



Ministerie van Infrastructuur
en Waterstaat

stowa

PILOTONDERZOEK UPFLOW GAK

VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN
DOOR GRANULAIR ACTIEFKOOL FILTRATIE



RAPPORT

2023
52

PILOTONDERZOEK UPFLOW GAK
VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN
DOOR GRANULAIR ACTIEFKOOL FILTRATIE

RAPPORT

2023

52

ISBN 978.94.6479.041.2



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 Joost van den Bulk - Tauw
Alexandra Deeke – Waterschap de Dommel
Peter van Horne – Waterschap de Dommel
Job Robben – Waterschap de Dommel
Ruud Schemen – Waterschap de Dommel

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Judith Kloosterman-Greftenhuis - Waterschap Vechtstromen
Christa Morgenschweis - Waternet
Veerle Luimstra - Witteveen+Bos
Tiza Spit - Witteveen+Bos
Manon Bechger - Waternet
Philip Schyns - Waterschap Rijn en IJssel
Miriam Bakker - Waterschap Vallei en Veluwe
Jantien Foekema - Norit Activated Carbon
Astrid Mous - WLN
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 2023-52

ISBN 978.94.6479.041.2

Het onderzoek is mede gefinancierd door Waterschap de Dommel met een financiële bijdrage vanuit TAUW.

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

UPFLOW GAK, EEN TOEKOMSTBESTENDIG ALTERNATIEF VOOR HET CONVENTIONELE GAK-FILTER

Op RWZI Hapert is onderzoek gedaan naar de inzetbaarheid van twee verschillende Upflow-GAK - technieken. In tegenstelling tot het conventionele GAK-filter wordt het Upflow-GAK-filter van onder naar boven doorstroomd. Door de opwaartse stroming is het actief kool in beweging met als resultaat beter contact tussen actief kool en het water en geen kortsluitstromingen. Hierdoor worden goede verwijderingsrendementen gehaald met een lagere CO₂-voetafdruk, zeker als gebruik gemaakt wordt van gereactiveerde kool.

Het Innovatieprogramma Microverontreinigingen uit afvalwater (IPMV) is een initiatief van Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) en de Nederlandse Waterschappen om de zoektocht naar innovatieve technologieën die beter of goedkoper zijn dan de standaard technologieën, te versnellen.

Vanuit het oogpunt om chemicaliënverbruik te reduceren is waterschap De Dommel op zoek gegaan naar technieken waarbij gereactiveerde kool op effectieve wijze kan worden ingezet voor de verwijdering van medicijnresten. Dit heeft geleid tot een haalbaarheidsstudie naar twee Upflow GAK-filteertechnieken Carboplus en Dynacarbon die is ingebracht in het IPMV. Op basis van de uitkomst van deze haalbaarheidsstudie is voor beide technieken een pilotonderzoek uitgevoerd op RWZI Hapert.

De Carboplus- pilot is een gefluidiseerd bed actief kool filter, waar meerdere malen per week, afhankelijk van de behandelde hoeveelheid (afval)water, vers actief kool wordt toegevoegd en beladen kool wordt onttrokken. Hierdoor kan het filter continu worden bedreven.

De Dynacarbon – pilot is een moving bed reactor, waar eenmalig actief kool in wordt gebracht dat met een mammoetpomp continu wordt gewassen. Beide pilots werden bedreven met reeds gereactiveerde kool.

De pilots werden gedurende 11 maanden ingezet op het effluent van RWZI Hapert om de effectiviteit van de verwijdering van organische microverontreinigingen te meten. Beide pilots zijn in staat gebleken om verwijderingsrendement van 80% en meer te halen bij een lagere CO₂-voetafdruk én voor lagere kosten dan een conventioneel GAK-filter. Daarnaast werd ook een afname van de ecotoxiciteit van 50% gehaald. Beide technologieën zijn interessant voor de Nederlandse RWZI's.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

In het kader van het Innovatieprogramma Microverontreinigingen van Stowa, het Rijk (Ministerie Infrastructuur en Waterstaat (IenW)) en de Nederlandse Waterschappen is er op verschillende RWZI's in Nederland pilot onderzoek uitgevoerd om duurzame en kosten efficiënte alternatieven voor de referentie technologieën PACAS, GAK en Ozon te testen en verder te brengen.

Op RWZI Hapert is een van deze onderzoeken uitgevoerd; twee verschillende Upflow-GAK-technieken zijn getest voor de inzetbaarheid op een Nederlandse RWZI. De geteste Upflow-GAK-technieken zijn Carboplus en Dynacarbon.

Beide technieken betreffen van onder naar boven doorstroomde GAK-filters, maar de uitvoeringsvorm verschilt.

De Carboplus-installatie is een gefluïdiseerd GAK-filter, die gebruik maakt van micro-grains (extra kleine actief kool granules $\pm 0,5\text{mm}$) en waarbij continu actief kool wordt toegevoegd afhankelijk van de hoeveelheid behandeld afvalwater.

De Dynacarbon- installatie is een bewegend bed GAK-filter, waar het filter in het begin met de totale hoeveelheid granulair actief kool wordt gevuld totdat het einde van de standtijd is bereikt.

Tijdens het pilotonderzoek van de Carboplus pilot zijn verschillende doseringen actief kool getest, namelijk 15, 18, 20 en 30 g/m^3 , om de invloed op het verwijderingsrendement vast te stellen. Verder zijn er geen instellingen aan deze pilot veranderd.

Tijdens het pilotonderzoek van de Dynacarbon is met name de verblijftijd van het te behandelen water in het filter gevarieerd, dit om aan de ene kant sneller het gewenste aantal bedvolumes te bereiken, maar aan de andere kant om inzicht te krijgen in de invloed van de verblijftijd op het verwijderingsrendement.

Naast de metingen aan het verwijderingsrendement werd ook de invloed op de ecotoxiciteit van het water gemeten.

Tijdens het onderzoek is gebleken dat de Dynacarbon in de zomer gevoelig was voor verstopping als gevolg van de aanwezige algenbloei. Dat is een aandachtspunt bij verdere opschaling.

De Carboplus pilot wist met een dosering van 20 g/m^3 een verwijderingsrendement van >80% te behalen en met een dosering van 30 g/m^3 werd een verwijderingsrendement van >85% voor de beste 7 uit 11 Nederlandse gidsstoffen gehaald.

Doseerhoe- veelheid in g/m^3	Gemiddelde verwijdering in % van de beste 7 uit 11 gidsstoffen	Gemiddelde verwijdering in % van 11 gidsstoffen	Gemiddelde verwijdering in % van 19 (monitoring) gidsstoffen
15	74	63	61
18	76	66	63
20	81	73	65
30	86	77	73

De Dynacarbon pilot wist tot 15.000 behandelde bedvolumes een verwijderingsrendement van >85% voor de beste 7 uit 11 Nederlandse gidsstoffen te behalen.

Op de ecotoxiciteitstesten wisten zowel de Carboplus pilot, als ook de Dynacarbon pilot een afname van >50% van de ecotoxiciteit te realiseren, conform de eisen uit het IPMV-programma.

Op basis van deze onderzoeksresultaten is voor beide technologieën een ontwerp voor de full-scale installatie (standaard rwzi van 100.000 i.e.) gemaakt, om de CO₂-footprint, investeringskosten en de operationele kosten te bepalen.

Techniek	CO ₂ footprint (g CO ₂ /m ³)	Kosten €/m ³	Verwijderingsrendement gidsstoffen (%)
Carboplus GAK	96 - 173	0,15	80 - 85
Dynacarbon GAK	110 - 187	0,21	80 - 85

Met beide technologieën wordt een nageschakeld verwijderingsrendement van 80-85% voor de beste 7 uit 11 Nederlandse gidsstoffen behaald. De kostprijs voor de Carboplus installatie komt daarbij uit op 0,15€/m³ met een CO₂-footprint van 96 -173 gCO₂/m³ (dit is afhankelijk van de hoeveelheid gereactiveerde kool). De kostprijs voor de Dynacarbon installatie komt uit op 0,21€/m³ met een CO₂-footprint van 110 – 187 gCO₂/m³ (dit is afhankelijk van de hoeveelheid gereactiveerde kool).

Beide technologieën presteren beter dan het referentie GAK-filter en vergelijkbaar met de referentie ozon + zandfiltratie en zijn dus interessant voor de Nederlandse RWZI's.

Ook de doorkijk naar de concept Europese richtlijn stedelijk afvalwater en de daarbij behorende lijst aan gidsstoffen laat zien, dat zowel de Carboplus, als ook de Dynacarbon in staat zijn om een nageschakeld verwijderingsrendement >85% te blijven halen.

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 UPFLOW GAK VERWIJDERING VAN MICROVERONTREINIGINGEN DOOR GRANULAIR ACTIEFKOOL FILTRATIE

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel van het pilotonderzoek	1
1.3	Onderzoeksvragen	2
1.3.1	Kennisvragen Carboplus	2
1.3.2	Kennisvragen Dynacarbon	2
1.4	Leeswijzer	2
2	MATERIAAL EN METHODEN	3
2.1	Actief kool	3
2.1.1	Microverontreiniging en adsorptie	3
2.1.2	Toegepaste actief kool	4
2.1.3	CO ₂ -footprint en hergebruik	5
2.2	Opzet Pilots	6
2.3	Beschrijving Carboplus pilot	7
2.3.1	Installatieopbouw	7
2.3.2	Bedrijfsvoering	8
2.3.3	Spoelcyclus	9
2.4	Beschrijving Dynacarbon pilot	9
2.4.1	Installatieopbouw	9
2.4.2	Bedrijfsvoering	10
2.5	Tijdslijn van de bedrijfsvoering	11
2.6	Bemonstering en analyse	11
2.6.1	Monsternamen	11
2.6.2	Monitoringsparameters	12
2.6.3	Gidsstoffen	12
2.6.4	Macroparameters	13
2.6.5	Online metingen	13
2.6.6	Biologische effectmonitoring en PFAS	13
2.6.7	Bepaling kooluitspoeling	14
2.6.8	Antibiotica resistentie	14

3	RESULTATEN	15
3.1	Inleiding	15
3.2	Verwijderingsrendementen microverontreinigingen	15
3.2.1	RWZI Hapert	15
3.2.2	Carboplus pilot	16
3.2.3	Dynacarbon pilot	19
3.3	Biologische effectmonitoring	24
3.4	Verwijderingsrendementen macroparameters	24
3.4.1	Carboplus	25
3.4.2	Dynacarbon	26
3.5	PFAS	28
3.6	Kooluitspoeling	28
3.7	Antibioticaresistentie	29
4	BEANTWOORDEN ONDERZOEKSVRAGEN EN DISCUSSIE	31
4.1	Inleiding	31
4.2	Carboplus	31
4.3	Onderzoeksvragen Carboplus	32
4.4	Dynacarbon	33
4.5	Onderzoeksvragen Dynacarbon	34
4.6	Toekomst onder de Europese richtlijn stedelijk afvalwater	35
4.7	Uitgangspunten voor full-scale installatie	37
4.7.1	Carboplus	37
4.7.2	Dynacarbon	37
5	DUURZAAMHEID	38
5.1	Inleiding	38
5.2	Uitgangspunten	38
5.3	CO ₂ -footprint	39
6	KOSTEN	41
6.1	Inleiding	41
6.2	Investeringskosten	41
6.3	CAPEX en OPEX	42
7	ONTWERP FULL-SCALE INSTALLATIE	44
7.1	Inleiding	44
7.2	Uitgangspunten rwzi Hapert	44
7.3	Schetsontwerp	44
7.4	Inpassing op rwzi Hapert	47
7.5	Doorvertaling naar 100.000 i.e. referentie rwzi	48
8	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	50
8.1	Conclusies	50
8.2	Aanbevelingen	51
9	BIBLIOGRAFIE	52

BIJLAGE I	NADERE BESCHRIJVING OPBOUW/WERKING VAN ACTIEF KOOL	53
BIJLAGE II	BESCHRIJVING SPOELCYCLUS CARBOPLUS	54
BIJLAGE III	SPECIFICATIES VAN DE IN DE PILOT GEBRUIKTE SOORTEN ACTIEF KOOL	55
BIJLAGE IV	HYDRAULISCHE VERBLIJFTIJD	56
BIJLAGE V	BESCHRIJVING BEPALING UITSPOELING ACTIEFKOOL	57
BIJLAGE VI	RESULTATEN IJKREEKS UITSPOELING KOOLBEPALING	59
BIJLAGE VII	VERWIJDERING MACROPARAMETERS	61
BIJLAGE VIIIA	RESULTATEN PFAS-ONDERZOEK STOWA	63
BIJLAGE VIIIA	RESULTATEN TKI-PROJECT 'EEN INTEGRALE AANPAK VOOR OPSPORING VAN ONGEWENSTE PERFLUORSTOFFEN IN DE WATERKETEN'	65
BIJLAGE IX	RESULTATEN KOOLUITSPOELING	68
BIJLAGE X	BOUWKOSTEN	70

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING

De emissie van medicijnresten naar het oppervlaktewater is een steeds groter aandachtspunt geworden. In dat kader heeft de STOWA dan ook een landelijke hotspotanalyse¹ laten uitvoeren om te onderzoeken welke rioolwaterzuiveringen een relatief groot aandeel hebben op het lozen van medicijnresten op het oppervlaktewater. Daarnaast is ook in het kader van de Schone Maaswaterketen een hotspotanalyse voor het stroomgebied van de Maas uitgevoerd. Hierbij kwamen voor Waterschap De Dommel naast Tilburg, Eindhoven Biest-Houtakker de rioolwaterzuiveringen (RWZI's) Soerendonk en Hapert naar voren. Naar aanleiding hiervan zijn er 2 verkenningen uitgevoerd, ozonisatie op Soerendonk en inzet van (granulair) kool op Hapert. Op basis daarvan is er een haalbaarheidsstudie uitgevoerd voor de verwijdering van medicijnresten op RWZI Hapert.

In juni 2020 is de haalbaarheidsstudie Upflow GAK-filtratie opgeleverd (TAUW, 2020) waarbij de haalbaarheid van twee innovatieve systemen te weten het Carboplus-systeem (in het vervolg te noemen Carboplus) van Stereau en het Dynacarbon-systeem (in het vervolg te noemen Dynacarbon) van Nordic Water onderzocht is voor de verwijdering van microverontreinigingen. Vanuit de Dommel is deze studie vervolgens ingebracht in het Innovatieprogramma Microverontreinigingen (IPMV). De haalbaarheidsstudie is eerder met de BC GAK van het IPMV besproken en akkoord bevonden.

In de haalbaarheidsstudie wordt geconcludeerd dat beide systemen aanzienlijke duurzaamheidsvoordelen bieden ten opzichte van de referentie systemen PACAS, ozon + zandfiltratie en GAK. De kosten van beide systemen zijn competitief met ozon + zandfiltratie. Naar aanleiding van de haalbaarheidsstudie heeft Waterschap De Dommel besloten een pilot onderzoek uit te voeren op de RWZI Hapert met zowel Carboplus als met Dynacarbon. Het pilotonderzoek is uiteindelijk ook ondergebracht in het IPMV.

1.2 DOEL VAN HET PILOTONDERZOEK

Het doel van dit pilot onderzoek is om voor zowel de Carboplus als de Dynacarbon de haalbaarheid² voor de Nederlandse zuiveringspraktijk vast te stellen. Concreet betekent dit het bepalen van het verwijderingsrendement op de 19 (aspirant)gidsstoffen en het bijbehorende GAK verbruik, de ecotoxicologische effecten en de duurzaamheid van het concept. Aan de hand van bovengenoemde doelstelling zijn onderzoeksvragen geformuleerd. Deze zijn in de volgende paragraaf uitgewerkt.

1 Hotspotanalyse geneesmiddelen (2015-32), Landelijke hotspotanalyse geneesmiddelen RWZI's (2017-42)

2 Omdat het project onderdeel uitmaakt van de 2e tranche is de eis voor de verwijdering over de gehele RWZI vastgesteld op 80 % i.p.v. 70%.

1.3 ONDERZOEKSVRAGEN

De kennisvragen uit de haalbaarheidsstudie zijn voor de pilots op de RWZI Hapert te herleiden naar de volgende vragen:

1.3.1 KENNISVRAGEN CARBOPLUS

1. Is het Carboplus systeem in staat om bij een GAK-dosering van 15 mg/l een verwijderingsrendement van >80% te genereren op de gidsstoffen? (verwijderingsrendement berekend over de RWZI + Carboplus systeem) bij een hydraulische aanvoer van 15 m/h?
2. Hoe ontwikkelt het verwijderingsrendement zich op de gidsstoffen bij een hogere of lagere dosering van het actief kool?
3. In welke mate wordt PFAS verwijderd in het Carboplus systeem?
4. Wat is het spoelwaterverbruik per m³ behandeld afvalwater?
5. Is er sprake van uitspoeling van kooldeeltjes uit het Carboplus systeem en zo ja hoeveel?
6. Wat is de CO₂ footprint van het Carboplus systeem bij de gehanteerde GAK-doseringen en toegepaste gereactiveerde GAK?
7. In welke mate neemt de toxiciteit van het rwzi effluent af door het Carboplus systeem.
8. Wat zijn de kosten van het Carboplus systeem omgerekend per m³ behandeld afvalwater?

1.3.2 KENNISVRAGEN DYNACARBON

9. Hoeveel bedvolumes kan de Dynacarbon behandelen voordat het verwijderingsrendement voor de gidsstoffen onder de 80% komt?
10. Hoe verloopt het verwijderingsrendement van 7,11 en 19 gidsstoffen door de Dynacarbon inclusief reguliere rwzi.
11. Hoeveel mg GAK/l is er nodig om over de Dynacarbon tot een verwijderingsrendement van 80% (voor gidsstoffen) te komen.
12. Hoe ontwikkelt het verwijderingsrendement per gidsstof door de Dynacarbon zich over de tijd.
13. In welke mate worden N, P en PFAS verwijderd door de Dynacarbon.
14. In welke mate neemt de toxiciteit van het rwzi effluent af door de Dynacarbon.
15. Wat is het spoelwaterverbruik van de Dynacarbon per m³ behandeld afvalwater.
16. Wat is de GAK CO₂ footprint bij een verwijderingsrendement van 80% voor de beste 7 van 11 gidsstoffen over de Dynacarbon.

1.4 LEESWIJZER

In Hoofdstuk 2 worden het materiaal en de methode die tijdens beide pilots zijn gebruikt beschreven. Eveneens komt in dit hoofdstuk aan bod hoe de adsorptie van kool functioneert, welke parameters worden geanalyseerd en hoe de monsternamen zijn gedaan. In Hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de resultaten die zijn behaald door beide pilots. Vervolgens worden de onderzoeksvragen beantwoord in hoofdstuk 4 en wordt de CO₂-footprint berekend in hoofdstuk 5. De kostenberekening voor zowel de kosten in euro's per behandeld m³ afvalwater als de totale investeringskosten zijn uitgewerkt in hoofdstuk 6. Het ontwerp van een full-scale installatie is opgenomen in hoofdstuk 7. In hoofdstuk 8 worden de conclusies en aanbevelingen behandeld.

2

MATERIAAL EN METHODEN

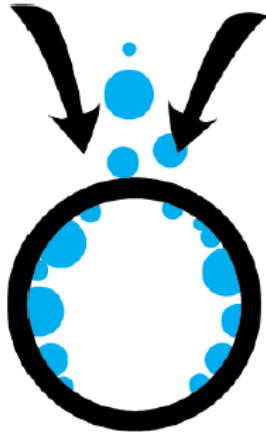
In het kader van het Innovatie Programma Microverontreinigingen uit RWZI-afvalwater' (IPMV) worden door de Nederlandse Waterschappen verschillende technieken onderzocht op haalbaarheid voor de verwijdering van microverontreinigingen. In dit hoofdstuk worden de op RWZI Hapert toegepaste technieken met nageschakeld granulair kool geïntroduceerd en nader toegelicht. Hierbij komen eerst de gemeenschappelijke thema's aan de orde en vervolgens de specifieke zaken per pilot.

2.1 ACTIEF KOOL

2.1.1 MICROVERONTREINIGING EN ADSORPTIE

Toepassing van actief kool, in de vorm van nageschakelde filtratie is een van de mogelijkheden om medicijnresten en andere microverontreinigingen te verwijderen uit (afval)waterstromen. Deze verwijdering gebeurt bij actief kool door middel van adsorptie. Bij adsorptie blijft de verontreiniging aan het actief kool zitten, zie Afbeelding 1.

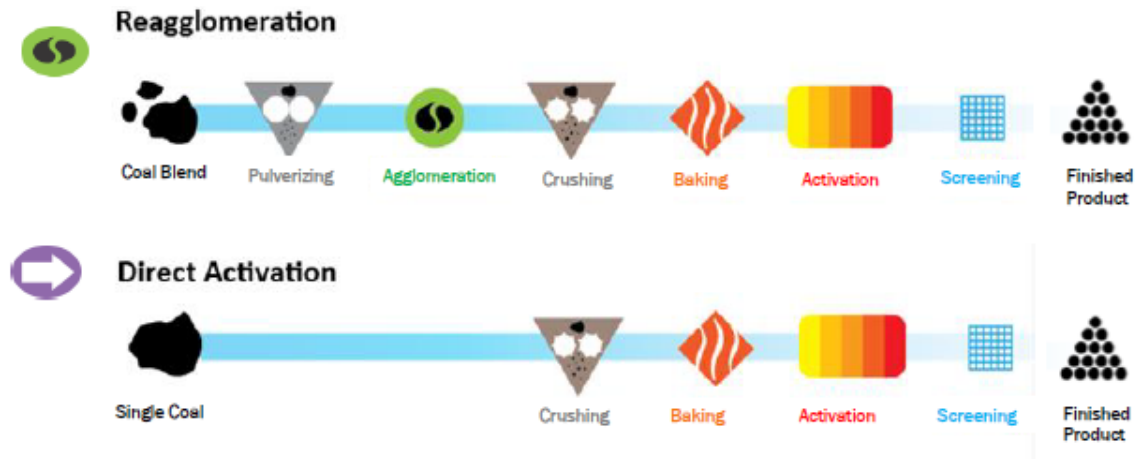
AFBEELDING 1 ADSORPTIE AAN ACTIEF KOOL (CHEMVIRON (KURARAY COMPANY), 2021)



De moleculen van de microverontreinigingen worden op hun plaats gehouden door de inwendige adsorptie poriën van het actief kool. Het aantal en de grootte van de poriën van het actieve kool zijn cruciaal voor de prestaties. De verontreiniging moet er doorheen kunnen migreren zodat alle contactoppervlakken van de korrel optimaal wordt benut. Voor een verdere werking/opbouw van actief kool wordt verwezen naar bijlage I.

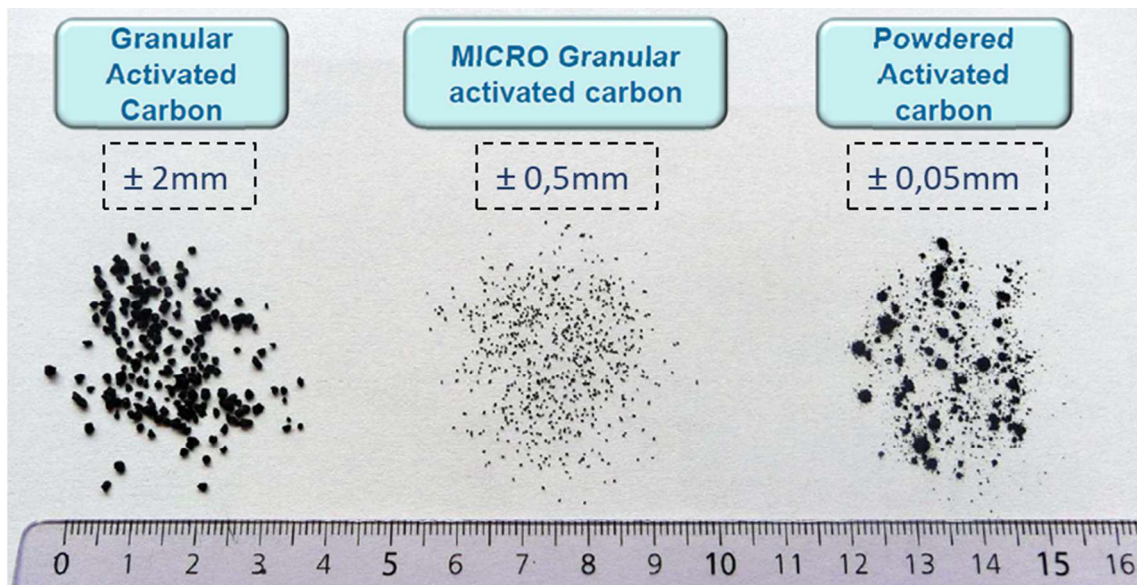
Actief kool wordt geproduceerd uit hout, kokosnoot, turf of steenkool. Het actief kool kan hierbij op twee manier worden geproduceerd, (1) een mengsel van verschillende kolen wordt vermalen en vervolgens wordt het poeder weer samengeklonken tot een grotere korrel (granulair kool), (2) één specifieke kool wordt vermalen en dat poeder wordt weer samengeklonken tot een grotere korrel. Deze twee manier zijn visueel weergegeven in Afbeelding 2. Het contactoppervlak van actief kool wordt door het activatieproces vergroot. Daardoor kan 5 gram actief kool door de aanwezigheid van de vele poriën een contactoppervlak hebben ter grootte van een voetbalveld.

AFBEELDING 2 ACTIVATIE PROCES ACTIEF KOOL (CHEMVIROON (KURARAY COMPANY), 2021)



Er zijn verschillende soorten actief kool, het gaat dan in hoofdzaak om poederkool en granulair kool. Daarnaast worden op beperkte schaal nog varianten toegepast zoals micro granulair actief kool in het Carboplus filter (verder micro GAK). Micro GAK is met een gemiddelde diameter van 0,5 mm aanzienlijk kleiner dan gangbaar granulair actief kool wat een diameter heeft van circa 2 mm en komt goed tot zijn recht in een fluidized bed systeem als Carboplus. In Afbeelding 3 wordt een indruk gegeven van de verschillende soorten. Let op: het poederkool bestaat uit 'hoopjes poeder' waardoor het groter lijkt dan micro GAK wat in werkelijkheid niet zo is.

AFBEELDING 3 GRANULAIR ACTIEFKOOL, MICRO GRANULAIR ACTIEF KOOL EN PLUKJES POEDER ACTIEF KOOL; BRON STEREAU



2.1.2 TOEGEPASTE ACTIEF KOOL

In het verleden is reeds pilot/full scale onderzoek gedaan met beide systemen waarbij ook diverse kolen van meerdere leveranciers zijn getest³. In dit pilot onderzoek is hier gebruik van gemaakt en is niet opnieuw een test naar de beste kool uitgevoerd. Het gekozen type granulair actief kool voor de pilot van Carboplus is de Cyclecarb 305 van Chemviron. Dit type kool bestaat uit micro-granules en heeft daardoor een groter contactoppervlak met het te behandelen afvalwater, tevens zijn hiermee de beste resultaten geboekt bij een eerdere pilot

³ Zie ook de eerdere haalbaarheidsstudie Hapert.

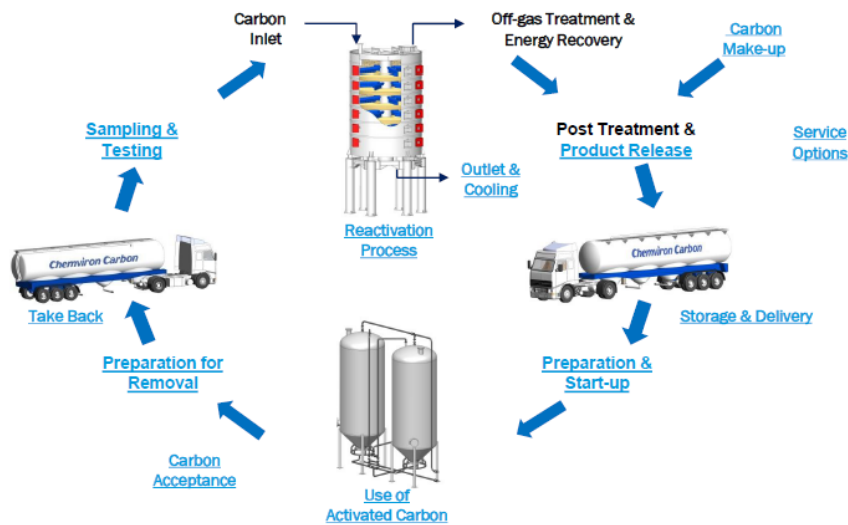
in Zwitserland op RWZI Penthaz⁴ (Triform 2018). Het is gereactiveerd granulair actief kool wat duurzaamheidsvoordelen biedt ten opzichte van niet te reactiveren kool.

De Dynacarbon pilot van Nordic Water is gevuld met Cyclecarb 401. Deze reactieerbare kool is als beste naar voren gekomen in eerdere experimenten⁵ met een dergelijk filter (Projectverbund Emmingen-Liptingen, 2015)

2.1.3 CO₂-FOOTPRINT EN HERGEBRUIK

De Cyclecarb 305 en 401 zijn bijzonder in gebruik doordat deze koolsoorten kunnen worden gereactiveerd. Door de kool te reactiveren kan het meerdere keren worden gebruikt. Hierdoor is het duurzamer in gebruik en wordt er tot wel vijf keer minder CO₂ uitgestoten dan bij kool dat niet wordt gereactiveerd⁶, zoals bijvoorbeeld in het PACAS proces gebeurt. Het reactivatieproces is in Afbeelding 4 weergegeven.

AFBEELDING 4 CYCLUS REACTIVATIE ACTIEF KOOL (CHEMVIRON (KURARAY COMPANY), 2021)



Het verschil in CO₂-uitstoot zit hem dus in het reactiveren van kool. Het reactiveren van kool zorgt per ton gebruikt actief kool voor een vermindering van 7 ton CO₂. De verschillen in uitstoot staan hieronder weergegeven:

De CO₂-emissie van gereactiveerde GAK is conform de haalbaarheidsstudie vastgesteld op 2,52 kg CO₂/kg. Voor vers GAK geldt een CO₂/kg emissie van 9,6 kg per CO₂/kg.

- 4 Voor het CarboPlus systeem zijn meerdere kolen getest van verschillende leveranciers. Zo is op de rwzi Penthaz getest met Norit GAC 3040 AW en Cyclecarb 305, hieruit kwam Cyclecarb 305 van Chemviron Carbon als de beste naar voren.
- 5 Op de rwzi Emmingen-Liptingen zijn 7 verschillende GAK soorten van verschillende leveranciers (CSC, Jacobi, Chemviron, Norit, Carbo Tech en Donau Carbon) getest. Uit deze test kwam Cyclecarb 401 van Chemviron als beste naar voren voor de verwijdering van microverontreinigingen.
- 6 Wel met de opmerking dat voor reactivatie externe energie nodig is hetgeen bij de energieprijzen van medio 2022 een prijsverhogend effect heeft.

2.2 OPZET PILOTS

De pilots zijn gesitueerd tussen de afloop van nabezinktank 2 en 4. De pilotlocatie is oranje gemarkeerd in Afbeelding 5.

