (tijdelijke zuurstofloosheid en) desorptie van kool. Dit is in eerder onderzoek geconstateerd.
- De resultaten van de bio assays worden verlaagd door BODAC-nieuw.

6.1.2 STANDAARDZUIVERING 100.000 I.E. (CO₂-FOOTPRINT EN KOSTEN)

De BODAC is met het oog op CO₂ footprint ondanks de langere EBCT van 23 minuten competitief met het oog op CO₂ footprint t.o.v. de technieken: PACAS, ozon en zandfiltratie en GAK. Kanttekening: de verwijderingsrendementen van BODAC (75-84%) liggen iets lager dan ozon en zandfiltratie (80-85%) en GAK (80-85%) bij een vergelijkbaar ontwerpdebiet.

De bijdrage door BODAC aan de CO₂ footprint is bij een standtijd van 12 jaar 114 g/m³ behandeld water en de totale RWZI met verwijdering van organische micro's komt daarmee uit op 1.878 ton CO₂/jaar. De andere technieken liggen tussen 1.953-3.009 ton CO₂/jaar. De jaarlijkse kosten voor het toepassen van BODAC zijn 0,25 €/m³ behandeld water. In alle berekeningen wordt BODAC tezamen met de trommelzeef meegenomen.

Aangezien er geen tekenen zijn van een verlaagde prestatie of slijtage aan het kool, kan met vrij veel zekerheid gesteld worden dat de standtijd van de BODAC langer dan 12 wordt. Desondanks is dat niet getest in het pilotonderzoek, wat logischerwijs niet langer dan 1,5 jaar duurde. Om iets te zeggen over het effect van een kortere en langere standtijd staan hieronder nog de kosten en CO₂ footprint bij een standtijd van 6 en 20 jaar:

- Effect van 6 jaar standtijd: de CO₂ footprint van de BODAC is 144 CO₂/m³ en jaarlijkse kosten zijn 0,27 €/m³.
- Effect van 20 jaar standtijd: de CO₂ footprint van de BODAC is 102 CO₂/m³ en jaarlijkse kosten zijn 0,25 €/m³.

6.2 AANBEVELINGEN

De drukfiltratie en zuurstofdosering hebben een significant effect op de kosten van de toepassing van BODAC. Voor de toepassing als nabehandeling van RWZI Emmen is een zuurstofdosering nodig, door hoge ammoniumconcentraties in het effluent. Bij andere zuiveringen waar lagere concentraties in het RWZI effluent aanwezig zijn kan de dosering van alleen lucht voldoende zijn. Vanuit dit project wordt geadviseerd hier verder naar te kijken en waar mogelijk de manier van zuurstof doseren verder te optimaliseren.

Daarnaast wordt er in een vervolgstudie ervaring opgedaan met ijzerdosering in de aanvoer naar het filter zodat fosfaat gebonden en afgevangen wordt in het filter. Middels deze 'ad-on' is BODAC in staat om gelijktijdig te nitrificeren, te defosfateren en breekt het ook medicijn-resten af.

VERWIJZINGEN

Abromaitis, V. 2018. Metoprolol adsorption desorption and biodegradation dynamics in biological activated carbon systems. *Doctoral Thesis, Technological sciences, chemical engineering*. 2018.

Bernadet, Olga, et al. 2023. Biological Oxygen-dosed Activated Carbon (BODAC) filters - a bioprocess for ultrapure water production removing organics, nutrients and micropollutants. *Journal of Hazardous Materials*. 458, 2023, Vol. 131882.

Boorsma, M, Dost, S and Prummel, H. 2020. Geen biofouling op omgekeerde-osmosemembranen door voorzuivering met biologische actiefkoolfiltratie. *H2O online*. 24 januari, 2020, <https://www.h2owaternetwerk.nl/vakartikelen/geen-biofouling-op-omgekeerde-osmose-membranen-door-voorzuivering-met-biologisch-actiefkoolfiltratie>.

de Vogel, D, et al. 2020. BODAC - Biologisch actiefkoolfiltratie met zuurstofdosing voor verwijdering microverontreinigingen uit RWZI-afvalwater. *Haalbaarheidsstudie*. Glimmen : WLN, 2020.

De Wilt, H.A. 2018. Pharmaceutical removal. Synergy between biological and chemical processes for wastewater. *Doctoral Thesis*. 2018.

Ecofide. 2022. Handreiking voor het uitvoeren van biologische effectmonitoring bij vergaande zuivering van RWZI-effluënten. s.l. : Ecofide, 2022. Concept eindversie 0.8.

— . 2020. Handreiking voor uitvoeren van biologische effectmonitoring bij vergaande zuivering van RWZI-effluënten. s.l. : Ecofide, 2020. versie 0.7, 03-04-2020.

El Gamal, M, et al. 2018. Bio-regeneration of activated carbon: a comprehensive review. *Elsevier separation and purification technology*. 197, 2018, Vols. 345-359.

Guillosou, R, et al. 2019. Organic micropollutants in a large wastewater treatment plant: What are the benefits of an advanced treatment step by activated carbon adsorption in comparison to conventional treatment? *Chemosphere*. 218, 2019, Vols. 1050-1060.

IenW. Bemonstering en chemische analyse 7 medicijnresten in RWZI-afvalwater t.b.v. bijdrageregeling 'zuivering medicijnresten'.

Mulder, M. 2022. Berekening CO2 footprint en kosten voor vergaande verwijdering van micro's uit rwzi-afvalwater. 2022. 28 december.

— . 2021. Evaluatie Gidsstoffen - Ten behoeve van de bijdrageregeling 'Zuivering Medicijnresten'. s.l. : Ministerie van IenW en Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit RWZI-afvalwater van STOWA, 2021. 9 juli.

Pinela, S.R., et al. 2023. Ultrafiltration (UF) and Biological Oxygen Dosed Activated Carbon (BODAC) Filtration to Prevent Fouling in Reversed Osmosis (RO): A Mass Balance Analysis. *Manuscript is under review*. 2023.

Rattier, M, et al. 2012. Organic micropollutant removal by biological activated carbon filtration: a review. *Urban Water Security Research Alliance*. Technical Report No. 53, 2012.

Sbardella, L, et al. 2018. Advanced biological activated carbon filter for removing pharmaceutically active compounds from treated waste water. *Science of total environment*. 636, 2018, Vols. 519-529.

Schipper, M and Timmer, H. 2022. EU Herziening Richtlijn Stedelijk Afvalwater. *Vewin*. [Online] december 5, 2022. [Cited: mei 29, 2023.] https://www.vewin.nl/SiteCollectionDocuments/Standpunten/Position%20Paper%20-%20UWWTD%20NL_V3.pdf#:~:text=EU%20Herziening%20Richtlijn%20Stedelijk%20Afvalwater%20In%20oktober%202022,PollutionAmbitie%20en%20de%20doelstellingen%20uit%20de%20Green%20Deal..

Snyder, S.A., et al. 2007. Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals. *Desalination*. 202, 2007, Vols. 156-181.

STOWA. 2021. STOWA. *Brochuren over IPMV*. [Online] november 16, 2021. [Cited: mei 15, 2023.] <https://www.stowa.nl/nieuws/brochure-over-ipmv>.

— . **2017.** *Verkenning technologische mogelijkheden voor verwijdering van medicijnresten uit afvalwater*. 2017. 2017/36.

— . *Verwijderen van microverontreinigingen uit effluent van RWZI's, een vertaling van kennis en ervaring uit Duitsland en Zwitserland*. 2015. 2015/27.

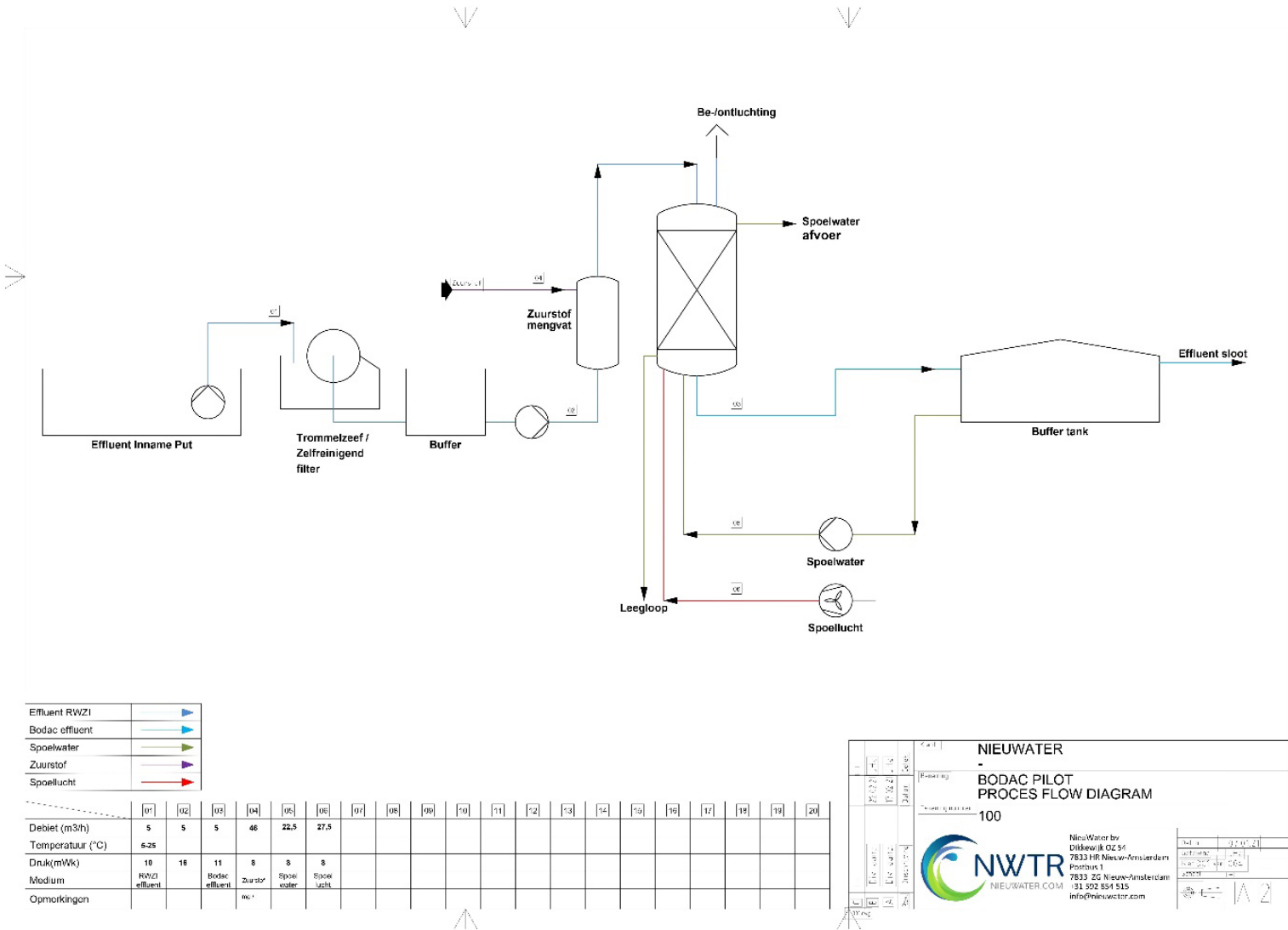
WLN. 2020. *PVA Pilotonderzoek verwijdering microverontreinigingen uit RWZI-afvalwater met BODAC*. Glimmen : WLN, 2020.

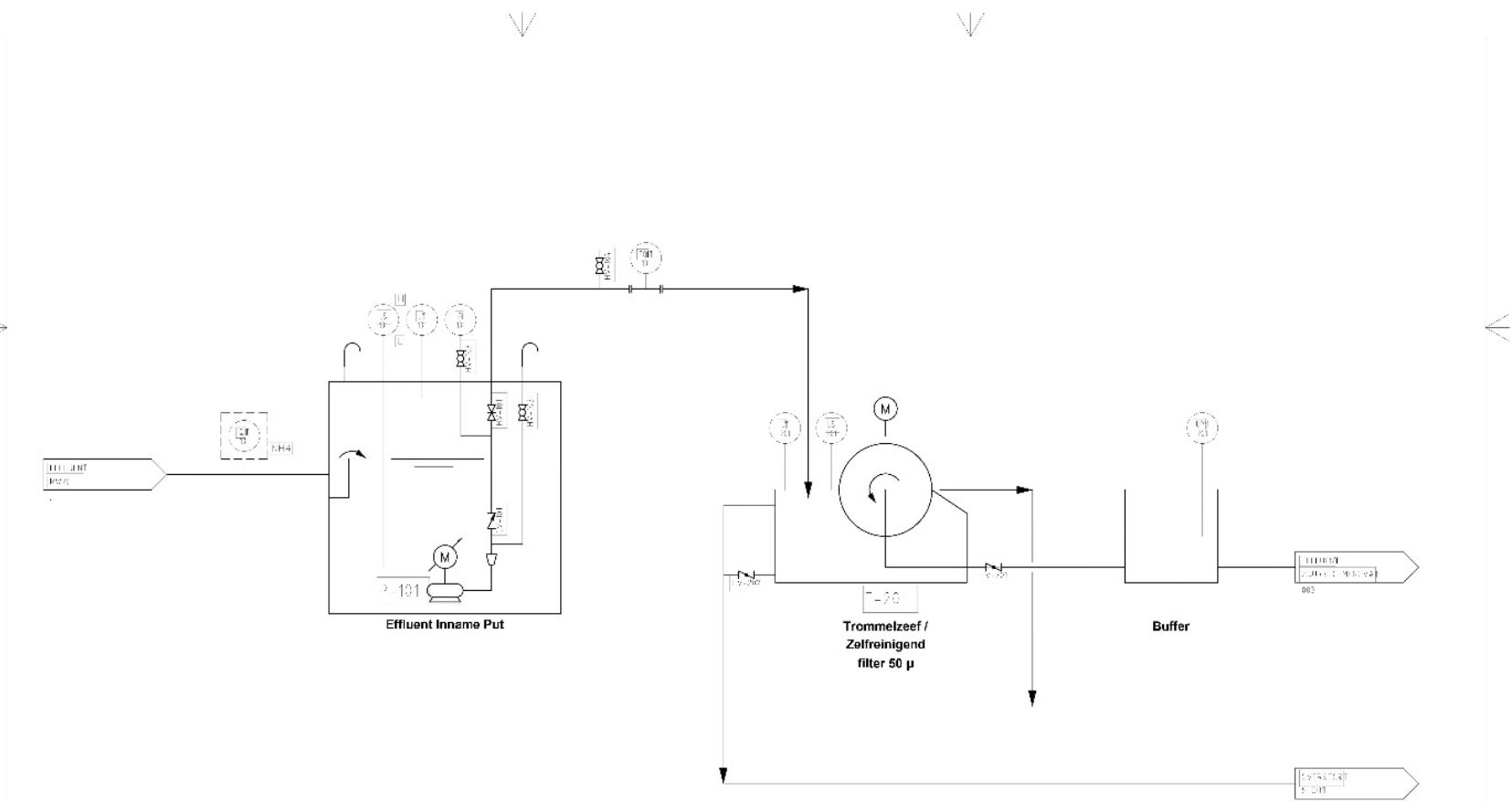
— . **2020.** *STOWA haalbaarheidsstudie BODAC*. Glimmen : WLN, 2020. 8283.

BIJLAGEN

PFD EN P&ID BODAC PILOT

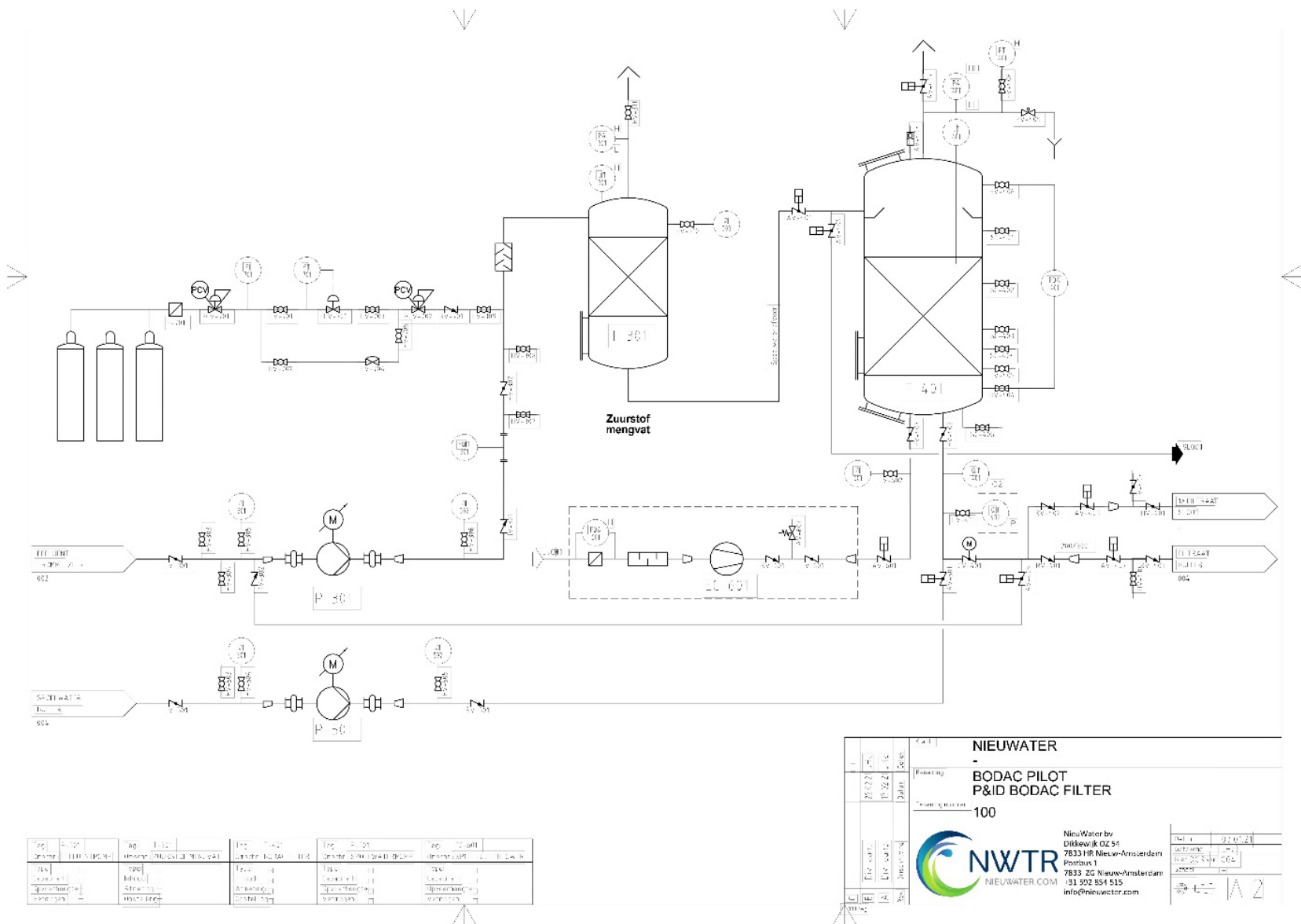
46

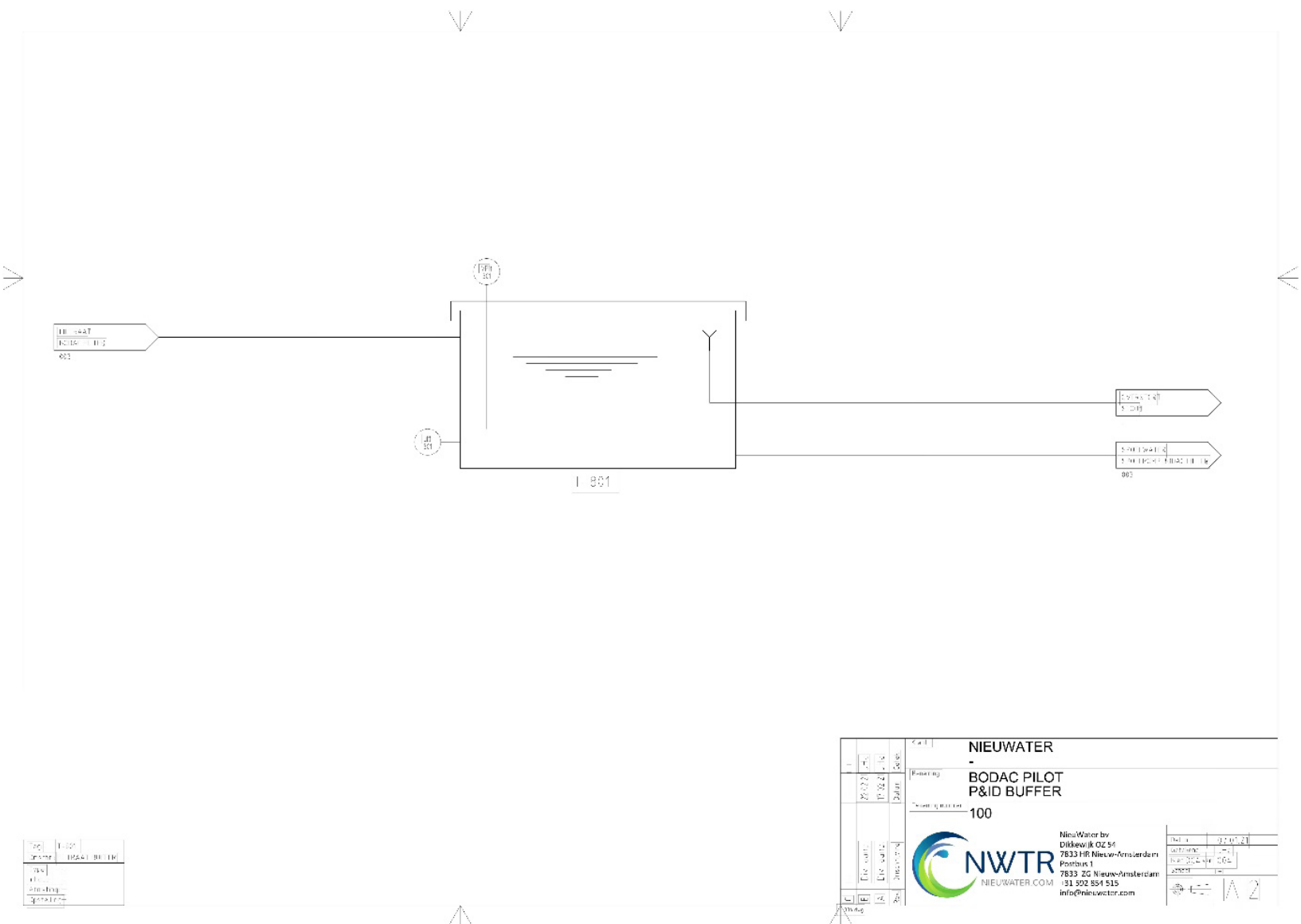




100	100	100	100
100	100	100	100
100	100	100	100
100	100	100	100

NIEUWATER	
BODAC PILOT P&ID INNAME	
100	
	
NieuwWater bv Dijkweg 18 02 51 7833 HR Nieuw-Amsterdam Postbus 1 7833 ZG Nieuw-Amsterdam +31 592 854 515 info@nieuwwater.com	

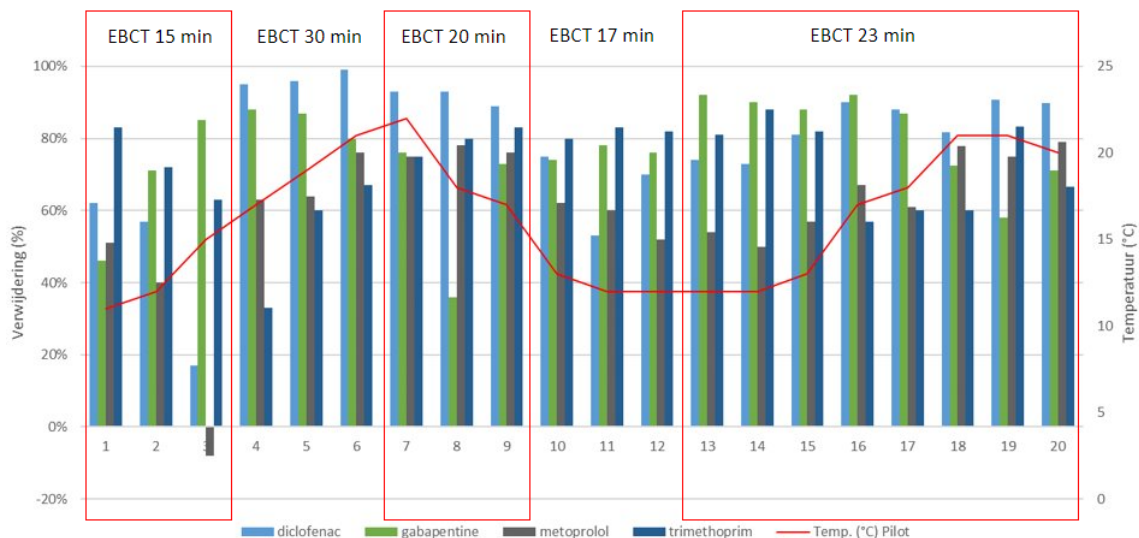
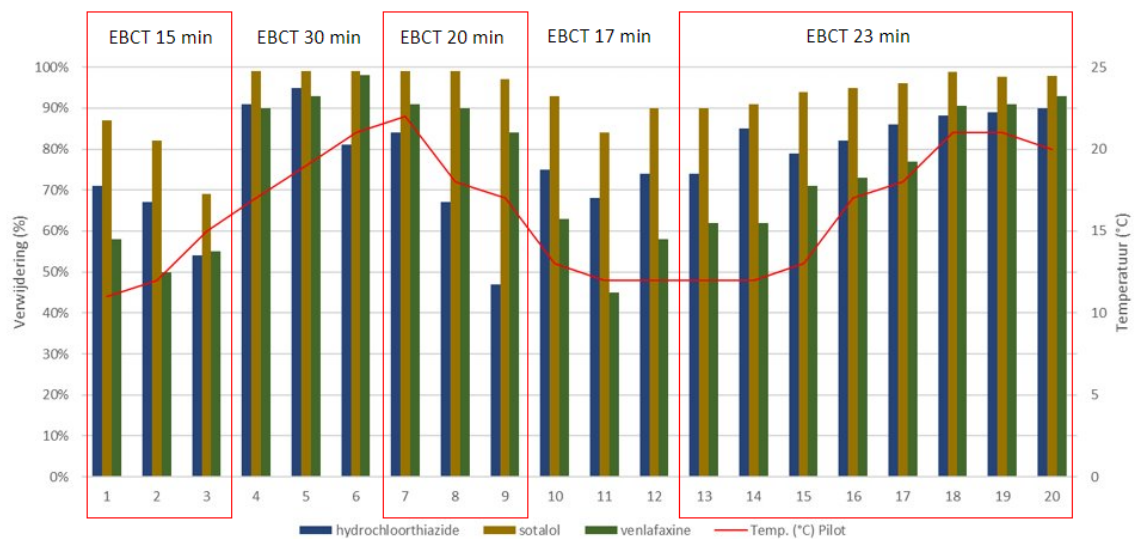


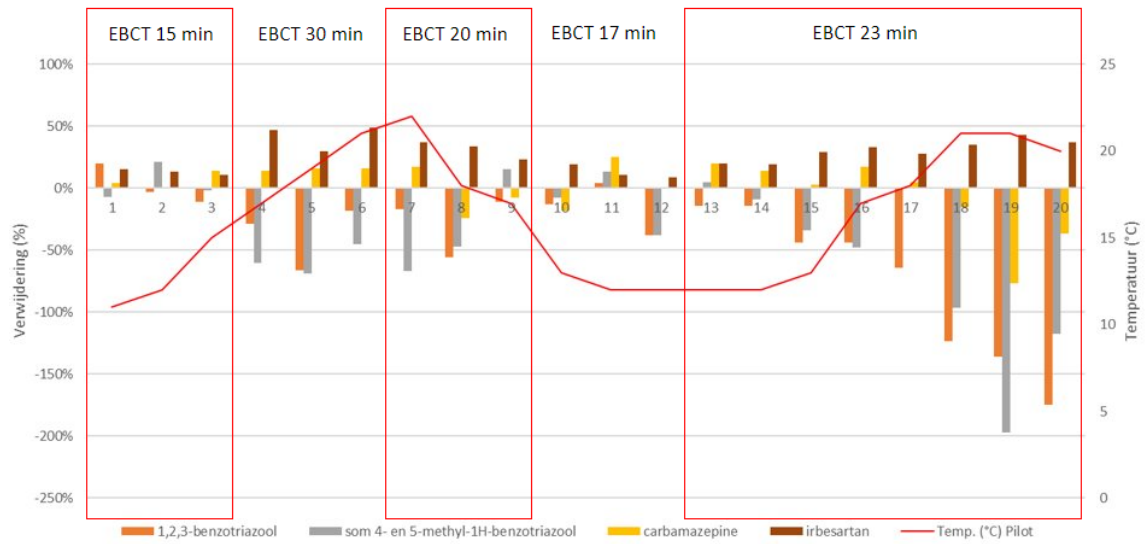




BIJLAGE II

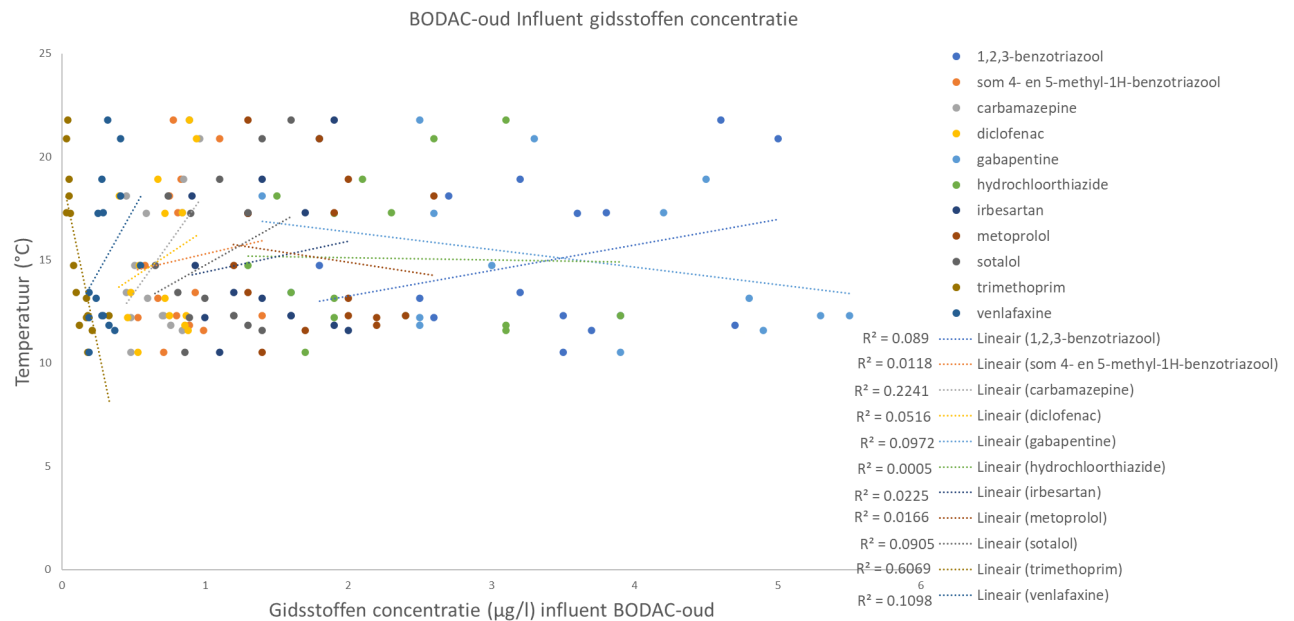
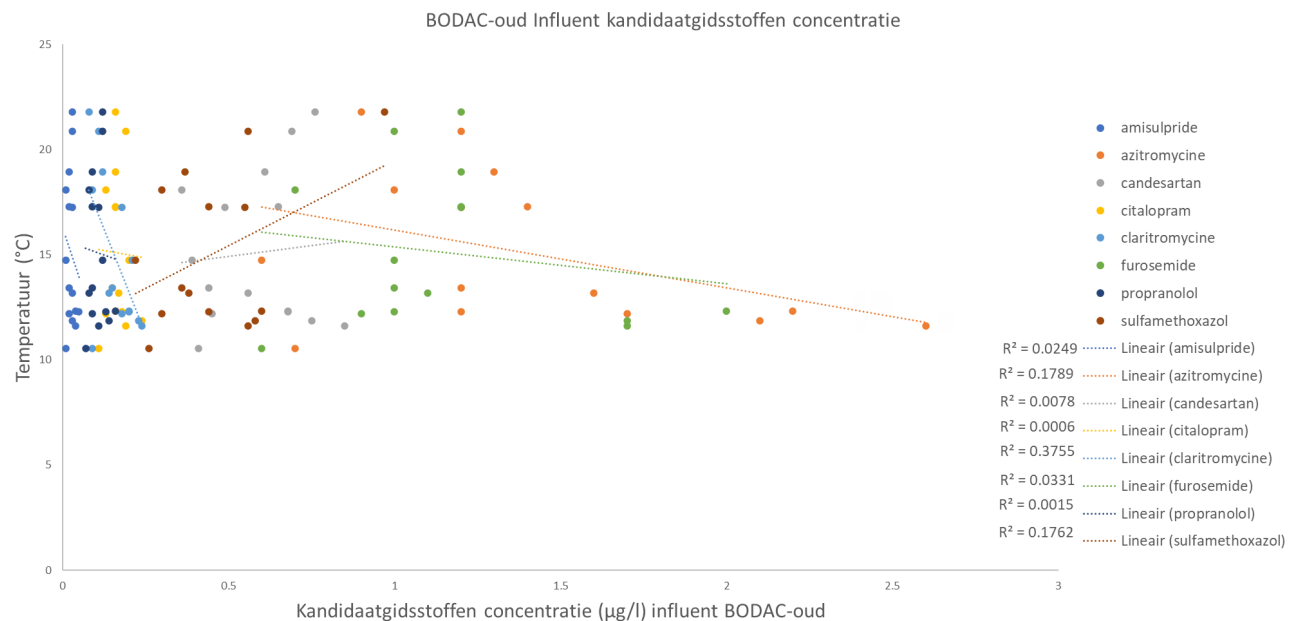
VERWIJDERINGSPERCENTAGE IN BODAC- OUD PER GIDSSTOF BIJ VERSCHILLENDE EBCT EN TEMPERATUUR





BIJLAGE III

RELATIE GIDSSTOFFEN CONCENTRATIE VOEDING EN TEMPERATUUR IN BODAC-LOUD

FIGUUR 0.1 CONCENTRATIE GIDSSTOFFEN ($\mu\text{G/L}$) IN BODAC-INFLUENT UITGEZET TEGEN VOEDINGSWATERTEMPERATUUR ($^{\circ}\text{C}$)FIGUUR 0.2 CONCENTRATIE KANDIDAATGIDSSTOFFEN ($\mu\text{G/L}$) IN BODAC-INFLUENT UITGEZET TEGEN VOEDINGSWATERTEMPERATUUR ($^{\circ}\text{C}$)

BIJLAGE IV

NON TARGET SCREENING BODAC-LOUD

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

In het groene vlak van de plot zijn de componenten 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 componenten weergegeven die significant zijn toegenomen in het filtraat ten opzichte van het influent van de BODAC filter. Componenten die buiten de gekleurde vlakken vallen zijn niet significant ($\leq PV$ (probability value) toe- ($\geq \log_2$ fold change) of afgenomen ($\leq -\log_2$ fold change).

POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Meetronde 2 (onderzoekperiode 19.03 – 23.03.'22) met EBCT 15 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.3 NTS PLOT VAN DE POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 19.03 – 23.03.'22) MET EBCT 15 MIN



TABEL 19 SIGNIFICANT AFNAME POSITIEF IONISERENDE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ONDERZOEKSPERIODE 19.03 – 23.03.'22) MET EBCT 15 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
Gidsstof	1	Diclofenac	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ N O ₂	-1,2	3,3
Gidsstof	1	Gabapentin	C ₉ H ₁₇ N O ₂	-1,9	4,4
Kandidaatgidsstof	1	Propranolol	C ₁₆ H ₂₁ N O ₂	-3,0	4,4
Gidsstof	1	Sotalol	C ₁₂ H ₂₀ N ₂ O ₃ S	-2,6	4,0
Gidsstof	1	Trimethoprim	C ₁₄ H ₁₈ N ₄ O ₃	-1,9	3,5

TABEL 20 **SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN**

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	2-Amino-6-methylmercaptapurine	C ₆ H ₇ N ₅ S	-1,7	4,1
2	Atenolol acid	C ₁₄ H ₂₁ N O ₄	-2,5	3,8
2	Celiprolol	C ₂₀ H ₃₃ N ₃ O ₄	-1,9	3,9
2	Cimetidine	C ₁₀ H ₁₆ N ₆ S	-3,0	6,9
2	Clopidogrel carboxylic acid	C ₁₅ H ₁₄ Cl N O ₂ S	-2,7	7,2
2	Diphenylamine	C ₁₂ H ₁₁ N	-1,5	0,6
2	Escitalopram	C ₂₀ H ₂₁ F N ₂ O	-2,2	3,4
2	Gliclazide	C ₁₅ H ₂₁ N ₃ O ₃ S	-2,5	4,1
1	Lidocaine	C ₁₄ H ₂₂ N ₂ O	-2,1	1,0
1	MDMA	C ₁₁ H ₁₅ N O ₂	-1,5	3,5
1	N,N'-Diphenylguanidine	C ₁₃ H ₁₃ N ₃	-1,4	1,5
2	N-[(S)-(+)-1-Ethoxycarbonyl-3-phenylpropyl]-L-alanine	C ₁₅ H ₂₁ N O ₄	-2,0	2,1
1	Naproxen	C ₁₄ H ₁₄ O ₃	-1,1	4,5
2	Sitagliptin	C ₁₆ H ₁₅ F ₆ N ₅ O	-1,4	2,6
2	Tris(2-butoxyethyl) phosphate	C ₁₈ H ₃₉ O ₇ P	-3,2	5,4
1	Valsartan	C ₂₄ H ₂₉ N ₅ O ₃	-1,0	3,9
2	Verapamil hydrochloride	C ₂₇ H ₃₈ N ₂ O ₄	-2,0	3,2

TABEL 21 **SIGNIFICANT TOENAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN**

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
1	Caffeine	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂	1,5	4,7
1	Paraxanthine	C ₇ H ₈ N ₄ O ₂	1,6	5,2
2	Theobromine	C ₇ H ₈ N ₄ O ₂	1,7	2,1

Meetronde 6 (onderzoekperiode 16.07 – 20.07.'22) met EBCT 30 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.4 NTS PLOT VAN DE POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 16.07 – 20.07.'22) MET EBCT 30 MIN



TABEL 22 SIGNIFICANT AFNAME POSITIEF IONISERENDE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ONDERZOEKSPERIODE 16.07 – 20.07.'22) MET EBCT 30 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
Kandidaatgidsstof	2	Amisulpride	C ₁₇ H ₂₇ N ₃ O ₄ S	-4,7	1,8
Gidsstof	1	Carbamazepine	C ₁₅ H ₁₂ N ₂ O	-1,2	3,3
Kandidaatgidsstof	1	Clarithromycin	C ₃₈ H ₆₉ N ₅ O ₁₃	-1,9	4,1
Gidsstof	1	Diclofenac	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ N ₂ O ₂	-6,3	3,6
Gidsstof	1	Gabapentin	C ₉ H ₁₇ N ₂ O ₂	-2,1	5,4
Gidsstof	1	Metoprolol	C ₁₅ H ₂₅ N ₂ O ₃	-2,2	7,2
Kandidaatgidsstof	1	Propranolol	C ₁₆ H ₂₁ N ₂ O ₂	-4,6	3,8
Gidsstof	1	Sotalol	C ₁₂ H ₂₀ N ₂ O ₃ S	-8,8	2,3

TABEL 23 SIGNIFICANT TOENAME POSITIEF IONISERENDE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ONDERZOEKSPERIODE 16.07 – 20.07.'22) MET EBCT 30 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
Gidsstof	1	4-Methylbenzotriazole	C ₇ H ₇ N ₃	1,0	6,0

TABEL 24 SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

	Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
	2	2,5-Dimethylpyrazine	C ₆ H ₈ N ₂	-4,8	3,6
	1	2-Methyl-S-benzothiazole	C ₈ H ₇ N S ₂	-1,7	6,2
	2	4-Acetamidoantipyrine	C ₁₃ H ₁₅ N ₃ O ₂	-3,7	4,9
	1	4-Aminoantipyrine	C ₁₁ H ₁₃ N ₃ O	-3,5	3,7
	1	4-Formylaminoantipyrine	C ₁₂ H ₁₃ N ₃ O ₂	-4,4	2,4
	1	4'-Hydroxydiclofenac	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ N O ₃	-5,6	4,1
	1	Atenolol	C ₁₄ H ₂₂ N ₂ O ₃	-1,8	5,2
	2	Atenolol acid	C ₁₄ H ₂₁ N O ₄	-1,9	5,6
	1	Benzafibrate	C ₁₉ H ₂₀ Cl N O ₄	-2,5	4,4
	1	Bisoprolol	C ₁₈ H ₃₁ N O ₄	-2,5	8,3
	1	Caffeine	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂	-1,5	5,7
	1	Carbamazepine 10,11-epoxide	C ₁₅ H ₁₂ N ₂ O ₂	-7,7	4,3
	2	Celiprolol	C ₂₀ H ₃₃ N ₃ O ₄	-7,7	6,9
	2	Cetirizine	C ₂₁ H ₂₅ Cl N ₂ O ₃	-2,8	3,9
	2	Cimetidine	C ₁₀ H ₁₆ N ₆ S	-6,2	8,0
	2	Clopidogrel carboxylic acid	C ₁₅ H ₁₄ Cl N O ₂ S	-10,3	4,2
	2	Clozapine	C ₁₈ H ₁₉ Cl N ₄	-1,2	1,4
	2	Desacetyl diltiazem	C ₂₀ H ₂₄ N ₂ O ₃ S	-4,9	3,1
	2	Desmethylcitalopram	C ₁₉ H ₁₉ F N ₂ O	-1,9	3,8
	1	Difenoconazole	C ₁₉ H ₁₇ Cl ₂ N ₃ O ₃	-4,6	4,7
	2	Escitalopram	C ₂₀ H ₂₁ F N ₂ O	-7,5	2,7
	2	Fexofenadine	C ₃₂ H ₃₉ N O ₄	-1,5	6,2
	2	Flecainide	C ₁₇ H ₂₀ F ₆ N ₂ O ₃	-1,7	2,1
	2	Gliclazide	C ₁₅ H ₂₁ N ₃ O ₃ S	-8,5	3,3
	2	Isophorone	C ₉ H ₁₄ O	-1,7	2,2
	1	Ketoprofen	C ₁₆ H ₁₄ O ₃	-3,3	2,9
	2	Labetalol	C ₁₉ H ₂₄ N ₂ O ₃	-4,4	3,1
	1	Lidocaine	C ₁₄ H ₂₂ N ₂ O	-8,0	3,6
	1	MDMA	C ₁₁ H ₁₅ N O ₂	-3,0	4,3
	1	Mebendazole	C ₁₆ H ₁₃ N ₃ O ₃	-1,6	2,3
	2	Metoclopramide	C ₁₄ H ₂₂ Cl N ₃ O ₂	-2,7	3,1
	1	N,N'-Diphenylguanidine	C ₁₃ H ₁₃ N ₃	-2,0	3,0
	1	Naproxen	C ₁₄ H ₁₄ O ₃	-1,6	2,9
	2	O-Desmethylvenlafaxine	C ₁₆ H ₂₅ N O ₂	-6,3	5,9
	1	Pencycuron	C ₁₉ H ₂₁ Cl N ₂ O	-6,9	4,7
	1	Praziquantel	C ₁₉ H ₂₄ N ₂ O ₂	-1,3	3,8
	1	Primidone	C ₁₂ H ₁₄ N ₂ O ₂	-1,4	2,7
	1	Prosulfocarb	C ₁₄ H ₂₁ N O S	-2,1	4,2
	2	Rivaroxaban	C ₁₉ H ₁₈ Cl N ₃ O ₅ S	-2,4	6,8
	2	Sitagliptin	C ₁₆ H ₁₅ F ₆ N ₅ O	-2,3	6,0
	1	Spinosyn A	C ₄₁ H ₆₅ N O ₁₀	-5,2	4,2
	2	Sulfapyridine	C ₁₁ H ₁₁ N ₃ O ₂ S	-2,8	4,4
	2	Sulpiride	C ₁₅ H ₂₃ N ₃ O ₄ S	-4,1	1,8
	2	Tapentadol	C ₁₄ H ₂₃ N O	-8,2	4,5
	2	Tetrakis(2-hydroxypropyl)ethylenediamine	C ₁₄ H ₃₂ N ₂ O ₄	-9,8	7,1

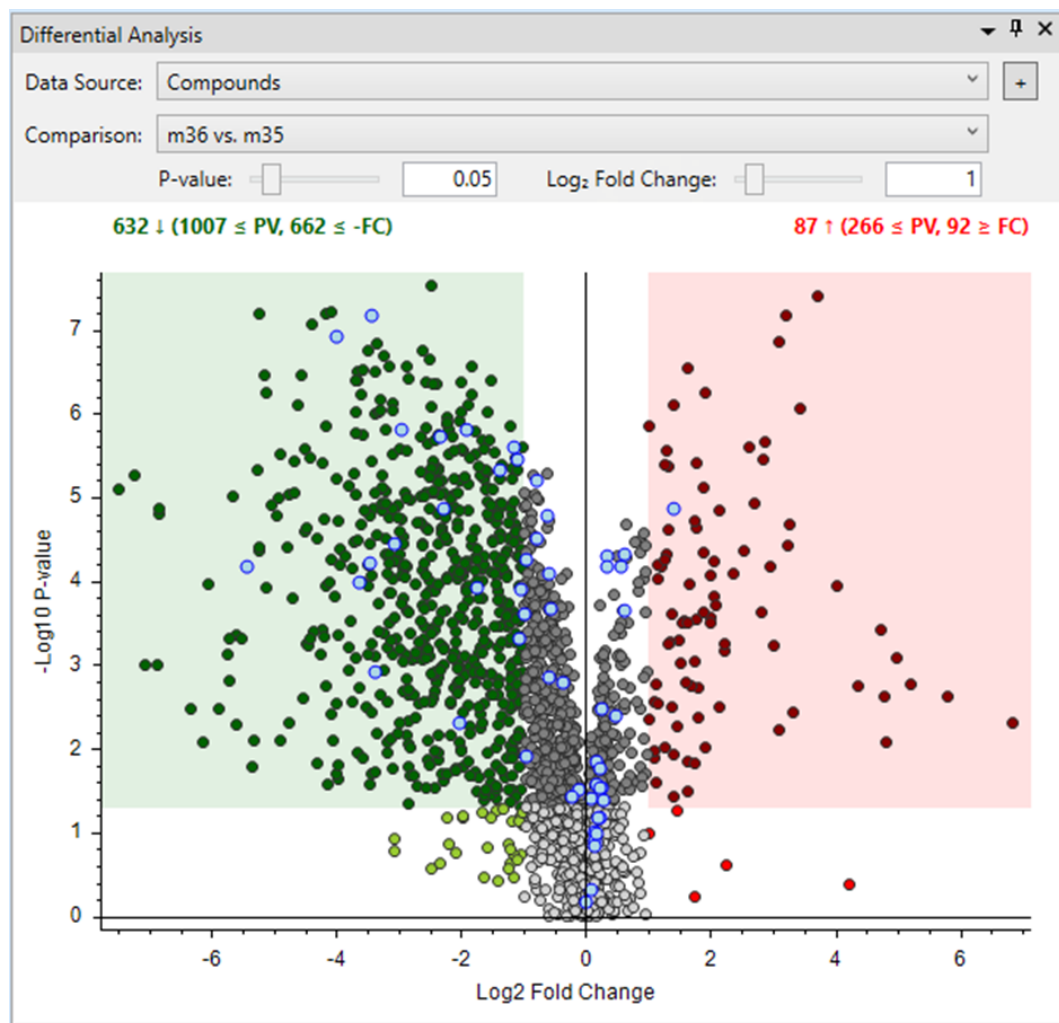
Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
1	Tramadol	C ₁₆ H ₂₅ N O ₂	-9,1	4,1
1	Tributyl phosphate	C ₁₂ H ₂₇ O ₄ P	-1,9	2,8
2	Tris(2-butoxyethyl) phosphate	C ₁₈ H ₃₉ O ₇ P	-3,2	7,2
1	Valsartan	C ₂₄ H ₂₉ N ₅ O ₃	-4,5	4,2
2	α-Hydroxymidazolam	C ₁₈ H ₁₃ Cl F N ₃ O	-1,1	3,2

TABEL 25 SIGNIFICANT TOENAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
1	2,6-Dichlorobenzamide (BAM)	C ₇ H ₅ Cl ₂ N O	5,1	6,4
2	Azoxystrobin	C ₂₂ H ₁₇ N ₃ O ₅	1,2	2,5
1	Chloridazon	C ₁₀ H ₈ Cl N ₃ O	3,8	3,3
1	Desamino metamitron	C ₁₀ H ₉ N ₃ O	1,8	3,8
1	Desaminometribuzin	C ₈ H ₁₃ N ₃ O S	1,8	3,2
1	Dimethenamid	C ₁₂ H ₁₈ Cl N O ₂ S	2,1	6,4
1	Fluoxastrobin	C ₂₁ H ₁₆ Cl F N ₄ O ₅	1,1	4,2
1	Flutolanil	C ₁₇ H ₁₆ F ₃ N O ₂	1,4	7,0
1	Linuron	C ₉ H ₁₀ Cl ₂ N ₂ O ₂	4,3	4,5
1	Terbutylazine	C ₉ H ₁₆ Cl N ₅	1,5	2,9
1	Thiacloprid	C ₁₀ H ₉ Cl N ₄ S	4,5	2,5

Meetronde 10 (onderzoekperiode 28.11 – 02.12.'22) met EBCT 17 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.5 NTS PLOT VAN DE POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 28.11 – 02.12.'22) MET EBCT 17 MIN



TABEL 26 SIGNIFICANT AFNAME POSITIEF IONISERENDE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ONDERZOEKSPERIODE 28.11 – 02.12.'22) MET EBCT 17 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
Gidsstof	1	Diclofenac	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ N O ₂	-1,9	5,8
Gidsstof	1	Gabapentin	C ₉ H ₁₅ N O	-1,7	3,9
Gidsstof	1	Metoprolol	C ₁₅ H ₂₅ N O ₃	-1,4	5,3
Kandidaatgidsstof	1	Propranolol	C ₁₆ H ₂₁ N O ₂	-3,4	7,2
Gidsstof	1	Sotalol	C ₁₂ H ₂₀ N ₂ O ₃ S	-3,6	4,0
Gidsstof	1	Trimethoprim	C ₁₄ H ₁₈ N ₄ O ₃	-3,1	4,4

TABEL 27 SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
1	Caprolactam	$C_6 H_{11} N O$	-1,2	5,6
1	Cyprodinil	$C_{14} H_{15} N_3$	-3,0	5,8
1	Lidocaine	$C_{14} H_{22} N_2 O$	-3,5	4,2
1	MDMA	$C_{11} H_{15} N O_2$	-2,3	4,9
2	O-Desmethylvenlafaxine	$C_{16} H_{25} N O_2$	-2,3	5,7
2	Oxcarbazepine	$C_{15} H_{12} N_2 O_2$	-5,4	4,2
1	Prosulfocarb	$C_{14} H_{21} N O S$	-2,0	2,3
1	Sulfapyridine	$C_{11} H_{11} N_3 O_2 S$	-1,0	3,9
1	Tramadol	$C_{16} H_{25} N O_2$	-4,0	6,9

TABEL 28 SIGNIFICANT TOENAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
1	Flutolanil	$C_{17} H_{16} F_3 N O_2$	1,42	4,86566

Meetronde 13 (onderzoekperiode 11.02 – 15.02.'23) met EBCT 23 min. en DWA condities.**FIGUUR 0.6****NTS PLOT VAN DE POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 11.02 – 15.02.'23) MET EBCT 23 MIN****TABEL 29: SIGNIFICANT AFNAME POSITIEF IONISERENDE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ONDERZOEKSPERIODE 11.02 – 15.02.'23) MET EBCT 23 MIN**

	Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
Kandidaatgidsstof	2	Amisulpride	C ₁₇ H ₂₇ N ₃ O ₄ S	-5,1	2,2
Kandidaatgidsstof	1	Azithromycin	C ₃₈ H ₇₂ N ₂ O ₁₂	-1,9	5,7
Gidsstof	1	Diclofenac	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ N O ₂	-2,2	6,3

TABEL 30 SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	1-(2,6-Dichlorophenyl)-2-indolone	C ₁₄ H ₉ Cl ₂ N O	-2,3	6,7
2	1-(4-hydroxyphenyl)propane-1,2-diol	C ₉ H ₁₂ O ₃	-3,5	6,6
2	1H-indol-3-yl(pyridin-2-yl)methanol	C ₁₄ H ₁₂ N ₂ O	-1,3	1,6
2	2,5-Dimethylpyrazine	C ₆ H ₈ N ₂	-3,9	5,8
2	2-Amino-6-methylmercaptapurine	C ₆ H ₇ N ₅ S	-2,0	7,4
2	2-Anisidine	C ₇ H ₉ N O	-2,0	4,0
2	2-Fluoromethamphetamine	C ₁₀ H ₁₄ F N	-1,6	5,2
2	3-Hydroxy-2-methylpyridine	C ₆ H ₇ N O	-3,1	4,6
2	3-Hydroxy-5-(hydroxymethyl)-2-methylisonicotinaldehyde oxime	C ₈ H ₁₀ N ₂ O ₃	-1,6	2,4
2	4-Acetamidoantipyrine	C ₁₃ H ₁₅ N ₃ O ₂	-1,3	5,4
2	4-Formylaminoantipyrine	C ₁₂ H ₁₃ N ₃ O ₂	-2,4	6,1
2	5-Hydroxymebendazole	C ₁₆ H ₁₅ N ₃ O ₃	-1,3	2,0
2	8-Hydroxyquinoline	C ₉ H ₇ N O	-2,2	4,9
2	Alfuzosin	C ₁₉ H ₂₇ N ₅ O ₄	-2,9	2,9
2	Aliskiren	C ₃₀ H ₅₃ N ₃ O ₆	-1,0	4,9
2	Amphetamine	C ₉ H ₁₃ N	-1,8	3,3
2	Atazanavir	C ₃₈ H ₅₂ N ₆ O ₇	-1,9	4,7
2	Atenolol acid	C ₁₄ H ₂₁ N O ₄	-2,7	6,5
2	Benzophenone	C ₁₃ H ₁₀ O	-2,3	5,3
2	Bisoprolol	C ₁₈ H ₃₁ N O ₄	-1,1	5,3
1	Carbamazepine 10,11-epoxide	C ₁₅ H ₁₂ N ₂ O ₂	-1,0	4,1
2	Celiprolol	C ₂₀ H ₃₃ N ₃ O ₄	-2,9	6,7
2	Cimetidine	C ₁₀ H ₁₆ N ₆ S	-4,0	8,0
2	cis-Tramadol	C ₁₆ H ₂₅ N O ₂	-3,9	7,7
2	Climbazole	C ₁₅ H ₁₇ Cl N ₂ O ₂	-1,4	5,3
2	Clindamycin	C ₁₈ H ₃₃ Cl N ₂ O ₅ S	-1,6	3,4
2	Clopidogrel	C ₁₆ H ₁₆ Cl N O ₂ S	-2,5	6,6
2	Clopidogrel carboxylic acid	C ₁₅ H ₁₄ Cl N O ₂ S	-4,2	7,3
1	Clozapine	C ₁₈ H ₁₉ Cl N ₄	-1,4	1,4
2	Desacetyl diltiazem	C ₂₀ H ₂₄ N ₂ O ₃ S	-5,1	2,0
2	Diheptyl phthalate	C ₂₂ H ₃₄ O ₄	-2,0	5,0

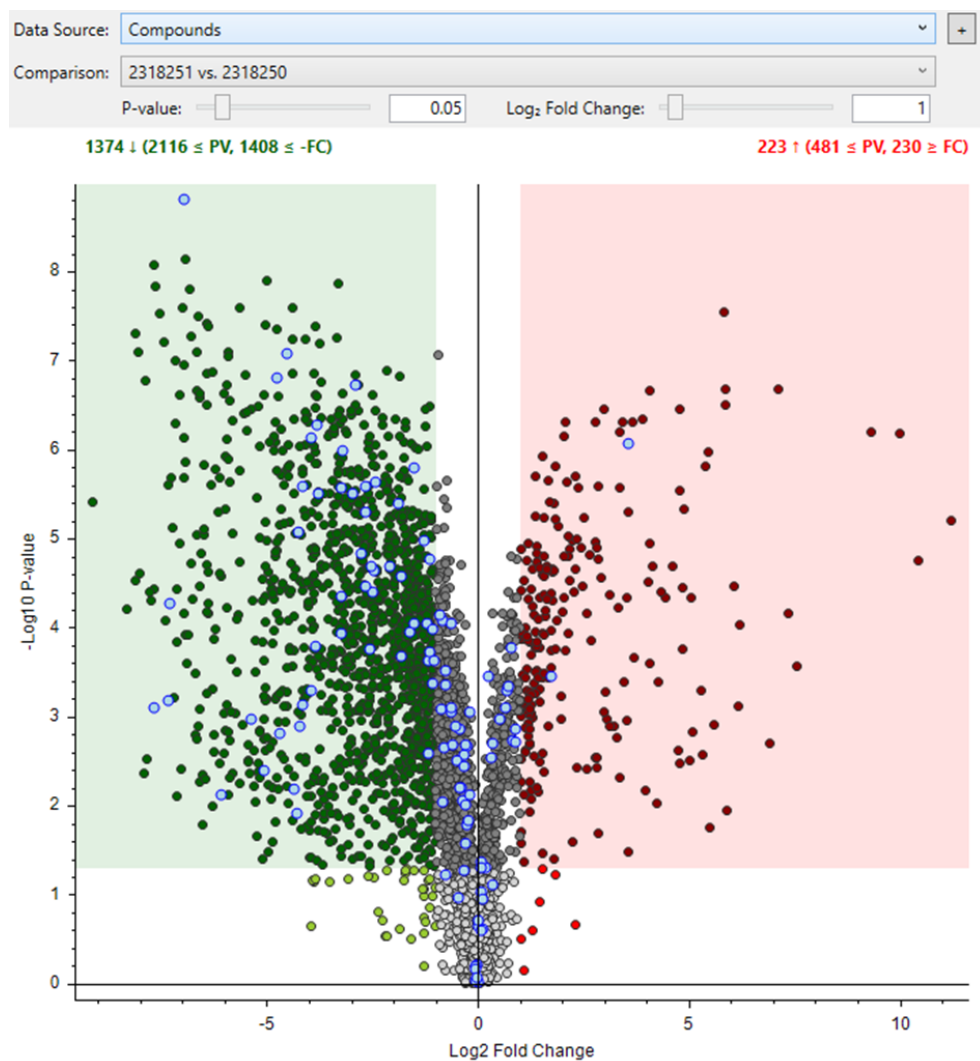
TABEL 31 SIGNIFICANT TOENAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	1,2-Benzisothiazolin-3-one	C ₇ H ₅ N O S	2,2	3,8
2	2,2,6,6-Tetramethyl-4-piperidinol	C ₉ H ₁₉ N O	2,1	4,0
1	Chloridazon	C ₁₀ H ₈ Cl N ₃ O	3,5	2,4
1	Flutolanil	C ₁₇ H ₁₆ F ₃ N O ₂	1,5	4,4
2	Terbuthylazine	C ₉ H ₁₆ Cl N ₅	1,0	1,9

Meetronde 15 (onderzoekperiode 15.04 – 19.04.'23) met EBCT 23 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.7

NTS PLOT VAN DE POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 15.04 – 19.04.'23) MET EBCT 23 MIN



TABEL 32

SIGNIFICANT AFNAME POSITIEF IONISERENDE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ONDERZOEKSPERIODE 15.04 – 19.04.'23) MET EBCT 23 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
Kandidaatgidsstof	2	Amisulpride	C ₁₇ H ₂₇ N ₃ O ₄ S	-4,4	2,2
Gidsstof	1	Diclofenac	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ N O ₂	-2,4	5,6
Gidsstof	1	Gabapentin	C ₉ H ₁₇ N O ₂	-2,9	6,7
Gidsstof	2	Metoprolol	C ₁₅ H ₂₅ N O ₃	-1,2	3,6
Kandidaatgidsstof	1	Propranolol	C ₁₆ H ₂₁ N O ₂	-3,2	6,0
Gidsstof	2	Trimethoprim	C ₁₄ H ₁₈ N ₄ O ₃	-2,6	3,8
Gidsstof	2	Venlafaxine	C ₁₇ H ₂₇ N O ₂	-1,8	4,6