AFBEELDING 5 LUCHTFOTO OVERZICHT RWZI HAPERT MET INDICATIE PILOTLOCATIE

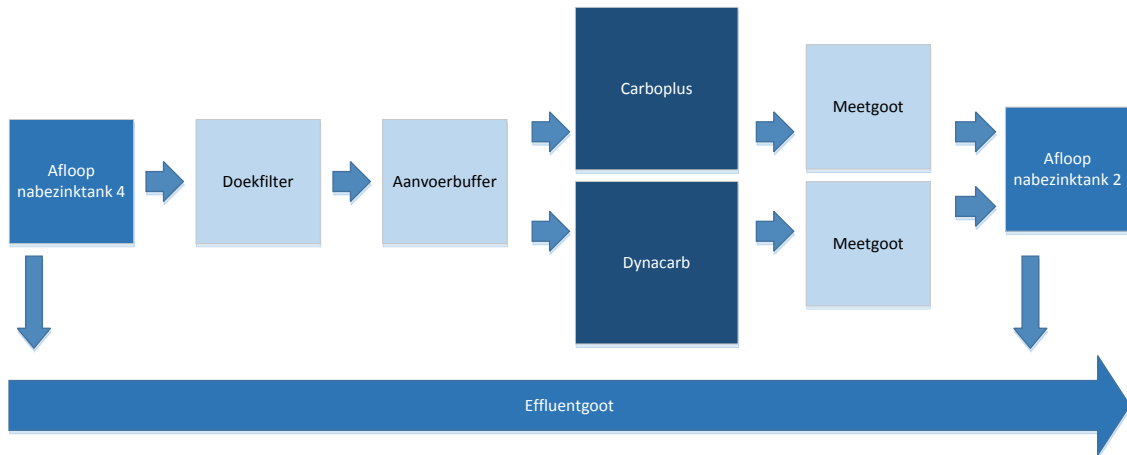


Effluent uit afloop nabezinktank 4 wordt naar het Sobyte doekfilter (500 μ m)⁷ gepompt, het gefilterd water is ontdaan van blad en draadalgen en loopt uit in de aanvoerbuffer. Vanuit de aanvoerbuffer hebben beide pilots een eigen toevoer pomp. Het effluent van de pilots loopt door de meetgoot, deze is geplaatst voor monsternamen en het meten met de UV/VIS-sensor. De meetgoot heeft een vrijverval uitloop naar afloop nabezinktank 2. De pilot aan- en afvoer zijn schematisch weergegeven in Afbeelding 6.

Bemonstering vindt daarnaast nog plaats bij het in- en effluent van de rioolwaterzuivering. De laatste is tevens de meetlocatie voor het bepalen van de concentraties welke naar de pilots voeren. In de effluentgoot van de rioolwaterzuivering is ook een UV/VIS-sensor geplaatst.

⁷ Tijdens het pilot onderzoek is gebleken dat er vanaf het voorjaar algengroei in de nabezinktank optreedt, dit leidt tot verstopping van het filter van de opvoerpomp waardoor de installatie wordt uitgeschakeld. Ook is er grote kans op verstopping van de airlift pomp van de Dynacarbon. Daarom is op 23 juni 2021 besloten dit filter, dat op dat moment beschikbaar was bij de leverancier te plaatsen voor een continue bedrijfsvoering.

AFBEELDING 6 PFD PILOT OPSTELLING

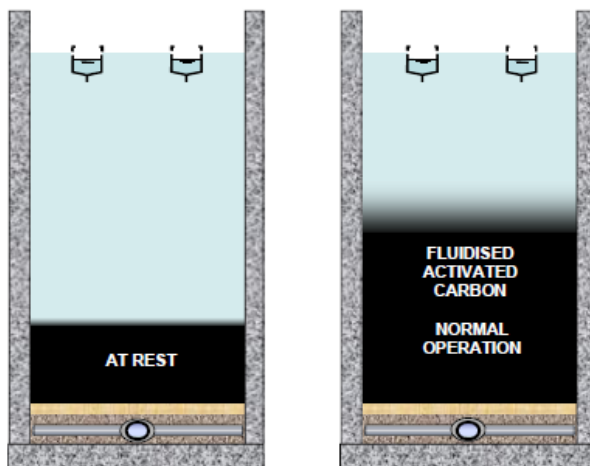


2.3 BESCHRIJVING CARBOPLUS PILOT

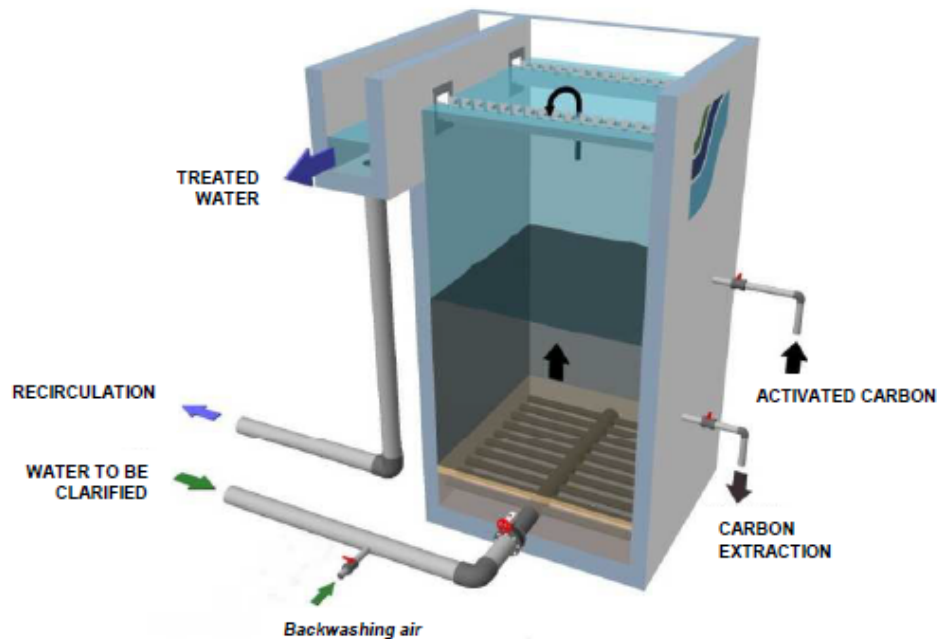
2.3.1 INSTALLATIEOPBOUW

De Carboplus installatie bestaat uit een reactor met daarin een gefluidiseerd actief kool bed bestaande uit micro-granules. De reactor wordt opwaarts doorstroomd, aan de bovenzijde stroomt het gezuiverde water via een overstort rand weer uit de reactor. In dit proces wordt, debiet afhankelijk, continue nieuw actief kool toegevoegd en verzadigd kool verwijderd. Dit type reactor wordt in full-scale gebruikt op rwzi Penthaz in Zwitserland. Een doorsnede van een full-scale installatie is te zien in Afbeelding 7 met daaronder in Afbeelding 8 de werking van een gefluidiseerd actief kool bed.

AFBEELDING 7 DOORSNEDE CARBOPLUS INSTALLATIE (STEREAU, 2020)



AFBEELDING 8 WERKING GEFLUÏDISEERD KOOLBED (STEREAU, 2020)



De pilot installatie (zie Afbeelding 9) heeft, net als de full-scale installatie, een reactor met daarin een gefluïdiseerd actief kool bed. De pilot wordt bedreven met een aantal uitgangspunten zoals bij een full-scale installatie⁸:

- De hoogte van de pilot reactor is gelijk aan die van de full-scale reactor;
- Er wordt met eenzelfde aanvoersnelheid van 15 m/u gewerkt.

Hierdoor zijn de resultaten van de pilot te vergelijken met die van een full-scale installatie. Doordat de waterverdeling aan de onderkant van de pilot minder gelijkmatig is kan er zelfs van worden uitgegaan dat de gerealiseerde verwijderingsrendementen een worst-case benadering zijn van de praktijksituatie.

2.3.2 BEDRIJFSVOERING

De Carboplus pilotinstallatie wordt bedreven met effluent vanuit nabezinktank 4. Zoals reeds is beschreven in paragraaf 2.2 wordt het effluent uit deze nabezinktank continue door een pomp opgepompt richting het Sobyte filter.

Vanuit dit Sobyte filter wordt het water naar een aanvoerbuffervat geleid en vanuit daar zal het te behandelen afvalwater door de pilot worden behandeld. Het te behandelen afvalwater, met een continu debiet van ca. 250 l/u, wordt opwaarts door het actief kool bed geleid, waardoor de microverontreinigingen aan het kool kunnen adsorberen. Bij de start van de pilotinstallatie wordt deze met 2/3 van de uiteindelijke hoeveelheid actief kool (ca. 8,4kg) gevuld tot een bedhoogte van ca. 1,05m. In de daaropvolgende 10 weken wordt de pilotinstallatie iedere week 1 keer per week met 15g/m³ behandeld afvalwater bijgevoerd tot de bedhoogte van ca. 1,5m is bereikt. De kolom is altijd gevuld met ongeveer 13kg actief kool (0,028m³ kool) en wordt bedreven met een verblijftijd van ~7min. Pas na de opstartperiode van 9 weken wordt er gebruikt actief kool afgetapt en vers actief kool met een bepaalde dosering in g/m³ behandeld afvalwater bijgevoerd en wordt het bemonsteringsprogramma voor de verwijdering van de microverontreinigingen opgestart. De punten in de pilot waar dit wordt gedaan zijn weergegeven in Afbeelding 9. In deze pilot wordt het actief kool periodiek

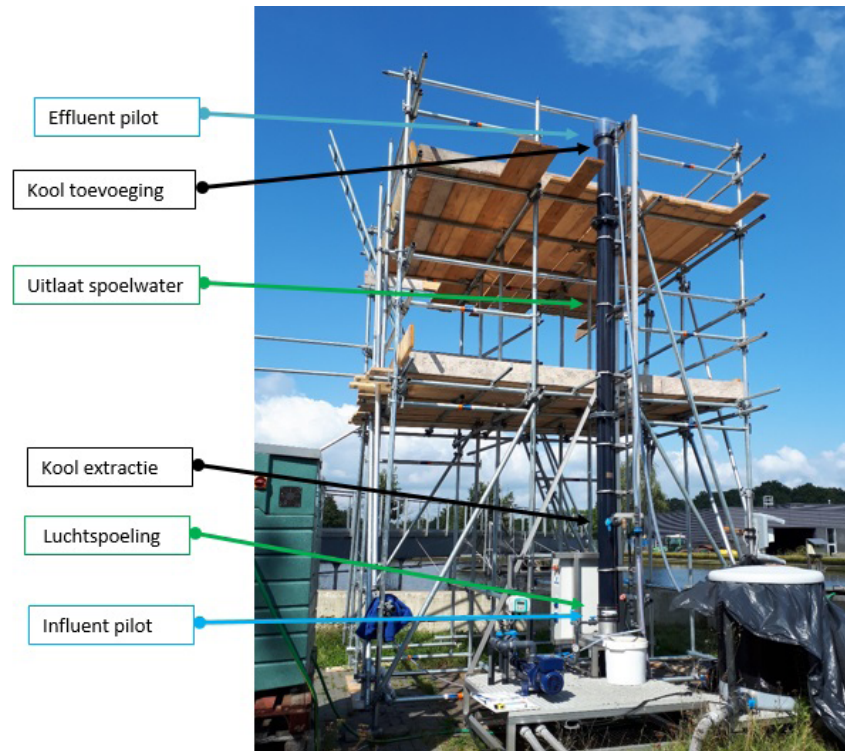
⁸ Tijdens een bezoek van Stereau (de leverancier van het Carboplus systeem) is ons verteld dat op Penthaz een diskfilter is geplaatst in de toevoer naar de reactor. Dit filter heeft een mesh size van 10 µm. Stereau (de leverancier van Carboplus) geeft echter aan dat zij zelf een mesh size van 3 mm adviseren.

boven in de kolom, bij het effluent van de pilot, met de hand toegevoegd. In de praktijk is dit erg arbeidsintensief. Voor een toekomstige pilot wordt geadviseerd om dit via een pomp in de toevoerleiding te doseren. Wanneer het kool niet voldoende is verzadigd met water kan het niet bezinken naar het actief kool bed en bestaat er kans op uitspoeling via het effluent. Bij een full-scale installatie gebeurt het doseren van actief kool direct in het aanwezige actief kool bed waardoor er aanzienlijke minder kans is op uitspoeling doordat het meer weerstand ondervindt van het aanwezig kool en zodoende de tijd krijgt om te verzadigen met water.

2.3.3 SPOELCYCLUS

Om het maximale rendement te behalen wordt het actiefkool bed door middel van een spoel cyclus ontdaan van vervuiling. De frequentie hiervan is afhankelijk van de mate van vervuiling. Dit wordt bepaald aan de hand van het oplopen van de druk door de toevoerpomp. Het toevoegen van het actief kool gebeurt pas na het spoelproces, om te voorkomen dat het nieuwe actief kool, dat onvoldoende is verzadigd met water, anders direct weer uitspoelt tijdens de spoelcyclus. Het spoelen van de kool gebeurt in 6 stappen die in detail in bijlage II zijn weergegeven, deze stappen worden wekelijks 2 of 3 keer herhaald.

AFBEELDING 9 OPBOUW CARBOPLUS PILOT



2.4 BESCHRIJVING DYNACARBON PILOT

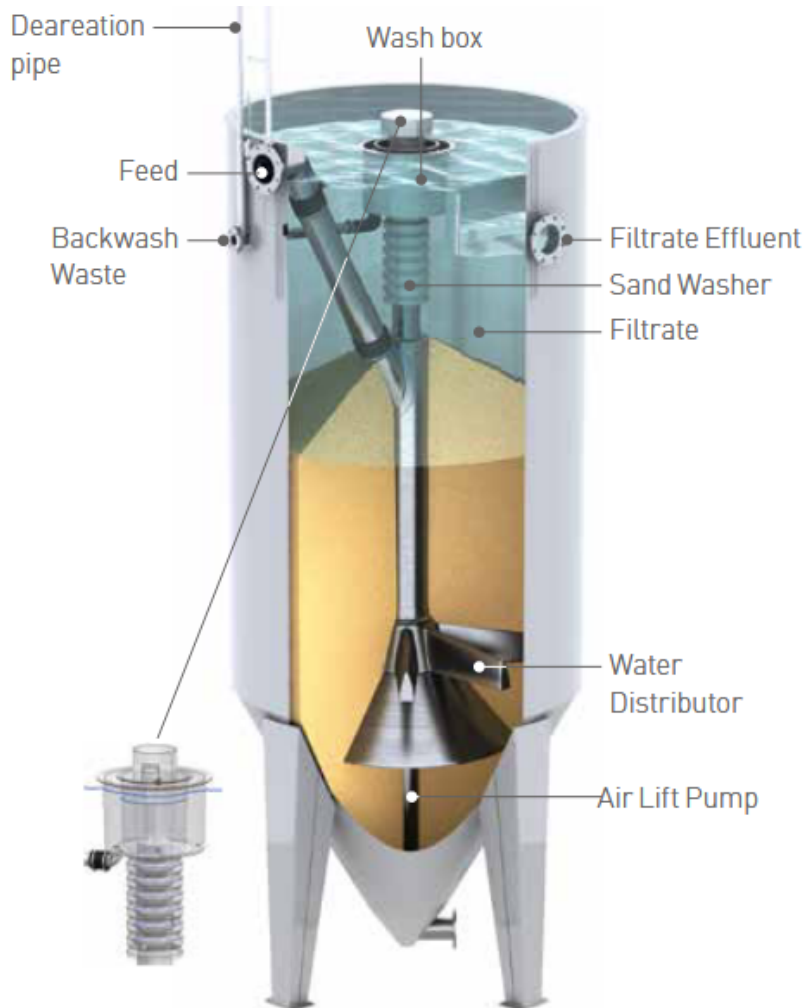
2.4.1 INSTALLATIEOPBOUW

Het voor de pilot van de Dynacarbon installatie ingezette filter is in principe een Dynasand filter gevuld met granulair actiefkool met als verschil dat er een kleinere mammoetpomp gebruikt wordt⁹. Het filter wordt van onderaf doorstroomt met rwzi effluent. Het filterbed wordt continue in beweging gebracht door een mammoetpomp en gereinigd met een wasser die doorstroomd wordt met filtraat uit het Dynacarbon filter.

⁹ Gaandeweg de pilotperiode is wel de vraag opgekomen of dit wel de juiste configuratie betreft. Dit ook in relatie met opmerkingen van Brightwork over aanvullende aanpassingen in het door hen geleverde GAK-filter.

In Afbeelding 10 is een doorsnede van het Dynacarbon filter weergegeven.

AFBEELDING 10 DOORSNEDE DYNACARBON INSTALLATIE (NORDICWATER)



2.4.2 **BEDRIJFSVOERING**

De Dynacarbon pilotinstallatie wordt bedreven met effluent vanuit nabezinktank 4. Zoals reeds is beschreven in paragraaf 2.2 wordt het effluent uit deze nabezinktank continue door een pomp opgepompt richting het Sobyte filter. Vanuit dit Sobyte filter wordt het water naar een aanvoerbuffervat geleid en vanuit daar via een eigen aanvoerpomp naar het filter. Het te behandelen afvalwater wordt opwaarts door het actief kool bed geleid, waardoor de microverontreinigingen aan het kool kunnen adsorberen. Om verstoppingen te voorkomen wordt de kool middels een interne mammoetpomp naar de wasser gepompt en daar gewassen. De Dynacarbon pilotinstallatie heeft een filtratieoppervlak van 0,7 m². De snelheid over het filter bedraagt circa 7m/h, een hogere snelheid zal uitspoeling van de kool als gevolg hebben. De EBCT (empty bed contact time, verblijftijd) van het filter is 20 minuten. Het debiet over de pilot bedraagt circa 5m³/h. De installatie is gevuld met 720 kg GAK (= 1,6 m³ GAK), één behandeld bedvolume is dan ook 1,6 m³.

2.5 TIJDLIJN VAN DE BEDRIJFSVOERING

Beide pilots zijn in oktober 2020 opgestart. Het heeft enige tijd gekost om de installaties stabiel te bedrijven en voor de Dynacarbon pilotinstallatie is zelfs besloten om de hele installatie opnieuw op te starten met verse kool. Gedurende de pilot periode is niet met een constante bedrijfsvoering gewerkt. Zo is bij Carboplus gewerkt met verschillende doseringen¹⁰ en is het toevoerdebiet van de Dynacarbon aan het begin verhoogd om meer bedvolumes te kunnen verwerken binnen de beschikbare tijd (omdat de pilotinstallatie opnieuw moest worden opgestart). De variaties in de gebruikte actief kool dosering zijn in Tabel 1 te zien.

TABEL 1 TOEGEPASTE DOSERING ACTIEF KOOL IN G/M³ VOOR DE CARBOPLUS PILOTINSTALLATIE

Carboplus	2021												2022			
	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	jan	feb	mrt	
dosering kool (gram/m ³)	15/1-28/6 15 gram/m ³					29/6 - 16/9 30gram/m ³			17/9 - 16/11 20 gram/m ³				17/11 - 2/12 15 gram/m ³	3/12-19/3 18 gram/m ³		
aantal malen verversing kool/week	15/1 - 8/3 1/week			9/3 - 27/9 2/week						29/9 - 19/3 3/week						
plaatsing doekenfilter													vanaf 23/6			

De Carboplus installatie is afhankelijk van de periode 1, 2 of 3 keer per week aangevuld met vers actief kool¹¹. Afwijkingen in de bedrijfsvoering en opmerkingen zijn in het logboek geschreven en worden digitaal overgenomen.

De Dynacarbon pilotinstallatie wordt bij de start volledig gevuld met kool, tussentijds wordt tijdens elk bezoek de werking gecontroleerd en indien nodig het debiet bijgesteld. De verblijftijden die zijn gehanteerd zijn te zien in Tabel 2. Registratie van debiet en eventuele storingen worden via Grafana, een digitaal platform, doorgezonden en opgeslagen. Ook worden bijzonderheden in het aanwezige logboek geschreven.

TABEL 2 TOEGEPASTE VERBLIJFTIJDEN EN FILTRATIESNELHEDEN IN DE DYNACARBON PILOTINSTALLATIE

Dynacarbon	2021										2022			
	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	jan	feb	mrt		
Filtersnelheid m/u	1/4 - 11/6 6,14m/u			12/6 - 17/1 7,7m/u							18/1 - 15/2 6,34m/u		5,9m/u	
Verblijftijd [min]	28 min (sterk fluctuerend)										18 minuten		21minuten	23min
Plaatsing doekenfilter											vanaf 23/6			

2.6 BEMONSTERING EN ANALYSE

De resultaten van beide pilotinstallaties worden met een uitgebreid bemonsteringsprogramma gevolgd. Er zijn analyses op gidsstoffen, macroparameters, PFAS en ecotoxiciteit uitgevoerd gedurende de looptijd van de pilots. Het bemonsteringsprogramma wordt in de volgende paragrafen toegelicht.

2.6.1 MONSTERNAME

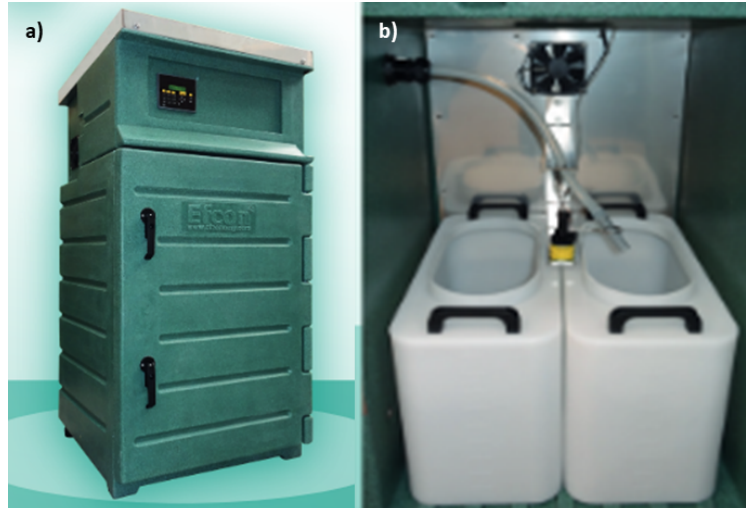
Voor uitvoering van het pilotonderzoek zijn meerdere monsterpunten voorzien. Naast de reguliere monsternamenvoorzieningen van de rioolwaterzuivering op influent en effluent zijn ook extra bemonsteringapparaten van influent rwzi, effluent rwzi, effluent Carboplus en effluent Dynacarbon geplaatst. De monsternamename bij de pilot is handmatig in te stellen, de overige worden aangestuurd via het aanwezige SCADA-systeem. De monsternamename is afhankelijk van type bemonstering ingesteld op 24- of 72-uurs monsternamename.

¹⁰ Dat kan ook inzicht geven in de full scale bedrijfsvoering omdat het verwijderingsrendement in de biologie ook seizoensgebonden is.

¹¹ Er is gestart met 1 maal per week en dit is gaandeweg het onderzoek verhoogd tot uiteindelijk 3 maal per week.

Toegepaste monsternametoerzieningen zijn van het type All weather Efccon® Industrial Vacuüm sampler (Afbeelding 11a) met geïntegreerde koeling en verwarming, deze voldoen aan ISO 5667-1, 2, 3, 10 en NEN 6600-1. Deze zijn voorzien van een verdeler en 2 stuks 55 liter polyethyleen monstervaten (Afbeelding 11b).

AFBEELDING 11 A) MONSTERKAST B) MONSTERVATEN MET VERDEELSTATION



2.6.2 MONITORINGSPARAMETERS

Naast gidsstoffen, worden ook macroparameters, TOC en PFAS gemeten, kooluitspoeling wordt bepaald en biologische effectmonitoring ondernomen. In de volgende paragrafen worden de parameters verder toegelicht.

2.6.3 GIDSSTOFFEN

Gedurende de looptijd van de pilot worden 19 (monitoring) gidsstoffen geanalyseerd in 24 en 72 uren monsters, de 19 (monitoring) gidsstoffen staan in Tabel 3.

Tijdens de 72-uren bemonstering worden het influent van de rwzi, het effluent van de rwzi en het effluent van beide pilotinstallaties onderzocht voor de vaststelling van het verwijderingsrendement in het kader van het onderzoeksprogramma. Aanvullend wordt de 24-uren bemonstering uitgevoerd op het effluent van de rwzi en het effluent van beide pilotinstallaties om het verloop van het verwijderingsrendement te kunnen volgen.

Bemonstering geschiedt volgens de “voorlopige werkinstructie bemonstering en chemische analyse medicijnresten in rwzi-afvalwater t.b.v. bijdrageregeling ‘zuivering medicijnresten’ (IenW) en innovatieprogramma ‘microverontreinigingen uit afvalwater’ (Stowa/IenW), versie 0.7, 3 april 2020”.

In afwijking op deze werkinstructie is op basis van de eerste resultaten uit de BC Robuuste bemonstering medicijnresten besloten om niet 48 uren monsters met 1 dag verschuiving te nemen maar 72 uren monsters met 2 dagen verschuiving tussen influent en effluent te nemen.

Deze manier van bemonsteren geeft minder variatie en past beter bij de hydraulische verblijftijd van de RWZI. Voor meer informatie over de hydraulische verblijftijden in de RWZI Hapert onder verschillende procesomstandigheden wordt verwezen naar bijlage IV.

TABEL 3 OVERZICHT (MONITORING) GIDSSTOFFEN

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

*Gidsstof: minimaal 7 van de 11 gidsstoffen dient in een overall zuiveringsrendement van tenminste 70% te resulteren voor de bestaande rwzi incl. vergaande zuiveringsstap (vergaand behandeld effluent rwzi ten opzichte van influent rwzi > 70%); Monitoring: stof dient verplicht gemonitord te worden in pilots van het IPMV en demo's vanuit de bijdragereregeling 'Zuivering Medicijnresten'.

2.6.4 MACROPARAMETERS

De macroparameters CZV, N-totaal, NH₄-N, P-totaal, ZS, DOC en turbiditeit worden bij elke bemonstering geanalyseerd. Hiermee wordt vastgesteld of voor deze parameters mogelijk nog extra verwijdering optreedt in de pilot.

DOC wordt als potentiële sturings- of signaalparameter gezien voor de dosering van actief kool. Net zoals de gidsstoffen adsorbeert DOC ook aan actief kool en heeft zo een correlatie met verwijderingsrendement van deze gidsstoffen.

2.6.5 ONLINE METINGEN

Uit de literatuur van eerdere onderzoeken is gebleken dat voor kool- en ozondosering sturing op basis van UV-transmissie en DOC mogelijk is. Tijdens het bedienen van de pilotinstallaties op rwzi Hapert wordt met een UV-Vis spectrofotometer (WTW, NitraVis 7051Q NI) op het effluent van de rwzi en het effluent van beide pilotinstallaties gemeten. Door deze continue meting wordt inzicht verkregen in de DOC-verwijdering in relatie tot het verwijderingsrendement van de gidsstoffen.

2.6.6 BIOLOGISCHE EFFECTMONITORING EN PFAS

Het effect op de ecotoxiciteit zal gedurende de pilotperiode twee keer worden vastgesteld voor beide pilot installaties conform de voorlopige IPMV-handreiking voor het uitvoeren van biologische effectmetingen in RWZI-effluenten (versie 0,7, d.d. 3 april 2020). Aanvullend zijn ook nog testen uitgevoerd voor oxidatieve stress respons (Nrf2-calux), Celdood (cytotox) en pesticiden (anti-AR calux).

Deze metingen zijn uitgevoerd door Waterproef (biologische effectmeting) waarbij zowel de ecotoxiciteit van het rwzi effluent als die van beide pilot installaties vastgesteld zijn.

Verder zijn er gedurende de pilot periode twee keer PFAS-analyses uitgevoerd. Daarnaast participeert de Dommel in een TKI-project aangaande het voorkomen van PFAS in afvalwater. De Carboplus pilot is in dit uitgebreide onderzoek meegenomen. Deze resultaten kunnen pas na overleg met het consortium worden opgenomen in dit rapport en ontbreken daardoor nog in deze versie. Ook de PFAS-analyses uit het STOWA-onderzoek m.b.t. PFAS zullen nog worden verwerkt.

2.6.7 BEPALING KOOLUITSPOELING

In het kader van het IPMV is door RHDHV een voorlopig advies opgesteld voor een methode om te bepalen hoeveel kool er uitspoelt naar het effluent. Deze methode is afgeleid van de elders beschreven Schwarzgradbestimmung. Voor de beschrijving van de methode wordt verwezen naar Bijlage V. Het is een indicatieve methode waarbij een ijkreeks wordt gemaakt door samples te filtreren met daarin een oplopende hoeveelheid poederkool, zodat de filterpapiertjes steeds donkerder kleuren naarmate meer kool wordt af gefiltreerd. Zodoende ontstaat een ijkreeks waarmee, visueel, nieuw gefiltreerde samples vergeleken en ingeschaald kunnen worden. In Bijlage VI zijn de foto's van de ijkreeks opgenomen.

2.6.8 ANTIBIOTICA RESISTENTIE

Er wordt in diverse pilots enkele monsters onderzocht op de aanwezigheid van antibiotica-resistente bacteriën en genen. Er zijn diverse antibioticaresistente bacteriën (AMR), waarvan CPE (Carbapenamse-producerende enterobacteriaceae) bacteriën en ESBL (Extended spectrum beta-lactamases) bacteriën de meeste bekende en voorkomende zijn. De combinatie van de CPE- en ESBL-analyse geeft een goede indicatie van de aanwezigheid van darmbacteriën, die ongevoelig (resistent) zijn voor sommige antibiotica. CPE-bacteriën worden niet altijd aangetroffen in rwzi-effluent en de analyse hiervan is duur. Daarom is in dit project analyse van ESBL-analyse uitgevoerd.

De analyse van *E. coli* bacteriën is eenvoudiger en goedkoper dan antibioticaresistente bacteriën (ESBL). Voor rioolwater wordt een verband tussen de aanwezigheid van *E. coli* en ESBL verwacht. Als blijkt dat deze relatie inderdaad bestaat dan zou kunnen worden volstaan met alleen analyse van *E. coli*: als er geen *E. coli* aanwezig is zullen AMR ook niet aanwezig zijn. *E. coli* is in deze studie met 2 verschillende analysemethoden uitgevoerd: de standaardmethode voor (drink)water (LSA-methode) en een methode die mogelijk beter geschikt is in sterk vervuild water (NBX-methode).

Als er antibioticaresistente bacteriën worden aangetroffen, kunnen er ook antibiotica-resistente genen worden aangetroffen. De relatie hiertussen in rwzi-effluent is nog niet duidelijk. Wel zijn er aanwijzingen dat vergaande oxidatie van rwzi-effluent leidt tot meer antibioticaresistente genen. Daarom is ook de analyse van (20 geselecteerde) genen meegenomen.

3

RESULTATEN

3.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de Carboplus en de Dynacarbon pilotinstallatie weergegeven. Beide pilots zijn op 22 oktober 2020 opgestart. De Carboplus pilotinstallatie heeft continue tot 8 maart 2022 kunnen werken. De Dynacarbon pilotinstallatie daarentegen moest in februari 2021 stopgezet worden als gevolg van operationele hick-ups. Per 1 april is de Dynacarbon pilotinstallatie met vers kool opnieuw opgestart en heeft tot 8 maart 2022 kunnen werken. De resultaten van beide pilots die worden besproken zijn:

- Verwijderingsrendement van de microverontreinigingen per nageschakelde pilot en van influent rwzi tot effluent pilot
- Verwijderingsrendement van macroparameters per pilot (nageschakeld)
- Biologische effect monitoring per pilot
- Verwijderingsrendement van PFAS per pilot
- Bepaling kool uitspoeling per pilot

Bij de verwerking van de resultaten is een ontwerp DWA-debiet van 350m³/uur voor RWZI Hapert aangehouden. Voor 1,5 x DWA volgt er een dagdebiet van 12.600m³/dag, alles boven de 12.600m³/dag wordt aangemerkt als RWA-debiet en zou bij een full-scale installatie niet behandeld worden.

In hoofdstuk 4 worden de onderzoeksvragen met behulp van de resultaten beantwoord.

3.2 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN MICROVERONTREINIGINGEN

De verwijderingsrendementen van de microverontreinigingen zijn berekend per stof van de 11 gidsstoffen inclusief de standaarddeviatie per stof. Daarnaast worden 3 verschillende verwijderingsrendementen voor de microverontreinigingen bepaald:

1. Het gemiddelde verwijderingsrendement voor alle 19 (monitoring) gidsstoffen
2. Het gemiddelde verwijderingsrendement voor alle 11 gidsstoffen
3. Het gemiddelde verwijderingsrendement voor de beste 7 uit de 11 gidsstoffen

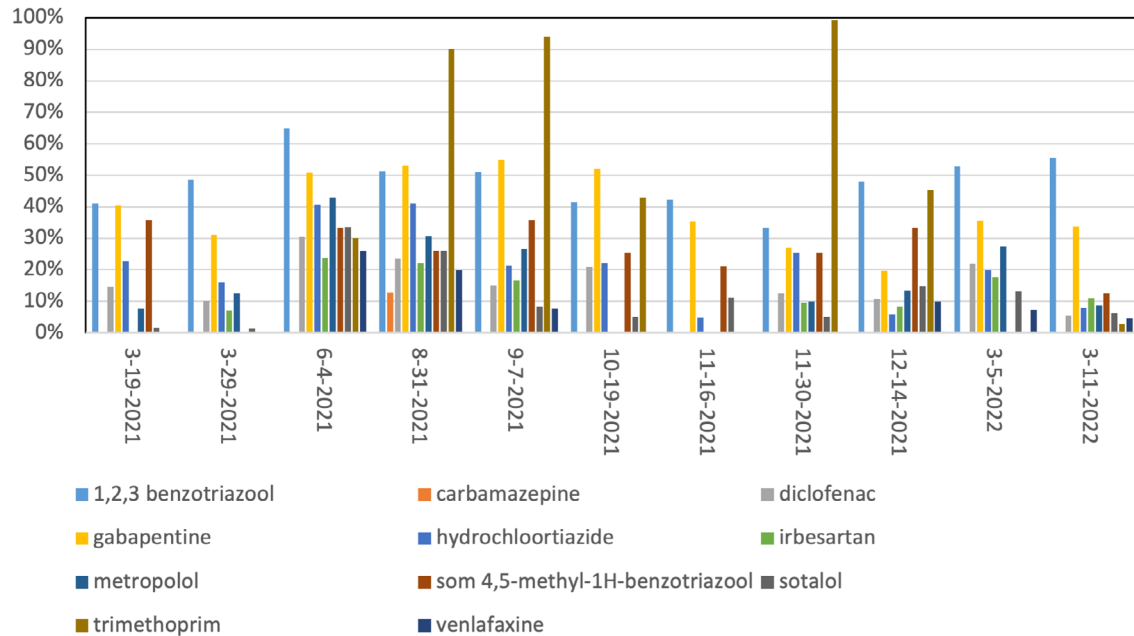
De gidsstoffen staan benoemd in Tabel 3 in paragraaf 2.6.3 met daarbij bijbehorend aangegeven of het een gidsstof of een monitoringsstof betreft.

3.2.1 RWZI HAPERT

In de aeratietank van de zuivering vindt verwijdering van microverontreinigingen plaats door de biologie. In Figuur 1 is het verwijderingsrendement per gidsstof van de biologie van rwzi Hapert opgenomen, hier zijn alleen de DWA-monsters weergegeven en het verwijderingsrendement is bepaald met de 72-uurs bemonstering (met 1 dag overlap, zie hoofdstuk 2.6). 1,2,3 benzotriazool, gabapentine en som 4,5-methyl-1H-benzotriazool worden gedurende het hele jaar met gemiddeld 30% verwijderd door de biologie. Carbamazepine, irbesartan, trimethoprim en venlafaxine bleken lastig te bemonsteren met de gekozen 72-uurs bemonstering met 1 dag overlap, er werd vaak een negatief verwijderingsrendement voor deze

gidsstoffen geregistreerd, deze resultaten ontbreken in Figuur 1. Voor trimethoprim is dit ook bij de “BC Robuuste bemonstering” op andere zuiveringen vastgesteld. Verder is te zien dat het verwijderingsrendement van alle gidsstoffen gedurende de zomerperiode van juni tot en met september hoger is dan gedurende de rest van het jaar.

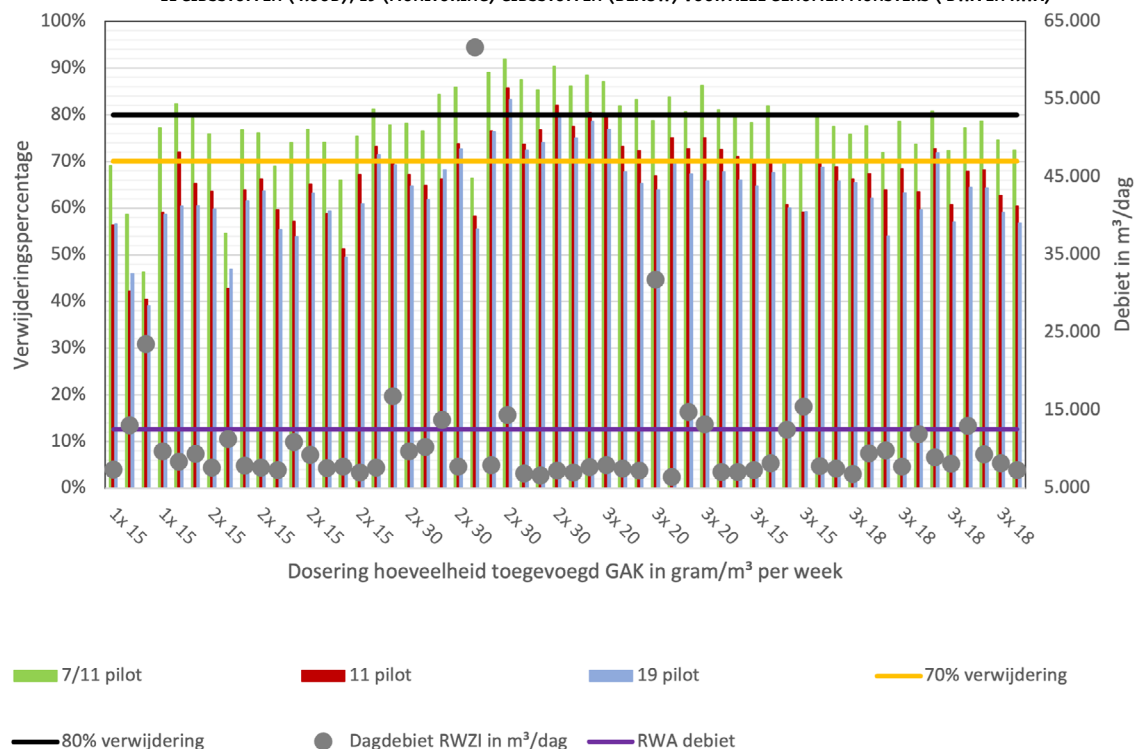
FIGUUR 1 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN RWZI HAPERT PER GIDSSTOF PER BEMONSTERING (DWA-MONSTERS)



3.2.2 CARBOPLUS PILOT

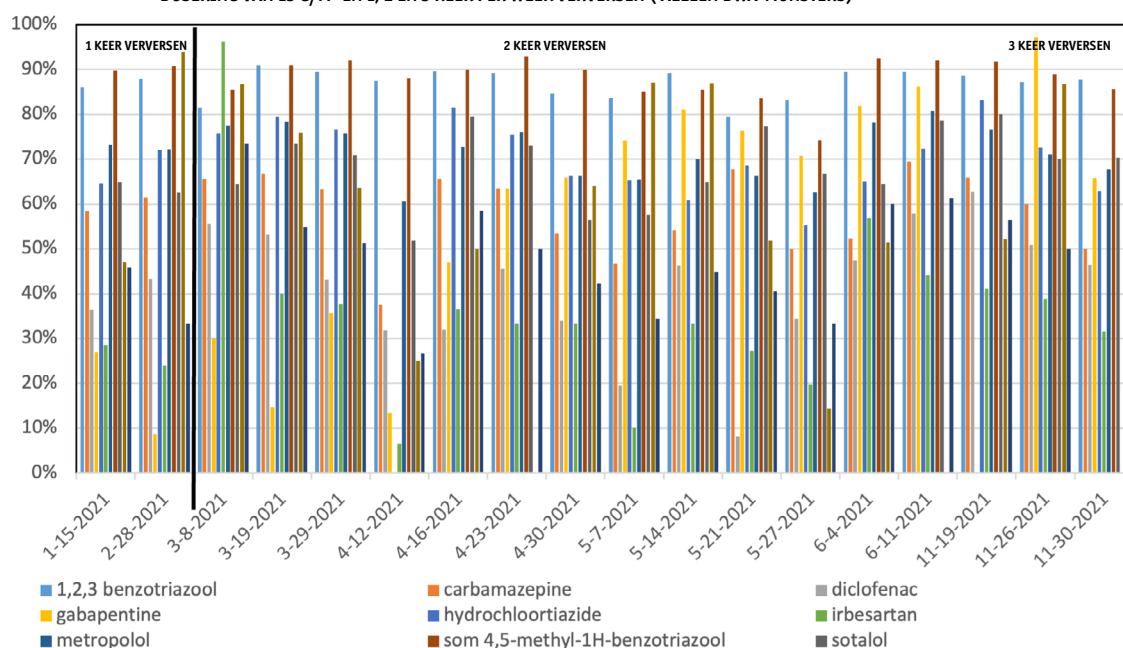
In deze paragraaf bespreken we de resultaten die puur met de nageschakelde Carboplus pilotinstallatie zijn behaald. In Figuur 2 is een overzicht weergegeven over alle resultaten, die gedurende het bedrijven van de Carboplus pilotinstallatie zijn behaald, dus zowel de DWA resultaten, als ook de RWA-resultaten zijn weergegeven. In groen is het gemiddelde verwijderingsrendement van de beste 7 uit 11 gidsstoffen weergegeven, in rood het gemiddelde verwijderingsrendement van alle 11 gidsstoffen en in blauw het gemiddelde verwijderingsrendement van alle 19 (monitoring) gidsstoffen, met geel wordt het verwijderingsrendement van 70% en met zwart het verwijderingsrendement van 80% weergegeven. In dit overzicht zijn ook alle monsters, die onder RWA-omstandigheden (debiet hoger dan 12.600 m³/dag) zijn genomen, weergegeven. Het dagdebiet van rwzi Hapert wordt met de grijze punten aangeduid.

FIGUUR 2 OVERZICHT VERWIJDERINGSRENDEMENT NAGESCHAKELDE CARBOPLUS PILOTINSTALLATIE MET 7 UIT 11 GIDSSTOFFEN (GROEN), 11 GIDSSTOFFEN (ROOD), 19 (MONITORING) GIDSSTOFFEN (BLAUW) VOOR ALLE GENOMEN MONSTERS (DWA EN RWA)



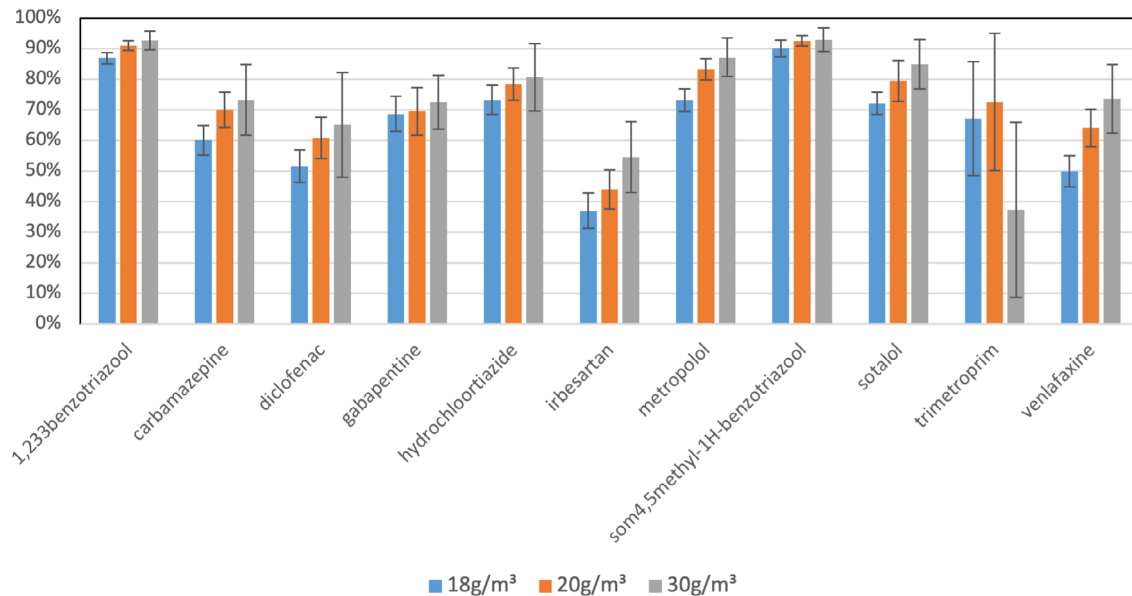
Zoals in Figuur 2 te zien, is de Carboplus pilotinstallatie met verschillende actief kool-doseringen bedreven. Er heeft ook een test plaatsgevonden met het verversen van de actief kool. In de full scale installatie wordt het actief kool automatisch verversed afhankelijk van het behandelde debiet. In de pilotinstallatie moet de actief kool handmatig verversed worden, daarom is er een proef gedaan of het aantal momenten van verversen in een week invloed heeft op het verwijderingsrendement. Deze test is uitgevoerd met een dosering van 15g/m³, zie Figuur 3.

FIGUUR 3 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE NAGESCHAKELDE CARBOPLUS PILOTINSTALLATIE PER GIDSSTOF MET EEN ACTIEF KOOL DOSERING VAN 15 G/M³ EN 1, 2 EN 3 KEER PER WEEK VERVERSEN (ALLEEN DWA-MONSTERS)



Figuur 3 laat zien dat er nauwelijks invloed is van het aantal keren dat het kool gedurende de week in de pilotinstallatie wordt verversen op het verwijderingsrendement per gidsstof. Twee of drie keer per week verversen werkt beter, dan een keer. Over alle 11 gidsstoffen wordt met een keer per week verversen een gemiddeld verwijderingsrendement gehaald van 58%, dit ligt voor twee en drie keer verversen per week duidelijk hoger met 65% en 67% respectievelijk. Voor 7 van de 11 gidsstoffen kan met de nageschakelde pilotinstallatie een verwijderingsrendement van 70% gerealiseerd worden.

FIGUUR 4 HET VERWIJDERINGSRENDEMENT PER GIDSSTOF VOOR DE DOSERINGEN VAN 18G/M³, 20 G/M³ EN 30 G/M³ IN CARBOPLUS PILOINSTALLATIE (NAGESCHAKELD)

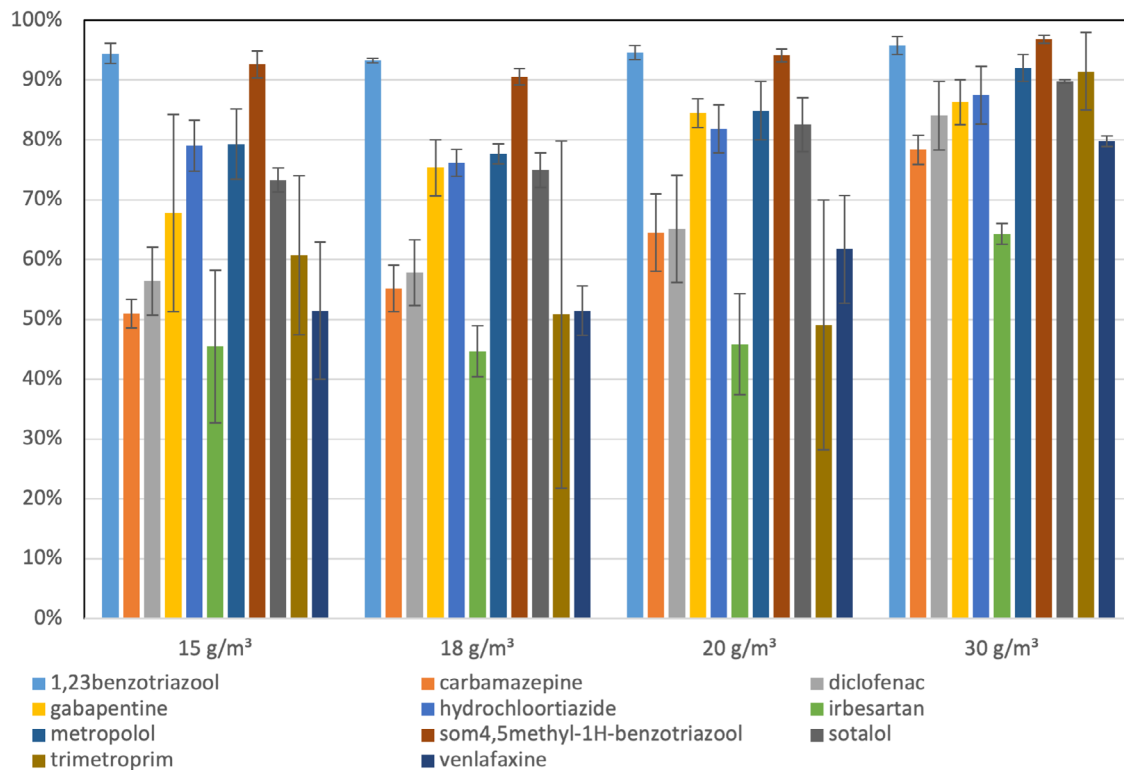


In Figuur 4 is het gemiddelde verwijderingsrendement per gidsstof inclusief de standaarddeviatie voor de actief kool doseringen van 18 g/m³, 20 g/m³ en 30 g/m³ weergegeven. Het is duidelijk te zien, dat het verhogen van de actief kool dosering van 18 g/m³ op 20 g/m³ tot een toename van het verwijderingsrendement voor iedere gidsstof leidt. Het gemiddelde verwijderingsrendement voor de beste 7 uit 11 gidsstoffen is bij een dosering van 18 g/m³ rond de 75% en dit neemt toe tot een gemiddeld verwijderingsrendement voor de beste 7 uit 11 gidsstoffen van rond de 81% bij een dosering van 20 g/m³. Een verhoging van de dosering naar 30 g/m³ leidt tot een verdere toename van het verwijderingsrendement, maar deze toename staat niet in verhouding tot het sterk gestegen verbruik aan actief kool. Met een dosering van 30 g/m³ wordt een gemiddeld verwijderingsrendement voor de beste 7 uit 11 gidsstoffen van rond de 84% gerealiseerd. Met de verhoging van de dosering van 18 g.m³ naar 20 g/m³ wordt een toename van 6% in het verwijderingsrendement van de beste 7 uit 11 gidsstoffen gerealiseerd, terwijl dit voor de verhoging van de dosering van 20 g/m³ naar 30g/m³ maar 3% is voor de beste 7 uit 11 gidsstoffen.

3.2.2.1 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE CARBOPLUS PILOT INCLUSIEF DE RWZI

Naast het verwijderingsrendement van de Carboplus pilotinstallatie zelf is ook het verwijderingsrendement van de pilotinstallatie inclusief de rwzi bepaald, dus influent rwzi Hapert tot en met effluent pilot, dit is alleen voor DWA-monsters gedaan.

FIGUUR 5 GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT EN STANDAARDDEVIATIE PER GIDSSTOF PER DOSERING VOOR DE CARBOPLUS PILOTINSTALLATIE INCLUSIEF DE REGULIERE RWZI HAPERT (INFLUENT RWZI – EFFLUENT PILOT)



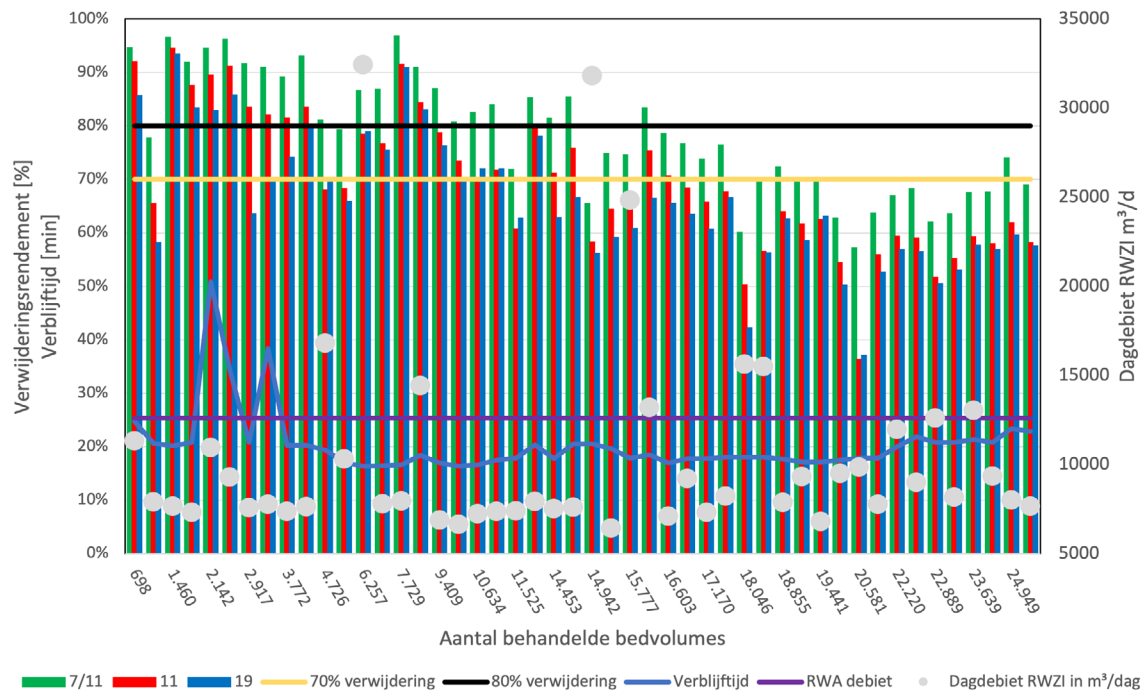
In Figuur 5 is het gemiddelde verwijderingsrendement inclusief de standaarddeviatie per gidsstof en per dosering actief kool weergegeven van het influent van de rwzi tot aan het effluent van de pilot. Met een toenemende actief kool dosering kunnen steeds meer gidsstoffen met een hoger rendement verwijderd worden. Voor de stoffen carbamazepine, irbesartan, trimethoprim en venlafaxine zijn in Figuur 4 wel verwijderingsrendementen opgenomen, terwijl deze in de resultaten van het verwijderingsrendement van alleen de biologie veel negatieve verwijderingsrendementen hebben gehaald. Ze horen niet bij de beste 7 uit 11 gidsstoffen en maken dus geen deel uit van het gemiddelde verwijderingsrendement.

3.2.3 DYNACARBON PILOT

In deze paragraaf bespreken we de pilotresultaten van de Dynacarbon pilotinstallatie. De Dynacarbon installatie is in bedrijf geweest van 1 april 2021 tot 8 maart 2022.

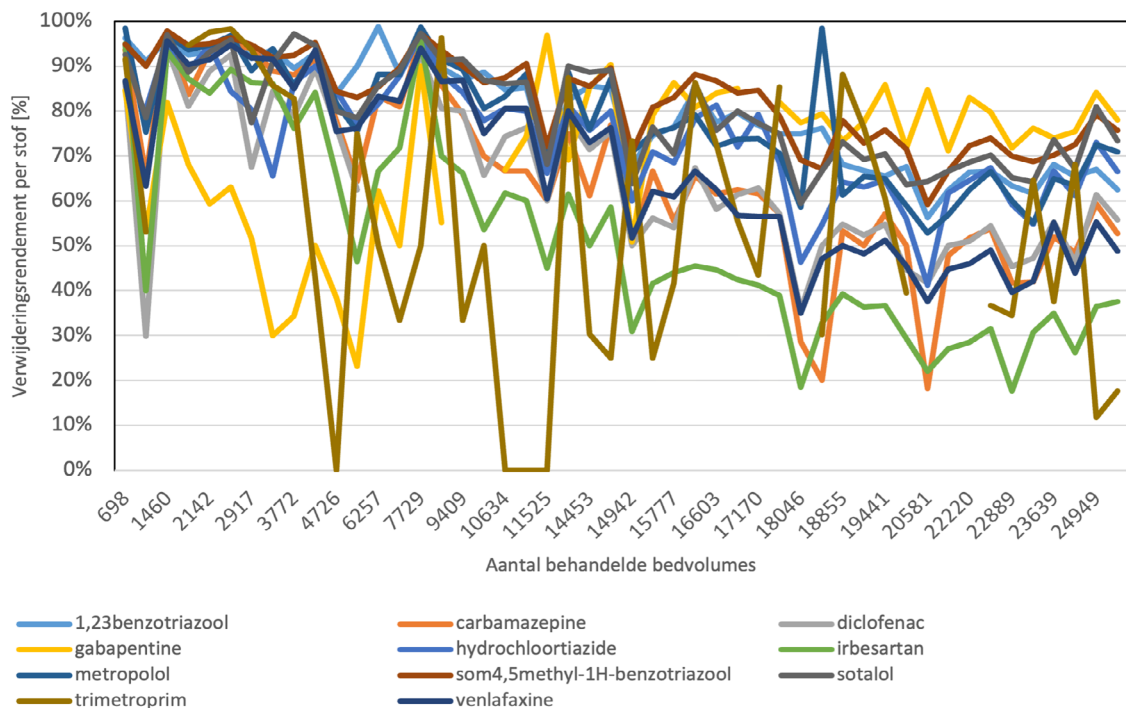
In Figuur 6 is het overzicht van alle resultaten van de gehele proefperiode (inclusief monsters genomen bij RWA). In groen zijn de gemiddelde verwijderingsrendementen voor de beste 7 uit 11 gidsstoffen weergegeven, in rood het gemiddelde verwijderingsrendement voor alle 11 gidsstoffen en in blauw het gemiddelde verwijderingsrendement voor alle 19 (monitoring-)gidsstoffen. De blauwe lijn geeft de verblijftijd weer, de paarse lijn geeft de grens van het DWA debiet weer en de grijze bolletjes geven het daadwerkelijke dagdebiet van RWZI Hapert weer in m³/d. Figuur 6 laat zien dat de Dynacarbon met een afnemend gemiddeld verwijderingsrendement te maken heeft bij toenemende standtijd. Tot ongeveer 15.000 behandelde bedvolumes behaald de Dynacarbon pilotinstallatie een verwijderingsrendement van 80% voor de beste 7 uit 11 gidsstoffen. Voor de laatste twee monsters kon wel een hoger verwijderingsrendement gemeten worden, dan voor de monsters ervoor omdat de verblijftijd van ongeveer 21min naar 23min was verlengd.

FIGUUR 6 OVERZICHT OVER ALLE BEHAALDE VERWIJDERINGSRENDERMENTEN VAN DE NAGESCHAKELDE DYNACARBON PILOINSTALLATIE VOOR 7 UIT DE 11 GIDSSTOFFEN (GROEN), 11 GIDSSTOFFEN (ROOD) EN ALLE 19 (MONITORING) GIDSSTOFFEN VOOR ALLE GENOMEN MONSTERS (DWA EN RWA)



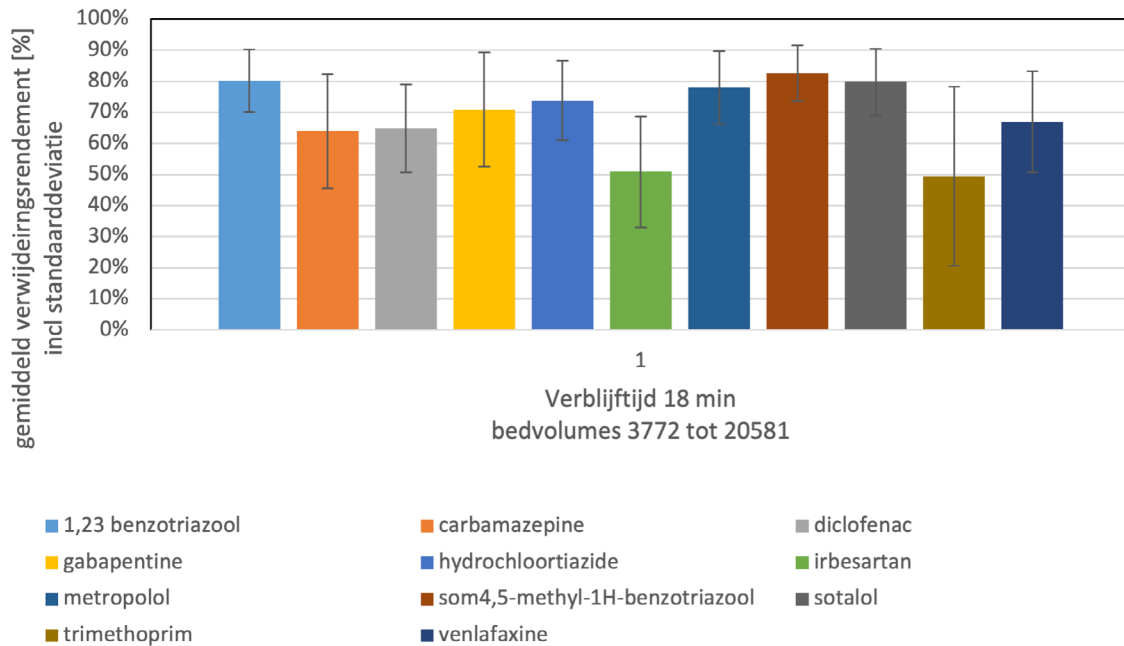
In Figuur 7 is het verloop van het verwijderingsrendement per gidsstof gedurende de hele proefperiode te zien. Figuur 7 geeft alle resultaten weer van alle genomen monsters onder zowel DWA als RWA omstandigheden. Opvallend is dat 1,2,3 benzotriazool som4,5 methyl-1H-benzotriazool, hydrochloortiazide en metropolol de hele tijd goed verwijderd worden, terwijl gabapentine in het begin van de proefperiode maar matig en aan het einde van de proefperiode heel goed wordt verwijderd. Irbesartan is de gidsstof met het slechtste verwijderingsrendement gedurende de hele proefperiode.