TABEL 33 SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	1,3-Phenylenediamine	C ₆ H ₈ N ₂	-3,2	4,4
2	2,5-Dimethylpyrazine	C ₆ H ₈ N ₂	-4,0	3,3
2	2-Amino-6-methylmercaptapurine	C ₆ H ₇ N ₅ S	-1,8	3,7
2	3-Hydroxy-2-methylpyridine	C ₆ H ₇ N O	-3,0	5,5
2	3-Hydroxy-5-(hydroxymethyl)-2-methylisonicotinaldehyde oxime	C ₈ H ₁₀ N ₂ O ₃	-2,5	4,7
2	3-Methylbenzophenone	C ₁₄ H ₁₂ O	-3,2	3,9
2	4-Acetamidoantipyrine	C ₁₃ H ₁₅ N ₃ O ₂	-1,6	4,0
1	4-Aminoantipyrine	C ₁₁ H ₁₃ N ₃ O	-3,2	5,6
1	4-Formylaminoantipyrine	C ₁₂ H ₁₃ N ₃ O ₂	-2,8	4,8
1	4'-Hydroxydiclofenac	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ N O ₃	-1,1	4,0
2	Aliskiren	C ₃₀ H ₅₃ N ₃ O ₆	-1,0	3,6
2	Atenolol acid	C ₁₄ H ₂₁ N O ₄	-2,5	4,4
2	Benzidine	C ₁₂ H ₁₂ N ₂	-5,4	3,0
1	Bisoprolol	C ₁₈ H ₃₁ N O ₄	-1,2	4,1
1	Carbamazepine 10,11-epoxide	C ₁₅ H ₁₂ N ₂ O ₂	-1,1	4,8
2	Celiprolol	C ₂₀ H ₃₃ N ₃ O ₄	-3,8	5,5
2	Cimetidine	C ₁₀ H ₁₆ N ₆ S	-4,2	5,6
2	Clindamycin	C ₁₈ H ₃₃ Cl N ₂ O ₅ S	-1,9	5,4
2	Clopidogrel	C ₁₆ H ₁₆ Cl N O ₂ S	-2,7	5,6
2	Clopidogrel carboxylic acid	C ₁₅ H ₁₄ Cl N O ₂ S	-4,8	6,8
2	Desacetyl diltiazem	C ₂₀ H ₂₄ N ₂ O ₃ S	-6,1	2,1
2	Desmethyldiltiazem	C ₁₉ H ₁₉ F N ₂ O	-1,1	3,7
2	Escitalopram	C ₂₀ H ₂₁ F N ₂ O	-3,8	6,3
2	Gliclazide	C ₁₅ H ₂₁ N ₃ O ₃ S	-3,9	3,8
2	Labetalol	C ₁₉ H ₂₄ N ₂ O ₃	-4,2	2,9
2	Lamotrigine	C ₉ H ₇ Cl ₂ N ₅	-1,1	3,4
1	Lidocaine	C ₁₄ H ₂₂ N ₂ O	-3,9	6,1
1	MDMA	C ₁₁ H ₁₅ N O ₂	-2,5	4,6
2	Methadone	C ₂₁ H ₂₇ N O	-2,7	4,5
2	Metoclopramide	C ₁₄ H ₂₂ Cl N ₃ O ₂	-7,3	4,3
2	Norverapamil	C ₂₆ H ₃₆ N ₂ O ₄	-7,0	8,8
2	O-Desmethylenlafaxine	C ₁₆ H ₂₅ N O ₂	-2,7	5,3
2	Oxcarbazepine	C ₁₅ H ₁₂ N ₂ O ₂	-4,2	5,1
1	Pirimicarb	C ₁₁ H ₁₈ N ₄ O ₂	-1,2	2,6
2	Rivaroxaban	C ₁₉ H ₁₈ Cl N ₃ O ₅ S	-1,3	5,0
2	Sitagliptin	C ₁₆ H ₁₅ F ₆ N ₅ O	-1,5	5,8
1	Sulfapyridine	C ₁₁ H ₁₁ N ₃ O ₂ S	-1,5	4,1
2	Sulpiride	C ₁₅ H ₂₃ N ₃ O ₄ S	-4,3	1,9
2	Tapentadol	C ₁₄ H ₂₃ N O	-7,7	3,1
2	Tetrakis(2-hydroxypropyl)ethylenediamine	C ₁₄ H ₃₂ N ₂ O ₄	-4,2	3,1
2	Triphenyl phosphate	C ₁₈ H ₁₅ O ₄ P	-2,1	4,7
2	Verapamil	C ₂₇ H ₃₈ N ₂ O ₄	-4,5	7,1

TABEL 34 SIGNIFICANT TOENAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	2,2,6,6-Tetramethyl-4-piperidinol	C ₉ H ₁₉ N O	1,7	3,5
1	Chloridazon	C ₁₀ H ₈ Cl N ₃ O	3,6	6,1

Meetronde 16 (onderzoekperiode 20.05 – 24.05.'23) met EBCT 23 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.8

NTS PLOT VAN DE POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 20.05 – 24.05.'23) MET EBCT 23 MIN



TABEL 35

SIGNIFICANT AFNAME POSITIEF IONISERENDE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ONDERZOEKSPERIODE 20.05 – 24.05.'23) MET EBCT 23 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
Kandidaatgidsstof	2	Amisulpride	$C_{17}H_{27}N_3O_4S$	-4,7	2,2
Kandidaatgidsstof	2	Azithromycin	$C_{38}H_{72}N_2O_{12}$	-2,4	5,1
Kandidaatgidsstof	2	Citalopram	$C_{20}H_{21}FN_2O$	-4,5	4,0
Gidsstof	1	Diclofenac	$C_{14}H_{11}Cl_2NO_2$	-3,0	7,0
Gidsstof	1	Gabapentin	$C_9H_{17}NO_2$	-3,2	6,7
Gidsstof	1	Metoprolol	$C_{15}H_{25}NO_3$	-1,2	4,0
Kandidaatgidsstof	1	Propranolol	$C_{16}H_{21}NO_2$	-3,6	5,9
Gidsstof	1	Sotalol	$C_{12}H_{20}N_2O_3S$	-4,5	3,0
Gidsstof	1	Trimethoprim	$C_{14}H_{18}N_4O_3$	-1,3	3,0
Gidsstof	2	Venlafaxine	$C_{17}H_{27}NO_2$	-2,0	6,4

TABEL 36 SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
1	1,3-diphenylguanidine	C ₁₃ H ₁₃ N ₃	-1,1	1,8
2	2,5-Dimethylpyrazine	C ₆ H ₈ N ₂	-4,5	4,5
2	2-Fluoromethamphetamine	C ₁₀ H ₁₄ F N	-1,1	1,6
1	2-Methyl-S-benzothiazole	C ₈ H ₇ N S ₂	-1,4	3,4
2	3-Hydroxy-2-methylpyridine	C ₆ H ₇ N O	-1,9	5,7
2	3-Hydroxy-5-(hydroxymethyl)-2-methylisonicotinaldehyde oxime	C ₈ H ₁₀ N ₂ O ₃	-1,4	4,5
2	4-Acetamidoantipyrine	C ₁₃ H ₁₅ N ₃ O ₂	-1,7	5,9
1	4-Aminoantipyrine	C ₁₁ H ₁₃ N ₃ O	-1,8	3,1
1	4-Formylaminoantipyrine	C ₁₂ H ₁₃ N ₃ O ₂	-2,9	4,3
1	4'-Hydroxydiclofenac	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ N O ₃	-1,1	4,5
2	Aliskiren	C ₃₀ H ₅₃ N ₃ O ₆	-1,3	4,6
2	Amisulpride	C ₁₇ H ₂₇ N ₃ O ₄ S	-4,7	2,2
2	Atazanavir	C ₃₈ H ₅₂ N ₆ O ₇	-2,8	5,3
2	Atenolol acid	C ₁₄ H ₂₁ N O ₄	-2,9	4,7
2	Azithromycin	C ₃₈ H ₇₂ N ₂ O ₁₂	-2,4	5,1
1	Benzafibrate	C ₁₉ H ₂₀ Cl N O ₄	-1,4	1,3
2	Bis(2-ethylhexyl) amine	C ₁₆ H ₃₅ N	-1,8	4,2
1	Bisoprolol	C ₁₈ H ₃₁ N O ₄	-1,2	4,4
1	Carbamazepine 10,11-epoxide	C ₁₅ H ₁₂ N ₂ O ₂	-1,1	4,3
2	Celiprolol	C ₂₀ H ₃₃ N ₃ O ₄	-3,6	6,6
2	Cetirizine	C ₂₁ H ₂₅ Cl N ₂ O ₃	-1,2	3,5
2	Cimetidine	C ₁₀ H ₁₆ N ₆ S	-4,6	3,9
2	Citalopram	C ₂₀ H ₂₁ F N ₂ O	-4,5	4,0
2	Clopidogrel carboxylic acid	C ₁₅ H ₁₄ Cl N O ₂ S	-5,9	6,1
2	Codeine	C ₁₈ H ₂₁ N O ₃	-3,5	5,7
2	Desacetyl diltiazem	C ₂₀ H ₂₄ N ₂ O ₃ S	-3,7	2,9
1	Desamino metamitron	C ₁₀ H ₉ N ₃ O	-2,1	5,6
1	Diclofenac	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ N O ₂	-3,0	7,0
2	Didecyldimethylammonium	C ₂₂ H ₄₇ N	-1,0	3,2
2	Diltiazem	C ₂₂ H ₂₆ N ₂ O ₄ S	-7,2	4,2
1	Dipyridamole	C ₂₄ H ₄₀ N ₈ O ₄	-8,0	2,2
1	Flutolanil	C ₁₇ H ₁₆ F ₃ N O ₂	-1,2	6,0
1	Gabapentin	C ₉ H ₁₇ N O ₂	-3,2	6,7
2	Gliclazide	C ₁₅ H ₂₁ N ₃ O ₃ S	-4,9	5,9
2	Hydromorphenol	C ₁₇ H ₂₁ N O ₄	-3,0	5,3
2	Isophorone	C ₉ H ₁₄ O	-1,2	2,9
1	Ketoprofen	C ₁₆ H ₁₄ O ₃	-2,2	2,3
1	Lidocaine	C ₁₄ H ₂₂ N ₂ O	-4,6	3,6
1	MDMA	C ₁₁ H ₁₅ N O ₂	-2,4	3,5
1	Mebendazole	C ₁₆ H ₁₃ N ₃ O ₃	-2,8	2,4
1	Metamitron	C ₁₀ H ₁₀ N ₄ O	-3,3	8,2
2	Methadone	C ₂₁ H ₂₇ N O	-3,0	3,1
2	Metoclopramide	C ₁₄ H ₂₂ Cl N ₃ O ₂	-2,8	1,6
1	Metoprolol	C ₁₅ H ₂₅ N O ₃	-1,2	4,0
1	N,N'-Diphenylguanidine	C ₁₃ H ₁₃ N ₃	-1,1	1,8
1	Naproxen	C ₁₄ H ₁₄ O ₃	-1,7	2,7
2	Norverapamil	C ₂₆ H ₃₆ N ₂ O ₄	-5,7	6,7
2	Omeprazole sulphone	C ₁₇ H ₁₉ N ₃ O ₄ S	-2,3	4,2
2	Oxcarbazepine	C ₁₅ H ₁₂ N ₂ O ₂	-7,3	3,7
2	Oxybenzone	C ₁₄ H ₁₂ O ₃	-2,8	2,8

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	Pantoprazole	C ₁₆ H ₁₅ F ₂ N ₃ O ₄ S	-2,1	7,2
1	Pencycuron	C ₁₉ H ₂₁ Cl N ₂ O	-3,1	5,1
1	Propranolol	C ₁₆ H ₂₁ N O ₂	-3,6	5,9
2	Propylhexedrine	C ₁₀ H ₂₁ N	-1,2	2,2
1	Prosulfocarb	C ₁₄ H ₂₁ N O S	-4,1	4,1
2	Quinoline	C ₉ H ₇ N	-2,4	4,3
2	Rivaroxaban	C ₁₉ H ₁₈ Cl N ₃ O ₅ S	-1,5	5,1
2	Sitagliptin	C ₁₆ H ₁₅ F ₆ N ₅ O	-1,6	4,3
1	Sotalol	C ₁₂ H ₂₀ N ₂ O ₃ S	-4,5	3,0
1	Sulfapyridine	C ₁₁ H ₁₁ N ₃ O ₂ S	-1,6	5,5
2	Sulpiride	C ₁₅ H ₂₃ N ₃ O ₄ S	-2,1	1,6
2	Tetrakis(2-hydroxypropyl)ethylenediamine	C ₁₄ H ₃₂ N ₂ O ₄	-5,8	2,8
1	Trimethoprim	C ₁₄ H ₁₈ N ₄ O ₃	-1,3	3,0
2	Triphenyl phosphate	C ₁₈ H ₁₅ O ₄ P	-1,9	3,1
1	Valsartan	C ₂₄ H ₂₉ N ₅ O ₃	-2,5	6,3
2	Venlafaxine	C ₁₇ H ₂₇ N O ₂	-2,0	6,4
2	Verapamil	C ₂₇ H ₃₈ N ₂ O ₄	-4,7	3,3

TABEL 37 SIGNIFICANT TOENAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
1	Chloridazon	C ₁₀ H ₈ Cl N ₃ O	3,5	4,6
1	Desaminotribuzin	C ₈ H ₁₃ N ₃ O S	2,0	6,6
1	Dimethenamid	C ₁₂ H ₁₈ Cl N O ₂ S	1,1	1,2
1	Fluoxastobin	C ₂₁ H ₁₆ Cl F N ₄ O ₅	1,4	5,1
2	Terbutylazine	C ₉ H ₁₆ Cl N ₅	1,7	2,6
1	Thiacloprid	C ₁₀ H ₉ Cl N ₄ S	1,7	3,2

NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Meetronde 2 (onderzoekperiode 19.03 – 23.03.'22) met EBCT 15 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.9

NTS PLOT VAN DE NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 19.03 – 23.03.'22) MET EBCT 15 MIN



TABEL 38 SIGNIFICANT AFNAME NEGATIEF IONISERENDE KANDIDAATGIDSSTOF (ONDERZOEKSPERIODE 19.03 – 23.03.'22) MET EBCT 15 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
Kandidaatgidsstof	1	Furosemide	C ₁₂ H ₁₁ Cl N ₂ O ₅ S	-1,3	4,8

TABEL 39 SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
1	3-Nitrofenol	C ₆ H ₅ N O ₃	-1,1	3,6
2	Mycophenolic acid	C ₁₇ H ₂₀ O ₆	-1,5	4,0
2	Valsartan	C ₂₄ H ₂₉ N ₅ O ₃	-1,1	6,1

TABEL 40 SIGNIFICANT TOENAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENT

Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
2	Chlorothiazide	C ₇ H ₆ Cl N ₃ O ₄ S ₂	2,8	6,0

Meetronde 6 (onderzoekperiode 16.07 – 20.07.'22) met EBCT 30 min. en DWA condities.**FIGUUR 0.10****NTS PLOT VAN DE NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 16.07 – 20.07.'22) MET EBCT 30 MIN****TABEL 41 SIGNIFICANT AFNAME NEGATIEF IONISERENDE KANDIDAATGIDSSTOF (ONDERZOEKSPERIODE 16.07 – 20.07.'22) MET EBCT 30 MIN**

	Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
Kandidaatgidsstof	1	Furosemide	C ₁₂ H ₁₁ ClN ₂ O ₅ S	-6,8	3,1

TABEL 42 SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN

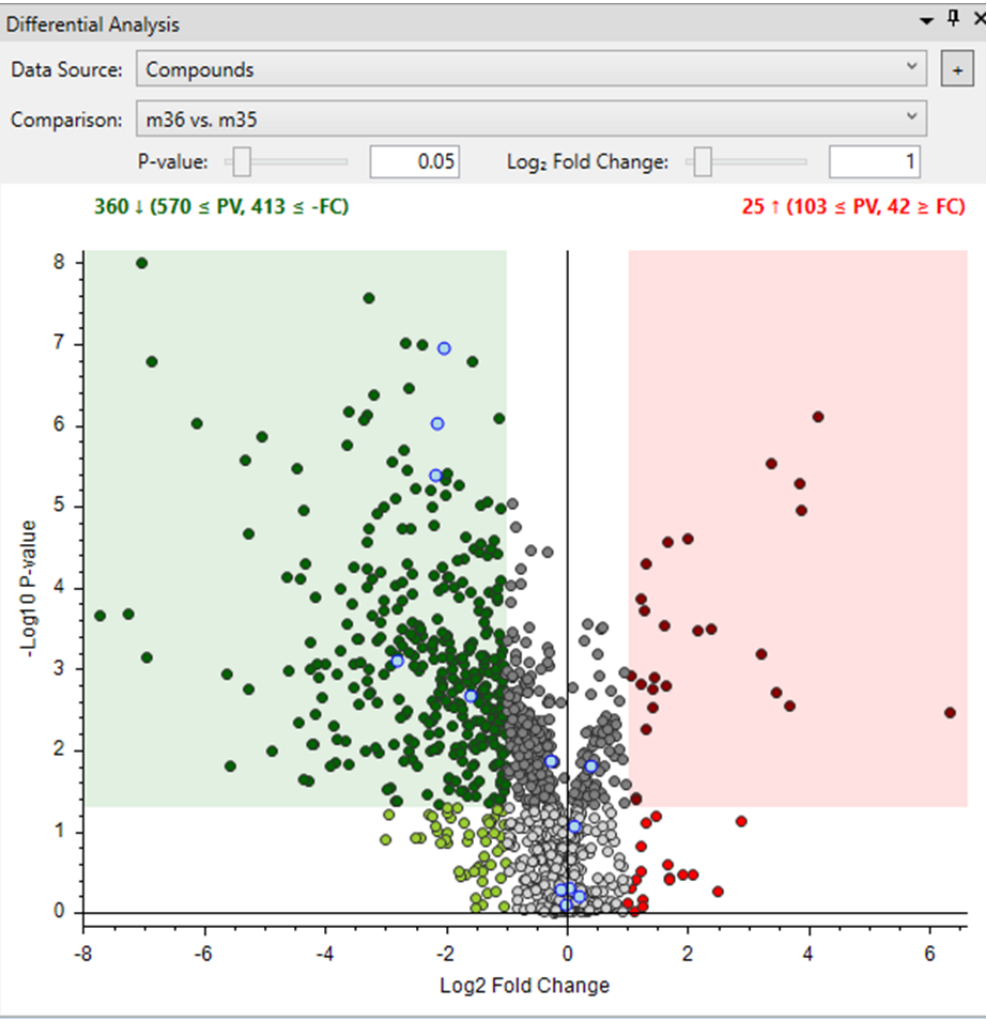
Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
1	3,4-Dimethylbenzenesulfonic acid	C ₈ H ₁₀ O ₃ S	-2,3	2,5
1	Bentazone	C ₁₀ H ₁₂ N ₂ O ₃ S	-2,9	2,2
2	Losartan	C ₂₂ H ₂₃ ClN ₆ O	-1,0	3,2
1	Saccharin	C ₇ H ₅ N ₃ O ₃ S	-3,1	4,3
2	Xylenesulfonate	C ₈ H ₁₀ O ₃ S	-2,5	3,6

TABEL 43: SIGNIFICANT TOENAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
1	Acesulfame	C ₄ H ₅ N ₃ O ₄ S	1,5	5,9

Meetronde 10 (onderzoekperiode 28.11 – 02.12.’22) met EBCT 17 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.11 NTS PLOT VAN DE NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 28.11 – 02.12.’22) MET EBCT 17 MIN



TABEL 44 SIGNIFICANT AFNAME NEGATIEF IONISERENDE KANDIDAATGIDSSTOF (ONDERZOEKSPERIODE 28.11 – 02.12.’22) MET EBCT 17 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
Kandidaatgidsstof	1	Furosemide	C ₁₂ H ₁₁ Cl N ₂ O ₅ S	-2,8	3,1
Gidsstof	1	Hydrochlorothiazide	C ₇ H ₈ Cl N ₃ O ₄ S ₂	-2,0	6,9

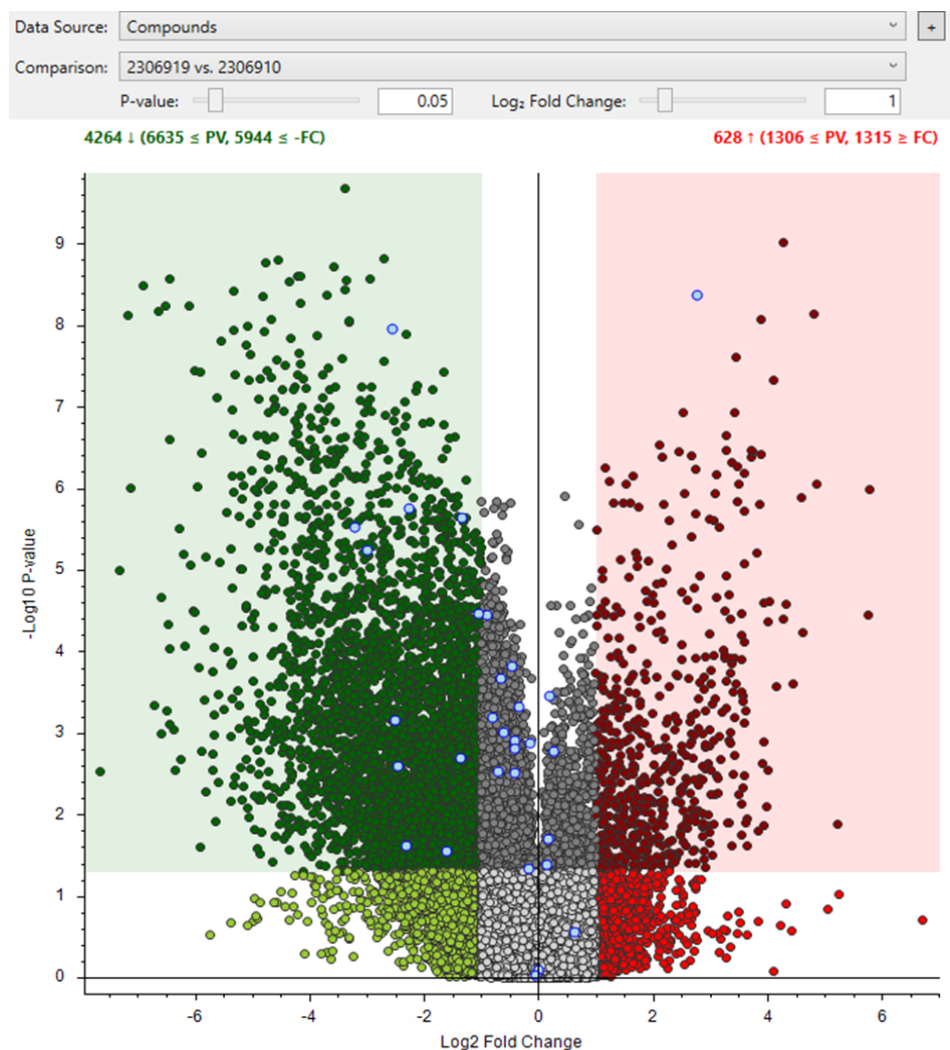
TABEL 45 SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	Fludioxonil	C ₁₂ H ₆ F ₂ N ₂ O ₂	-2,2	6,0
1	Saccharin	C ₇ H ₅ N O ₃ S	-2,2	5,4
2	Xylenesulfonate	C ₈ H ₁₀ O ₃ S	-1,6	2,7

Meetronde 13 (onderzoekperiode 11.02 – 15.02.'23) met EBCT 23 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.12

NTS PLOT VAN DE NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 11.02 – 15.02.'23) MET EBCT 23 MIN



TABEL 46 SIGNIFICANT AFNAME NEGATIEF IONISERENDE KANDIDAATGIDSSTOF (ONDERZOEKSPERIODE 11.02 – 15.02.'23) MET EBCT 23 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
Kandidaatgidsstof	2	Furosemide	C ₁₂ H ₁₁ Cl N ₂ O ₅ S	-2,5	3,2
Gidsstof	2	Hydrochlorothiazide	C ₇ H ₈ Cl N ₃ O ₄ S ₂	-2,3	5,8

TABEL 47 SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN

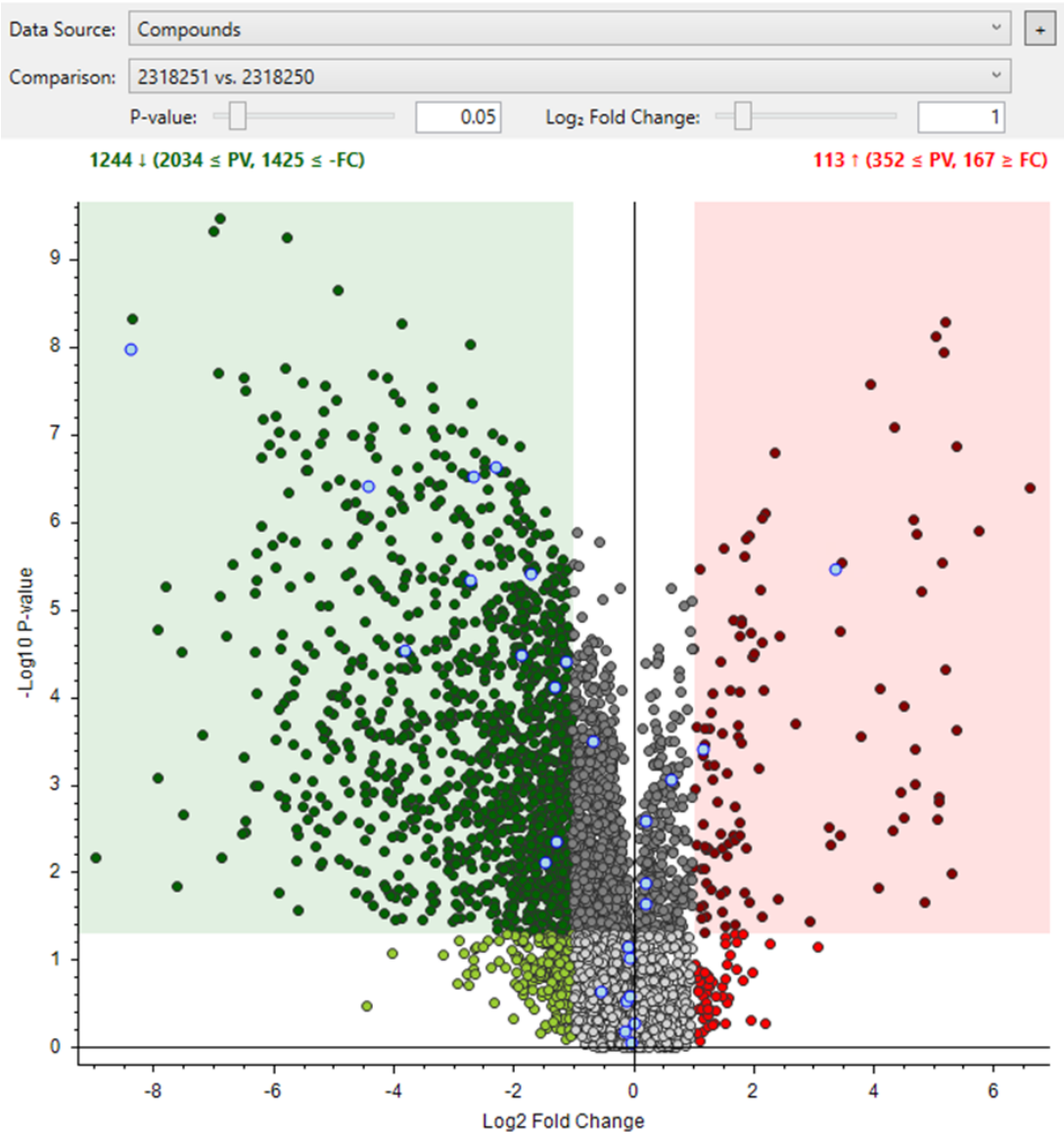
Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
2	1-(Carboxymethyl)cyclohexanecarboxylic acid	C ₉ H ₁₄ O ₄	-2,3	1,6
1	3-Nitrofenol	C ₆ H ₅ N O ₃	-1,6	1,6
2	3-tert-Butyladipic acid	C ₁₀ H ₁₈ O ₄	-3,2	5,5
2	Acetazolamide	C ₄ H ₆ N ₄ O ₃ S ₂	-1,1	4,5
2	Mycophenolic acid	C ₁₇ H ₂₀ O ₆	-3,0	5,2
2	Rivaroxaban	C ₁₉ H ₁₈ Cl N ₃ O ₅ S	-1,3	5,6
2	Saccharin	C ₇ H ₅ N O ₃ S	-2,5	8,0

TABEL 48 SIGNIFICANT TOENAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
2	Chlorothiazide	C ₇ H ₆ Cl N ₃ O ₄ S ₂	2,8	8,4

Meetronde 15 (onderzoekperiode 15.04 – 19.04.'23) met EBCT 23 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.13 NTS PLOT VAN DE NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 15.04 – 19.04.'23) MET EBCT 23 MIN



TABEL 49 SIGNIFICANT AFNAME NEGATIEF IONISERENDE KANDIDAATGIDSSTOF (ONDERZOEKSPERIODE 15.04 – 19.04.'23) MET EBCT 23 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
Kandidaatgidsstof	1	Furosemide	C ₁₂ H ₁₁ Cl N ₂ O ₅ S	-2,7	5,3
Gidsstof	1	Hydrochlorothiazide	C ₇ H ₈ Cl N ₃ O ₄ S ₂	-2,7	6,5

TABEL 50 **SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN**

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	1,7-Dimethyluric acid	$C_7 H_8 N_4 O_3$	-8,4	8,0
2	3-tert-Butyladipic acid	$C_{10} H_{18} O_4$	-4,4	6,4
1	4-Nitrophenol	$C_6 H_5 N O_3$	-1,3	2,3
1	Cyclamic acid	$C_6 H_{13} N O_3 S$	-1,5	2,1
1	Fludioxonil	$C_{12} H_6 F_2 N_2 O_2$	-1,1	4,4
2	Rivaroxaban	$C_{19} H_{18} Cl N_3 O_5 S$	-1,3	4,1
1	Saccharin	$C_7 H_5 N O_3 S$	-1,9	4,5
1	Valsartan	$C_{24} H_{29} N_5 O_3$	-1,7	5,4
2	Xylenesulfonate	$C_8 H_{10} O_3 S$	-2,3	6,6

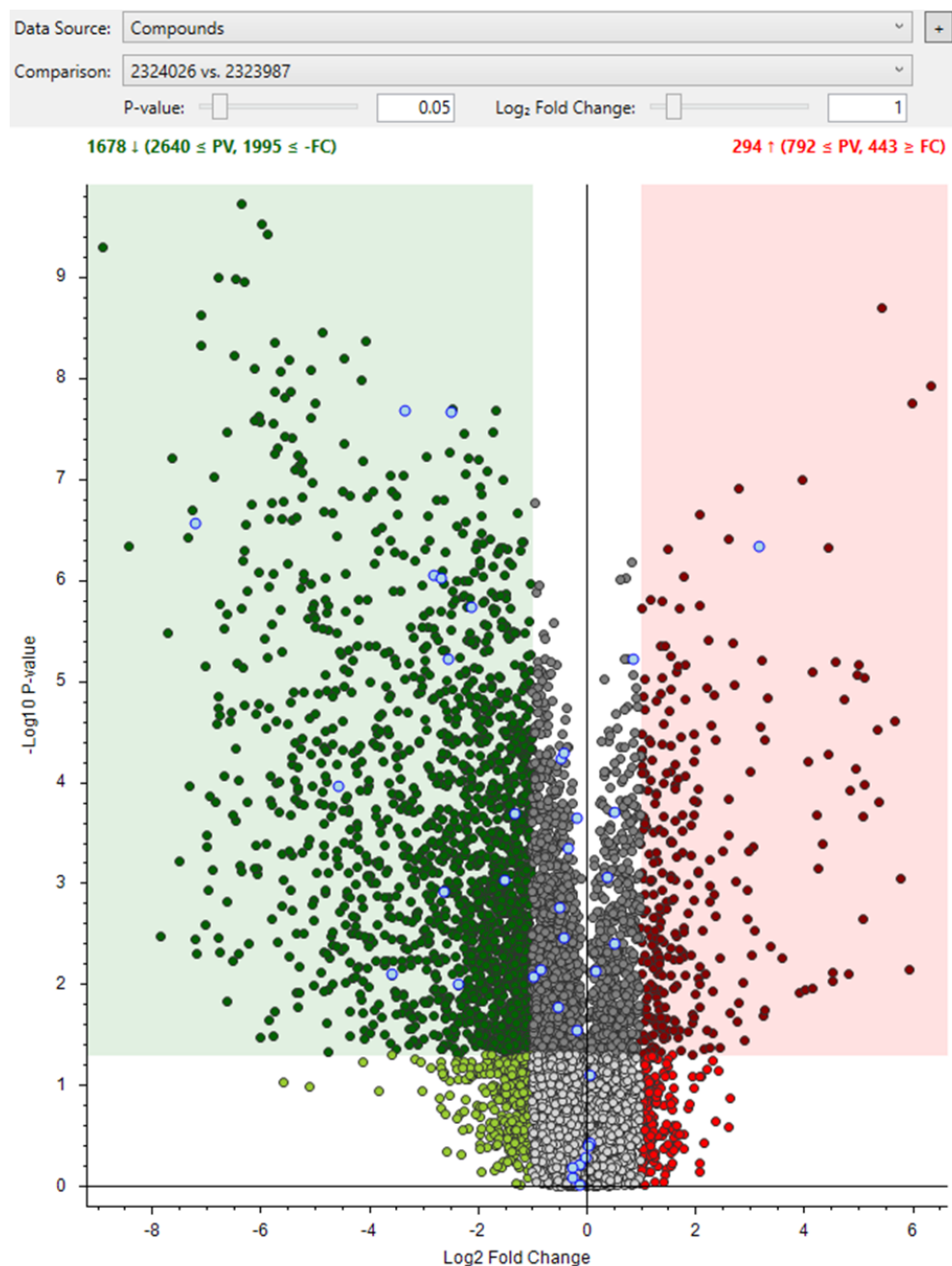
TABEL 51 **SIGNIFICANT TOENAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN**