FIGUUR 7 HET VERWIJDERINGSRENDERMENT PER GIDSSTOF PER BEMONSTERING VOOR DE GEHELE PROEFPERIODE VAN DE NAGESCHAKELDE DYNACARBON PILOINSTALLATIE



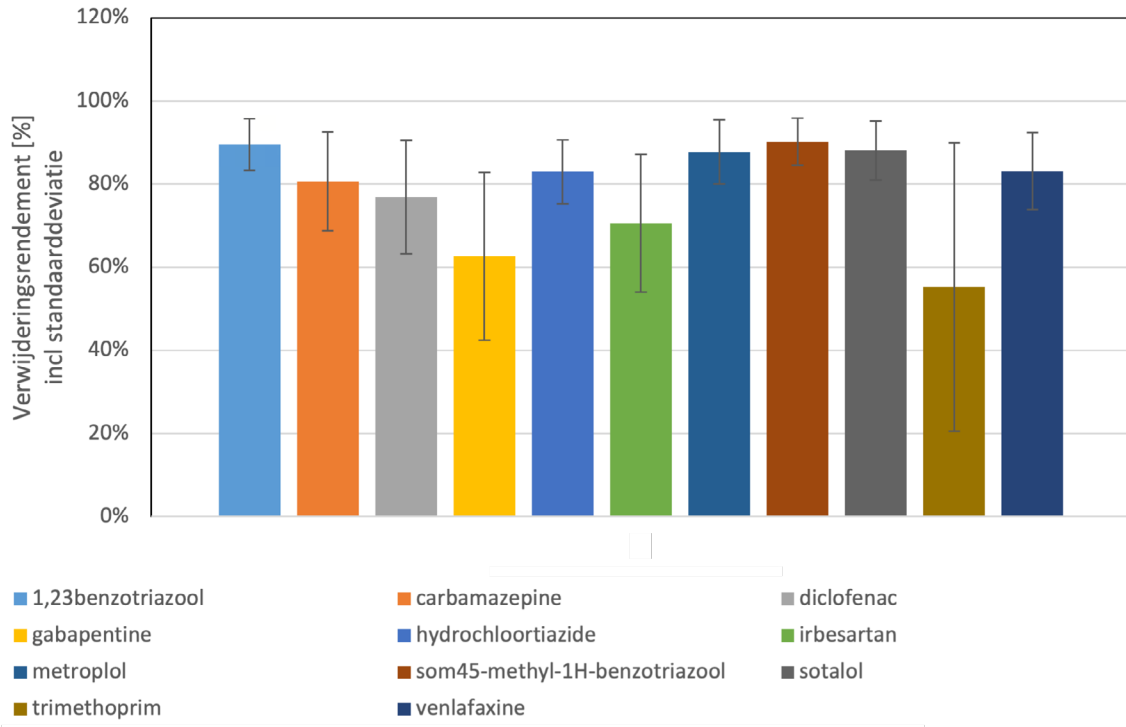
In Figuur 8 zijn het gemiddelde verwijderingsrendement per gidsstof inclusief de standaardafwijking voor een verblijftijd van ongeveer 18 min weergegeven. Op deze verblijftijd werd de Dynacarbon pilotinstallatie van 3.772 tot en met 20.581 bedvolumes bedreven. Opvallend zijn de lage standaardafwijkingen van maar 9 tot 11% voor de gidsstoffen 1,2,3 benzotriazool, sotalol en som 4,5 methyl-1H-benzotriazool te noemen. Voor Trimethoprim en carbamazepine wordt een zeer hoge standaardafwijking gemeten. Dit is mogelijk te verklaren met de moeilijkheden bij de bemonstering van deze gidsstoffen op rwzi Hapert.

FIGUUR 8 GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT (INCLUSIEF STANDAARDAFWIJKING) PER GIDSSTOF VOOR DE VERBLIJFTIJD VAN 18 MIN VOOR HET OPERATIONELE BEREIK VAN 3772 TOT 20581 BEHANDELDE BEDVOLUMES VAN DE NAGESCHAKELDE DYNACARBON PILOTINSTALLATIE

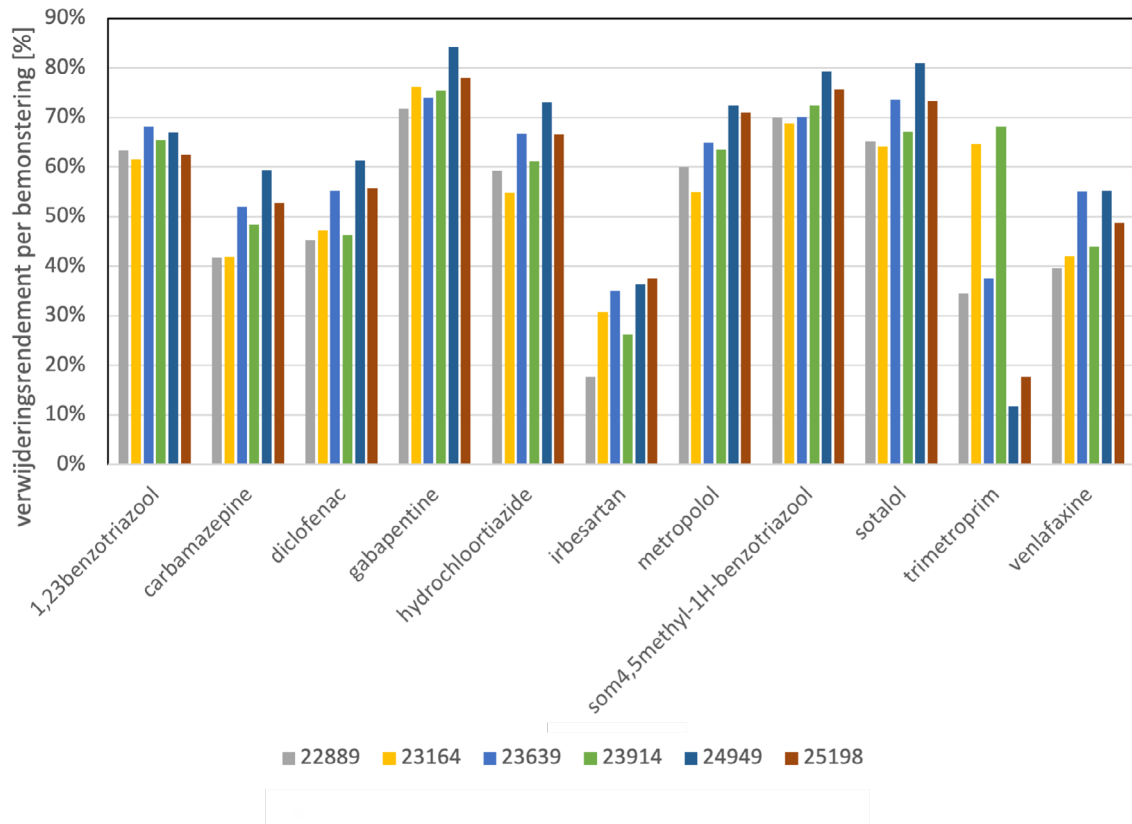


In Figuur 8 is te zien, dat de Dynacarbon pilotinstallatie voor dit aantal bedvolumes niet meer aan de minimale eis van een verwijderingsrendement van minimaal 80% voor de beste 7 uit 11 gidsstoffen kan voldoen. Daarom is in Figuur 9 het gemiddeld verwijderingsrendement inclusief de standaarddeviatie opgenomen voor 0 tot 14942 behandelde bedvolumes.

FIGUUR 9 GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT (INCLUSIEF STANDAARDAFWIJKING) PER GIDSSTOF VOOR HET OPERATIONELE BEREIK VAN 0 TOT 14942 BEHANDELDE BEDVOLUMES VAN DE NAGESCHAKELDE DYNACARBON PILOINSTALLATIE



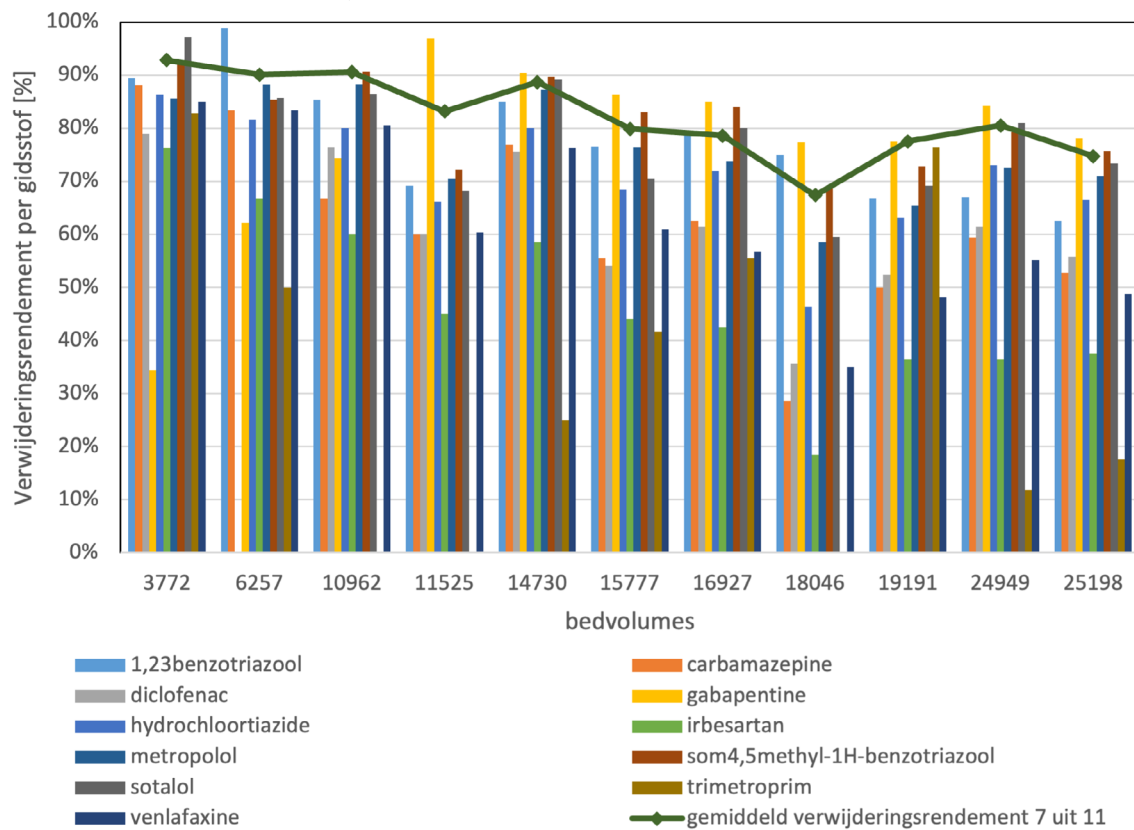
FIGUUR 10 VERWIJDERINGSRENDEMENT PER GIDSSTOF TIJDENS DE LAATSTE 6 MONSTERNEMINGEN. DE VERBLIJFTIJD IN DE NAGESCHAKELDE DYNACARBON PILOINSTALLATIE IS VOOR DE LAATSTE 6 MONSTERNEMINGEN VERLENGD VAN 18 NAAR 21MIN MINUTEN EN VERVOLGENS VOOR DE LAATSTE TWEE MONSTERNEMINGEN NOG NAAR 23MIN



In Figuur 10 zijn de verwijderingsrendementen per gidsstof gedurende de laatste 6 monster-
nemingen weergegeven. Het gemiddelde verwijderingsrendement voor de beste 7 uit 11
gidsstoffen was tijdens de proefneming op 22.220 en 22.682 bedvolumes afgenomen tot rond
de 64% bij een verblijftijd van 18 min. Toen werd de verblijftijd als eerste stap verhoogd van
18 naar 21 min. Dit heeft met een gemiddeld verwijderingsrendement van 63% voor de beste
7 uit 11 gidsstoffen geen verbetering opgeleverd. Als laatste stap werd na 23914 behandelde
bedvolumes de verblijftijd nog verder verhoogd naar 23 min. Dit heeft voor de monster-
nemingen op 24949 en 25198 behandelde bedvolumes weer tot een verbetering van het gemid-
delde verwijderingsrendement voor de beste 7 uit 11 gidsstoffen geleid van 71%. In Figuur
10 is duidelijk te zien, dat het verwijderingsrendement van met name hydrochloorthiazide,
metropolol, som 4,5 methyl-1H-benzotriazol en sotalol is toegenomen door het verlengen
van de verblijftijd.

3.2.3.1 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE DYNACARBON PILOTINSTALLATIE INCLUSIEF REGULIERE RWZI HAPERT

FIGUUR 11 HET VERWIJDERINGSRENDEMENT PER GIDSSTOF VOOR DE DYNACARBON PILOTINSTALLATIE INCLUSIEF DE RWZI (INFLUENT RWZI
TOT AAN EFFLUENT PILOT). IN GROEN IS HET GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT VOOR DE BESTE 7 UIT 11 WEERGEGEVEN



Naast het verwijderingsrendement van de Dynacarbon pilotinstallatie zelf is ook het verwij-
deringsrendement van het influent van rwzi Hapert tot het effluent van de pilotinstallatie
bepaald.

Aangezien de Dynacarbon pilotinstallatie eenmalig met verse kool wordt gevuld en
vervolgens x bedvolumes blijft staan, zien we in Figuur 11 afnemende verwijderingsrende-
menten. Tot ongeveer 15.000 bedvolumes heeft de Dynacarbon pilotinstallatie inclusief de
reguliere rwzi een verwijderingsrendement van ruim boven de 80% weten te behalen. Dit
verwijderingsrendement is sterk afgenomen tot nog maar net 70% bij 18.000 bedvolumes en

is daarna weer toegenomen tot ongeveer 75% bij ongeveer 25.000 bedvolumes. De toename in verwijderingsrendement is te wijten aan het feit, dat de verblijftijd is verhoogd van 18 naar 21 min (zie Figuur 10). De dip in het gemiddelde verwijderingsrendement bij de monsternamen op 18046 bedvolumes is wellicht te wijten aan RWA-omstandigheden in het begin van de 72uur-monsternamen (RWA-debiet van 32555m³/dag op dag 2 van de monsternamen en 24078 m³/dag op dag 3 van de 5 dagen durende monsternamen).

3.3 BIOLOGISCHE EFFECTMONITORING

Naast het verwijderingsrendement van de gidsstoffen is het ook belangrijk, dat de pilotinstallaties een verbetering van het effluent op de ecotoxiciteit bereiken. De ecotoxiciteit wordt door toxiciteitsmetingen van meerdere afzonderlijke stofgroepen bepaald. De metingen die tijdens duur van de pilots zijn uitgevoerd zijn getoetst aan de bioassays zoals opgenomen in de voorlopige handreiking voor (vergaand) gezuiverd rwzi-effluent t.w. xenobiotisch metabolisme (PAH- en PXR-calux), hormoonverstoring (ERa-calux) en de Daphnia- en Microtox-testen. Daarnaast zijn de cytotox (celdood), de anti-AR calux (pesticiden) en de GR-calux (glucocorticoïd) bioassays uitgevoerd.

De resultaten van de ecotoxiciteitstest zijn weergegeven in Tabel 4.

TABEL 4 RESULTATEN VAN DE ECOTOXICITEITSTESTEN VOOR BEIDE PILOTINSTALLATIES

Resultaat	Era-calux	GR-calux	PAH-Calux	PXR-calux	Microtox mbv multi SPE TU (toxic units)	Daphniatox mbv multi SPE TU (toxic units)
blanco v1	<0,0045	<1	95	<0,43	<0,015	<0,015
blanco v2	<0,0044	<1,6	2,8	,0,48		
effluent reguliere rwzi v1	0,93	210	420	52	0,041	0,015
effluent reguliere rwzi v2	1,6	110	150	19		
Carboplus v1	0,21	76	170	42	0,029	<0,015
Carboplus v2	0,49	56	29	14		
Dynacarbon	0,23	81	210	23	0,032	<0,015
rendement Carboplus v1	77%	64%	60%	19%	29%	
rendement Carboplus v2	69%	49%	81%	26%		
rendement Dynacarbon	75%	61%	50%	56%	22%	

Er zijn twee ecotoxiciteitstesten voor de Carboplus pilotinstallatie uitgevoerd (19-11-21 bij een dosering van 15g/m³ en 22-12-21 bij een dosering van 18g/m³) en één voor de Dynacarbon pilotinstallatie (19-11-21 bij ongeveer 16.000 behandelde bedvolumes). In Tabel 4 zijn de verwijderingsrendementen per ecotoxiciteitstest weergegeven. De pilotinstallaties zijn goed in staat om hormoonverstorende stoffen en glucocorticoïde te verwijderen, de xenobiotische stoffen daarentegen worden maar matig verwijderd.

Beide pilotinstallaties realiseren een ecotoxiciteitsafname van meer dan 50%.

3.4 VERWIJDERINGSRENDEMENTEN MACROPARAMETERS

Tijdens de analyses van de gidsstoffen zijn ook diverse macroparameters meegenomen om te bekijken of verwijdering plaatsvindt in de pilotinstallaties. Het betreft de volgende parameters:

- Stikstof totaal (N-totaal);
- Fosfor totaal (P-totaal);

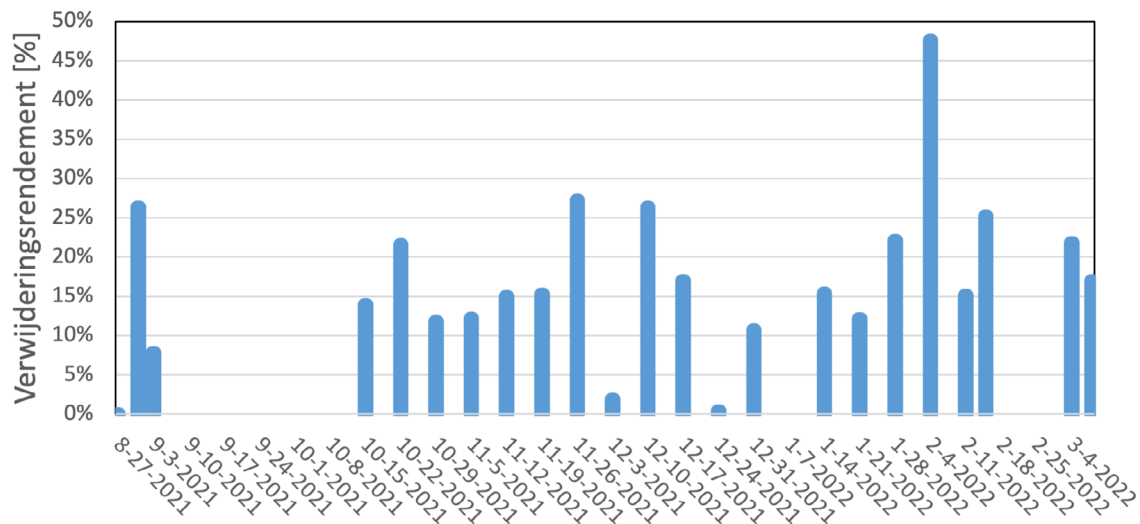
- Chemisch zuurstofverbruik (CZV);
- Opgelost organische koolstof (DOC);
- Onopgeloste bestanddelen (OB).

De Carboplus pilot en de Dynacarbon pilot worden beide apart weergegeven in resp. paragraaf 3.4.1. en paragraaf 3.4.2.

3.4.1 CARBOPLUS

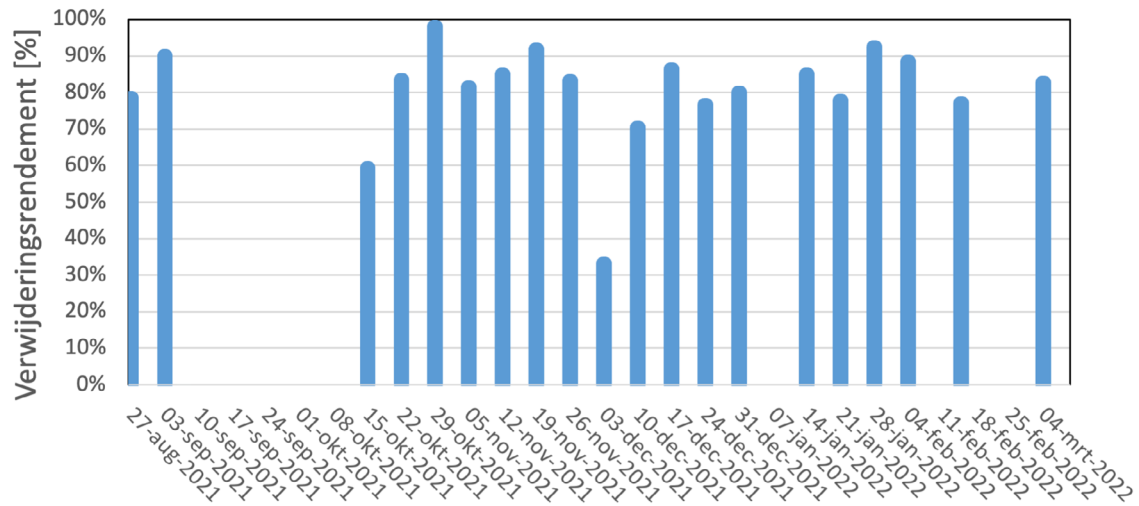
De afname van het DOC-gehalte in de (pilot) installatie staat in relatie met de verwijdering van de organische microverontreinigingen. Bij meerdere installaties in het buitenland wordt deze meting dan ook gebruikt om het verloop van het verwijderingsrendement te volgen. Voor beide pilotinstallaties zijn op rwzi Hapert zowel een online-meting als ook labmetingen uitgevoerd. De resultaten van de labmeting zijn weergegeven in Figuur 12. De metingen tot 27-8-21 waren niet betrouwbaar, omdat het monster voor de DOC-bepaling uit een doorstroombak werd genomen, welke door te geringe doorstroming te maken kreeg met aangroei van algen. In de periode vanaf 27-8-21 is deze doorstroombak vervangen voor een veel kleiner vat met betere doorstroming (verversing).

FIGUUR 12 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DOC IN DE NAGESCHAKELDE CARBOPLUS PILOTINSTALLATIE



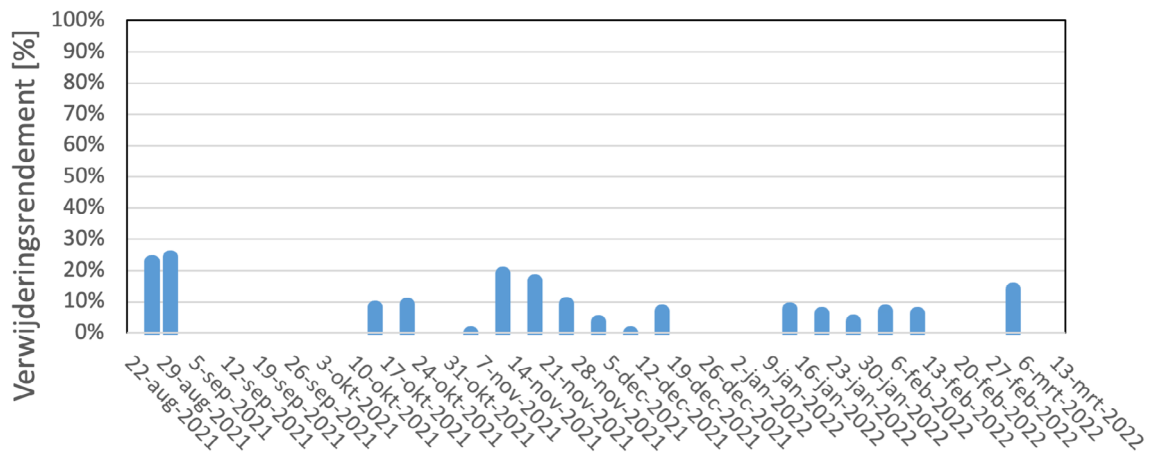
Naast DOC is ook het verwijderingsrendement van ammonium vastgesteld. De Carboplus pilotinstallatie heeft een gemiddeld verwijderingsrendement van 80% over de periode vanaf augustus tot aan maart gehaald, zie Figuur 13.

FIGUUR 13 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN AMMONIUM IN DE NAGESCHAKELDE CARBOPLUS PILOTINSTALLATIE



Naast het verwijderingsrendement van ammonium is ook gekeken of er verwijdering op N-totaal optreedt. De N-totaal verwijdering is ten opzichte van de ammonium verwijdering significant lager. De resultaten van de N-totaal verwijdering zijn in Figuur 14 weergegeven.

FIGUUR 14 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN N-TOTAAL IN DE CARBOPLUS PILOTINSTALLATIE

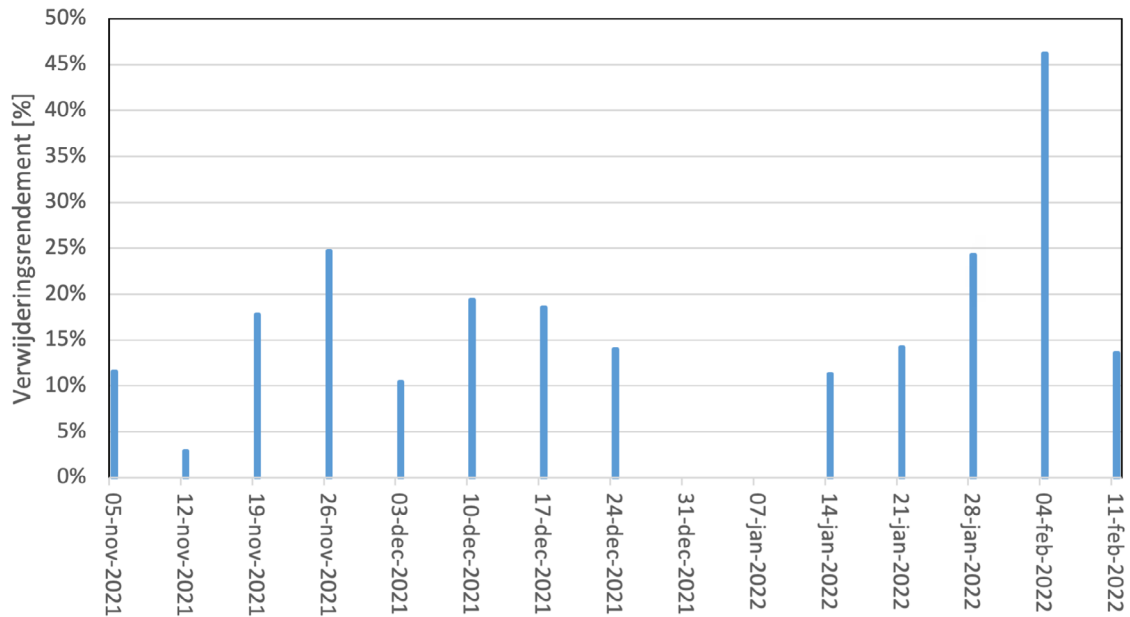


Er treedt geen verwijdering op bij de parameters onopgeloste bestanddelen en fosfaat, deze parameters hebben respectievelijk van 27 augustus tot en met 8 maart een gemiddelde verwijdering van 1 en 6 procent. De resultaten van deze parameters zijn te zien in Bijlage VII.

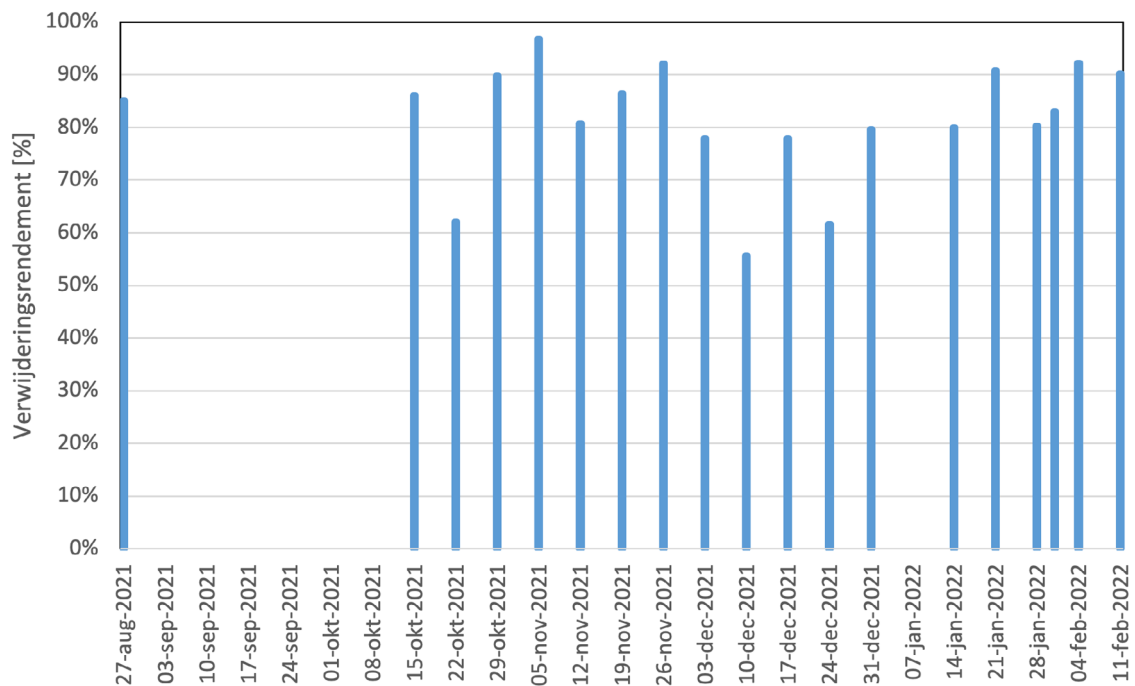
3.4.2 DYNACARBON

Ook voor de Dynacarbon pilotinstallatie zijn de verwijderingsrendementen van de macroparameters bepaald.

In Figuur 15 is het verwijderingsrendement van de DOC weergegeven. Er treedt een matige verwijdering van DOC van gemiddeld 18% op gedurende de proefperiode van augustus 2021 tot februari 2022.

FIGUUR 15 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DOC VAN DE NAGESCHAKELDE DYNACARBON PILOTINSTALLATIE

Het verwijderingsrendement van ammonium is te zien in Figuur 16. Het gemiddelde verwijderingsrendement van ammonium voor alle monsters uit de periode augustus 2021 tot februari 2022 komt uit op gemiddeld 82%.

FIGUUR 16 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN AMMONIUM VAN DE NAGESCHAKELDE DYNACARBON PILOTINSTALLATIE

De gemeten resultaten voor N-totaal en fosfaat zijn opgenomen in Bijlage VII (hoofdstuk 10.7).

3.5 PFAS

Naast de verwijdering van microverontreinigingen en de macroparameters is ook gekeken naar de verwijdering van stoffen uit de PFAS-groep. Voor dit onderzoek zijn twee monsters van het effluent van rwzi Hapert en het effluent van de pilotinstallaties geanalyseerd door Aquon. In Tabel 5 zijn de resultaten van de bemonstering voor beide pilotinstallaties weergegeven.

In de Carboplus pilotinstallatie heeft een verwijdering van 47% voor de PFOS en van 35% voor de PFOA plaatsgevonden. In de Dynacarbon pilotinstallatie heeft een verwijdering van 53% voor de PFOS en 26% voor de PFOA plaatsgevonden.

Beide pilotinstallaties zijn ook voor uitgebreide onderzoeken naar PFAS-stoffen gebruikt. Dit betreft enerzijds het STOWA-onderzoek naar de verwijdering van PFAS binnen het IPMV (deze resultaten zijn te vinden in Bijlage VIIIA) en anderzijds een TKI-onderzoek waarin de Dommel deelnemer is (deze resultaten zijn te vinden in Bijlage VIIIb).

TABEL 5 RESULTATEN EN VERWIJDERINGSRENDEMENT BEMONSTERING PFAS

	PFOS		PFOA		Verwijdering	
	17-2-2021	26-11-2021	17-2-2021	26-11-2021	PFOS	PFOA
	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l		
Effluent RWZI	24	17	5	6,7		
Carboplus	16	6,6	3	4,7	47%	35%
Dynacarbon	11	8,1	4	4,5	53%	26%

De voorlopige resultaten van het STOWA-onderzoek (zonder TOPA) zijn: Wanneer naar de concentraties van individuele stoffen wordt gekeken blijkt dat vrijwel alle aangetroffen stoffen behalve PFPeA en PFHxA in enige mate worden verwijderd.

De verwachting is dat actief kool vooral effectief is voor PFAS met langere ketens en dat kortere ketens slecht worden verwijderd. In dit onderzoek aangetroffen PFAS behalve PFPeA (C5) en PFHxA (C6) worden in enige mate verwijderd. Vooral voor PFBA (C4) en PFBS (C4) is dit opvallend en niet conform verwachting. Of actief kool geschikt is voor het verwijderen van precursors is nog onduidelijk. De precursor 6:2 FTS wordt in ieder geval voor circa 20% verwijderd. De overige precursors uit het standaard analysepakket worden niet aangetroffen. Bij de resultaten van het TKI-onderzoek wordt opgemerkt dat de daarbij gevonden concentraties relatief laag zijn waardoor op basis van deze beperkte metingen geen verantwoorde uitspraak over de effectiviteit van actief kool voor de verwijdering van PFAS kan worden gedaan.

Tot slot valt voor de RWZI Hapert op dat er een grote dagelijkse variatie zit in de gevonden concentraties PFAS.

3.6 KOOLUITSPOELING

De Schwarzgradbestimmung voor zowel de Carboplus pilotinstallatie als ook de Dynacarbon pilotinstallatie heeft bevestigd dat er geen kooluitspoeling plaatsvindt. De foto's van de uitgevoerde bepalingen zijn te vinden in Bijlage IX (hoofdstuk 10.9).

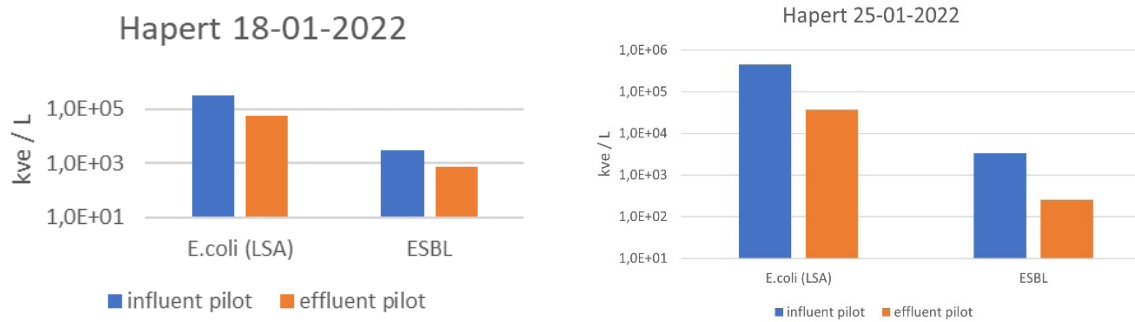
3.7 ANTIBIOTICARESISTENTIE

Er zijn op twee momenten (18-1-22 en 25-1-22) monsters genomen op 2 verschillende monsterpunten:

- Influent pilot (=effluent zuivering)
- Effluent pilot Carboplus

De resultaten van de verwijdering van E. coli en ESBL (AMR) zijn hieronder weergegeven.

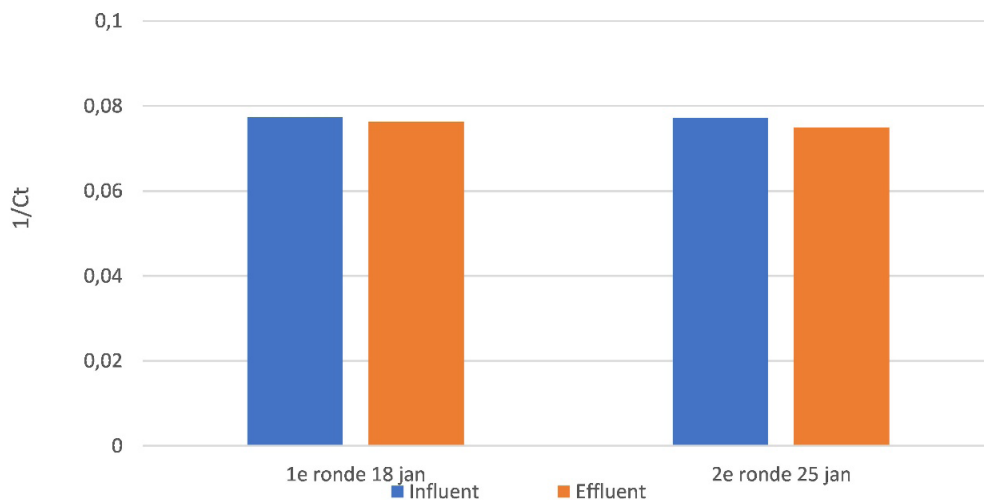
FIGUUR 17 RESULTATEN VAN E.COLI (LSA) EN ESBL IN TOE- EN AFVOER VAN DE CARBOPLUS OP 18 JANUARI 2022(LINKS) EN 25 JANUARI (RECHTS)



Op alle twee de monsternamemomenten is het beeld vergelijkbaar, zie Figuur 17. Er vindt een geringe verwijdering (< 1 log) van E. coli en ESBL plaats.

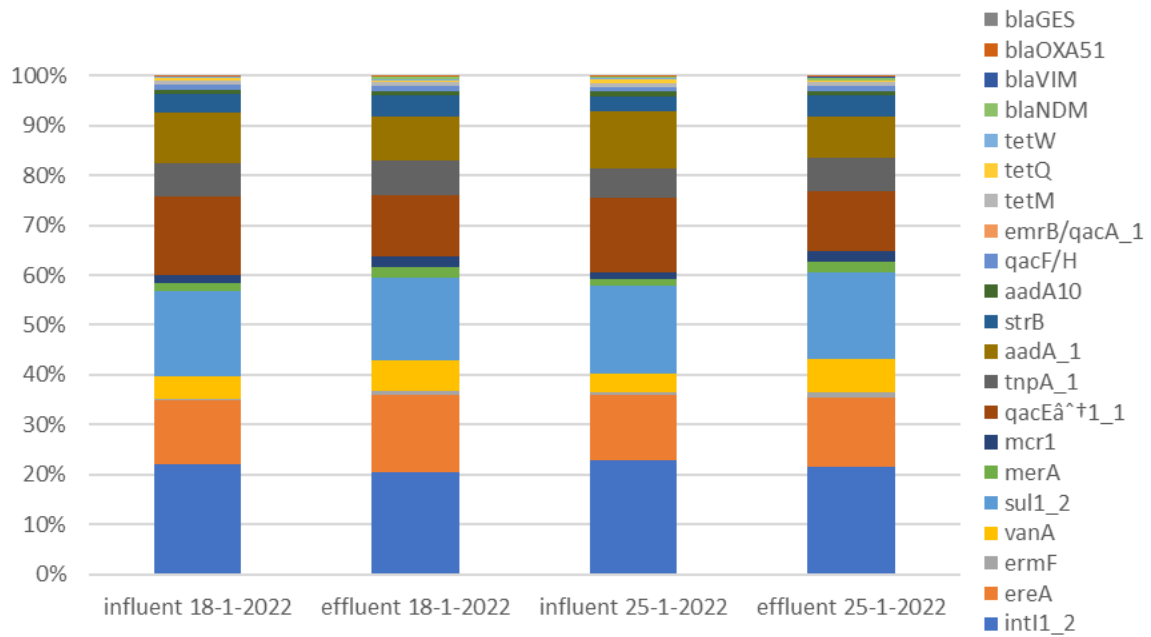
De analyse van de 16S concentratie (maat voor DNA) geeft aan dat er nagenoeg geen verwijdering is (zie Figuur 18).

FIGUUR 18 RESULTATEN VAN DE 16S GEN CONCENTRATIE VOOR EN NA DE PILOT



Ook is er geen verschuiving zichtbaar in de specifieke AMR-gen samenstelling (zie Figuur 19) na de Carboplus pilot.

FIGUUR 19 SPECIFIEKE AMR-GEN SAMENSTELLING VAN DE DIVERSE MONSTERS



De verwachting was dat Upflow-GAK geen tot weinig invloed zou hebben op de verwijdering van zowel antibioticaresistente bacteriën (ESBL) en AMR-genen en deze resultaten bevestigen dit beeld.

4

BEANTWOORDEN ONDERZOEKSVRAGEN EN DISCUSSIE

4.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de pilotinstallaties op rwzi Hapert onderling met elkaar vergeleken. Eveneens worden de behaalde resultaten van de pilotinstallaties op rwzi Hapert vergeleken met andere installaties uit het buitenland.

4.2 CARBOPLUS

In Tabel 6 worden de verwijderingsrendementen per gidsstof voor de nageschakelde Carboplus pilotinstallatie op rwzi Hapert vergeleken met de eerder behaalde resultaten op rwzi Penthaz. Voor de vergelijking van de verwijderingsrendementen is uitgegaan van een dosering van 15g/m³ actief kool (deze dosering wordt gebruikt op rwzi Penthaz). Het DOC-gehalte van het influent van de Carboplus-installatie is aangegeven per rwzi omdat deze van invloed is op het verwijderingsrendement van microverontreinigingen.

TABEL 6 VERGELIJKING VERWIJDERINGSRENDEMENT 11 GIDSSTOFFEN VAN DE CARBOPLUS-INSTALLATIE OP RWZI HAPERT EN OP RWZI PENTHAZ BIJ EEN DOSERING VAN 15G/M³

verwijderingsrendement 11 gidsstoffen SUBSTANCES	Hapert	Penthaz
1-2-3 benzotriazole	87%	N/A
Carbamazépine	59%	87%
Diclofénac	42%	85%
Gabapentine	55%	23%
Hydrochlorothiazide	70%	90%
Irbesatan	36%	79%
Metoprolol	75%	92%
Som 4,5 methylbenzotriazol	86%	N/A
Sotalol	64%	90%
Triméthopriime	62%	94%
Venlafaxine	48%	82%
Gemiddelde 11 gidsstoffen	62%	86%
DOC	10 mg/l (+/-2)	6 mg/l (+/-1)

Op rwzi Hapert zijn voor vrijwel alle gidsstoffen lagere verwijderingsrendementen behaald. Dit heeft te maken met twee oorzaken, namelijk: Zoals in paragraaf 2.2 beschreven staat is de pilot installatie een worst-case benadering ten opzichte van een full-scale installatie. En de tweede oorzaak is het hogere DOC-gehalte in het influent van de pilot. Het verschil hierin zou mogelijk kunnen ontstaan door het filter in de toeloop naar de installaties. Het filterdoek bij de pilot op rwzi Hapert heeft een mesh grootte van 500 micron terwijl het filter op rwzi Penthaz een mesh grootte heeft van 10 micron. Hierdoor wordt er mogelijk meer DOC verwijderd door het filter met als gevolg dat er een lager DOC-gehalte naar de installatie

gaat. Het DOC dat naar de actief kool installaties gaat, wordt geadsorbeerd aan het actief kool daardoor is er minder ruimte om microverontreinigingen te adsorberen waardoor er een lager verwijderingsrendement wordt behaald.

4.3 ONDERZOEKSVRAGEN CARBOPLUS

Doel van het pilotonderzoek met de Carboplus pilotinstallatie was het bepalen van het optimale verwijderingsrendement met een zo laag mogelijke actief kool dosering. Om deze reden is er gebruik gemaakt van 4 verschillende actief kool doseringen, te weten: 15, 18, 20 en 30 g/m³.

- 1. Is het Carboplus systeem in staat om bij een GAK-dosering van 15 g/m³ een verwijderingsrendement van >80% te genereren op de gidsstoffen? (verwijderingsrendement berekend over de RWZI + Carboplus systeem) bij een hydraulische aanvoer van 15 m/h?**
Bij de testen van de Carboplus pilotinstallatie op rwzi Hapert is het maar enkele keren gelukt om voor de pilotinstallatie inclusief de reguliere rwzi met een dosering van 15g/m³ een verwijderingsrendement >80% te halen. Om gedurende het hele jaar voor de hele zuivering een verwijderingsrendement van >80% te halen is ons voorstel dus ook, om uit te gaan van een dosering van 30g/m³ gedurende het gehele jaar. Specifiek voor de RWZI Hapert geldt hier als mogelijke optimalisatie dat in de zomerperiode een actief kool dosering van 20g/m³ volstaat om te voldoen aan >80% verwijdering.

- 2. Hoe ontwikkelt het verwijderingsrendement zich op de gidsstoffen bij een hogere of lagere dosering van het actief kool?**

Een lagere dosering dan 15g/m³ is uiteindelijk niet getest, aangezien met 15g/m³ al niet volledig aan de eis voor een verwijderingsrendement van >80% (influent rwzi tot aan effluent pilot) kon worden voldaan. De pilot is bedreven met 15, 18, 20 en 30 gram actief kool per kuub behandeld afvalwater de resultaten van de gemiddelde verwijdering hiervan zijn in Tabel 7 weergegeven. Het gemiddelde verwijderingsrendement is berekend per dosering en alleen voor de monsters genomen onder DWA-omstandigheden.

TABEL 7 GEMIDDELD VERWIJDERINGSRENDEMENT 19 (MONITORING)GIDSSTOFFEN NAGESCHAKELDE CARBOPLUS PILOTINSTALLATIE

Doseerhoeveelheid in g/m ³	Gemiddelde verwijdering in % van de beste 7 uit 11 gidsstoffen	Gemiddelde verwijdering in % van 11 gidsstoffen	Gemiddelde verwijdering in % van 19 (monitoring) gidsstoffen
15	74	63	61
18	76	66	63
20	81	73	65
30	86	77	73

- 3. In welke mate wordt PFAS verwijderd in het Carboplus systeem?**

Stoffen uit de groep PFOS worden beter verwijderd, dan stoffen uit de groep PFOA. Om hier meer over te kunnen zeggen is meer onderzoek en betere analysemethodes gewenst.

- 4. Wat is het spoelwaterverbruik per m3 behandeld afvalwater?**

Het spoelwaterverbruik voor de Carboplus pilotinstallatie kon niet worden bepaald, aangezien de spoeling handmatig uitgevoerd werd.

- 5. Is er sprake van uitspoeling van kooldeeltjes uit het Carboplus systeem en zo ja hoeveel?**
Met behulp van de Schwarzgradbestimmung is vastgesteld, dat er geen kooldeeltjes uit het systeem uitspoelen (zie Bijlage VI).

6. **Wat is de CO₂ footprint van het Carboplus systeem bij de gehanteerde GAK-doseringen en toegepaste gereactiveerde GAK?**

De CO₂ voetafdruk voor de Carboplus installatie komt uit op 88 - 126 gCO₂/m³ behandeld afvalwater (afhankelijk van het aandeel gereactiveerd kool). Voor verdere toelichting zie hoofdstuk 5.3.

7. **In welke mate neemt de toxiciteit van het rwzi effluent af door het Carboplus systeem.**

De ecotoxiciteit kan met behulp van de Carboplus installatie met 50% gereduceerd worden.

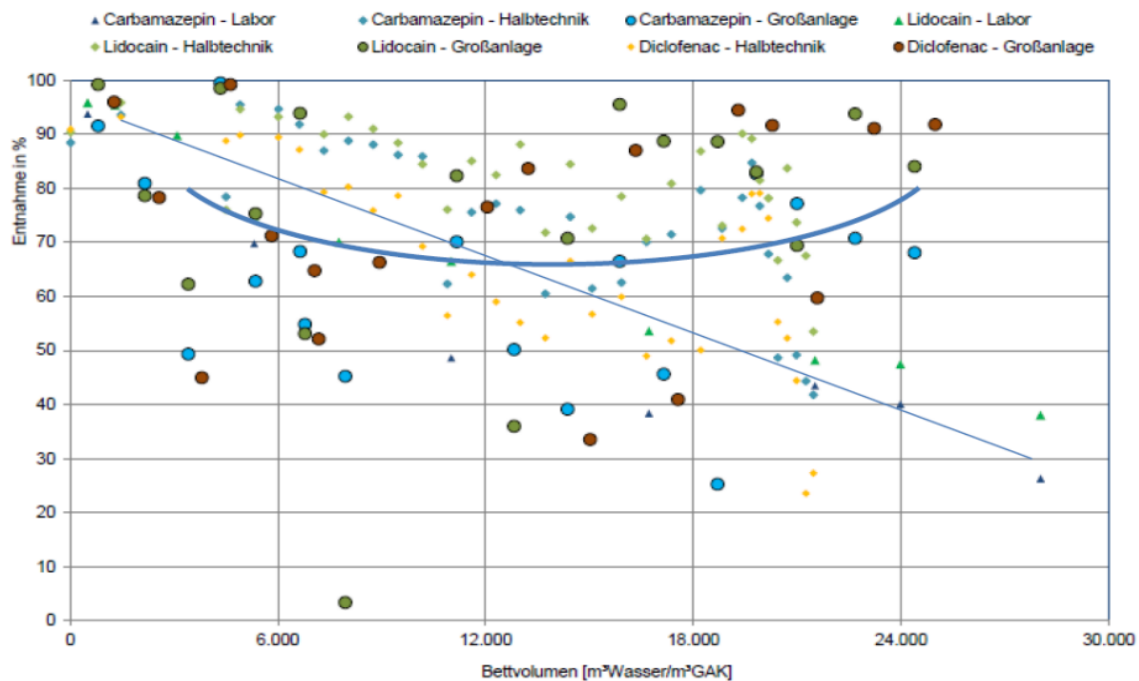
8. **Wat zijn de kosten van het Carboplus systeem omgerekend per m³ behandeld afvalwater?**

De kosten voor de Carboplus installatie per m³ behandeld afvalwater voor een verwijderingsrendement van 80% voor de beste 7 uit 11 gidsstoffen komt uit op 0,13 €/m³. Voor verdere toelichting zie hoofdstuk 6.3.

4.4 DYNACARBON

In Figuur 20 zijn eerder behaalde resultaten van de Dynacarbon installatie als zowel pilot, maar ook als full-scale installatie weergegeven. Uitgaande van de resultaten van de pilot-installatie (Halbtechnik) heeft de Dynacarbon in het eerdere onderzoek een verwijderingsrendement van ca. 55% gehaald voor diclofenac bij 15.000 behandelde bedvolumes en een verwijderingsrendement van ca. 75% voor carbamazepine (ook bij 15.000 behandelde bedvolumes). Tijdens de pilotperiode op rwzi Hapert werd bij 15.000 behandelde bedvolumes een verwijderingsrendement van ca. 66% gehaald voor carbamazepine en van ca. 67% voor diclofenac.

FIGUUR 20 EERDER BEHALDE RESULTATEN VAN DE DYNACARBON INSTALLATIE ALS PILOT EN FULL-SCALE INSTALLATIE (NORDIC WATER, 2020)



4.5 ONDERZOEKSVRAGEN DYNACARBON

1. **Hoeveel bedvolumes kan de Dynacarbon pilotinstallatie behandelen voordat het verwijderingsrendement voor de gidsstoffen onder de 80%?**

Tijdens het pilotonderzoek is vastgesteld dat de Dynacarbon pilotinstallatie gedurende 15.000 behandelde bedvolumes een verwijderingsrendement van meer dan 85% voor de beste 7 uit 11 gidsstoffen haalt. De Dynacarbon pilotinstallatie heeft tot 25.000 behandelde bedvolumes nog een verwijderingsrendement van meer dan 70% voor de beste 7 uit 11 gidsstoffen gehaald.

2. **Hoe verloopt het verwijderingsrendement van 7,11 en 19 gidsstoffen door de Dynacarbon inclusief reguliere rwzi?**

Zoals verwacht, neemt het verwijderingsrendement gedurende de looptijd van de pilotinstallatie steeds verder af.

3. **Hoeveel g GAK/m³ is er nodig om over de Dynacarbon inclusief RWZI tot een verwijderingsrendement van 80% (voor gidsstoffen) te komen.**

Tijdens de testen van de Dynacarbon pilotinstallatie werden 15.000 bedvolumes behandeld met een verwijderingsrendement van >86% voor de beste 7 uit 11 gidsstoffen. Daarmee zijn 24.000m³ afvalwater behandeld, dit betekent, dat er voor het behalen van een verwijderingsrendement van ~86% ongeveer 30g GAK/m³ nodig is.

4. **Hoe ontwikkelt het verwijderingsrendement per gidsstof door de Dynacarbon zich over de tijd.**

De ontwikkeling van het verwijderingsrendement per gidsstof over de pilotperiode van de Dynacarbon is weergegeven in Figuur 7. Zoals verwacht neemt het verwijderingsrendement voor alle stoffen gedurende de proefperiode af. Er is maar één uitzondering en dat is gabapentine, het verwijderingsrendement voor deze gidsstof is aan het einde van de proefperiode hoger, dan in het begin.

5. **In welke mate worden N, P en PFAS verwijderd door de Dynacarbon.**

In de Dynacarbon pilotinstallatie heeft verwijdering van met name ammonium plaats gevonden, er was nauwelijks sprake van verwijdering van N-tot en van PO₄. Voor stoffen uit de PFAS-groep kon wel een verwijdering gemeten worden, maar er is nog teveel onbekend om hier echt iets over te kunnen zeggen.

6. **In welke mate neemt de toxiciteit van het rwzi effluent af door de Dynacarbon.**

Zoals in hoofdstuk 3.3 is beschreven, is de Dynacarbon pilotinstallatie in staat om een reductie van meer dan 50% op de ecotoxiciteit te realiseren.

7. **Wat is het spoelwaterverbruik van de Dynacarbon per m³ behandeld afvalwater.**

De waswaterpomp heeft gedurende de looptijd van de Dynacarbon pilotinstallatie 23% van de tijd aangestaan. Het debiet is eenmalig uitgeliterd op 150 liter per uur, dat is $0,23 \times 24 \times 150 = 828$ liter spoelwater per dag. Van 01-04-2021 tot 8-3-2022 (dat zijn 342 dagen) is 40.318 m³ water behandeld. Dit betekent dat er $342 \times 828 / 1000 = 283,167$ m³ spoelwater zijn gebruikt in de pilotperiode. Per m³ behandeld afvalwater betekent dit een spoelwatergebruik van: $283 / 40.318 \times 1000 = 7,02$ liter spoelwater per m³ behandeld water.

8. **Wat is de CO₂ footprint bij een verwijderingsrendement van >85% voor de beste 7 van 11 gidsstoffen over de Dynacarbon inclusief reguliere RWZI.**

De CO₂-footprint voor de Dynacarbon installatie komt uit op 133 – 175 g CO₂/m³ behandeld afvalwater (Het verschil in de CO₂-footprint zit in het aandeel gereactiveerde kool.).

4.6 TOEKOMST ONDER DE EUROPESE RICHTLIJN STEDELIJK AFVALWATER

Door de EU is een voorstel gedaan voor een revisie van de Richtlijn Stedelijk Afvalwater¹². 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 8. 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.

TABEL 8 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-benzotriazol
metoprolol		irbesartan
venlafaxine		som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazol
		gabapentine
		sotalol
		thrimethoprim

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

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

De verwijdering wordt conform het concept EU-voorstel berekend op basis van de gemiddelde verwijdering van de beschouwde stoffen in elk 24h- of 48h-monster op basis van concentraties. Het 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 9. 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.

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

Het aangenomen actiefslibrendement van de standaard rwzi kan voor de concept EU-gidsstoffen 40% zijn, net zoals voor de Nederlandse gidsstoffen¹³. Dit is echter afhankelijk van in welke mate de concept EU-gidsstoffen daadwerkelijk voorkomen. De concept EU-gidsstoffen Amisulpride, Candesartan en Clarithromycine komen over het algemeen in onvoldoende mate voor in Nederlandse influenten en effluenten van rwzi's. Dit is ook de reden waarom deze niet zijn opgenomen als gidsstof in Nederland. De concept EU-gidsstof Citalopram komt wel voldoende voor, maar is afgefallen als Nederlandse gidsstof vanwege een mogelijk te hoog verwijderingsrendement door het actiefslib (>50%)¹⁴. 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 20 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 aactiefslibrendement 25-35% bedraagt. Bij deze tegenvallende actiefslib rendementen is een nageschakeld rendement van 80% onvoldoende om het overall rendement van 80% te behalen: het overall rendement zal dan circa 75% bedragen.

In Tabel 9 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) filtratie¹⁵ in vergelijking met de technologie in dit rapport. De informatie in deze tabel is gebaseerd op expert judgement en eerste resultaten van pilotinstallaties en actiefslibinstallaties in Nederland en dient daarom alleen als grove indicatie om het verschil tussen de concept EU-wetgeving en de Nederlandse richtlijnen te duiden en kunnen zeker niet als absolute getallen worden gebruikt.

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

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

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

TABEL 9 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)	Carboplus	Dynacarbon
Instelling	0,7 g O ₃ /g DOC	15-20 mg PAK/l	EBCT (verbleeftijd): 30 min; standtijd 6 maanden	30mg/L; EBCT: 6 minuten	EBCT: 22minuten; standtijd: 11 maanden
Nageschakeld verwijderingsrendement (%)	80-90%	nvt	80-90%	80-90%	80-90%
Overall verwijderingsrendement (%) volgens rekenregels concept EU Richtlijn Stedelijk Afvalwater dd 26/10/2022 (6 van de 12 onderverdeeld in categorieën)	75-85%	70-80%	75-85%	75 – 85%	75 – 85%
Gekozen gidsstoffen EU (6 van de 12; verhouding van 2:1 voor aantal stoffen uit categorie 1 ten opzichte van aantal stoffen uit categorie 2)	Benzotriazol, 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	Benzotriazol, som 4,5-methyl benzotriazol, Hydrochloor-thiazide, Metoprolol, Citalopram, Diclofenac	Benzotriazol, som 4,5-methyl benzotriazol, Hydrochloor-thiazide, Metoprolol, Citalopram, Diclofenac
Overall verwijderingsrendement (%) volgens rekenregels bijdrageregeling Ministerie IenW en IPMV (7 van de 11)	80-85%	70-80%	80-85%	80 – 85%	80 – 85%
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	Benzotriazole, som 4,5-methyl benzotriazol, Hydrochloor-thiazide, Sotalol, Metoprolol, Gabapentine, Diclofenac	Benzotriazole, som 4,5-methyl benzotriazol, Hydrochloor-thiazide, Sotalol, Metoprolol, Gabapentine, Diclofenac

4.7 UITGANGSPUNTEN VOOR FULL-SCALE INSTALLATIE

Uit de resultaten van het onderzoek naar de inzetbaarheid van de Carboplus installatie en de Dynacarbon installatie voor de verwijdering van microverontreinigingen zijn de uitgangspunten voor een full-scale-installatie geformuleerd, zonder te kijken naar mogelijke optimalisaties in de bedrijfsvoering.

4.7.1 CARBOPLUS

Op basis van de resultaten van de Carboplus pilotinstallatie zijn de instellingen voor een full-scale-installatie in de Nederlandse situatie geformuleerd. Om een overall verwijderingsrendement van 80% te behalen op de zuivering moet de installatie voor de verwijdering van de microverontreinigingen zelf een verwijderingsrendement van 85 – 90 % halen. In het geval van de Carboplus installatie betekent dit bij een EBCT van 6min en een aanvoersnelheid van 15m/u dat een dosering van 30g/m³ micro-grains gedurende het jaar gehanteerd moet worden.

4.7.2 DYNACARBON

Ook voor de Dynacarbon-installatie zijn voor de full-scale installatie de uitgangspunten op basis van de behaalde resultaten geformuleerd. Om een verwijderingsrendement van 85 – 90% op de microverontreinigingen te halen is de standtijd van de Dynacarbon-installatie verkort naar 15.000 behandelde bedvolumes, indien een EBCT van 22 min wordt gehandhaafd.

5

DUURZAAMHEID

5.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk is de duurzaamheid van het Carboplus en Dynacarbon concept uitgewerkt en vergeleken met de referentietechnieken PACAS, O₃+zandfiltratie en GAK. Paragraaf 5.2 bevat de uitgangspunten waarna de CO₂ footprint uitgewerkt is in paragraaf 5.3. Als uitgangspunt voor de berekening van de CO₂-emissie is een rwzi van 100.000 i.e. gehanteerd conform het door de STOWA ontwikkelde model “CO₂ footprint RWZI’s micro’s voor bepalen CO₂ footprint”.

5.2 UITGANGSPUNTEN

GAK

In Tabel 10 zijn de CO₂-footprints van vers actief kool op basis van steenkool en gereactiveerd actief kool opgenomen.

TABEL 10 CO₂-FOOTPRINT VAN VERSCHILLENDE TYPES ACTIEF KOOL, BRON: STOWA

Kool	CO ₂ footprint (kg CO ₂ /kg kool)
Vers actief kool op basis van steenkool	9,6
Gereactiveerd actief kool op basis van steenkool	2,5*

*90% gereactiveerd kool, 10% verse kool

Voor de berekening van de CO₂ footprint van het Carboplus en Dynacarbon systeem zijn twee verschillende scenario’s gehanteerd voor de vulling van de filters;

- Alle vullingen betreffen gereactiveerd GAK
- Een op de vijf vullingen betreft vers GAK (20% vers GAK, 80% gereactiveerd GAK) waarbij de eerste vulling bestaat uit volledig vers GAK

De onderbouwing achter het scenario waarbij enkel gereactiveerd GAK wordt toegepast is de ervaring die GAK-producenten hebben met de regeneratie van GAK uit steenkool. Zolang er 10% ‘vers’ GAK gesuppleerd wordt om thermische verliezen te compenseren geven leveranciers aan dat GAK oneindig te regenereren is zonder verlies van kwaliteit.

Het scenario waarbij een op de vijf vullingen vers GAK betreft gaat uit van het scenario dat de initiële vulling van het GAK-filter vers GAK betreft en dat na 4 regeneraties het gehele filterbed vervangen dient te worden door vers GAK.