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
1	2-Methyl-4-chlorophenoxyacetic acid (MCPA)	$C_9 H_9 Cl O_3$	1,2	3,4
2	Chlorothiazide	$C_7 H_6 Cl N_3 O_4 S_2$	3,4	5,5

Meetronde 16 (onderzoekperiode 20.05 – 24.05.'23) met EBCT 23 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.14

NTS PLOT VAN DE NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 20.05 – 24.05.'23) MET EBCT 23 MIN



TABEL 52

SIGNIFICANT AFNAME NEGATIEF IONISERENDE KANDIDAATGIDSSTOF (ONDERZOEKSPERIODE 20.05 – 24.05.'23) MET EBCT 23 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
Kandidaatgidsstof	1	Furosemide	C ₁₂ H ₁₁ ClN ₂ O ₅ S	-3,3	7,7
Gidsstof	2	Hydrochlorothiazide	C ₇ H ₈ ClN ₃ O ₄ S ₂	-2,7	6,0

TABEL 53 **SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN**

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	1-(Carboxymethyl)cyclohexanecarboxylic acid	C ₉ H ₁₄ O ₄	-3,6	2,1
2	1,7-Dimethyluric acid	C ₇ H ₈ N ₄ O ₃	-7,2	6,6
2	3-Phenoxybenzoic acid	C ₁₃ H ₁₀ O ₃	-2,5	5,2
2	3-tert-Butyladipic acid	C ₁₀ H ₁₈ O ₄	-4,6	4,0
2	Caffeic acid	C ₉ H ₈ O ₄	-2,4	2,0
2	Desamino metamitron	C ₁₀ H ₉ N ₃ O	-2,1	5,7
2	Flutolanil	C ₁₇ H ₁₆ F ₃ N O ₂	-1,3	3,7
1	Furosemide	C ₁₂ H ₁₁ Cl N ₂ O ₅ S	-3,3	7,7
2	Hydrochlorothiazide	C ₇ H ₈ Cl N ₃ O ₄ S ₂	-2,7	6,0
1	p-Toluenesulfonic acid	C ₇ H ₈ O ₃ S	-2,6	2,9
2	Rivaroxaban	C ₁₉ H ₁₈ Cl N ₃ O ₅ S	-1,5	3,0
2	Saccharin	C ₇ H ₅ N O ₃ S	-2,8	6,0
2	Valsartan	C ₂₄ H ₂₉ N ₅ O ₃	-2,5	7,7

TABEL 54 **SIGNIFICANT TOENAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN**

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	Chlorothiazide	C ₇ H ₆ Cl N ₃ O ₄ S ₂	3,2	6,3

BIJLAGE V

NON TARGET SCREENING BODAC-NIEUW

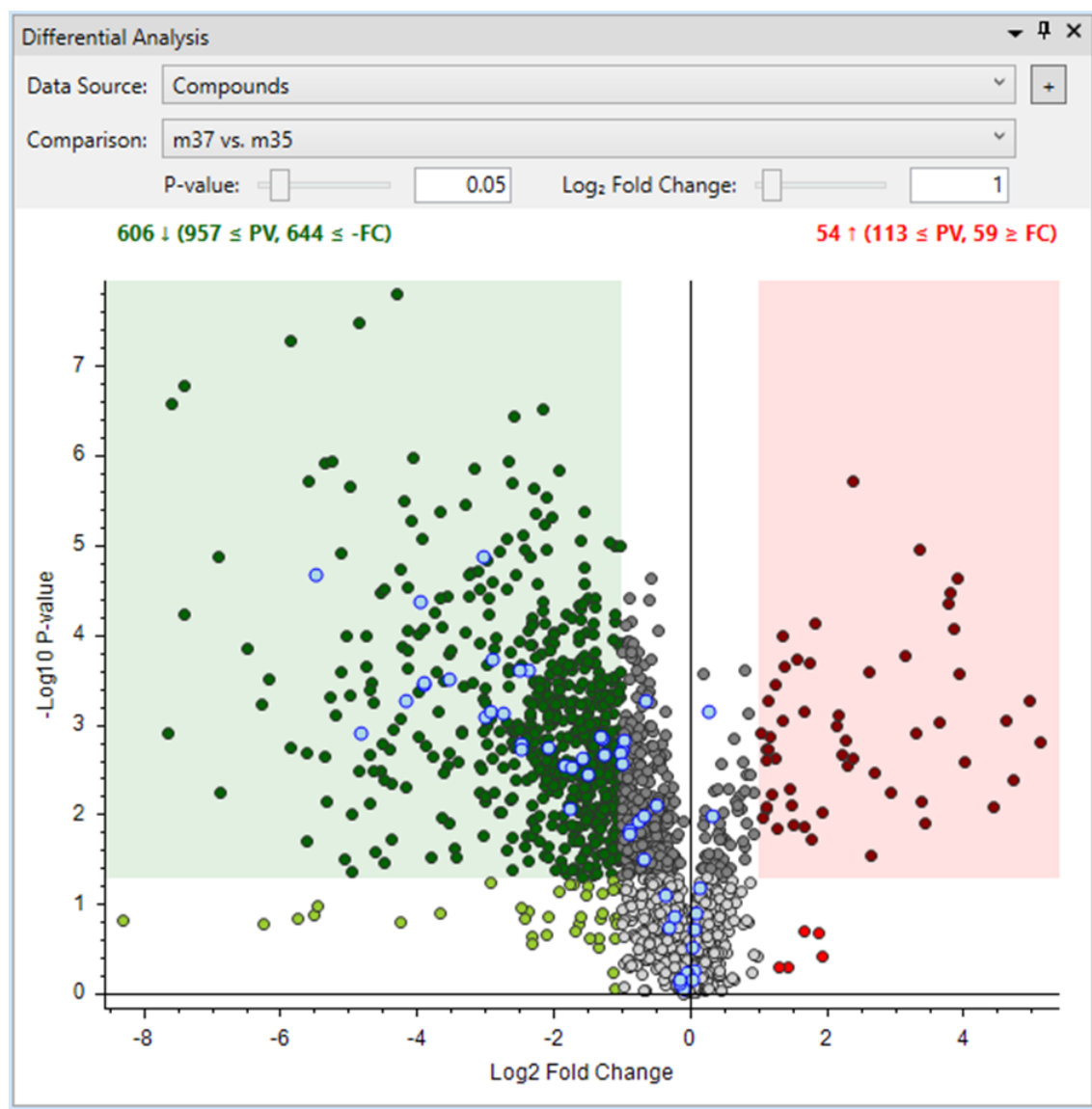
Van de NTS resultaten van is per screening een figuur geplot. De screening is opgesplitst in positief en negatief ioniserende componenten. Elke stip in een plot staat voor een component. De blauwe stippen zijn bekende componenten. De groene stippen zijn onbekende componenten die zijn afgenomen. De rode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

In het groene vlak van de plot zijn de componenten 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 componenten weergegeven die significant zijn toegenomen in het filtraat ten opzichte van het influent van de BODAC filter. Componenten die buiten de gekleurde vlakken vallen zijn niet significant ($\leq PV$) toe- ($\geq \log_2$ fold change) of afgenomen ($\leq -\log_2$ fold change).

POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Meetronde 4 (onderzoekperiode 28.11 – 02.12.'22) met EBCT 15 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.15 NTS PLOT VAN DE POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 28.11 – 02.12.'22) MET EBCT 15 MIN



TABEL 55 SIGNIFICANT AFNAME POSITIEF IONISERENDE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ONDERZOEKSPERIODE 28.11 – 02.12.'22) MET EBCT 15 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
Gidsstof	2	5-Methylbenzotriazole	$C_7 H_7 N_3$	-4,8	2,9
Gidsstof	1	Benzotriazole	$C_6 H_5 N_3$	-3,5	3,5
Gidsstof	1	Carbamazepine	$C_{15} H_{12} N_2 O$	-1,6	2,6
Kandidaatgidsstof	1	Clarithromycin	$C_{38} H_{69} N O_{13}$	-1,7	2,5
Gidsstof	1	Diclofenac	$C_{14} H_{11} Cl_2 N O_2$	-1,3	2,9
Gidsstof	1	Gabapentin	$C_9 H_{15} N O$	-1,0	2,7
Gidsstof	1	Metoprolol	$C_{15} H_{25} N O_3$	-3,0	3,1
Kandidaatgidsstof	1	Propranolol	$C_{16} H_{21} N O_2$	-5,5	4,7
Gidsstof	1	Sotalol	$C_{12} H_{20} N_2 O_3 S$	-3,0	4,9

TABEL 56 SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	1-Methylbenzotriazole	$C_7 H_7 N_3$	-4,2	3,3
1	Atenolol	$C_{14} H_{22} N_2 O_3$	-2,4	3,6
1	Bisoprolol	$C_{18} H_{31} N O_4$	-2,9	3,1
1	Carbamazepine 10,11-epoxide	$C_{15} H_{12} N_2 O_2$	-1,7	2,1
1	Fluopyram	$C_{16} H_{11} Cl F_6 N_2 O$	-1,3	2,7
1	Flutolanil	$C_{17} H_{16} F_3 N O_2$	-2,1	2,7
1	Lidocaine	$C_{14} H_{22} N_2 O$	-2,5	3,6
2	MDMA	$C_{11} H_{15} N O_2$	-4,0	4,4
1	N,N'-Diphenylguanidine	$C_{13} H_{13} N_3$	-3,9	3,5
2	O-Desmethylenlafaxine	$C_{16} H_{25} N O_2$	-1,5	2,4
1	Prosulfocarb	$C_{14} H_{21} N O S$	-2,7	3,1
1	Sulfapyridine	$C_{11} H_{11} N_3 O_2 S$	-1,8	2,5
2	Tramadol	$C_{16} H_{25} N O_2$	-2,5	2,8
1	Valsartan	$C_{24} H_{29} N_5 O_3$	-1,3	2,8

Meetronde 7 (onderzoekperiode 11.02 – 15.02.'23) met EBCT 15 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.16

NTS PLOT VAN DE POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 11.02 – 15.02.'23) MET EBCT 15 MIN



TABEL 57

SIGNIFICANT AFNAME POSITIEF IONISERENDE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ONDERZOEKSPERIODE 11.02 – 15.02.'23) MET EBCT 15 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
Kandidaatgidsstof	2	Amisulpride	$C_{17}H_{27}N_3O_4S$	-2,1	5,4
Kandidaatgidsstof	2	Azithromycin	$C_{38}H_{72}N_2O_{12}$	-1,5	5,3
Gidsstof	1	Benzotriazole	$C_6H_5N_3$	-1,9	7,6
Gidsstof	2	Carbamazepine	$C_{15}H_{12}N_2O$	-1,5	2,4
Gidsstof	1	Gabapentin	$C_9H_{17}NO_2$	-2,4	4,3
Gidsstof	1	Metoprolol	$C_{15}H_{25}NO_3$	-1,9	3,9
Kandidaatgidsstof	1	Propranolol	$C_{16}H_{21}NO_2$	-3,7	6,4
Gidsstof	1	Sotalol	$C_{12}H_{20}N_2O_3S$	-1,8	2,7
Gidsstof	1	Trimethoprim	$C_{14}H_{18}N_4O_3$	-2,4	7,7

TABEL 58 SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	1-(2,6-Dichlorophenyl)-2-indolone	C ₁₄ H ₉ Cl ₂ N O	-2,0	4,1
2	1-(4-hydroxyphenyl)propane-1,2-diol	C ₉ H ₁₂ O ₃	-2,1	3,9
2	1H-indol-3-yl(pyridin-2-yl)methanol	C ₁₄ H ₁₂ N ₂ O	-1,3	1,5
2	2-(3,4-Dimethoxyphenyl)-5-methylamino-2-isopropylvaleronitrile	C ₁₇ H ₂₆ N ₂ O ₂	-1,0	5,3
2	2,5-Dimethylpyrazine	C ₆ H ₈ N ₂	-3,6	6,9
2	2-Amino-6-methylmercaptapurine	C ₆ H ₇ N ₅ S	-2,9	5,8
2	2-Anisidine	C ₇ H ₉ N O	-1,7	4,6
2	2-Fluoromethamphetamine	C ₁₀ H ₁₄ F N	-2,2	2,6
1	2-Methyl-S-benzothiazole	C ₈ H ₇ N S ₂	-3,6	4,7
2	3-Hydroxy-2-methylpyridine	C ₆ H ₇ N O	-1,3	4,0
1	4'-Hydroxydiclofenac	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ N O ₃	-1,2	4,6
1	4-Methylbenzotriazole	C ₇ H ₇ N ₃	-2,8	7,6
2	8-Hydroxymirtazapine	C ₁₇ H ₁₉ N ₃ O	-5,2	3,0
2	Alfuzosin	C ₁₉ H ₂₇ N ₅ O ₄	-2,1	2,8
2	Aliskiren	C ₃₀ H ₅₃ N ₃ O ₆	-1,3	4,7
2	Amitriptyline	C ₂₀ H ₂₃ N	-2,8	4,9
2	Amphetamine	C ₉ H ₁₃ N	-1,8	3,3
2	Atazanavir	C ₃₈ H ₅₂ N ₆ O ₇	-2,3	5,0
1	Atenolol	C ₁₄ H ₂₂ N ₂ O ₃	-1,5	5,3
2	Benzophenone	C ₁₃ H ₁₀ O	-2,4	5,3
1	Bisoprolol	C ₁₈ H ₃₁ N O ₄	-1,7	5,2
2	Caffeine	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂	-1,2	5,7
1	Carbamazepine 10,11-epoxide	C ₁₅ H ₁₂ N ₂ O ₂	-1,2	4,6
2	Celiprolol	C ₂₀ H ₃₃ N ₃ O ₄	-1,1	5,3
2	Cimetidine	C ₁₀ H ₁₆ N ₆ S	-3,8	4,9
2	Climbazole	C ₁₅ H ₁₇ Cl N ₂ O ₂	-1,3	6,0
2	Clopidogrel	C ₁₆ H ₁₆ Cl N O ₂ S	-1,2	4,0
2	Clopidogrel carboxylic acid	C ₁₅ H ₁₄ Cl N O ₂ S	-2,9	4,2
2	Clozapine	C ₁₈ H ₁₉ Cl N ₄	-2,1	1,3
2	Desacetyl diltiazem	C ₂₀ H ₂₄ N ₂ O ₃ S	-2,5	5,6
2	Diltiazem	C ₂₂ H ₂₆ N ₂ O ₄ S	-1,8	5,6
1	Dipyridamole	C ₂₄ H ₄₀ N ₈ O ₄	-7,8	6,9
2	Escitalopram	C ₂₀ H ₂₁ F N ₂ O	-1,7	4,9
2	Famotidine	C ₈ H ₁₅ N ₇ O ₂ S ₃	-5,7	3,6
2	Flecainide	C ₁₇ H ₂₀ F ₆ N ₂ O ₃	-1,4	6,1
2	Fluconazole	C ₁₃ H ₁₂ F ₂ N ₆ O	-1,1	3,3
1	Flutolanil	C ₁₇ H ₁₆ F ₃ N O ₂	-1,2	3,2
2	Gliclazide	C ₁₅ H ₂₁ N ₃ O ₃ S	-4,7	5,4
2	Hydroxy bupropion	C ₁₃ H ₁₈ Cl N O ₂	-1,2	3,8
1	Imidacloprid	C ₉ H ₁₀ Cl N ₅ O ₂	-1,4	4,7
2	Iminostilbene	C ₁₄ H ₁₁ N	-1,4	6,0
1	Ketoprofen	C ₁₆ H ₁₄ O ₃	-1,1	2,5
1	Lidocaine	C ₁₄ H ₂₂ N ₂ O	-1,3	4,0
1	MDMA	C ₁₁ H ₁₅ N O ₂	-2,9	6,0
1	Mebendazole	C ₁₆ H ₁₃ N ₃ O ₃	-3,4	2,0
2	Methadone	C ₂₁ H ₂₇ N O	-1,2	4,4
2	Metoclopramide	C ₁₄ H ₂₂ Cl N ₃ O ₂	-1,6	3,5
2	Mirtazapine	C ₁₇ H ₁₉ N ₃	-4,8	3,7
1	N,N'-Diphenylguanidine	C ₁₃ H ₁₃ N ₃	-2,7	1,5
2	N-[(S)-(+)-1-Ethoxycarbonyl-3-phenylpropyl]-L-alanine	C ₁₅ H ₂₁ N O ₄	-1,7	6,0

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
1	Naproxen	C ₁₄ H ₁₄ O ₃	-1,4	3,8
2	Norverapamil	C ₂₆ H ₃₆ N ₂ O ₄	-5,5	2,5
2	Omeprazole sulphone	C ₁₇ H ₁₉ N ₃ O ₄ S	-1,5	3,1
2	Oxcarbazine	C ₁₅ H ₁₂ N ₂ O ₂	-1,4	3,5
2	Oxybenzone	C ₁₄ H ₁₂ O ₃	-2,1	5,1
2	Pantoprazole	C ₁₆ H ₁₅ F ₂ N ₃ O ₄ S	-1,7	5,0
2	PPG n9	C ₂₇ H ₅₆ O ₁₀	-2,5	4,4
2	Rivaroxaban	C ₁₉ H ₁₈ Cl N ₃ O ₅ S	-1,9	4,2
2	Sitagliptin	C ₁₆ H ₁₅ F ₆ N ₅ O	-1,6	4,2
2	Sulpiride	C ₁₅ H ₂₃ N ₃ O ₄ S	-2,1	5,4
2	Tapentadol	C ₁₄ H ₂₃ N O	-2,3	4,3
2	Telmisartan	C ₃₃ H ₃₀ N ₄ O ₂	-1,2	3,3
2	Tetrakis(2-hydroxypropyl)ethylenediamine	C ₁₄ H ₃₂ N ₂ O ₄	-2,3	6,4
1	Thiabendazole	C ₁₀ H ₇ N ₃ S	-4,8	6,3
2	Triphenyl phosphate	C ₁₈ H ₁₅ O ₄ P	-1,8	5,3
2	Verapamil	C ₂₇ H ₃₈ N ₂ O ₄	-2,5	7,1

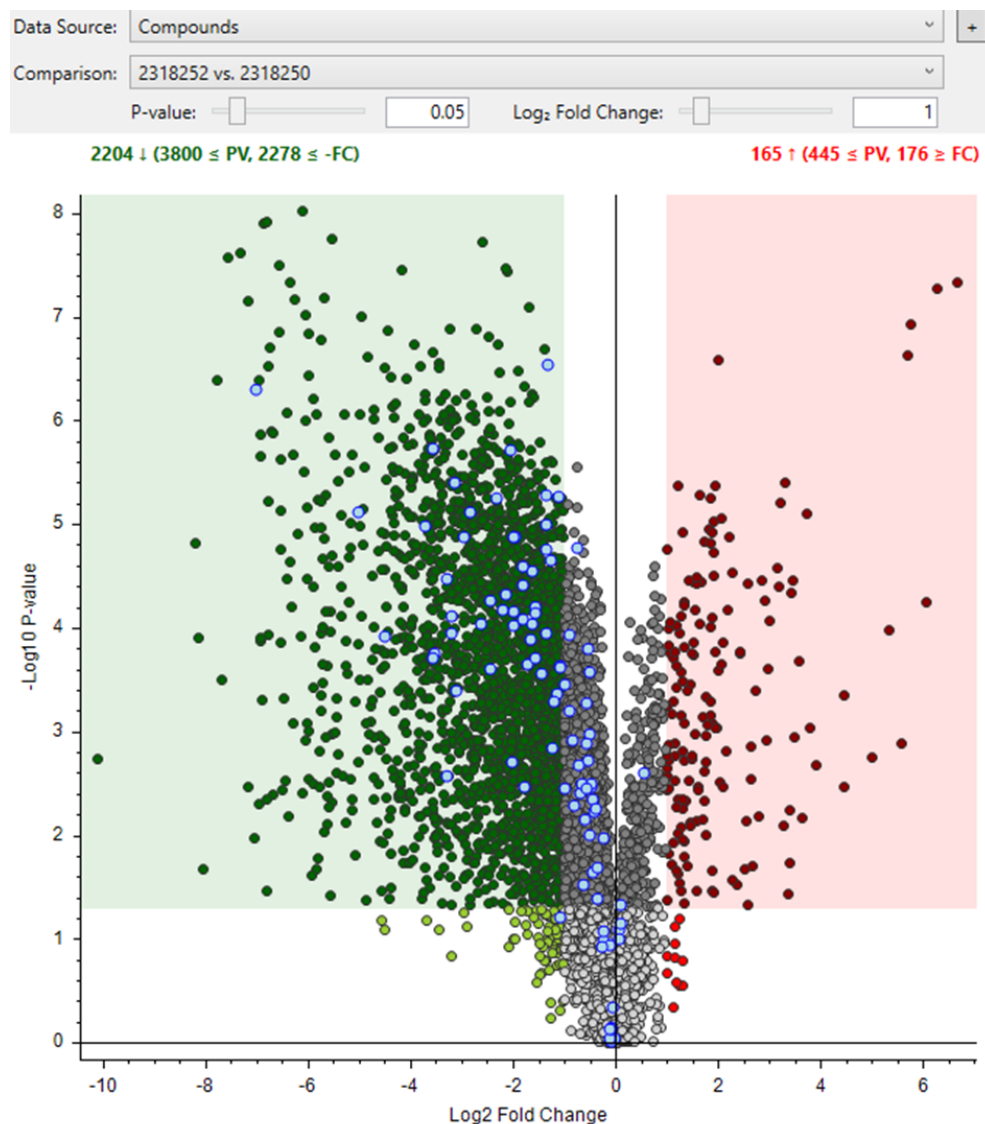
TABEL 59 SIGNIFICANT TOENAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	1H-indol-3-yl(pyridin-2-yl)methanol	C ₁₄ H ₁₂ N ₂ O	2,1	5,9

Meetronde 9 (onderzoekperiode 15.04 – 19.04.'23) met EBCT 17 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.17

NTS PLOT VAN DE POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 15.04 – 19.04.'23) MET EBCT 17 MIN



TABEL 60

SIGNIFICANT AFNAME POSITIEF IONISERENDE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ONDERZOEKSPERIODE 15.04 – 19.04.'23) MET EBCT 17 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
Gidsstof	1	4-Methylbenzotriazole	C ₇ H ₇ N ₃	-2,0	4,0
Gidsstof	1	5-Methylbenzotriazole	C ₇ H ₇ N ₃	-2,3	5,2
Kandidaatgidsstof	2	Amisulpride	C ₁₇ H ₂₇ N ₃ O ₄ S	-2,4	3,6
Gidsstof	1	Benzotriazole	C ₆ H ₅ N ₃	-1,4	3,9
Gidsstof	1	Diclofenac	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ N O ₂	-1,4	5,3
Gidsstof	1	Gabapentin	C ₉ H ₁₇ N O ₂	-2,0	4,9
Gidsstof	1	Metoprolol	C ₁₅ H ₂₅ N O ₃	-2,0	4,2
Kandidaatgidsstof	1	Propranolol	C ₁₆ H ₂₁ N O ₂	-3,7	5,0
Gidsstof	2	Trimethoprim	C ₁₄ H ₁₈ N ₄ O ₃	-2,5	4,3

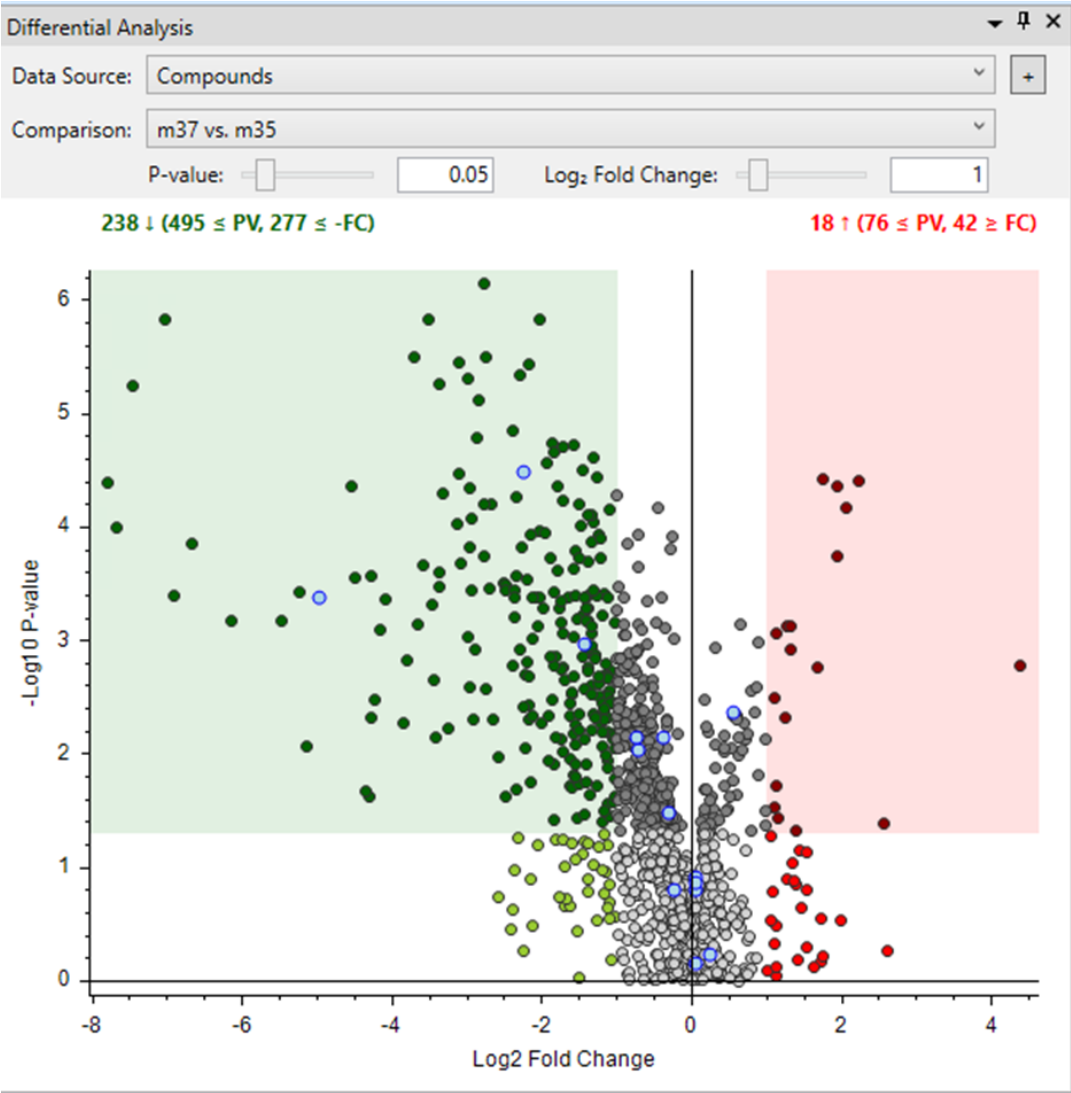
TABEL 61 SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) POSITIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
1	2-Methyl-S-benzothiazole	C ₈ H ₇ N S ₂	-3,2	4,0
2	3-Hydroxy-5-(hydroxymethyl)-2-methylisonicotinaldehyde oxime	C ₈ H ₁₀ N ₂ O ₃	-1,3	6,5
2	3-Methylbenzophenone	C ₁₄ H ₁₂ O	-3,3	2,6
1	4-Aminoantipyrine	C ₁₁ H ₁₃ N ₃ O	-3,2	5,4
1	4'-Hydroxydiclofenac	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ N O ₃	-1,1	5,3
2	Aliskiren	C ₃₀ H ₅₃ N ₃ O ₆	-1,5	3,6
1	Atenolol	C ₁₄ H ₂₂ N ₂ O ₃	-1,6	4,2
2	Azoxystrobin	C ₂₂ H ₁₇ N ₃ O ₅	-1,2	2,8
1	Bisoprolol	C ₁₈ H ₃₁ N O ₄	-2,0	4,9
1	Carbamazepine 10,11-epoxide	C ₁₅ H ₁₂ N ₂ O ₂	-1,3	4,8
2	Celiprolol	C ₂₀ H ₃₃ N ₃ O ₄	-1,6	3,7
2	Cimetidine	C ₁₀ H ₁₆ N ₆ S	-4,5	3,9
2	Clindamycin	C ₁₈ H ₃₃ Cl N ₂ O ₅ S	-1,1	3,6
2	Clopidogrel	C ₁₆ H ₁₆ Cl N O ₂ S	-1,6	4,6
2	Clopidogrel carboxylic acid	C ₁₅ H ₁₄ Cl N O ₂ S	-3,6	5,7
2	Desacetyl diltiazem	C ₂₀ H ₂₄ N ₂ O ₃ S	-2,8	5,1
2	Desmethylcitalopram	C ₁₉ H ₁₉ F N ₂ O	-1,8	4,4
2	Escitalopram	C ₂₀ H ₂₁ F N ₂ O	-2,1	4,3
2	Flecainide	C ₁₇ H ₂₀ F ₆ N ₂ O ₃	-1,6	4,0
1	Flutolanil	C ₁₇ H ₁₆ F ₃ N O ₂	-1,4	5,0
2	Gliclazide	C ₁₅ H ₂₁ N ₃ O ₃ S	-5,0	5,1
1	Imidacloprid	C ₉ H ₁₀ Cl N ₅ O ₂	-1,7	3,9
1	Ketoprofen	C ₁₆ H ₁₄ O ₃	-1,8	2,5
2	Labetalol	C ₁₉ H ₂₄ N ₂ O ₃	-3,5	3,8
2	Lamotrigine	C ₉ H ₇ Cl ₂ N ₅	-1,8	4,1
1	Lidocaine	C ₁₄ H ₂₂ N ₂ O	-1,7	3,7
1	MDMA	C ₁₁ H ₁₅ N O ₂	-2,6	4,0
1	Mebendazole	C ₁₆ H ₁₃ N ₃ O ₃	-3,6	3,7
1	N,N'-Diphenylguanidine	C ₁₃ H ₁₃ N ₃	-2,2	4,2
1	Naproxen	C ₁₄ H ₁₄ O ₃	-1,6	4,1
2	Norverapamil	C ₂₆ H ₃₆ N ₂ O ₄	-7,0	6,3
2	O-Desmethylvenlafaxine	C ₁₆ H ₂₅ N O ₂	-1,1	3,6
1	Pirimicarb	C ₁₁ H ₁₈ N ₄ O ₂	-1,1	3,4
1	Propiconazole	C ₁₅ H ₁₇ Cl ₂ N ₃ O ₂	-1,3	4,6
2	Rivaroxaban	C ₁₉ H ₁₈ Cl N ₃ O ₅ S	-2,0	5,7
2	Sulpiride	C ₁₅ H ₂₃ N ₃ O ₄ S	-2,0	2,7
2	Tapentadol	C ₁₄ H ₂₃ N O	-3,3	4,5
2	Tetrakis(2-hydroxypropyl)ethylenediamine	C ₁₄ H ₃₂ N ₂ O ₄	-3,0	4,9
2	Triphenyl phosphate	C ₁₈ H ₁₅ O ₄ P	-1,8	4,6
2	Verapamil	C ₂₇ H ₃₈ N ₂ O ₄	-3,2	4,1

NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Meetronde 4 (onderzoekperiode 28.11 – 02.12.’22) met EBCT 15 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.18 NTS PLOT VAN DE NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 28.11 – 02.12.’22) MET EBCT 15 MIN

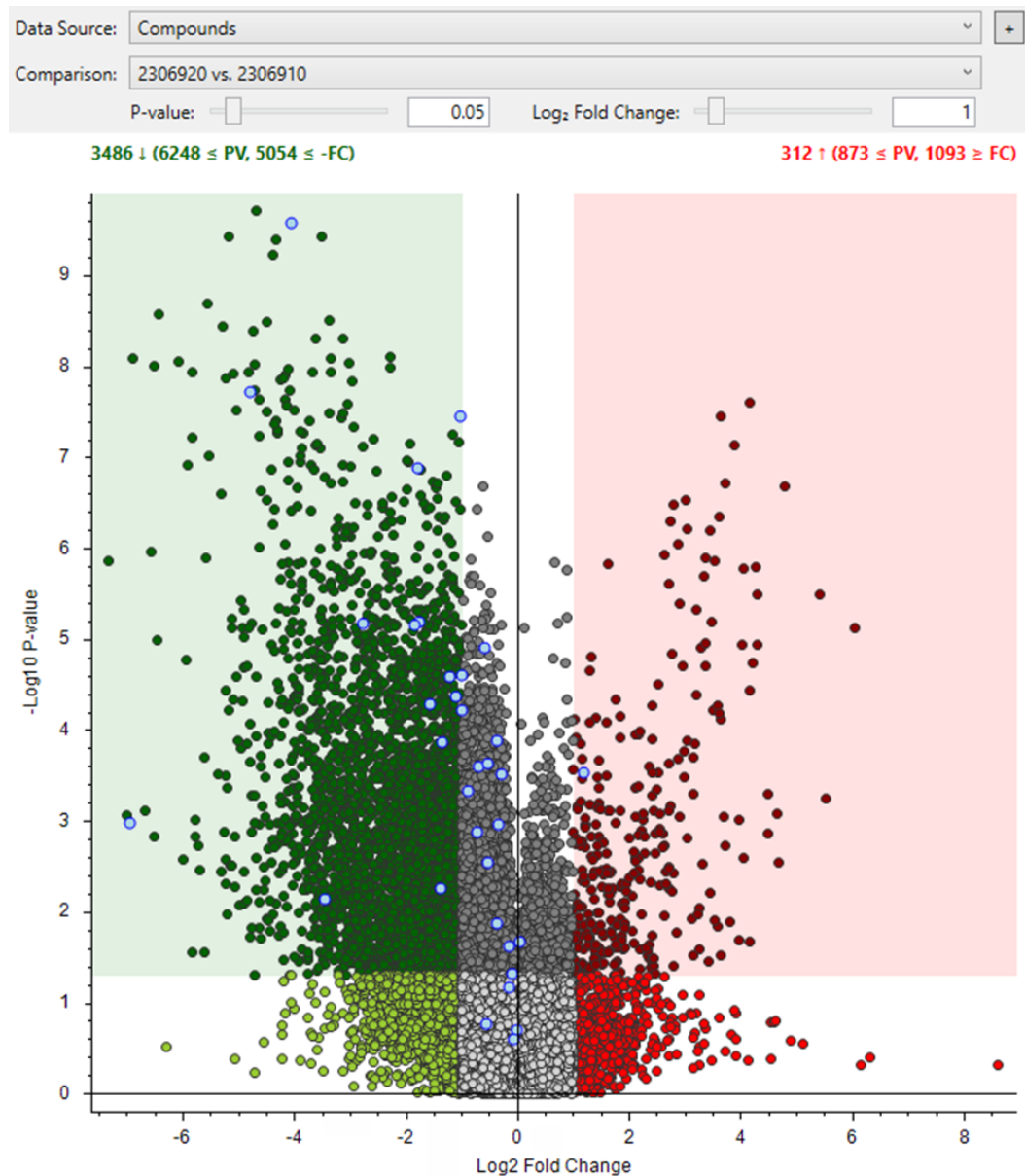


TABEL 62 SIGNIFICANT AFNAME NEGATIEF IONISERENDE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ONDERZOEKSPERIODE 28.11 – 02.12.’22) MET EBCT 15 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
Kandidaatgidsstof	1	Furosemide	$C_{12}H_{11}ClN_2O_5S$	-1,4	3,0
Gidsstof	1	Hydrochlorothiazide	$C_7H_8ClN_3O_4S_2$	-2,2	4,5

Meetronde 7 (onderzoekperiode 11.02 – 15.02.'23) met EBCT 15 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.19 NTS PLOT VAN DE NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 11.02 – 15.02.'23) MET EBCT 15 MIN



TABEL 63 SIGNIFICANT AFNAME NEGATIEF IONISERENDE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ONDERZOEKSPERIODE 11.02 – 15.02.'23) MET EBCT 15 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
Gidsstof	1	4-Methylbenzotriazole	C ₇ H ₇ N ₃	-2,8	5,2
Gidsstof	1	5-Methylbenzotriazole	C ₇ H ₇ N ₃	-3,5	2,1
Kandidaatgidsstof	1	Furosemide	C ₁₂ H ₁₁ Cl N ₂ O ₅ S	-1,0	7,4
Gidsstof	2	Hydrochlorothiazide	C ₇ H ₈ Cl N ₃ O ₄ S ₂	-1,6	4,3

TABEL 64 SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN

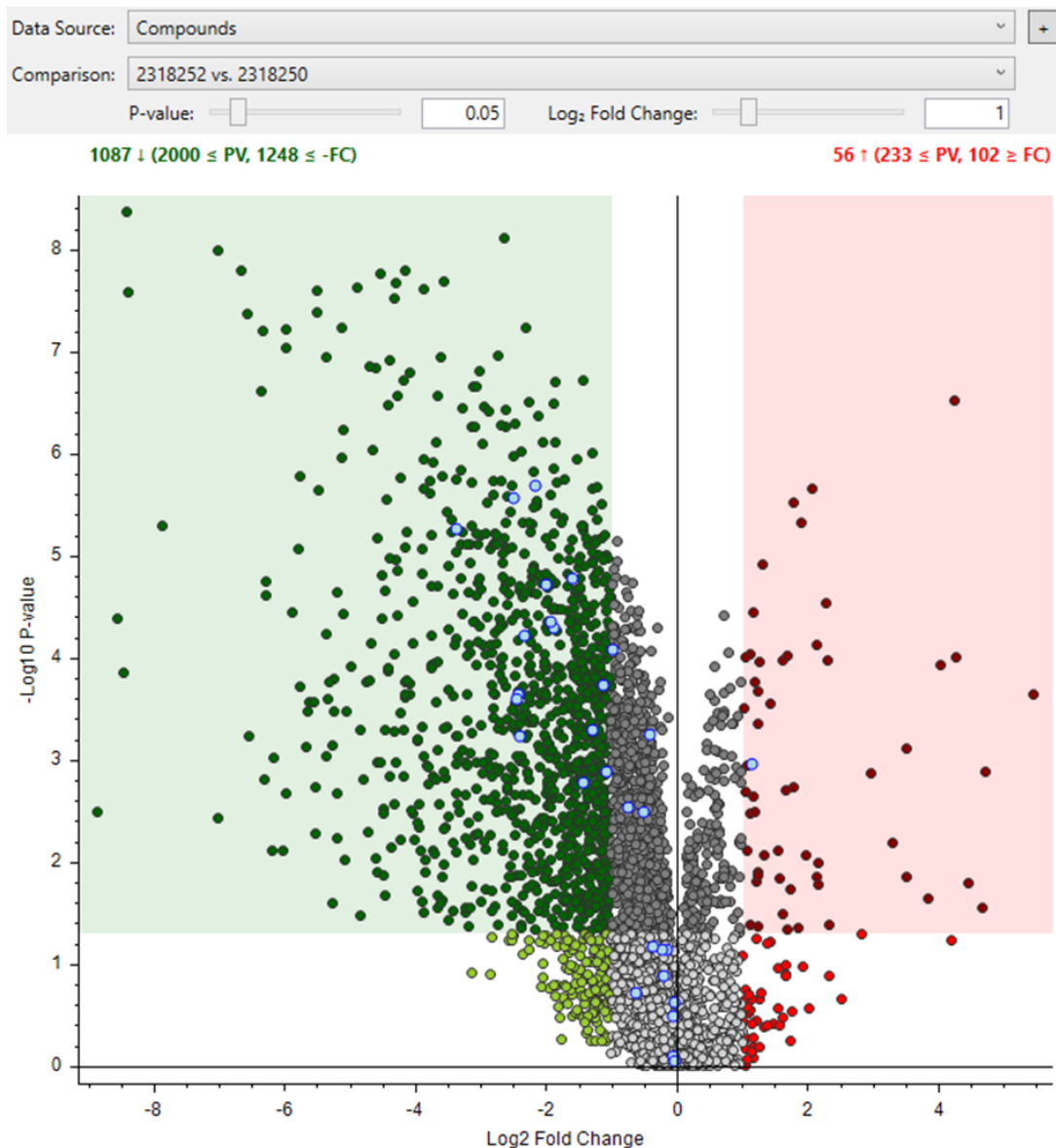
Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	1,7-Dimethyluric acid	$C_7 H_8 N_4 O_3$	-6,9	3,0
2	3-tert-Butyladipic acid	$C_{10} H_{18} O_4$	-1,4	3,9
2	4-Dodecylbenzenesulfonic acid	$C_{18} H_{30} O_3 S$	-1,1	4,4
1	4-Nitrophenol	$C_6 H_5 N O_3$	-1,4	2,3
2	4-Toluenesulfonamide	$C_7 H_9 N O_2 S$	-4,8	7,7
2	Acetazolamide	$C_4 H_6 N_4 O_3 S_2$	-1,8	5,2
2	Bicalutamide	$C_{18} H_{14} F_4 N_2 O_4 S$	-1,2	4,6
2	Chlorothiazide	$C_7 H_6 Cl N_3 O_4 S_2$	-1,0	4,2
2	Fludioxonil	$C_{12} H_6 F_2 N_2 O_2$	-4,1	9,6
2	Mycophenolic acid	$C_{17} H_{20} O_6$	-1,7	5,2
2	Rivaroxaban	$C_{19} H_{18} Cl N_3 O_5 S$	-1,8	6,9

TABEL 65 SIGNIFICANT TOENAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	Xanthosine	$C_{10} H_{12} N_4 O_6$	1,2	3,5

Meetronde 9 (onderzoekperiode 15.04 – 19.04.'23) met EBCT 17 min. en DWA condities.

FIGUUR 0.20 NTS PLOT VAN DE NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN (ONDERZOEKSPERIODE 15.04 – 19.04.'23) MET EBCT 17 MIN



TABEL 66 SIGNIFICANT AFNAME NEGATIEF IONISERENDE (KANDIDAAT)GIDSSTOFFEN (ONDERZOEKSPERIODE 15.04 – 19.04.'23) MET EBCT 17 MIN

	Niveau	Name	Formula	Log ₂ Fold Change	-Log ₁₀ P-value
Gidsstof	1	4-Methylbenzotriazole	C ₇ H ₇ N ₃	-2,5	5,6
Gidsstof	1	5-Methylbenzotriazole	C ₇ H ₇ N ₃	-2,2	5,7
Kandidaatgidsstof	1	Furosemide	C ₁₂ H ₁₁ Cl N ₂ O ₅ S	-1,3	3,3
Gidsstof	1	Hydrochlorothiazide	C ₇ H ₈ Cl N ₃ O ₄ S ₂	-1,6	4,8

TABEL 67 SIGNIFICANT AFNAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENTEN

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
2	3-tert-Butyladipic acid	$C_{10}H_{18}O_4$	-2,3	4,2
1	4-Nitrophenol	$C_6H_5NO_3$	-1,1	2,9
2	Bicalutamide	$C_{18}H_{14}F_4N_2O_4S$	-1,4	2,8
2	Caffeic acid	$C_9H_8O_4$	-2,4	3,6
2	Fipronil	$C_{12}H_4Cl_2F_6N_4OS$	-1,1	3,7
1	Fludioxonil	$C_{12}H_6F_2N_2O_2$	-3,4	5,3
2	Mycophenolic acid	$C_{17}H_{20}O_6$	-2,5	3,6
2	Rivaroxaban	$C_{19}H_{18}ClN_3O_5S$	-2,0	4,7
1	Xylenesulfonate	$C_8H_{10}O_3S$	-1,9	4,3

TABEL 68 SIGNIFICANT TOENAME (NIVEAU 1 EN 2) NEGATIEF IONISERENDE COMPONENT

Niveau	Name	Formula	Log2 Fold Change	-Log10 P-value
1	Acesulfame	$C_4H_5NO_4S$	1,2	3,0

BIJLAGE VI

BEKENDE STOFFEN NTS

De (kandidaat) gidsstoffen die tijdens een bemonstering positief ioniserend afnemen zijn in onderstaande tabel weergegeven voor zowel BODAC-oud als nieuw. Het aantal voorkomende stoffen, die ook nog eens negatief ioniserend zijn gedetecteerd, zijn tussen haakjes weergegeven.

TABEL 69 VOORKOMEN (KANDIDAAT) GIDSSTOFFEN AFNAME IN BODAC-OUDE EN BODAC-NIEUW TIJDENS DE ONDERZOEKSPERIODEN

	BODAC-oud afname	BODAC-nieuw afname
Gidsstoffen		
Carbamazepine	1x	2x
Diclofenac	6x	2x
Gabapentine	5x	3x
Hydrochloorthiazide	1x	-
Hydrochloorthiazide	3x (Negatief ioniserend)	3x (Negatief ioniserend)
Metoprolol	4x	3x
Sotalol	4x	2x
Trimethoprim	4x	2x
Venlafaxine	2x	-
Kandidaat gidsstoffen		
Amisulpride	4x	2x
Citalopram	1x	-
Furosemide	1x	-
Furosemide	5x (Negatief ioniserend)	3x (Negatief ioniserend)
Propranolol	5x	3x

Van de 11 gidsstoffen nemen 8 stoffen af bij BODAC-oud en 7 stoffen bij BODAC-nieuw. Van de 8 kandidaat gidsstoffen nemen 4 stoffen af bij BODAC-oud en 3 stoffen bij BODAC-nieuw. De (kandidaat) gidsstoffen die afnemen worden als positief ioniserende componenten gedetecteerd. Alleen hydrochloorthiazide en furosemide nemen zowel positief ioniserend als negatief ioniserend af bij BODAC-oud. Deze stoffen zijn alleen als negatief ioniserend afname waargenomen bij BODAC-nieuw.

De (bekende niveau 1) stoffen die zowel positief als negatief ioniserend afnemen bij BODAC-oud zijn in onderstaande tabel weergegeven.

TABEL 70 STOFFEN DIE ZOWEL POSITIEF ALS NEGATIEF IONISEREND AFNEMEN BIJ BODAC-OUDE

Naam
Desamino metamitron
Fludioxonil
Flutolanil
Furosemide
Hydrochlorothiazide
Saccharin
Valsartan

Desamino metatritron is een metaboliet van metatritron, een herbicide. Fludioxonil en flutolanil zijn fungiciden. Furosemide, hydrochloorthiazide en valsartan zijn geneesmiddelen. Saccharin is een kunstmatige zoetstof. De (bekende niveau 1) stoffen die zowel positief ioniserend afnemen als toenemen bij BODAC-oud zijn in onderstaande tabel weergegeven.

TABEL 71

STOFFEN DIE ZOWEL POSITIEF IONISEREND AFNEEMT ALS TOENEEMT BIJ BODAC-OU

Naam
Caffeine
Desamino metatritron
Flutolanil

Flutolanil wordt mogelijk door sporadische zuurstofloosheid na een verhoogde ammoniumpiek (regenweersituatie) gedesorbeerd in de BODAC. Flutolanil is een fungicide en geen afbraakproduct. Caffeine is de enige (niveau 1) stof die zowel positief ioniserend afneemt als positief ioniserend toeneemt. Caffeine is een alkaloid die o.a. van nature voorkomt in koffiebonen, thee en cacaobonen. Er zijn geen (niveau 1) stoffen die zowel negatief ioniserend toenemen als positief en negatief ioniserend afnemen.

De (bekende niveau 1) stoffen die positief ioniserend toenemen bij BODAC-oud zijn in onderstaande tabel weergegeven.

TABEL 72

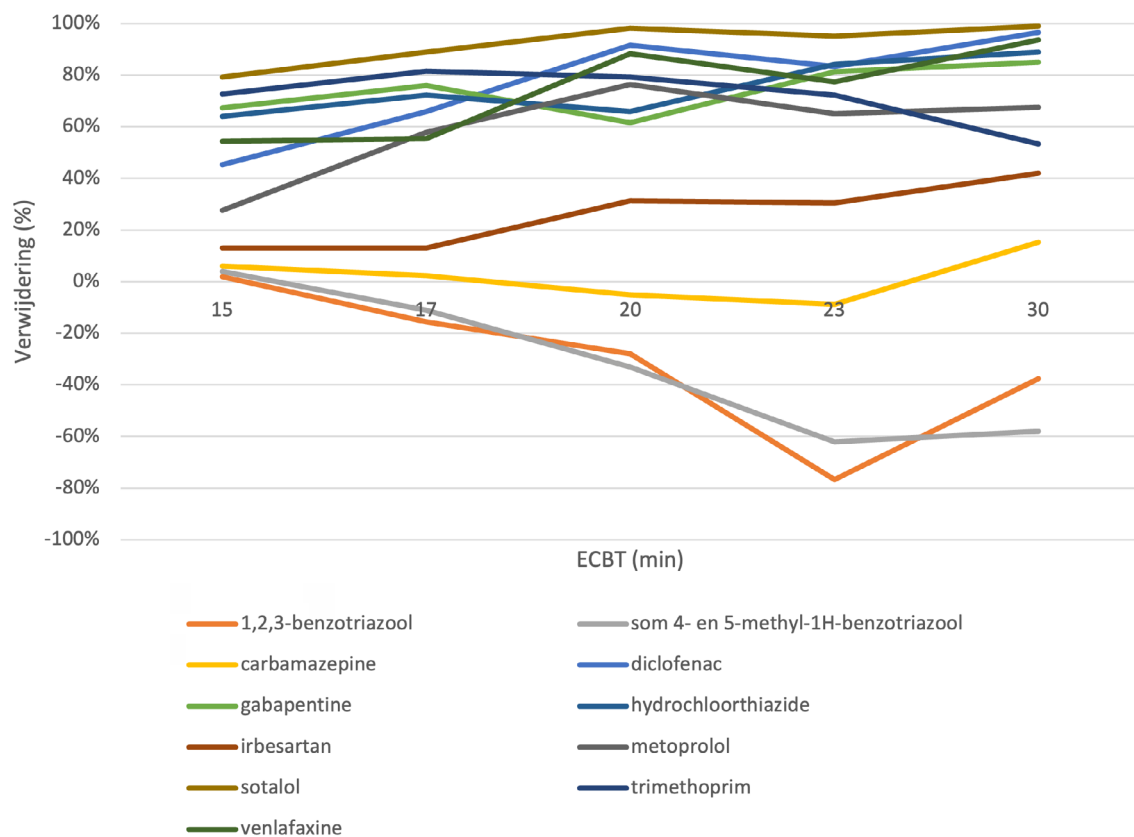
POSITIEF IONISEREND TOENAME VAN NTS BIJ BODAC-OU

Naam	Beschrijving
2,6-Dichlorobenzamide (BAM)	Metaboliet van dichlobenil (2,6 -dichloorbenzonitril) = herbicide
4-Methylbenzotriazole	Derivaat van benzotriazole = cheleermiddel (complexvormer)
Caffeine	Werkzame stof voorkomt in plantenrijk = alkaloid
Desamino metatritron	Metaboliet van metatritron = herbicide
Linuron	Herbicide
Paraxanthine	Metaboliet van caffeine
Desaminometribuzin	Derivaat van metribuzin = herbicide
Dimethenamid	Herbicide
Fluoxastrobin	Fungicide
Thiacloprid	Insecticide
Flutolanil	Fungicide
Terbutylazine	Herbicide
Chloridazon	Herbicide

De meeste NTS stoffen die positief ioniserend toenemen zijn chemische bestrijdingsmiddelen. Caffeine en zijn metaboliet paraxanthine worden gedetecteerd als toenemende positief ioniserende componenten (tijdens BM2). Dit kwam 1 keer voor in de detectie van de 6 NTS-metingen, waarbij alleen caffeine ook werd gedetecteerd als afnemende positief ioniserend component (tijdens BM6).

BIJLAGE VII

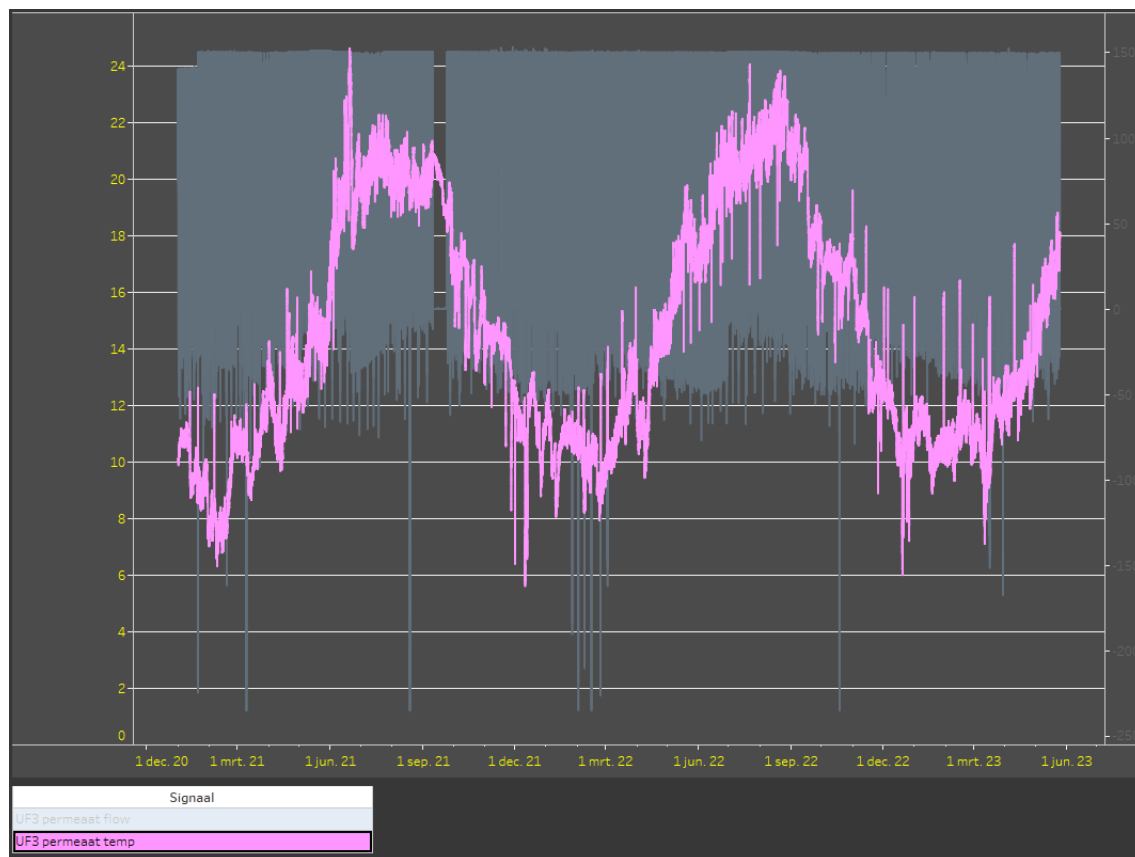
GEMIDDELTE VERWIJDERINGSPERCENTAGE PER GIDSSTOF BIJ VERSCHILLENDE EBCT'S IN BODAC-0UD

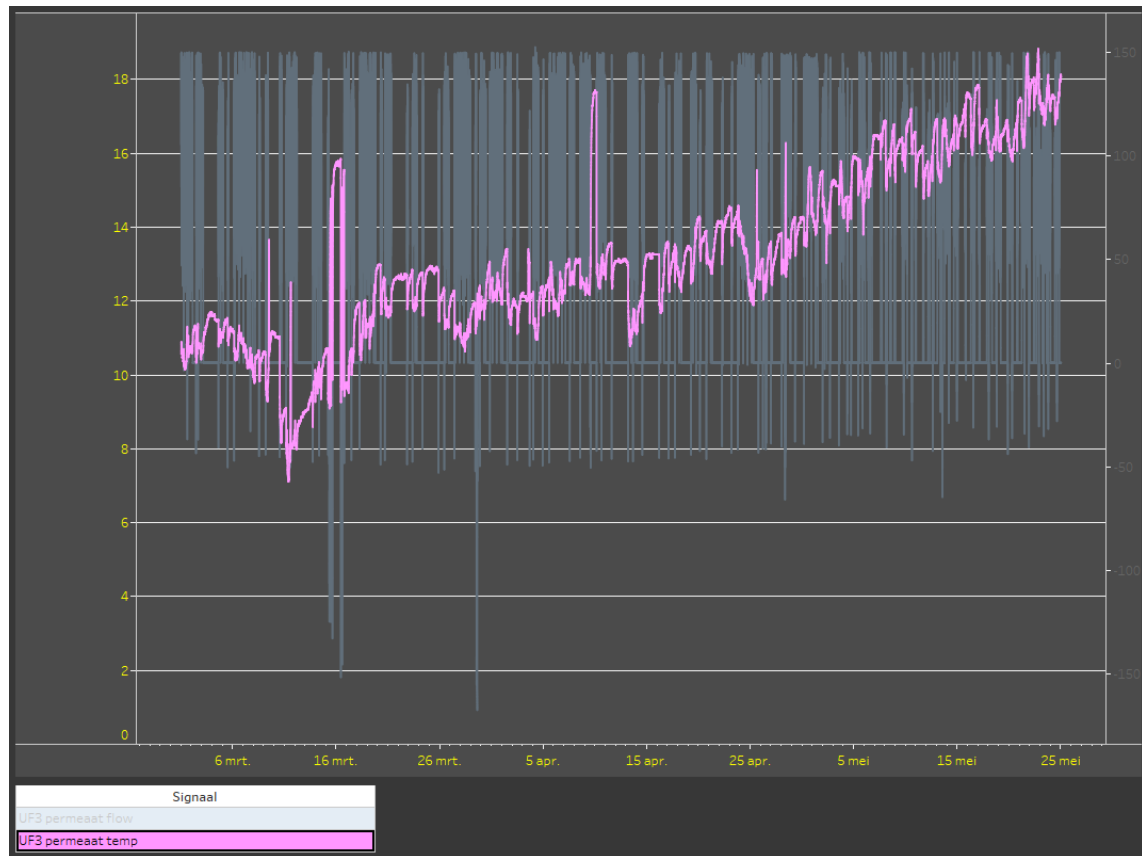


BIJLAGE VIII

TEMPERATUUR FLUCTUATIE FULL SCALE BODAC

FIGUUR 0.21 TEMPERATUUR SINDS 1 JANUARI 2021 IN HET UF PERMEAAT, INFLUENT FULL SCALE BODAC



FIGUUR 0.22 TEMPERATUUR VAN BEGIN MAART TOT EIND MEI IN HET UF PERMEAAT, INFLUENT FULL SCALE BODAC

BIJLAGE IX

PERFORMANCE BODAC-0UD

De performance van BODAC-oud is weergegeven in een tijdlijn waarin de startdatum van de ingestelde EBCT en de einddatum (schepdag) van drie bemonsteringen zijn opgenomen. Vervolgens is er ook aangegeven in welke periode een lage zuurstofconcentratie $< 2 \text{ mg O}_2/\text{l}$ in het BODAC-filtraat heerste en wat de duur daarvan is geweest.

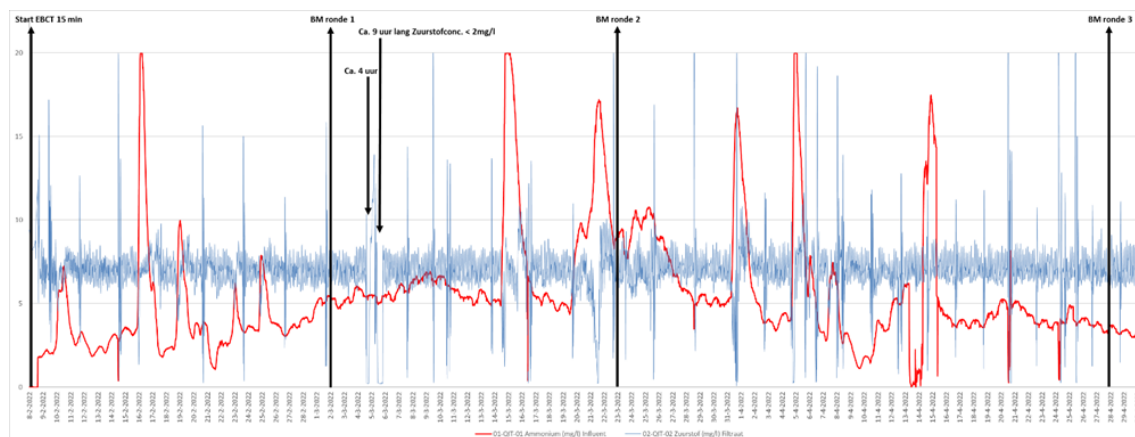
De gekleurde lijnen in de volgende figuren geven het volgende weer:

- De blauwe lijn geeft de zuurstofconcentratie weer in het BODAC-filtraat in $\text{mg O}_2/\text{l}$.
- De rode lijn geeft de ammoniumconcentratie weer van het voedingswater in $\text{mg NH}_4/\text{l}$.
- De oranje lijn geeft het drukverschil over het filterbed weer in meterwaterkolom (mWk).
- De groene lijn geeft het aantal deeltjes weer in het BODAC-filtraat in nr. x1000.

PERFORMANCE MET EBCT 15 MIN.

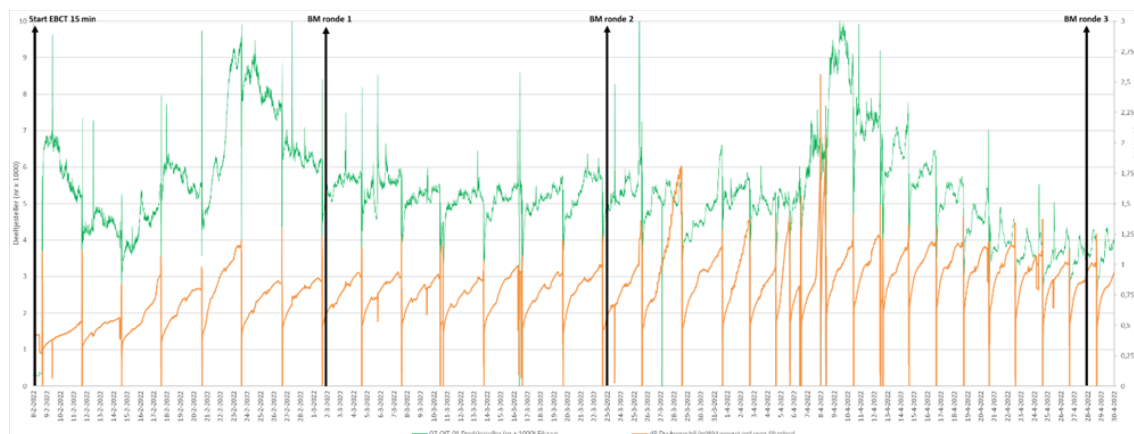
De EBCT van 15 min. is ingesteld op 8 februari tot 23 mei 2022. Op 5 maart 2022 heerste er voor ongeveer 9 uur lang een zuurstofconcentratie die kleiner was dan 2 mg/l . De oorzaak hiervan was een technisch probleem aan de zuurstof regelklep.