ENERGIE

Het energieverbruik van het Carboplus en Dynacarbon systeem is berekend aan de hand van de budgetramingen van de aangeboden installaties. Voor het Carboplus systeem is een verbruik van 0,043 kWh/m³ berekend en voor het Dynacarbon systeem een verbruik van 0,088 kWh/m³. Deze uitgangspunten zijn gehanteerd voor de berekening van het energieverbruik van beide systemen waarbij onderscheid gemaakt is in het energieverbruik van de toevoerpompen, spoelwaterpompen, compressor en overige onderdelen.

ENERGIEVERBRUIK CARBOPLUS

In vergelijking met gefluïdiseerd bed zandfilters is het energieverbruik van het Carboplus systeem relatief laag vanwege de lage dichtheid en specifieke granulometrie van de GAK-korrels. Actieve kool is makkelijker te fluïdiseren dan bv zand gezien zijn geringe dichtheid (+/- 450 kg/m³) en de granulometrie van de korrels

In Tabel 11 is het energie- en GAK verbruik van het Carboplus en Dynacarbon systeem opgenomen. Op basis van deze tabel is in paragraaf 5.3 de CO₂ footprint uitgewerkt.

TABEL 11 ENERGIE EN GAK VERBRUIK VOOR NABEHANDELING 100.000 I.E. REFERENTIE RWZI

Parameter	Eenheid	Carboplus	Dynacarbon
Debiet nabehandeling	m ³ /j	6.132.000	6.132.000
Elektriciteit nabehandeling, excl. opvoeren effluent en spoelwater	kWh/j	21.189	125.029 *
Elektriciteit opvoeren	kWh/j	186.678	415.360
Elektriciteit recirculatiepompen		57.055	
GAK verbruik vers	kg/j	0 – 66.226 **	0 – 66.226**
GAK verbruik totaal	kg/j	183.960 ***	183.960 ****

*inclusief energieverbruik compressor mammoetpomp

**indien geen vers GAK gedoseerd wordt 0; indien 20% vers GAK gedoseerd wordt 66.226 kg per jaar voor Carboplus en 66.226kg per jaar voor Dynacarbon

***op basis van een GAK-dosering van 30 gram/m³ gedurende het jaar, waarvan 10% vers GAK

****op basis van 15.000 bedvolumes per vulling

5.3 CO₂-FOOTPRINT

In Tabel 12 is de CO₂ footprint van de Carboplus en Dynacarbon systemen berekend en vergeleken met de referentietechnieken PACAS, O₃+zandfiltratie en GAK. In de tabel is zowel het scenario uitgewerkt waarbij enkel gereactiveerde GAK wordt toegepast als het scenario waarbij de initiële vulling bestaat uit vers GAK en de GAK na vier regeneraties vervangen wordt door vers GAK (20% vers GAK, 80% gereactiveerd GAK).

Wat opvalt is dat de CO₂ footprint voor het Carboplus systeem met 96 – 173 gram CO₂ per m³ heel veel lager is dan referentie GAK wat een CO₂-emissie heeft van 325 gram CO₂ per m³. In vergelijking met PACAS en O₃+zandfiltratie stoot het Carboplus proces meer CO₂ uit, uitgaande van 20% vers GAK en 80% gereactiveerd. Indien enkel gereactiveerd GAK gebruikt wordt valt de CO₂ footprint lager uit dan PACAS en O₃+zandfiltratie.

Het Dynacarbon concept resulteert in een uitstoot van 110 – 187 gram CO₂ per m³ wat eveneens aanzienlijk lager is dan referentie GAK. In vergelijking met PACAS en O₃+zandfiltratie resulteert het Dynacarbon concept in een gelijke CO₂-uitstoot indien enkel gereactiveerd GAK wordt toegepast en een hogere uitstoot indien 20% van de vullingen vers GAK betreft. De verklaring voor de lage CO₂-emissies van Carboplus is het relatief lage GAK verbruik per m³ behandeld afvalwater en het feit dat voornamelijk gereactiveerd GAK gebruikt wordt.

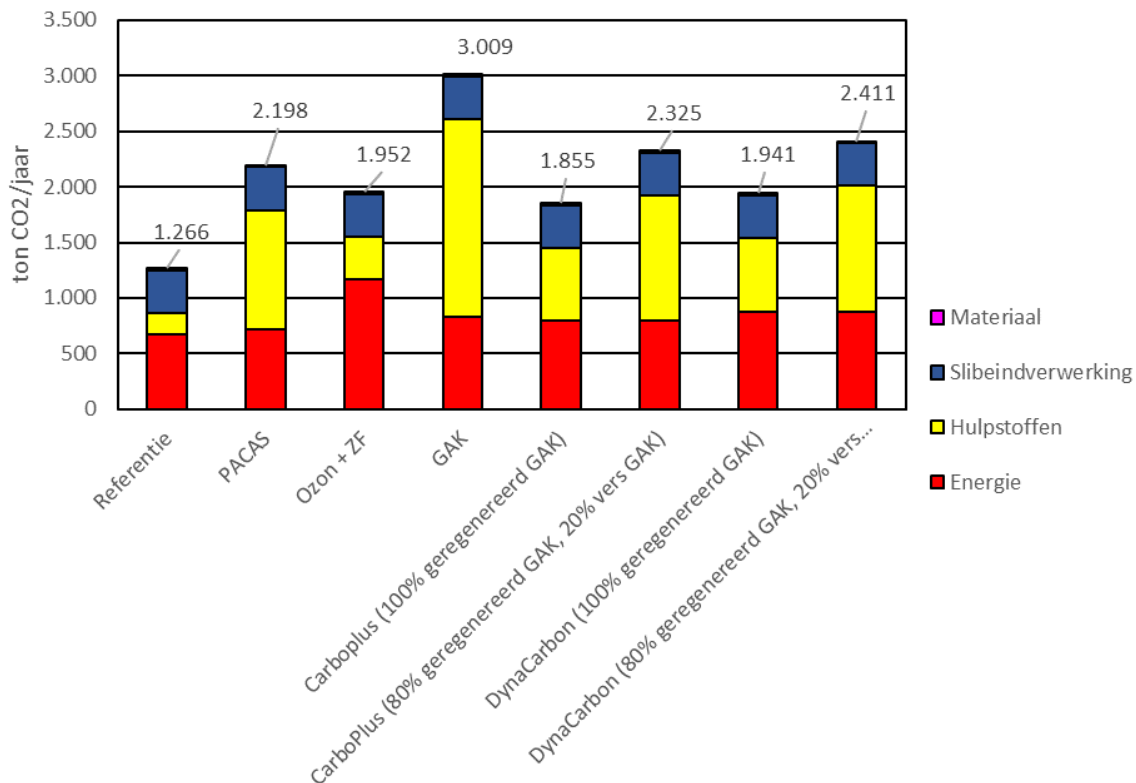
TABEL 12 CO₂-FOOTPRINT REFERENTIETECHNIEKEN VERSUS CARBOPLUS EN DYNACARBON

Parameter	Eenheid	PACAS	O ₃ -ZF	GAK	CarboPlus, 100% *	CarboPlus, 20%, 80% **	DynaCarbon, 100% *	DynaCarbon, 20%, 80% **
CO ₂ footprint totaal	Ton CO ₂ per jaar	2.198	1.953	3.009	1.855	2.325	1.941	2.411
Behandeld afvalwater	m ³ /jaar	7.665.000	5.365.500	5.365.500	6.132.000	6.132.000	6.132.000	6.132.000
CO ₂ footprint per m ³	g CO ₂ /m ³	122	128	325	96	173	110	187

*100% gereactiveerd GAK

**20% vers GAK, 80% gereactiveerd GAK

In Figuur 21 is de totale jaarlijkse CO₂ emissie van de afzonderlijke systemen gepresenteerd, inclusief de uitstoot van de rwzi. De uitstoot van het CarboPlus en DynaCarbon systeem valt aanzienlijk lager uit dan de uitstoot van referentie GAK.

FIGUUR 21 CO₂ FOOTPRINT TOTALE RWZI INCLUSIEF VERWIJDERING MICROVERONTREINIGINGEN

6

KOSTEN

6.1 INLEIDING

In paragraaf 6.2 zijn op basis van de budgetramingen de investeringskosten bepaald waarna in paragraaf 6.3 de jaarlijkse kosten en de kosten per m³ behandeld afvalwater berekend zijn.

6.2 INVESTERINGSKOSTEN

De onderdelen die aangeboden zijn in de ontvangen budgetramingen zijn opgenomen in bijlage 10.11. In bijlage 10.11.1 is een budgetraming opgenomen voor de bouw- en stichtingskosten van een Carboplus installatie voor 1.040 m³/h. Hierbij is uitgegaan van de volgende uitgangspunten:

- De installatie is niet onderheid
- De installatie is niet opgesteld in een gebouw. De schakelkasten staan wel binnen opgesteld
- Er is geen voorfilter voorzien (trommelzeef of doekenfilter)

De bouwkosten zijn verstrekt door de firma Stereau waarna deze vermenigvuldigd zijn met de IPMV toeslagfactoren.

De bouw- en stichtingskosten voor de Dynacarbon installatie zijn gelijk gesteld aan die van de Bio-GAK-installatie welke beschreven is in STOWA-rapport 'Biologisch geactiveerde continufiltratie over granulair actief kool – Pilotonderzoek Bio-GAK'. Het principe van de Dynacarbon en Bio-GAK-installatie is nagenoeg identiek met het verschil dat de Bio-GAK-installatie belucht wordt en de Dynacarbon niet. De stichtingskosten van de Bio-GAK zijn opgenomen in bijlage 10.11.2.

De kosten voor het aansluiten van de installatie op de rwzi vallen buiten de scope van de werkzaamheden. Deze werkzaamheden omvatten de toevoer en afvoer van water, een nieuwe transformator, aansluiten van de installatie op de transformator, de integratie van de installatie in SCADA en kosten in relatie tot de standaarden van waterschappen.

In Tabel 13 zijn de bouwkosten vermenigvuldigd met een onvolledigheidsfactor van 25% en een factor 25% aannemerskosten.

Tot slot is een opslag van 80% gerekend over de totale bouwkosten om te komen tot de stichtingskosten. Deze factor bestaat uit kosten voor BTW, onvoorzien, engineering, projectmanagement, directievoering, verzekeringen, tijdelijke voorzieningen tijdens ombouw en opstart, opleiding en communicatie kosten.

TABEL 13 STICHTINGSKOSTEN

Onderdeel		Carboplus	Dynacarbon
Bouwkosten		€ 1.984.000	€ 2.953.000
Onvolledigheid	25%	€ 496.000	€ 738.000
Aannemerskosten	25%	€ 620.000	€ 923.000
Bouwkosten totaal		€ 3.100.000	€ 4.614.000
Opslag t.b.v. stichtingskosten	80%	€ 2.480.000	€ 3.691.000
Totaal stichtingskosten		€ 5.580.000	€ 8.305.000

In Tabel 13 is te zien dat de stichtingskosten voor het Carboplus systeem ingeschat worden op EUR 5,6 miljoen tegenover EUR 8,3 miljoen voor het Dynacarbon filter. Dat is een verschil van 2,7 miljoen euro. Dit verschil wordt veroorzaakt doordat het Dynacarbon systeem meer internals vereist. Het Dynacarbon systeem vereist door de continue spoeling geen buffers. Voor het Carboplus systeem betreft 39% van de investering civiele kosten en 61% WTBE/PA. Voor het Dynacarbon systeem is uitgegaan van 31% civiele kosten en 69% WTBE/PA.

6.3 CAPEX EN OPEX

De jaarlijkse kosten van beide systemen zijn vastgesteld op basis van de financiële uitgangspunten in Tabel 14.

TABEL 14 FINANCIËLE UITGANGSPUNTEN

Parameter	Eenheid	Waarde
Annuïteit	%	4
Afschrijving civiel	jaar	30
Afschrijving WTBE	jaar	15
Afschrijving PA	jaar	5
Onderhoud civiel	% van bouwkosten	0,50%
Onderhoud WTBE/PA	% van investering	3,00%
FTE	EUR/j	50.000
FTE	uur/j	520
elektriciteit	EUR/kWh	0,1
GAK massa	kg/m ³	450
GAK	EUR/m ³	€ 1.200
GAK	EUR/ton	2.667
GAK prijs gereactiveerd	EUR/m ³	€ 500
GAK prijs gereactiveerd	EUR/ton	€ 1.111
Slibverwerking	EUR/ton ds	€ 600
Productie spoelwater	EUR/m ³	€ 0,04
Verwerking spoelwater	EUR/m ³	€ 0,01

Voor het berekenen van de jaarlijkse kosten is verder uitgegaan van de uitgangspunten in Tabel 15.

TABEL 15 UITGANGSPUNTEN CARBOPLUS EN DYNACARBON

Parameter	Eenheid	Carboplus	Dynacarbon
Te behandelen jaardebiet	m ³ /j	6.132.000	6.132.000
GAK-dosering	kg/jaar	183.960	183.960
Energieverbruik	kWh/m ³	0,043	0,088
Beheer	uur/j	520	520
Waswater	m ³ /j	12.150	306.600

Op basis van de investeringskosten in Tabel 13 en de uitgangspunten in Tabel 14 en Tabel 15 zijn in Tabel 16 de jaarlijkse kosten voor het Carboplus en het Dynacarbon systeem uitgewerkt evenals de kosten per m³ behandeld afvalwater.

TABEL 16 JAARLIJKSE KOSTEN

Parameter	Eenheid	Carboplus	Dynacarbon
Kapitaallasten	EUR/j	€ 496.000	€ 795.000
Energie	EUR/j	€ 26.000	€ 54.000
personeel	EUR/j	€ 14.000	€ 14.000
onderhoud	EUR/j	€ 68.000	€ 115.000
GAK	EUR/j	€ 307.000	€ 307.000
Waswater	EUR/j	-	€ 3.000
Totale kosten	EUR/j	€ 911.000	€ 1.288.000
Kosten per m³ behandeld	EUR/m³	€ 0,15	€ 0,21

In Tabel 16 is te zien dat de kosten per m³ behandeld afvalwater in het geval van het Carboplus concept 15 cent per m³ bedragen. De kosten van Dynacarbon bedragen 21 cent per m³. De kosten van Carboplus en Dynacarbon vallen hiermee lager uit dan referentie GAK-filtratie wat 26 cent per m³ kost. In vergelijking met O₃+zandfiltratie vallen de kosten gelijk of hoger uit terwijl PACAS met 5 cent per m³ aanzienlijk goedkoper is dan beide GAK-systemen. De totale jaarlijkse kosten voor het Carboplus systeem bedragen 911.000 EUR/jaar tegenover 1.288.000 EUR/jaar voor het Dynacarbon systeem.

Om de gevoeligheid voor de GAK-dosering en de standtijd vast te stellen is de prijs van beide systemen berekend voor variabele GAK-doseringen. Bij een lagere GAK-dosering van 20 mg/l bedraagt de prijs van het Carboplus systeem per m³ afgerond 13 cent terwijl bij een hogere GAK-dosering van 40 mg/l de prijs 17 cent per m³ wordt.

Indien de standtijd van het GAK in het Dynacarbon systeem 0,5 jaar bedraagt in plaats van 11 maanden dan lopen de kosten op naar 24 cent per m³ terwijl bij een standtijd van 2 jaar de prijs afgerond 18 cent per m³ is.

7

ONTWERP FULL-SCALE INSTALLATIE

7.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk zijn aan de hand van budgetramingen van leveranciers en de uitgevoerde pilots op de RWZI Hapert schetsontwerpen opgesteld voor een Carboplus en Dynacarbon systeem op de rwzi Hapert. Op basis van deze schetsontwerpen is vervolgens een doorvertaling gemaakt naar een 100.000 i.e. case waarbij eveneens gebruik gemaakt is van de ervaring uit het Bio-GAK-project (STOWA 2011-22).

7.2 UITGANGSPUNTEN RWZI HAPERT

De uitgangspunten voor het ontwerp van het Carboplus en Dynacarbon systeem zijn opgenomen in Tabel 17.

TABEL 17 UITGANGSPUNTEN NABEHANDELING RWZI HAPERT VIA UPFLOW GAK-FILTRATIE

Parameter	Eenheid	Waarde
Capaciteit	v.e. a 150 gram TZV	64.373
Gemiddelde aanvoer Upflow GAK	m ³ /h	332
Ontwerpcapaciteit Upflow GAK	m ³ /h	525
Jaardebiet rwzi Hapert	m ³ /j	4.500.000
Jaardebiet via Upflow GAK filter	m ³ /j	2.909.808

7.3 SCHETSONTWERP

Op basis van de ontvangen budgetramingen is een schetsontwerp opgesteld van beide installaties.

CARBOPLUS

De belangrijkste kenmerken en capaciteiten van het Carboplus systeem voor de schaalgrootte rwzi Hapert zijn opgenomen in Tabel 18.

TABEL 18

KENMERKEN EN CAPACITEITEN CARBOPLUS SYSTEEM

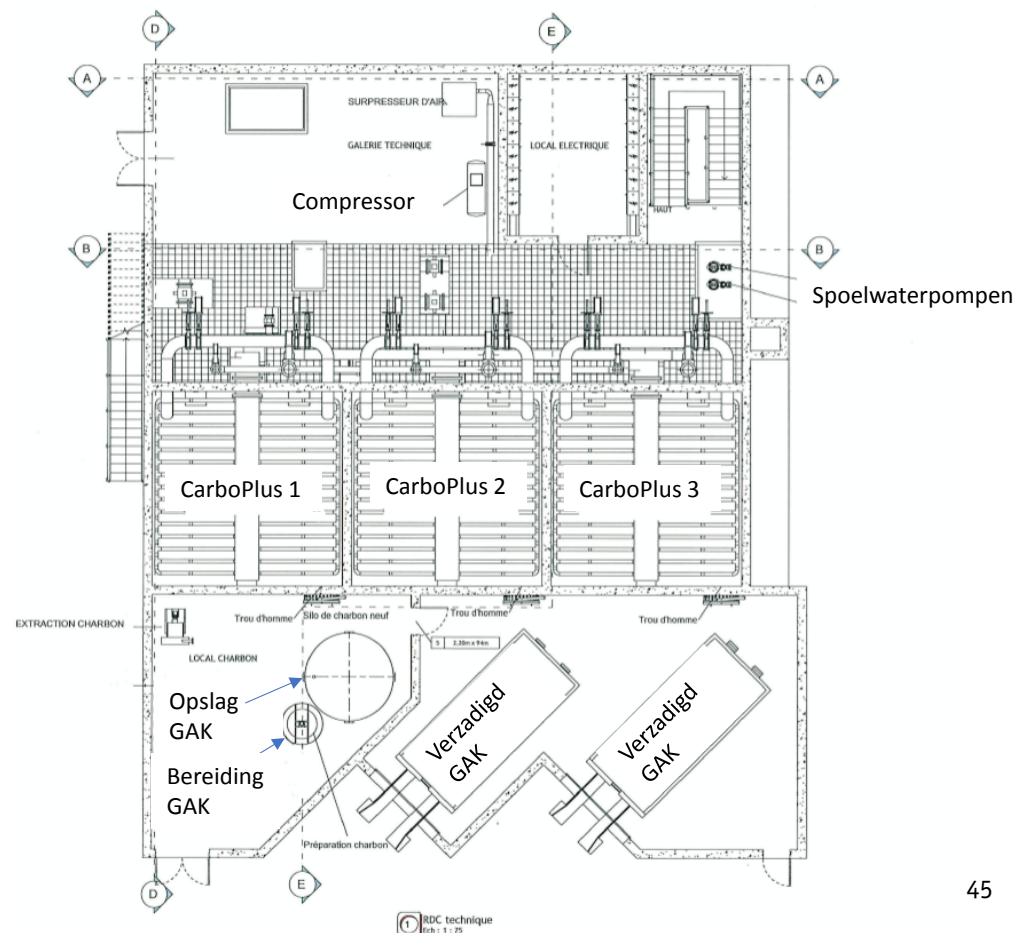
Parameter	Eenheid	Waarde
Hydraulische capaciteit	m ³ /h	525
CarboPlus tanks	Aantal	3
Oppervlak per tank	m ²	11,2
Totaal oppervlak	m ²	33,6
Hoogte GAK filterbed in rust	m	1,5
Dosering micro GAK	gram/m ³	30
Voedingstank (3+1 voedingspompen)	m ³	35
Waswatertank	m ³	85
Opslagsilo micro GAK	m ³	8
micro GAK aanmaak en doseervoorziening	Stuks	1
Drainage containers micro GAK spui	Aantal	2
Volume drainage container micro GAK spui	m ³ per stuk	15

In Figuur 22 en Figuur 23 zijn het boven aanzicht en zij aanzicht van de CarboPlus installatie voor de rwzi Hapert opgenomen waarbij de installaties en onderdelen zijn opgesteld in een gebouw. De lengte en breedte van het gebouw zijn niet opgegeven maar bedragen naar schatting 12 bij 18 meter. Het gebouw is 3 tot 4 meter hoog (exclusief bordessen en opslagsilo GAK). Ondergronds zijn kelders voorzien voor schoon water en spoelwater. Afhankelijk van de hydraulische capaciteit van de rwzi kan spoelwater ook direct naar de rwzi worden geleid en kan de spoelwaterkelder achterwege gelaten worden.

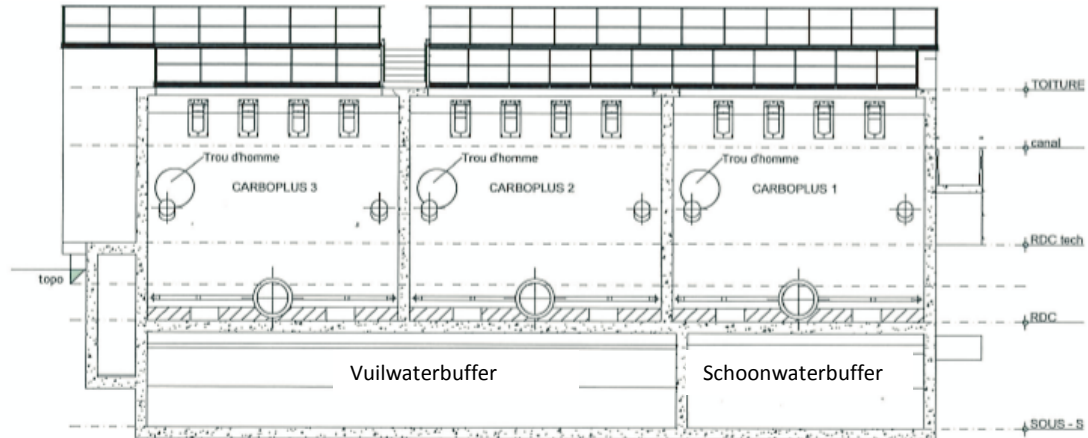
De installaties zoals ingetekend in onderstaand figuur hoeven niet allemaal in een gebouw geplaatst te worden. De opslag van GAK en de containers met verzadigd GAK kunnen ook buiten onder een overkapping geplaatst worden terwijl de compressor en schakelkasten in een container geplaatst worden.

FIGUUR 22

BOVEN AANZICHT CARBOPLUS RWZI HAPERT, BRON: STEREAU



FIGUUR 23 ZIJ AANZICHT CARBOPLUS GEBOUW, BRON: STEREAU



DYNACARBON

De belangrijkste kenmerken en capaciteiten van het Dynacarbon systeem zijn opgenomen in Tabel 19. Alle installaties en tanks zijn opgesteld op een betonnen plaat op maaiveld. De schakelkasten staan opgesteld in een technische ruimte van 4,2 bij 3,0 meter.

Uit de pilot testen op de rwzi Hapert volgt een hydraulische belasting van 5,3 m³/h bij een filterbeddiepte van 2,5 meter. Dit zou voor Hapert resulteren in 12 afzonderlijke filters waardoor het een complexe en dure installatie wordt. Om kosten en materialen te besparen zijn de internals van meerdere filters gezamenlijk in één tank geplaatst waardoor er geen afzonderlijke rvs-filters gerealiseerd hoeven te worden maar volstaan kan worden met een betonnen tank met aan de binnenkant afzonderlijke air lift pompen die op een afstand van circa 2,5 meter van elkaar geplaatst zijn. In het STOWA-pilotonderzoek Bio-GAK is voor een toevoer van 1.040 m³/h uitgegaan van drie ronde betonnen tanks met 7 airlift pompen per stuk, een gezamenlijk filterbedoppervlak van 165 m² en een bedhoogte van 3 meter. Uitgaande van de benodigde contacttijd van 31 minuten voor de rwzi Hapert volstaan twee ronde betonnen tank met een filteroppervlak van 55 m² per stuk, en 7 airlift pompen per filter. De kenmerken van deze filters zijn opgenomen in Tabel 19.

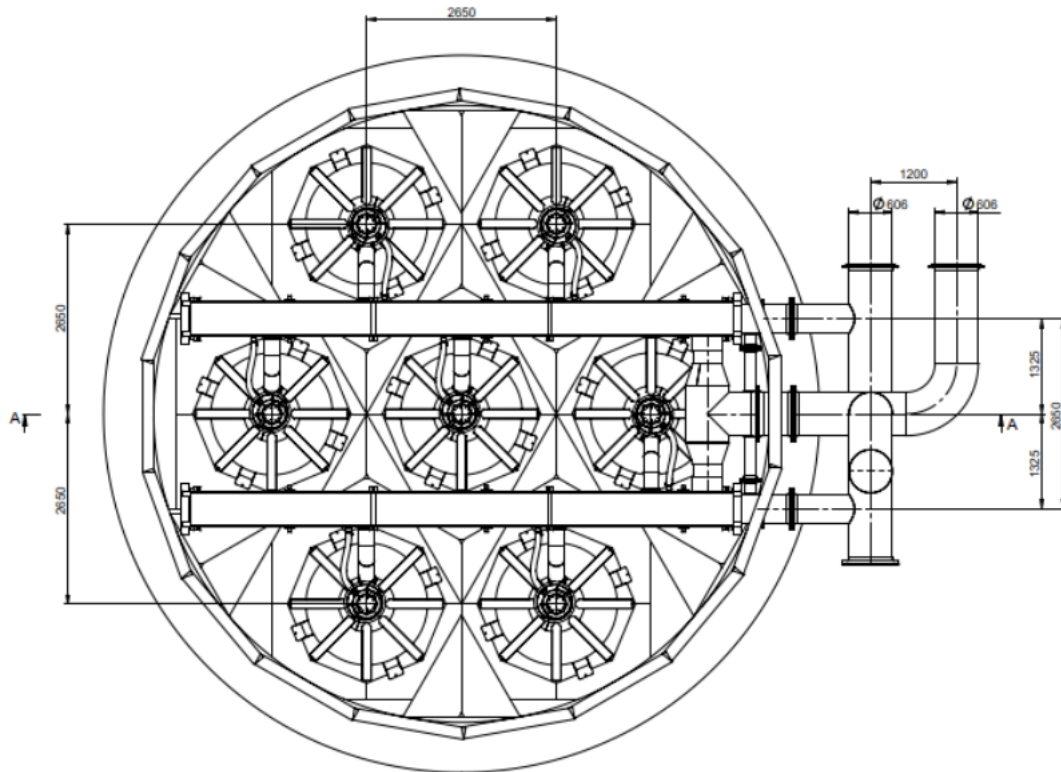
TABEL 19 KENMERKEN EN CAPACITEITEN DYNACARBON SYSTEEM

Aspect	Eenheid	Waarde
Hydraulische capaciteit	m ³ /h	525
Gemiddelde aanvoer	m ³ /h	332
Aantal filters	Stuks	2
Filteroppervlak per filter	m ²	55
Airlift pompen per filter	aantal	7
Bedhoogte filter	m	3
Contacttijd	minuten	31

In Figuur 24 is het boven aanzicht van het Dynacarbon systeem voor de rwzi Hapert opgenomen.

De diameter van de tank is 9 meter, exclusief de technische ruimte. Het Dynacarbon filter staat buiten opgesteld boven maaiveld terwijl de pompen, compressors en schakelkasten binnen in een gebouw opgesteld staan.

FIGUUR 24 BOVENAANZICHT DYNACARBON SYSTEEM MET 7 AIRLIFT POMPEN GECOMBINEERD IN ÉÉN TANK (BRON STOWA 2022-11)



7.4 INPASSING OP RWZI HAPERT

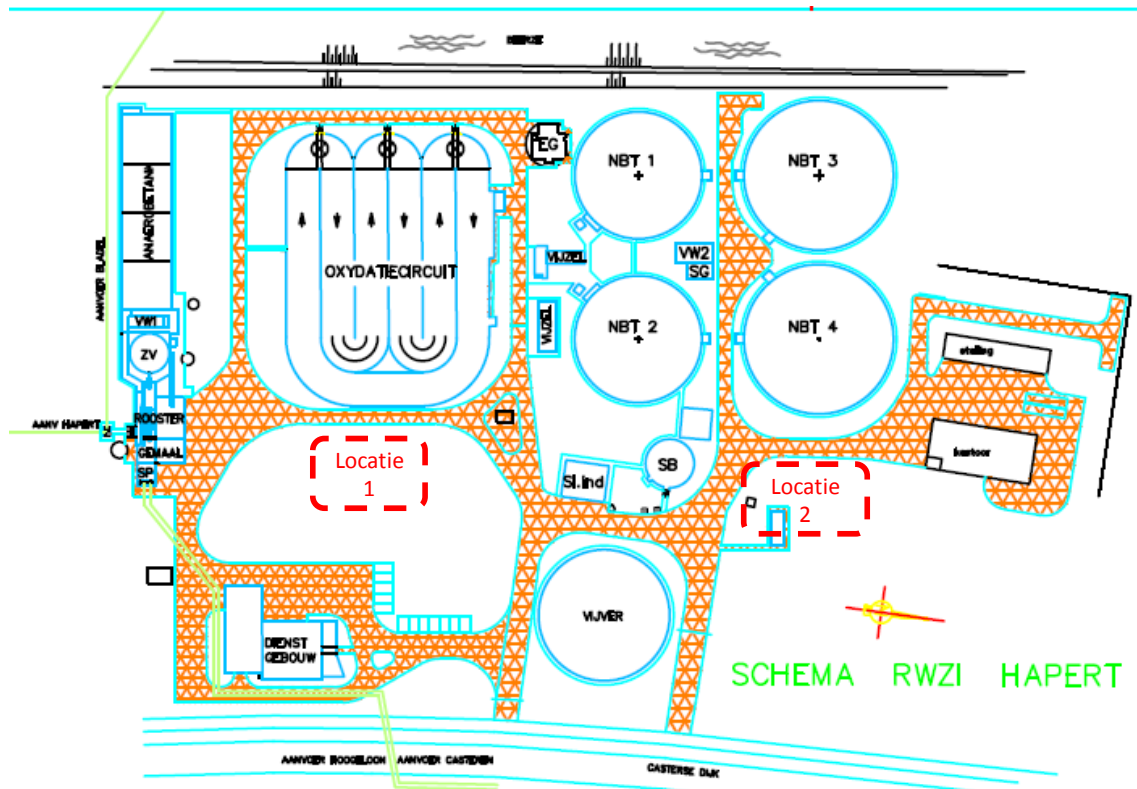
Op basis van de dimensies zoals vastgesteld in paragraaf 7.3 is in deze paragraaf een inschatting gemaakt van de inpassing van beide systemen. Uitgangspunten voor het inpassen van beide systemen op de rwzi Hapert:

- Carboplus: Oppervlak 12 bij 18 meter. Hoogte 3 tot 4 meter, exclusief GAK-silo en bordessen.
- Dynacarbon: 2 ronde tank met een diameter van 9 meter. Hoogte 6,8 meter. Exclusief een technische ruimte van 4,2 bij 3,0 meter.

In Figuur 25 is een schematische weergave opgenomen van de rwzi Hapert met twee potentiële locaties voor het nageschakelde GAK filter. Het GAK-filter is niet exact op schaal ingetekend maar beide locaties zijn voldoende groot:

- Locatie 1: Tussen de oxidatiesloot en het dienstgebouw lijkt voldoende ruimte beschikbaar voor een eventuele nabehandeling. Hier ligt momenteel een vijver. Deze locatie is in het figuur rood omkaderd en aangeduid als “Locatie 1”. Een aandachtspunt van deze locatie is de toevoer van het effluent van de nabezinktanks. De effluentleiding van de rwzi Hapert wordt nabij nabezinktank 4 gescheiden waarna het effluent verdeeld wordt over moerasbos noord en moerasbos zuid. Om al het effluent op locatie 1 te kunnen behandelen zal het leidingwerk aangepast moeten worden.
- Locatie 2: Een mogelijk betere locatie is “Locatie 2”. Deze locatie bevindt zich direct bij het verdeelwerk van het effluent waardoor op deze locatie al het effluent kan worden behandeld en er geen extra leidingwerk gerealiseerd hoeft te worden. In een vervolgfase dienen de mogelijkheden voor inpassing nader vastgesteld te worden.

FIGUUR 25 SCHEMATISCHE IMPRESSIE RWZI HAPERT MET POTENTIELE LOCATIES GAK FILTERS; GAK FILTERS NIET OP SCHAAL; BRON: WATERSCHAP DE DOMMEL



7.5 DOORVERTALING NAAR 100.000 I.E. REFERENTIE RWZI

Als referentie rwzi voor deze haalbaarheidsstudie geldt een rwzi met een capaciteit van 100.000 i.e. a 150 gram TZV. De uitgangspunten voor deze referentie rwzi zijn vastgesteld door de STOWA en zijn opgenomen in Tabel 20.

TABEL 20 UITGANGSPUNTEN 100.000 I.E. REFERENTIE RWZI

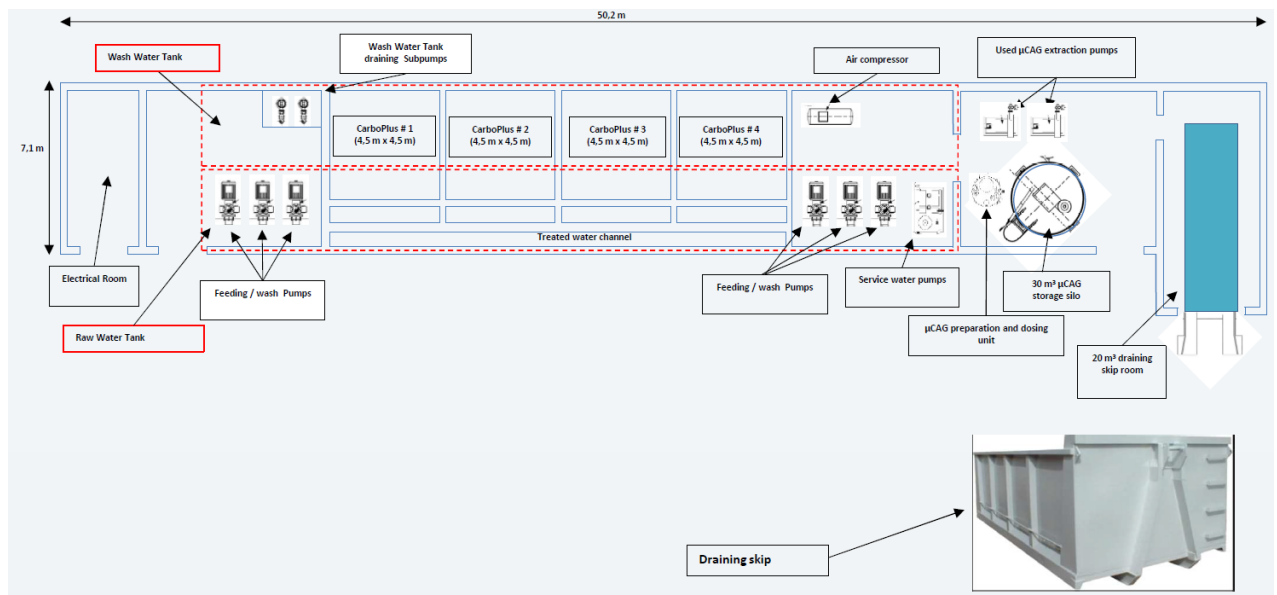
Aspect	Eenheid	Waarde
Capaciteit rwzi	i.e. 150 g TZV	100.000
Dagdebiet	m ³ /dag	21.000
Jaardebiet	m ³ /jaar	7.665.000
DWA-piek	m ³ /h	900
Ontwerp DWA-piek	m ³ /h	1.040
Hydraulische capaciteit aanvullende zuivering	m ³ /h	1.040
Zuivering in GAK filter	m ³ /jaar	6.132.000

De totale jaarlijkse aanvoer van de referentie rwzi is 7.665.000 m³ per jaar. Voor deze studie is ervan uitgegaan dat het nageschakelde GAK-filter 80% van het op de rwzi aangevoerde water verwerkt wat neerkomt op 6.132.000 m³ per jaar. De ontwerpcapaciteit van het nageschakelde GAK-filter bedraagt voor de referentie rwzi 1.040 m³/h.

In overleg met Stereau is voor de 100.000 i.e. referentie rwzi uitgegaan van 4 Carboplus filters met een totaal oppervlak van (4 x 20,3 m² =) 81 m².

In Figuur 26 is een schematische impressie opgenomen van het CarboPlus systeem. De afzonderlijke onderdelen zijn naast elkaar geplaatst wat in een totaal benodigd oppervlak van 370 m² resulteert.

FIGUUR 26 SCHEMATISCHE IMPRESSIE CARBOPLUS SYSTEEM 100.000 I.E. RWZI; BRON: STEREAU



Als uitgangspunt voor het Dynacarbon filter wordt uitgegaan van het ontwerp conform het STOWA Pilotonderzoek Bio-GAK met drie ronde betonnen tanks met 7 airlift pompen elk, een filterbeddiepte van 3 meter en een totaal filteroppervlak van 165 m². De lay-out van het Dynacarbon systeem is uitgewerkt in het STOWA-pilotonderzoek Bio-GAK.

8

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

8.1 CONCLUSIES

Uit het onderzoek kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Zowel de Carboplus, als ook de Dynacarbon pilot zijn geschikt om een nageschakeld verwijderingsrendement van >85% voor de gidsstoffen (beste 7 uit 11) te halen.
- Zowel de Carboplus, als ook de Dynacarbon installatie hebben de ecotoxicologische kwaliteit van het water met 50% kunnen verbeteren.
- Zowel de Carboplus, als ook de Dynacarbon installatie zijn in staat om geringe (>20%) hoeveelheden PFAS te verwijderen.
- Zowel de Carboplus, als ook de Dynacarbon zijn in de tijdens het pilotonderzoek gebruikte opzet in staat om ook de stoffen conform de Europese richtlijn stedelijk afvalwater met >85% te verwijderen.
- De Carboplus pilotinstallatie bereikt de verwijderingsrendementen op RWZI Hapert met een dosering die twee keer zo hoog is, als elders in Europa (30g/m³ t.o.v. 15 g/m³).
- Voor het behalen van de verwijderingsrendementen dient het filterbed van de Dynacarbon installatie na circa 15.000 bedvolumes vervangen te worden, wat relatief snel is.
- Voor de Dynacarbon pilotinstallatie was een voorbehandeling van het effluent van RWZI Hapert, met als doel verwijdering van de aanwezige algen, noodzakelijk. Bedrijven van de pilotinstallatie zonder enige voorbehandeling leverde regelmatig procesverstoringen op.
- Voor de Carboplus installatie konden met de gebruikte opzet van de pilot geen conclusies over spoelwatergebruik en het functioneren van de automatische kooldosering getrokken worden.

In Tabel 21 zijn beide Upflow-GAK concepten naast de referentie technieken gezet om inzicht te krijgen in de bijbehorende CO₂ footprint, de kosten in euro's per behandelde m³ afvalwater en het verwachte verwijderingsrendement van gidsstoffen.

TABEL 21 OVERZICHTSTABEL VAN DE DIVERSE TECHNIKEN MET CO₂ FOOTPRINT, KOSTEN EN VERWIJDERINGSRENDEMENT

Techniek	CO ₂ footprint (g CO ₂ /m ³)	Kosten €/m ³	Verwijderingsrendement gidsstoffen (%)
Carboplus GAK	96 - 173	0,15	80 - 85
Dynacarbon GAK	110 - 187	0,21	80 - 85
PACAS	122	0,05	70 - 75
Ozon+zandfiltratie	128	0,17	80 - 85
GAK	325	0,26	80 - 85

Uit Tabel 21 is het volgende op te maken:

- De CO₂ footprint van Carboplus en Dynacarbon is relatief hoog in vergelijking met PACAS en ozon+zandfiltratie
- In vergelijking met referentie GAK is de CO₂ footprint van beide Upflow-GAK-technieken laag.
- Het verwijderingsrendement op gidsstoffen is voor Upflow GAK gelijk aan dat van ozon+zandfiltratie en referentie GAK.

- De kosten van Upflow-GAK vallen hoger uit dan PACAS en zijn concurrerend met Ozon+zandfiltratie. Bovendien zijn de technieken aanzienlijk goedkoper dan de referentie GAK.

8.2 AANBEVELINGEN

- Met name de Dynacarbon pilotinstallatie bleek storingsgevoelig op algen, dit werd verholpen door het gebruik van een voorgeschakeld filter met een mesh-size van 50µm. Het filter met deze mesh-size werd ingezet omdat het beschikbaar was. Er wordt dus aangeraden verder onderzoek te doen naar de voorbehandelingsmethode en de minimaal benodigde mesh-size.
- Tijdens het pilotonderzoek is duidelijk geworden, dat de verblijftijd in het Dynacarbon filter een grote invloed heeft op het verwijderingsrendement. Aanbevolen wordt dit in een full-scale installatie nader te onderzoeken, dit kan immers leiden tot een langere standtijd van het actief kool.
- De Carboplus pilotinstallatie is handmatig gespoeld, hierdoor kon niet worden vastgesteld hoeveel spoelwater de installatie verbruikt en hoe vaak de installatie gespoeld dient te worden. Dit verdient aandacht in of een volgend onderzoek of de full-scale installatie.
- De samenstelling van het afvalwater van RWZI Hapert vereist voor het Carboplus concept een dosering van 30g/m³ micro-grains. Mogelijk dat op een andere rwzi een lagere GAK-dosering volstaat. Aanbevolen wordt om het Carboplus concept ook op andere rwzi's te testen om te beoordelen of daar een lagere GAK-dosering kan worden gehanteerd wat zal leiden tot een lagere CO₂ footprint en lagere kosten.
- Het Carboplus concept is qua kosten concurrerend met ozon+zandfiltratie waardoor aanbevolen wordt om deze techniek in overweging te nemen voor toekomstig te realiseren nabehandelinginstallaties.
- Voor RWZI Hapert zijn er duidelijk seizoensinvloeden zichtbaar in het verwijderingspercentage voor medicijnresten in de biologie. De dosering voor de Carboplus kan hierop worden aangepast. Dit kan mogelijk een besparing geven.

9

BIBLIOGRAFIE

Chemviron (Kuraray company). (2021). *Removal of persistent pollutants*. Feluy, Belgium: Chemviron .

Stereau. (2020). *Carboplus micrograin activated carbon pilot plan unit (descriptive memo)*. Stereau. Maurepas: Stereau.

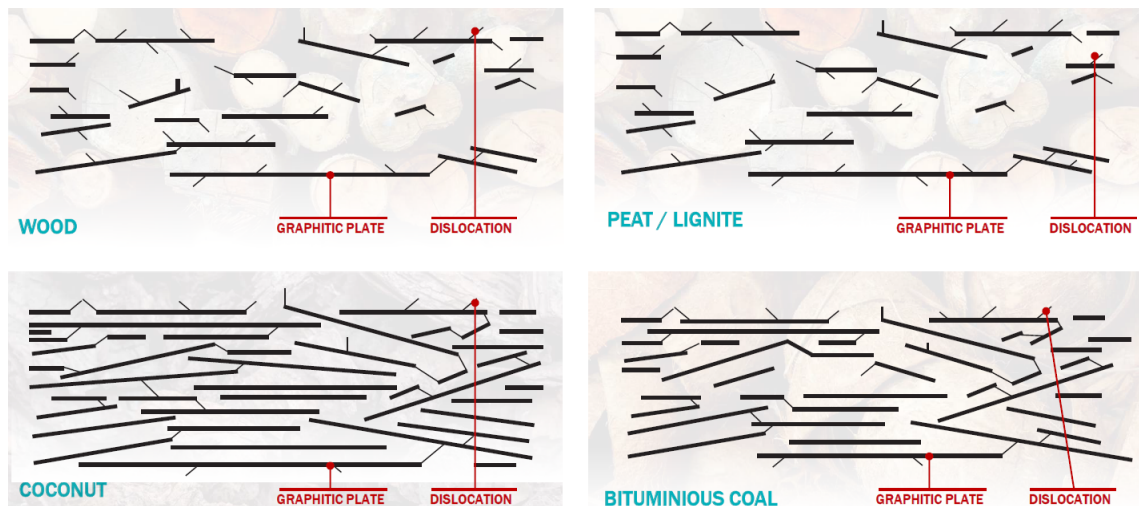
BIJLAGE I

NADERE BESCHRIJVING OPBOUW/WERKING VAN ACTIEF KOOL

Actief kool bestaat uit plaatjes van grafiet die als laagjes op elkaar zitten met daartussen in ruimtes, in deze ruimtes vindt adsorptie plaats. Dit gebeurt door middel van Vanderwaalskrachten, hier komt dan ook de naam actief kool vandaan.

De ruimtes tussen deze grafiet plaatjes verschillen per ruw materiaal wat als basis wordt gebruikt. Zo heeft ieder ruw materiaal haar eigen karakteristieke eigenschappen, een weergave hiervan is te zien in Afbeelding 12. Deze karakteristieke eigenschappen zijn ook van invloed op het verwijderingsrendement per stof.

AFBEELDING 12 VERSCHIL IN EIGENSCHAPPEN VAN RUW MATERIAAL ACTIEF KOOL (CHEMVIRON, KURARAY COMPANY, 2021)



BIJLAGE II

BESCHRIJVING SPOELCYCLUS CARBOPLUS

Het spoelen van het fluidized bed van Carboplus gebeurt in de volgende 6 stappen:

1. Stop toevoerpomp
2. Waterniveau 20 cm laten zakken
3. Schoonborstelen kolom
4. Waterniveau nogmaals 30 cm laten zakken
5. 2 minuten luchtspoeling met een snelheid van $30\text{m}^3/\text{h.m}^2$
6. Waterspoeling met een snelheid van $30\text{m}/\text{h}$ tot maximale hoogte kolom, bij bereik maximale hoogte het vervuilde water aflaten.

De laatste stap wordt tweemaal uitgevoerd alvorens alles weer in bedrijf wordt genomen.

BIJLAGE III

SPECIFICATIES VAN DE IN DE PILOT GEBRUIKTE SOORTEN ACTIEF KOOL

In onderstaande Tabel 22 is het verschil in specificaties voor beide soorten kool te zien. Met daarin de rechterkolom de cyclecarb 305 die in de Carboplus pilot is gebruikt en de linker kolom bevat de specificaties van het actief kool, cyclecarb 401, dat in de Dynacarbon pilot is gebruikt.

TABEL 22: DE SPECIFICATIES VAN HET GEBRUIKTE ACTIEF KOOL (RECHTER KOLOM CYCLECARB 305, LINKER KOLOM CYCLECARB 401), CHEMVIRON, KURARAY COMPANY 2021

CARBSORB® SPECIFICATIONS	30	40	CARBSORB® TYPICAL PROPERTIES	30	40
Iodine Number, min., mg/g	900	950	Methylene blue number	230	260
Hardness Number, min.	90	90	Total Surface Area, (N ₂ BET method/g)	900	950
Moisture Content, as packed, max., wt%	2	2	Backwashed and Drained Bed Density, kg/m ³	450	450
Mesh Size, US Sieve Series, wt%	8x30	12x40	Effective size, mm	0.9	0.6
> 8 mesh (2.36 mm), max.	11	-	Uniformity coefficient	1.8	1.8
> 12 mesh (1.70 mm), max.	-	5	Mean Particle Diameter, mm	1.6	1.0
< 30 mesh (0.60 mm), max.	4	-	Dechlorination Half Length, cm	4	2
< 40 mesh (0.425 mm), max.	-	4			

BIJLAGE IV

HYDRAULISCHE VERBLIJFTIJD

Voor het bepalen van de optimale bemonsteringsmethode voor de monsters van influent rwzi tot de effluent pilot is de hydraulische verblijftijd van rwzi Hapert bepaald.

RWZI Hapert is ontworpen voor een DWA van 8.500m³/dag, de aeratie tanks en nabezink-tanks hebben samen een inhoud van 21.299m³, hieruit volgt een verblijftijd voor rwzi Hapert van 2,5 dagen, dus 60uur (zie Tabel 23).

TABEL 23 IN ONDERSTAANDE TABEL IS DE BEREKENING VAN DE HYDRAULISCHE VERBLIJFTIJD VAN RWZI HAPERT OPGENOMEN.

	DWA-debiet	Inhoud VBT's	Inhoud Biologie	Aantal NBT (klein)	Inhoud NBT's	Aantal NBT (groot)	Inhoud NBT's	Inhoud totaal	Verblijftijd	
Rwzi	[m ³ /dag]	[m ³]	[m ³]	[-]	[m ³]	[-]	[m ³]	[m ³]	[dag]	[uren]
Hapert	8.500	0	13.500	2	2.710	2	5.089	21.299	2,5	60

BIJLAGE V

BESCHRIJVING BEPALING UITSPOELING ACTIEFKOOL

MATERIAAL

De benodigde materialen om deze bepaling uit te voeren zijn hieronder beschreven:

- Buchner trechter voor 110 mm filters, met vacuümpomp
- Filterpapier 0,2 um en 110 mm diameter 3 stuk
- Balans, met een nauwkeurigheid van 0,0001 gram
- 3 bekeerglazen van 1 liter
- 17 liter effluent van de RWZI waar de test plaatsvindt
- 12 mg stof van poederkool Cyclecarb 305
- Magneetroerder
- Opstelling om filterpapier te fotograferen terwijl deze nog in de Buchnertrechter zit

Het poederkool¹⁶ is aangeleverd door leverancier Chemviron en wordt zowel gebruik bij de Carboplus pilot als bij de Dynacarbon pilot. Hierbij is bij deze test gekozen voor poederstof van de Cyclecarb 305 omdat dit als eerste zou uitspoelen. De ijkreeks is gemaakt met een concentratie van 0,25 mg/L, 0,5 mg/L en 0,75mg/L poederstof. In de proef die RHDHV heeft opgesteld voor de Nereda® Simpelveld, waar 5 mg/L de laagste poederkooldosering is die wordt getest, is uitgegaan van een ijkreeks waarbij een poederkoolverlies van 5% nog kan worden bepaald. De concentratie van 0,75 mg/L is teruggerekend 15 mg/L, dit is het minimale gehalte aan poederkool wat wordt gedoseerd op de Carboplus installatie. Er is dan ook voor gekozen om dit filtreren met 1000 milliliter effluent doordat eerdere ijkreeksen met kleinere hoeveelheden effluent geen zichtbaar verschil opleverde. De resultaten van de ijkreeks zijn beschreven in bijlage V.

METHODE

Methode voor ijkreeks:

1. 12 mg poederkool afgewogen in bekeerglas 1
2. 2 liter effluent toevoegen,
3. Om goed in suspensie te komen deze 40 uur laten roeren met magneetroerder.
4. 1 liter monster verwijderen
5. 1 liter effluent toevoegen om verdunningsreeks verder door te voeren
6. Met de magneetroerder 10 minuten laten mengen
7. De stappen 4,5 en 6 herhalen tot monster 16x is verdund.
8. 1 liter monster aftappen met een concentratie van 0,75 mg/L kool, dit is monster 1
9. Van de overige 1 liter monster een 0,5 liter verwijderen
10. 0,5 liter effluent toevoegen.
11. 1 liter monster aftappen met een concentratie van 0,5 mg/L kool, dit is monster 2
12. Herhaal stap 8 en 9 eenmaal
13. 1 liter monster aftappen met een concentratie van 0,25 mg/L kool, dit is monster 3

¹⁶ Het betreft hier een fijne fractie van hun granulaire kool.

14. Plaats een filterpapier in de Buchnertrechter en maak deze nat met demiwater
15. Filtreer 250 ml van het monster
16. Maak een foto
17. Herhaal stap 14 en 15 tot er 1 liter monster is gefiltreerd
18. Verwijder het filterpapier
19. Herhaal stappen 13 tot en met 16 voor de overige twee monsters.

Methode voor actief kool bepaling in effluent

1. Neem 1 liter debiet proportioneel verzameld effluent
2. Deze met magneetroerder 10 minuten laten mengen
3. Neem hetzelfde filterpapier als gebruikt is bij de ijkreeks
4. Filterpapier plaatsen in Buchnertrechter en deze nat maken met demiwater
5. 500 ml monster filtreren
6. Maak een foto
7. De overige 500 ml filtreren
8. Maak een foto

UITLEZING

Vergelijk de zojuist gefotografeerde filterpapiertjes met de gefotografeerde papiertjes van de ijkreeks en lees af hoeveel poederkool er in de sample zat.

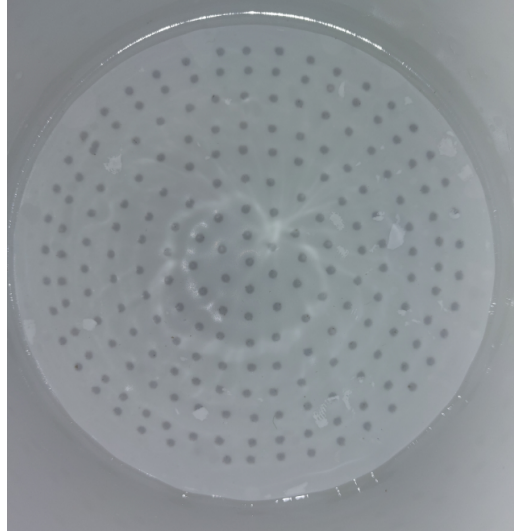
BIJLAGE VI

RESULTATEN IJKREEKS UITSPOELING KOOLBEPALING

RESULTATEN IJKREEKS 0,25 MG/L ACTIEF KOOL



FIGUUR 1A 0,25 MG/L KOOL 250ML



FIGUUR 1B 0,25 MG/L KOOL 500ML



FIGUUR 1C 0,25 MG/L KOOL 750 ML



FIGUUR 1D 0,25 MG/L KOOL 1000ML

RESULTATEN IJKREEKS 0,5 MG/L ACTIEF KOOL



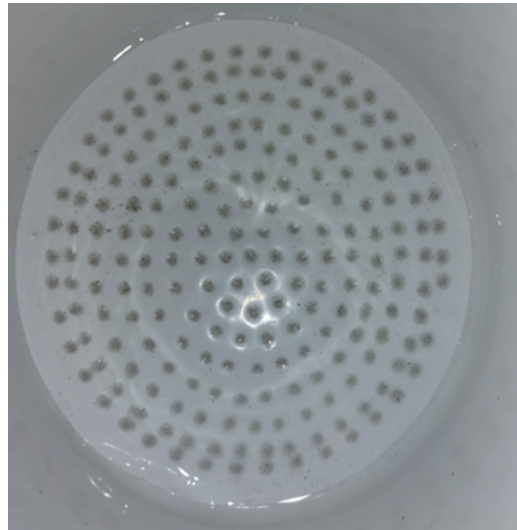
FIGUUR 2A 0,50 MG/L KOOL 250ML



FIGUUR 2B 0,50 MG/L KOOL 500ML



FIGUUR 2C 0,50 MG/L KOOL 750 ML



FIGUUR 2D 0,50 MG/L KOOL 1000ML

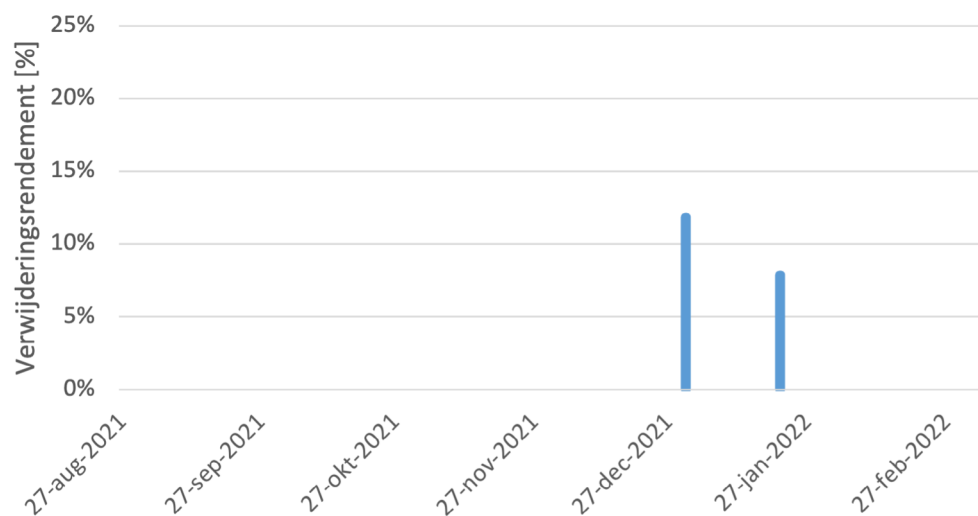
BIJLAGE VII

VERWIJDERING MACROPARAMETERS

RESULTATEN CARBOPLUS

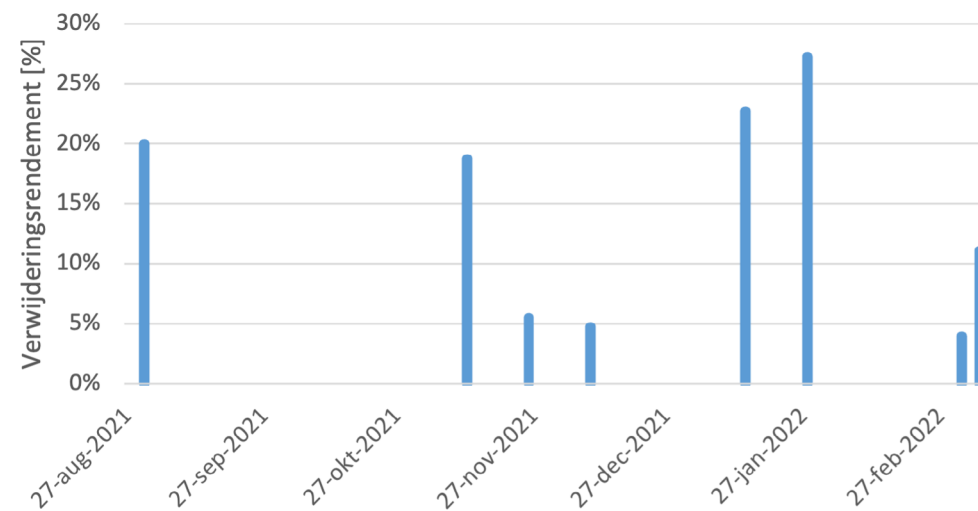
Naast de eerder besproken verwijderingsrendementen van DOC, ammonium en N-totaal zijn ook de verwijderingsrendementen van de onopgeloste bestanddelen en het fosfaat bepaald. Voor onopgeloste bestanddelen is er maar tijdens enkele monsters een verwijderingsrendement vastgesteld, dit is te zien in Figuur 27.

FIGUUR 27 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE NAGESCHAKELDE CARBOPLUS PILOTINSTALLATIE VOOR ONOPGELOSTE BESTANDELEN



Ook voor fosfaat is maar tijdens enkele monsters een positief verwijderingsrendement gemeten, dit is te zien in Figuur 28.

FIGUUR 28 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE NAGESCHAKELDE CARBOPLUS PILOTINSTALLATIE VOOR FOSFAAT

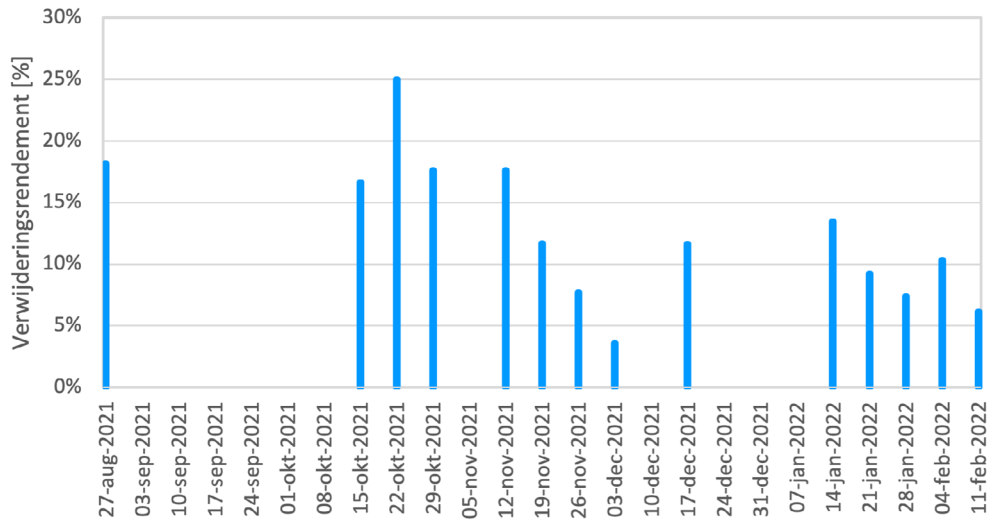


RESULTATEN DYNACARBON

Ook voor de nageschakelde Dynacarbon pilotinstallatie zijn de verwijderingsrendementen voor N-totaal en fosfaat bepaald.