FIGUUR 0.23 TIJDLIJN VAN DE EERSTE DRIE BEMONSTERINGEN (BM1, BM2 EN BM3). RODE LIJN IS DE AMMONIUMCONCENTRATIE (MG/L) IN HET INFLUENT VAN DE BODAC FILTER. BLAUWE LIJN IS DE ZUURSTOFCONCENTRATIE (MG/L) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



De hoogste piek van het aantal deeltjes is ongeveer 10.000 deeltjes in het BODAC-filtraat op 9 april 2022. Het gevolg hiervan was een drukverhoging op het BODAC-filter. In de periode dat de zuurstofconcentratie $< 2 \text{ mg/l}$ was, is het aantal deeltjes in het BODAC-filtraat ongeveer 6.000. Dit was een relatief kleine verhoging wat naar verwachting te maken had met uitspoeling van biologie (bacteriën) door zuurstofloosheid.

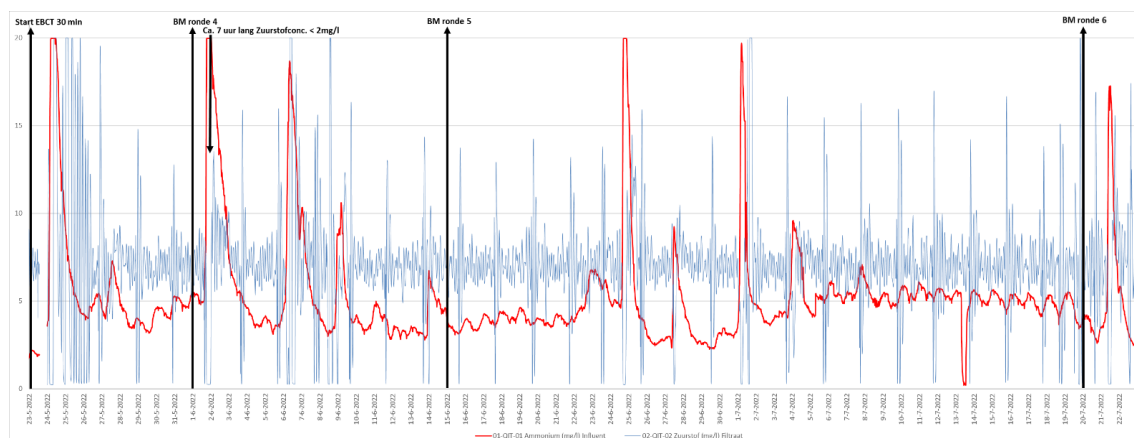
FIGUUR 0.24 TIJDLIJN VAN DE EERSTE DRIE BEMONSTERINGEN (BM1, BM2 EN BM3). ORANJE LIJN IS HET DRUKVERSCHIL (MWK) OVER HET BODAC FILTER. GROENE LIJN IS HET AANTAL DEELTJES (NR. X1000) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



PERFORMANCE MET EBCT 30 MIN.

De EBCT van 30 min. is ingesteld op 23 mei tot 12 augustus 2022. Op 1 juni 2022 heerste er voor ongeveer 7 uur lang een zuurstofconcentratie < 2 mg/l. Op deze dag was er ook een hoge ammoniumconcentratie van ongeveer 20 mg/l. Deze werd niet veroorzaakt door hevige regenval, volgens KNMI (0 mm neerslag). De oorzaak is (nog) onbekend.

FIGUUR 0.25 TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM4, BM5 EN BM6). RODE LIJN IS DE AMMONIUMCONCENTRATIE (MG/L) IN HET INFLUENT VAN DE BODAC FILTER. BLAUWE LIJN IS DE ZUURSTOFCONCENTRATIE (MG/L) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER

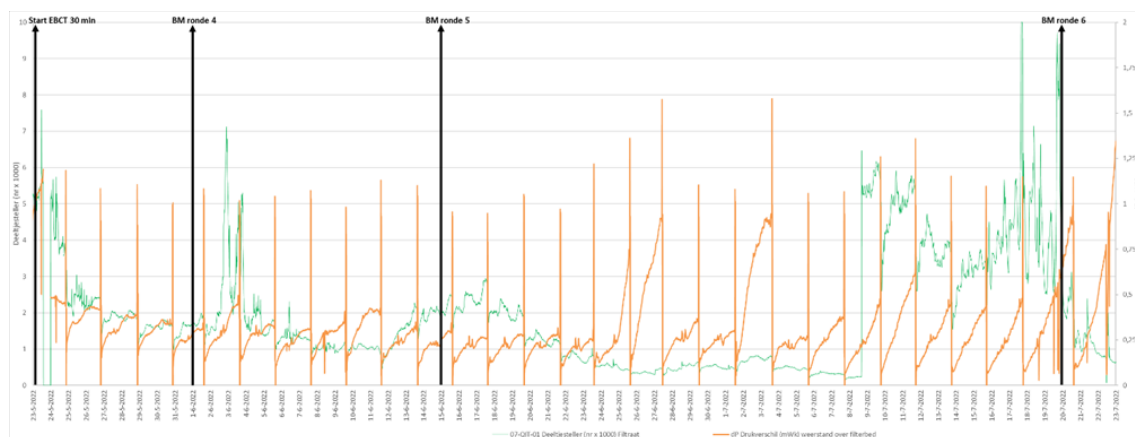


De hoogste piek van het aantal deeltjes is ongeveer 9.000 deeltjes in het BODAC-filtraat op 17 juli en 19 juli 2022. Het gevolg hiervan is een drukverhoging op het BODAC filter. In de periode nadat de zuurstofconcentratie < 2 mg/l was, bereikte het aantal deeltjes een piek van ongeveer 7.000. Op de dag zelf, 1 juni, was het hoogste aantal deeltjes ongeveer 2.000. Het verhoogde aantal deeltjes (ca. 7.000) had naar verwachting te maken met uitspoeling van biologie (bacteriën) vanwege de zuurstofloosheid.

F

IGUUR 026

TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM4, BM5 EN BM6). ORANJE LIJN IS HET DRUKVERSCHIL (MWK) OVER DE BODAC-NIEUWEDILTER. GROENE LIJN IS HET AANTAL DEELTJES (NR. X1000) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER

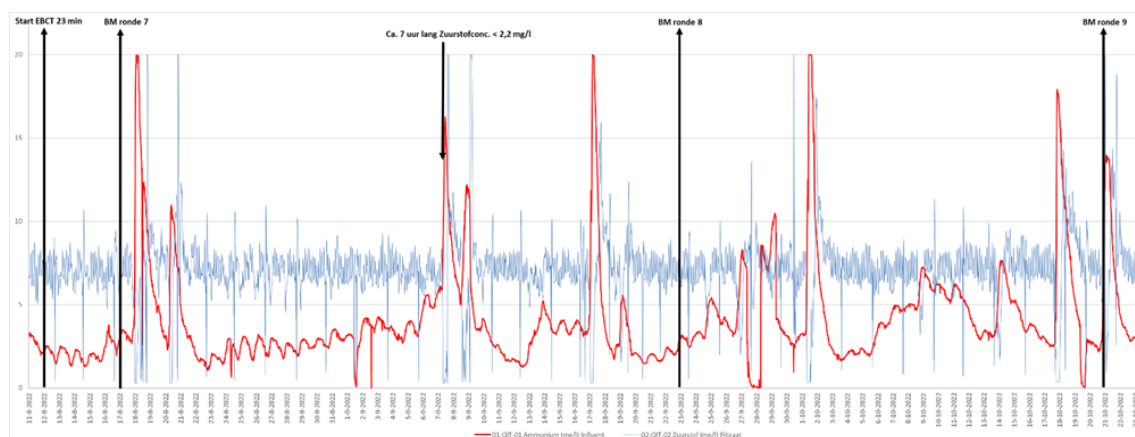


PERFORMANCE MET EBCT 20 MIN.

De EBCT van 20 minuten is op 12 augustus ingesteld tot 31 oktober 2022. Op 7 september 2022 heerste er voor ongeveer 7 uur lang een zuurstofconcentratie $< 2,2$ mg/l. In die periode was er ook een relatief verhoogde ammoniumconcentratie in het voedingswater van ongeveer 16 mg/l. Volgens KNMI was er op 7 september ongeveer 9 mm neerslag.

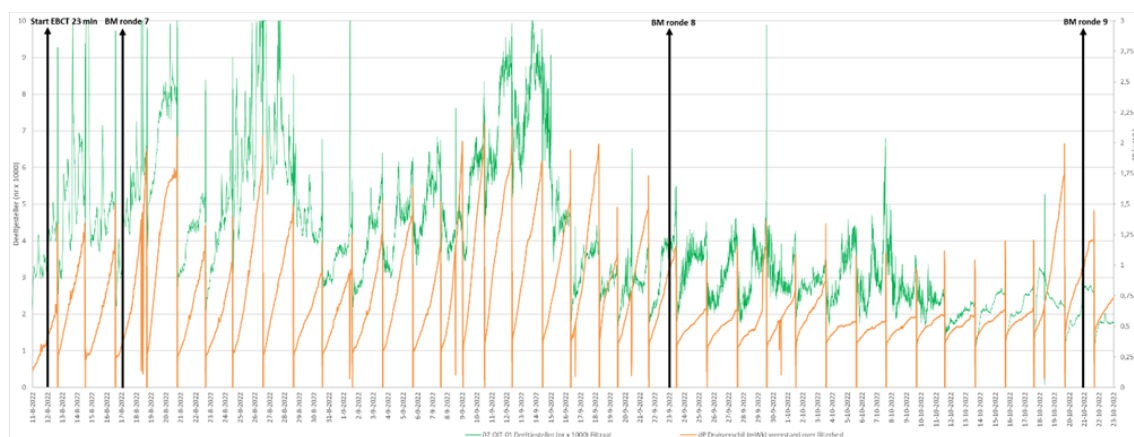
FIGUUR 0.27

TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM7, BM8 EN BM9). RODE LIJN IS DE AMMONIUMCONCENTRATIE (MG/L) IN HET INFLUENT VAN DE BODAC FILTER. BLAUWE LIJN IS DE ZUURSTOFCONCENTRATIE (MG/L) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



Er zijn een aantal hoge pieken van het aantal deeltjes van ongeveer 9.000 in het BODAC-filtraat. Het gevolg hiervan is een aantal keren drukverhoging op de BODAC-filter. In de periode dat de zuurstofconcentratie $< 2,2$ mg/l was, was de piek in het aantal deeltjes ongeveer 7.000. De oorzaak van de hoge aantal deeltjes is (nog) onbekend.

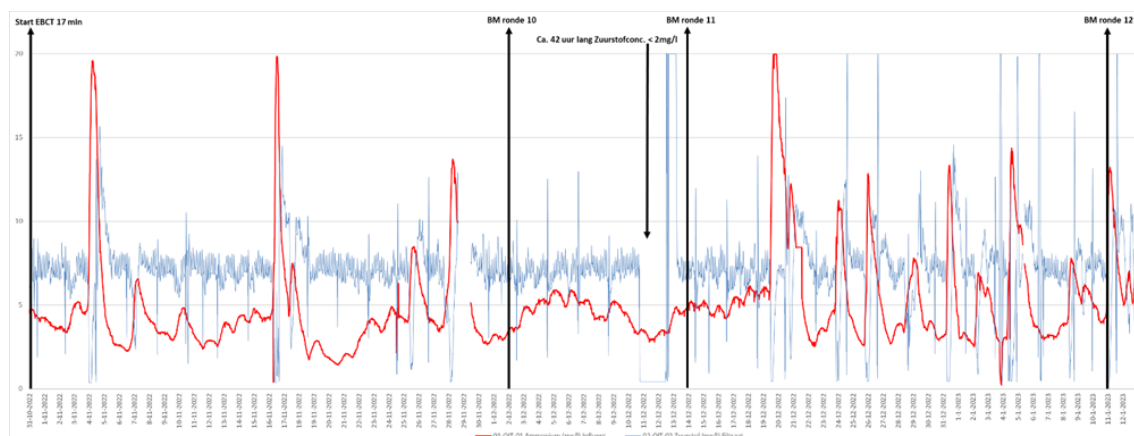
FIGUUR 028 TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM7, BM8 EN BM9). ORANJE LIJN IS HET DRUKVERSCHIL (MWK) OVER DE BODAC-FILTERBED. GROENE LIJN IS HET AANTAL DEELTJES (NR. X1000) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



PERFORMANCE MET EBCT 17 MIN.

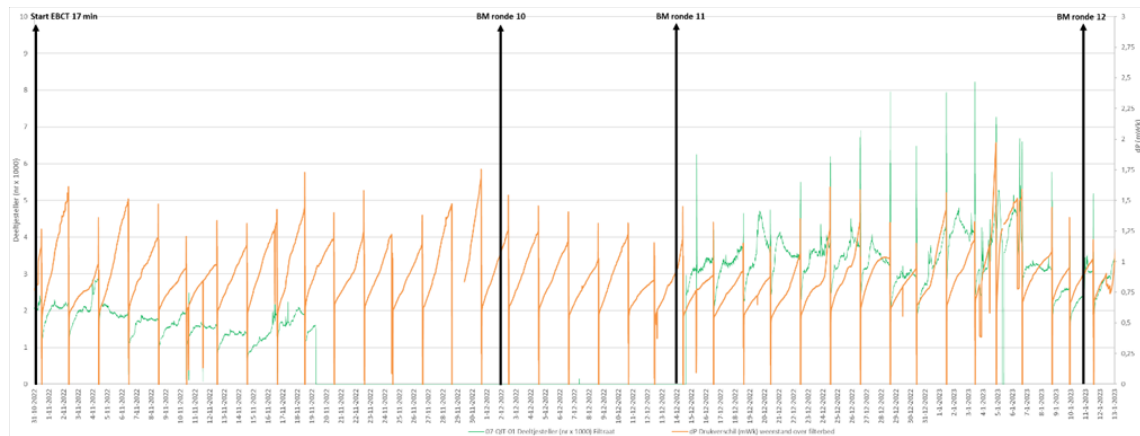
De EBCT van 17 minuten is ingesteld op 31 oktober 2022 tot 11 januari 2023. Tussen 10-12 december 2022 heerste er voor ongeveer 42 uur lang een zuurstofconcentratie < 2 mg/l. De oorzaak hiervan was een technisch probleem met de zuurstofdosing.

FIGUUR 0.29 TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM10, BM11 EN BM12). RODE LIJN IS DE AMMONIUMCONCENTRATIE (MG/L) IN HET INFLUENT VAN DE BODAC FILTER. BLAUWE LIJN IS DE ZUURSTOFCONCENTRATIE (MG/L) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



Het hoogste aantal deeltjes is ongeveer 8.000 deeltjes in het BODAC-filtraat op 3 januari 2023. In de periode dat de zuurstofconcentratie < 2,2 mg/l was, was het aantal deeltjes 0. Tussen 19 november en 14 december 2022, dus 25 dagen lang, stond de deeltjesteller op 0. De oorzaak hiervan is dat de deeltjesteller is verwijderd (wanneer en waarom is (nog) onbekend) en op 14 december is teruggeplaatst.

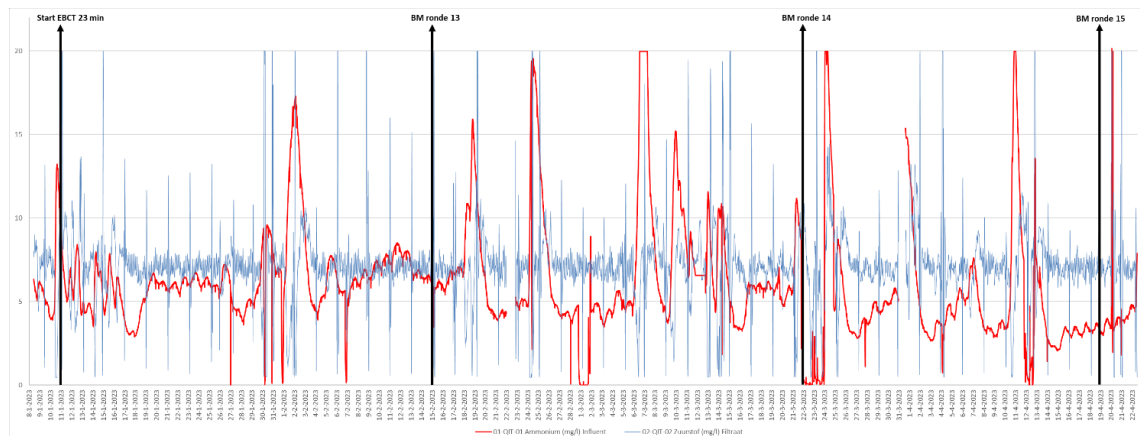
FIGUUR 0.30 TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM10, BM11 EN BM12). ORANJE LIJN IS HET DRUKVERSCHIL (MWK) OVER DE BODAC-FILTERBED, GROENE LIJN IS HET AANTAL DEELTJES (NR. X1000) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



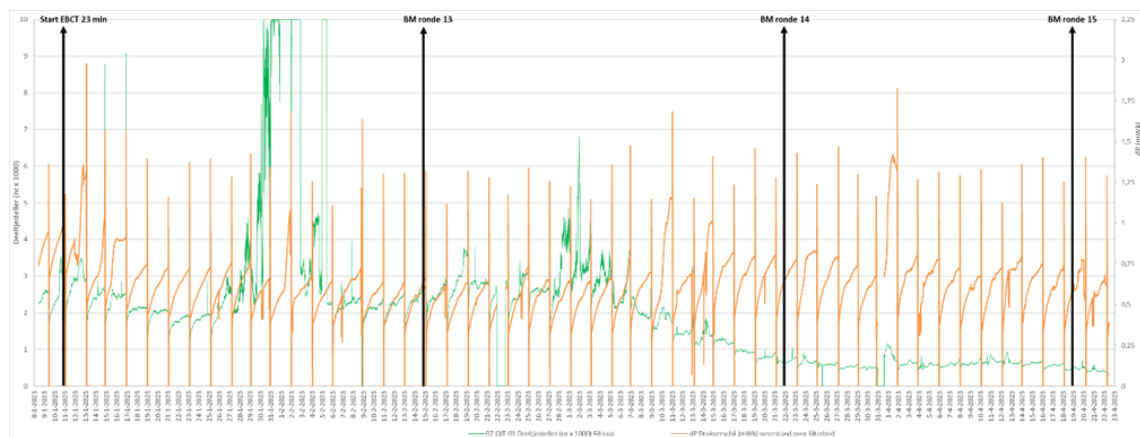
PERFORMANCE MET EBCT 23 MIN.

De EBCT van 23 minuten is ingesteld op 11 januari 2023 tot 1 september 2023.

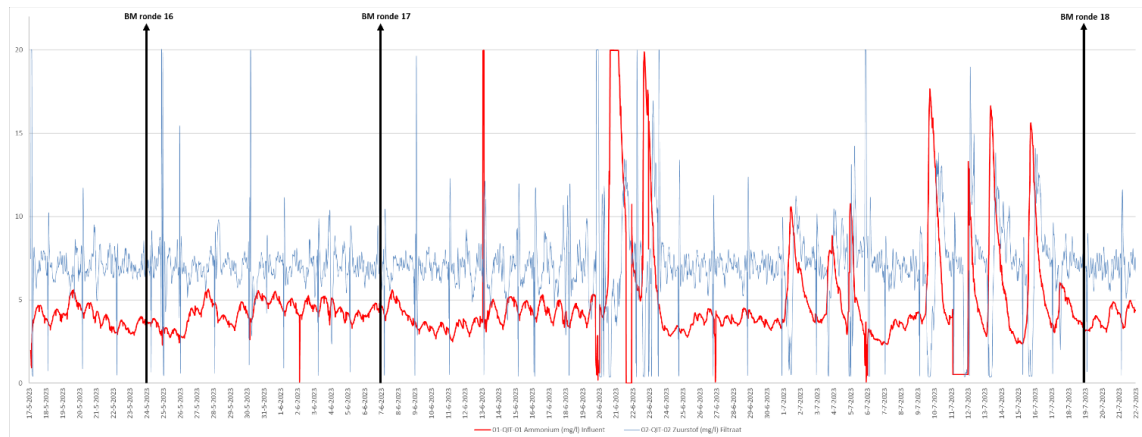
FIGUUR 0.31 TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM13, BM14 EN BM15). RODE LIJN IS DE AMMONIUMCONCENTRATIE (MG/L) IN HET INFLUENT VAN DE BODAC FILTER. BLAUWE LIJN IS DE ZUURSTOFCONCENTRATIE (MG/L) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



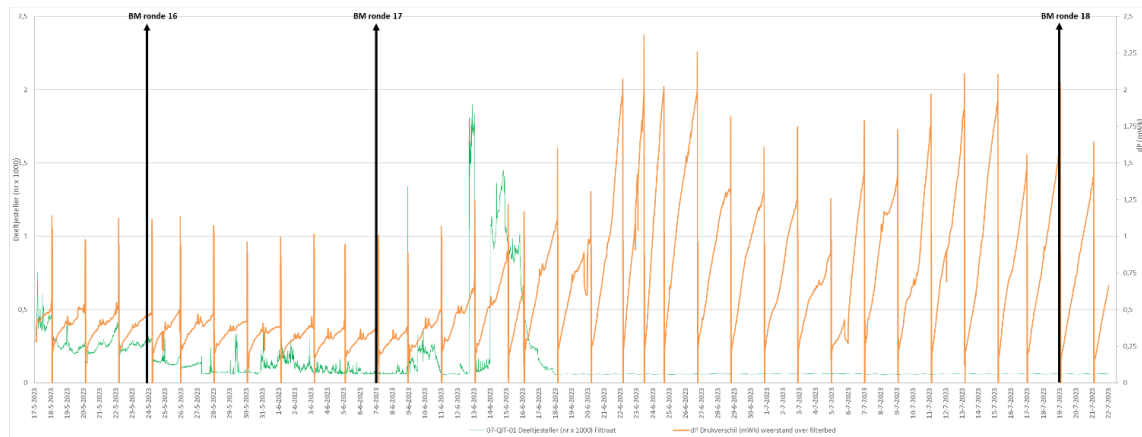
FIGUUR 0.32 TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM13, BM14 EN BM15). ORANJE LIJN IS HET DRUKVERSCHIL (MWK) OVER DE BODAC-FILTERBED, GROENE LIJN IS HET AANTAL DEELTJES (NR. X1000) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



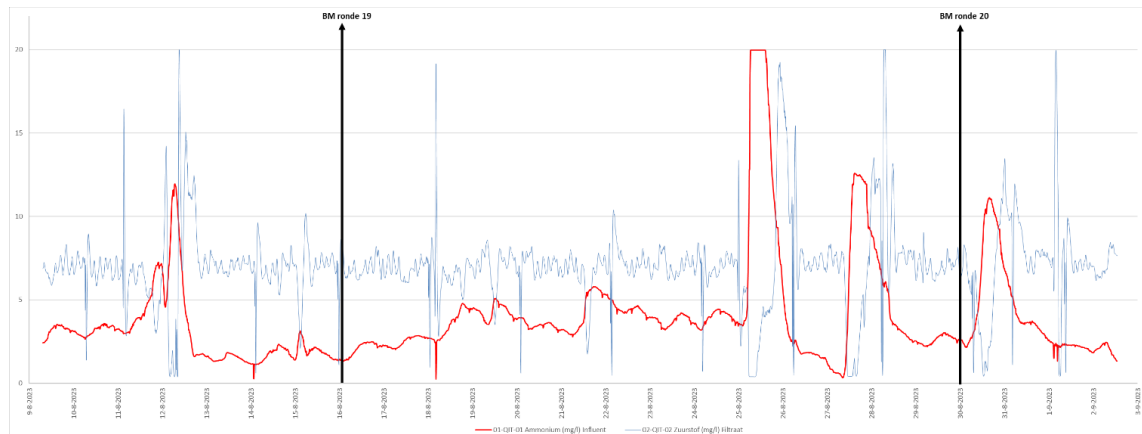
FIGUUR 0.33 TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM16, BM17 EN BM18). RODE LIJN IS DE AMMONIUMCONCENTRATIE (MG/L) IN HET INFLUENT VAN DE BODAC FILTER. BLAUWE LIJN IS DE ZUURSTOFCONCENTRATIE (MG/L) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



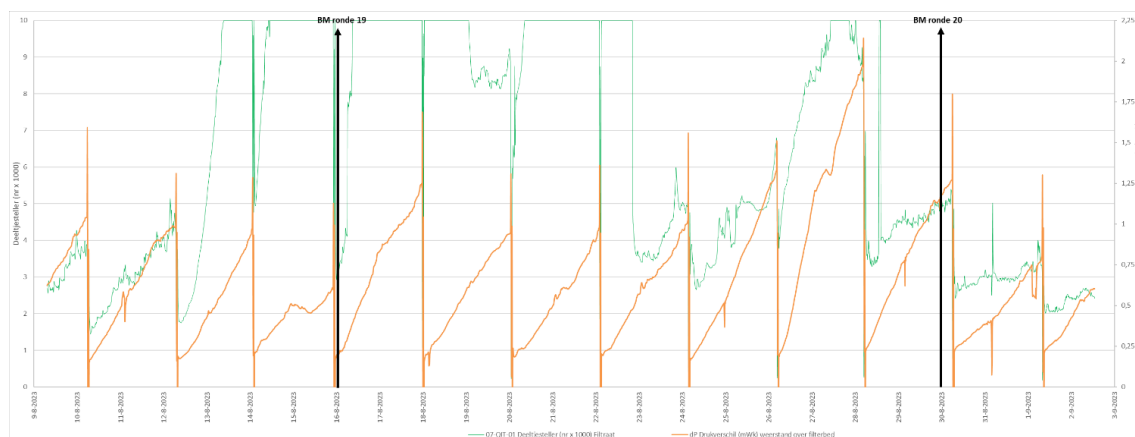
FIGUUR 0.34 TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM16, BM17 EN BM18). ORANJE LIJN IS HET DRUKVERSCHIL (MWK) OVER DE BODAC-FILTERBED. GROENE LIJN IS HET AANTAL DEELTJES (NR. X1000) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



FIGUUR 0.35 TIJDLIJN VAN TWEE BEMONSTERINGEN (BM19 EN BM20). RODE LIJN IS DE AMMONIUMCONCENTRATIE (MG/L) IN HET INFLUENT VAN DE BODAC FILTER. BLAUWE LIJN IS DE ZUURSTOFCONCENTRATIE (MG/L) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



FIGUUR 0.36 TIJDLIJN VAN TWEE BEMONSTERINGEN (BM19 EN BM20). ORANJE LIJN IS HET DRUKVERSCHIL (MWK) OVER DE BODAC-FILTERBED. GROENE LIJN IS HET AANTAL DEELTJES (NR. X1000) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



BIJLAGE X

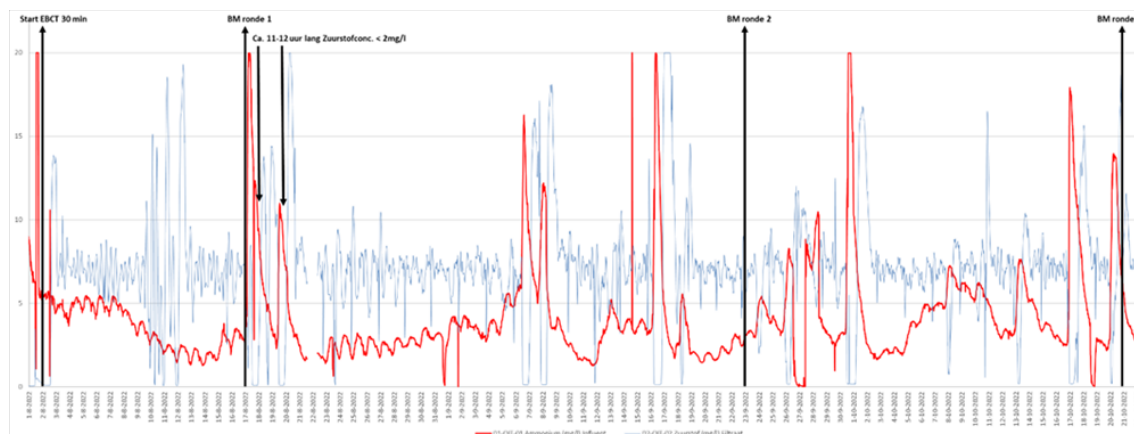
PERFORMANCE BODAC-NIEUW

PERFORMANCE MET EBCT 30 MIN.

De EBCT van 30 minuten is op 2 augustus ingesteld tot 31 oktober 2022. Op 18 en 20 augustus 2022 heerste er voor respectievelijk ongeveer 11 en 12 uur lang een zuurstofconcentratie die kleiner was dan 2 mg/l. Op 18 augustus is de hoogste ammoniumconcentratie ongeveer 20 mg/l. Meer dan 20 mg/l kan niet gemeten worden door de online meter, daarom is niet met zekerheid te zeggen hoe hoog het ammoniumgehalte precies is geweest. Zuurstofloosheid lijkt hier dus het gevolg van hoge ammoniumconcentraties, wat veroorzaakt werd door regenval volgens KNMI (ongeveer 12 mm neerslag). De bemonsteringronde 1 was al geweest (17 augustus) voordat er neerslag plaatsvond (18 augustus).

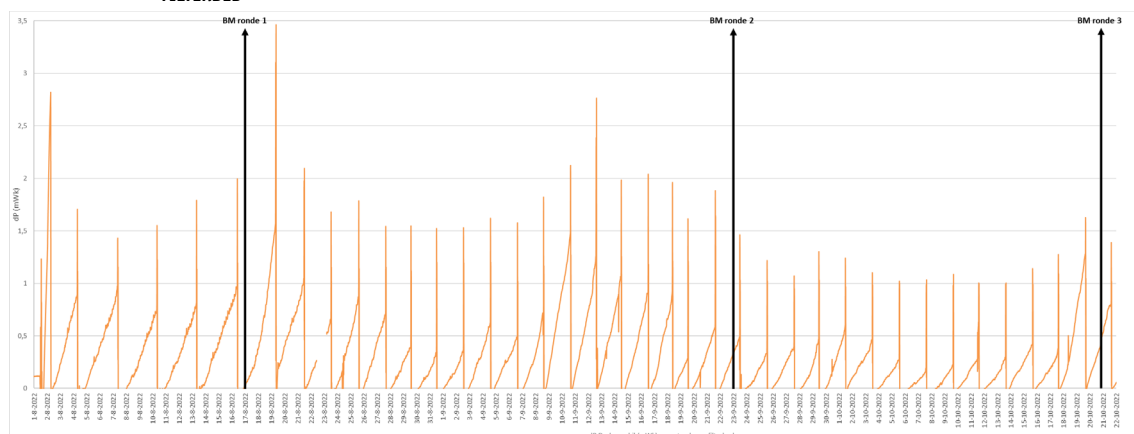
FIGUUR 0.37

TIJDLIJN VAN DE EERSTE DRIE BEMONSTERINGEN (BM1, BM2 EN BM3). RODE LIJN IS DE AMMONIUMCONCENTRATIE (MG/L) IN HET INFLUENT VAN DE BODAC FILTER. BLAUWE LIJN IS DE ZUURSTOFCONCENTRATIE (MG/L) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



FIGUUR 0.38

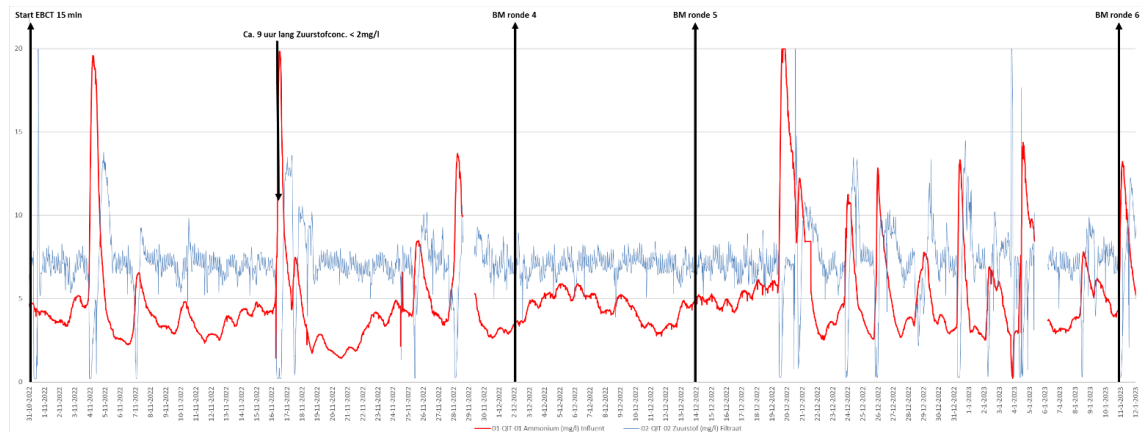
TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM1, BM2 EN BM3). ORANJE LIJN IS HET DRUKVERSCHIL (MWK) OVER DE BODAC-FILTERBED



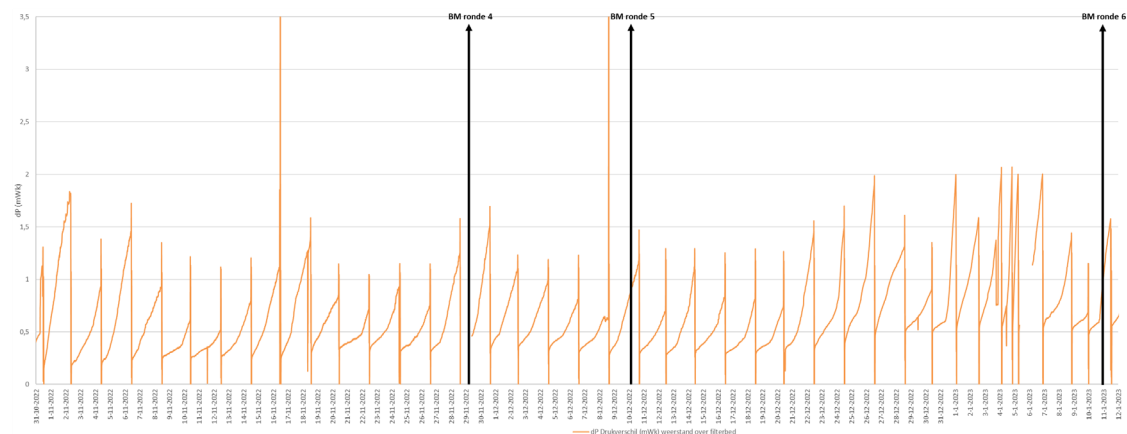
PERFORMANCE MET EBCT 15 MIN.

De EBCT van 15 minuten is ingesteld op 31 oktober 2022 tot 19 juni 2023. Op 16 november 2022 heerste er voor ongeveer 9 uur lang een zuurstofconcentratie die kleiner was dan 2 mg/l. Op 16 november is de hoogste ammoniumconcentratie ongeveer 20 mg/l. Deze hoge ammoniumconcentratie werd veroorzaakt door regenval (ongeveer 15 mm neerslag, bron KNMI).

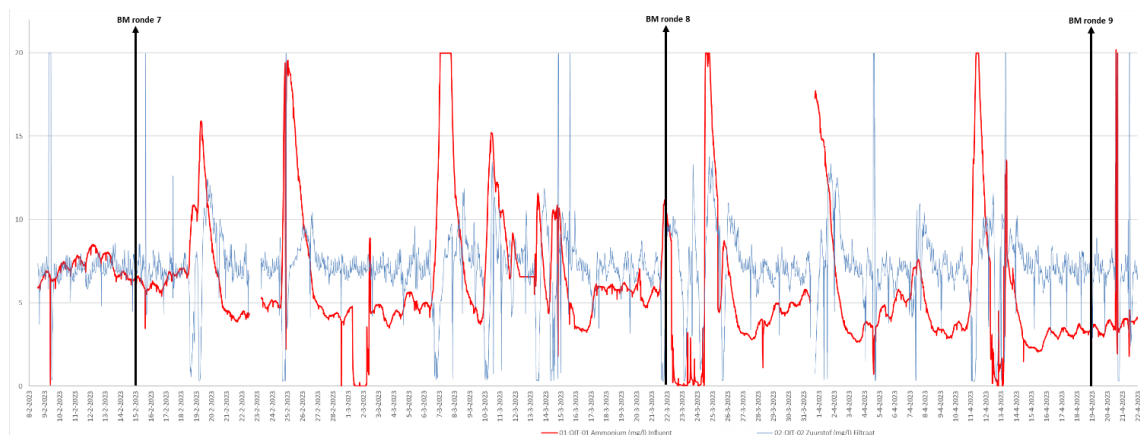
FIGUUR 0.39 TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM4, BM5 EN BM6). RODE LIJN IS DE AMMONIUMCONCENTRATIE (MG/L) IN HET INFLUENT VAN DE BODAC FILTER. BLAUWE LIJN IS DE ZUURSTOFCONCENTRATIE (MG/L) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



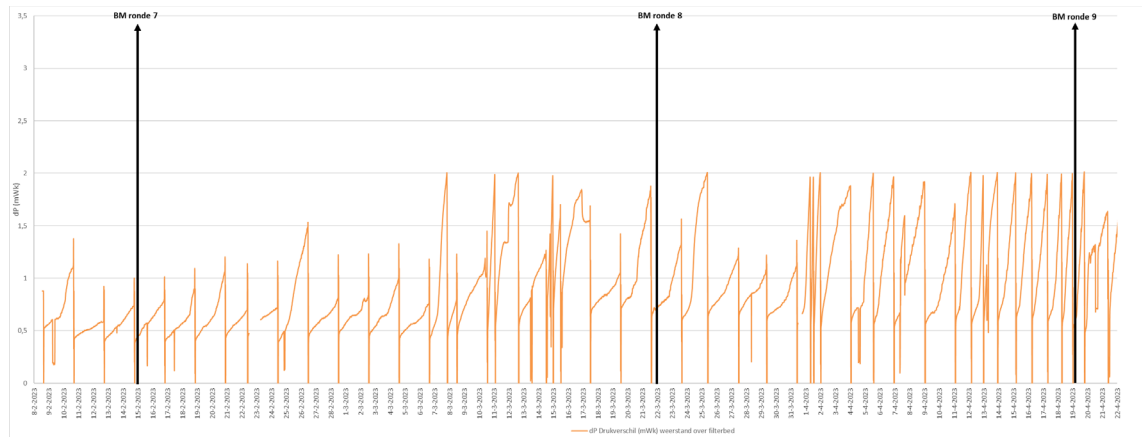
FIGUUR 0.40 TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM4, BM5 EN BM6). ORANJE LIJN IS HET DRUKVERSCHIL (MWK) OVER DE BODAC-FILTERBED



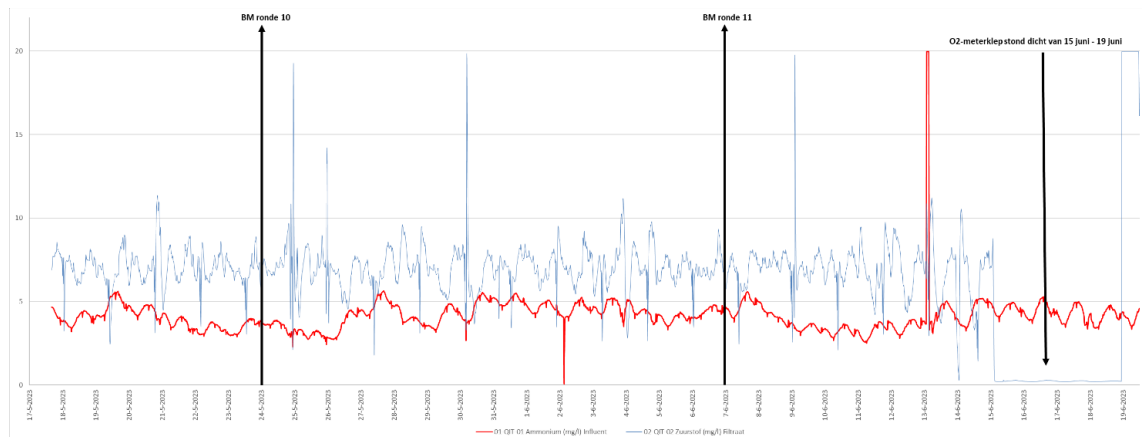
FIGUUR 0.41 TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM7, BM8 EN BM9). RODE LIJN IS DE AMMONIUMCONCENTRATIE (MG/L) IN HET INFLUENT VAN DE BODAC FILTER. BLAUWE LIJN IS DE ZUURSTOFCONCENTRATIE (MG/L) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



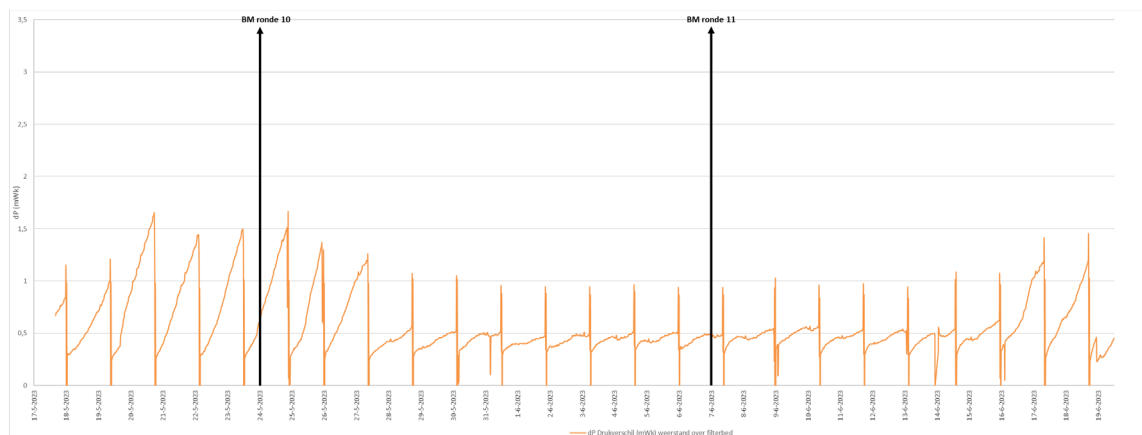
FIGUUR 0.42 TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM7, BM8 EN BM9). ORANJE LIJN IS HET DRUKVERSCHIL (MWK) OVER DE BODAC-FILTERBED



FIGUUR 0.43 TIJDLIJN VAN TWEE BEMONSTERINGEN (BM10 EN BM11). RODE LIJN IS DE AMMONIUMCONCENTRATIE (MG/L) IN HET INFLUENT VAN DE BODAC FILTER. BLAUWE LIJN IS DE ZUURSTOFCONCENTRATIE (MG/L) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



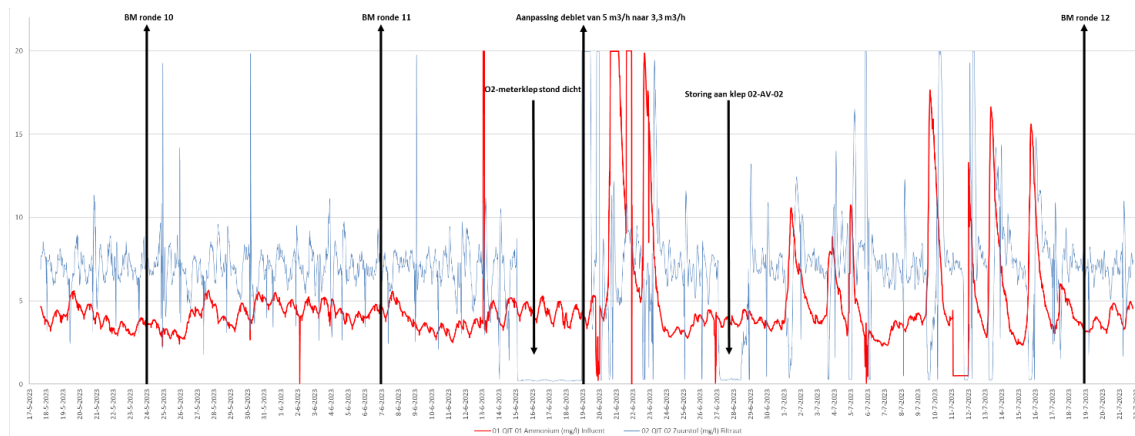
FIGUUR 0.44 TIJDLIJN VAN TWEE BEMONSTERINGEN (BM10 EN BM11). ORANJE LIJN IS HET DRUKVERSCHIL (MWK) OVER DE BODAC-FILTERBED



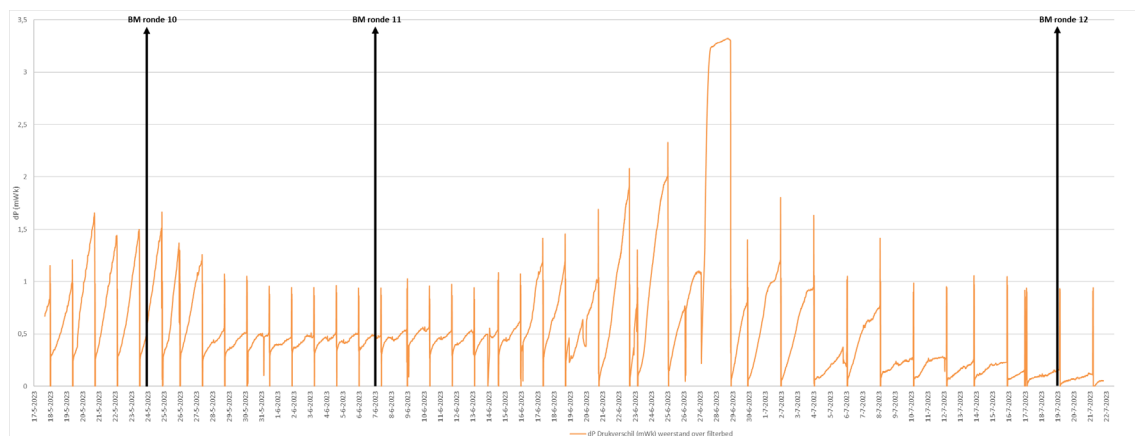
PERFORMANCE MET EBCT 23 MIN.

De EBCT van 23 minuten is ingesteld op 19 juni tot 1 september 2023.

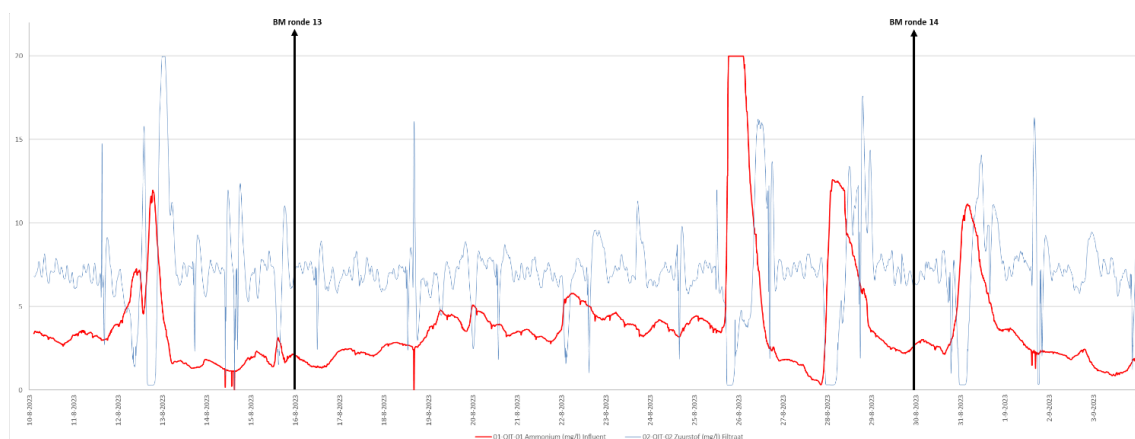
FIGUUR 0.45 TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM10, BM11 EN BM12). RODE LIJN IS DE AMMONIUMCONCENTRATIE (MG/L) IN HET INFLUENT VAN DE BODAC FILTER. BLAUWE LIJN IS DE ZUURSTOFCONCENTRATIE (MG/L) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER

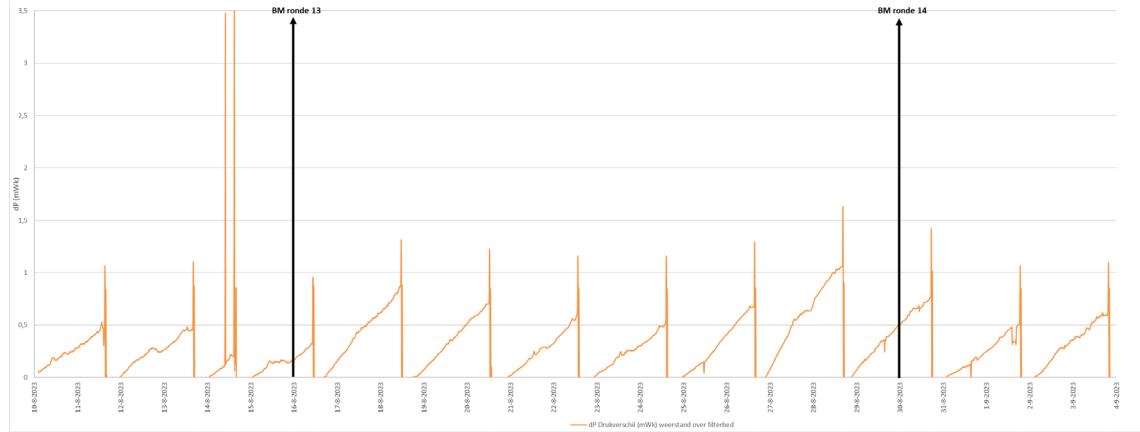


FIGUUR 0.46 TIJDLIJN VAN DRIE BEMONSTERINGEN (BM10, BM11 EN BM12). ORANJE LIJN IS HET DRUKVERSCHIL (MWK) OVER DE BODAC-FILTERBED



FIGUUR 0.47 TIJDLIJN VAN TWEE BEMONSTERINGEN (BM13 EN BM14). RODE LIJN IS DE AMMONIUMCONCENTRATIE (MG/L) IN HET INFLUENT VAN DE BODAC FILTER. BLAUWE LIJN IS DE ZUURSTOFCONCENTRATIE (MG/L) IN HET FILTRAAT VAN DE BODAC FILTER



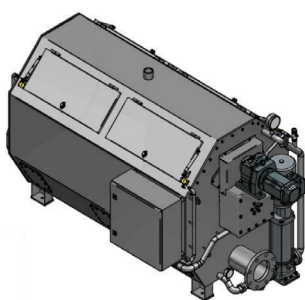
FIGUUR 0.48 TIJDLIJN VAN TWEE BEMONSTERINGEN (BM13 EN BM14). ORANJE LIJN IS HET DRUKVERSCHIL (MWK) OVER DE BODAC-FILTERBED

BIJLAGE XI

SPECIFICATIES, INSTELLINGEN EN OVERIGE INFORMATIE TROMMELZEEF

Model type trommelzeef en specificaties:

Micro Drum Filter
Type: 100-SS-MDF-803-50



Serie nummer 003-VK170203

Model/Type: 100-SS-MDF-803-50
Serial number: 003-VK170203
Year of fabrication: 2017
Project reference: 21701728 / 50755
Material housing: SS 316L
Material filterelement/screen: SS 316L
Filter size: 50 µ
Max. capacity: 15 m³/hour max.
Min. capacity: N.A.
Max. working pressure: N.A.
Min. working pressure: N.A.
Max. temperature: 50 °C
Net. weight: +/- 765 kg
Power: 400 V, 3 phase, 50 Hz



Constructie	Volgens tekening 170519-001
Hoofd afmetingen (LxWxH)	2590 x 1247 x 1332 mm
Gewicht	865 kg
Constructie materialen	SS 316/bolt connections or welding
Inlaat	DN 150 – PN 10
Uitlaat	DN 150 – PN 10
Sludge uitlaat	DN 125 – PN 10
Ontluchting	2" BSP threat connection (female)
Ontwerpdata	
Ontwerp temperatuur	2-80 °C
Totale screen oppervlakte	3,3 m²
Hydraulisch screen oppervlakte	1,32 m²
Rotatiesnelheid drum	4 - 12 omwentelingen per minuut
Filtratie niveau	50 µ, met 39 % vrije doorlaat
Reinigingsdruk	10 bar
Sproei capaciteit	4,932 m³/uur bij 10 bar
Aantal sproei nozzles	15 pcs
Bedrijfstemperatuur	Min. 3 °C en max. 50 °C
Geluid	< 65 dB
P-pomp	10 bar
Energie input	400V / 3Ph+N / PE / 50Hz
Pomp fabricaat DP	3,0 kW 230/400 V, 50 Hz
Reductor fabricaat SEW	0,75 kW/400 V/50 Hz/IP65

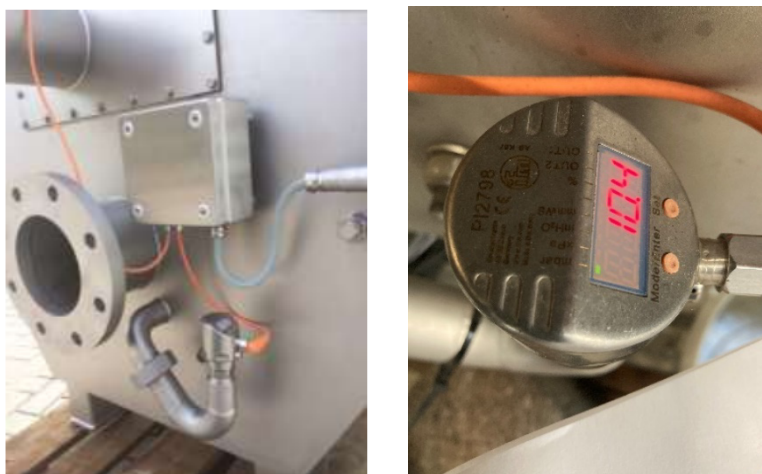
Het spoelen van de trommelzeef gaat automatisch en is ingesteld op de volgende voorwaarden:

1. NIVEAUBEWAKING

De druk niveaumetingen zorgen ervoor dat de trommelzeef tijdig spoelt. Er zit een regeling in de software voor het niveau in de trommel, die bepaalt wanneer de trommelzeef gaat spoelen. Signalen t.b.v. niveaubewaking komen van de druksensor die al is geïnstalleerd en geprogrammeerd door een Plectrum medewerker.

FIGUUR 0.49

NIVEAUBEWAKING TROMMELZEEF MET DRUKSENSOR



De instellingen van de PI 2798 niveauregeling zijn:

Meeteenheid	mbar
Niveau Hoog setpoint	7 (cmWk)
Niveau Laag setpoint	3 (cmWk)
Niveau Alarm setpoint	7 (cmWK)

Het niveau in de trommelzeef wordt ongeveer geregeld tussen de 3 en 7 cmWk. De alarm wordt bereikt bij een hoog niveau van 7 cm en na ongeveer 30 seconden gaat dan de alarm door naar een storing die aangaat op de bedieningskast. De trommelzeef valt uit als dit hoog niveau wordt behaald.

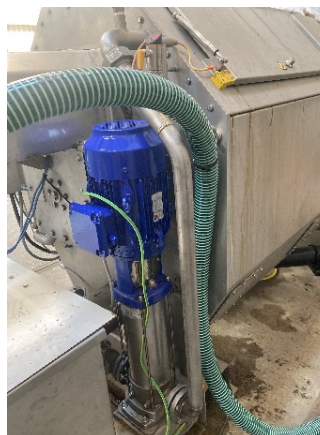
2. DRUKBEWAKING SPROEIERS

De trommelzeef bevat 15 sproeiers, deze zijn vervangen medio april 2023, om het zeefdoek schoon te spoelen. Signalen t.b.v. drukbewaking van de sproeiers komen van de druksensor.

FIGUUR 0.50 **DRUKBEWAKING SPROEIJERS MET DRUKSENSOR**

De instellingen van de druksensor drukbewaking zijn:

Meeteenheid	bar
Druk Hoog setpoint	10
Druk Laag setpoint	8

FIGUUR 0.51 **SEW-REDUCTOR****FIGUUR 0.52** **SPROEIPOMP**

De sproeipomp produceert een waterdruk, deze is handmatig in te stellen en is ingesteld op een minimale druk van 8,2 bar, voor het voeden van de sproeiers. Water wordt aangezogen uit de bodem van de trommelzeef. De druksensor is alleen in de periode van november 2022 tot 24 april 2023 handmatig verlaagd van 8,2 bar naar 7,6 bar omdat de sproeipomp de 10 bar niet haalde vanwege slijtage van de pomp. De pomp is inmiddels gereviseerd en op 4 april 2023 vervangen. Als de druk onder de ingestelde minimale druk van de sproeipomp komt te liggen geeft de pomp een storing.

Vanaf januari 2023 was er meer vervuiling in de sproeikoppen en een verhoogde spoelcyclus (vaker spoeling). Deze vervuiling kwam waarschijnlijk door het aangeleverde watersamenstelling. Vanaf april was er minder vervuiling en is de spoelcyclus verlaagd. Dit is te zien aan de urenteller van de sproeipomp, die wordt vastgelegd. Het totaal aantal uren per dag wat de pomp gesproeid heeft wordt bijgehouden. Het is normaal als de pomp over de hele dag 2,5 tot 3 uur heeft gesproeid. Wanneer het aantal uren sproeien toeneemt is het noodzaak om de trommelzeef en de bufferbak te reinigen.

Daarnaast is er een preventieve spoeling ingesteld, elke 6 uur voor 15 minuten.

REINIGINGSREGIME

De binnenkant van de trommelzeef en de bufferbak (bak achter de trommelzeef) worden 1 x per jaar gereinigd (18 aug 2022 was de 1^{ste} grondige reiniging). Vanaf februari 2023 werd de trommelzeef vaker gereinigd, namelijk 1 x per 2 weken, omdat er meer aangroei is van biologisch materiaal (o.a. algen) dan verwacht. Reiniging houdt in:

- De onderkant van de trommelzeef losmaken, openen en leeg laten lopen.
- De zijanten en onderkant van de trommelzeef reinigen met een hoge druk spuitslang.
- Er zit een wormschroef in de collectorbuis van de trommelzeef, deze wordt gereinigd met een hogedruk spuitslang.
- De bufferbak naast de trommelzeef wordt geleegd en gereinigd.

Aanvullend:

- In de bufferbak zijn er twee niveaumetingen voor zowel BODAC-oud als BODAC-nieuw. Tijdig controleren van deze metingen op vervuiling en schoonmaken is gewenst om storingen te voorkomen.
- De strainer van de toevoer van de Amtaxmeter (ammoniummeter) wordt elke dag gecontroleerd en gereinigd.
- In de winter heeft de trommelzeef minder last van actief biologisch materiaal, maar meer dood materiaal (detritus) dan in de zomer. In de zomer is er meer algengroei en dit geeft dan de grootste bijdrage aan de vervuiling van de trommelzeef.
- Het zeefdoek (50 µm) van de trommel is 1 keer vervangen in mei 2023.

Het trommelzeefsysteem is niet gekoppeld aan het pilotsysteem. Het is alleen door een algemeen alarm vanuit het drumfilter gekoppeld. Het alarm is ingesteld op niveau en druk. Wanneer de pilot uitvalt, draait de trommelzeef door. De trommelzeef is beveiligd met een overflow beveiliging en valt bij hoog niveau uit. Wanneer de trommelzeef uitvalt en de bufferbak te laag niveau heeft (onder de 30 cm) gaan de BODAC pilots over op rondpompen.

BIJLAGE XII

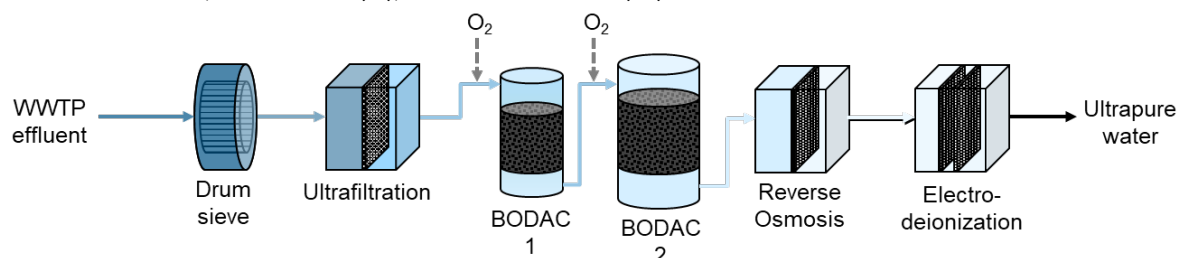
SUMMARY OF BIOLOGICAL OXYGEN-DOSED ACTIVATED CARBON (BODAC) FILTERS RESEARCH AT WETSUS

The BODAC research at Wetsus consists of three main approaches: i) the study of the removal of organic micro-pollutants (OMPs) in the full-scale BODAC filters and of the putative bacteria involved in the removal of OMPs, and these aspects are being studied by Olga Bernadet; ii) the study of the removal of (bio)fouling precursors in the full-scale BODAC filters and in laboratory-scale BODAC filters, and these aspects are being studied by Sara Pinela; iii) the study of the performance of full- and pilot-scale BODAC filters, and this aspect is being studied by Amanda Larasati.

1. FULL-SCALE BODAC FILTERS

A two-year study of the performance of the full-scale BODAC 1 and 2 filters (Figure 1) was conducted and reported in Bernadet et al. (2023). The full-scale BODAC filters had been in operation for 9-11 years at the time of the study and had not been replaced or off-site regenerated. The surface area of the BODAC granular filters, measured as Brunauer-Emmett-Teller specific surface area (BET_{SSA}), was reduced by ~70% from the virgin carbon, and the backwashing process generally did not recover the surface area of the BODAC granules. The surface of BODAC granules is covered with biofilms containing various microorganisms and inorganic deposits, mainly consisting of calcium, iron, and manganese. After backwashing, significant biofilms and inorganic deposits were still present on the surface of both BODAC 1 and 2 granules. The BODAC filters reduced the concentration of soluble organic matter, mainly proteins, acted as an effective nitrification system and almost completely removed manganese.