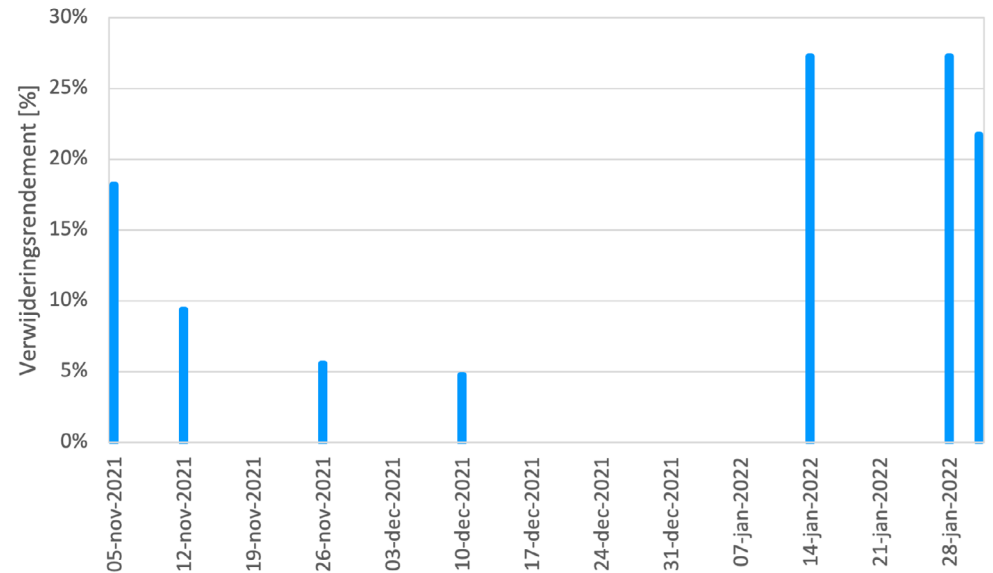
Het gemiddelde verwijderingsrendement voor N-totaal is 10% en is in Figuur 29 weergegeven.

FIGUUR 29 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE NAGESCHAKELDE DYNACARBON PILOTINSTALLATIE VOOR N-TOTAAL



Voor fosfaat is maar tijdens enkele monsters een positief verwijderingsrendement gemeten, dit is weergegeven in Figuur 30.

FIGUUR 30 VERWIJDERINGSRENDEMENT VAN DE NAGESCHAKELDE DYNACARBON PILOTINSTALLATIE VOOR FOSFAAT



BIJLAGE VIII A

RESULTATEN PFAS-ONDERZOEK STOWA

Onderzoek naar verwijdering van PFAS en PFAS-precursors in nageschakelde technieken voor vergaande verwijdering van organische micro's uit rwzi-afvalwater: Pilot Hapert (upflow GAK)

Anja Derksen 4 april 2023

In diverse pilots en demonstratieprojecten wordt de effectiviteit van nageschakelde technieken voor de vergaande verwijdering van organische micro's uit rwzi-afvalwater onderzocht. Dit onderzoek loopt parallel aan het onderzoek naar antibioticaresistente bacteriën en resistentiegenen. In een overall rapportage zullen de resultaten van alle onderzochte technieken en locaties gebundeld worden en in samenhang geduid. Momenteel zijn nog niet alle resultaten bekend en wordt hier alleen kort aangegeven wat er is onderzocht en wat de resultaten van de twee monstermomenten van de pilot Hapert zijn.

Opzet onderzoek en uitgevoerde analyses

Uit eerdere onderzoek naar PFAS bij rwzi's (STOWA-rapport 2021-46) is naar voren gekomen dat PFAS niet of nauwelijks worden verwijderd op de reguliere zuivering. In veel gevallen is er zelfs sprake van een ogenschijnlijke toename PFAS in rwzi's. Niet geanalyseerde (onbekende) precursors in het influent worden in de rwzi omgezet naar wel geanalyseerde (bekende) precursors en stabiele PFAS met een korte ketenlengte (C4 – C8). Voor een toelichting op wat PFAS en PFAS-precursors zijn en hun belang in de rwzi wordt verwezen naar STOWA-rapport 2019-46 en 2019-47. In het huidige onderzoek wordt gekeken naar de effectiviteit van aanvullende zuiveringstechnieken bij het verwijderen van PFAS én PFAS-precursors uit rwzi-effluent. Er zijn bij rwzi Hapert ten behoeve van PFAS-analyses op twee momenten (18-01-22 en 25-01-22) monsters genomen op 2 verschillende monsterpunten:

- Influent van de upflow GAK-pilotinstallatie (= effluent van de reguliere zuivering)
- Effluent van de upflow GAK-pilotinstallatie

Er worden drie verschillende analysetechnieken ingezet:

- Het standaard PFAS-analysepakket: 30 verschillende stoffen (stabiele PFAS zoals de bekende stoffen PFOS en PFOA, enkele vervangers daarvan en enkele precursors)
- Analyse van enkele eerder nog nauwelijks onderzochte PFAS met een zeer korte koolstofketen (<C4)
- De TOP-analyse of Totaal Oxideerbare Precursor analyse: een screeningsmethode om een inschatting van de totaal aanwezige precursors (zonder dat bekend is welke stoffen het precies zijn)

Op dit moment zijn alleen resultaten van de standaard analyses bekend.

Resultaten Pilot Hapert (upflow GAK)

De aangetroffen concentraties zijn in Tabel 24 en Figuur 31 weergegeven. Opvallend is dat de concentraties in het influent van de pilot op de tweede monsterdatum ongeveer een factor 2 hoger zijn dan op de eerste monsterdatum en de precursor 6:2 FTS zelfs bijna 15 keer

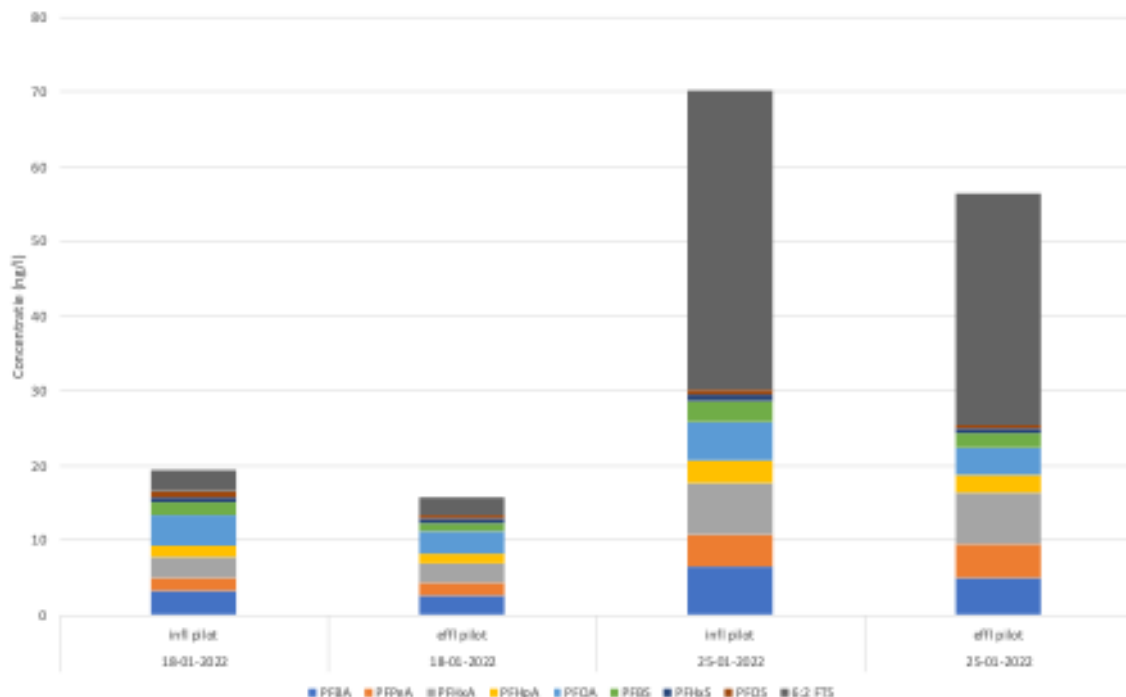
hoger. De upflow-GAK-behandeling leidt tot afname van het totaal PFAS-gehalte (circa 20%). Wanneer naar de concentraties van individuele stoffen wordt gekeken blijkt dat vrijwel alle aangetroffen stoffen behalve PFPeA en PFHxA in enige mate worden verwijderd.

De verwachting is dat actief kool vooral effectief is voor PFAS met langere ketens en dat kortere ketens slecht worden verwijderd. In dit onderzoek worden vrijwel alle aangetroffen PFAS behalve PFPeA (C5) en PFHxA (C6) in enige mate verwijderd. Vooral voor PFBA (C4) en PFBS (C4) is dit opvallend en niet conform verwachting. Of actief kool geschikt is voor het verwijderen van precursors is nog onduidelijk. De precursor 6:2 FTS wordt in ieder geval ieder geval voor circa 20% verwijderd. De overige precursors uit het standaard analysepakket worden niet aangetroffen.

TABEL 24 AANGETROFFEN PFAS CONCENTRATIES IN NG/L. GEARCEERDE CONCENTRATIES ZIJN TUSSEN DE DETECTIELIMIET EN DE RAPPORTAGEGREN EN MOGEN ALLEEN INDICATIEF GEBRUIKT WORDEN. DEZE STOFFEN ZIJN WEL AANGETROFFEN MAAR KUNNEN NIET BETROUWBAAR GEKWANTIFICEERD WORDEN

Rwzi	Hapert	Hapert	Hapert	Hapert
Techniek	upflow GAK	upflow GAK	upflow GAK	upflow GAK
Datum	18-01-2022	18-01-2022	25-01-2022	25-01-2022
Matrix	infl pilot	effl pilot	infl pilot	effl pilot
PFBA	3,2	2,6	6,4	4,9
PFPeA	1,7	1,7	4,4	4,7
PFHxA	2,9	2,6	6,8	6,7
PFHpA	1,5	1,3	3,0	2,4
PFOA	4,1	3,0	5,2	3,6
PFBS	1,7	1,2	2,8	2,1
PFHxS	0,62	0,45	0,88	0,57
PFOS	0,88	0,58	0,72	0,46
6:2 FTS	2,8	2,3	40	31

FIGUUR 31 AANGETROFFEN PFAS IN NG/L



BIJLAGE VIII A

RESULTATEN TKI-PROJECT 'EEN INTEGRALE AANPAK VOOR OPSPORING VAN ONGEWENSTE PERFLUORSTOFFEN IN DE WATERKETEN'

In het kader van het pilot onderzoek 'Upflow GAK voor de verwijdering van medicijnresten' zijn ook metingen gedaan naar PFAS (PFOA en PFOS) om te zien of dit door Granulair Actief Kool (GAK) verwijderd wordt. Deze resultaten zijn opgenomen in het hoofdrapport. Daarnaast zijn er PFAS-metingen uitgevoerd in het kader van het STOWA-onderzoek PFAS (robuuste bemonstering). Deze volgen nog. Deze bijlage betreft de resultaten van metingen op Hapert (17/3/2022 9:00 – 18/3/2022 9:00) in het kader van het TKI-project "Een integrale aanpak voor opsporing van ongewenste perfluorstoffen in de waterketen". In dit kader heeft een uitgebreide bemonstering plaatsgevonden waarbij ook onderzoek is gedaan aan precursors. Op Hapert zijn eerder ook monsters voor het grotere STOWA-onderzoek naar PFAS genomen. Deze resultaten en worden hier niet verder behandeld maar komen grotendeels overeen.

Eerst volgt wat nadere uitleg over de gemeten stoffen. Daarna de resultaten en vervolgens de duiding van deze resultaten.

ALGEMEEN¹⁷:

- Perfluorohexaanzuur (PFHxA) 6 koolstofatomen
- Perfluorheptaanzuur (PFHpA) 7 koolstofatomen
- Perfluoroctaanzuur (PFOA) 8 koolstofatomen
- Perfluornonaanzuur (PFNA) 9 koolstofatomen
- Perfluordecaanzuur (PFDA) 10 koolstofatomen
- Perfluorundecaanzuur (PFUnDA) 11 koolstofatomen
- Perfluordodecaanzuur (PFDoDA) 12 koolstofatomen
- Perfluortridecaanzuur (PFTrDA) 13 koolstofatomen
- Perfluortetradecaanzuur (PFTeDA) 14 koolstofatomen
- Perfluorbutaansulfonzuur (PFBS) 4 koolstofatomen
- Perfluorhexaansulfonzuur (PFHxS) 6 koolstofatomen
- Perfluorheptaansulfonzuur (PFHpS) 7 koolstofatomen
- Perfluoroctaansulfonzuur (PFOS) 8 koolstofatomen
- Perfluordecaansulfonzuur (PFDS) 10 koolstofatomen
- Hexafluorpropyleenoxide-dimerzuur (HFPO-DA = GenX)
- Natrium 4,8-dioxa-3H-perfluornonaanzuur (NaDONA)
- 1H,1H,2H,2H-Perfluorhexaansulfonzuur (4:2 FTS) 6 koolstofatomen
- 1H,1H,2H,2H-Perfluoroctaansulfonzuur (6:2 FTS) 8 koolstofatomen
- 1H,1H,2H,2H-Perfluordecaansulfonzuur (8:2 FTS) 10 koolstofatomen
- 1H,1H,2H,2H-Perfluordodecaansulfonzuur (10:2 FTS) 12 koolstofatomen

¹⁷ Bron: Poly- en PerFluor Alkyl Stoffen (PFAS), Kennisdocument over stoffeigenschappen, gebruik toxicologie, onderzoek en sanering van PFAS in grond en grondwater, Expertisecentrum PFAS (2018) DDT219-1/18-009.764

Precursors zijn verbindingen die het potentieel hebben om PFCA's of PFSA's te vormen en kunnen worden bepaald door:

- Totaal bepalingen organisch gebonden fluor (AOF¹⁸, PIGE¹⁹ of TOF)
- TOP²⁰-analyse, waarbij vrijwel alle precursors worden afgebroken tot wel analyseerbare PFCA's

RESULTATEN

ANALYSE VAN DE LEGACY PFAS EN ENKELE PRECURSOREN (NG/L)

Monster	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFOS	6:2FTS	8:2FTS	10:2FTS
Influent	1,55	0,5	1,3	0,2	0,3	n.t.b.*	1	1,9	0,5
Effluent	2,8	1	3,2	0,3	0,2	0,8	2,3	0,3	<0,1
Na GAK	3	1	2,8	0,4	0,2	1	2,4	0,2	<0,1

* Net te bepalen i.v.m. verhoogde achtergrond.

Monster	PFUnDA	PFDoDA	PFTTrDA	PFTeDA	PFBS	PFHxS	PFHpS	PFDS	GenX	naDONA	4:2FTS
Influent	<0,6	<0,2	<0,1	<0,1	n.t.b.	n.t.b.	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Effluent	<0,6	<0,2	<0,1	<0,1	n.t.b.	0,6	0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Na GAK	<0,6	<0,2	<0,1	<0,1	n.t.b.	0,7	0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

ANALYSE NA ACTIEVE OXIDATIE (TOPA) (NG/L)

Monster	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUnDA	PFDoDA	PFTTrDA	PFTeDA
Influent	5,2	3,1	3,5	1,1	0,7	<0,3	0,2	<0,1	<0,2
Effluent	5,9	2	2,8	0,5	0,2	<0,3	<0,2	<0,1	<0,2
Na GAK	6,5	1,8	2,1	0,2	0,2	<0,3	<0,2	<0,1	<0,2

ANALYSE VAN DE LEGACY PFAS EN ENKELE PRECURSOREN (PMOL/L)

Monster	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	6:2FTS	8:2FTS
Influent	4,9	1,4	3,1	0,4	0,6	2,2	3,5
Effluent	8,9	2,7	7,7	0,6	0,4	5,1	0,5
Na GAK	9,6	2,7	6,8	0,9	0,4	5,3	0,4

ANALYSE NA ACTIEVE OXIDATIE (TOPA) (PMOL/L)

Monster	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	Som
Influent	16,6	8,5	8,5	2,4	1,4	37,4
Effluent	18,8	5,5	6,8	1,1	0,4	32,6
Na GAK	20,7	4,9	5,1	0,4	0,4	31,5

DE VERSCHILBEREKENING TUSSEN REGULIER EN MET OXIDATIE IN PMOL/L IS DAN

Monster	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	Som
Influent	11,6	7,1	5,3	1,9	0,8	26,7
Effluent	9,9	2,7	-0,9	0,5	0	13,1
Na GAK	11,1	2,2	-1,7	-0,5	0	13,3

De hierboven gepresenteerde resultaten zijn in enkelvoud uitgevoerd en de TOPA is niet onder accreditatie. De TOPA is wel geverifieerd in een vergelijkend onderzoek tussen KWR en WFSR.

18 Adsorbable organofluorine

19 Particle-induced gamma emission

20 Total oxidizable precursors (TOPA)

Naast deze analyses zijn ook nog 2 eerdere analyses uitgevoerd op dezelfde locatie door een andere partij. Hieronder de resultaten in vergelijking met eerdere metingen (ng/l). Ze komen qua orde grote overeen met het monster van 26/11/2021 dat door Aquon is geanalyseerd.

Monster	PFOA	PFOA	PFOA	PFOS	PFOS	PFOS
Datum (meting)	17/2/2021 Aquon	26/11/2021 Aquon	TKI	17/2/2021 Aquon	26/11/2021 Aquon	TKI
Influent			1,3			n.t.b.
Effluent	50	6,7	3,2	240	17	0,8
Na GAK	30	4,7	2,8	160	6,6	1

Duiding van de resultaten

- De meeste van de gevonden concentraties binnen het TKI-project zijn relatief laag. Hierdoor moeten de hieronder genoemde bevindingen met voorzichtigheid geïnterpreteerd worden. Concentraties zijn weergegeven in pmol/L i.p.v. ng/L, zodat somberekeningen beoordeeld kunnen worden.
- Tijdens de actieve oxidatie neemt de concentratie PFHxA, PFHpA en in het influent ook PFOA en PFNA toe. De concentratie gevormde PFHxA en PFHpA tijdens de actieve oxidatie wordt maar deels verklaard door de aanwezigheid van 6:2-FTS of 8:2-FTS in de monsters. De toename in PFHxA is tussen 9.9 en 11.6 pmol/L, voor PFHpA is dat 2.2 tot 7.1 pmol/L. Opgeteld is dat een toename van 12.6 tot 18.8 pmol/L. 6:2-FTS en 8:2-FTS kunnen maximaal 5,7 pmol/L verklaren, dat is 30 tot 45%. Hieruit concluderen we dat er in de drie monsters nog andere precursoren aanwezig zijn die ketenlengtes bevatten van waarschijnlijk C6 tot (in het influent) C9.
- Bij vergelijking van het influent en het water na GAK, zien we een voorzichtige toename (in enkele gevallen een verdubbeling) van PFHxA, PFHpA en PFOA. Mogelijk wordt dit verschil veroorzaakt door een verschil in de monsternametijd en dus de verblijftijd in het systeem. Een tweede mogelijke verklaring is dat de biologische zuivering leidt tot omzetting van bekende en onbekende precursoren (vergelijkbaar aan de actieve oxidatie) naar deze legacy PFAS. Dit verklaart echter niet dat de hoogste toename van de concentratie legacy PFAS ten gevolge van de actieve oxidatie in het influent gevonden wordt (26,7 pmol/L ten opzichte van 13,3 en 13,1 pmol in water na GAK en het effluent). Kortom, het influent lijkt de meeste (onbekende) precursoren te bevatten. Met name de precursoren met lange ketenlengte (die na oxidatie leiden tot PFHpA, PFOA en PFNA) lijken verwijderd te worden in de zuivering.
- Wat betreft de vraag of GAK PFAS actief kan verwijderen leveren deze resultaten geen bewijs voor een significante verbetering.

Deze activiteit is medegefinancierd uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken.

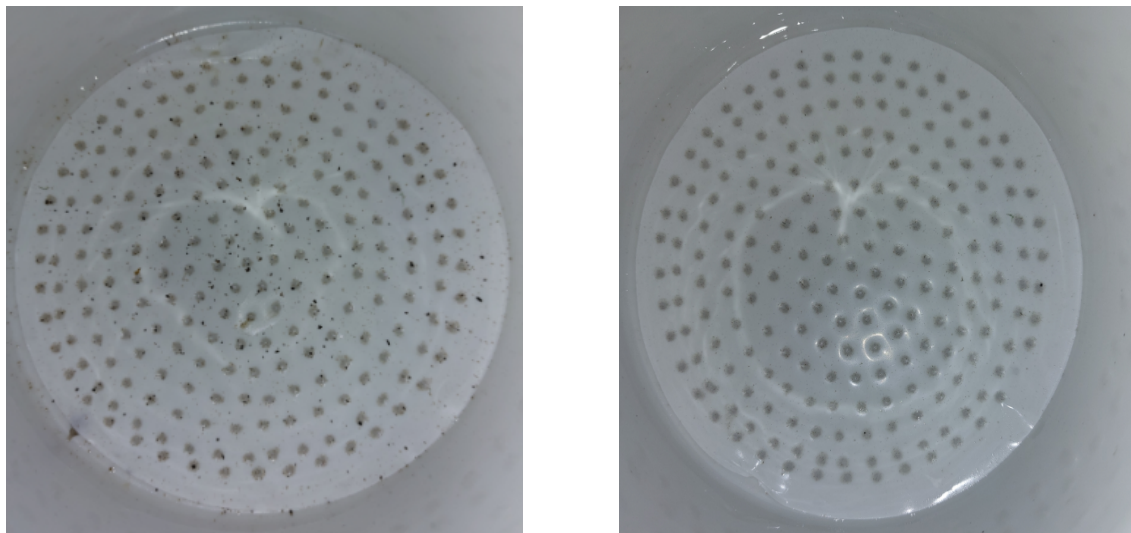
BIJLAGE IX

RESULTATEN KOOLUITSPOELING

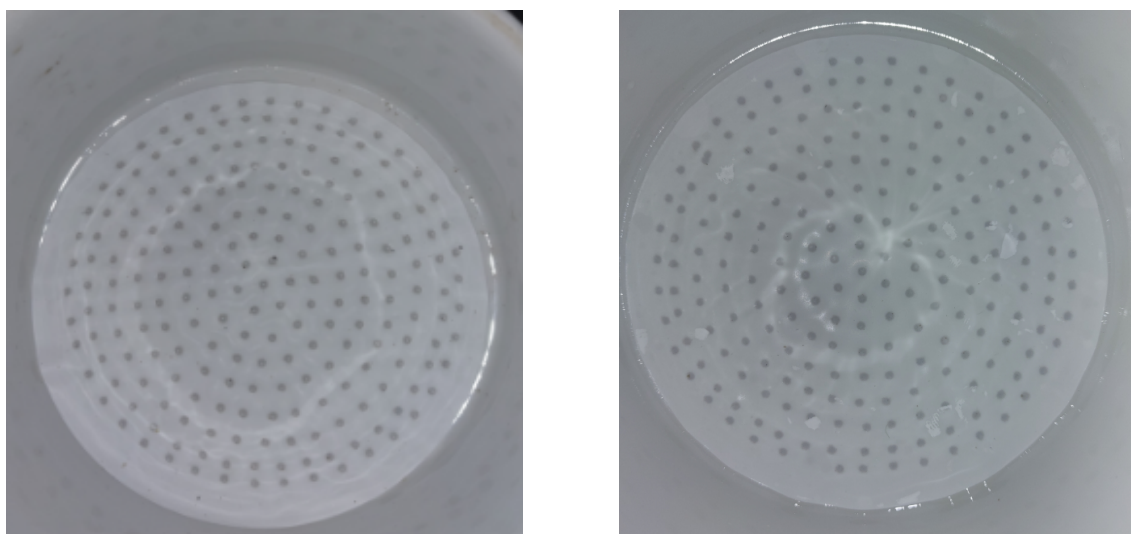
RESULTATEN CARBOPLUS

In totaal zijn er twee bepalingen gedaan, resp. bepaling 1-12 en bepaling 3-1 waarvan de uitkomsten hieronder zijn weergegeven. In de figuren is er een bepaalde mate van verkleuring te zien op het witte filterpapier. De bepaling van 1-12 geeft een sterkere grijskleuring af. Deze grijskleuring lijkt op het eerste gezicht op actief kool maar dit is daadwerkelijk uitgespoeld biologisch materiaal. Het resultaat met de meeste verkleuring van de bepaling van 1-12 en 3-1 zijn te zien in Figuur 32 en Figuur 33. De overige figuren van de bepalingen zijn in de bijlage geplaatst.

FIGUUR 32 LINKS FOTO BEPALING 1-12 (1000ML) MET DE STERKSTE VERKLEURING VAN DEZE BEPALING. RECHTS FOTO VAN IJKREEKS MET UITSPOELING VAN 0,18MG/L



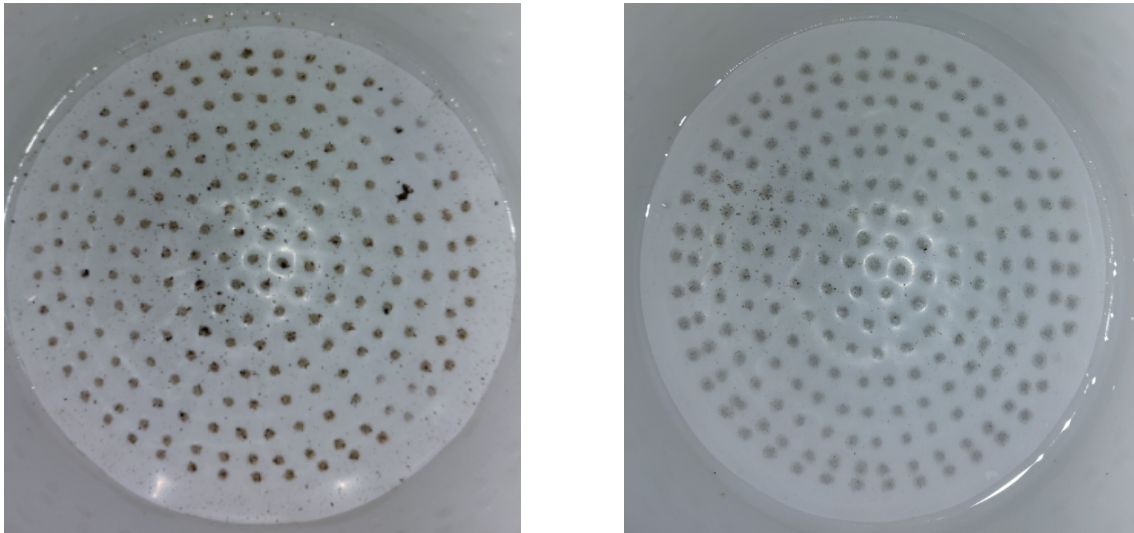
FIGUUR 33: LINKS: BEPALING 3-1 (1000ML) MET DE STERKSTE VERKLEURING VAN DEZE BEPALING. RECHTS: FOTO VAN IJKREEKS MET UITSPOELING VAN 0,125MG/L



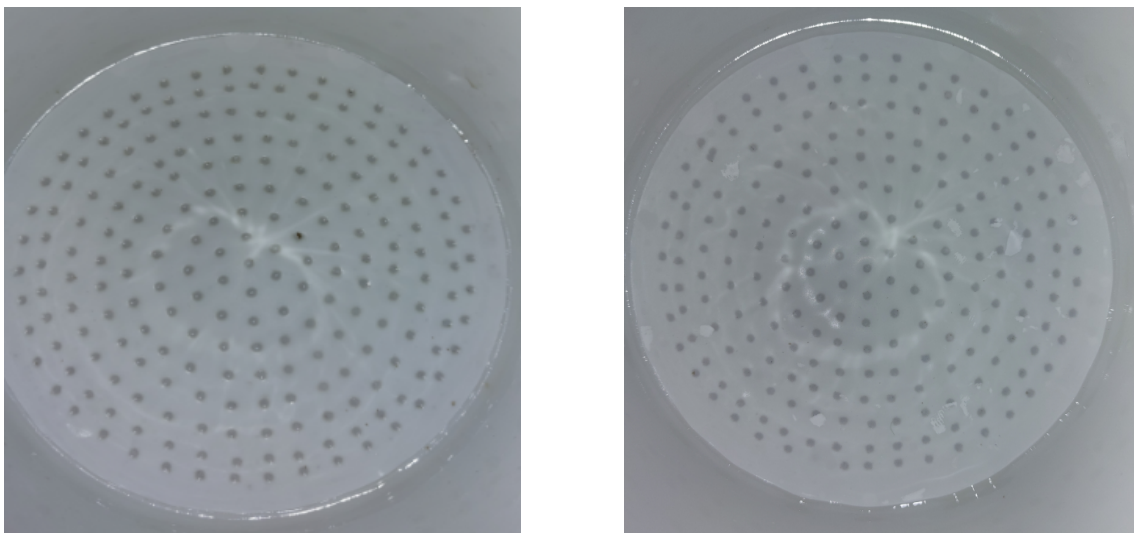
RESULTATEN DYNACARBON

De resultaten van de bepalingen van de Dynacarbon pilot zijn hieronder weergegeven. Bij de bepaling van 1-12 is, net als bij de Carboplus pilot bepaling, er een sterkere grijskleuring zichtbaar. Hierbij geldt eveneens dat het om biologisch materiaal gaat. De resultaten met de sterkste verkleuring van de bepaling van 1-12 en 3-1 zijn naast de foto's van de ijkreeks gelegd die het meest overeenkomen met de betreffende foto's, zie Figuur 34 en Figuur 35.

FIGUUR 34 LINKS: FOTO BEPALING 1-12 (1000ML) MET DE STERKSTE VERKLEURING VAN DEZE BEPALING. RECHTS: IJKREEKS MET UITSPOELING VAN 0,13MG/L



FIGUUR 35 LINKS: BEPALING 3-1 (1000ML) MET DE STERKSTE VERKLEURING VAN DEZE BEPALING. RECHTS: IJKREEKS MET UITSPOELING VAN 0,125MG/L



BIJLAGE X

BOUWKOSTEN

SPECIFICATIE BOUWKOSTEN CARBOPLUS

TABEL 25 BOUWKOSTEN VOOR DE CARBOPLUS-INSTALLATIE (AANGELEVERD DOOR STEREAU)

Discipline	Directe bouwkosten	€
WTB	Ruw water tank apparatuur (pompen, kleppen, flowmeters en niveausensoren)	87.000
WTB	Carboplus apparatuur (interne delen, kleppen, flowmeters, niveausensoren, air suppressors, pompen en proces instrumentatie)	269.000
WTB	Actief kool doseersysteem en opslag	83.000
WTB	Spoelwater tank apparatuur (pompen, kleppen, flowmeters en niveausensoren)	11.000
WTB	Overige apparatuur (utiliteiten en veiligheidsapparatuur)	68.000
WTB	Leidingwerk en installatie op site	374.000
E&I	Schakelpanelen, bekabeling en lokale besturing	223.000
PA	Procesautomatisering	100.000
C	Grondwerk, betonconstructie en bewapeningsstaal	486.000
C	Grondverbetering	85.000
	Totaal directe bouwkosten zonder opties	1.786.000
C	Optioneel gebouw voor bedieningsruimte	48.000
C	Extra ruw water tank (pomptank in geval van retrofit bestaande zuivering)	96.000
C	Spoelwatertank (in geval dat dit gebufferd dient te worden)	54.000

SPECIFICATIE BOUWKOSTEN DYNACARBON

TABEL 26 BOUWKOSTEN DYNACARBON-INSTALLATIE (VOLGENS BIO-GAK, BRON STOWA 2022-11)

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