FIGURE 1 SCHEMATIC OVERVIEW OF THE PROCESSES INVOLVED IN PUURWATERFABRIEK (EMMEN, NL) TO TREAT THE WASTEWATER TREATMENT PLANT (WWTP) EFFLUENT INTO ULTRAPURE WATER. THE PROCESSES ARE CONSISTING OF DRUM SIEVE (1 MM OPENING SIZE), ULTRAFILTRATION (UF, PORE SIZE OF 0.04 μ M), BIOLOGICAL OXYGEN-DOSED ACTIVATED CARBON (BODAC) 1 AND 2 FILTERS, REVERSE OSMOSIS (RO), AND ELECTRODEIONIZATION (EDI)



1.1 BIOFOULING PRECURSORS REMOVAL

Considering the lack of fouling in the reverse osmosis (RO) membranes operating at *Puurwaterfabriek* (Emmen, NL), it is necessary to investigate the removal of organics in the system. The ultrafiltration (UF) removed approximately 33% of the total chemical oxygen demand (COD), and most of the removed fraction was particulate COD. BODAC 1 and 2 also removed approximately 20% and 33% of the total COD, respectively, primarily in the form of soluble COD. In addition, UF removed 92% of biopolymer compounds (> 10 kDa) through size exclusion mechanisms.

The concentration of nitrogen can greatly influence biofouling in the downstream process. There was no removal of total nitrogen (TN) noticed by the UF and BODAC filters; however, the nitrogen species changed throughout the process. All the ammonium (NH_4^+) and nitrite (NO_2^-) at the influent of UF, transformed into nitrate (NO_3^-) after passing through BODAC 1, suggesting the nitrification process occurred. Important to note that the UF removed at least 50 % of NH_4^+ . The transformation of these nitrogen species, and resulting in bio-recalcitrant NO_3^- , could minimize the biofouling issues in the RO membrane.

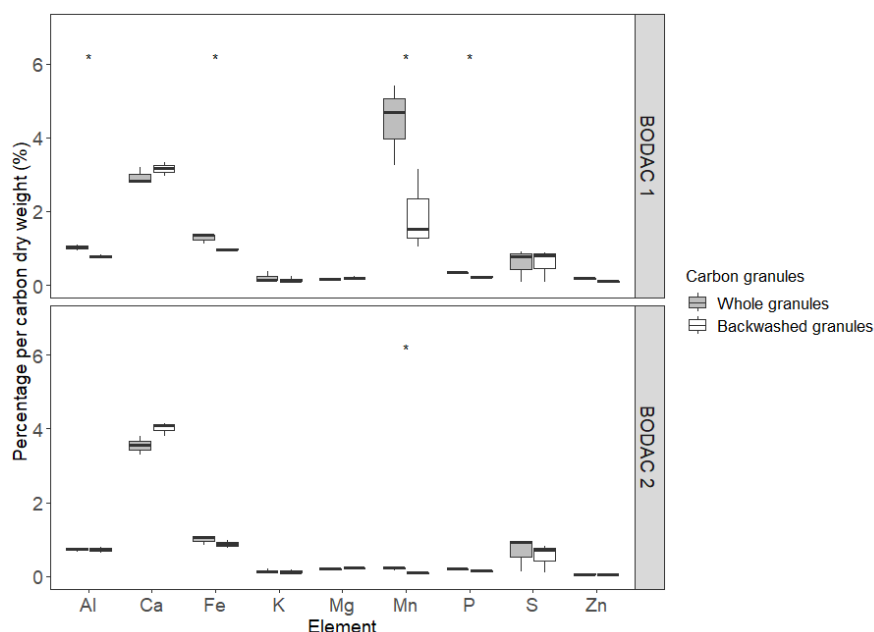
Regarding phosphate known as a limiting nutrient and essential for forming biofilms, which later impacted biofouling, there was no removal of phosphate in the UF and BODAC filters. This finding suggested phosphate was not the primary nutrient controlling the lack of biofouling in the RO membrane placed after BODAC filters.

Cations, such as calcium, potassium, and magnesium may deposit on the RO membrane and cause fouling. These minerals were not removed from the water after UF and BODAC filtration, but their presence did not hamper the performance of the RO membrane. However, iron and manganese were removed by the BODAC filters (mostly by BODAC 1) at around 79% and 99%, respectively. The almost complete removal of manganese from the influent water connects with the high manganese retention observed within BODAC granules (**Figure 2**). The manganese was apparently washed-out during backwashing as seen by the difference in manganese contained in the whole and backwashed granules (before and after backwashing carbon granules, respectively) as seen in **Figure 2**. Furthermore, oxygen dosed to the filter could contribute to manganese oxidation via an abiotic and biotic pathway. The removal of manganese was hypothesized to correlate with the lack of biofouling in the RO membrane, and further testing is required to elucidate these phenomena.

F

FIGURE 2

INORGANICS ACCUMULATED IN BODAC 1 AND 2 MEASURED USING MICROWAVE-ASSISTED DIGESTION AND INDUCTIVELY COUPLED PLASMA OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY (ICP-OES) OF THE CARBON GRANULES IN 2021 (N = 6)



1.2 OMPS REMOVAL

During the two years of monitoring in 2019 – 2021, sampling campaigns were conducted in each three months and thirteen OMPs were monitored (Bernadet et al., 2023). In line with previous findings by de Vogel et al. (2020), most of the OMPs were removed in BODAC 1, and BODAC 2 was polishing the removal for some OMPs, such as gabapentin and irbesartan. Atenolol, hydrochlorothiazide, lidocaine, metoprolol, sotalol, and trimethoprim were consistently well removed (>70%) in BODAC 1 and 2. Among them, only hydrochlorothiazide and metoprolol removal seemed to be affected by water temperature, with decreased removal observed at temperatures lower than 13 °C. Clarithromycin, diclofenac, and irbesartan and were only moderately removed (30 – 70%) in BODAC 1, and further removed in BODAC 2. The further removal of OMPs in BODAC 2 was expected because BODAC 2 acted as a polishing filter with a higher empty bed contact time (EBCT) compared to BODAC 1, allowing a longer contact between carbon granules (including biofilm and inorganic deposition) and the OMPs. In general, no specific removal pattern was observed for OMPs based on their physicochemical properties, and these phenomena have also been observed in other biological activated carbon (BAC) filters (Rattier et al., 2012). This is plausible because the carbon granules used in BAC filters are covered with biofilms and other compounds, which alter the initial physicochemical properties of the carbon granules and subsequently affect their adsorption affinity for many compounds from water. The adsorption-desorption and biodegradation dynamics in BAC systems make predicting the removal of OMPs in the filters particularly challenging.

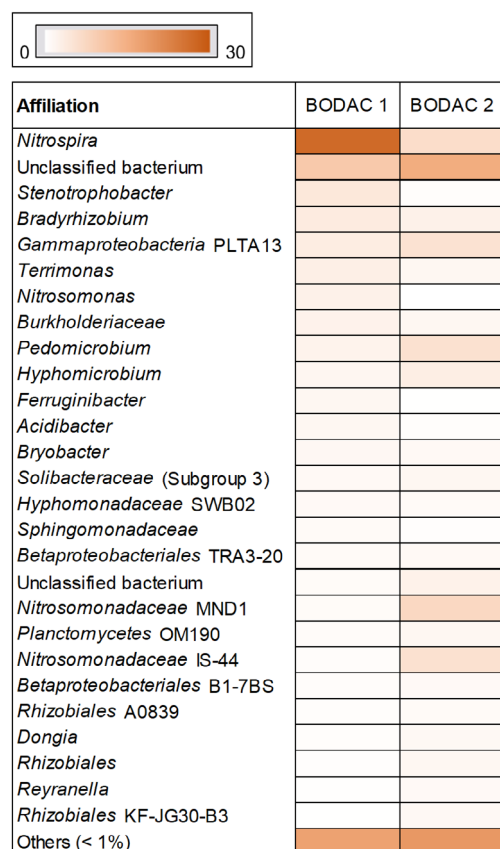
1.3 MICROBIAL COMMUNITY PRESENT IN THE FULL-SCALE BODAC FILTERS

Microbial community analysis of the BODAC granules was performed and reported in Bernadet et al. (2023). DNA extracted from BODAC 1 and 2 was used for amplification and sequencing of 16S rRNA gene fragments, and the results (Figure 3) showed that the most dominant community members identified were related to either nitrogen removal or manganese oxidation, explaining the ability of BODAC filters as an effective nitrification and manganese removal system. *Nitrospira* and *Nitrosomonadaceae* (MND1 and IS-44) were the dominant genera found in BODAC 1 and 2, respectively. Among others, *Pedomicrobium* and *Hypomicrobium*, were

also detected for their presence in the BODAC filters. They are genera widely reported to have the ability to oxidize soluble manganese to insoluble manganese (Gebers, 1981; Tyler, 1970).

FIGURE 3

RELATIVE ABUNDANCES OF DOMINANT BACTERIAL GROUPS (>1 % RELATIVE ABUNDANCE) IDENTIFIED VIA MICROBIAL COMMUNITY ANALYSIS USING 16S rRNA GENE AMPLICON SEQUENCING OF WHOLE GRANULES SAMPLED FROM BODAC 1 AND 2, REPORTED AS A PERCENTAGE (IN THE RANGE 0–30 %), AND THEIR TAXONOMY CLASSIFICATION AT THE IDENTIFIED LEVEL. ALL AMPLICON SEQUENCE VARIANTS <1 % ARE SUMMED TOGETHER AND PRESENTED AS OTHERS (N = 3, THE PERCENTAGE VALUE IS THE MEAN AVERAGE). COPYRIGHT 2023 BY BERNADET ET AL. (ELSEVIER)



1.4 POTENTIAL MECHANISMS OF OMPS REMOVAL

In BAC system, adsorption and biodegradation are considered as the main mechanisms of OMP removal. The surface area of BODAC filters operated 9 - 11 years remained stable ~ 300 m² g⁻¹, suggesting the limitation of adsorption and/or adsorption and desorption occurred simultaneously, thus the stable and generally unchanged surface area can be maintained while the filters actively remove OMPS. In the case of biodegradation, complete nitrification was always achieved during the process during the 2-year monitoring, the enzymatic activity of nitrifying bacteria could significantly contribute to the co-metabolism of OMPS (Men et al., 2017; Rattier et al., 2014). Manganese oxidation was probably catalyzed by several microbial groups identified in the granular communities, and the presence of manganese oxides could contribute to the oxidation of OMPS (Li et al., 2022).

1.5 THE EFFECT OF OXYGEN DOSING

Batch bottle experiments were performed using synthetic water of UF filtrate, spiked with 4 types of OMPS: benzotriazole, sotalol, gabapentin, and irbesartan. The bottles were flushed with oxygen. No significant changes in calcium, sodium, potassium, orthophosphate and sulphate parameters. However, there were slight changes in the soluble iron concentration, but not in the soluble manganese concentration. It appeared that benzotriazole and irbe-

sartan were removed at high DO concentrations in water (approximately 62 mg O₂/L), and sotalol and gabapentin were not removed. The organic analysis conducted indicated that benzotriazole and irbesartan were not mineralized, but transformed.

2. PILOT-SCALE BODAC FILTERS

2.1 COMPARABLE BODAC FILTERS PERFORMANCE WITH AND WITHOUT THE UF PRE-TREATMENT

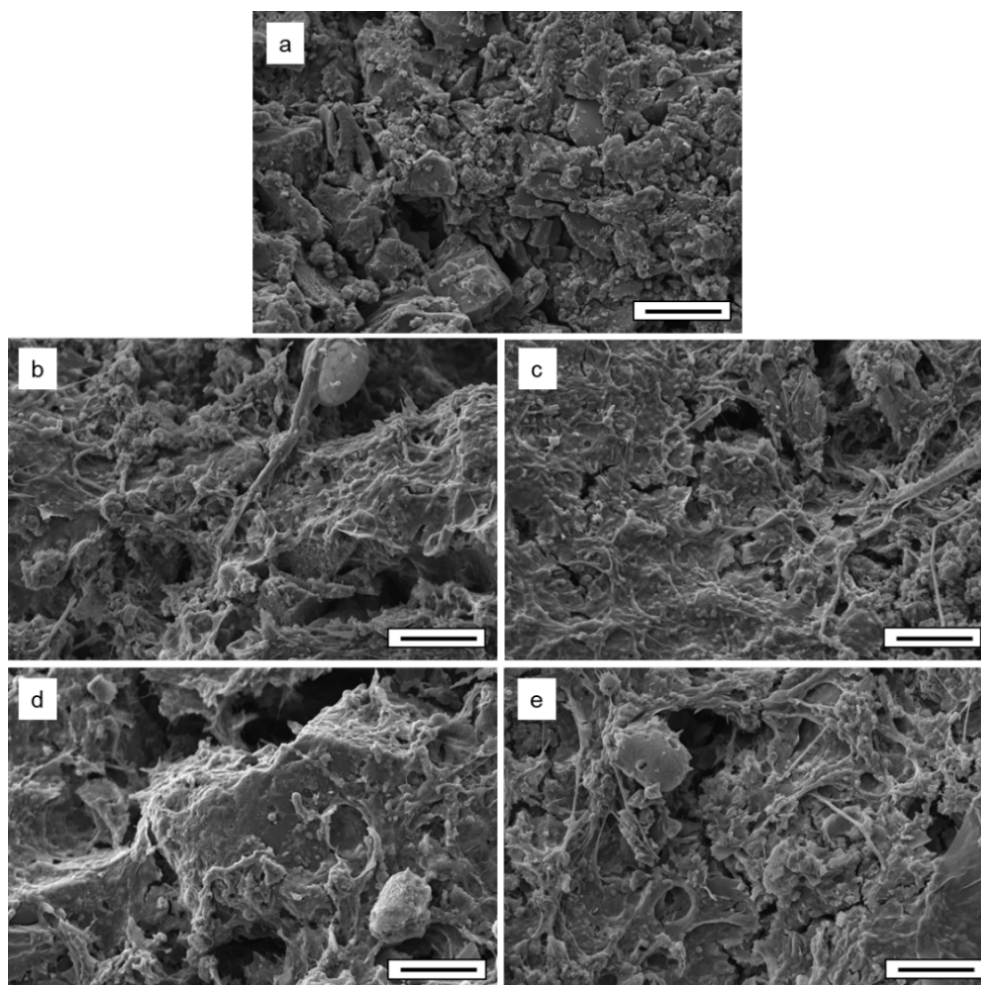
The performance of BODAC filters with or without the UF pre-treatment was assessed in July, September and December 2022 by comparing the performance of BODAC 1 full-scale and BODAC A pilot-scale. Without the UF, the pilot BODAC A can remove biopolymers compounds for 5 – 26%. The measurements on COD (15 – 30%), iron (20 – 40%), and manganese (> 90%) removal were comparable with BODAC 1 full-scale where the UF pre-treatment applied. The changes in the nitrogen speciation were also observed in both full- and pilot-scale filters, where there was no net removal TN. However, it was found that the UF removed at least 50 % of NH₄⁺, minimising NH₄⁺ loading to the BODAC filters. Regardless of its concentration at the inlet (varied from 0.5 – 5 mg N/L), NH₄⁺ completely transformed into NO₃⁻ in the BODAC full- and pilot-scale filters.

2.2 PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF BODAC A AND B

The pilot-scale BODAC filters consist of two parallel filters, BODAC A and B filters, where BODAC A is filled with carbon granules from BODAC 1 in the full-scale plant and BODAC B is filled with virgin carbon granules. The representative images of the surface morphology of virgin granular activated carbon (GAC) and BODAC granule samples observed by scanning electron microscopy (SEM) are shown in Figure 4. The BODAC A was operated for more than 400,000 bed volumes (BV) or 11 years (Figure 4b and c), while the BODAC B was operated for only 2500 BV or 1 month (Figure 4d and e). It was observed that the biofilm was present on the surface of carbon for both BODAC A and B, despite the BODAC B was operated for only 1 month. The biological removal in the GAC/BAC filter was usually expected after ~20000 BV passed the filter, but the bacterial community could be detected earlier, around ~2500 BV (Knezev, 2015). The still presence of biofilm on the surface of carbon granules even after backwash indicates that there are persistent biofilms remaining on the carbon surface that were not washed-out during the backwash operation using air and water (Figure 4f and e). Backwashing removed most of the loosely bound biofilm and some of inorganics similarly of that in the full-scale BDOAC filters (Figure 2).

The specific surface area of carbon granules in BODAC A was about 305 m²/g, and as a comparison, it is about 1007 m²/g for virgin GAC, suggesting the reduction of 70% after 11 years of operation. The BET_{SSA} of the carbon granules in BODAC A remains stable with small fluctuation, similar to that of the full-scale filters (Bernadet et al., 2023). The BET_{SSA} of the carbon granules in BODAC B decreased by approximately 50% compared to virgin GAC in only one month of operation, or 2500 BV passed through the filter. Most of the decrease occurred in the micropore surface area, the adsorption sites for contaminants and/or OMPs. In contrast to BODAC A, the accumulation of calcium, iron and manganese in BODAC B was less pronounced after 1 month of operation.

FIGURE 4 REPRESENTATIVE SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM) IMAGES OF THE SURFACE OF A. VIRGIN CARBON GRANULE (GAC), B. CARBON GRANULE FROM BODAC A BEFORE BACKWASH, C. CARBON GRANULE FROM BODAC A AFTER BACKWASH, D. CARBON GRANULE FROM BODAC B BEFORE BACKWASH, AND E. CARBON GRANULE FROM BODAC B AFTER BACKWASH. SCALE BARS ARE 10 μm



2.3 PERFORMANCE OF BODAC B

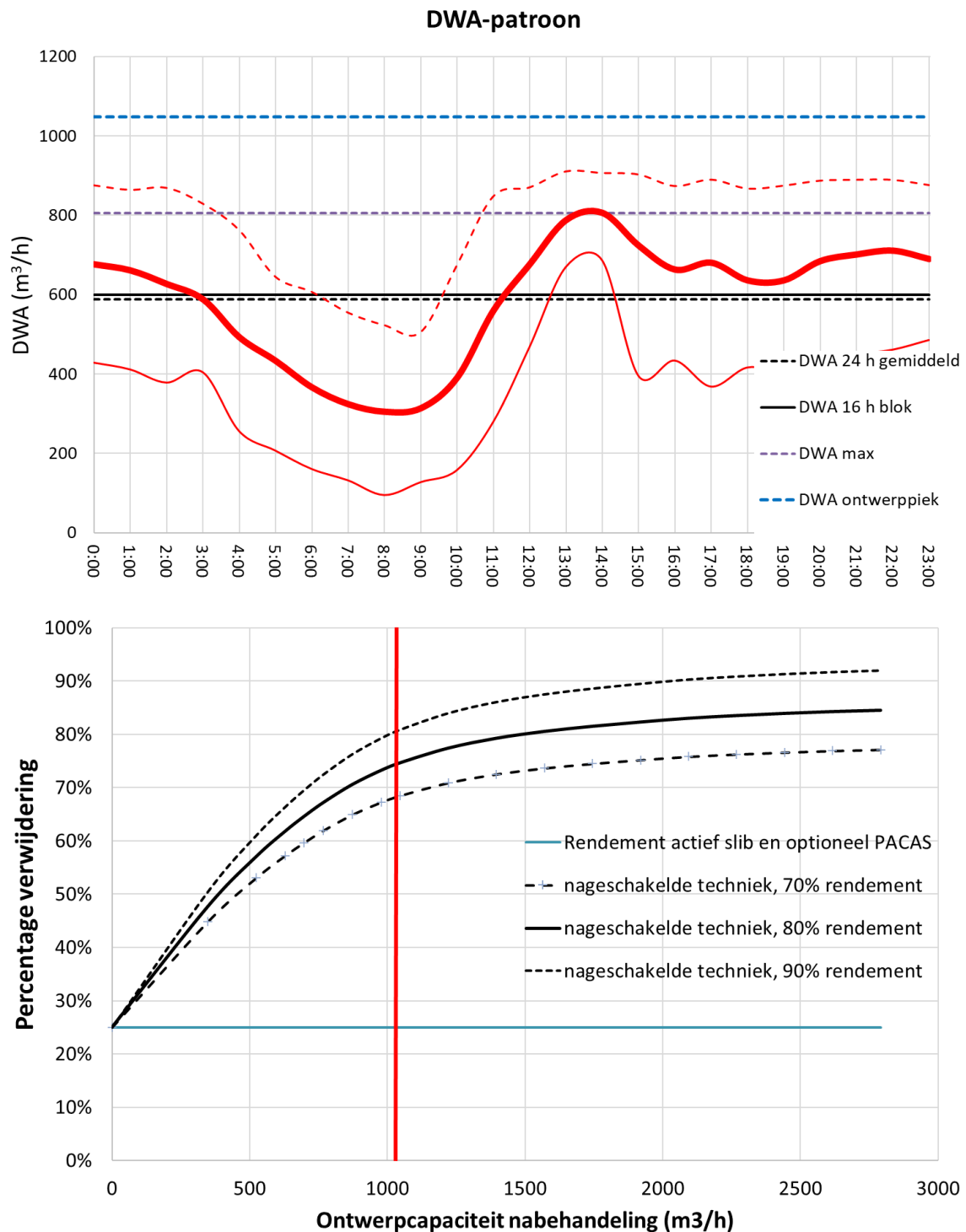
After 720 BV (August 17th or 2 weeks after the BODAC B was put into operation), the BODAC B removed all OMPs below the detection limit. At this BV, the BODAC B removed approximately 86%, 86% and 47% of COD, iron, and manganese, respectively. In these first few days of BODAC B operation, the main removal mechanisms were hypothesized to be adsorption, where the contaminants were adsorbed into the pores of the carbon, and biodegradation was still limited as the biofilms were just starting to grow. After one month of BODAC B operation or at 2500 BV, COD and iron removal decreased to 53% and 58%, respectively, while manganese removal increased to 89%. The decrease in COD and iron is due to the decrease in the BET_{SSA} of the BODAC B carbon granules. The COD removal decreased in BODAC B, where the decrease of organic compounds is commonly found in the performance of BAC filters (Fundneider et al., 2021), as the adsorption process is no longer a dominant process within the operating time. The increase in manganese removal is hypothesized to be related to the development of a biofilm on the carbon surface, where the biofilm can adsorb manganese or even utilize manganese, oxidize it and retain it on the carbon surface. Manganese removal in BAC systems is probably related to the activity of manganese oxidizing bacteria (MOB), which convert soluble manganese (Mn^{2+}) to insoluble manganese oxides (MnOx) on the granule surface (Bernstein et al., 2022).

3. REFERENCES

- Bernadet, O., Larasati, A., van Veelen, H. P. J., Euverink, G. J. W., & Gagliano, M. C. (2023). Biological Oxygen-dosed Activated Carbon (BODAC) filters – A bioprocess for ultrapure water production removing organics, nutrients and micropollutants. *Journal of Hazardous Materials*, 458, 131882. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131882>
- de Vogel, D., van der Maas, P., Kloosterman-Greftenhuis, J., & Doost, S. (2020). *Biologisch Actiefkoolfiltratie Met Zuurstofdosering Voor Verwijdering Microverontreinigingen Uit Rwzi-Afvalwater*.
- Fundneider, T., Alonso, V. A., Wick, A., Albrecht, D., & Lackner, S. (2021). Implications of biological activated carbon filters for micropollutant removal in wastewater treatment. *Water Research*, 189, 116588. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116588>
- Gebbers, R. (1981). Enrichment, isolation, and emended description of *Pedomicrobium ferrugineum* Aristovskaya and *Pedomicrobium manganicum* Aristovskaya. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 31(3), 302 – 316. <https://doi.org/10.1099/00207713-31-3-302>
- Knezev, A. (2015). *Microbial Activity in Granular Activated Carbon Filters in Drinking Water Treatment (Issue September)* [PhD Thesis, Wageningen University]. <https://doi.org/ISBN978-94-6257-244-7>
- Li, H., Fu, B., Huang, H., Wu, S., Ge, J., Zhang, J., Li, F., & Qu, P. (2022). Catalytic degradation of organic pollutants by manganese oxides: a comprehensive review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 34(1), 395 – 406. <https://doi.org/10.1080/26395940.2022.2123047>
- Men, Y., Achermann, S., Helbling, D. E., Johnson, D. R., & Fenner, K. (2017). Relative contribution of ammonia oxidizing bacteria and other members of nitrifying activated sludge communities to micropollutant biotransformation. *Water Research*, 109, 217 – 226. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.048>
- Rattier, M., Reungoat, J., Gernjak, W., Keller, J., & Joss, A. (2012). Investigating the role of adsorption and biodegradation in the removal of organic micropollutants during biological activated carbon filtration of treated wastewater. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2(3), 127 – 139. <https://doi.org/10.2166/wrd.2012.012>
- Rattier, M., Reungoat, J., Keller, J., & Gernjak, W. (2014). Removal of micropollutants during tertiary wastewater treatment by biofiltration: Role of nitrifiers and removal mechanisms. *Water Research*, 54, 89 – 99. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.030>
- Tyler, P. A. (1970). Hyphomicrobia and the oxidation of manganese in aquatic ecosystems. *Antonie van Leeuwenhoek*, 36(1), 567 – 578. <https://doi.org/10.1007/BF02069059>

BIJLAGE XIII

ACHTERGRONDINFORMATIE CO₂ FOOTPRINT EN INFORMATIE M.B.T. KOSTENBEREKENING



		m ³
inhoud persleiding		12710
inhoud VBT		6482
inhoud actief slib		27200
inhoud NBT		16058
		%
rendement AT micro's		25%
debietreeks	uursom (m ³ /h)	0,9

Invulblad parameters: geel gearceerde velden invullen voor zover van toepassing

Onderwerp	Eenheid	Parameter per jaar	Parameter per jaar	Parameter per jaar	Parameter per jaar	Parameter per jaar	Invulhulp
Naam		Variant 1 Referentie	Variant 2 PACAS	Variant 3 Ozon + ZF	Variant 4 GAK	Variant 5 BODAC	
Hoeveelheden							
Aanvoer rioolwater	m ³	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	7.665.000	Niet aanpasbaar
Influent CZV	kg	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	3.831.681	Niet aanpasbaar
Influent Nkj	kg	359.588	359.588	359.588	359.588	359.588	Niet aanpasbaar
Effluent Nitot	kg	52.140	52.140	52.140	52.140	52.140	Niet aanpasbaar
Verwijderde i.e. 150 g TZV	kg	97.225	97.225	97.225	97.225	97.225	Niet aanpasbaar
Behandelde i.e. in influent 150 g TZV	kg	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	Niet aanpasbaar
DOC effluent	mg/l	11	11	11	11	11	Niet aanpasbaar
Dimensionering verwijdering micro's							
Minimale jaarhoeveelheid nabehandeling	m ³ /jaar	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	5.365.500	
Behandelde jaarhoeveelheid nabehandeling	m ³ /jaar	5.365.500	7.665.000	5.365.500	5.365.500	5.365.500	Te behandelen jaarhoeveelheid minimaal 70%
Geproduceerd slib	ton ontwaterd slib	6.100	6.192	6.100	6.100	6.100	Mag alleen worden aangepast bij geïntegreerde maatregelen, niet bij nabehandeling
Drogestofgehalte slib	%	21,10%	22,29%	21,10%	21,10%	21,10%	Mag alleen worden aangepast bij geïntegreerde maatregelen, niet bij nabehandeling
Geproduceerd slib	ton ds	1.287	1.380	1.287	1.287	1.287	
Transport voelbaar slib	km	50	50	50	50	50	Niet aanpasbaar
Transport voelbaar slib	ton	0	0	0	0	0	Niet aanpasbaar
Transport ontwaterd slib	km	100	100	100	100	100	Niet aanpasbaar
Transport ontwaterd slib	ton	6.100	6.192	6.100	6.100	6.100	Niet aanpasbaar
Inkoop energie rwzi exclusief verwijdering micro's							
<i>Inkoop energie</i>							
Inkoop elektriciteit	kWh	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	1.193.548	Niet aanpasbaar
Inkoop aardgas	Nm ³	3.710	3.710	3.710	3.710	3.710	Niet aanpasbaar
Inkoop warmte	GJ						Niet aanpasbaar
<i>Inkoop brandstoffen</i>							
Diesel	kg	16.000	16.000	16.000	16.000	16.000	Niet aanpasbaar
Inkoop energie rwzi voor verwijdering micro's							
<i>Inkoop energie</i>							
Inkoop elektriciteit	kWh	0	91.104	654.591	4.380	468.417	Excl. opvoeren effluent en spoelwater; excl. productie en behandeling spoelwater
Overig invloed nabehandeling op rwzi							
Opvoeren rioolwater	meter	0	0	8	8	8	Bij nageschakelde behandeling 8 meter opvoeren conform standaard
Percentage spoelwater		0%	0%	10%	10%	10%	Bij nageschakelde behandeling 10% spoelwater toepassen conform standaard
Gebruik spoelwater	m ³	0	0	536.550	536.550	536.550	
Akoeren spoelwater	m ³	0	0	536.550	536.550	536.550	
Inkoop hulpstoffen		Oplossing					
Actieve kool	kg	100%	91.980		83.200	16.667	NB let bij GAK op bulkgewicht per m ³ actieve kool
Actieve kool geregenereerd	kg	100%			312.000		NB let bij GAK op bulkgewicht per m ³ actieve kool
Actieve kool biologische oorsprong	kg	100%					NB CO ₂ -waarde obv haalbaarheidsstudie biokolen
Aluminiumchloride, hydraatvorm	kg	40%					Voor chemicaliën let op % oplossing (zie opmerking handleiding cel A8)
Aluminiumsulfaat, poedervorm	kg	100%					
Antiscalants (polycarboxylaten)	kg	100%					
Azijnzuur	kg	98%					
Bio-ethanol	kg	100%					
Calciumoxide (ongebuste kalk; poeder)	kg	100%					
Citroenzuur	kg	50%					
Glycerine uit epichloorhydrine	kg	100%					
Glycerine uit koolzaadolie	kg	100%					
Izer(II)chloride	kg	40%	260.000	260.000	260.000	260.000	
Izerchloridesulfaat	kg	100%					
Izersulfaat	kg	100%					
Kalkhydraat	kg	100%					
Kalkmelk op basis van gebuste kalk	kg	100%					
Koolstofdioxide, vloeibaar	kg	100%					
Magnesiumchloride	kg	54%					
Magnesiumchloride, anhydride	kg	100%					
Magnesiumchloride, hydraat, vaste vorm	kg	100%					
Magnesiumoxide	kg	100%					
Melasse uit suikerbieten	kg	100%					
Methanol	kg	100%					
Natriumaluminaat oplossing	kg	38%					
Natriumchloride (zout), poedervorm	kg	100%					
Natriumhypochloriet	kg	15%					
Natronloog kwikcelproces	kg	50%					
Natronloog, membraanproces	kg	50%					
Natronloog, productiemix	kg	50%					
Polymeer, anionisch	kg	100%					
Polymeer, anionisch, vloeibaar	kg	100%					
Polymeer, kationisch, poeder	kg	100%					
Polymeer, kationisch, vloeibaar	kg	100%	23.168	22.083	23.168	23.168	
Polyaluminiumchloride	kg	100%	3.200	3.200	3.200	3.200	Niet aanpasbaar
Polyaluminiumsulfaat, poeder	kg	100%					
Waterstofperoxide	kg	50%					
Zoutzuur, reactie propyleen en chloor	kg	36%					
Zoutzuur uit de reactie van waterstof en chloor	kg	100%					
Zoutzuur uit het Mannheim proces	kg	100%					
Zuurstof (vloeibaar)	kg	100%		445.337		118.041	
Zwavelzuur, vloeibaar	kg	100%					
Materialen							
Gewapend beton	m ³	3.800	3.805	4.050	4.030	4.030	
Levensduur gewapend beton	jaar	30	30	30	30	30	Niet aanpasbaar

CO2 footprint verwijdering microverontreinigingen uit rwzi-afvalwater							
			Ref	PACAS	Ozon+zandfiltratie	GAK	BODAC
CO2 footprint totaal	ton CO2/jr	1265		2198	1953	3009	1878
behandelde hoeveelheid	m3/jaar	0		7.665.000	5.365.500	5.365.500	5.365.500
CO2 footprint verwijdering micro's	g CO2/m3			122	128	325	114